

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PUCP

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS SENSORES
FIBRA ÓPTICA RAMAN Y BRAGG PARA EL
INTERNET DE LAS COSAS**

**Trabajo de investigación para obtener el grado académico de
BACHILLER EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN
INGENIERÍA DE LAS TELECOMUNICACIONES**

AUTOR:

Álvaro Burga Larco

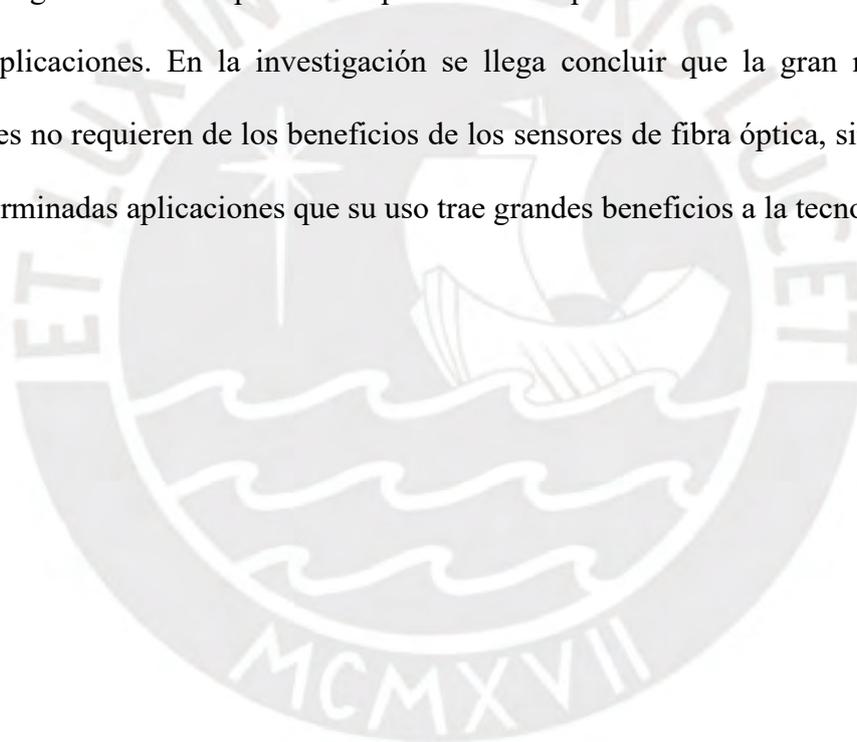
ASESOR:

Manuel Augusto Yarlequé Medina

Lima, Diciembre del 2020

Resumen

El IoT como tecnología requiere el uso de sensores para poder extraer los datos del entorno para poder automatizar procesos y actividades en sus distintas aplicaciones. Por otra parte, los sensores de fibra óptica son una nueva tecnología que trae un buen número de beneficios en el sensado, tales como la inmunidad a la interferencia electromagnética y la capacidad para sensar múltiples puntos utilizando un solo sensor, en este caso la fibra óptica. Por tanto, el objetivo principal de esta investigación es la evaluación de los sensores de fibra óptica de Raman y de rejilla de Bragg para las aplicaciones principales del IoT. De igual manera se piensa comparar el desempeño de estos dos sensores en las distintas aplicaciones. En la investigación se llega a concluir que la gran mayoría de aplicaciones no requieren de los beneficios de los sensores de fibra óptica, sin embargo, si hay determinadas aplicaciones que su uso trae grandes beneficios a la tecnología.



Índice

Resumen	i
Índice	ii
Índice de imágenes	iv
Índice de tablas	v
Introducción.....	vi
Capítulo 1	1
Presentación del tema	1
1.1. Área de las telecomunicaciones	1
1.2. Contextualización	1
1.3. Objetivos, alcance y justificación	3
1.4. Desarrollo de la investigación.....	4
Capítulo 2	5
Investigación bibliográfica	5
2.1. Conceptos previos.....	5
2.1.1. Scattering en la fibra óptica.....	5
Rayleigh scattering	6
Raman Scattering.....	8
2.1.2. Reflectometría	9
Reflectometría en el dominio del tiempo (OTDR).....	12
Arquitectura del OTDR	16
Resolución espacial	17
Efecto del ruido en el OTDR.....	18
2.2. Sensores de fibra óptica	19
2.2.1. Sensor Raman distribuido	19
Efecto de la temperatura en Raman Scattering.....	19
Sistema de sensado distribuido Raman	21
Limitaciones	23
2.2.2. Sensor por rejilla de Bragg.....	23
Fundamentos de rejilla de Bragg.....	23

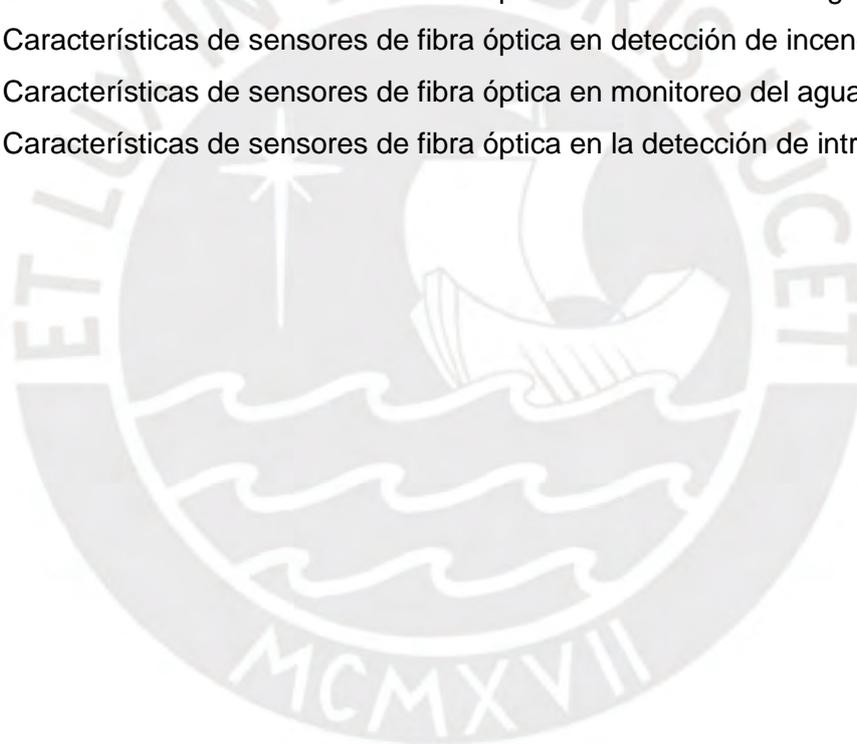
Efecto de la temperatura en la rejilla de Bragg	25
Efecto de la tensión en la rejilla de Bragg	26
Sistema de sensado con rejilla de Bragg	26
Limitaciones	28
2.3. Internet de las cosas (IoT).....	29
2.3.1. Capa de dispositivos.....	30
2.3.2. Capa de red.....	32
2.3.3. Capa de aplicación	33
Capítulo 3:	35
Estudio comparativo	35
3.1. Sensores de fibra óptica en estacionamiento de autos inteligente	35
3.2. Sensores de fibra óptica detección de fallas en obras civiles	37
3.3. Sensores de fibra óptica en medición del trafico	39
3.4. Sensores de fibra óptica en iluminación inteligente	41
3.5. Sensores de fibra óptica en detección de incendios.....	44
3.6. Sensores de fibra óptica en control del agua.....	48
3.7. Sensores de fibra óptica en detección de intrusos.....	51
Conclusiones.....	54
Bibliografía.....	55

Índice de imágenes

Figura 1.1. Numero de dispositivos conectados por año.....	2
Figura 2.1. Distintos tipos de dispersión según la longitud de onda	5
Figura 2.2. Fundamentos de Rayleigh Scattering	7
Figura 2.3. Fundamentos de Raman Scattering.....	9
Figura 2.4. Topologías de sensado en la fibra	11
Figura 2.5. Patrón del OTDR	15
Figura 2.6. Arquitectura del OTDR.....	16
Figura 2.7. Rejilla de Bragg.....	24
Figura 2.8. Sensado con rejilla de Bragg con OSA y pulso de banda ancha.....	27
Figura 2.9. Sensado con rejilla de Bragg laser con longitud de onda variable y fotodetector.....	28
Figura 2.10. Arquitectura del IoT.....	30
Figura 2.11. Tipos de sensores en el IoT.....	31
Figura 3.1. Estacionamiento de autos inteligente actualmente.....	35
Figura 3.2. Detección de presencia.....	42
Figura 3.3. Detección de incendios con fibra óptica.....	46
Figura 3.4. Monitoreo de calidad del agua en peceras con IoT.....	49

Índice de tablas

Tabla 2.1. Diferencia de intensidades de los tipos de Back Scattering.....	6
Tabla 2.2. Variables de la potencia de backscattering	13
Tabla 2.3. Variables de la energía del pulso	14
Tabla 2.4. Variables en la resolución espacial	18
Tabla 2.5. Parámetros de intensidad de scattering Raman anti Stokes	20
Tabla 2.6. Aplicaciones principales del IoT	34
Tabla 3.1. Características de sensores de fibra óptica en estacionamiento inteligente	37
Tabla 3.2. Características de sensores de fibra óptica en detección de fallas en obras civiles.....	39
Tabla 3.3. Características de sensores de fibra óptica en medición de tráfico	41
Tabla 3.4. Características de sensores de fibra óptica en iluminación inteligente	44
Tabla 3.5. Características de sensores de fibra óptica en detección de incendios	47
Tabla 3.6. Características de sensores de fibra óptica en monitoreo del agua.....	51
Tabla 3.7. Características de sensores de fibra óptica en la detección de intrusos.....	53



Introducción

Una tecnología muy aclamada por la sociedad es el IoT, el cual es una red que busca interconectar todos los dispositivos a una misma red de forma que se puedan comunicar. Una de las principales aplicaciones de esta tecnología es de automatizar los procesos y las actividades diarias en la vida de las personas. Esto con el fin de mejorar su calidad de vida. Para poder automatizar los procesos el IoT usa diversos sensores para poder extraer la información del entorno y así poder tomar decisiones.

Por otra parte, en estos últimos años se ha descubierto el potencial de usar la fibra óptica como elemento de sensado. Estos novedosos sensores son inmunes a la interferencia electromagnética y utilizan las fibras estándar de telecomunicaciones para el sensado. Además, la particularidad de estos sensores es que permiten el sensado en múltiples puntos a lo largo de la fibra.

