**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**

***Trabajo Fin de Grado***

# ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE FIBRAS ÓPTICAS PARA SU APLICACIÓN EN UN SISTEMA SENSOR DISTRIBUIDO DE TEMPERATURA BASADO EN RAMAN

**(Study of the behaviour of optical fibers for application in a system distributed temperature sensor based on Raman)**

**Para acceder al Título de**

***Graduado en***

***Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación***

**Autor: Ana Rincón Castanedo**

**Marzo - 2019**

E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACION

# GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

CALIFICACIÓN DEL TRABAJO FIN DE GRADO

**Realizado por:** Ana Rincón Castanedo

**Director del TFG:** María Ángeles Quintela Incera

**Título:** "Estudio del comportamiento de fibras ópticas con la temperatura para su aplicación en un sistema sensor distribuido de temperatura basado en Raman"

**Title:** "Study of the behaviour of optical fibers for application in a system distributed temperature sensor based on Raman"

**Presentado a examen el día:** 22 de Marzo de 2019

para acceder al Título de

**GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN**

Composición del Tribunal:

Presidente (Basterrechea Verdeja, José):

Secretario (Quintela Incera, María Ángeles):

Vocal (Quintela Incera, Antonio):

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de: .....

| | |
|---|---|
| Fdo.: El Presidente | Fdo.: El Secretario |
| Fdo.: El Vocal | Fdo.: El Director del TFG<br>(sólo si es distinto del Secretario) |
| Vº Bº del Subdirector | Trabajo Fin de Grado Nº<br>(a asignar por Secretaría) |

# *Agradecimientos*

A mi profesora y tutora del proyecto, María Ángeles Quintela por sus consejos y apoyo en este trabajo para que pudiera salir adelante.

A Ismail Laarossi por su tiempo y ayuda en el laboratorio, estoy muy agradecida por ello.

A todos los miembros del Departamento de Ingeniería Fotónica por su compañía en tantas horas de laboratorio.

Por supuesto, a mis padres, Luis Rincón y Natividad Castanedo por apoyarme en todas mis metas personales, confiar y creer en mí en todo momento.

A mis hermanas, Lucía, Natividad, Cecilia y Gema Rincón, por todos los momentos de felicidad que me aportan y por no dejarme rendirme nunca.

A mis amigas y amigos, tanto de Bezana como de Astillero, que son muchos, por todos los buenos momentos y consejos que me brindaron durante esta etapa.

Y por último pero no menos importante, a mi apoyo incondicional, mi pilar, mi casa, mi refugio y mi paz, mi chico Pablo Rioz Martínez, por todo lo que me aportas y enseñas cada día, tu cariño, tu atención y tu fe en mí, siempre. Por aguantar y vivir conmigo tanto los buenos como los malos momentos vividos durante toda mi carrera. Por creer en mí siempre.

Esto es también gracias a ti.

# *Estudio del comportamiento de fibras ópticas para su aplicación en un sistema sensor distribuido de temperatura basado en Raman*

## Resumen

El gran desarrollo experimentado por los sensores de fibra óptica en los últimos años los han llevado a ser muy atractivos en ciertas aplicaciones industriales pudiendo competir con los tradicionales sensores eléctricos y electrónicos.

Si además hacemos uso de la fibra óptica, herramienta potencialmente usada en varios campos y sectores, como sensor a la propia fibra, teniendo gran cantidad de ventajas, por el mero hecho de ser la propia fibra la que realiza la medida. En este proyecto, haremos un estudio del comportamiento y de la atenuación de diferentes tipos de fibras de altas temperaturas haciendo uso del sensado distribuido mediante la técnica de Raman. El objetivo principal es el estudio del comportamiento de las fibras ópticas recubiertas de Oro, Cobre, Aluminio y Polyimida a altas temperaturas, bajo las mismas condiciones y en tiempo de medida en el laboratorio breve. Mediante esta técnica, haremos un estudio de la atenuación, analizando las señales de Stokes y Anti-Stokes (fuertemente dependiente de la temperatura) y obteniendo la atenuación mediante la recta de estas señales en cada punto de medida de temperatura y teniendo como idea final, la de elegir una de las fibras de alta temperatura, dependiendo de las medidas resultantes de la atenuación y del comportamiento y propiedades de la fibra óptica, para así decidir cuál es la fibra más adecuada para las aplicaciones industriales de altas temperaturas mediante la técnica Raman.

Además de esto, se añadirán los errores en las medidas a causa de las micro curvaturas y macro curvaturas y se tendrán también en cuenta las posibles degradaciones de las fibras ópticas con la temperatura: oxidación, reacción con el silicio, pérdida de las propiedades mecánicas, atenuaciones a baja y alta temperatura y las pérdidas inducidas por hidrógeno.

Además de las medidas, en este trabajo, se realiza un estudio de la técnica mencionada de Raman, los tipos de fibras que se utilizan a altas temperaturas y sus limitaciones, las posibles degradaciones de las fibras, errores en las medidas, errores en las propias propiedades de las fibras y los montajes utilizados para llegar a tal fin.

Una vez realizadas las medidas de todas las fibras con ayuda de la Unidad de Interrogación Raman, se analizará la atenuación (si se puede) y sacaremos unas conclusiones y un estudio de cada tipo de fibra. Hay que destacar que cada una de las fibras ha sido medida bajo las mismas condiciones, en tiempos de medida muy breves y con ciclos de medida de alta y baja temperatura de forma brusca, para así, hacer la elección de la fibra más idónea.

# *Study of the behaviour of optical fibbers for application in a system distributed temperature sensor based on Raman*

## Summary

The great development experienced by fiber optic sensors in recent years has made them very attractive in certain industrial applications, being able to compete with traditional electrical and electronic sensors.

If we also use fiber optic, tool potentially used in various fields and sectors, as a sensor to the fiber itself, having many advantages, by the mere fact of being the fiber itself that makes the measurement. In this project, we will study the behavior and attenuation of different types of high temperature fibers using sensing distributed by the Raman technique. The main objective is the study of the behavior of the optical fibers coated with Gold, Copper, Aluminum and Polyimide at high temperatures, under the same conditions and at the time of measurement in the short laboratory. Using this technique, we will study the attenuation, analyzing the Stokes and Anti-Stokes signals (strongly dependent on temperature) and obtaining the attenuation by the line of these signals at each point of temperature measurement and having as a final idea, the choice of one of the high temperature fibers, depending on the measures resulting from the attenuation and the behavior and properties of the optical fiber, in order to decide which fiber is the most suitable for high temperature industrial applications using the Raman technique.

In addition to this, the errors in the measurements will be added due to the micro curvatures and macro curvatures and the possible degradations of the optical fibers will also be taken into account with the temperature: oxidation, reaction with the silicon, loss of the mechanical properties, attenuations at low and high temperature and losses induced by hydrogen.

In addition to the measurements, in this work, a study of the aforementioned technique of Raman, the types of fibers used at high temperatures and their limitations, the possible degradations of the fibers, errors in the measurements, errors in the own properties of the fibers and mounts used to achieve this purpose.

Once the measurements of all the fibers have been made with the help of the Raman Interrogation Unit, the attenuation will be analyzed (if possible) and we will draw conclusions and a study of each type of fiber. It should be noted that each of the fibers has been measured under the same conditions, in very short measuring times and with high and low temperature measurement cycles, in order to make the choice of the most suitable fiber.

# Índice General

*Introducción……..…….……11*

*Capítulo.1. Revisión de Sensado Distribuido……13*

*Capítulo.1.1. Fibra óptica como canal…….....……....13*

*Capítulo.1.2. Estructura de una fibra óptica……...14*

*Capítulo.1.3. Fibra óptica como sensor……...16*

*Capítulo.1.3.1. Estado del Arte…….…….……....16*

*Capítulo.1.3.2. ¿Qué es un sensor? …….…….……17*

*Capítulo.1.4. Sensores Distribuidos, Cuasi-Distribuidos y puntuales…….…….18*

*Capítulo.1.4.1. Sensores Distribuidos……....19*

*Capítulo.2. Fenómenos/Técnicas……...21*

*Capítulo.2.1. Descripción y prestaciones técnicos…….....21*

*Capítulo.2.2. Ventajas e inconvenientes…….....23*

*Capítulo.2.3. Aplicaciones de los sensores distribuidos…….....24*

*Capítulo.3. Teoría del Sensado distribuido Raman……..25*

*Capítulo.3.1. Teoría clásica de la técnica Raman……....25*

*Capítulo.3.2. Tipos de fibra para Altas Temperaturas……27*

*Capítulo.3.3. Degradación a altas temperaturas……..37*

*Capítulo.3.4. Pérdidas inducidas por el hidrógeno……..38*

*Capítulo.3.5. Cable de Fibra Óptica de Altas temperaturas en la actualidad……...39*

*Capítulo.4. Procedimiento de medida……40*

*Capítulo.4.1. Objetivos……..40*

*Capítulo.4.2. Dispositivos de medida…….……...40*

*Capítulo.4.3. Preparado de las fibras…….……..42*

*Capítulo.5. Medidas experimentales de las Fibras ópticas con la Temperatura……..……..……....44*

*Capítulo.5.1. Objetivos de medida…….……....44*

*Capítulo.5.2. Montaje para medidas…….……....44*

*Capítulo.5.3.Características técnicas de la Unidad de Interrogación.....46*

*Capítulo.5.4. Cálculo independiente de Δα…….48*

*Capítulo.5.5. Puntos de referencia vs Secciones de referencia…..49*

*Capítulo.5.6. Procedimiento de Calibración…….....……...55*

*Capítulo.5.7.Procedimiento de Calibración de fibras metálicas……....55*

*Capítulo.5.8. Atenuaciones…….…….....58*

*Capítulo.5.9. Matlab: Script y Figuras…….....60*

*Capítulo.6. Conclusiones y líneas futuras…….69*

*Bibliografía……..70*

# Índice de Figuras

*Figura.1.1 Funcionamiento de una fibra óptica……..13*

*Figura.1.2.1 Reflexión total interna de una fibra óptica……..14*

*Figura.1.2.2 Estructura de una fibra óptica……..14*

*Figura.1.2.3 Atenuación de una fibra óptica y representación de las diferentes ventanas……..16*

*Figura.1.4.1 Esquema sensor local / puntual…….....18*

*Figura.1.4.2 Esquema sensor cuasi- distribuido o multipunto……18*

*Figura.1.4.3 Esquema sensor distribuido……..19*

*Figura.1.4.1.1 Tipos de sensores distribuidos de Fibra Óptica……....20*

*Figura.1.4.1.2 Frecuencias de Rayleigh, Brillouin y Raman……..20*

*Figura.2.1.1 Proceso de generación de los 2 tipos de dispersión: elástica (Rayleigh) e inelástica (Raman y Brillouin)……21*

*Figura.2.1.2 Proceso de generación dela dispersión Raman: a) Dispersión Stokes, b) Dispersión Anti-Stokes……...22*

*Figura.3.1.1 Las diferentes posibilidades de una luz dispersada: Dispersión Rayleigh, Dispersión Stokes (las moléculas absorben energía), Dispersión Anti-Stokes (las moléculas pierden energía)…..26*

*Figura.3.1.2 Diagrama de Sensado Distribuido de Temperatura de Raman basado en la técnica OTDR……...27*

*Figura.4.2.1 Horno utilizado para las pruebas……40*

*Figura.4.2.2 Cable "Pigtail"……..40*

*Figura.4.2.3 Unidad de Interrogación Raman……41*

*Figura.4.2.4 Fusionadora……..41*

*Figura.4.2.5 Corta fibras……...41*

*Figura.5.2.1.1 Montaje medida Fibra de Oro y Cobre……45*

*Figura.5.2.1.2 Montaje medida Aluminio y Polyimida……....46*

*Figura.5.3.1 Editor de Configuración. Software DTS Configurator..47*

*Figura.5.5.1 Página principal Asistente de Calibración…….49*

*Figura.5.5.2.Editor de Configuración: Ajuste de índices y longitudes.....50*

*Figura.5.5.3 Paso 1: Elegir fuente de datos……..50*

*Figura.5.5.4 Paso 1a: Elegir tiempos de medición……...51*

*Figura.5.5.5 Traza del rastro seleccionado……..51*

*Figura.5.5.6 Paso selección del tipo de calibración……..52*

*Figura.5.5.7.Ajuste radio de atenuación o rastro de temperatura constante……..53*

*Figura.5.5.8.Ajuste de temperatura actual y zona de temperatura constante…….....53*

*Figura.5.5.9 Paso final de Calibración……....54*

*Figura.5.9.1 Medida de temperatura de las fibras de Oro y Cobre (hasta 450 grados) y Aluminio y Polyimida (hasta los 400 grados) frente a la distancia total del montaje……..…….60*

*Figura.5.9.2 Medida de la temperatura de las fibras de Oro y Cobre (hasta 450 grados) y Aluminio y Polyimida (hasta los 400 grados) dentro del horno en relación con la longitud de la fibra dentro..……...61*

*Figura.5.9.3 Señales AS de cada tipo de fibra dentro y fuera del horno……...……62*

*Figura.5.9.4 Medida de la señal AS de las fibras de Oro y Cobre (hasta 450 grados) y Aluminio y Polyimida (hasta los 400 grados) dentro del horno en relación con la longitud de la fibra dentro……63*

*Figura.5.9.5 Medida de la temperatura de las fibras de Oro y Cobre (hasta 450 grados) y Aluminio y Polyimida (hasta los 400 grados) dentro del horno en relación con la longitud de la fibra dentro……..64*

*Figura.5.9.6 Medida de la señal S de las fibras de Oro y Cobre (hasta 450 grados) y Aluminio y Polyimida (hasta los 400 grados) dentro del horno en relación con la longitud de la fibra dentro……..65*

*Figura.5.9.7 Pérdidas por curvatura en la fibra…….……..66*

*Figura.5.9.8 Errores y varianzas de cada fibra……66*

*Figura.5.9.9.Temperatura real frente a la Temperatura Teórica…….....67*

*Figura.5.9.10.Figuras izq.: Oro (azul) y Cobre (naranja), dcha.: Aluminio (azul) y Polyimida (naranja)…….68*

## Índice de Tablas

*Tabla 2.2.1. Principales diferencias entre Raman y Brillouin…….23*

*Tabla 3.2.1. Características Fibra de Oro……..29*

*Tabla 3.2.2. Características Fibra de Aluminio…….……..31*

*Tabla 3.2.3. Características Fibra de Cobre……33*

# *Índice de Ecuaciones*

***Ecuación 2.1……..22***

***Ecuación 3.3……..37***

***Ecuación 5.3……..46***

***Ecuación 5.4……..47***

***Ecuación 5.5……..47***

***Ecuación 5.6……..47***

***Ecuación 5.7……..48***

***Ecuación 5.8……..48***

***Ecuación 5.9……..48***

***Ecuación 5.10……...55***

***Ecuación 5.11……...55***

***Ecuación 5.12……...56***

***Ecuación 5.13……...56***

***Ecuación 5.14……...57***

***Ecuación 5.15……...58***

***Ecuación 5.16……...58***

***Ecuación 5.17……...58***

***Ecuación 5.18……...58***

***Ecuación 5.19……...58***

***Ecuación 5.20……...58***

***Ecuación 5.21……...58***

***Ecuación 5.22……...58***

***Ecuación 5.23……...58***

*Ecuación 5.24*……...*59*
*Ecuación 5.25*……...*59*
*Ecuación 5.26*……...*59*
*Ecuación 5.27*……...*59*
*Ecuación 5.28*……...*67*

## *Acrónimos y Palabras Clave*

- **APD – Fotodiodo de Avalancha**
- **DTS – Sensor Distribuido de Temperatura**
- **EPI – Equipo de Protección Individual**
- **FO – Fibras Óptica**
- **NA – Apertura Numérica**
- **OFS – Optical Fiber Sensor**
- **OTDR – Reflectometría Óptica en el dominio del Tiempo**

# *Introducción*

El fenómeno de la transmisión de la luz a través de elementos de fibra, esencialmente de sílice y materiales plásticos muy procesados, ha significado un avance sustancial en la transmisión de información a largas distancias y en condiciones de entorno severas: instalaciones submarinas a grandes profundidades, obra civil, prospecciones geológicas, ambientes radiactivos, etc.

En la década de los años sesenta y setenta el avance de la tecnología láser y de estas fibras llevó a un auge en la utilización para la transmisión de datos. Posteriormente la mejora de los dispositivos láser, su potencia luminosa y la electrónica asociada, abrió la posibilidad de su utilización en el campo de monitorización de parámetros físicos a largas distancias (sensores ópticos). Características como: baja atenuación, alta velocidad de transmisión, inmunidad a las interferencias electromagnéticas, pequeño tamaño y peso, flexibilidad, alto punto de fusión y posibilidad de multiplexado, hacen de las fibras ópticas, dispositivos óptimos para las aplicaciones de transmisión de datos y medida remota.

El campo de aplicación de las fibras ópticas es muy amplio y aumenta día a día. Algunos de los campos de aplicación de las fibras ópticas son: Medicina, Iluminación, Aplicaciones Militares, Arqueología, Telecomunicaciones, Transporte y Sensores. Dentro del campo de los sensores, tenemos los sensores de temperatura, con aplicaciones como detección de fugas, monitorización de zonas industriales, gaseoductos, perforaciones, etc.

En cuanto a las aplicaciones de medida remota, los sensores basados en fibras ópticas se pueden clasificar de forma general en: Puntuales, Cuasi-Distribuidos ó Distribuidos. Esencialmente las medidas distribuidas se basan en fenómenos de dispersión óptica y las medidas puntuales en fenómenos de refracción óptica; esto condiciona el diseño de estos sensores.

El objeto de este trabajo es el estudio de diferentes fibras ópticas para sensores distribuidos de temperatura basados en la dispersión por efecto Raman, en condiciones de alta temperatura y así tener un estudio completo y general del comportamiento de estas en dichas condiciones y la posibilidad de elegir bajo los estudios realizados de las diferentes fibras a altas temperaturas, la fibra que mejor se adapte a futuros proyectos y/o aplicaciones industriales. En la actualidad es más bien escaso el conocimiento del cual se dispone sobre este tema de sensores de fibra óptica para altas temperaturas mediante la dispersión por efecto Raman.

Para tal fin, el trabajo se ha organizado en seis partes fundamentales tal y como se detalla a continuación:

En el primer capítulo se da una visión general sobre la importancia de los sensores, las fibras ópticas y el sensado distribuido. También se especifican las diferencias entre los dos fenómenos de dispersión inelástica: Raman y Brillouin.

En el segundo capítulo se introduce la teoría del sensado distribuido por efecto Raman así como los fenómenos de Rayleigh y Brillouin y las técnicas utilizadas. Aclarando los fenómenos que ocurren y los posibles problemas a la hora de utilizar esta técnicas.

En el tercer capítulo, se define la teoría clásica de Raman y el sensado distribuido mediante esta técnica. Se analizan los tipos de fibras para alta temperatura dando sus características técnicas más relevantes. Se realiza también un estudio de

estos tipos de fibras, así como sus posibles degradaciones frente a temperaturas muy elevadas.

En el cuarto capítulo se resume el procedimiento que se debe llevar a cabo para la medida de la atenuación en las fibras. Los objetivos firmes de este proyecto además de presentar los procedimientos a seguir y los dispositivos para la medida de la atenuación así como la preparación de las fibras para su posterior montaje.

En el quinto capítulo se presentan las medidas experimentales realizadas en el laboratorio de las fibras a alta temperatura con datos reales y conclusiones breves sobre la clasificación respecto de la atenuación que presentan las diferentes fibras a estudiar, así como las características técnicas de la Unidad de Interrogación, los montajes de medida y los procedimientos de calibración.

En el sexto y último capítulo, se presentan las conclusiones finales, determinando qué tipo de fibra es la más adecuada, cuál tiene menos pérdidas y cuál sería la menos adecuada en torno a la atenuación. Además se mencionan posibles líneas futuras sobre este estudio o sus posibles mejoras a la hora de trabajar con este tipo de fibras a altas temperaturas.

# *Capítulo I*

# *Revisión de Sensado Distribuido*

## 1.1 Fibra Óptica como canal

En las últimas décadas la fibra óptica se ha convertido en un elemento clave en los sistemas de comunicación. Una gran ventaja es su inmunidad a campos eléctricos y obviamente es muy importante su bajo coeficiente de atenuación, de aproximadamente 0.2 dB/Km [8].

La fibra óptica es un filamento de vidrio de alta pureza, sumamente delgado (similar al diámetro de un cabello humano, de 2 a 125 micras), flexible y extremadamente compacto. Tiene un alto grado de confiabilidad debido a que son inmunes a las interferencias electromagnéticas de radio-frecuencia. Están fabricadas a altas temperaturas con base en silicio y en su proceso de elaboración es controlado por medio de computadoras, para permitir que el índice de refracción de su núcleo, que es la guía de la onda luminosa, sea uniforme y evite modificaciones en su comportamiento. Son ideales para incorporarse en cables junto con otros componentes conductivos debido a que no transportan señales eléctricas y por tanto, pueden usarse conjuntamente con conductores de alta tensión. Tienen un gran ancho de banda, que puede ser utilizado para incrementar la capacidad de transmisión con el fin de reducir el coste por canal.

El funcionamiento de la fibra óptica consiste básicamente en la emisión de luz mediante un emisor (ejemplo: diodo láser), la cual entra en el núcleo de la fibra, que suele ser de plástico o cristal, envuelto por una cubierta con un índice de refracción menor que el del núcleo, ocasionando el fenómeno de reflexión total interna, facilitando que la luz viaje por el interior de la fibra, guiando las señales luminosas con muy bajas pérdidas a través de largas distancias.

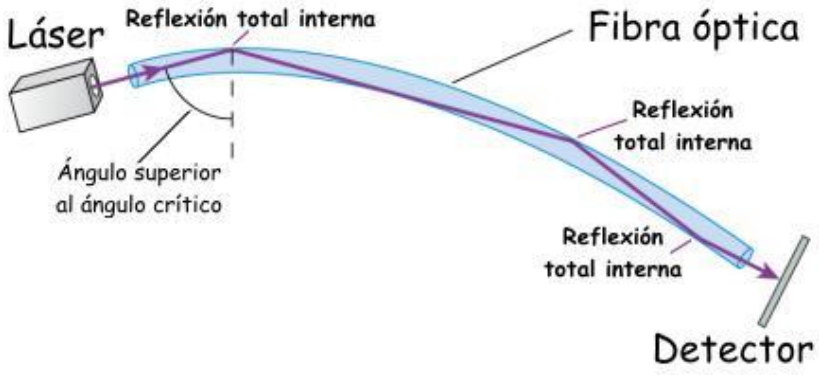



*Figura 1.1. Funcionamiento de una fibra óptica*

## 1.2 Estructura de una fibra óptica

Una fibra óptica tiene un núcleo de vidrio con un índice de refracción $n_1$, mayor al índice de refracción $n_2$ de la capa del material que lo rodea, llamado cubierta o revestimiento. Esto da lugar al fenómeno de la reflexión total interna entre los medios de diferentes índices de refracción.

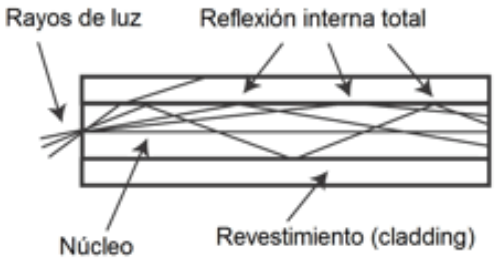



*Figura 1.2.1. Reflexión total interna en una fibra óptica*

- El *núcleo*: es el medio físico que transporta las señales ópticas de datos desde la fuente de luz al dispositivo de recepción. Consiste en una fibra de vidrio ultra-puro de diámetro muy pequeño. Cuanto mayor es el diámetro del núcleo, mayor es la cantidad de luz que puede transportar.
  Los tres tamaños de diámetro más usuales son: 50 µm, 62.5 µm y 100 µm.

- El *revestimiento o cubierta*: rodea el núcleo y tiene un índice de refracción distinto, de forma que actúa como capa reflectante y consigue que las ondas de luz que intentan escapar del núcleo sean reflejadas y retenidas en el núcleo, gracias al fenómeno de reflexión total interna mostrado en la Figura *1.2.1*.

- El recubrimiento o *cubierta protectora*: material que tiene la función de proteger a la fibra óptica. Añade varias capas de plástico con el fin de proteger la fibra contra las curvaturas excesivas y proporcionarla resistencia mecánica.

$$n_{núcleo} > n_{revestimiento}$$

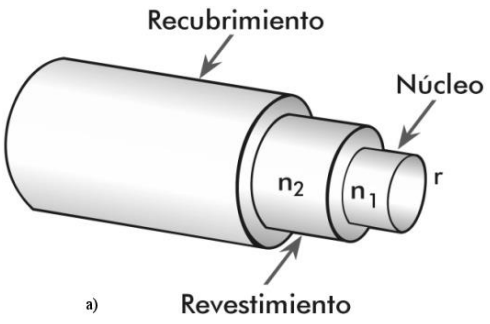



*Figura 1.2.2. Estructura interna de una fibra óptica*

Un parámetro importante para cualquiera de los tipos de fibras ópticas es la atenuación. Se define como la disminución de potencia de la señal óptica y se expresa en $dB/Km$, que es la pérdida de potencia del rayo de luz en $dB$, en un $Km$ .

Los principales factores que influyen en la atenuación son:

- *Pérdidas por absorción*: las impurezas del material absorben la luz y la transforman en calor. La principal fuente de absorción son los residuos de iones de hidroxilo (OH+) y de dopantes que se utilizan para modificar el índice de refracción del vidrio.
  Esta absorción ocurre a longitudes de onda independientes, determinadas por los elementos que absorben la luz. La absorción de OH+ predomina y ocurre más notoriamente en las longitudes de: 1000 nm, 1400 nm y por encima de 1600 nm.

- *Pérdidas por dispersión*: la luz choca con los átomos individuales en el vidrio.
  La luz que se dispersa en los ángulos que estén fuera de la apertura numérica, que indica la capacidad para recoger la luz de la fibra, se absorberá en el revestimiento o se reflejará hacia la fuente. Existen dos tipos de pérdidas por dispersión: las no lineales, en las cuáles existe un cambio, un incremento en la potencia de entrada lo que hace que haya también un incremento proporcional en la potencia de salida (Raman y Brillouin); o las lineales, en las cuáles se transfiere parte de la potencia contenida en un modo de propagación a otro modo de forma lineal (proporcional a la potencia del modo) (Rayleigh y Mie).

Un parámetro esencial de las fibras ópticas es la ventana de trabajo. Cuando hablamos de ventanas de trabajo nos referimos a las distintas frecuencias que utilizamos para transmitir el haz de luz, es decir, la longitud de onda central de la fuente luminosa que utilizamos para transmitir la información a lo largo de la fibra. Las posibilidades de utilizar una ventana de trabajo u otra llevará consigo la aparición de parámetros diferentes de atenuación, que influirán de modo diferente en la señal transmitida a lo largo de la fibra.

Las ventanas de trabajo se clasifican en:

- Primera ventana a $850\ nm$ .
- Segunda ventana a $1300\ nm$ .
- Tercera ventana a $1550\ nm$ .

La atenuación es mayor si trabajamos en primera ventana y menor si lo hacemos en tercera. El hecho de que se suela utilizar la primera ventana en la transmisión de una señal es debido al menor coste de las fuentes luminosas utilizadas, al ser tecnológicamente más simple su fabricación.

La longitud de onda en la que se trabaja influye en gran medida en la atenuación como se puede ver a continuación:

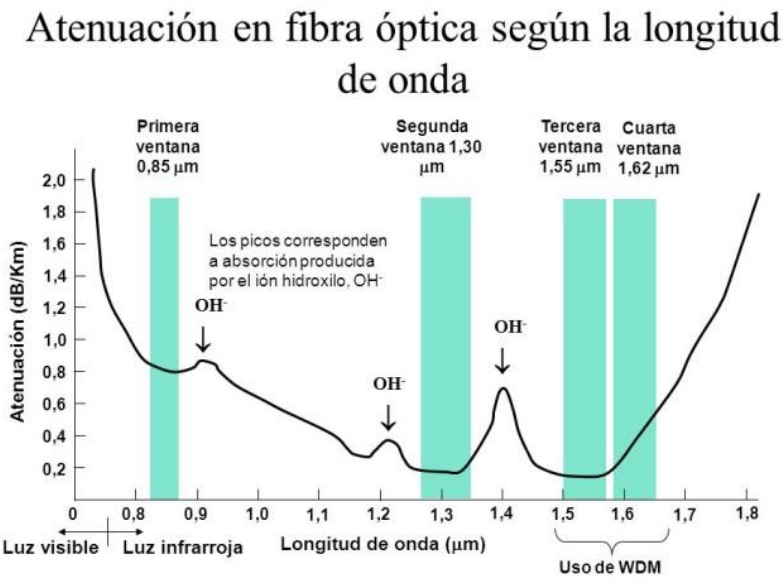



*Figura 1.2.3. Atenuación de una fibra óptica y representación de las diferentes ventanas*

En la Figura *1.2.3* puede observarse que la segunda y tercera ventana están separadas por un pico de atenuación. Este pico es causado por la absorción de OH, que explicaremos más adelante. La ventana con menor atenuación es la tercera con un valor de $0.2\,dB/Km$. Razón por la cual, esta ventana sea la más utilizada en los sistemas de telecomunicación.

## 1.3 Fibra óptica como Sensor

### 1.3.1 Estado del Arte

La necesidad de medir ha sido esencial para el avance de la civilización. La limitada capacidad de nuestros sentidos nos ha llevado al diseño de "sensores" que superaran nuestras intrínsecas limitaciones. También ha sido necesario dotar de "sentidos" a las máquinas que construimos para aumentar nuestra fuerza, potencia, velocidad.

En la actualidad, existe un sinfín de aplicaciones en las que los sensores tienen un papel fundamental, como por ejemplo en cadenas de montaje de coches, plantas de generación eléctrica, control remoto, sistemas incorporados en el hogar (domótica), o detección de irregularidades en parámetros médicos.

A día de hoy, la mejora tanto en el diseño de sensores basados en semiconductores, como en fibras ópticas; así como, en el ahorro de costes debido a la mejora tecnológica, está provocando un significativo incremento en la productividad y la relevancia de estos sensores en la industria.

Una de las más importantes tecnologías impulsoras de los sistemas sensores desde hace unos años hasta ahora, es el uso de las fibras ópticas en el ámbito sensorial, fuera de su uso primario que es el campo de las comunicaciones. Este trabajo se centra en el comportamiento de las fibras ópticas como sensores, para determinar una serie de parámetros de la fibra y su entorno, esenciales para su caracterización.

### 1.3.2 ¿Qué es un sensor?

Se define sensor como todo aquel dispositivo que tiene una propiedad sensible a una magnitud del medio, de tal manera que al variar esta magnitud también lo hará con cierta intensidad la propiedad. En otras palabras manifiesta la presencia de dicha magnitud y también su valor (medida).

La resolución de un sensor se define como el menor cambio en la magnitud de entrada que produce un cambio observable en la magnitud de salida. Por otro lado, la precisión se corresponde con el máximo error esperado en la medida. La precisión con la que las fibras ópticas aportan información acerca de cambios en las estructuras o procesos dan valor a la utilización de la fibra óptica como sensor.

La resolución puede ser de menor valor que la precisión. Por ejemplo, si al medir una distancia la resolución es de 0,01 mm, y la precisión es de 1 mm, entonces podrán observarse variaciones en la distancia medida de 0,01 mm, pero no puede asegurarse que haya un error de medición menor a 1 milímetro.

Dentro del mundo óptico, los sensores de fibra óptica (OFS, Optical Fiber Sensor) tienen importantes ventajas sobre los sensores eléctricos y los voluminosos sensores ópticos.

- Pequeño tamaño y peso, lo que les hace muy fáciles de manipular y trabajar con ellos.
- Inmunes a cualquier interferencia electromagnética o de radiofrecuencia además de estar a prueba de agua y humedad.
- Capacidad de detección distribuida como la de multiplexación, además de un gran ancho de banda y sensibilidad.
- Medidas de gran distancia.

Hay varios campos de aplicación para los sensores de fibra óptica como telecomunicaciones, biomedicina, militares, arqueología, etc. Vamos a centrarnos en este momento, en los sensores de temperatura ya que son parte fundamental del proyecto.

Los sensores de temperatura distribuida pueden implementarse con éxito en múltiples segmentos industriales como: Detección de fugas en diques y presas, vigilancia en hornos industriales de inducción, detección de incendios en túneles, cintas transportadoras y edificios de especial peligro de incendio, monitorizado de temperatura en plantas y procesos de ingeniería, detección de agua subterránea, perfiles de temperatura en un eje de la mina y sobre lagos y glaciares, etc.

## 1.4 Sensores Distribuidos, Cuasi-distribuidos y Puntuales

Si hacemos una clasificación o distinción de los sensores en relación a la dependencia que tienen de la posición en la fibra en la que se detecte el parámetro físico a medir, podemos distinguir entre: Sensores locales/puntuales, sensores cuasi-distribuidos y sensores distribuidos.

Los sensores puntuales, se definen como aquellos que se utilizan para medir o sensar un parámetro físico en una zona concreta. Pueden estar basados en tecnologías de redes de difracción o interferometría óptica.

*Figura 1.4.1. Esquema sensor local / puntual*

Así mismo, se definen los sensores cuasi-distribuidos como aquellos en los que se conocen con precisión las posiciones en las que se miden esos parámetros físicos. Los sensores se "graban" sobre la propia fibra en posiciones indicadas por el usuario del dispositivo. Tienen la ventaja de poder multiplexar más de uno en una fibra óptica, lo que quiere decir que podemos medir en más de un lugar diferente, de forma simultánea, en una misma fibra óptica. Dentro de este tipo de sensores, destacan los sensores que basan su funcionamiento en redes de Bragg, estos se utilizan particularmente para medir temperatura y/o elongación y pueden ser empleados en sistemas de monitorizado de estructuras de obra civil, túneles, puentes, etc.

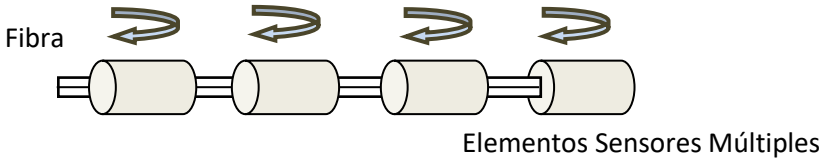



*Figura 1.4.2. Esquema sensor cuasi- distribuido o multipunto.*

Por último, los sensores de fibra óptica distribuidos, son aquellos en los que la medida del parámetro físico se puede realizar en cualquier punto a lo largo de la fibra. Si lo que se quiere es monitorizar los cambios de temperatura y tensión en grandes estructuras, estos sensores son los más aconsejables y adecuados. Estos sensores pueden llegar a abarcar grandes distancias, del orden de las decenas de kilómetros, con esto, se pueden tener un número bastante alto de puntos de medida dependiendo de la resolución espacial.

Estos sensores están basados en las dispersiones Rayleigh, Raman y Brillouin. Se pueden dividir en sistemas basados en dispersión lineal, como la dispersión de Rayleigh o los basados en la dispersión no lineal, como Raman o Brillouin.

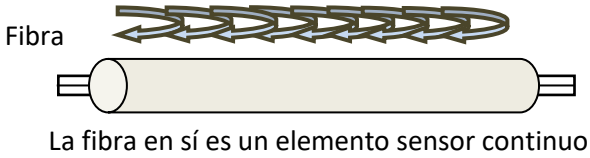



*Figura 1.4.3. Esquema sensor distribuido.*

En este proyecto, vamos a centraremos en los sensores distribuidos y en concreto los basados en efectos no lineales de scattering de Raman. A continuación se explican con más detalle los sensores distribuidos.

### 1.4.1 Sensores Distribuidos

Debido a la capacidad de estos sensores de abarcar grandes distancias, ya que la fibra actúa toda ella como sensor, los hace idóneos a la hora de ser utilizados para grandes infraestructuras y medir con cierta resolución espacial, los cambios que se hayan producido en la fibra (temperatura, tensión, etc).

El principio que siguen estos sensores de fibra óptica distribuidos es una modulación de la frecuencia o intensidad de la luz, causada por una perturbación externa. Al mismo tiempo se realiza una detección síncrona con la que se determina la posición en la que se produjo esa perturbación o cambio en la fibra. Igualmente, si en la estructura se produce cualquier daño o fisura esto da lugar a una variación en la intensidad o en la frecuencia de la luz que se transmitirá a lo largo de la fibra óptica.

Una vez realizadas las calibraciones pertinentes, estos sensores permiten la monitorización de cualquiera de los parámetros que afectan físicamente a la fibra, pudiéndose realizar esta monitorización en la posición o posiciones que se requiera o necesite a lo largo de toda la fibra. En función de la tecnología que se utilice se puede llegar a las decenas de kilómetros y a obtener una gran cantidad de puntos de medida.

En el siguiente cuadro se observan los tres tipos de sensores distribuidos y sus principales características o dependencias con los parámetros de Temperatura, Frecuencia, Intensidad o Tensión:

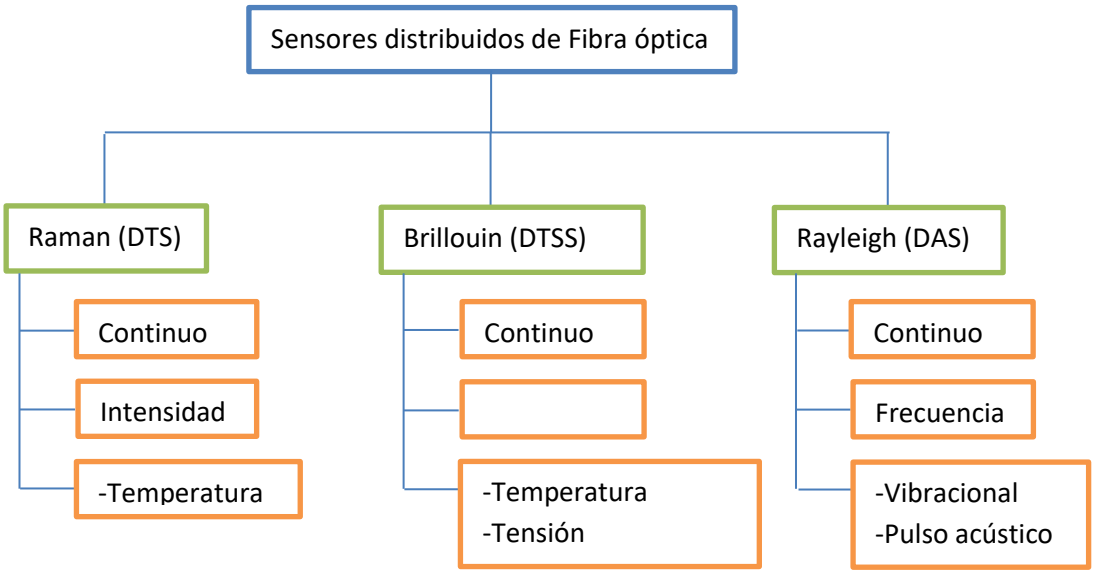



*Figura 1.4.1.1. Tipos de Sensores Distribuidos de Fibra Óptica*

La siguiente figura *1.4.1.2* muestra, conforme a la intensidad de la luz dispersada, los diferentes tipos de sensores distribuidos: elástica (Rayleigh) e inelástica (Raman y Brillouin). La señal central (Rayleigh) es una dispersión elástica, esto significa que no presenta cambios respecto a la luz incidente en su frecuencia. Después de ésta, aparecen las señales de dispersión inelástica (Brillouin) debido a que presenta cambios respecto de la luz incidente, con cambios de frecuencias por encima de la luz incidente, que se conocen como anti-Stokes o con cambio de frecuencias por debajo de la luz incidente que en este caso se conocen como Stokes. Análogamente, la siguiente señal (Raman), tiene también las dos frecuencias de Stokes y Anti-Stokes. Cabe destacar que la frecuencia de Brillouin Anti-Stokes tiene una fuerte dependencia con la temperatura y la tensión mecánica, y que la amplitud de la señal Raman Anti-Stokes tiene una fuerte dependencia con la temperatura.

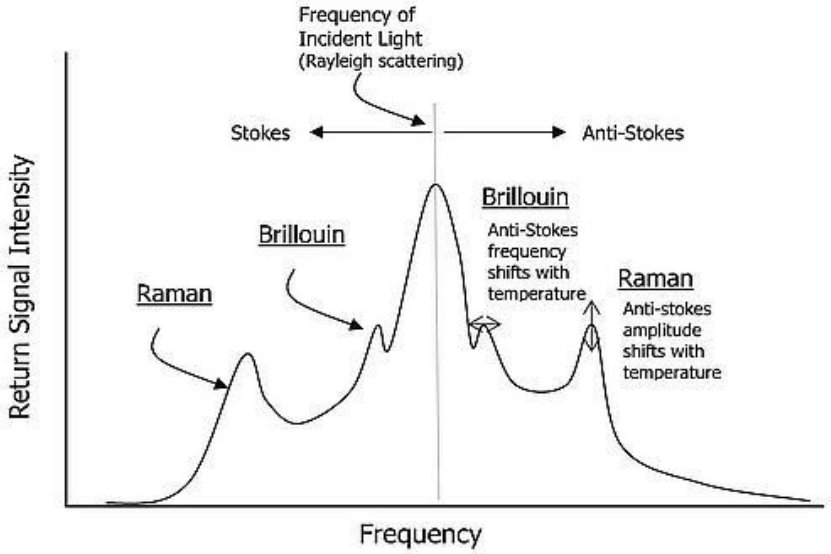



*Figura 1.4.1.2. Frecuencias de Rayleigh, Raman y Brillouin.*

# *Capítulo II*

# *Fenómenos / Técnicas*

## 2.1 Descripción y prestaciones técnicas

Una vez introducidos los aspectos básicos sobre Brillouin, Raman o Rayleigh, vamos a profundizar más en este tema, buscando una explicación de los fenómenos físicos que ocurren en las fibras ópticas. A diferencia de los procesos no lineales de tipo elástico, en los que no existe intercambio energético entre el campo electromagnético y el medio dieléctrico, en los procesos no lineales de tipo inelástico una parte de la energía de la onda incidente se cede al medio, originándose una onda de frecuencia diferente a la de la onda incidente, mientras que el resto de energía continua propagándose por la fibra.

Cuando una luz monocromática, un diodo láser, incide sobre una muestra suceden varios fenómenos:

1. La mayor parte de la luz pasa a través de la muestra; transmisión de la luz. No hay intercambio de energía entre los fotones incidentes y las moléculas de la muestra, por lo tanto, no hay dispersión.

2. Una pequeña parte de la luz se dispersa en todas las direcciones; se produce un intercambio de energía. Las diferencias de energía son iguales a las diferencias de los estados vibracionales. Se trata entonces de un choque elástico de los fotones con las moléculas. Por lo tanto, al conservarse la energía, el resultado es un fotón dispersado a la misma frecuencia $\nu$ que el incidente, como se puede observar en la figura *2.1.1*. A esta dispersión elástica se la conoce con el nombre de dispersión Rayleigh.

3. Una parte aún más pequeña de la luz se dispersa también en todas direcciones; el intercambio de energía que se produce provoca una diferencia de energía distinta a las diferencias entre estados. Se habla entonces de un choque inelástico de los fotones con las moléculas. El resultado es un fotón dispersado a una frecuencia distinta que la del incidente. Ésta dispersión inelástica se conoce con los nombres de dispersión Raman y dispersión Brillouin, y puede ser de dos tipos: Stokes y Anti-Stokes.

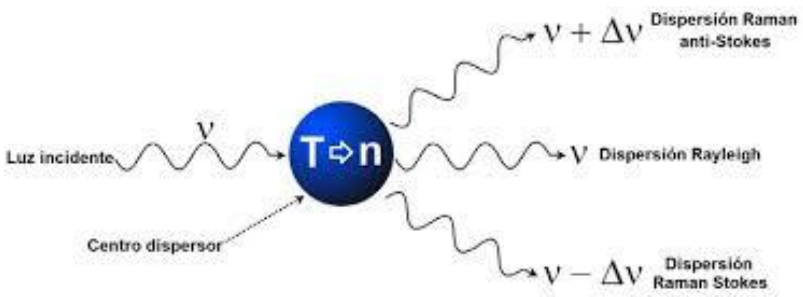



*Figura .2.1.1 Proceso de generación de los dos tipos de dispersión: elástica (Rayleigh) e inelástica (Raman y Brillouin).*

Existen dos efectos no lineales de tipo inelástico: el llamado "scattering Raman" y el llamado "scattering Brillouin". En ambos procesos (pueden tratarse desde un punto de vista mecánico-cuántico) la absorción de un fotón incidente por el medio para crear un fotón de menor energía que la que presenta el fotón incidente y un fonón. La diferencia entre estos dos efectos mencionados es la energía del fonón introducido en el proceso y por ello la diferencia de frecuencias entre el fotón incidente y el generado. En el caso del "scattering Raman" se encuentra involucrado un fonón óptico (frecuencia del orden de 10 THz), mientras que en el "scattering Brillouin" se encuentra involucrado un fonón acústico (frecuencia del orden de 10 GHz). En el siguiente apartado explicaremos de forma detallada el primero de los efectos no lineales de tipo inelástico, "scattering Raman".

En la dispersión Raman la energía total del sistema se conserva intercambiando la energía entre los fotones de bombeo por un lado, y los fotones dispersados y los fonones, en este caso, fonones ópticos, por otro lado. La energía de estos fotones es igual a la diferencia de energía que existe entre los modos de vibración del medio creando un cambio entre la luz dispersada y la luz incidente. Como ya hemos mencionado anteriormente cuando un fotón de bombeo incide sobre una molécula, ésta puede absorber o generar un fonón haciendo que su energía se sume o se reste a la energía del fotón de bombeo. Como consecuencia de esto, se dan origen a nuevas líneas en el espectro de la luz dispersada en frecuencias más altas y más bajas que la de bombeo. Estas frecuencias altas se denominan, líneas Stokes (menor energía) y las frecuencias bajas son las llamadas líneas Anti-Stokes (mayor energía).