Por tanto, el presente trabajo busca identificar el beneficio del uso de los sensores de fibra óptica, especialmente del sensor distribuido de Raman y el sensor de rejilla de Bragg, en las distintas aplicaciones principales del IoT. De igual forma, se comparará el rendimiento de estos dos sensores.

En el primer capítulo se desarrollará la problemática y justificación de la investigación, al igual que se definirán los objetivos de esta. En el segundo capítulo se describirá el funcionamiento de los sensores de fibra óptica mencionados anteriormente, al igual que se describirá el funcionamiento de la red IoT con sus principales aplicaciones. En el capítulo 3 se realizará el análisis comparativo entre los sensores de fibra óptica descritos anteriormente en las distintas aplicaciones principales del IoT. Por último, se desarrollarán las conclusiones de la investigación y se mostrarán las referencias.

Capítulo 1

Presentación del tema

1.1. Área de las telecomunicaciones

El área de la carrera de ingeniería de las telecomunicaciones correspondiente a este proyecto, es el área de comunicaciones ópticas. Esto se debe a que el objeto principal de esta tesis es usar la fibra óptica como sensor, por tanto, se deben aplicar todos los conocimientos adquiridos en los cursos de comunicaciones ópticas para poder realizar esta tesis. Los conocimientos adquiridos de estos temas fueron enseñados en el curso de comunicaciones ópticas en la Pontificia Universidad Católica del Perú y de los cursos de “*advanced optical fiber lab*” y “*optical fiber sensors*” en la Universidad Politécnica de Barcelona.

De igual manera se usan conceptos de radiofrecuencia relacionados principalmente con la teoría de propagación de los campos electromagnéticos debido a que el elemento que se usa para obtener información es la luz que viaja por la fibra óptica, y como la luz se puede interpretar como una onda electromagnética se pueden aplicar todas las propiedades y conocimientos adquiridos de esta temática. Estos conocimientos fueron adquiridos en los cursos de física 4 y en especial el curso de teoría de campos electromagnéticos aplicados a las telecomunicaciones de la Pontificia Universidad católica del Perú.

1.2. Contextualización

El Internet de las cosas, mejor conocido como IoT por sus siglas en inglés, es una tecnología novedosa que está viniendo con fuerza en estos últimos años. Esta tecnología, como su nombre lo indica busca que todos los dispositivos se encuentren conectados a

una red y que estos informen constantemente su estado de tal forma que puede ser configurado desde un equipo remoto tal como un celular. Además de los equipos ya existentes, se planean incorporar sensores de forma que se tenga un conocimiento del medio a través de la medición de distintas variables físicas y que de esta manera los equipos por si mismos puedan tomar acciones de acuerdo a la cuantificación de estas variables [1], [2]. El número de dispositivos IoT crece exponencialmente con el paso de los años tal como se observa en la imagen 1.1.

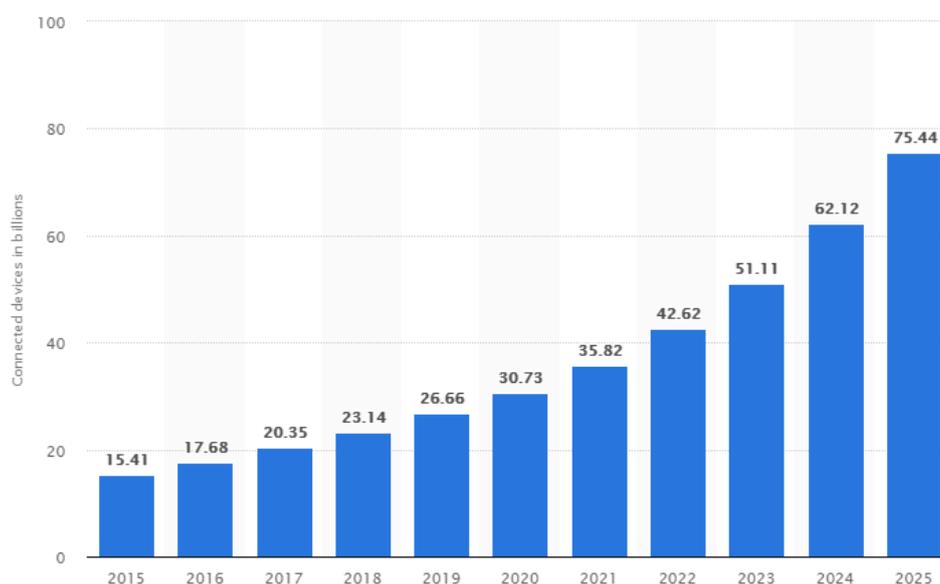


Figura 1.1. Numero de dispositivos conectados por año

Fuente [3]

Por otra parte, desde no hace mucho se tienen sensores de fibra óptica los cuales tienen una forma de sensado novedosa utilizando la fibra óptica como elemento de sensado. Estos sensores, tienen diversos beneficios, tales como la inmunidad ante la interferencia electromagnética presente, la capacidad de utilizar fibras estándar de telecomunicaciones, lo cual facilita su obtención, y lo resistente que es ante los distintos medios, lo cual reduce

el costo de mantenimiento. Por ello una oportunidad de mejora sería poder aplicar esta clase de sensores en el IoT para distintos casos de aplicaciones.

1.3. Objetivos, alcance y justificación

El objetivo principal sería identificar el funcionamiento de los distintos tipos de sensores de fibra óptica y como estos aportarían en un mejor sensado de las variables físicas para el IoT de manera que se puedan traer beneficios adicionales con respecto a los sensores actuales.

Específicamente se enfocará a los sensores ópticos de fibra óptica de Raman y rejilla de Bragg, los cuales son sensores de fibra óptica capaces de medir la temperatura con gran precisión y en el caso de la rejilla de Bragg adicionalmente permite sensar la tensión. Además, el sensor Raman es un sensor distribuido, los cuales son muy escasos y podrían ser muy útiles para disminuir la cantidad de sensores que se pueden implementar en el IoT.

Con lo definido anteriormente se piensa dar respuesta a las siguientes preguntas:

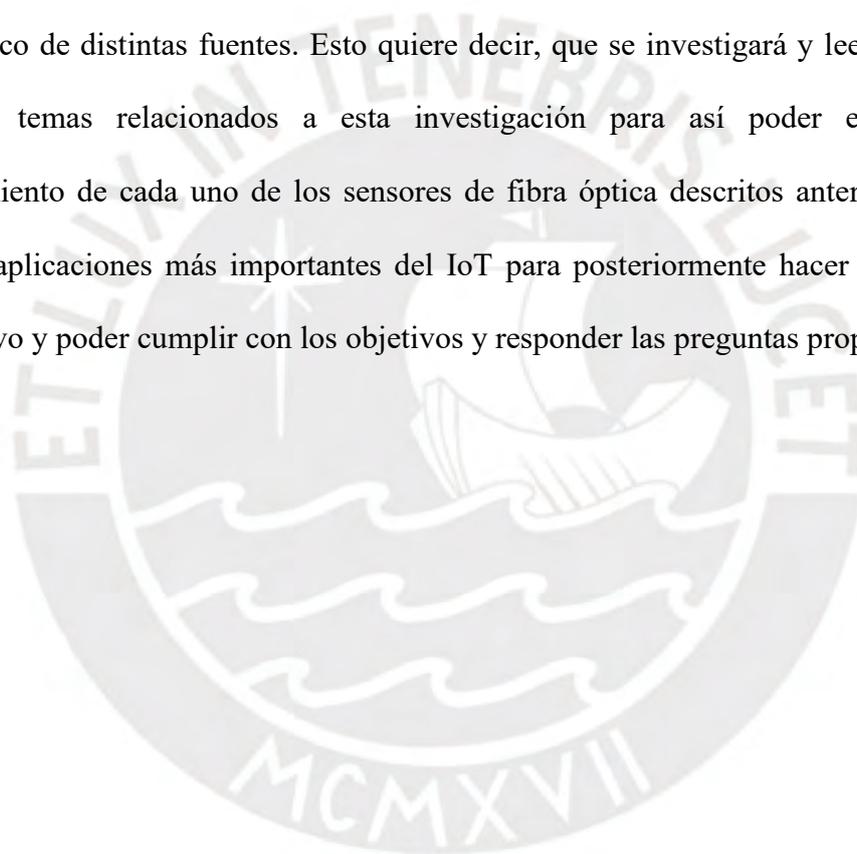
- ¿Cómo se podría usar cada uno de los distintos sensores de fibra óptica descritos anteriormente para mejorar la obtención de la data del IoT?
- ¿Qué valor adicional brinda estos sensores con respecto a los sensores convencionales que se usan en el IoT?

Es importante el desarrollo de esta investigación, ya que tanto el sensado por fibra óptica y el IoT son temas novedosos y en estudio los cuales se complementan, ya que el IoT necesita de sensores para poder cumplir con sus funcionalidades. De igual manera, como se explicó anteriormente, el sensado por fibra óptica en la mayoría de sensores actúan de una forma distribuida, es decir que son capaces de obtener información a lo largo de toda

la fibra, característica que no se encuentra casi presente en la mayoría de sensores convencionales para medir temperatura o presión. Además, se puede evaluar la precisión de estos sensores y otros beneficios que puedan resultar en una implementación ideal del IoT. Por último, se podrán hallar distintas futuras aplicaciones del IoT para estos sensores, los cual facilitaría el desarrollo de futuras investigaciones.

1.4. Desarrollo de la investigación

Esta investigación es una investigación bibliográfica, por tanto, se realizará un análisis bibliográfico de distintas fuentes. Esto quiere decir, que se investigará y leerá bastante sobre los temas relacionados a esta investigación para así poder entender el funcionamiento de cada uno de los sensores de fibra óptica descritos anteriormente y sobre las aplicaciones más importantes del IoT para posteriormente hacer un análisis comparativo y poder cumplir con los objetivos y responder las preguntas propuestas.



Capítulo 2

Investigación bibliográfica

2.1. Conceptos previos

2.1.1. Scattering en la fibra óptica

El scattering o dispersión es la principal causa de atenuaciones en la fibra óptica el cual es debido a la dispersión de la luz que se da cuando la luz interactúa con distintos componentes intrínsecos de la fibra óptica. Los sensores de fibra óptica obtienen la información a través del back scattering, es decir la porción dispersada que regresa al inicio de la fibra[4], [5].