Para explicar este fenómeno a continuación se ilustra con una imagen el proceso de generación:

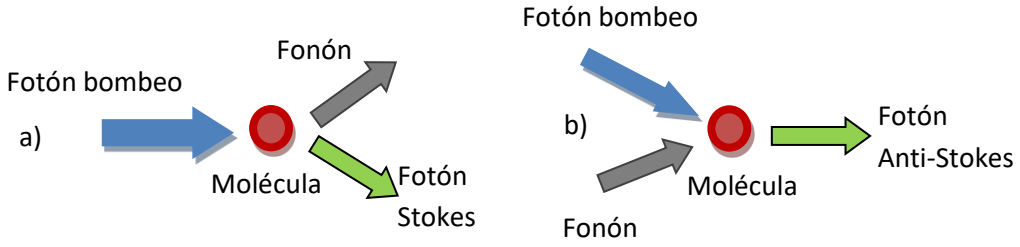



*Figura 2.1.2. Proceso de generación de la dispersión Raman; a) Dispersión Stokes, b) Dispersión Anti-Stokes.*

El desplazamiento en frecuencia se produce para ciertas frecuencias vibracionales características de las moléculas que componen el material donde se guía la luz. El desplazamiento en frecuencia de la dispersión Raman para sílice es de $\Delta f = 13.2\,THz$ [7], de la frecuencia del haz de bombeo. Esto puede ser descrito en términos de desplazamiento de longitud de onda como:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2 \Delta f}{c} \qquad \textit{Ecuación (2.1)}$$

## 2.2 Ventajas e inconvenientes

La dispersión por estimulación Raman es similar a la de Brillouin con la excepción que hemos visto en la figura del espectro donde la modulación que se produce es a mayor frecuencia. Las bandas de Raman están más alejadas de la frecuencia fundamental. La dispersión Raman puede ocurrir tanto en la dirección de la propagación como en la contraria.

El scattering de Brillouin suele ser un efecto indeseable en las comunicaciones por fibra óptica, ya que parte de la señal transmitida se puede ver dispersada y no llegar al detector. Para una misma fibra, el umbral de potencia a partir del cual se produce el efecto Raman es unos dos órdenes de magnitud mayor que para el efecto Brillouin. Este hecho surge como consecuencia de la mayor eficiencia del efecto Brillouin. Sin embargo, en el efecto Raman se puede producir en ambos sentidos, pero el proceso es más eficiente en el sentido co-propagante, ya que el umbral para este sentido es un 20% menor que para el sentido contra-propagante.

El efecto Brillouin está condicionado por la anchura espectral de línea, mientras que el efecto Raman es razonablemente independiente del ancho espectral de la fuente utilizada, siempre que éste no sea inferior a un valor de $\sim$ 0.5 nm. La onda Stokes para el efecto Brillouin sólo se propaga en sentido contra-propagante al sentido de la onda de bombeo.

Por tanto, la diferencia entre la dispersión Raman y Brillouin reside en los siguientes puntos [15]:

Desde el punto de vista cuántico, en la dispersión Raman el fotón incidente se transforma en otro fotón con una frecuencia distinta a la incidente y en un fonón óptico, mientras que en la dispersión de Brillouin, el fotón incidente se transforma en otro fotón con una frecuencia distinta a la incidente (y también distinta a la de Raman) y en un fonón acústico. Las frecuencias de los fonones acústicos se sitúan en el entorno de los 10 GHz, mientras que las debidas a los fonones ópticos están alrededor de los 10 THz (esto produce los desplazamientos en frecuencia de los fotones dispersados).

Respecto a las potencias para generar estos efectos, también hay diferencias. Mientras que para Raman necesitamos una potencia bastante elevada para Brillouin, sin embargo, necesitamos una potencia bastante inferior a la de Raman. Por ejemplo, una potencia típica de bombeo para Raman puede ser 440 mW, mientras que una potencia de bombeo para Brillouin está en torno a 4.2 mW.

Por último, las medidas de la temperatura y la tensión que se hacen con los sistemas sensores distribuidos son diferentes. En Brillouin, las mediciones se realizan utilizando el desplazamiento en frecuencia de la señal dispersada, mientras que para Raman se hace midiendo las variaciones en intensidad o amplitud. Estas mediciones se realizan sobre las ondas de Stokes y anti-Stokes.

En la siguiente tabla se presentan las características más interesantes de ambas técnicas:

| | Máxima longitud de la fibra | Resolución Espacial | Resolución de Temperatura | Tipo de Fibra | Rango dinámico | Unidad de lectura |
|---|---|---|---|---|---|---|
| RAMAN | Variable, ($\leq 20\ Km$) | $3m\ /50\ cm$ | $\pm\ 2\ °C\ a\ 0{,}1\ °C$ | Fibra multimodal Fibra mono modo | $3\ dB$ (Sensibilidad al cambio de atenuación) | Hasta 16 canales |
| BRILLOUIN | Variable, ($\leq 70\ Km$) | $De\ 1\ m\ a\ 10\ cm$ | $\pm 0{,}1\ \mu strain$[1] $(tensión)\ y\ 0{,}01\ °C$ | Fibra mono modo | $10\ dB$ ( no sensible al cambio de atenuación) | 1 o 2 canales |

*Tabla 2.2. Principales diferencias entre Raman y Brillouin.*

Como conclusión, para el proyecto presente de sensado distribuido de alta temperatura para el estudio de varios tipos de fibras, la tecnología óptima es RAMAN debido a que tiene una fuerte dependencia sólo con la temperatura, a diferencia de Brillouin que es sensible a la temperatura y al "strain". A continuación haremos una descripción y explicación del mismo de forma aún más detallada.

## 2.3 Aplicaciones de los sensores distribuidos

Como se ha descrito anteriormente, los sensores distribuidos tienen la ventaja de abarcar grandes distancias, así como, de proporcionar un gran número de puntos de medida, siendo muy útil para la seguridad en entornos hostiles o difíciles de trabajar. Gracias a la utilización de este tipo de sensores en la actualidad puede hacerse fácilmente un seguimiento de los parámetros que se quieran medir, como por ejemplo, la temperatura en un túnel, para saber si se ha producido un incendio, o en pozos donde pueda haberse producido una fuga de gas, por ejemplo.

En la actualidad se está utilizando cada vez más, los sensores distribuidos de temperatura basados en Raman para la detección en túneles, cintas transportadoras industriales y como ya se ha dicho antes, en edificios con especial peligro de incendio, al igual que la detección de fugas en diques y presas.

Estas son algunas de las soluciones que ofrecen los sensores distribuidos de temperatura basados en Raman:

-Túneles, metro, aparcamientos
-Cintas transportadoras
-Bandejas de cables y transformadores.
-Conductos de autobuses, falsos suelos y techos.
-Áreas de producción
-Refinerías y plantas químicas.
-Almacenes y congeladores.

[1] Microstrain=micra/metro. Δl/l.

# *Capítulo III*
# *Teoría del Sensado Distribuido Raman*

## 3.1 Teoría clásica de la técnica Raman

El efecto Raman se llama así por el físico indio Sir Chandrasekhara Venkata Raman (1880-1970), que descubrió que si la luz atraviesa un material transparente, parte de la luz desviada cambia su longitud de onda. En el proceso de dispersión Raman, los cambios de frecuencia dependen de las frecuencias vibratorias características de las moléculas. La componente de frecuencia ascendente Raman se denomina línea anti-Stokes (AS) y la componente de reducción descendente se denomina línea Stokes (S). La intensidad del Anti-Stokes (AS) retro dispersado muestra una fuerte dependencia con la temperatura mientras que el Stokes (S) retro dispersado sólo depende ligeramente de la temperatura.

Este efecto en las fibras ópticas es de especial interés en el sensado para la medida distribuida de temperatura ya que se aprovecha la fuerte dependencia de la componente AS con la temperatura para así poder medirla. Sin embargo, no hay que olvidar que la señal de retro dispersión Anti-Stokes (AS) depende no sólo de la temperatura, sino también de la atenuación de la fibra a la longitud de onda del AS y de las pérdidas locales (empalmes, conectores y pérdidas por fusión). Las variaciones en las pérdidas locales pueden ser malinterpretadas como variaciones en la temperatura y dar errores significativos. Para resolver este problema, la señal Anti-Stokes se normaliza con la otra señal retro-dispersada (Stokes).

Se tiene un campo eléctrico de frecuencia angular $W_0 = 2\pi f_0$ generado por un láser. El fotón de energía $hf_0$ excita la molécula después de haber colisionado con ella, desde un estado inicial $E_1$ al estado virtual $E_3 = hf_0 + E_1$. Como es sabido, el estado virtual está prohibido, ya que no es de absorción real, por lo tanto, decaerá a otro tercer estado. Desde el punto de vista de niveles energéticos, en la dispersión Stokes el sistema decae del estado $E_3$ al estado $E_2$, haciendo la transición $E_1 \rightarrow E_3 \rightarrow E_2$. En este sistema el estado $E_2$ es de mayor energía que el estado inicial $E_1$. La diferencia de energía $\Delta E = |E_2 - E_1| = h(f_0 - f_s)$ se convierte en vibración de la molécula y se genera un fonón.

En la dispersión Anti-Stokes se sigue la transición $E_2 \rightarrow E_4 \rightarrow E_1$, donde $E_2$ es el estado inicial y está excitado por la vibración de la molécula. Después ésta se excita al estado virtual $E_4 = hf_0 + E_2$ y cayendo al estado de energía $E_1$. El resultado es la generación de un fotón Anti-Stokes con una frecuencia angular mayor que la del fotón incidente , ya que la energía del estado final $E_1$ es menor que la del estado inicial $E_2$.

En la siguiente figura se puede observar el esquemático del diagrama de dispersión de Raman.

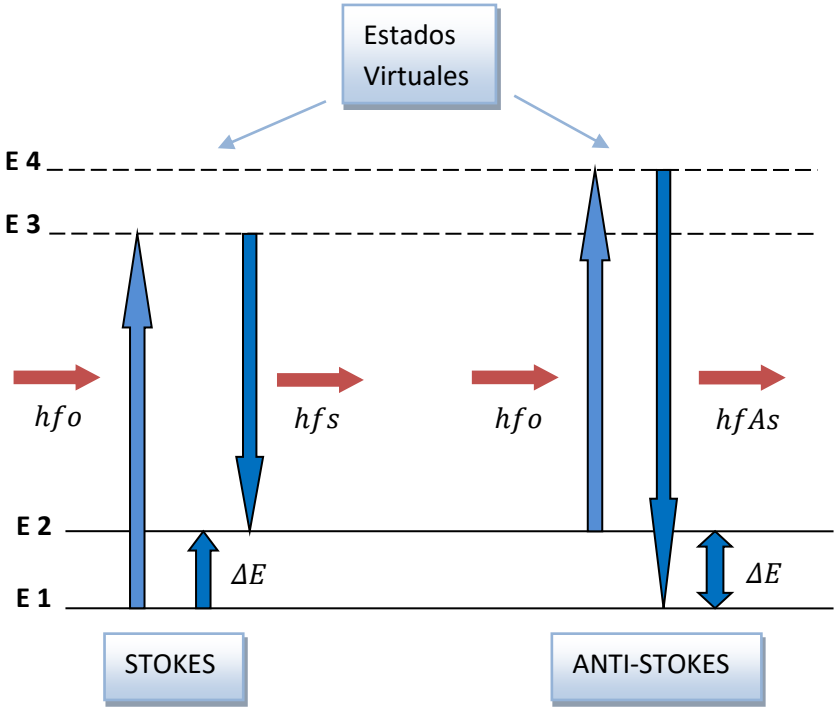



Figura 3.1.1. Las diferentes posibilidades de una luz dispersada: la dispersión Stokes (la molécula absorbe energía) y la dispersión anti-Stokes (molécula pierde energía).

La intensidad de la dispersión Raman Stokes es del orden de cien veces superior a la dispersión Raman Anti-Stokes. Esto es debido a que, según la ley de distribución de energías de Maxwell-Boltzman, el 99 % de las moléculas se encuentran en un estado vibracional de menor energía que el fundamental. Por tanto, la probabilidad de que ocurran transferencias de energía que den lugar a la dispersión Raman Stokes es mucho mayor que la de la dispersión Raman Anti-Stokes. Con el aumento de la temperatura la probabilidad de una transición Anti-Stokes aumenta.

En los sistemas Raman DTS (Sensado Distribuido de Temperatura) basados en el principio de la reflectometría óptica en el dominio del tiempo (OTDR), presentan un esquemático como el de la figura 3.1.2 donde lanza un pulso láser corto e intenso a la fibra de detección. El pulso láser se lanza a la fibra bajo prueba (FUT) a través de un circulador óptico. El pulso de luz se propaga a lo largo de la fibra, interactuando con las moléculas que componen el núcleo de la fibra óptica. Esta interacción genera dispersión de la luz, que puede ser tanto elástica como inelástica.
Una pequeña porción de la luz dispersada es capturada y guiada hacia atrás a lo largo de la fibra hacia el extremo donde se lanza el pulso. A través de un circulador, las señales retro dispersadas se guían a filtros para separar la luz retro dispersada Raman de las señales retro dispersadas de Rayleigh y Brillouin. Finalmente, las señales filtradas se detectan mediante fotodiodos, que suelen ser fotodiodos de avalancha de alta sensibilidad y bajo ruido (APD) porque la potencia de las señales recogidas es muy pequeña (60-70 dB por debajo de los niveles de potencia pico utilizados).Las señales de salida se muestrean utilizando un sistema de conversión analógico al digital de alta resolución (ADC).

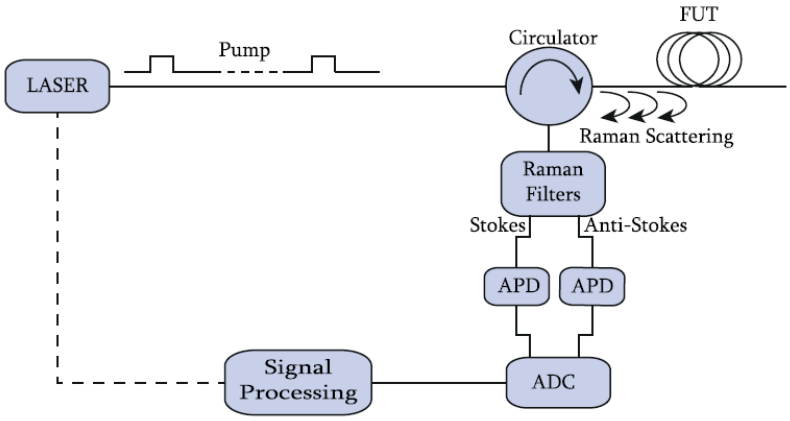



*Figura 3.1.2. Diagrama de esquema de Sensado Distribuido de Temperatura de Raman basado en la técnica OTDR*

Este esquema es el que se utilizará para la futura medida de atenuación y temperatura mediante la Unidad de Interrogación Raman.

## 3.2 Tipos de Fibras para Alta Temperatura

Los sensores distribuidos de temperatura basados en el efecto Raman han sido una pieza clave en algunos sectores industriales como el sector de gas o de petróleo debido a sus características y ventajas respecto de los sensores distribuidos convencionales. Sin embargo, una de las limitaciones de estos sensores es que no pueden excederse los 300 grados en los entornos de medida que se vayan a utilizar.

En la actualidad las industrias y el mercado demandan sistemas sensores capaces de medir en entornos hostiles ($> 300℃$), entornos habituales en cualquiera de los sectores industriales de gas y petróleo, durante largos períodos de tiempo y con una precisión muy elevada. Pues bien, ya sabemos que no son fáciles de encontrar en el mercado, de hecho, existen prototipos creados en laboratorios y bajo condiciones bastante favorables pero que en otros entornos industriales puede que no llegaran a funcionar de forma correcta. En estos laboratorios las pruebas no se hacen bajo condiciones de curvaturas, movimientos bruscos y estirados, es decir, estas fibras podrían llegar a soportar incluso los 600 grados Celsius sin ningún tipo de recubrimiento, añadiendo errores en la medida y llegando a deteriorar la propia fibra.

Por esto y más, se necesitan recubrimientos de la fibra óptica que les aporte una consistencia mecánica para poder soportar las condiciones extremas de temperatura en entornos industriales. Existen en el mercado dos tipos de recubrimiento: Polyimida y metálicos (Aluminio, Cobre y Oro).

El recubrimiento de Polyimida es el más común pero el más limitado en temperatura, soportando hasta los 300 grados. Estas fibras además no son impermeables y pueden sufrir invasión de hidrógeno en el núcleo, dañando la fibra y disminuyendo la resistencia de fatiga contra el “estirado” de la fibra a determinadas longitudes de onda del espectro infrarrojo. Estos problemas pueden solventarse con un recubrimiento de carbón en la fibra y así bloquear la entrada de agua y disminuir la difusión del hidrógeno.

Para altas temperaturas, temperaturas mayores de 350℃, se utilizan las fibras con revestimiento metálico. El proceso de fabricación de estas fibras utiliza la técnica llamada de "congelación", donde el recubrimiento de metal se aplica durante el proceso de estirado de la fibra.

La temperatura de la fibra debe ser algo inferior al punto de fusión del metal, de esta manera, una capa de este metal puede adherirse, "congelarse", en la superficie de la fibra. Este recubrimiento crea una capa hermética que protege al núcleo de la fibra óptica de la invasión de hidrógeno.

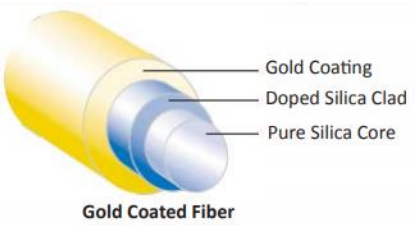
Dentro de las fibras con recubrimiento de metal están las de Aluminio, Cobre y Oro y éstas tienen las ventajas de soportar tanto temperaturas mayores a los 350 grados como radiaciones nucleares. Sin embargo, estos metales pueden reaccionar con el silicio a determinadas temperaturas, a excepción del Cobre que no reacciona debido al alto punto de fusión (aproximadamente 1000 grados).Sin embargo, el Cobre tiene una desventaja ya que se oxida la superficie en presencia de oxígeno a elevadas temperaturas, provocando un deterioro de la fibra y de sus propiedades mecánicas.

Por último las fibras de Oro son idóneas para altas temperaturas debido a que llegan a soportar los 700 grados, aunque tienen una atenuación alta a bajas temperaturas que disminuye a medida que aumenta la temperatura. Además, estas fibras son mucho más caras y frágiles que las anteriores, haciéndolas menos adecuadas para aplicaciones industriales que no quieran invertir mucho.

Teniendo en cuenta las consideraciones hechas, los dos mejores candidatos para recubrir la fibra son, por el momento y sin medidas claras, el Aluminio y el oro. El rango de temperatura de trabajo de la fibra recubierta con Aluminio, puede reducirse debido a la posible reacción del metal con la sílice a partir de determinadas temperaturas.

A continuación, una breve descripción de las características técnicas de los tipos de fibra que trabajan en amplios rangos de temperatura.

# *Fibra de Oro*




| *Rango de Temperatura* | *Aplicaciones* | *Fabricante* | *Tipos* | *Especificaciones* |
|---|---|---|---|---|
| $-269°C\ a + 700°C$ | -Sensores resistentes a la radiación<br><br>-Control de turbina de cohete y motor a reacción<br><br>-Alta temperatura y detección criogénica<br><br>-Dispositivos de vacío ultra alto<br><br>-Detección de agujeros bajo tierra para la industria del petróleo | fiberguide industries<br>THE FIBER OPTIC SOLUTIONS COMPANY<br>A HALMA COMPANY | Salto de índice multi modo | AN :$0.12, 0.22, 0.26$<br>Tamaño del diámetro /revestimiento: $50/125$µm y $400/440$ µm.<br>Núcleo: sílice fundida dopada con germanio<br>Revestimiento: sílice fundida pura |
| | | | Índice gradual multi modo | AN :$50$ µm $-$ $0.200$<br>$62.5$ µm $-$ $0.275$<br>Tamaño del diámetro /revestimiento: $50/125$µm y $62.5/125$ µm.<br>Núcleo: sílice fundida dopada con germanio<br>Revestimiento: sílice fundida pura |
| | | | Mono modo | AN: $0.12$<br>Campo de modo<br>Tamaño del diámetro /revestimiento: $4.3/125$µm y $9/125$ µm.<br>Núcleo: sílice fundida dopada con germanio<br>Revestimiento: sílice fundida pura |

*Tabla 3.2.1. Características Fibra de Oro*

Tipos de Fibra de Oro:

1) **Anhydroguide**

Núcleo Sílice fundida pura / Revestimiento Sílice dopada con flúor– Salto de índice Multi modo

Longitud de onda: VIS-IR (Low OH): $300\ nm - 2400\ nm$

Apertura Numérica:$Standard: 0.22\ \pm 0.02$ – Prefijo AFS

$Low: 0.12\ \pm 0.02$ – Prefijo AFM

$Hi: 0.26\ \pm 0.02$ – Prefijo AFH

**2) Superguide**

Núcleo de Sílice fundida pura / Revestimiento Sílice dopada con flúor – Salto índice Multi modo

Longitud de onda: UV-VIS (High OH): $190\ nm - 1250\ nm$

Apertura Numérica:$Standard$ : $0.22\ \pm 0.02$ – Prefijo SFS

$Low$ : $0.12\ \pm 0.02$ – Prefijo SFM

$Hi$ : $0.26\ \pm 0.02$ – Prefijo SFH

**3) Anhydrous Graded Idex (AGI) Multi modo**

Longitud de onda: Optimizado $850\ nm - 1300\ nm$

Apertura Numérica: $50\ \mu m$ : $0.200\ \pm 0.02$

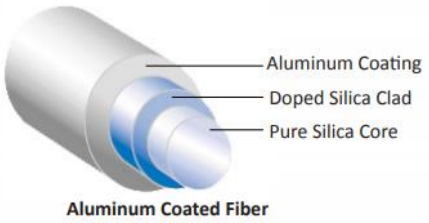
$62.5\ \mu m$ : $0.275\ \pm 0.02$

**4) Anhydrous Silica (ASI) Mono modo**

Longitud de onda: $4.3\ /\ 125\ \mu m$: $633\ nm - 680\ nm$

Apertura Numérica: $0.12 \pm 0.02$

# *Fibra de Aluminio*




| *Rango de Temperatura* | *Aplicaciones* | *Fabricante* | *Tipos* | *Especificaciones* |
|---|---|---|---|---|
| $-269°C\ a\ +400°C$ | -Sensores resistentes a la radiación.<br><br>-Control de turbina de cohete y motor a reacción.<br><br>-Alta temperatura y detección criogénica.<br><br>-Dispositivos de vacío ultra alto.<br><br>-Ambientes corrosivos y cáusticos.<br><br>-Fabricación de semiconductores. | fiberguide industries<br>THE FIBER OPTIC SOLUTIONS COMPANY<br>A HALMA COMPANY | Salto de índice multi modo | AN:$0.12, 0.22, 0.26$<br>Tamaño del diámetro/ revestimiento: $50/125$µm y $400/440$ µm.<br>Núcleo: sílice fundida pura<br>Revestimiento: Sílice dopada con flúor |
| | | | Índice gradual multi modo | AN:$50\ \mu m - \ 0.200$<br>$62.5\ \mu m - 0.275$<br>Tamaño del diámetro/ revestimiento: $50/125$µm y $62.5/125$ µm.<br>Núcleo: sílice fundida dopada con germanio<br>Revestimiento: sílice fundida pura |
| | | | Mono modo | AN: $0.12$<br>Campo de modo<br>Tamaño del diámetro / revestimiento: $4.3/125$µm y $9/125$ µm.<br>Núcleo: sílice fundida dopada con germanio<br>Revestimiento: sílice fundida pura |