Además, como se observa en la figura 2.1 se tienen principalmente 3 tipos de scattering que se usan para el sensado, Raman, Brillouin y Rayleigh y el espectro correspondiente para una luz incidente con una longitud de onda de λ_0 .

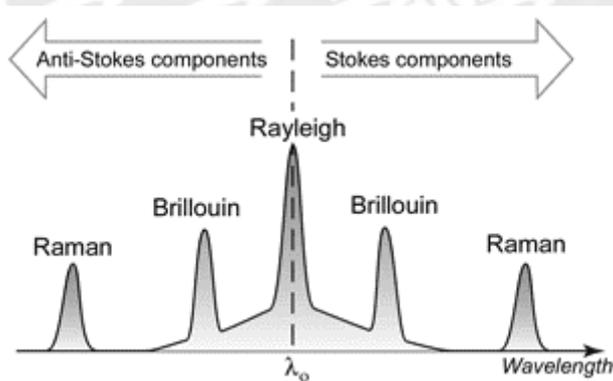


Figura 2.1. Distintos tipos de dispersión según la longitud de onda

Fuente [6]

De igual forma, en la tabla 2.1, se puede apreciar los distintos porcentajes relativos al back scattering que presentan cada uno de los componentes descritos anteriormente.

Tabla 2.1. Diferencia de intensidades de los tipos de Back Scattering

Fuente [7]

Tipo de Back Scattering	Porcentaje del back Scattering total	Diferencia en dB respecto al Rayleigh
<i>Rayleigh</i>	97%	0dB
<i>Raman</i>	0.5%	25 dB
<i>Brillouin</i>	2.5%	15 dB

A continuación, se describirán los back scattering Rayleigh y Raman, como se producen y sus características principales.

Rayleigh scattering

En primer lugar, está el Rayleigh scattering el cual es el componente de dispersión de mayor potencia que se da cuando la luz viaja en la fibra óptica con un aproximado del 96.5% de la potencia total reflejada [5].

Este tipo de dispersión se debe a la falta de homogeneidad del coeficiente de reflexión de la fibra al momento de su fabricación [4]. Cuando la fibra óptica se fabrica, el vidrio se dopa con ciertos elementos químicos que hace que su índice de refracción sea distinto al del cladding (revestimiento) de tal manera que se pueda generar la reflexión total interna y la luz se pueda propagar en la fibra como se explicó anteriormente. Sin embargo, el dopaje genera que algunas partículas del elemento del dopaje muy pequeñas, menores a la longitud de onda, se queden en la fibra. Estas partículas tienen un índice de refracción distinto al vidrio, por tanto, cuando la luz incide e interactúa con estas partículas, genera

una dispersión [4]. Como la partícula es menor a la longitud de onda, toda la luz incidente se dispersa omnidireccionalmente, es decir en todas las direcciones. Por ende, la mayor porción de potencia óptica que interactúa con este elemento sale de la fibra por medio de la refracción que se da en el núcleo de la fibra, debido a que un buen porcentaje de ángulos que han sido dispersados no cumplen con el ángulo crítico para que se produzca la reflexión total interna. Por tanto, esta energía se pierde [5]. Se puede apreciar este fenómeno en la imagen 2.2.

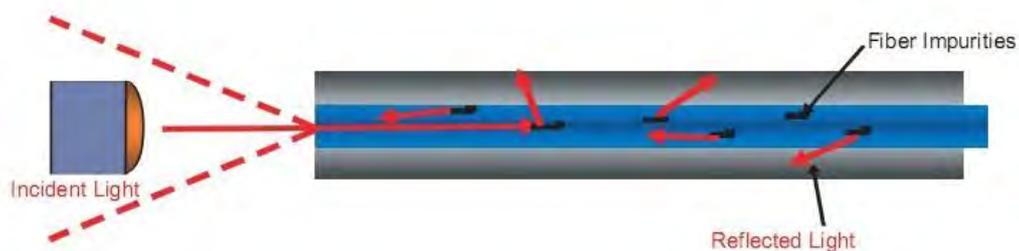


Figura 2.2. Fundamentos de Rayleigh Scattering

Fuente [8]

Cabe resaltar que, como se mencionó anteriormente, un tipo de scattering muy importante es el back scattering. Este tipo de scattering trae consigo información valiosa con la que se puede sensar distintos eventos que se dan en la fibra óptica.

Además, el Rayleigh scattering, a diferencia de los siguientes tipos de scattering que se verá a continuación mantiene la misma longitud de onda que la luz que incide en la fibra. Y este tipo de scattering independiente de variables externas tales como son la temperatura y la presión [5].

Raman Scattering

En segundo lugar, se encuentra el Raman Scattering el cual tiene un efecto no lineal inelástico, es decir la luz dispersada por este tipo de scattering se encuentra a otra longitud de onda respecto a la luz incidente [6]. Este es el componente de menor potencia de los scattering como se describió anteriormente en la tabla 2.1. teniendo el 0.5% de potencia reflejada del total y el 1.5% del Rayleigh. El Raman scattering se separa en 2 componentes. El Stokes el cual tiene una mayor longitud de onda respecto a la luz incidente y el anti Stokes, el cual tiene una menor longitud de onda respecto a la luz incidente. Del 0.5% del total del Raman Scattering, el 90% de la energía corresponde al componente Stokes mientras que solo el 10% corresponde al componente anti Stokes[9]. Sin embargo, la intensidad de este último varía bastante de acuerdo a la temperatura de la fibra óptica.

Este tipo de scattering se produce por la interacción de la luz con las moléculas en vibración de la sílice (SiO_2) presente en la fibra óptica (Los fonones). La sílice por su estructura cuenta con modos de vibración, los cuales necesitan cierta energía para que se puedan dar [9].

Por tanto, como se observa en la figura 2.3, cuando un fotón incide una molécula de sílice que se encuentra en un estado sin vibración, la energía del fotón es absorbida. Posteriormente la molécula de sílice al no poder contener tanta energía, libera la diferencia entre la energía necesaria para tener su modo de vibración y la energía del fotón. De esta forma se emiten fotones con menor energía respecto a la luz original omnidireccionalmente. Este tipo de fotones es conocido como Raman Stokes.

Por otra parte, como se observa en la figura 2.3. anti Stokes, cuando un fotón incide a una molécula de sílice que ya se encuentra en un modo de vibración, de igual manera la energía del fotón es absorbida. Sin embargo, en este caso existe una probabilidad que la

molécula de sílice le ceda la energía del modo de vibración y sea emitido. De esta manera, se emiten fotones con mayor energía a la luz incidente. Este tipo de fotones se le conocen como Raman Anti Stokes [10].

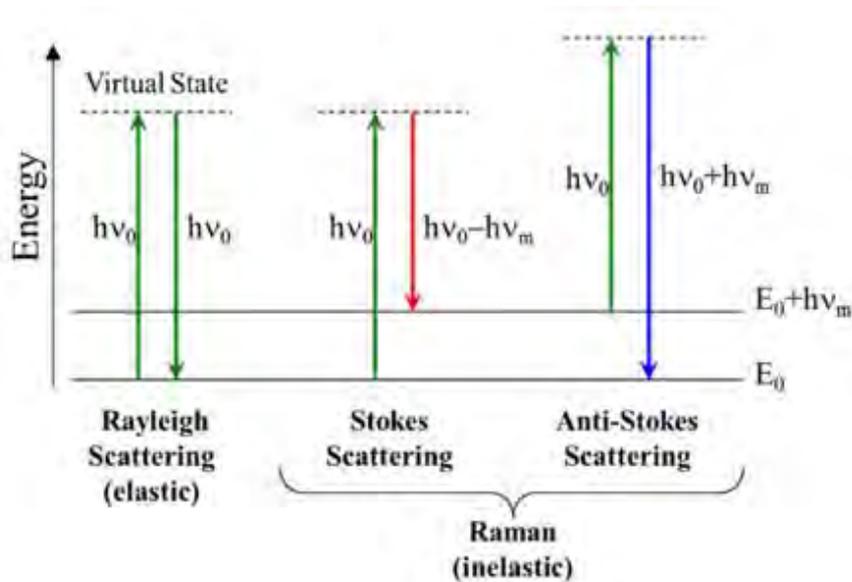


Figura 2.3. Fundamentos de Raman Scattering

Fuente [10]

Cabe resaltar que la probabilidad que de que suceda el Raman Stokes es mucho mayor que la probabilidad que se de Raman Anti Stokes, por esa razón es que la intensidad del primer tipo es mucho mayor [7].

Además, las componentes de Raman suelen encontrarse a aproximadamente 13.2THz de separación respecto a la luz incidente (100nm) y con un ancho de banda de hasta 6TH para la luz incidente de 1550nm [7].

2.1.2. Reflectometría

Como se desarrolló anteriormente, cuando la fibra óptica transfiere datos, un buen porcentaje de la luz se ve reflejada al transmisor por el scattering. Esto en teoría podría

verse como algo negativo ya que se está perdiendo energía. Además, la potencia de la luz que le llega de vuelta al transmisor podría afectar su funcionamiento. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, esta energía reflejada contiene información del porqué se reflejó. Por tanto, con un diseño se puede capturar esta energía y tener información del viaje de la luz en la fibra óptica [11].

Por definición a este proceso se le conoce como reflectometría. Es decir, el proceso en que se obtiene información a partir de la energía dispersada proveniente del backscattering producido en la fibra óptica [11].

En este proceso la fibra puede actuar de dos maneras. En primer lugar, la fibra puede actuar de forma intrínseca, en la cual la fibra misma es la que actúa como elemento de sensado. En segundo lugar, es la forma extrínseca en la cual la fibra solo actúa como un intermediario entre el transmisor y el elemento de sensado [12]. Usualmente este último elemento de sensado utiliza energía eléctrica para funcionar, por tanto, hay que tener un conversor óptico eléctrico para recibir la información. Este proceso trae muchas más pérdidas a comparación de cuando la fibra actúa de forma intrínseca por tanto conviene trabajar de forma intrínseca tal como trabajan todos los sensores que se describirán próximamente.