*Tabla 3.2.2. Características fibra de Aluminio*

Tipos de fibra de Aluminio:

1) **Anhydroguide**

Núcleo sílice fundida pura/Revestimiento sílice dopada con flúor – Salto índice Multi modo

Longitud de onda: VIS-IR (Low OH): $300\ nm - 2400\ nm$
Apertura Numérica: $Standard: 0.22\ \pm 0.02$ – Prefijo AFS
$Low: 0.12\ \pm 0.02$ – Prefijo AFM
$Hi: 0.26\ \pm 0.02$ – Prefijo AFH

2) **Superguide**

Núcleo sílice fundida pura/Revestimiento sílice dopada con flúor – Salto índice Multi modo

Longitud de onda: UV-VIS (High OH) : $190\ nm - 1250\ nm$
Apertura Numérica: $Standard$ : $0.22\ \pm 0.02$ – Prefijo AFS o SFS
$Low$ : $0.12\ \pm 0.02$ – Prefijo AFM o SFM
$Hi$ : $0.26\ \pm 0.02$ – Prefijo AFH o SFH

**3) Anhydrous Graded Idex (AGI) Multi modo**

Longitud de onda: Optimizado $850\ nm - 1300\ nm$
Apertura Numérica: $50\ \mu m$ : $0.200\ \pm 0.02$
$62.5\ \mu m$ : $0.275\ \pm 0.02$

**4) Anhydrous Silica (ASI) Mono modo**

Longitud de onda:$ASI\ 633(4.3/125\ \mu m)$ : $633\ nm - 680\ nm$
$ASI\ 1500(9.0/125\ \mu m)$ : $1310\ nm$
Apertura Numérica: $0.12\ \pm 0.02$

## *Otras fibras de Aluminio*

- Fabricante: IVG Fiber

1) Salto de índice fibra Multi modo

| | **AL 200/220** | **AL 400/440** |
|---|---|---|
| **Apertura Numérica** | 0.22 | 0.22 |
| **Composición Núcleo/Revest** | **Fusionado dopado puro** | **Fusionado dopado puro** |
| **Diámetro Núcleo** | $\mathbf{200 \pm 3\ \mu m}$ | $\mathbf{400 \pm 5\ \mu m}$ |
| **Diámetro Revestimiento** | $\mathbf{220 \pm 3\ \mu m}$ | $\mathbf{425 \pm 5\ \mu m}$ |
| **Diámetro Cubierta** | $\mathbf{270 \pm 10\ \mu m}$ | $\mathbf{535 \pm 10\ \mu m}$ |

2) Índice gradual fibra Multimodal (Low OH)

| | **AL 50/125** |
|---|---|
| **Atenuación a 1300 nm** | **14 dB/Km** |
| **Rango Longitud de Onda** | **600-2000 nm** |
| **Apertura Numérica** | **0.22** |
| **Composición Núcleo/Revest** | **Germanio dopado puro** |
| **Diámetro Núcleo** | $\mathbf{50\ \mu m}$ |
| **Diámetro Revest** | $\mathbf{125 \pm 1\ \mu m}$ |
| **Diámetro Cubierta** | $\mathbf{165 \pm 10\ \mu m}$ |

# *Fibra de Cobre*

| *Rango de Temperatura* | *Aplicaciones* | *Fabricante* | *Tipos* | *Especificaciones* |
|---|---|---|---|---|
| $-269°C\ a\ +400°C$ | -Sensores resistentes a la radiación.<br><br>-Control de turbina de cohete y motor a reacción.<br><br>-Alta temperatura y detección criogénica.<br><br>-Dispositivos de vacío ultra alto.<br><br>-Ambientes corrosivos y cáusticos.<br><br>-Fabricación de semiconductores. | IVG Fiber | Salto de índice multi modo | Diámetro cubierta<br>Cu 100/110<br>$145 \pm 10\ \mu m$<br>Cu 200/220<br>$\mathbf{270 \pm 10\ \mu m}$<br>Cu 400/440<br>$\mathbf{535 \pm 10\ \mu m}$<br>Cu 600/660<br>$\mathbf{745 \pm 15\ \mu m}$ |
| | | | Índice gradual multi modo | Diámetro cubierta<br>Cu 50/125<br>$165 \pm \mathbf{10\ \mu m}$<br>Cu 50/200<br>$260 \pm \mathbf{10\ \mu m}$ |

*Tabla 3.2.3 Características fibra de Cobre*

1) Salto de índice multi modo

- Tamaños estándares: 200/220, 400/440, 600/660.

| | **Cu 100/110** | **Cu 200/220** | **Cu 400/440** | **Cu 600/660** |
|---|---|---|---|---|
| **Apertura Numérica** | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.22 |
| **Composición** | **Dopado fundido puro** | **Dopado fundido puro** | **Dopado fundido puro** | **Dopado fundido puro** |
| **Núcleo/Revest** | | | | |
| **Diámetro Núcleo** | $\mathbf{100 \pm 2\ \mu m}$ | $\mathbf{200 \pm 3\ \mu m}$ | $\mathbf{400 \pm 5\ \mu m}$ | $\mathbf{600 \pm 8\ \mu m}$ |
| **Diámetro Revestimiento** | $\mathbf{110 \pm 2\ \mu m}$ | $\mathbf{220 \pm 3\ \mu m}$ | $\mathbf{440 \pm 5\ \mu m}$ | $\mathbf{660 \pm 8\ \mu m}$ |
| **Diámetro cubierta** | $\mathbf{145 \pm 10\ \mu m}$ | $\mathbf{270 \pm 10\ \mu m}$ | $\mathbf{535 \pm 10\ \mu m}$ | $\mathbf{745 \pm 15\ \mu m}$ |

- Disponibles para UV (High-OH) e IR (low-OH)

2) Índice gradual multi modo
   - Tamaño estándar: 50/125 and 50/200

| | **Cu 50/125** | **Cu 50/200** |
|---|---|---|
| **Apertura Numérica** | **0.22** | **0.22** |
| **Contenido OH** | **Low OH** | **Low OH** |
| **Rango Longitud de Onda** | **600-200 nm** | **600-2000 nm** |
| **Composición Núcleo** | **Germanio Dopado/Puro** | **Germanio Dopado/Puro** |
| **Diámetro Núcleo** | $\mathbf{50\ \mu m}$ | $\mathbf{50\ \mu m}$ |
| **Diámetro Revestimiento** | $\mathbf{125 \pm 1\ \mu m}$ | $\mathbf{200 \pm 2\ \mu m}$ |
| **Diámetro cubierta** | $\mathbf{165 \pm 10\ \mu m}$ | $\mathbf{260 \pm 10\ \mu m}$ |

# *Fibra de Polyimida*

1) Índice Gradual Multi modo

| *Fabricante* | *Aplicaciones* | *Rango de Temperatura* | *Ventajas* | *Variantes* |
|---|---|---|---|---|
| MM Fiber | DTS para pozos SAGD | $+300℃$ | Alto ancho de Banda | GIMM(50/125)P, GIMM(62.5/125)P |
| | Monitoreo de Temperatura en ambientes de radiación | | | |
| | Perfiles sísmicos verticales | | Altas temperaturas por encima de $300℃$ | |
| | Monitorización de fracturas hidráulicas | | | |

| | **GIMM(50/125)P** | **GIMM(62.5/125)P** |
|---|---|---|
| **Longitud de onda (nm)** | 800-1750 | 800-1750 |
| **Apertura Numérica** | 0.18-0.22 | 0.25-0.30 |
| **Atenuación (dB/km)** | **@850nm** $\mathbf{\leq 4.0}$ | **@850nm** $\mathbf{\leq 4.0}$ |
| | **@1300nm** $\mathbf{\leq 2.0}$ | **@1300nm** $\mathbf{\leq 2.0}$ |
| **Diámetro Revestimiento** | $\mathbf{125 \pm 1\ \mu m}$ | $\mathbf{125 \pm 1\ \mu m}$ |
| **Concentración Revestimiento Núcleo** | $\mathbf{\leq 2.0}$ | $\mathbf{\leq 2.0}$ |
| **Diámetro revestimiento** | $\mathbf{155 \pm 5\ \mu m}$ | $\mathbf{155 \pm 5\ \mu m}$ |
| **Diámetro Núcleo** | $50\ \mu m$ | $62.5\ \mu m$ |
| **Temperatura de Operación** | $\mathbf{-50\ to + 300℃}$ | $\mathbf{-50\ to + 300℃}$ |

1) Índice Gradual Multi modo Fibra recubierta Polyimida Carbón
   - Fabricante : MM Fiber
   - Aplicaciones :

-Sensado distribuido de Temperatura (DTS)
-Sistemas de detección de incendios
- Monitoreo de tuberías
-Producción / monitorización de inyección

- Ventajas :
  -Excelente resistencia contra el hidrógeno
  -Altas temperaturas de operación
  -Recubierta hermética
  -Perfil de índice gradual
- Variantes: GIMM(50/125)CP, GIMM(62.5/125)CP

| | **GIMM(50/125)CP** | **GIMM(62.5/125)CP** |
|---|---|---|
| **Longitud de onda (nm)** | 800-1750 | 800-1750 |
| **Apertura Numérica** | 0.18-0.22 | 0.25-0.30 |
| **Atenuación (dB/km)** | **@850nm** $\leq \mathbf{4.0}$ | **@850nm** $\leq \mathbf{4.0}$ |
| | **@1300nm** $\leq \mathbf{2.0}$ | **@1300nm** $\leq \mathbf{2.0}$ |
| **Diámetro Revestimiento** | $\mathbf{125 \pm 2\ \mu m}$ | $\mathbf{125 \pm 2\ \mu m}$ |
| **Concentración Revestimiento Núcleo** | $\leq \mathbf{2.0}$ | $\leq \mathbf{2.0}$ |
| **Diámetro revestimiento** | $\mathbf{155 \pm 5\ \mu m}$ | $\mathbf{155 \pm 5\ \mu m}$ |
| **Diámetro Núcleo** | 50 μm | 62.5 μm |
| **Temperatura de Operación** | $\mathbf{-50\ to + 300}$℃ | $\mathbf{-50\ to + 300}$℃ |

# *Fibra de Acrilato*

- Tipos: Alta temperatura Carbón + Acrilato (CHT) , Alta temperatura Acrilato(HT).

1) HT

| *Ventajas* | *Aplicaciones* | *Variantes* |
|---|---|---|
| Altas temperaturas de operación | Monitoreo de Tuberías | GIMM(50/125)HT, GIMM(62.5/125)HT |
| Fácil extracción | Sistema de detección de incendios | |
| Ancho de banda alto | Producción/Monitorización de inyección | |

| | **GIMM(50/125)HT** | **GIMM(62.5/125)HT** |
|---|---|---|
| **Longitud de onda (nm)** | 800-1750 | 800-1750 |
| **Apertura Numérica** | 0.18-0.22 | 0.25-0.30 |
| **Atenuación (dB/km)** | **@850nm** $\leq 3.2$ | **@850nm** $\leq 3.2$ |
| | **@1300nm** $\leq \mathbf{1.0}$ | **@1300nm** $\leq \mathbf{1.0}$ |
| **Diámetro Revestimiento** | $\mathbf{125 \pm 1\ \mu m}$ | $\mathbf{125 \pm 1\ \mu m}$ |

| | | |
|---|---|---|
| **Concentración** | $\leq \mathbf{2.0}$ | $\leq \mathbf{2.0}$ |
| **Revestimiento Núcleo** | | |
| **Diámetro revestimiento** | $245 \pm 15\ \boldsymbol{\mu m}$ | $245 \pm 15\ \boldsymbol{\mu m}$ |
| **Diámetro Núcleo** | 50 μm | 62.5 μm |
| **Temperatura de Operación** | $-50\ \boldsymbol{to} + 150℃$ | $-50\ \boldsymbol{to} + 150℃$ |

2) CHT

| *Ventajas* | *Aplicaciones* | *Variantes* |
|---|---|---|
| Resistencia contra el hidrógeno | Monitoreo de temperatura en ambientes de radiación | GIMM(50/125)CHT, GIMM(62.5/125)CHT |
| Revestimiento hermético | Perfiles sísmicos verticales | |
| Insensibilidad a la curvatura | Producción/Monitorización de inyección | |

| | **GIMM(50/125)CHT** | **GIMM(62.5/125)CHT** |
|---|---|---|
| **Longitud de onda (nm)** | 800-1750 | 800-1750 |
| **Apertura Numérica** | 0.18-0.22 | 0.25-0.30 |
| **Atenuación (dB/km)** | **@850nm** $\leq 3.2$ | **@850nm** $\leq 3.2$ |
| | **@1300nm** $\leq \mathbf{1.0}$ | **@1300nm** $\leq \mathbf{1.0}$ |
| **Diámetro revestimiento** | $\mathbf{125} \pm 2\ \boldsymbol{\mu m}$ | $\mathbf{125} \pm 2\ \boldsymbol{\mu m}$ |
| **Concentración revestimiento núcleo** | $\leq \mathbf{2.0}$ | $\leq \mathbf{2.0}$ |
| **Diámetro revestimiento** | $245 \pm 15\ \boldsymbol{\mu m}$ | $245 \pm 15\ \boldsymbol{\mu m}$ |
| **Diámetro Núcleo** | 50 μm | 62.5 μm |
| **Temperatura de Operación** | $-50\ \boldsymbol{to} + 150℃$ | $-50\ \boldsymbol{to} + 150℃$ |

## 3.3 Degradación a altas temperaturas

Las altas temperaturas pueden provocar fallos y daños en las fibras específicas que se utilizan para altas temperaturas. Dentro de este tipo de fibras, las fibras metálicas son las que reaccionan con el silicio a altas temperaturas a excepción del Cobre, como se ha descrito a lo largo de este proyecto.

Por ejemplo, el Aluminio reacciona con la sílice de la siguiente forma lo que fragiliza el conjunto fibra-cubierta metálica:

$$4AL + 3S_iO_2 \rightarrow 2Al_2O_3 + 3S_i \qquad \textit{Ecuación (3.3)}$$

Esto puede tener lugar a temperaturas incluso inferiores a la temperatura de fusión del Aluminio ($660℃$) y puede disminuir al bajar la temperatura. Es por esto que no se aconseja el uso de las fibras de Aluminio ya que se degradan a largo plazo cuando se someten a temperaturas mayores de $400℃$. Esto las hace tener un uso efímero.

De las fibras con recubrimientos metálicos con un alto punto de fusión: Oro, Plata, Cobre y Níquel ($\mathrm{Au, Ag, Cu, Ni}$) no tienen estudios tan exhaustivos como los existentes para los recubrimientos de Aluminio. Estos metales pueden reaccionar con el silicio a altas temperaturas de forma impredecible. Como en este proyecto hemos utilizado las fibras de Oro y Cobre, vamos a explicar más detalladamente las posibles degradaciones a altas temperaturas de estas fibras.

De la fibra de Oro sabemos que tiene una alta atenuación a bajas temperaturas, sin embargo, aumentando la temperatura esta atenuación disminuye. Estas variaciones, generalmente atribuidas a micro curvaturas y a la diferencia de coeficientes entre el recubrimiento y la fibra de vidrio, hacen que consideremos a estas fibras como poco uniformes en el perfil de atenuación y se obtengan errores en las medidas y en los resultados finales, algo perjudicial. Esto implica que a la hora de calibrar este tipo de fibras no podamos realizarlo de forma convencional, algo bastante desagradecido. Si la comparamos con las demás fibras metálicas esta es la más costosa y a su vez, la más frágil, algo que aumenta el precio final del proyecto.

La fibra de Cobre es la única fibra de metal que no reacciona con el silicio a altas temperaturas y posee un punto de fusión mayor que el Aluminio de aprox. $1000℃$, siendo idónea para aplicaciones a altas temperaturas. Sin embargo, a pesar de estas ventajas la fibra de Cobre tiene el problema del proceso de oxidación en la superficie de ésta, en presencia del oxígeno a altas temperaturas, provocando un deterioro en las propiedades mecánicas de la fibra.

Los recubrimientos de metal en las fibras tienen aproximadamente las mismas pérdidas ópticas que las fibras recubiertas de Polyimida. Las ventajas más significativas de las fibras metálicas frente a la fibra de Polyimida son su resistencia a ambientes de altas temperaturas mayores a los $350℃$, y su resistencia a la radiación nuclear (la Polyimida se descompone bajo radiación).

En este proyecto haremos un estudio de la atenuación de las fibras recubiertas de: Oro, Aluminio, Cobre y Polyimida. Aún con todas estas degradaciones y posibles fallos en las medidas, sacaremos en conclusión cuál de estas es la más idónea para el sensado distribuido a altas temperaturas mediante la técnica de Raman.

## 3.4 Pérdidas inducidas por el hidrógeno

A principios de los 80 se empezó a especular sobre la importancia de que las pérdidas inducidas por el hidrógeno podrían afectar a los sistemas de fibras ópticas. Se realizaron varios estudios sometiendo a la fibra a mínimas exposiciones de hidrógeno que dieron lugar a un fallo casi total del sistema. La aparición de hidrógeno en los cables de fibra óptica, es debida a la generación de $H_2$ causado por la corrosión de ciertos recubrimientos metálicos dentro de los cables. La difusión de las moléculas de $H_2$ al núcleo de la fibra da lugar al aumento de las pérdidas de transmisión de la misma. Estas pérdidas pueden ser tanto reversibles, como irreversibles o incluso permanentes.

Las pérdidas reversibles se anulan si se elimina el $H_2$ del entorno de la fibra. Estas pérdidas son debidas a la difusión de las moléculas de $H_2$ dentro del núcleo, aunque, de hecho, el $H_2$ no reacciona con las moléculas que componen el mismo. Las pérdidas aparecen como resultado de la aparición de nuevos picos de absorción en el espectro. Las pérdidas aumentan de forma proporcional a la presión a la que se encuentra el gas, lo cual resulta totalmente lógico ya que a mayor presión mayor cantidad de moléculas difundidas y mayor incremento de las pérdidas inducidas.

A medida que la temperatura aumenta también lo hace la velocidad de difusión, no obstante este aumento de la velocidad no implica un aumento en la capacidad de absorción, que disminuye, debido al descenso de la solubilidad del $H_2$.

Las pérdidas permanentes, una vez que se producen no pueden recuperarse. Esto se produce debido al efecto de las altas temperaturas que en este aspecto sí que son determinantes ya que las moléculas de $H_2$ reaccionan con los dopantes del núcleo, dando lugar a picos de absorción. Las posibles soluciones a este problema podrían ser: 1) Revestir la fibra de un material que sirva como barrera a la difusión o 2) Usar fibras con un núcleo compuesto por sílice puro para así evitar la reacción de las moléculas $H_2$ con los dopantes del núcleo y evitar el incremento de estas pérdidas.

Como primera solución, a bajas temperaturas, el carbono puede ser utilizado como barrera para el bloqueo de la difusión de las moléculas de $H_2$, pero a altas temperaturas, el carbono deja de ser impermeable. El recubrimiento de Aluminio puede utilizarse hasta $400℃$, pero a partir de esa temperatura las moléculas de Al podrían reaccionar con las moléculas de la propia fibra, como se indicó anteriormente. Por último y superando la temperatura de los $400℃$ se utiliza el recubrimiento de la fibra con oro, que bloquea la difusión de las moléculas de $H_2$ al núcleo.

## 3.5. Cable de Fibra Óptica a Altas Temperaturas en la Actualidad

No es tarea fácil encontrar cables de fibra óptica que puedan trabajar sin problemas a altas temperaturas en el mercado. Cuando buscamos cables que soporten unas altas temperaturas, por lo menos hasta los 300°C y 400°C, es casi imposible encontrarlos entre los suministradores especializados. En aplicaciones industriales en las que se quiera trabajar con estos sensores ópticos para procesos de soldadura, tratamientos térmicos, precalentamientos de piezas u otras actividades industriales, es muy difícil adquirir estos sensores y de ahí la importancia del estudio de estos y las posibles líneas futuras que se llevarán a cabo. Así como, desde el punto de vista de la investigación y los nuevos estudios es muy complicado obtener medidas y adquirir este tipo de herramientas debido a la tecnología actual, donde se encuentra casi en fase de desarrollo considerando estos rangos de temperatura (> 350ºC).

En el mercado se han encontrado algunos cables que pueden ser útiles para las aplicaciones de alta temperatura, en cuanto a máxima temperatura de trabajo limitado. El cable para hornos de la serie HTCM para alta temperatura está diseñado para su uso en aplicaciones de muy alta temperatura como un único cable conductor. Se recomienda para su uso en áreas que están expuestas a altas temperaturas de hasta 700°C.

Cable de Fibra marca omega

1. La empresa RS Components distribuye el cable de fibra para “alta temperatura” del fabricante Lapp Group. Lo venden como un cable que soporta altas temperaturas cuando en la ficha técnica vemos que sólo alcanza los 180°C. Es un valor considerado ya como alta temperatura pero es un límite bastante inferior a lo requerido por las aplicaciones que nos proponemos estudiar mediante la técnica de sensado distribuido Raman.

Cable Fibra óptica Lapp Group por RS Components

2. La gama HTF de fibras ópticas multi modo y mono modo de Optral, S.A. ha sido diseñada para utilizarse en un rango extendido de temperatura hasta un límite de 300°C.

# *Capítulo IV*

# *Procedimiento de medida*

## 4.1. Objetivos

En este capítulo se especifica la instrumentación utilizada en el presente trabajo para caracterizar las diferentes fibras estudiadas. Se presenta también una pequeña descripción de su funcionamiento y características técnicas que pueden ser de interés para el posterior análisis de resultados.

En primer lugar se van a describir las especificaciones de todos los dispositivos utilizados junto con su funcionamiento.

En segundo lugar se presentan dos montajes con el objeto de medir las diferentes fibras ópticas con la temperatura. El objetivo final es utilizar dichas fibras en un sistema de sensores distribuidos basados en el fenómeno de dispersión Raman y obtener unas medidas de la atenuación de cada fibra para de esta manera, haciendo el estudio de todas ellas, podamos elegir la más idónea para este proyecto.

## 4.2. Dispositivos de medida

-**Horno** (OBERSAL). Temperatura máxima admisible 1200℃.

*Figura 4.2.1. Horno utilizado para las pruebas.*

-**Pigtail:** Espiral ("coleta" o cable espiral) de fibra óptica formado por un cordón corto de fibra, un conector en uno de los extremos que sirve de interfaz con los equipos y fibra descubierta en el otro extremo para ser empalmado a la fibra del cable principal. En el extremo descubierto del cable pigtail se pela el revestimiento de color (recubrimiento) y se fusiona o empalma con una fibra.

*Figura 4.2.2. Cable "pigtail"*

-**Unidad de Interrogación Raman**: esta tecnología hace uso de cables sensores de fibra óptica de una longitud de varios kilómetros, que funcionan como sensores de temperatura lineal. El resultado es un perfil de temperatura continuo a lo largo de toda la extensión del cable sensor.

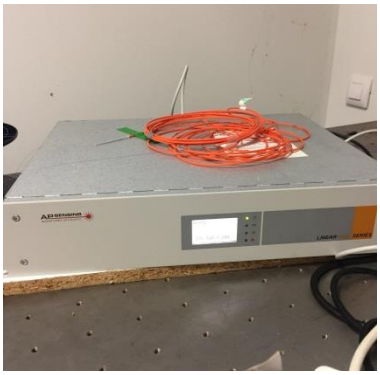


*Figura 4.2.3. Unidad de Interrogación Raman*

-**Fibras utilizadas**: fibras multi modo con diferentes tipos de recubrimientos: Oro, Polyimida, Aluminio y Cobre. Y fibra multimodal normal para el conexionado hasta el interrogador óptico.

-**Fusionadora**: aparato con alta precisión para fusionar o empalmar fibras con un mínimo de error.

*Figura 4.2.4. Fusionadora*

-**Cortadora**: se utiliza para cortar las fibras con una precisión de un ángulo de 90 grados.

*Figura 4.2.5. Cortadora*

## 4.3. Preparado de las fibras

Antes de comenzar con el montaje, lo primero que se debe hacer es preparar las fibras. La preparación consiste en adecuar todas las fibras a utilizar, las de medida y las de conexión con el equipo, así como los conectores ópticos a utilizar. Esta actividad es de suma importancia para garantizar unos buenos resultados en las medidas que realizaremos posteriormente. La intensidad de la luz dispersada por los efectos que estamos considerando es tan débil que hay que garantizar al máximo el reducir las pérdidas inducidas por aspectos de conexionado de las fibras hasta el interrogador. Para ello hay que seguir de forma rigurosa una serie de pasos en cuanto a la limpieza de las partes integrantes.

Para las fibras convencionales multimodal, de conexión, que utilizaremos para las uniones entre las fibras que vamos a estudiar, hay que proceder a pelar la fibra con un instrumento de pelado especial, seguido hay que limpiarlo bien con alcohol, se corta con el instrumento de corte VF-15H que permite un corte "limpio" a 90º y de caras totalmente paralelas (si el corte no se hace adecuadamente bien las pérdidas producidas en la cara final de la fibra serían considerables) y se colocan los extremos de la fibra en la fusionadora donde se alinean mecánicamente ambas caras en las direcciones X e Y antes de proceder a la fusión de las mismas.

Por otra parte las fibras que utilizaremos como sensores distribuidos, disponen de una ficha técnica en la que se describe con qué cantidad y qué tipo de producto químico hay que utilizar para retirar cada tipo de revestimiento (Polyimida, Cobre, Oro, Aluminio, etc). Hay que seguir igualmente todas las recomendaciones indicadas para el manejo de dichos productos químicos. Este proceso hay que realizarlo siempre antes de fusionar la fibra "sensor" con la fibra "de conexión".

A continuación se describe el procedimiento facilitado por el fabricante para realizar esta operación:

- ***Fibra Oro AFS50/125/155G***

  Máxima Temperatura de funcionamiento: 700 ℃
  Método de eliminación: Agua Regia
  Introducir en un vaso de precipitado de vidrio una cantidad de 3 partes de HCL (ácido clorhídrico), grado reactivo ≈38% y una parte de HN03 (ácido nítrico), grado reactivo 70%.
  Inmersión de la fibra en el ácido y esperar un par de horas hasta que la cubierta se haya eliminado por completo.

- ***Polyimida – Carbón GIMMSC(50/125)CP***

  Máxima Temperatura de funcionamiento: 385 ℃
  Método de eliminación: quemarlo o calentar ácido sulfúrico.
  Ácido sulfúrico caliente (T = 150-180 ° C).
  Sumergir unos minutos o hasta que se disuelva.
  Enjuague con agua limpia.

- ***Cobre Cu50/125***

  Máxima Temperatura de funcionamiento: 450 ℃
  Método de eliminación: ácido nítrico.
  La fibra recubierta de Cobre puede eliminarse empapándola en una solución de ácido nítrico al 20-50%. El metal se graba en menos de un minuto, dependiendo de la concentración de ácido y el espesor del recubrimiento.
  Inserte la fibra durante 45 minutos.

- ***Aluminio***

  Máxima Temperatura de funcionamiento: 400 ℃
  Método de eliminación: Hidróxido de Sodio.
  Llene el vaso de precipitados de 100 ml con gránulos de hidróxido de sodio hasta 1/4 de altura (25 ml). Llenar hasta 100 ml con agua. Revuelva hasta que se haya disuelto.
  Inserte la fibra durante 1-2 minutos.

En todo momento se deberán de tomar las precauciones necesarias y llevar las medidas de seguridad adecuadas. Todos los pasos a seguir deben hacerse en el interior de la campana extractora del laboratorio.

Para la manipulación de los vasos de precipitado es obligatorio llevar los siguientes Equipos de Protección Individuales (EPIS):

- Guantes
- Mascarilla
- Gafas de Protección
- Máscara especial

Una vez completado esto, ya se puede realizar el montaje y empezar con las medidas.

# *Capítulo V*

# *Medidas Experimentales de las Fibras Ópticas con la Temperatura*

## 5.1. Objetivos de medida

Los objetivos que marcan este proyecto son el estudio de la atenuación en diferentes tipos de fibras a altas temperaturas mediante la técnica de Sensado Distribuido de Raman, así como la visualización del comportamiento de cada fibra cuando se soportan altas temperaturas y la conclusión final del tipo de fibra más adecuada para aplicaciones a altas temperaturas, y sus posibles errores en las medidas. Este proceso de medida lo realizaremos, como ya hemos descrito antes, en el laboratorio de la Universidad y contaremos con las fibras de Oro, Cobre, Polyimida y Aluminio. Estas serán las fibras que mediremos y estudiaremos su comportamiento con la ayuda de la instrumentación descrita en el capítulo anterior.

## 5.2 Montaje para medidas

### 5.2.1 Procedimiento de medida

En primer lugar se conecta la Unidad de Interrogación con el PC y se configura de tal manera que nos muestre tanto las longitudes totales de nuestro montaje, como la longitud que se encuentra dentro del horno, la temperatura y su dependencia con la distancia, al igual que la atenuación. A lo largo de este capítulo se describen las características técnicas de la Unidad de Interrogación así como los parámetros necesarios para una medida correcta.

Empezaremos las medidas a la temperatura ambiente que es de unos 20℃. Incrementaremos hasta los 50 grados para la segunda medida y volveremos a incrementar de 25 en 25 grados cada medida hasta llegar a los 450 ℃ (en el caso de las fibras de Oro y Cobre) o hasta los 400℃ (en el caso de las fibras de Aluminio y Polyimida).

Después se medirá el enfriamiento durante 6 horas, con medidas cada minuto. Para que las medidas sean más fiables y con más exactitud se repetirán de nuevo las medidas y el enfriamiento y una vez hecho esto, se realizarán las medidas bajando y subiendo en temperatura.

### 5.2.2 Medida de atenuación con la Unidad de Interrogación Raman

A continuación se presenta el procedimiento de medida seguido para la medida de la atenuación en las diferentes fibras estudiadas a altas temperaturas.

Para este montaje contamos con la Unidad de Interrogación Agilent N4385A Distributed Temperature Sensing DTS (Ap Sensing) que aborda aplicaciones de detección de temperatura distribuida espacialmente.

Este sistema está basado en una técnica de reflectometría óptica tipo Raman en el dominio del tiempo (Raman-OTDR). Como ya se explicó anteriormente, un pulso láser que se propaga por la fibra va generando luz que se devuelve al extremo de transmisión donde se analiza. La luz retro dispersada contiene una gran cantidad de componentes de diferentes longitudes de onda. Algunas de estas componentes están afectadas por la temperatura mientras que el resto no. Midiendo precisamente la diferencia en la intensidad de la luz retro dispersada se puede determinar la temperatura, y calculando el tiempo de propagación de dichos componentes, el punto donde dicha componente se generó. El equipo dispone de 1, 2 o 4 canales opto-acoplados dependiendo de la configuración del mismo.

Las medidas que realizaremos se han dividido en dos: primero haremos las medidas de las fibras recubiertas de Oro y Cobre, por separado, debido al límite de temperatura de 450 grados. Después haremos las medidas de las fibras recubiertas de Aluminio y Polyimida hasta los 400 grados.

Empezaremos realizando el montaje tal y como se ha indicado, con todas las herramientas y aparatos mencionados, con el fin de tener la mayor fiabilidad posible en los datos registrados. Utilizaremos el programa Matlab para el procesado de los datos obtenidos y el "software" propio de la Unidad de Interrogación Raman.

Tanto para la medida de las fibras recubiertas de Oro y Cobre, como las recubiertas de Aluminio y Polyimida, se seguirá el esquema de montaje de las siguientes figuras:

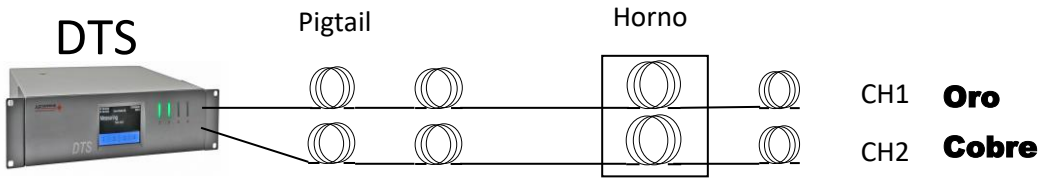



*Figura.5.2.1.1 Montaje medida de fibra de Oro y Cobre hasta los 450 grados.*

El canal 1, (recubrimiento de oro) tiene una longitud total de $332{,}49\,m$. El canal 2, (recubrimiento de Cobre) cuenta con una longitud total de $317{,}29\,m$. La longitud dentro del horno es de $9{,}5\,m$ y $10\,m$, respectivamente.

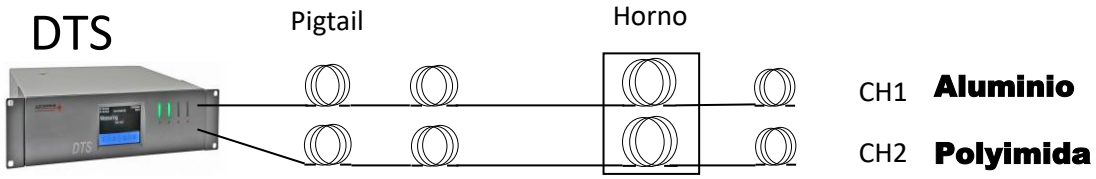



*Figura.5.2.1.2 Montaje medida de fibra de Aluminio y Polyimida hasta los 350 grados.*

El canal 1, (recubrimiento de Aluminio) tiene una longitud total de $360{,}88\,m$. El canal 2, (recubrimiento de Polyimida) cuenta con una longitud total de $296\,m$. La longitud dentro del horno es de $7{,}5\,m$ y $10\,m$, respectivamente.

## 5.3. Características Técnicas de la Unidad de Interrogación

Como se ha mencionado anteriormente, es necesario configurar una serie de parámetros antes de comenzar con las mediciones, para así llegar a nuestro objetivo y obtener resultados con la mayor precisión posible.

Una vez abierto el programa del fabricante llamado “DTS Configurator” y una vez conectado con el PC mediante la dirección IP de este, hay que fijar una configuración nueva.

A continuación se muestran todos los pasos a seguir para la configuración y calibración de la Unidad con ayuda de imágenes de este.

El primer parámetro importante a definir es la resolución espacial. Este parámetro depende del ancho del pulso de la señal láser inyectada. Está definida por:

$$R = \frac{t_w c}{2n} \qquad \textit{Ecuación (5.3)}$$

Donde $t_w$ es el ancho del pulso, $c$ es la velocidad de la luz en el vacío y n es el índice de refracción. Por ejemplo, se requieren pulsos con una duración de 10 ns para lograr una resolución espacial de 1m, que es la comúnmente utilizada en aplicaciones prácticas. Definiremos el intervalo de muestreo y la resolución espacial a $0.50\mathrm{m}$ y el valor de metros donde “Parar” a $360\mathrm{m}$. Este valor debe ser mayor que las longitudes de las fibras que se definieron. La siguiente figura muestra los parámetros de configuración de medición. La unidad ajusta automáticamente el ancho de pulso para obtener la resolución deseada.

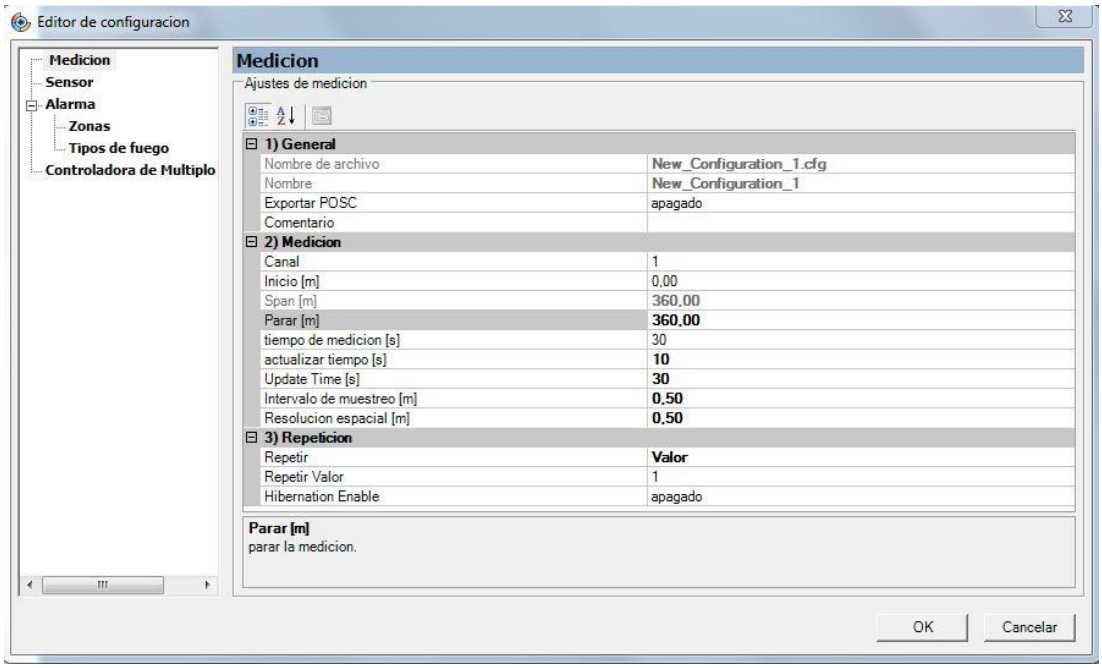



*Figura 5.3.1 Editor de Configuración. Software DTS Configurator.*

Se definen la frecuencia máxima y el tiempo mínimo requerido entre dos pulsos seguidos mediante las siguientes ecuaciones:

$$f_R = \frac{c}{2nL_f} \qquad \textit{Ecuación (5.4)}$$

$$t = \frac{1}{f} = \frac{2nL}{c} \qquad \textit{Ecuación (5.5)}$$

Donde $n$ es el índice de refracción del núcleo, $L$ es la longitud de la fibra y $c$ es la velocidad de la luz en el vacío.

No es necesario ajustar la frecuencia máxima en la unidad de interrogación ya que el tiempo de actualización intermedio mínimo es suficiente para la longitud máxima admitida por la unidad (L_max = 2Km → t_min = 20µs).

Para una medición Raman DTS de un solo extremo que utiliza ambas componentes de la dispersión Raman, el perfil de temperatura a lo largo de la fibra se puede proporcionar, en la posición z, a partir de la relación de potencia de las líneas anti-Stokes ($P_{AS}$) y Stokes ($P_S$), según la ecuación:

$$T(z) = \frac{\gamma}{ln\left[\frac{P_S(z,t)}{P_{AS}(z,t)}\right] + C - \Delta\alpha z} \qquad \textit{Ecuación (5.6)}$$

Donde $\gamma(k)$ representa el desplazamiento en energía entre un fotón a la longitud de onda del laser incidente y el fotón de scattering Raman. C es un parámetro constante sin dimensiones que agrupa la influencia de diversos factores, como la diferencia en la responsibidad del foto detector en las dos longitudes de onda. Consideramos que la constante C es invariante en el tiempo dado que la temperatura del sistema DTS no

cambia. Y $\Delta\alpha(\mathrm{m}^{-1})$ es la diferencia de atenuación entre las señales Stokes y Anti-Stokes en la fibra. [12]

## 5.4 Cálculo independiente de Δα

Se define alfa $\alpha$ , como la atenuación que sufre la fibra a lo largo de toda la fibra y se puede interpolar a partir de una longitud de fibra a una temperatura uniforme. Se define también $\Delta\alpha = \alpha_{\mathrm{aS}} - \alpha_{\mathrm{S}}$, como la diferencia de atenuación de las señales Stokes y Anti-Stokes en la fibra, teniendo además una relación con las potencias, $\frac{\mathrm{P_S}}{\mathrm{P_{aS}}}$. Esta relación entre potencias se atenuará con la distancia como:

$$\frac{P_S(z)}{P_{aS}(z)} = \frac{P_{0S}\exp(-\alpha_S z)}{P_{0aS}\exp(-\alpha_{aS} z)} \qquad \textit{Ecuación (5.7)}$$

Donde $P_{0S}$ y $P_{0aS}$ indican la potencia de las señales Anti-Stokes y Stokes en el punto de scattering. Haciendo el logaritmo neperiano de la ecuación (5.7) resulta:

$$\ln\frac{\mathrm{P_S}}{\mathrm{P_{AS}}}(\mathrm{z_2}) = \ln\frac{\mathrm{P_S}}{\mathrm{P_{AS}}}(\mathrm{z_1}) + \Delta\alpha\,(\mathrm{z_2} - \mathrm{z_1}) \qquad \textit{Ecuación (5.8)}$$

La ecuación *5.8* relata la relación $\frac{P_S}{P_{AS}}$ a la distancia a lo largo de la fibra. El valor de Δα se puede calcular entonces como la pendiente de una línea que ajusta los valores observados de $ln\frac{P_S}{P_{AS}}(z)$ como una función lineal de la distancia $z$ para una sección de fibra a una temperatura uniforme.

En las aplicaciones de DTS, la precisión de este cálculo dependerá principalmente de lo uniforme que pueda ser la temperatura y la linealidad de los datos del espectro de Raman, pero también estará relacionada con el número de puntos de datos considerados en la regresión.

En ausencia de una extensa sección de referencia de fibra, Δα se puede calcular a partir de dos puntos separados (distancias $z_1$ y $z_2$) a la misma temperatura mediante la reorganización de la ecuación (5.8) para obtener:

$$\Delta\alpha = \frac{ln\frac{P_S(z_1)}{P_{aS}(z_1)} - ln\frac{P_S(z_2)}{P_{aS}(z_2)}}{z_2 - z_1} \qquad \textit{Ecuación (5.9)}$$

## 5.5 Procedimiento de Calibración

En el proceso de calibración, obtenemos el valor de los siguientes parámetros $\Delta\alpha$, C y γ. Son necesarios para calcular la temperatura a partir de la potencia anti-Stokes ($P_{AS}$) y la potencia de alimentación ($P_S$).

Para la calibración, es necesario mantener una sección de la fibra a una temperatura estable y conocida (suponiendo que el valor de este término no presente cambios significativos a lo largo de la fibra).

A continuación, detallaremos el procedimiento de calibración utilizando el software Ap Sensing para calcular la atenuación diferencial, la ganancia y el desplazamiento.

Comenzamos seleccionando “Sensor”, como se muestra en la siguiente figura:

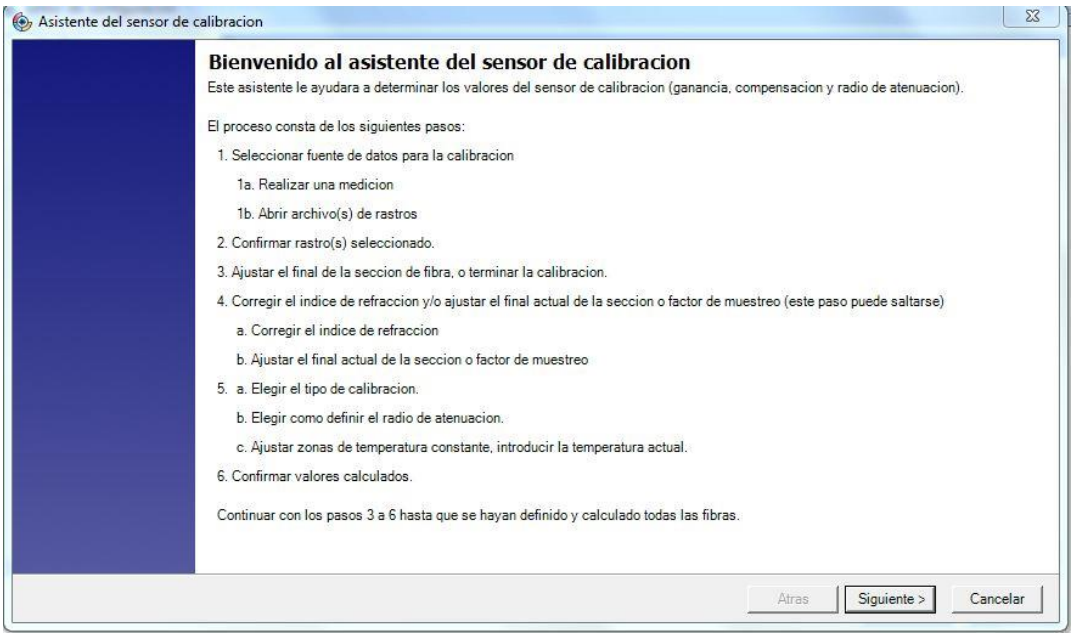



*Figura 5.5.1. Página principal Asistente de Calibración*

En esta ventana, podemos ajustar el índice de refracción y la longitud de la fibra. Al presionar el *Asistente de calibración del sensor*, aparecerá la siguiente ventana que muestra las diferentes opciones y los parámetros de calibración (ganancia, compensación, relación de atenuación entre la banda de Stokes y Anti-Stokes):

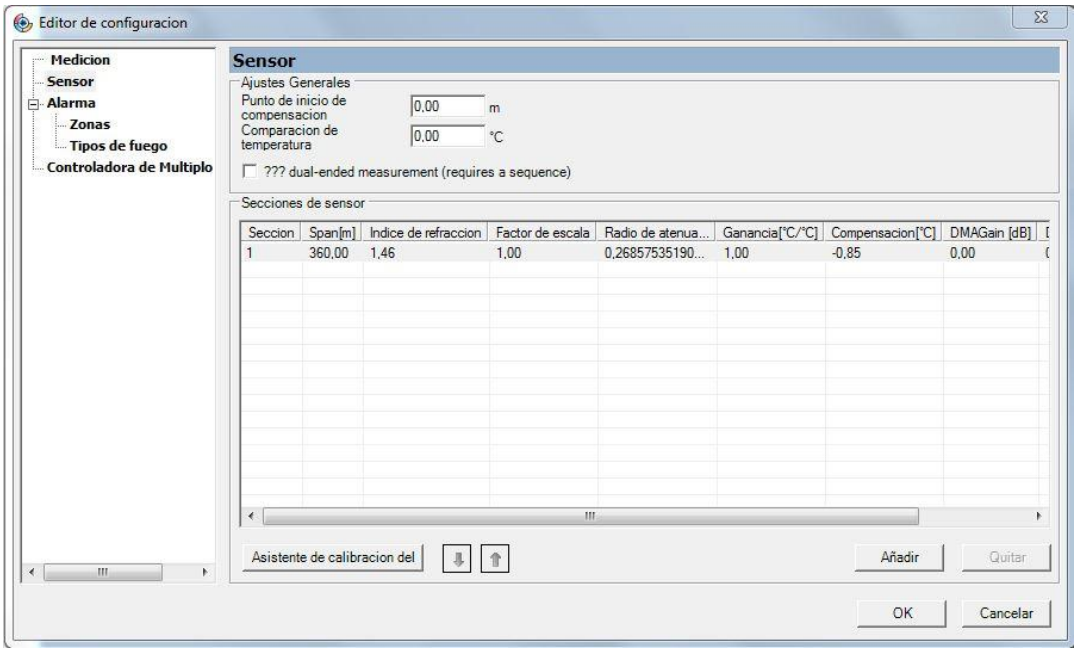



*Figura 5.5.2. Editor de Configuración. Ajustes de índices y longitudes.*

Después de presionar siguiente nos aparecerá una nueva ventana solicitando la fuente de los datos de calibración, que se puede obtener al realizar una medición o al seleccionar un archivo que contenga los datos de calibración guardados anteriormente.