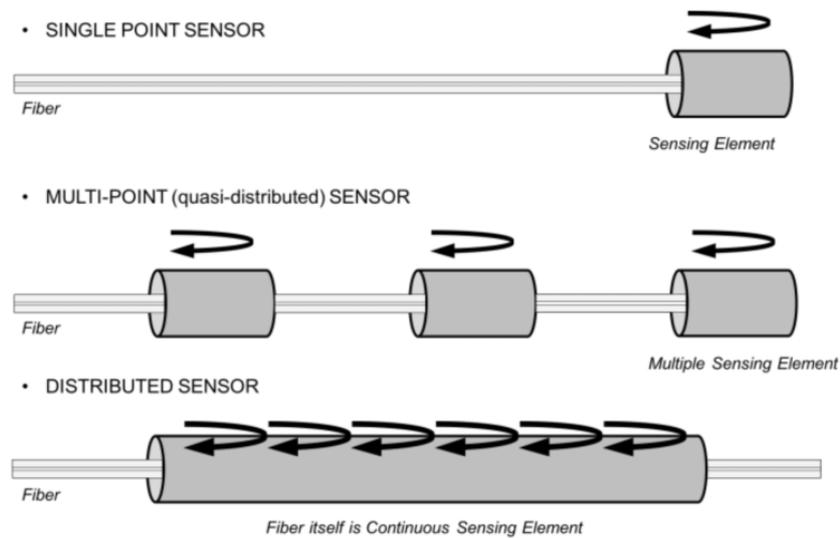


Figura 2.4. Topologías de sensado en la fibra

Fuente [13]

Además, dentro de la fibra, como se muestra en la imagen 2.4, se tienen 3 tipos de topología de sensado en la fibra, según explica [13], las cuales se explican a continuación:

- Sensor de punto simple: Este tipo de sensor solo detecta un punto específico a lo largo de la fibra. Puede ser tanto un sensado intrínseco como extrínseco. No suele ser muy utilizado
- Sensor multipunto: Este tipo de sensor obtiene la información en puntos discretos y previamente definidos a lo largo de toda la fibra. Es principalmente utilizado en aplicaciones con la rejilla de Bragg.
- Sensor distribuido: Este tipo de sensado obtiene información de lo que ocurre en la fibra óptica de manera continua, es decir se puede identificar lo que sucede lo que está sucediendo a lo largo de toda la longitud del sensor.

Esta última conviene utilizarse para la detección ya que se tiene información más precisa del estado de la fibra a lo largo de su longitud. Cabe resaltar que, a pesar de ser distribuida, se tiene una resolución espacial, es decir hay un límite espacial en el cual se puede diferenciar una muestra de la otra. Por tanto, a pesar de ser distribuida, también se tiene un número de muestras discretas. Sin embargo, a diferencia del multipunto, esta resolución espacial es muy alta (la separación espacial entre muestra y muestra) por tanto la cantidad de muestras van a ser mucho mayores con respecto a la del multipunto. A continuación, se explicarán los métodos de reflectometría en la cual se extrae la información.

Reflectometría en el dominio del tiempo (OTDR)

La reflectometría en el dominio del tiempo principalmente se trabaja con un equipo llamado el OTDR (*Optical time domain reflectometer*). Este trabaja con una detección no coherente, es decir no considera la fase de la luz, sino que obtiene información únicamente de la intensidad luminosa que le llega al receptor. A mayor intensidad luminosa, más corriente genera, por tanto, se pueden detectar cambios en la superficie a evaluar ya que una superficie sin fallos (como por ejemplo rupturas) genera una distinta reflexión a una que sí tiene [5].

Este equipo emite un pulso de luz a una guía de onda (usualmente fibra óptica) de tal manera que identifica el estado de la fibra en toda su longitud. La luz que se refleja debido al backscattering es identificada por un receptor óptico, el cual envía lo sentido a un procesador que registra la señal recibida con respecto al tiempo.

Según [5], en una fibra ideal con atenuación constante, sin rupturas ni ningún otro tipo de discontinuidades que afectan la potencia recibida es:

$$P_B(z) = E_0 * \eta(z)e^{-2\alpha z} \quad (2)$$

Los parámetros de la ecuación 2, la cual fue mostrada anteriormente se explican a detalle en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Variables de la potencia de backscattering

Variables	Significado	Unidades
E_0	Energía inicial del pulso que ingresa a la fibra	J
$\eta(z)$	Factor de back scattering. Es un número que representa la potencia que no se pierde debido a la refracción del scattering.	W/J
$e^{-2\alpha z}$	El factor de atenuación lo largo de la longitud en el tramo de ida y vuelta de la fibra	Factor Adimensional

Además, es importante resaltar que la energía del pulso (E_0) se puede calcular de la siguiente manera:

$$E_0 = P_0 * T \quad (3)$$

Los parámetros presentes en la ecuación 3 se pueden apreciar al detalle en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Variables de la energía del pulso

Variabes	Significado	Unidades
P_0	Potencia óptica incidida en la fibra óptica	W
T	Ancho temporal del pulso óptico. Representa el intervalo de tiempo en el que se está emitiendo el pulso	s

Cómo se llega a observar por la ecuación 2, cuando solo se considera el Rayleigh scattering, la potencia decae de forma lineal en escala logarítmica. Sin embargo, dado un punto z , en el cual se tenga una falla, ya sea una ruptura o cualquier tipo de discontinuación, se tendrá una gran variación del índice de refracción. Esto puede resultar de dos maneras. Si la discontinuidad es transversal a la propagación de la luz, se tendrá una gran reflexión. Sin embargo, en caso la falla o discontinuidad tiene una forma aleatoria, la luz incidida se va a ver completamente dispersada, generando que casi toda la energía se libere de la fibra por la refracción. De ambas formas se logra identificar la falla ya que ambas representan una pérdida de la energía incidida [5].

Por tanto, siendo el tiempo recorrido desde que se emitió el pulso óptico hasta que se identifica un evento t_e y la velocidad de grupo en la fibra óptica V_g , se puede llegar a identificar la anomalía en:

$$z(t_e) = \frac{v_g * t_e}{2} \quad (4).$$

Lo mostrado en la ecuación 4 se debe a él pulso de luz que viaja en la fibra tiene que llegar al punto y volver. Por ende, se divide en un factor de dos representando la ida y la vuelta de la luz

De esta manera, en caso reciba una intensidad mucho mayor (o menor) en un instante de tiempo t_e desde que se emitió el pulso, se puede calcular, y por ende detectar, a qué distancia se encuentra un punto de falla según el tiempo en el que llegó esta reflexión [5].

En la figura 2.5. se puede apreciar el patrón típico que se genera en el OTDR. Como se puede apreciar, cuando se tienen los distintos eventos en la fibra que generan mayores reflexiones, tal como conectores o roturas, se puede detectar en el OTDR y su distancia respecto al inicio de la fibra.

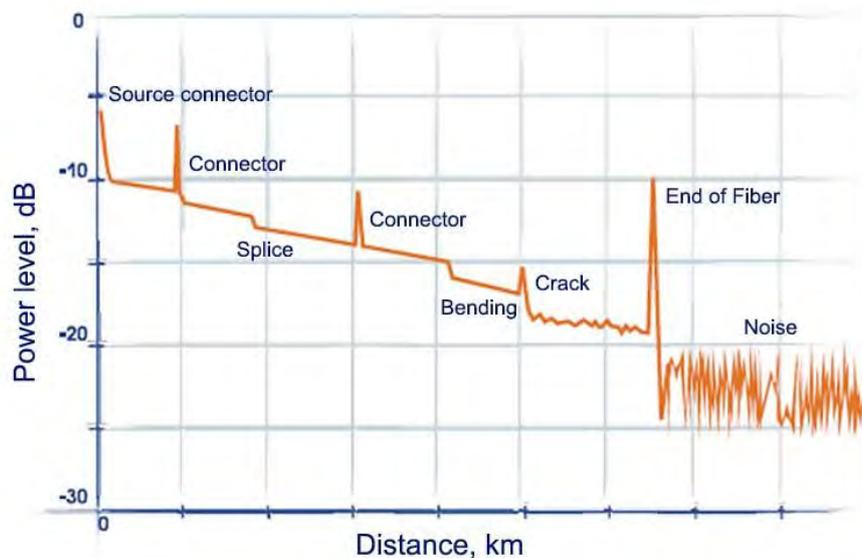


Figura 2.5. Patrón del OTDR

Fuente [14]

Arquitectura del OTDR

A continuación, se explicará a detalle la arquitectura de un OTDR, es decir los componentes que utiliza para poder realizar la función de detectar los eventos en la fibra óptica.

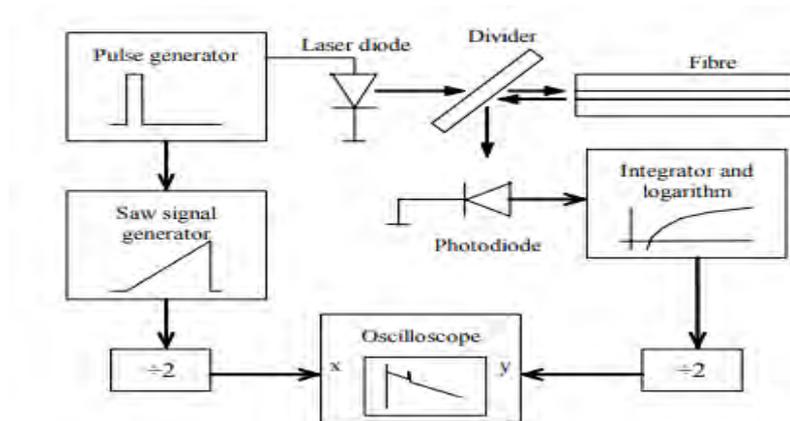


Figura 2.6. Arquitectura del OTDR

Fuente [15]

Como se puede apreciar en la figura 2.6, el OTDR empieza emitiendo el pulso óptico que incide en la fibra por medio de un láser. Este pulso entra en un circulador óptico, el cual es un elemento de tres puertos que se encarga de transmitir la energía de un puerto a otro sin que le llegue al tercero. En este caso, se envía la luz a la fibra óptica, la cual realiza el sensado de acuerdo a los eventos que suceden a lo largo de la fibra.

El backscattering que es regresado al inicio de la fibra, vuelve a ingresar al circulador óptico, solo que esta vez la luz se transmitirá del puerto donde se encuentra la fibra un puerto donde se encuentra un receptor óptico, el cual medirá la potencia de backscattering producida en el recorrido de la fibra. Cabe resaltar, que el circulador óptico evita que la luz vuelva al láser.