Pulsamos en hacer medición y damos a Siguiente.

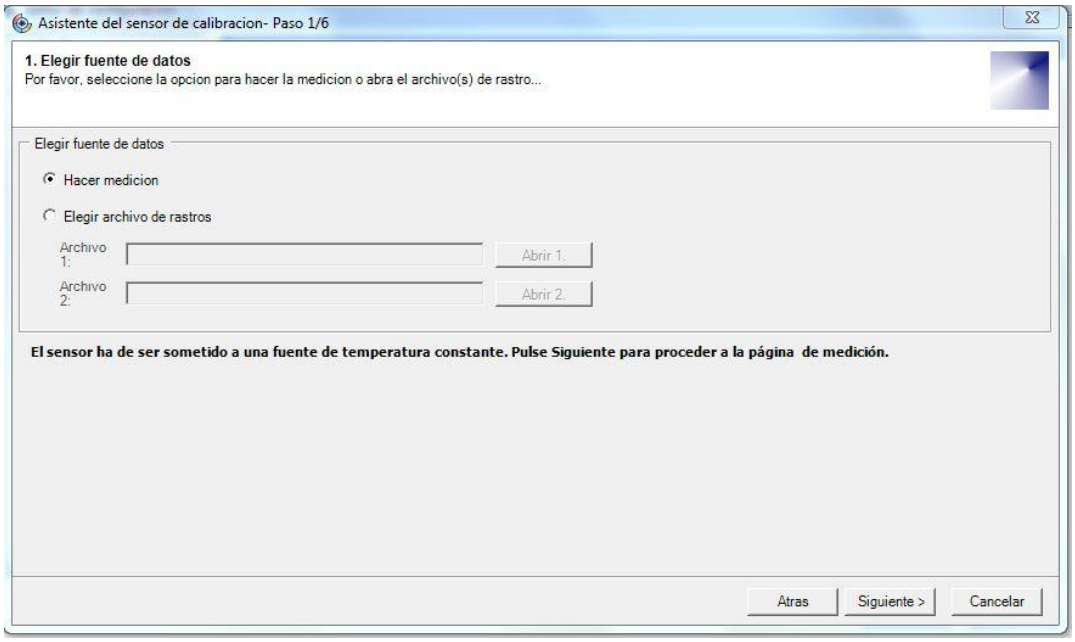



*Figura 5.5.3. Paso 1: Elegir fuente de datos*

Al elegir que los datos de calibración se obtengan de una medición, se abrirá una nueva ventana para iniciar la medición. En esta ventana, solo es necesario ajustar el tiempo de medición:

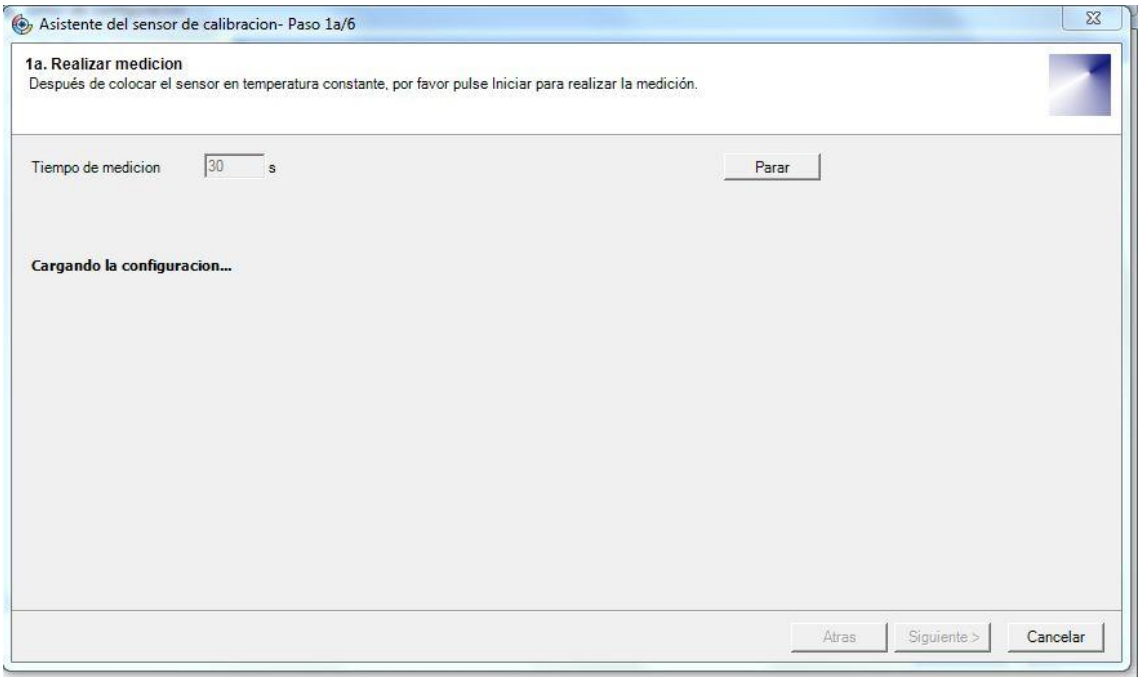



*Figura 5.5.4. Paso 1a : Elegir Tiempos de medición.*

Ajustamos el tiempo de medición a 30s y una vez que la unidad finaliza la medida, muestra la traza siguiente:

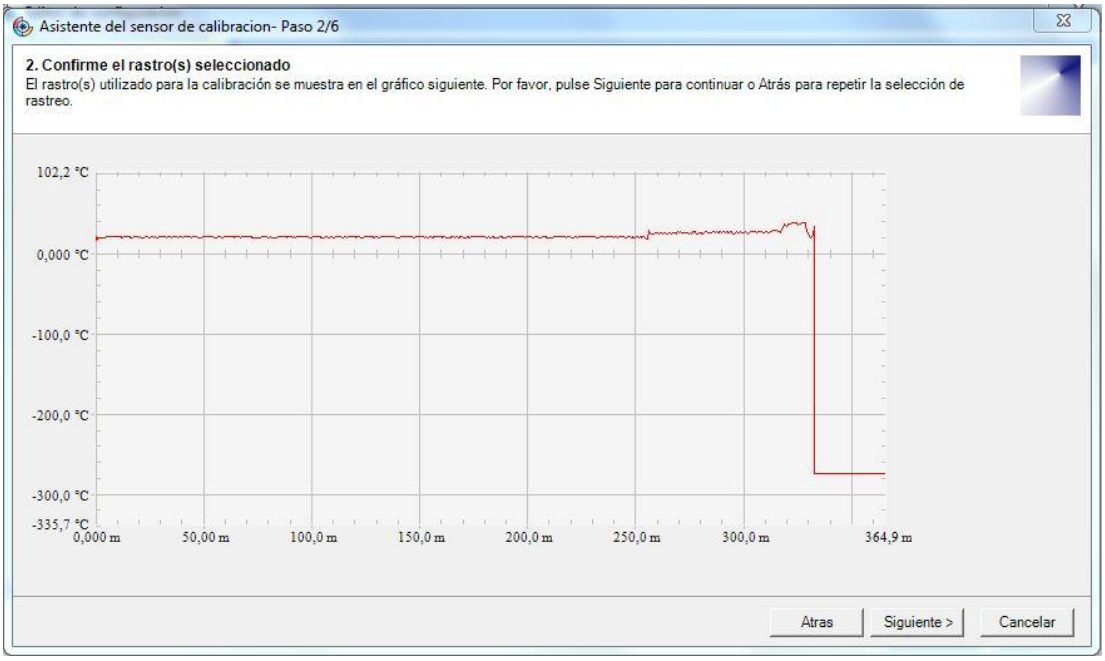



*Figura 5.5.5. Traza del rastro seleccionado.*

En esta ventana vemos donde acaban los metros de fibra, damos a siguiente y hay dos ajustes: por un lado, la distancia total de la fibra y su índice de refracción y, por otro lado, los parámetros de medición.

En la sección "Elija el tipo de calibración" elegimos la segunda, calibración de compensación (Ajusta solo el desplazamiento y la relación de atenuación, se requiere una sección de la fibra a una temperatura constante y conocida).

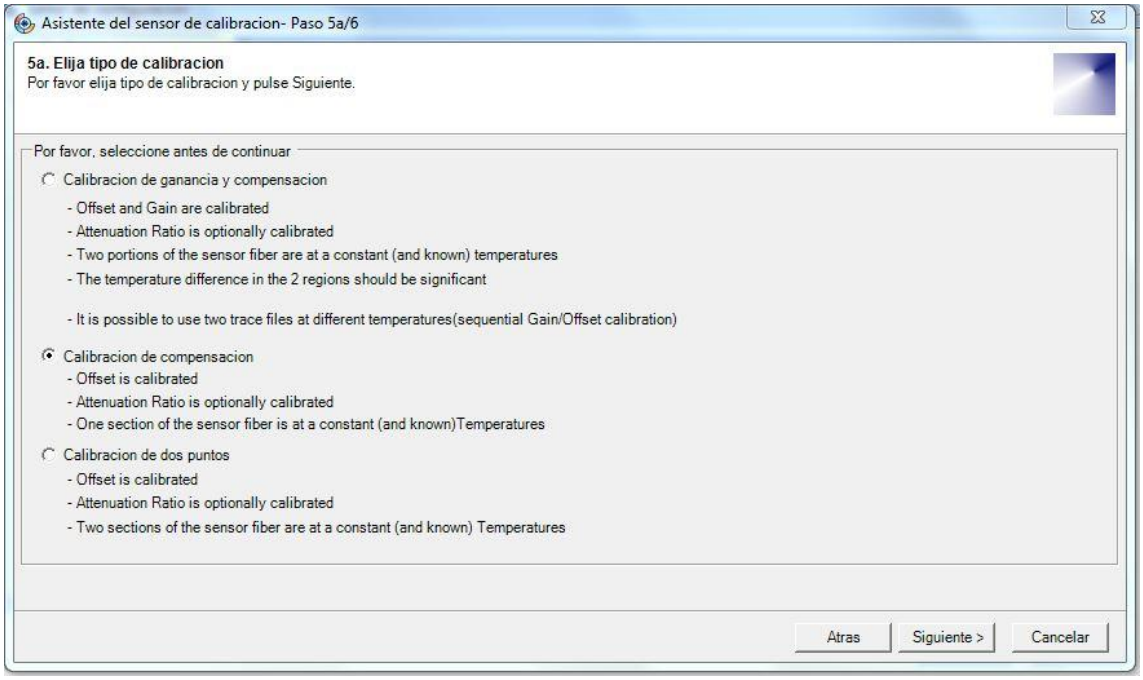



*Figura 5.5.6. Paso elección del tipo de Calibración. Elegir Calibración de compensación.*

En el caso de elegir el ajuste de la compensación y la relación de atenuación seleccionando una sección de fibra que se encuentre a una temperatura constante y conocida (opción 2), se abrirá la siguiente ventana. En esta ventana, es necesario seleccionar la sección y pinchar en "Incluir esta zona en el cálculo del índice de atenuación".

Al presionar para calcular el programa, se calcula el índice de atenuación de la sección seleccionada:

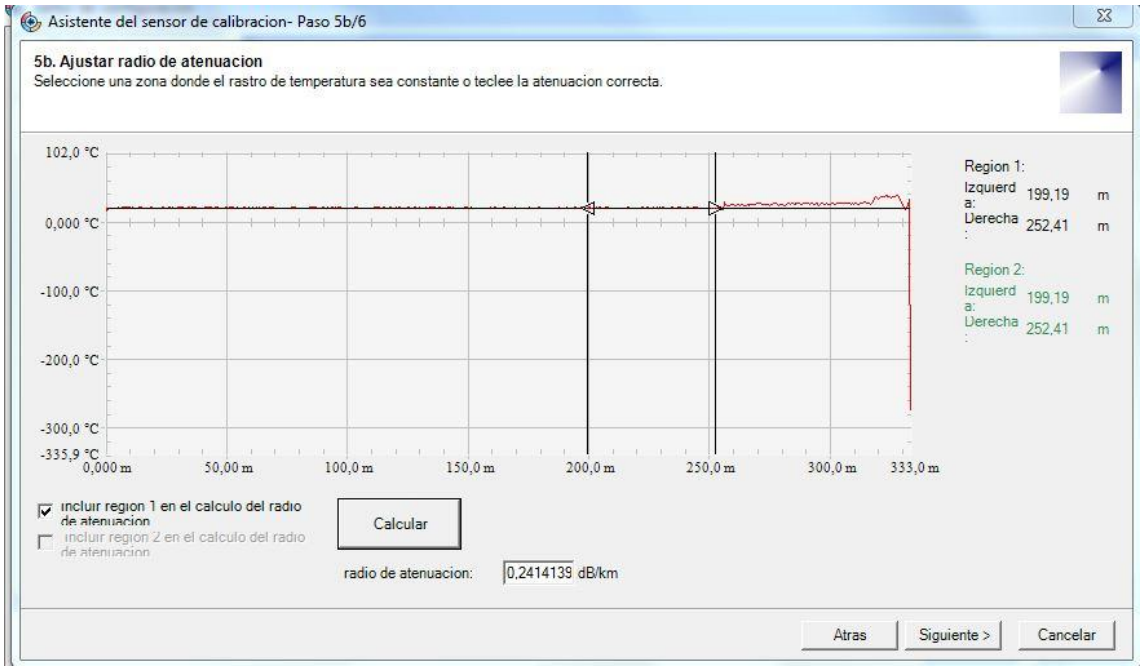



*Figura 5.5.7. Ajuste de radio de atenuación o rastro de temperatura constante.*

Al presionar siguiente, el programa procede a calcular el desplazamiento (debido a pérdidas puntuales). Para llevar a cabo este proceso, es necesario introducir la temperatura real y presionar el botón calcular. El software calcula la temperatura de las potencias AS y S y la compara con la temperatura introducida.

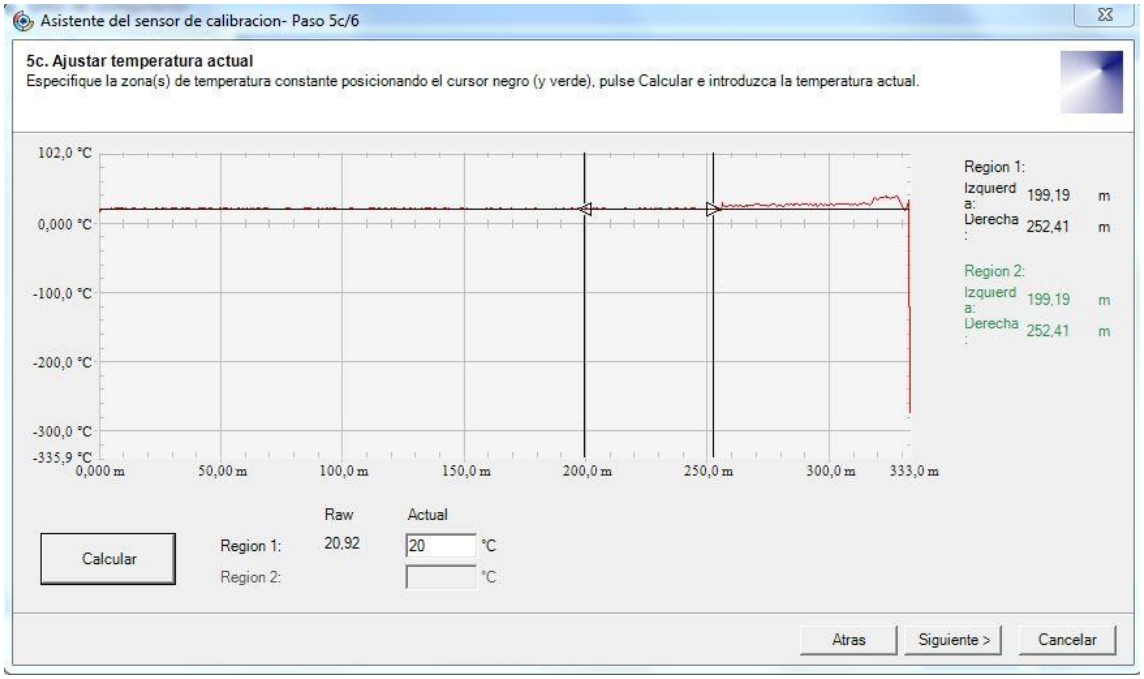



*Figura 5.5.8. Ajuste temperatura actual y zona de temperatura constante.*

Finalmente, se abre la siguiente ventana, que muestra el valor de los parámetros calibrados.

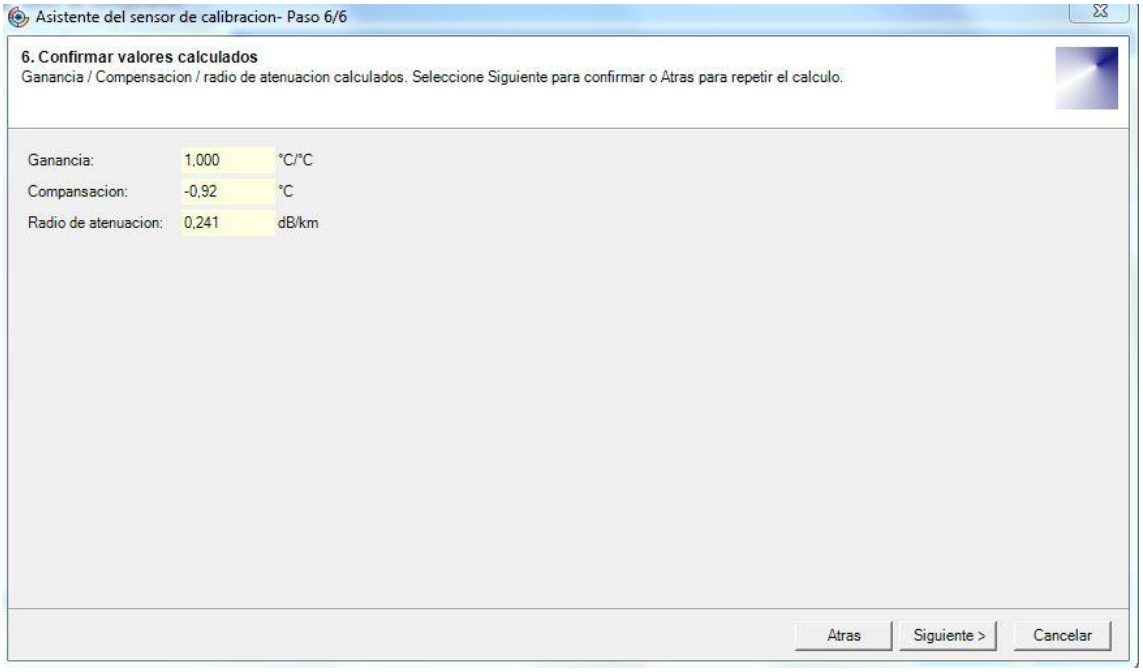



*Figura 5.5.9. Paso final de Calibración.*

Una vez concluido esto, ya estaría completado el proceso de calibración. Normalmente este proceso se realiza una vez y antes de las mediciones.

## 5.6 Puntos de referencia vs. Secciones de referencia

Para obtener parámetros de calibración más precisos y un error general más reducido, los cálculos anteriores se pueden realizar utilizando secciones de fibra a temperatura uniforme en lugar de puntos individuales.

Para cada sección de referencia, se van a determinar los valores representativos para la distancia $z^*$ y la relación de potencia ($\ln\left[\frac{P_S*}{P_{aS}}\right]$).

Estos valores representativos se calculan mejor como la media aritmética de cada uno de ellos a lo largo de la sección de referencia como:

$$z^* = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} z_i \qquad \textit{Ecuación (5.10)}$$

$$ln\frac{P_S^*}{P_{aS}} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} ln\frac{P_S(z_i)}{P_{aS}(z_i)} \qquad \textit{Ecuación (5.11)}$$

Esta última forma es la que se utilizaría después de las medidas para calcular las atenuaciones de las fibras.

## 5.7 Procedimientos de calibración de fibras metálicas

Debido a la alta variación de las pérdidas con la temperatura estos procedimientos de calibración definidos para las fibras convencionales no son adecuados para las fibras metálicas.

Como se comentó anteriormente, se utiliza la relación entre las señales de Stokes y Anti-Stokes para determinar la temperatura y poder corregir las variaciones de pérdida local en las trazas de la señal retro dispersada Raman. Sin embargo, el perfil no uniforme de las pérdidas en la fibra recubierta de metal induce errores en la temperatura estimada. El error de medición en la fibra recubierta de metal de sílice pura aumenta a medida que aumenta la temperatura.

Una calibración dinámica es necesaria para compensar las variaciones en el perfil, porque este tipo de fibras tienen pérdidas dependientes de la temperatura. Los estudios de variaciones de pérdida en función de la temperatura en estas fibras han demostrado que en 10 m de fibra recubierta de oro es posible obtener una diferencia de hasta 20 dB / Km en las pérdidas entre las temperaturas bajas y altas. Además, la atenuación no mantiene el mismo espectro para todas las longitudes de onda. Por lo tanto, el valor de la atenuación diferencial acumulativa está cambiando a medida que se modifica la temperatura

Sumado a estos problemas, la modificación de la configuración del canal y las pérdidas por histéresis exhibidas por las fibras recubiertas de metal pueden cambiar el valor de la atenuación diferencial acumulativa. Por lo tanto, no es posible calibrar el sistema Raman DTS para cada temperatura y guardar los parámetros de calibración para futuras mediciones. Teniendo en cuenta estas consideraciones, es necesario realizar un proceso de calibración después de cada cambio de temperatura. El

procedimiento para llevar a cabo esta calibración dinámica necesaria en estos casos, se explica a continuación.

Para lograr medidas reales, pueden contemplarse en el uso de una sección de la fibra sometida a una temperatura uniforme y similar, requerida para realizar el proceso de calibración. En este caso, los parámetros de calibración obtenidos (incluida la atenuación diferencial) serán similares a los necesarios para realizar una medición correcta. Sin embargo, esta solución no puede ser implementada en todo momento. Proporcionar temperaturas altas y estables en una sección de referencia adicional es realmente complejo en algunos entornos. Otra alternativa es el uso de la misma sección donde se controla la temperatura para llevar a cabo el proceso de calibración. Esta solución es aplicable a entornos donde las temperaturas a medir son estables y uniformes. Esta opción reduce la complejidad adicional de instalar otros sistemas para la calibración. Aquí, se puede detectar secciones sometidas a diferentes temperaturas de forma dinámica y calcular los parámetros de calibración para cada sección por separado

Para llevar a cabo el proceso de calibración propuesto, es necesario determinar que la temperatura es estable en todo el canal. Para lograr este objetivo, las mediciones de temperatura se realizaron periódicamente y la temperatura medida se comparó con la calculada previamente. Si la diferencia entre ambas mediciones es baja (menos de un umbral predeterminado), se consideraría que el perfil de temperatura es estable y, por lo tanto, se puede realizar el proceso de calibración. Este procedimiento es válido para sistemas donde la temperatura cambia lentamente.