Paralelamente a la obtención de la potencia del backscattering, el OTDR mantiene la cuenta del tiempo que va pasando desde que se emitió el pulso. Siguiendo la fórmula 4, el OTDR es capaz de detectar a que distancia se encuentra lo detectado y grafica la potencia óptica recibida en función a la longitud de la fibra óptica [5].

Resolución espacial

Además, como se mencionó anteriormente, al ser el OTDR un sensor distribuido, este cuenta con una resolución espacial. Esto quiere decir que se tiene una distancia mínima en el cual se puede identificar la variación del valor de la intensidad luminosa. Para distancias menores a ese valor no se puede identificar un cambio debido a la interferencia que se produce entre los distintos puntos que abarca el ancho del pulso óptico en el mismo instante de tiempo.

Por ende, según [16], se puede calcular matemáticamente la resolución espacial (SR) con la siguiente ecuación, cuyos parámetros se muestran en la tabla 2.4:

$$SR = \frac{V_g * T}{2} \quad (5)$$

Por ende, como la fibra óptica tiene un medio constante, la velocidad de grupo se mantendrá constante. Por ende, como se observa en la ecuación 4, la resolución espacial es totalmente dependiente a la anchura temporal del pulso óptico. Por ende, para tener una mejor resolución y poder detectar mejor los cambios a lo largo de la fibra entre distintos puntos en su longitud, se necesita que el ancho temporal sea el menor posible.

Tabla 2.4. Variables en la resolución espacial

Variabes	Significado	Unidades
V_g	velocidad de grupo en la fibra	m/s
T	Ancho temporal del pulso óptico. Representa el intervalo de tiempo en el que se está emitiendo el pulso	s

Efecto del ruido en el OTDR

Como todo sistema de comunicaciones, el ruido limita la distancia en la cual se pueda recolectar la información. En el caso de la fibra óptica, el ruido suele deberse a la emisión y absorción espontánea en la fibra lo cual genera pequeñas variaciones aleatorias en la intensidad de la luz en la fibra.

En general para que la señal pueda ser recuperada la relación señal a ruido óptica (OSNR) en el fotodetector debe superar su sensibilidad mínima. En general, la mínima condición para que esto se cumpla es que la potencia recibida en el fotorreceptor supere la potencia equivalente de ruido (NEP) [5].

Por tanto, se tiene que:

$$OSNR (dB) = P_B(dBm) - NEP(dBm) \quad (6)$$

Siendo el P_B la potencia del Backscattering que se obtiene de la ecuación 1.

De igual manera, tener un mayor OSNR permite tener una menor incertidumbre en el valor de la potencia recibida, lo cual implica una mayor precisión en el sensado. Por ende, el objetivo es tener un buen OSNR para tener una buena precisión y un buen SR para una buena resolución. Sin embargo, el OSNR es directamente proporcional al P_B el cual aumenta proporcionalmente al ancho del pulso, mientras que el SR es inversamente proporcional al ancho del pulso, por ende, estos dos parámetros son inversamente proporcionales [16].

2.2. Sensores de fibra óptica

2.2.1. Sensor Raman distribuido

Como se describió en la sección de scattering, el sensor Raman distribuido se basa en los cambios de la intensidad del Raman scattering. Este sensor principalmente es un sensor distribuido que se basa en el comportamiento del OTDR descrito en la sección anterior.

Efecto de la temperatura en Raman Scattering

Este sensor se basa principalmente en la variación del Raman anti Stokes debido a que su intensidad es muy sensible a la temperatura. La intensidad del componente anti Stokes, según [7], se define según la siguiente fórmula:

$$I_{AS}(T) = \frac{K_{AS}}{e^{\frac{h\Delta V}{kT}} - 1} \quad (7)$$

Los parámetros de la fórmula 7 se aprecian en la tabla 2.5.

Tabla 2.5. Parámetros de intensidad de scattering Raman anti Stokes

Variables	Significado	Unidades
K_{AS}	Factor constante proveniente de la fibra	Factor Adimensional
h	Constante de Planck igual a $6.63 * 10^{-34}$	J/Hz
k	Constante de Boltzmann igual a $1.38 * 10^{-23}$	J/K
ΔV	Diferencia de frecuencia respecto a la luz incidente. Para 1550nm es igual a $13.2 * 10^{12}$	Hz
T	Temperatura en la fibra óptica	K

Entonces según la ecuación 7, se puede calcular que la variación de intensidad luminosa del Raman Scattering anti Stokes aumenta en un 0.8% por cada grado kelvin que aumenta la temperatura [7].

De igual manera, la intensidad de componente Stokes es ligeramente dependiente a la temperatura, tal como se aprecia en la siguiente ecuación [7]:

$$I_S(T) = K_S \frac{e^{\frac{h\Delta V}{kT}}}{e^{\frac{h\Delta V}{kT}} - 1} \quad (8)$$

Siendo los parámetros los mismos que los de la tabla 2.5 agregando el K_S que representa una constante de proporcionalidad, el cual es diferente del K_{AS} .

Por tanto, según la ecuación 8, para temperaturas cercanas a 300K la componente Stokes tiene un aumento de 0.096% por cada grado kelvin que aumente la temperatura. Lo cual demuestra que a comparación del anti Stokes, esta no es muy sensible a la temperatura. Sin embargo, se utiliza de igual manera para el sensado de temperatura tal como se explicará próximamente.

Sistema de sensado distribuido Raman

Por tanto, para realizar el sensado, se usa un sistema similar al OTDR con la principal diferencia que se tendrá un fotorreceptor encargado de detectar la luz a la longitud de onda correspondientes a las componentes Stokes y anti Stokes del Raman scattering.

Entonces en base a la ecuación 2, se tiene que la potencia anti Stokes que llega al receptor es:

$$P_{AS}(z, T) = I_{AS}(T) * E_0 * \eta(z) e^{-(\alpha + \alpha_{as})z} \quad (9)$$

Por tanto, según la ecuación 9 y reemplazando $I_{AS}(T)$ de la ecuación 7, se puede detectar la temperatura en cualquier punto z de la fibra óptica.

Sin embargo, los láseres suelen tener pequeñas fluctuaciones aleatorias de su nivel de potencia al emitir la luz. Cuando lo que se detecta es Rayleigh scattering, esto no es ningún problema, ya que la potencia del Rayleigh scattering es mucho mayor que las diferencias por las fluctuaciones del láser [9]. Sin embargo, para potencias mucho menores, como es el caso de Raman scattering, la fluctuación de potencia del láser puede variar considerablemente el resultado medido en el receptor.

Por lo explicado anteriormente, no se puede trabajar puramente con el componente anti Stokes. Por ende, lo que se realiza para solucionar esta problemática es obtener la componente Stokes del Raman scattering y dividirlo a la componente anti Stokes de forma

que se obtiene una relación que sea independiente de la fluctuación de la potencia, pero dependiente de la temperatura.

Entonces, al igual que con la componente anti Stokes, la potencia recibida en el receptor es:

$$P_S(z, T) = I_S(T) * E_0 * \eta(z) e^{-(\alpha + \alpha_s)z} \quad (10)$$

Y dividiendo las ecuaciones 9 y 10 y reemplazando las ecuaciones 7 y 8 se obtiene que la relación es:

$$R(T(z)) = \frac{K_{AS}}{K_S} e^{-\frac{S_{le}}{T(z)}} * e^{-(\alpha_{as} - \alpha_s)z} \quad (11)$$

Siendo $S_{le} = -h * \frac{\Delta\nu}{k}$ la constante que representa la sensibilidad de la temperatura que para una luz incidente de 1550nm, $S_{le} = 663,1 K$ [9].

Como se puede apreciar, con esta relación, el sentido de temperatura no depende de la potencia del transmisor, lo cual lo hace inmune a las fluctuaciones de este. Además, tanto K_{AS} y K_S son constantes que se pueden eliminar tras calibrar el sensor con una temperatura de referencia. De igual forma, el factor de $e^{-(\alpha_{as} - \alpha_s)z}$ se puede conocer con facilidad sabiendo la distancia a la que se encuentra la muestra obtenida y las atenuaciones correspondientes a la longitud de onda de las componentes Raman Stokes y anti Stokes.

Por ende, siendo $\overline{R(T(z))} = \frac{R(T(z))}{R(T_{ref})}$, la división entre la relación de la componente Raman

Stokes y Raman anti Stokes a un punto z y la relación de estas dos componentes a una temperatura de referencia, se puede calcular la temperatura en cualquier punto de la fibra con la siguiente ecuación:

$$T(z) = \left[\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{S_{le}} (\ln(\overline{R(T(z))}) + (\alpha_{as} - \alpha_s)z) \right]^{-1} \quad (12)$$

Limitaciones

Cabe resaltar que este sensor tiene limitaciones debido a las bajas potencias y al tipo de fibra que se utilice.

Por una parte, si se utiliza una fibra multimodo, se limita en gran medida la distancia con la que se puede trabajar debido al aumento de la atenuación por parte del scattering a las longitudes de onda menores a 1550nm. Además, la dispersión intermodal ensancha el pulso de luz que incide en la fibra, por tanto, a mayor distancia peor será la resolución espacial [9].

Por otra parte, si se utiliza fibra monomodo, se requiere garantizar que la longitud de onda del componente anti Stokes se encuentre por encima de la longitud de onda de corte de la fibra. Además, se tendrá menor scattering respecto a la fibra multimodo, lo cual implica que a cortas distancias se tendrá una menor potencia recibida [9].

Además, debido a la baja potencia proveniente de los componentes de Raman Scattering, se necesitan aplicar métodos que mejoren el OSNR, tal como utilizar láseres de alta potencia con amplificadores y receptores de alta sensibilidad que involucran un incremento de precio. También se puede realizar un promediado de pulsos que reducen el ruido en un factor de \sqrt{n} siendo n el número de promediados. Sin embargo, esto aumenta el tiempo de la medida, por tanto, se tendrían menos muestras en un mismo intervalo de tiempo [9].

2.2.2. Sensor por rejilla de Bragg

Fundamentos de rejilla de Bragg

A diferencia de los otros sensores de fibra óptica que se describen en esta investigación, este sensor no utiliza el scattering como el elemento que contiene la información, sino que utiliza la propia reflexión que se genera en la fibra cuando se le agrega una rejilla de Bragg en el cladding [12].

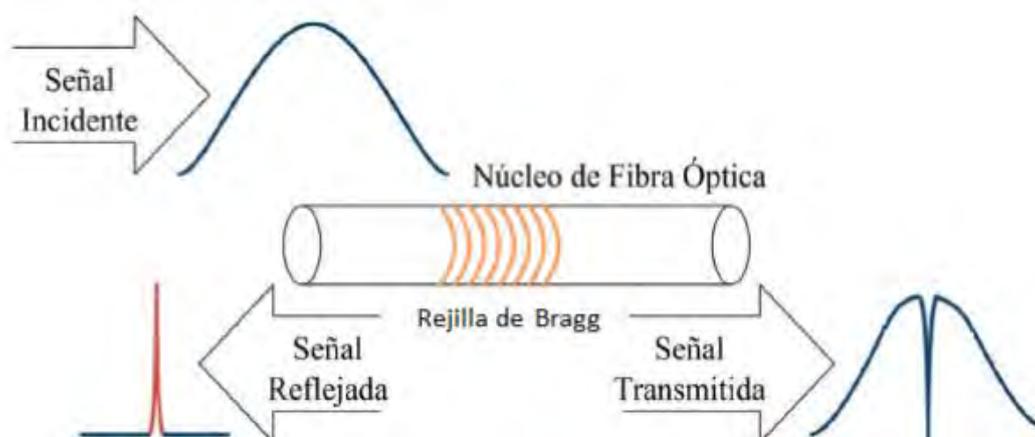


Figura 2.7. Rejilla de Bragg

[17]

La rejilla de Bragg, tal como se puede apreciar en la imagen 2.7, está compuesta con franjas periódicas de 2 índices de refracción diferentes. En la imagen, las líneas naranjas corresponden a un índice de refracción n_1 y el espacio en blanco entre 2 franjas naranjas corresponde a un índice de refracción n_2 . Un periodo está definido por una franja de n_1 y una de n_2 y su longitud es de Λ .

De acuerdo a su Λ , la rejilla de Bragg actúa como un filtro rechaza banda cuya banda de rechazo depende de la longitud de la rejilla [12], mientras más larga sea la rejilla de Bragg, más selectivo será en frecuencia. Entonces cuando se ingresa un pulso óptico en la fibra, la energía que viajaba a la longitud de onda correspondiente a la banda de rechazo será devuelta al receptor.

Por tanto, siendo n_{eff} el índice de refracción efectivo en la zona de la rejilla de Bragg, se puede obtener la longitud de onda que se va a reflejar (λ_B) con la siguiente ecuación [18]:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (13)$$

Se sabe que cuando se le expone a la fibra óptica un rayo de luz ultravioleta esta cambia ligeramente su índice de reflexión de forma permanente. Por tanto, para crear la rejilla se emite este tipo de rayos en porciones fijas de la fibra de tal forma que se puedan producir las franjas de índice de refracción diferente.

Efecto de la temperatura en la rejilla de Bragg

Como se puede apreciar en la ecuación 13, la longitud de onda de rechazo depende del índice de refracción de la fibra y la longitud de las franjas. Sin embargo, tras un aumento de temperatura, debido a la expansión térmica, la longitud de la fibra se ve aumentado en un factor de $\alpha = 0.55 * 10^{-4}\%/K$. De igual manera, el índice de refracción efectivo se ve aumentado por el efecto termo-óptico en un factor de $\zeta = 5.77 * 10^{-4}\%/K$ [18].

Por tanto, la variación de la temperatura desplaza la longitud de onda en un factor $\beta_T = \alpha + \zeta = 6.35 * 10^{-4}\%/K$. De esta manera, según [18], se puede calcular que dado un cambio de temperatura ΔT en grados Kelvin, se puede calcular el cambio de la longitud de onda con la siguiente ecuación:

$$\Delta\lambda = \beta_T * \Delta T * \lambda_0 \quad (14)$$

En general para una longitud de onda de $\lambda_0 = 1550nm$ la sensibilidad a la temperatura va a ser $S_T = 0.1K/pm$

Efecto de la tensión en la rejilla de Bragg

De forma similar, con una temperatura constante, según la ecuación 13 cuando se presenta una tensión tanto la longitud Λ como el n_{eff} va a verse afectados. Debido a que, por definición, la tensión es el aumento de longitud por unidad de longitud, él Λ se ve directamente afectado por ello teniendo un factor de variación del 100% por unidad de tensión. Por otra parte, una tensión decrece el n_{eff} en un factor de $\rho_e = -0.212\%$ al reducir la densidad de moléculas en la fibra en la zona [18].

Por tanto, la variación de la longitud de onda por la tensión está definida por un factor $\beta_\varepsilon = 1 + \rho_e = 0.79\%$. De esta manera, según [18], se puede calcular que el cambio de longitud de onda dado un cambio de tensión $\Delta\varepsilon$ es:

$$\Delta\lambda = \beta_\varepsilon * \Delta\varepsilon * \lambda_0 \quad (15)$$

En general para una longitud de onda de $\lambda_0 = 1550nm$ la sensibilidad a la tensión va a ser $S_s = 0.8\mu\varepsilon/pm$

Sistema de sensado con rejilla de Bragg

El sistema de sensado con rejilla de Bragg es un sensor que utiliza la reflectometría multipunto, es decir, se implementan las rejillas en distintas zonas de la fibra donde se desea identificar la variable a medir, en este caso la tensión o la temperatura. Además, es indispensable que estos sistemas sean calibrados antes de medir debido a que el sistema detecta cambios. También de acuerdo a lo que se desee medir, se debe mantener la otra variable constante; es decir, si se desea medir la temperatura, se debe garantizar que la tensión no afecte la medición y viceversa.

Hay dos formas de implementar el sistema de sensado ambas basadas en el funcionamiento del OTDR las cuales se describen a continuación

En primer lugar, se puede utilizar una fuente de luz de banda ancha y un analizador de espectro óptico (OSA) [18]. Como se puede apreciar en la imagen 2.8, primero se emite un pulso de luz de banda ancha en la fibra el cual cuando llega a la rejilla de Bragg la longitud de onda correspondiente a la banda de rechazo es reflejada y a través de un circulador óptico es analizada por una OSA, el cual identifica la componente de longitud de onda con mayor potencia en el espectro del pulso.

Cuando una fuerza actúa, sea por temperatura o tensión, la longitud de onda de rechazo en la rejilla de Bragg varía, y por ende la longitud de onda que se refleja también. Entonces cuando esta reflexión llega al OSA se identifica que la componente frecuencial de mayor potencia ha variado y calcula la diferencia de longitud de onda respecto a la referencia. De esta forma, según las ecuaciones 14 y 15 (de acuerdo a lo que se esté midiendo) se puede identificar el aumento de temperatura o tensión a partir de la variación de la longitud de onda.

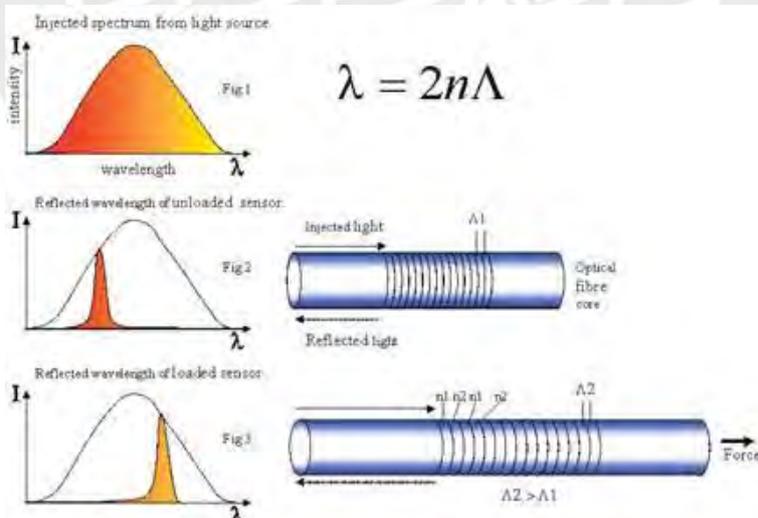


Figura 2.8. Sensado con rejilla de Bragg con OSA y pulso de banda ancha

Fuente [19]

En segundo lugar, se puede usar un láser selectivo de longitud de onda variable y un medidor de potencia. Al igual que el OTDR, se detecta el tiempo en que el láser emite una longitud de onda de forma que en la recepción se identifique a que longitud de onda corresponde la frecuencia medida. Entonces, en condiciones normales, se identifica la longitud de onda correspondiente a la potencia más alta. Este sistema se aprecia en la figura 2.9.

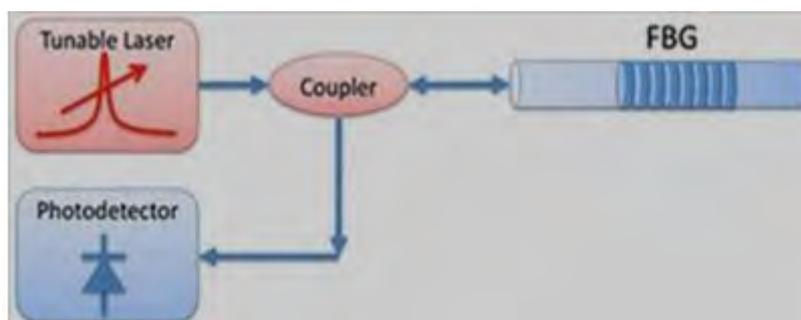


Figura 2.9. Sensado con rejilla de Bragg laser con longitud de onda variable y fotodetector

Fuente [18]

Cuando se emite una fuerza proveniente por un cambio de temperatura o tensión, se detectará que otra componente frecuencial tendrá más potencia que la calibrada. De esta forma se identifica la diferencia de longitud de onda y por ende el aumento de tensión o temperatura según las fórmulas 15 o 14 respectivamente.

Limitaciones

La limitación general del sensor de rejilla de Bragg es que, en general, es un sensor multipunto y no distribuido, por tanto, solo puede identificar eventos en puntos específicos en la fibra óptica [18].

De igual manera, se tiene que mantener la variable que no se desea medir constante o aplicar métodos correctivos para que no influya en la medición. En la medida de temperatura esto no suele ser un problema tan grande, puesto que la tensión se puede evitar dejando la fibra libre. Sin embargo, cuando se desea medir tensión, se deben elaborar métodos complejos para poder aislar el efecto de la temperatura [18].