Una vez que se realizó esta prueba, el canal se dividió en varias secciones, correspondientes a diferentes tipos de fibras o secciones a diferentes temperaturas. Esta división podría realizarse manualmente, cuando se conocen las propiedades del canal a medir, o detectar automáticamente cambios en la temperatura, o en trazas anti-Stokes/Stokes. En nuestro caso, se ha empleado un algoritmo utilizado en el procesado de imágenes para la detección de bordes. Se utilizó la primera derivada de la traza de temperatura y se buscaron aquellas áreas donde no era igual a cero. Después de delimitar esas áreas, se procedió a calcular los parámetros de calibración (γ, C y Δα) necesarios para obtener un perfil de temperatura correcto.

En primer lugar, la atenuación diferencial, Δα, se determinó para la sección de referencia. El valor de este parámetro se calculó independientemente de C y γ. Además, no es necesario conocer el valor exacto de la temperatura de la sección donde se estimó. A través de las potencias de las señales anti-Stokes y Stokes obtenidas para dos puntos separados a la misma temperatura (z_1 y z_2), Δα se determina por:

$$\Delta\alpha(z_1, z_2) = \frac{\ln\left[\frac{P_S(z_1)}{P_{AS}(z_1)}\right] - \ln\left[\frac{P_S(z_2)}{P_{AS}(z_2)}\right]}{z_2 - z_1} \qquad \textit{Ecuación (5.12)}$$

Sin embargo, para mejorar la precisión de la determinación de este parámetro, consideramos una sección a temperatura uniforme en lugar de puntos individuales.
En esta sección de fibra, las señales AS y S decaen exponencialmente bajo la forma:

$$P_{S/AS}(z) = P_{0S/0AS}(z)\, e^{-(\alpha_{S/AS} z)} \qquad \textit{Ecuación (5.13)}$$

Donde $P_{OS}$ y $P_{OAS}$ son las potencias de las señales AS y S, en el punto de dispersión respectivamente. Tomando el logaritmo natural de la relación entre las dos señales, se obtiene la siguiente expresión:

$$\ln\left[\frac{P_S(z)}{P_{AS}(z)}\right] = \ln\left[\frac{P_{0S}(z)}{P_{0AS}(z)}\right] + \Delta\alpha z \qquad \textit{Ecuación (5.14)}$$

Esta ecuación muestra que $\ln[P_S/P_{AS}]$ varía linealmente con la distancia z. Por lo tanto, Δα se calculó como la pendiente de una línea ajustada de los puntos recuperados de $\ln[P_S/P_{AS}]$ de esta sección.

Una vez que se calculó este parámetro, es posible determinar los otros dos utilizando la temperatura estable y conocida de la sección de referencia. Al fijar γ a su valor teórico, $\gamma = h\Delta v/k = 490K$ para un láser que emite a 1064 nm, se determina la constante C.

Los parámetros γ y C se consideraron constantes e invariantes en el tiempo. Por lo tanto, solo ha sido necesario determinar Δα para las otras secciones. Finalmente, el valor $\int_0^z \Delta\alpha(z')dz'$ en la posición z se calculó como la suma de cada Δα de las diferentes secciones hasta la posición z.

## 5.8 Cálculo de atenuaciones

Es importante ver el comportamiento de la atenuación con la temperatura. Esta atenuación se podrá calcular analíticamente obteniendo la pendiente de la curva de la señal AS y S para cada temperatura alcanzada. En algunos casos será una tarea difícil o casi inalcanzable la de obtener una pendiente real de cada curva debido a las imperfecciones de las fibras, si son ruidosas o tienen algún tipo de error introducido en la medida. Para el cálculo de la atenuación de la fibra a lo largo de X metros es necesario obtener las potencias de As y S así como la diferencia de ambos. Para cada tipo de fibra haremos un estudio de la atenuación a lo largo de la fibra a cada punto de subida de temperatura, teniendo así una medida distribuida de la atenuación en función de la temperatura y de cada tipo de material que recubre la fibra óptica.

Así, para cualquier tipo de fibra que vamos a realizar el estudio, se tienen las siguientes ecuaciones a partir de las cuales se podrá obtener la atenuación.

En primer lugar las potencias tanto de Stokes como Anti-Stokes se definen de la siguiente forma:

$$P_s(z) = P_0 \frac{1}{1-e^{\frac{-\Delta E}{kT}}} \Gamma_s e^{-(\alpha_p+\alpha_s)z} \qquad \textit{Ecuación (5.15)}$$

$$P_s(z) = Ce^{-(\alpha_p+\alpha_s)z} \qquad \textit{Ecuación (5.16)}$$

Haciendo logaritmos:

$$\ln[P_s(z)] = \ln[C] - (\alpha_p + \alpha_s)z \qquad \textit{Ecuación (5.17)}$$

Lo que equivale a una recta:

$$y = b + ax \qquad \textit{Ecuación (5.18)}$$

Donde:

$$y = \ln[P_s(z)] \qquad \textit{Ecuación (5.19)}$$
$$b = \ln[C] \qquad \textit{Ecuación (5.20)}$$
$$a = -(\alpha_p + \alpha_s) yx = z \qquad \textit{Ecuación (5.21)}$$

Lo mismo para la componente Anti-Stokes.

Además de las potencias de Stokes y Anti-Stokes, existe una relación entre estas descrita a continuación:

$$LR(z) = \frac{P_{As}(z)}{P_s(z)} = e^{\frac{-h\Delta v}{kT}} e^{-\Delta\alpha z} \qquad \textit{Ecuación (5.22)}$$

$$\ln[LR(z)] = \frac{P_{As}(z)}{P_s(z)} = \frac{-h\Delta v}{kT} - \Delta\alpha z \qquad \textit{Ecuación (5.23)}$$

Lo que equivale a una recta:

$$y = b + ax \qquad \textit{Ecuación (5.24)}$$

Donde

$$y = \ln[\mathrm{LR(z)}] \qquad \textit{Ecuación (5.25)}$$

$$b = \frac{-\mathrm{h}\Delta\mathrm{v}}{\mathrm{kT}} \qquad \textit{Ecuación (5.26)}$$

$$a = \Delta\alpha\mathrm{z} \ \mathrm{y} \ \mathrm{x} = \mathrm{z} \qquad \textit{Ecuación (5.27)}$$

Una vez hechos estos cálculos, con las gráficas obtenidas de las medidas de las señales de Stokes y Anti-Stokes, programando en una herramienta como Matlab estas ecuaciones, sacaríamos la pendiente de cada una de las medidas de temperatura y con esto, el valor de atenuación de esa fibra óptica a lo largo del horno en cada instante de subida o bajada de temperatura.

## 5.9 Matlab: Script y figuras

Para cada tipo de fibra hemos decidido hacer una serie de ciclos térmicos que permitan conocer en profundidad el comportamiento de estas fibras con la temperatura y nos permita decidir cuál es la más apropiada para altas temperaturas.

Empezando por las fibras de Oro y Cobre, que son las primeras medidas que se realizaron dentro del horno hasta los 450ºC, se realizaron dos ciclos de subida de temperatura desde los 25ºC hasta los 450ºC con un paso de 25ºC. Después se repitió este ciclo de nuevo, esta vez en un solo día (las medidas tardan en realizarse debido al tiempo que requiere calentar y/o enfriar el horno). Una vez hechos los dos ciclos enteros, se hicieron dos medidas: una medida constante de 450ºC de unas seis horas y otra medida de bajada (enfriamiento) a 25ºC durante 10-12 horas. Por último, se hicieron ciclos de subidas y bajadas para ver el comportamiento de la fibra, las pérdidas y cómo se comporta frente a cambios bruscos de temperaturas en poco tiempo. La subida de temperatura es de aproximadamente una hora y las constantes de subida y bajada (25ºC y 450ºC) se hicieron en dos horas más o menos (debido a que para bajar de los 450ºC a la temperatura ambiente había que dejarlo unas diez horas o más para que se enfriara). Después las de Aluminio y Polyimida se hicieron igual pero hasta los 400 grados.

Es importante resaltar que todas las medidas se realizaron bajo las mismas condiciones y en un tiempo mínimo entre unas y otras. Además al hacer las medidas con las fibras de dos en dos, podemos afirmas que estas medidas o resultados son bastante interesantes y sin apenas errores por cambios de condiciones.

### Medidas de la Temperatura frente a la distancia:

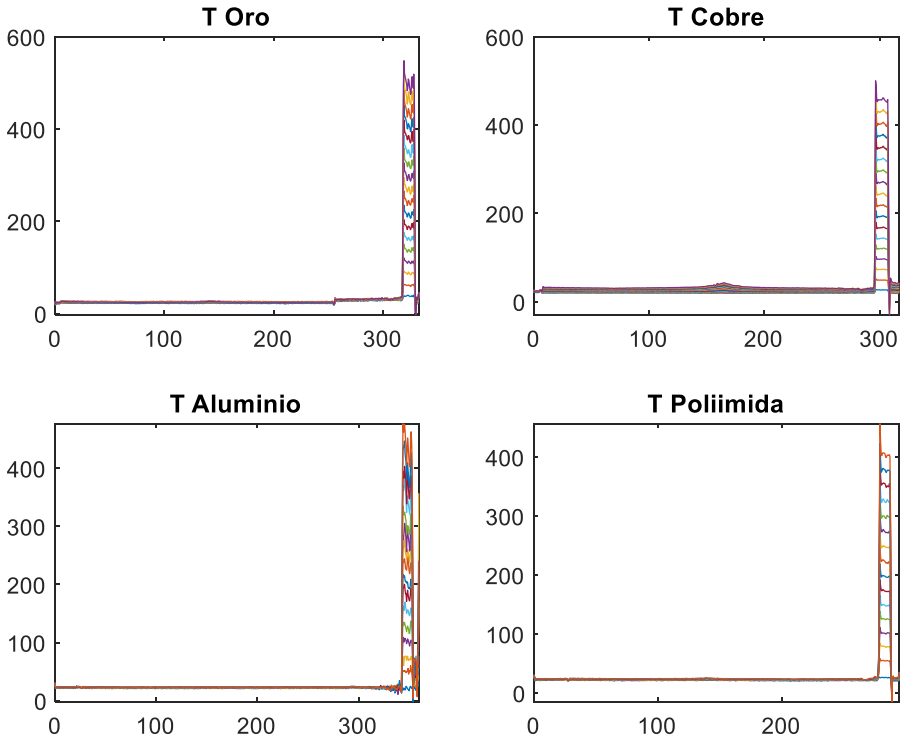



*Figura 5.9.1. Medida de temperatura de las fibras de Oro y Cobre (hasta 450 grados) y Aluminio y Polyimida (hasta los 400 grados) frente a la distancia total del montaje.*

Las grandes variaciones de la temperatura frente a la distancia dentro del horno darán lugar a pequeños errores en las medidas. La figura *5.9.1* muestra la medida total (de todo el montaje completo) de la temperatura frente a la distancia. La fibra que se encuentra fuera del horno es la que podemos ver donde la gráfica es más lineal, a una longitud de unos doscientos y pico o trescientos metros. La fibra dentro del horno es la que se encuentra donde empezamos a ver todas las variaciones de temperatura. Si hacemos zoom en estas gráficas y vemos lo que ocurre dentro del horno tendremos las figuras siguientes.

## Medidas de la Temperatura frente a la distancia dentro del horno:

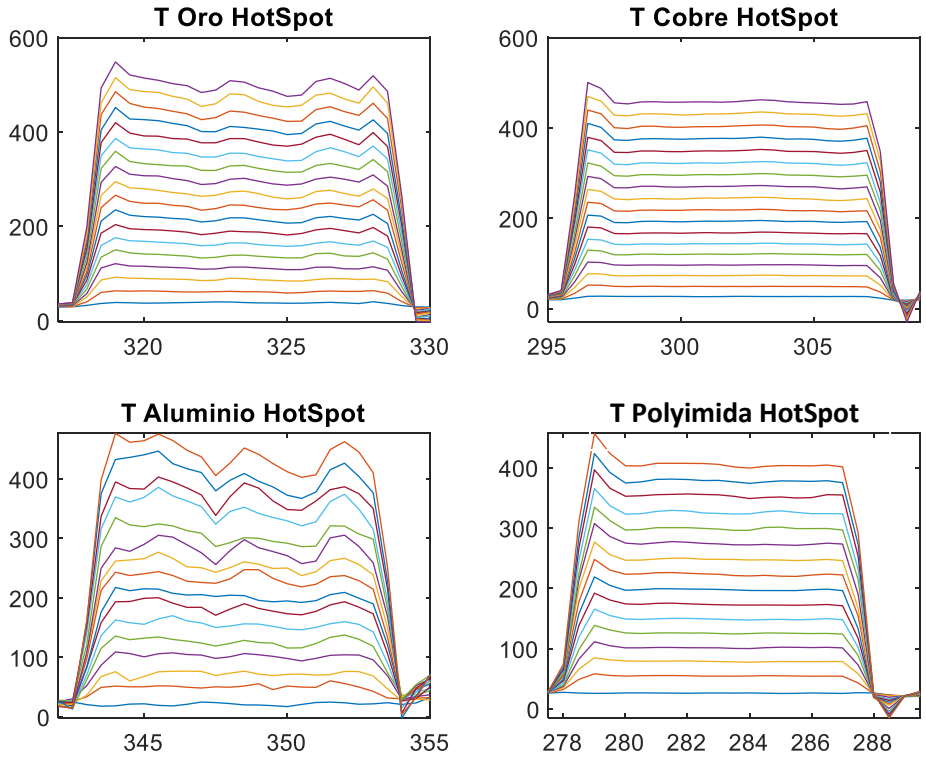



*Figura 5.9.2 Medida de la temperatura de las fibras de Oro y Cobre (hasta 450 grados) y Aluminio y Polyimida (hasta los 400 grados) dentro del horno en relación con la longitud de la fibra dentro.*

Como podemos observar las fibras que mejor se comportan frente a la temperatura, que tienen menos ruido y son más lineales, son las fibras de Cobre y Polyimida. Dentro del horno la fibra de Oro tiene un comportamiento poco lineal, es más lineal a bajas temperaturas y conforme aumentamos la temperatura la variación de la temperatura medida es cada vez mayor. Estas pequeñas aunque notorias variaciones provocarán no llegar a unos resultados óptimos o ciertos. Por otro lado, el Aluminio es aún más cambiante, la temperatura medida presenta muchas variaciones a lo largo de la fibra y esos “picos” influirán en los resultados ya que añade un ruido que nos dificultará el cálculo de las atenuaciones de la fibra. Sin embargo, con las fibras de Cobre y Polyimida no podemos decir lo mismo. En la figura de la fibra del Cobre se puede ver que las medidas de temperaturas son prácticamente lineales y la pendiente es casi nula para todas las temperaturas medidas, esto es algo muy interesante, ya que no sufre ni añade posibles errores como las anteriores.

Las medidas que se realicen con esta fibra tendrán unos resultados con mayor exactitud debido a la linealidad de las medidas. También es muy interesante la fibra de Polyimida que a baja temperatura es muy lineal y apenas hay variaciones.
Si bien hacemos un estudio de las señales de Stokes y Anti-Stokes de estas fibras obtenemos las siguientes figuras.

## Medidas de la señal AS frente a la distancia:

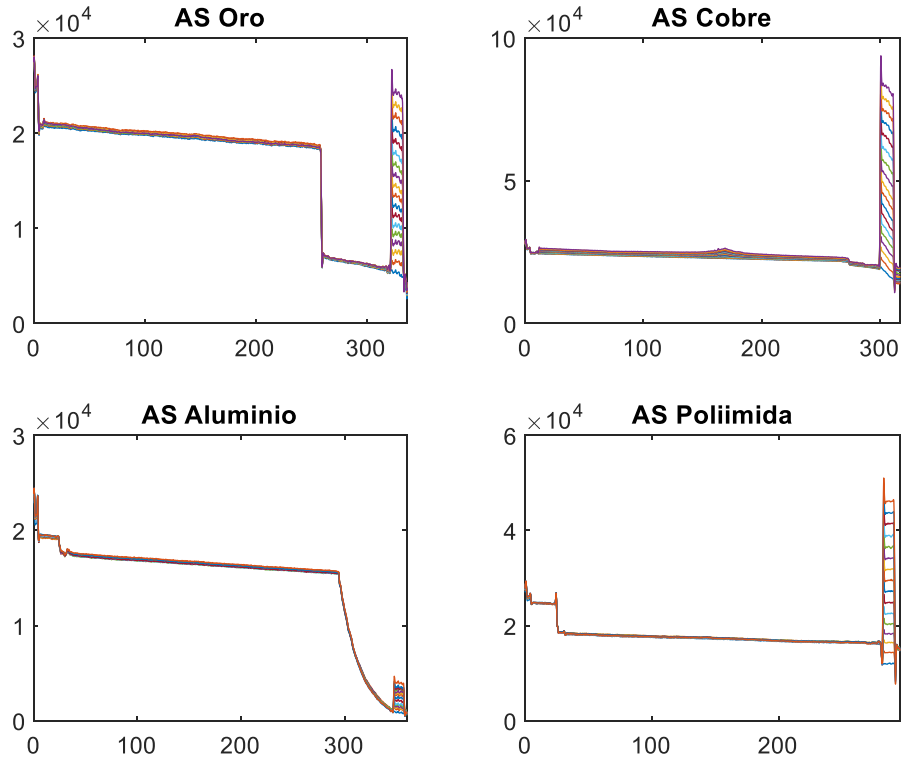



*Figura 5.9.3. Señales AS de cada tipo de fibra dentro y fuera del horno*

En la figura de la fibra de Oro se observa que la señal decae donde comienza la fibra con cubierta de Oro ya que a bajas temperaturas tiene una atenuación alta. En la fibra de Aluminio ocurre algo parecido pero la caída no es tan brusca. En las figuras de Anti-Stokes de Cobre y Polyimida apenas hay variación de la señal entre la fibra convencional y estas fibras, ya que a temperatura baja no presentan una atenuación elevada.

Tenemos que recordar que la señal Anti-Stokes es fuertemente dependiente de la temperatura y que se combina con la señal de Stokes para obtener la atenuación.

En estas fibras a temperatura ambiente no tienen una gran variación de la señal, pero a medida que aumenta la temperatura la potencia de la señal también aumenta.
Vamos a observar ahora más detalladamente esta señal pero sólo en el tramo en el cual la fibra está dentro del horno:

## Medidas de la señal AS frente a la distancia dentro del horno:

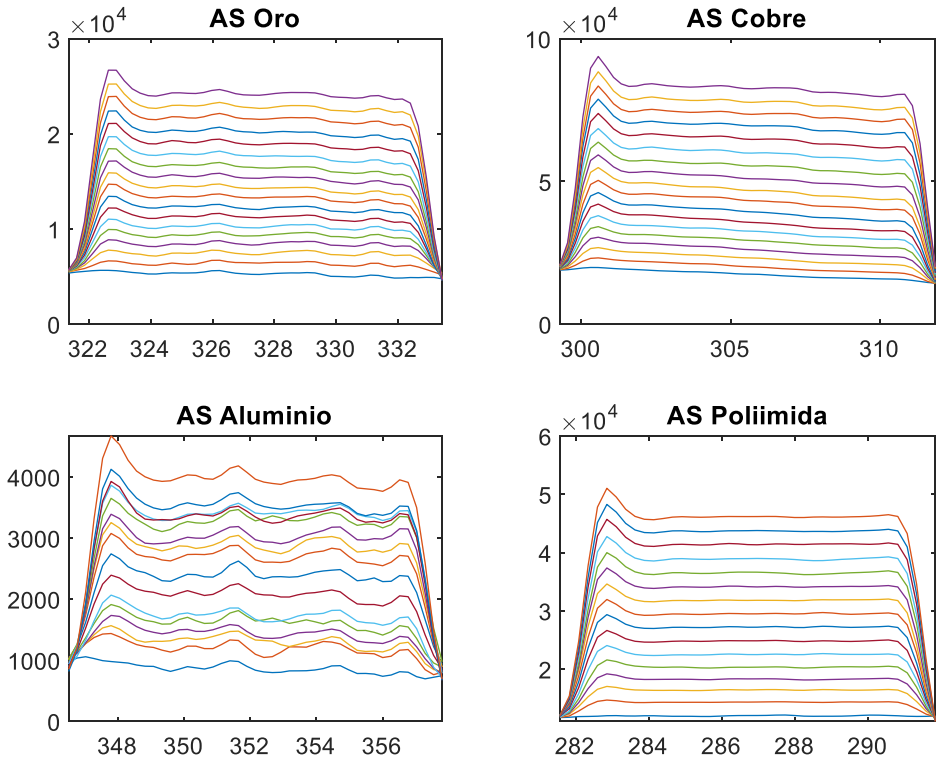



*Figura 5.9.4 Medida de la señal AS de las fibras de Oro y Cobre (hasta 450 grados) y Aluminio y Polyimida (hasta los 400 grados) dentro del horno en relación con la longitud de la fibra dentro.*

En estas gráficas en las que se muestra el tramo de fibra dentro del horno podemos observar de nuevo lo que comentábamos antes. Las fibras de Cobre y Polyimida tienen una variación de la señal muy pequeña, lo que las hace muy atractivas e interesantes para futuros proyectos. A temperatura ambiente la fibra de Polyimida tiene un nivel de señal casi nulo y a medida que aumenta la temperatura aumenta la potencia de Anti-Stokes. En la fibra de Cobre pasa igual con la diferencia de que a temperatura ambiente el nivel de señal tiene un valor pequeño y es más o menos lineal. A medida que la temperatura aumenta el nivel de potencia aumenta.

En la fibra recubierta de Oro la señal AS presenta pequeñas variaciones en cada medida de temperatura. Sin embargo, la fibra de Aluminio es la fibra que presenta una mayor variación de la señal AS, la señal es muy ruidosa tiene un nivel de señal muy cambiante en todas las medidas de temperatura.