Además de acuerdo al tipo de sistema que se desarrolle se producen otras limitaciones.

En caso del sistema constituido del láser de banda ancha y el OSA, el principal problema es que el OSA suele ser un elemento grande y pesado, lo cual dificulta la implementación en exteriores. Además, el láser de banda ancha suele tener menor potencia, lo cual resulta en menor OSNR que afecta la precisión de las variables a medir y la distancia máxima.

Por otra parte, en el caso del sistema del láser selectivo variable con el medidor de potencia, el problema principal es que el sistema está limitado a medir un solo punto debido a que el tiempo está siendo utilizado para identificar la longitud de onda de la potencia recibida [18].

2.3. Internet de las cosas (IoT)

Como se explicó anteriormente, el IoT es una tecnología en desarrollo en conjunto a la tecnología del 5G. Su objetivo principal es interconectar a los distintos objetos en una red de forma que se puedan comunicar entre sí sin la interacción del ser humano. De esta manera, pueden realizar acciones de forma autónoma permitiendo el desarrollo de muchas aplicaciones inteligentes [1].

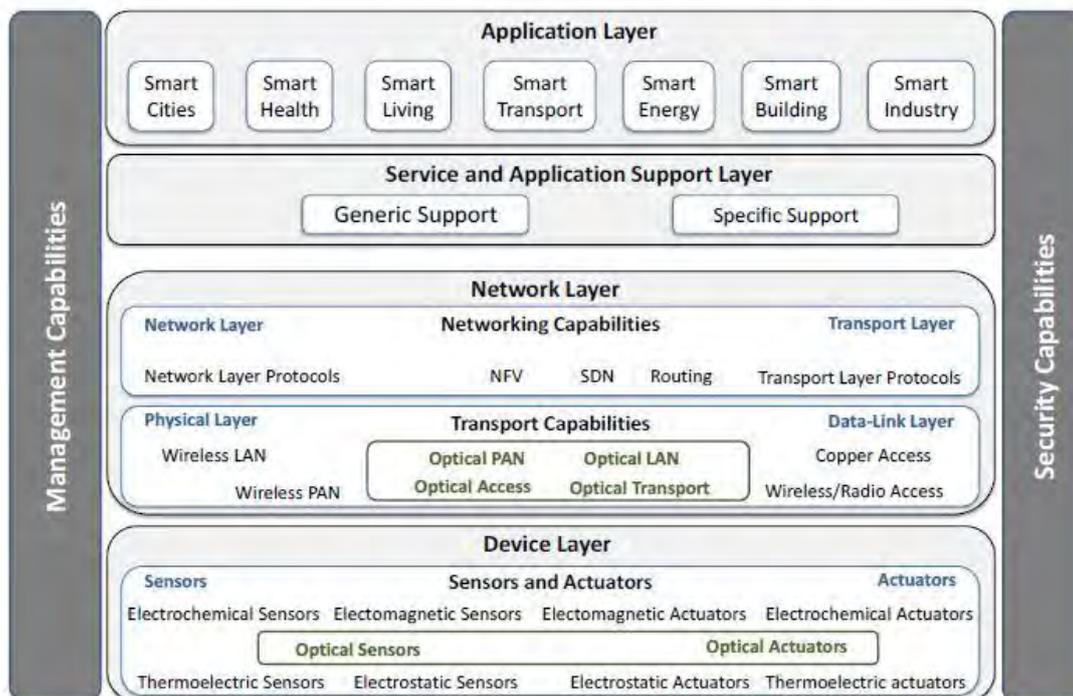


Figura 2.10. Arquitectura del IoT

Fuente [20]

Como se puede apreciar en la figura 2.10, la arquitectura del IoT está compuesta por 3 capas principales, las cuales son la capa de dispositivos, la capa de red y la capa de aplicación. De igual manera, esta cuenta con dos capas transversales: la capa seguridad y la capa de administración. A continuación, se describirán las capas principales de esta tecnología [20].

2.3.1. Capa de dispositivos

La capa de dispositivos es la que contiene todos los equipos que se encuentran conectados en la red. Estos dispositivos se dividen en dos categorías, sensores y actuadores.

En primer lugar, los sensores son los equipos que se encargan de medir las variables físicas del entorno. En un enfoque sistemático, estos son los equipos que capturan las entradas para que posteriormente sean procesadas y se puedan tomar decisiones. El IoT

necesita una gran variedad de sensores con distintas características para poder desarrollar las distintas aplicaciones que busca ofrecer [20].

En la imagen 2.11 se puede apreciar los distintos tipos de sensores que se usan en el IoT



Figura 2.11. Tipos de sensores en el IoT

Fuente [21]

En segundo lugar, los actuadores son los equipos que se encargan de realizar acciones de acuerdo a lo procesado anteriormente con la información recolectada por los sensores. Dentro del enfoque sistemático, estos son los elementos que generan las salidas del sistema realizando algún tipo de acción con el fin de satisfacer una aplicación. Por tanto, para que el IoT pueda desarrollar las aplicaciones, necesita de actuadores [20].

Principalmente los actuadores notifican a las personas de un evento y/o activan algún dispositivo como una cámara en caso de intento de robo en un hogar o un sistema de refrigeración en caso de temperaturas elevadas.

2.3.2. Capa de red

Esta capa es la encargada de transportar la información de los dispositivos a los servidores en donde se implementa la aplicación y viceversa. Esta capa está basada en las redes móviles ya que uno de los objetivos del IoT es implementarse en las redes del 4G y del 5G. Por tanto, esta capa se divide en 2 redes: la red de acceso y la red de transporte [20].

La red de acceso define la forma en que los dispositivos acceden a la red. Esta puede darse de darse por medios tanto alámbricos como inalámbricos. En la mayoría de casos será necesario que los dispositivos cuenten con un adaptador inalámbrico de forma que puedan transmitir o recibir señales electromagnéticas provenientes de antenas que conectan estas dos redes. Sin embargo, existen elementos que pueden acceder a la red por medios alámbricos, tal como cables de cobre o de fibra óptica. Por otra parte, la red de transporte define la transmisión de los datos entre los dispositivos y las aplicaciones. Esta red está compuesta principalmente con fibra óptica.

En ambas redes se puede dividir el tráfico en 2 planos, el plano de datos y el plano de control. El plano de datos es el que compone la información útil que contiene los datos recogidos por el sensor o las indicaciones del actuador. Por otra parte, el plano de control es el que contiene la información de cómo deben comportar los paquetes que viajan en la red. Dentro de esto se incluye la información del enrutamiento del paquete, la prioridad de este, entre otros.

2.3.3. Capa de aplicación

Por último, la capa de aplicación es la que se encarga de procesar toda la información recibida por los sensores para posteriormente indicarle a los actuadores las acciones a tomar.

El IoT tiene un conjunto de aplicaciones las cuales tienen la característica de ser independientes de la acción del ser humano, sino que las únicas entradas son los datos recibidos por los sensores de la capa de dispositivos [20].

En la tabla 2.6 se pueden apreciar las principales aplicaciones del IoT. Por tanto, distintas aplicaciones del IoT requerirán distintos sensores para obtener los parámetros necesarios para el correcto procesamiento de la data.

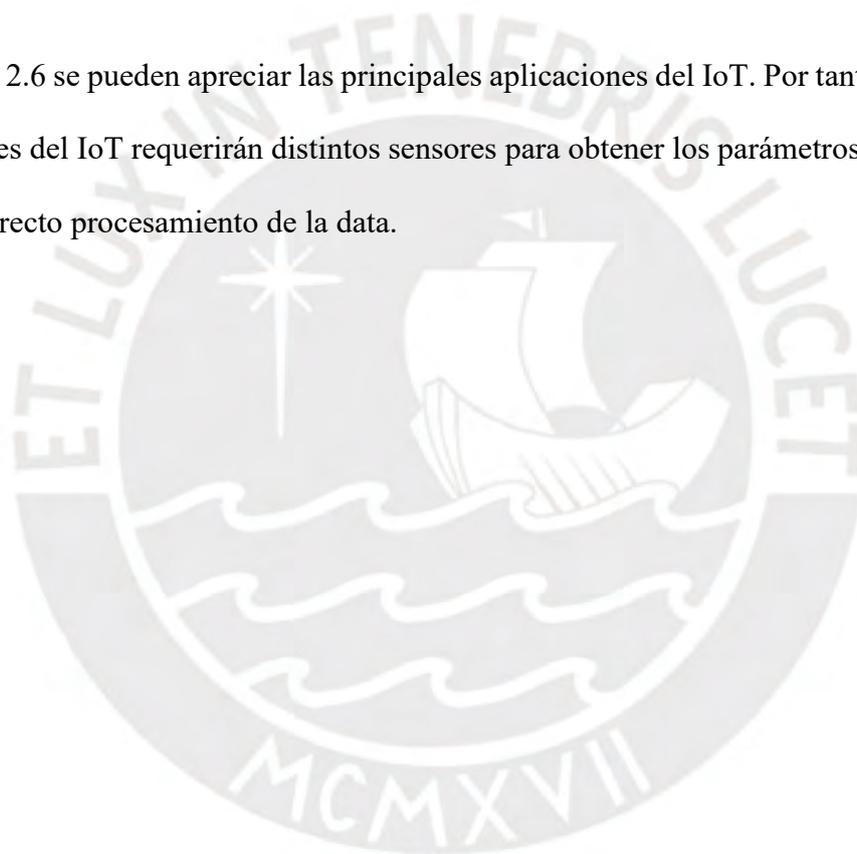


Tabla 2.6. Aplicaciones principales del IoT

Aplicación	Descripción
Estacionamiento de autos inteligente	Monitorea si un auto está bien estacionado
Monitoreo de estructuras	Identifican si las estructuras civiles se encuentran en un buen estado
Monitoreo de tráfico	Identifica la situación del tráfico vehicular en las calles
Iluminación inteligente	Activa las luces en una zona cuando se detecta la presencia de una persona y lo apaga en la ausencia
Detección de incendios	Monitorea la probabilidad de un incendio de acuerdo a distintos factores
Control del agua	Mantiene características del agua en un intervalo con el fin de que sea bebible o que permita la vida de la flora y la fauna acuática
Detección de incendios	Identifica la presencia de una persona no deseada en una zona

Capítulo 3:

Estudio comparativo

3.1. Sensores de fibra óptica en estacionamiento de autos inteligente

Como se mencionó en el capítulo 2.3, una de las principales aplicaciones del IoT es el estacionamiento de carros, el cual permite a los usuarios poder aparcar sus medios de transporte de forma segura e identificando el lugar para estacionar sin tener que perder tiempo en buscar el lugar ideal para estacionar. De igual manera, se debe garantizar que los autos se encuentren bien estacionados[22].