## Medidas de la señal S frente a la distancia:

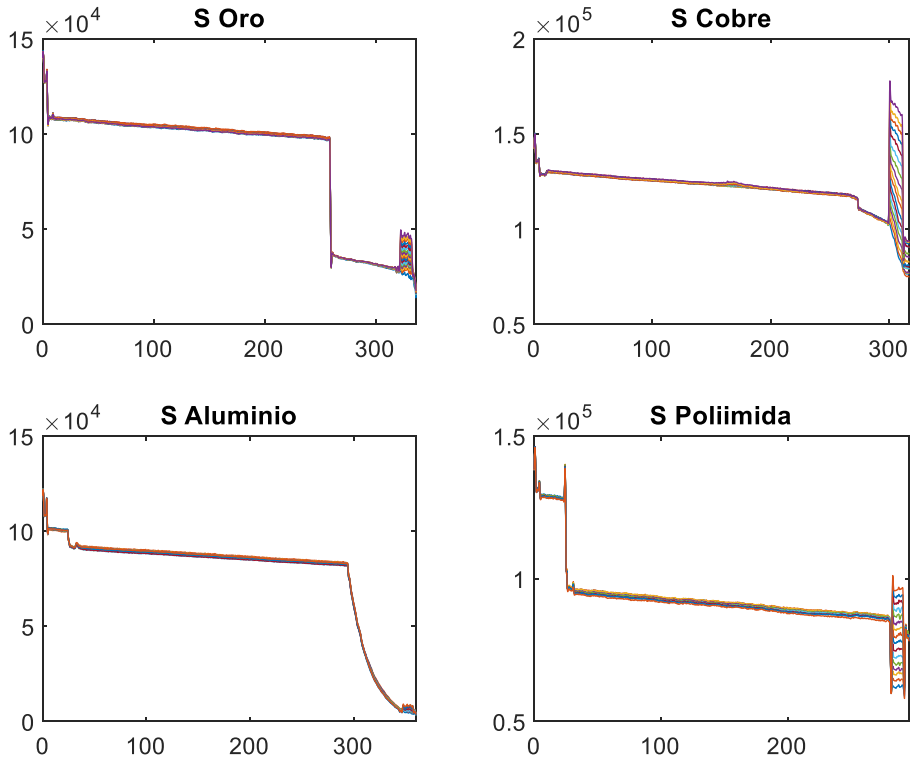



*Figura 5.9.5 Medida de la temperatura de las fibras de Oro y Cobre (hasta 450 grados) y Aluminio y Polyimida (hasta los 400 grados) dentro del horno en relación con la longitud de la fibra dentro.*

Como se ha visto antes con la señal de Anti-Stokes, en la señal de Stokes ocurre algo parecido y también se pueden observar las caídas donde empieza la fibra dentro del horno, en las fibras de Oro y Aluminio que tienen más atenuación a temperatura ambiente.

## Medidas de la señal S frente a la distancia dentro del horno:

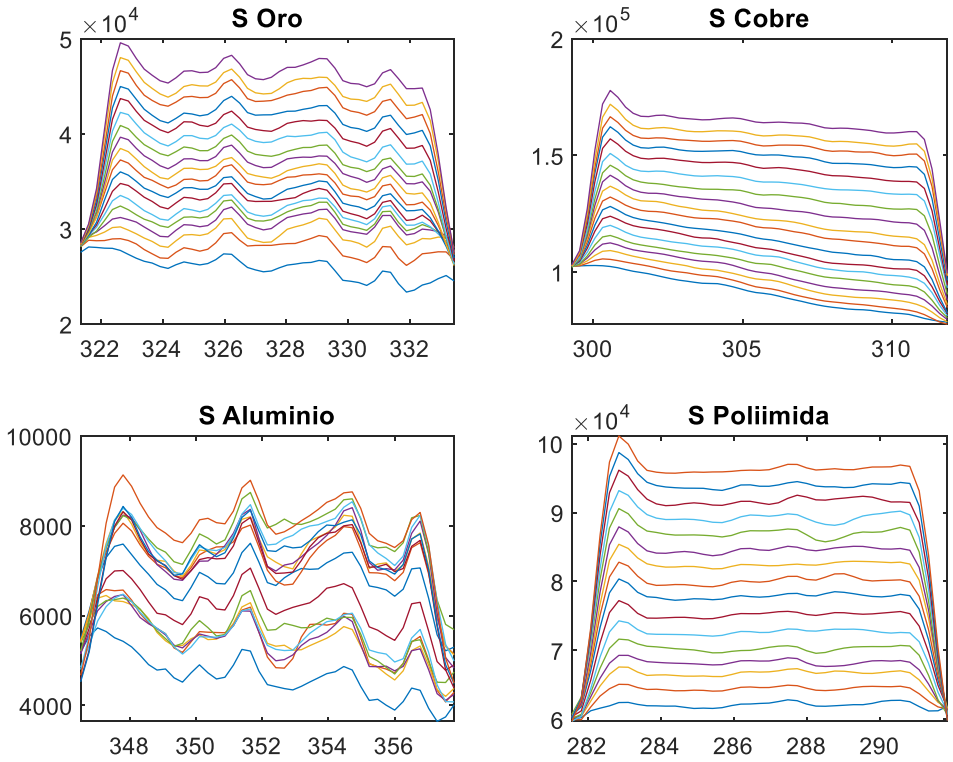



*Figura 5.9.6 Medida de la señal S de las fibras de Oro y Cobre (hasta 450 grados) y Aluminio y Polyimida (hasta los 400 grados) dentro del horno en relación con la longitud de la fibra dentro.*

Como conclusión al observar estos resultados, podemos afirmar que la mejor opción es la fibra de Cobre ya que podemos determinar con bastante exactitud la atenuación que presenta para cada temperatura, ya que la señal es casi una recta en toda la fibra dentro del horno y con esto podemos calcular la atenuación (pendiente de la recta) como se ha explicado en apartados anteriores.

La fibra de Polyimida también tiene un buen comportamiento, a temperatura ambiente tiene unas variaciones mínimas y a medida que aumenta la temperatura esas variaciones en la señal disminuyen. Pero debido a que hemos usado una longitud de la fibra muy pequeña no podemos determinar con exactitud la atenuación, a diferencia de la de Cobre.

En las fibras de Oro y Aluminio, y sobre todo en la fibra de Aluminio, tienen unas variaciones muy abruptas en la señal y esto hace difícil obtener la pendiente, esto quiere decir que no podemos obtener la atenuación con exactitud, incluso en pequeños tramos ya que varía mucho. Estos “picos” se deben a dos términos:

1. Las micro curvaturas: una micro curvatura en una fibra óptica es causada por imperfecciones microscópicas en la geometría de la fibra que se dan como resultado del proceso de fabricación o como diferentes parámetros propios de la fibra. Esto hace que diferentes rayos de luz se escapen del núcleo produciendo pérdidas, que cambian con la temperatura. Esta curvatura se produce principalmente en las fibras de metal.

2. Las macro curvaturas: los rayos de luz de mayor orden se escapan del núcleo multimodal provocando pérdidas. Esto se debe a una curvatura de pequeño radio creado por doblamientos de la fibra y son las que provocan las variaciones ruidosas de las señales de Stokes y Anti-Stokes para una misma temperatura a lo largo de la fibra.

Como regla práctica, puede considerarse un radio de curvatura mínimo de valor igual a diez veces el diámetro del tubo que aloja al módulo de fibras.

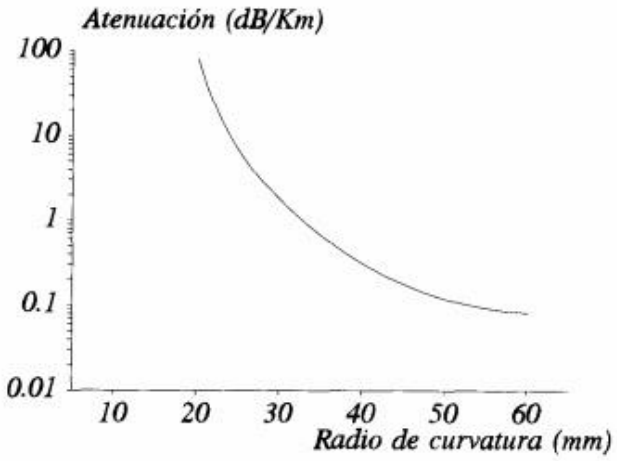



*Figura 5.9.7 Pérdidas por curvatura en la fibra*

A partir de los resultados mostrados anteriormente se ha calculado la temperatura media para los tramos de fibra que están dentro del horno y se ha comparado con la temperatura teórica marcada en el horno.

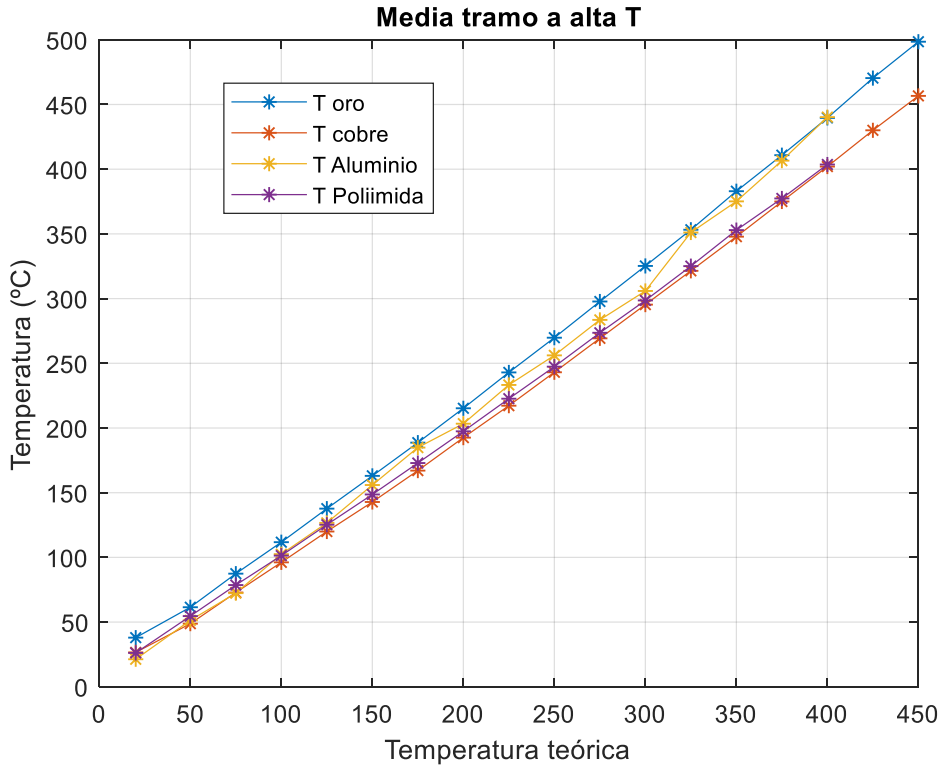



*Figura 5.9.8. Temperatura real frente a la temperatura teórica*

En la figura *5.9.8* observamos que la temperatura (T) de la fibra de Oro tiene un ligero error en la medida, por ejemplo a la temperatura teórica de $300\,℃$ la temperatura medida es unos $25\,℃$ más. La fibra de Aluminio también tiene errores y cuando el horno llega a los $300\,℃$ el error se dispara y la temperatura medida es aproximadamente 340ºC.
Las fibras de Cobre y Polyimida siguen una distribución casi constante con apenas errores en las medidas.

En la siguiente figura se muestra el error a partir de la medida así como la varianza de cada fibra:

## Medidas del error y la varianza de cada fibra:

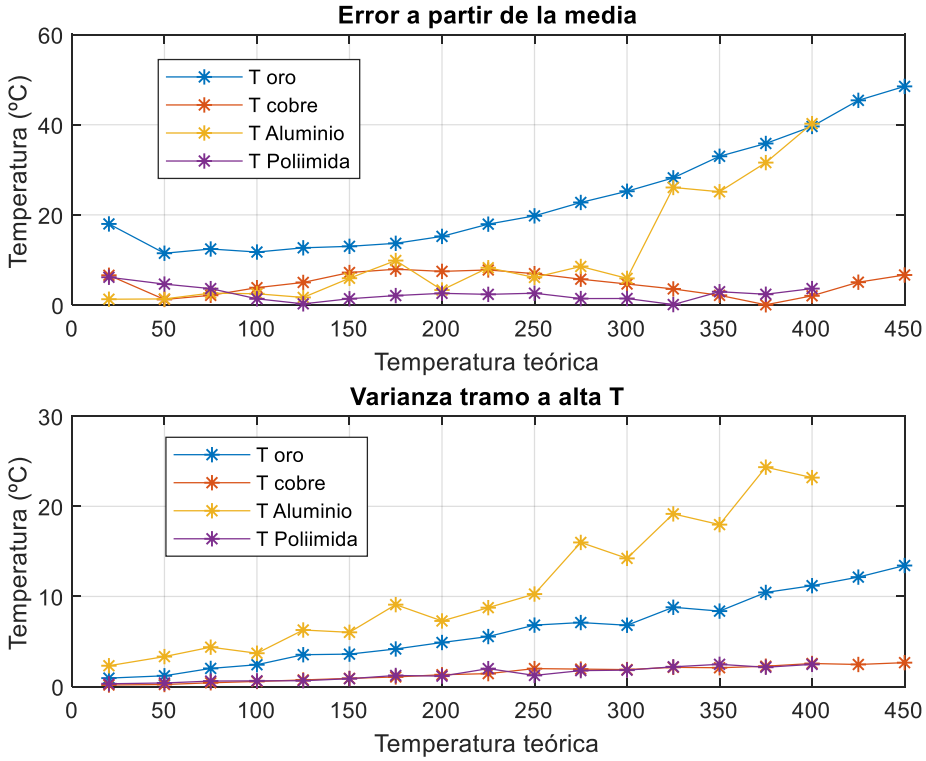



*Figura 5.9.9. Errores y varianzas de cada fibra*

El objetivo es tener un error mínimo y una varianza muy baja. Los errores a partir de la medida se ven afectados por las micro curvaturas descritas anteriormente. Este error se calcula haciendo la diferencia entre las dos temperaturas de la siguiente manera:

$$\Delta T = |T_{horno} - T_{medida}| \qquad \textit{Ecuación (5.28)}$$

Y como el término $\Delta\alpha = f(T)$, depende de la temperatura, también la atenuación dependerá de este error en las microcurvaturas y del error en la medida.

La varianza se ve afectada por las macro curvaturas descritas anteriormente. Las fibras de Oro y Aluminio tiene una varianza alta, y por consiguiente unos resultados peores, ya que el objetivo es tener una mínima varianza.

La fibra de Aluminio tiene un error que se dispara a partir de los $300℃$ al igual que la fibra de Oro que tiene un error en torno a los $20℃$ hasta los $300℃$ a partir de la cual se

dispara con un error en la medida de unos $40℃ - 50℃$. Las fibras recubiertas de Cobre y Polyimida son las que presentan menor error y menor varianza.

## Medidas AS y S normalizados:

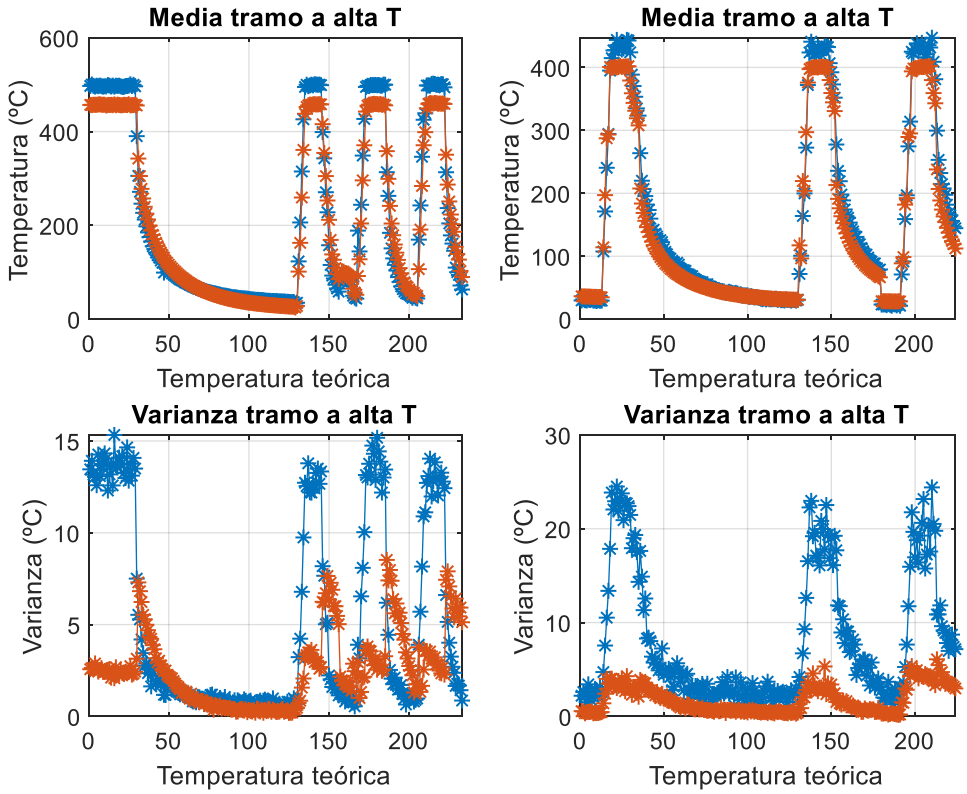



*Figura 5.9.10 Figuras izquierda: Oro (azul) y Cobre (naranja); derecha: Aluminio (azul) y Polyimida (naranja).*

Después de los ciclos anteriores, hemos sometido a las fibras a ciclos de subida y bajada de forma brusca. La subida la hemos realizado en una hora, hasta alcanzar el máximo de la temperatura permisible para ambas (Oro y Cobre hasta los 450 grados, Aluminio y Polyimida hasta los 400 grados) y una vez alcanzado este valor hemos recogido una cantidad de muestras a esta temperatura constante durante varias horas. Para el descenso o el ciclo de bajada hemos realizado lo mismo a la inversa. En estas figuras podemos observar que las dos figuras de la izquierda son las fibras de Oro y Cobre y las figuras de la derecha son las de Aluminio y Polyimida.
En las figuras de Oro y Cobre (izquierda), en la parte superior, se observa que la fibra de Oro (azul) tiene una varianza muy alta en comparación con la del Cobre, teniendo un comportamiento peor que la del Cobre. En la figura de la media, las dos fibras tanto la de Oro como la de Cobre tienen un comportamiento bastante ideal aunque la fibra de Oro podemos ver que tiene un error en la medida de la temperatura, midiendo unos 100 grados por arriba de su temperatura teórica. Las figuras de la derecha, Aluminio y Polyimida, tienen una media buena a excepción del Aluminio que le ocurre parecido al Oro y mide más grados de temperatura que la temperatura teórica. La varianza de estas fibras es mínima en la fibra de Polyimida y bastante notable en la fibra de Aluminio (azul).

Esta varianza es un valor que nos interesa bastante a la hora de elegir una fibra por su buen comportamiento a altas temperaturas. Cuanto menor sea esa varianza mejor será nuestra fibra.

# *Capítulo VI*

# *Conclusiones y Líneas futuras*

El estudio de las atenuaciones de las fibras ópticas recubiertas de Oro, Cobre, Aluminio y Polyimida a altas temperaturas mediante la técnica de Sensado Distribuido por efecto Raman ha sido el objetivo principal de este trabajo. Las fibras metálicas han tenido unos resultados visibles anteriormente y que junto con la Polyimida conforman el conjunto de fibras a estudiar su atenuación y comportamiento a altas temperaturas. Después de haber explicado las posibles degradaciones, las características de cada una de las fibras, sus rangos de temperatura así como sus posibles errores visibles en la medida, hemos podido concluir una serie de conclusiones en vista a los resultados obtenidos.

De estas medidas podemos sacar varias conclusiones. La primera conclusión es que aquellas fibras que soportan altas temperaturas, como el oro, no tienen por qué tener el mejor resultado en cuanto a atenuaciones y posibles errores en las medidas. La fibra de Oro ha tenido un comportamiento bastante poco lineal y las pequeñas variaciones inducidas por micro curvaturas y pérdidas han hecho que la varianza sea muy elevada, algo que nos define esta fibra como poco aconsejable para aplicaciones en las que tenga que tener un error bajo. Al igual que la fibra de Oro, la de Aluminio también se comporta de una manera similar, llegando a medir temperaturas más altas de la temperatura teórica, desencadenando en una variación en su varianza, resultando menor que la del Oro pero más elevada que las fibras restantes: Cobre y Polyimida.

Como conclusión final las fibras de Cobre y Polyimida son las que poseen mejores prestaciones y un menor error que las anteriores, teniendo una baja varianza y realizando una medida casi exacta de la temperatura respecto a la temperatura teórica. Si tuviésemos que elegir entre estas dos fibras, la mejor candidata sería la fibra de Cobre.

No ha sido tarea fácil la de elaborar, estudiar y medir todas las fibras de altas temperaturas que hemos tenido que utilizar. Como se ha descrito antes, el horno es una herramienta difícil de manejar, tarda mucho en enfriar y hay que tener una paciencia y determinación a la hora de introducir cada una de las fibras debido a su facilidad de rotura o curva inadecuada. A pesar de esto, las medidas que se han obtenido en el laboratorio, han sido buenas y nos han dado una idea global del estudio de estas fibras de altas temperaturas y su posible utilidad futura en alguna aplicación industrial como las ya mencionadas anteriormente.

Como líneas futuras podemos definir que la fibra con mejores resultados y por esto la candidata a usarla en aplicaciones a altas temperaturas, por su comportamiento frente a la temperatura y sus atenuaciones, sería la fibra de Cobre, a pesar de sus limitaciones de temperaturas y su problema de oxidación que podrían, en un futuro, solventarse sería la fibra que elegiríamos para aplicaciones industriales en las que se trabaje a altas temperaturas.

# BIBLIOGRAFÍA

José Luis Bueno Escobedo. Estudio de la Influencia de las Vibraciones Mecánicas en la Trasmisión de Luz Dentro de una Fibra Óptica. Maestría en Ciencias en Materiales. Noviembre 2012, Chihuahua.

Félix Rodríguez Barrios. Estudio de los métodos de mejora de sensores Brillouin distribuidos en fibra óptica mediante amplificación Raman. Departamento de Electrónica. Universidad de Alcalá. 2013.

Rubén L. Boroschek, Ph. D. ¿Qué podemos hacer con instrumentación en ingeniería civil?. Universidad de Chile. 2016.

David Krohn. Fiber Optic Sensors: Fundamentals and Applications. Septiembre 2015.

Sally M. Maughan. Distributed Fibre Sensing using microwave heterodyne detection of spontaneous Brillouin Backscatter. Doctor of Philosophy. Department of Electronics and Computer Science. University of Southhampton. Septiembre, 2001.

AbhisekUkil, Senior Member, IEEE, Hubert Braendle and Peter Krippner. Distributed Temperature Sensing: Review of Technology and Applications. May, 2012.

[7] Ismail Laarossi, Ruben Ruiz-Lombera, María Angeles Quintela, Jesús Mirapeix, Domingo Lima, David Solana and Jose Miguel Lopez-Higuera Senior Member, IEEE. Ultra-High Temperature Raman-based distributed optical fiber sensor with gold-coated fiber.

[8] Ismail Laarossi. Máster en Física, Instrumentación y Medio Ambiente. Facultad de Ciencias. Octubre 2014.

Gerd Keiser, Optical fiber communications. McGraw-Hill New York, 1983.

Diego F Grosz, Sistemas de Comunicación por Fibra Óptica de Alta Capacidad. Departamento de Física y Matemática, 2004.

Raman Kashyap, Fiber bragg gratings. Academic press, 1999.

Página Oficial Ap Sensing.

Mark B. Haunser, Francisco Suárez, Kenneth E. Glander, Nick van de Giesen, John S. Selker and Scott W. Tyler. Calibrating Single-Ended Fiber-Optic Raman Spectra Distributed Temperature Sensing Data. Sensors, 21 November 2011.

[15] Pablo Vallejo de la Cueva. Modelado de la dispersión estimulada de Brillouin en sistemas sensores distribuidos BOTDA. Universidad de Cantabria. Octubre 2015.