Para poder detectar la presencia de los autos, se necesitan sensores de presencia y de proximidad, los cuales identifican la presencia de un auto en un estacionamiento y por ende lo reportan como ocupado al sistema de IoT. Actualmente, la mayoría de estos sistemas utilizan sensores electromagnéticos los cuales presencian cuando aparece un auto tal como se aprecia en la imagen 3.1[23].



Figura 3.1. Estacionamiento de autos inteligente actualmente

Fuente [24]

Sin embargo, este sistema puede ser implementado utilizando sensores de fibra óptica de Bragg. Esto se puede lograr desplegando la fibra óptica en los estacionamientos. Como se mencionó anteriormente, el sensor de Bragg es un sensor multipunto, el cual es capaz de detectar los cambios de tensión en la fibra óptica. A la larga, un cambio de presión representado por la fuerza que genera el peso del auto al estar estacionado en un determinado espacio impacta en la tensión de la fibra óptica que esta soporta. Por tanto, cuando un auto ingresa a un estacionamiento, se puede detectar su presencia por el cambio de tensión que se detecta en la fibra debido a la presión ejercida por la presencia del carro.

Al ser un sensor multipunto, se puede generar las rejillas de bragg en las posiciones en donde va a estar el auto. De esta manera, a comparación de los otros métodos, solo se tendría que instalar un sensor por una larga fila de estacionamiento, por lo cual se ahorraría en gran medida los costos de sensores. De igual forma, este tipo de sensor se encuentra siempre conectado, por lo que no tendría problemas de batería que sufren los demás sensores[23].

Similarmente, se pueden usar sensores de Bragg auxiliares para garantizar que el auto esté correctamente estacionado, de tal forma que se notifique al usuario si no está estacionando correctamente el auto.

Además, como se mencionó anteriormente, en este lugar se debe garantizar la seguridad, por tanto, se deben implementar mecanismos tales que cumplan ese propósito. Uno de los cuales puede ser el despliegue de sensores de fibra óptica Raman o de temperatura de Bragg a través del estacionamiento, para monitorear continuamente la temperatura de los vehículos y así evitar que lleguen a temperaturas que atenten contra el buen funcionamiento del vehículo.

Sin embargo, al ser los vehículos elementos dinámicos, la fibra óptica Raman tendría que ser distribuida piso y monitorear la temperatura a distancia lo cual, como se mencionó en el capítulo 2, podría no llegar a ser muy efectivo debido a la baja intensidad de la señal Raman y la degradación de la temperatura que llega desde el carro hasta el sensor. Similarmente, el sensor de temperatura de Bragg a pesar de tener mayor OSNR no permitiría garantizar con precisión la temperatura de los carros para la finalidad descrita.

En la tabla 3.1 se aprecia el resumen de lo descrito anteriormente.

Tabla 3.1. Características de sensores de fibra óptica en estacionamiento inteligente

Sensores	Facilidad de despliegue	Sensibilidad a los cambios	Costo asociado	Efectividad de sensado
Sensor Bragg de tensión	Media	Media	Bajo	Media
Sensor Bragg de temperatura	Muy baja	Baja	Alto	Baja
Sensor Raman de temperatura	Muy Baja	Muy Baja	Alto	Muy Baja

3.2. Sensores de fibra óptica detección de fallas en obras civiles

Al igual que el punto anterior y según las aplicaciones del IoT descritas en el capítulo 2.3, una de las aplicaciones del IoT es el monitoreo de estructuras civiles para garantizar la estabilidad de la estructura y evitar los colapsos [25]. Parte de este monitoreo incluye la

evaluación de errores mientras se realiza la obra y otra evaluación tras finalizada la obra el cual garantiza la estabilidad de las estructuras ya finalizadas en el tiempo.

Para medir la calidad de una estructura civil, se pueden medir la vibración, debido a que un punto de vibración representa un punto de inestabilidad, y en ciertos casos la temperatura, principalmente para estructuras que transportan sustancias que se encuentran a distinta temperatura del ambiente.

En el caso de la vibración, al igual que lo explicado con la presión anteriormente, una vibración involucra cambios periódicos de la tensión del material [18], por tanto, se pueden detectar puntos de quiebra a partir del sensado de tensión.

Con lo mencionado anteriormente, se podría utilizar el sensor de Bragg para poder medir las vibraciones en las estructuras civiles. Sin embargo, como el sensor de rejilla de Bragg es un sensor multipunto, no se podría identificar el punto débil de la estructura a lo largo de la fibra, sino solo en puntos discretos, lo cual restringe en gran medida el sensado. Por tanto, una alternativa de uso sería implementar la rejilla en puntos críticos los cuales se estima que una falla pueda afectar en gran medida la estructura.

De igual manera, en caso sea una estructura extractora o transportadora de fluidos, tal como las tuberías o mangueras, se puede utilizar el sensor Raman, pues este es un sensor distribuido el cual permitiría identificar con precisión el punto de falla. En el caso en que la tubería transporte algún tipo de gas, la detección es inmediata puesto que una falla o ruptura involucraría una disminución de presión del gas que escapa, lo cual, según la ley de los gases ideales [26] involucra una reducción de la temperatura que puede ser detectada fácilmente.

Similarmente, en caso se trasporten líquidos, usualmente estos se encuentran en tuberías que aíslan en calor, por tanto, la temperatura del ambiente sería diferente a la del líquido, por tanto, tras una fuga se puede detectar la ubicación de la falla.

Además, en ambos tipos de sensores, se puede implementar la fibra desde el momento de la construcción y se tiene un monitoreo constante de toda una estructura utilizando solo un sensor, lo cual reduce los costos de mantenimiento y protege a los ciudadanos.

A continuación, en la tabla 3.2 se muestra el resumen de lo explicado en este subcapítulo.

Tabla 3.2. Características de sensores de fibra óptica en detección de fallas en obras civiles

Sensores	Facilidad de despliegue	Sensibilidad a los cambios	Costo asociado	Efectividad de sensado
Sensor Bragg de tensión	Alta	Media	Bajo	Baja
Sensor Bragg de temperatura	Alta	Muy alta	Bajo	Baja
Sensor Raman de temperatura	Alta	Alta	Bajo	Muy Alta

3.3. Sensores de fibra óptica en medición del tráfico

En el caso del tráfico, el IoT busca comunicar a los distintos conductores como se encuentra el tráfico en las calles, de tal forma que conozcan la ruta óptima y así se reduzca el tiempo de viaje de los vehículos por medio del uso de modelos estadísticos. De igual manera, esto se puede usar para detectar choques o carreteras cerradas.

Actualmente, este tipo de aplicaciones utilizan sensores GPS para poder identificar los carros y las rutas, pero aún no se llega a implementar el procesamiento estadístico para encontrar la ruta óptima. Sin embargo, en temas de sensores, los sensores de fibra óptica no tendrían mucha aplicabilidad comparándolos con los sensores inalámbricos existentes hoy en día.

En el caso en los sensores de rejilla de Bragg se podrían usar para detectar la presencia de los autos en puntos estratégicos de las carreteras, ya que como se mencionó con la aplicación del estacionamiento, la presión que ejerce el peso del carro se traduce en un cambio en la tensión del cable. Sin embargo, al ser un sensor multipunto, el sentido estaría en puntos discretos de la autopista, por tanto, no podría ser medido con claridad en donde se encuentran los vehículos ni que tan ocupada esta la autopista. Además, no traería mayores beneficios respecto al sentido por medio de las tecnologías inalámbricas.

Por otra parte, en el caso de los sensores de Raman, no se logra encontrar una aplicación coherente que aporte a la medición del tráfico en el IoT que incluya un sentido de temperatura. Una posible aplicación podría ser el uso de los sensores Raman para la detección de incendios en la autopista, pero como suele encontrarse al aire libre, suele ser fácilmente identificado por otros tipos de sensores.

En la tabla 3.3 se muestra el resumen de esta parte.

Tabla 3.3. Características de sensores de fibra óptica en medición de tráfico

Sensores	Facilidad de despliegue	Sensibilidad a los cambios	Costo asociado	Efectividad de sensado
Sensor Bragg de tensión	Muy Baja	Media	Alto	Muy Baja
Sensor Bragg de temperatura	Muy Baja	Muy Baja	Alto	Muy Baja
Sensor Raman de temperatura	Muy Baja	Muy Baja	Alto	Muy Baja

3.4. Sensores de fibra óptica en iluminación inteligente

Otra de las aplicaciones principales del IoT que fueron descritas en el capítulo 2.3 es la iluminación inteligente. Esta se basa principalmente en la optimización de eficiencia energética de la luz utilizada en el día a día, tanto en zonas exteriores, como las calles, como en zonas interiores, como hospitales, hogares, colegios, etc. [27]

El objetivo general es identificar la presencia de los objetos móviles, sean personas, vehículos u otros equipos automatizados del IoT que requieran de la luz, para poder variar la intensidad luminosa de las fuentes de luz del ambiente, tal como postes de luz, focos en los hogares y más [28]. Para el trabajo descrito anteriormente se requieren tres tipos de sensores los cuales se describen a continuación.

Primero, se necesita un sensor de presencia que, como se observa en la figura 3.2, identifique la presencia o ausencia de un objeto dentro de un determinado radio que genere un cambio en la intensidad de la fuente luminosa según requiera. De igual manera, estos sensores de presencia son utilizados para poder predecir la dirección del objeto y así poder ir comunicando a los demás sensores para que se vayan activando. Segundo, se requiere un sensor de luminancia que controle la intensidad luminosa que emita la fuente y que al mismo tiempo pueda identificar la intensidad luminosa exterior de tal forma de poder emitir la luz necesaria en el momento del día que requiera. Por último, se requiere un sensor de temperatura que monitoree la temperatura de las fuentes de luz, principalmente leds, de manera que no se sobrecalienten y por ello se quemen y malogren [29].

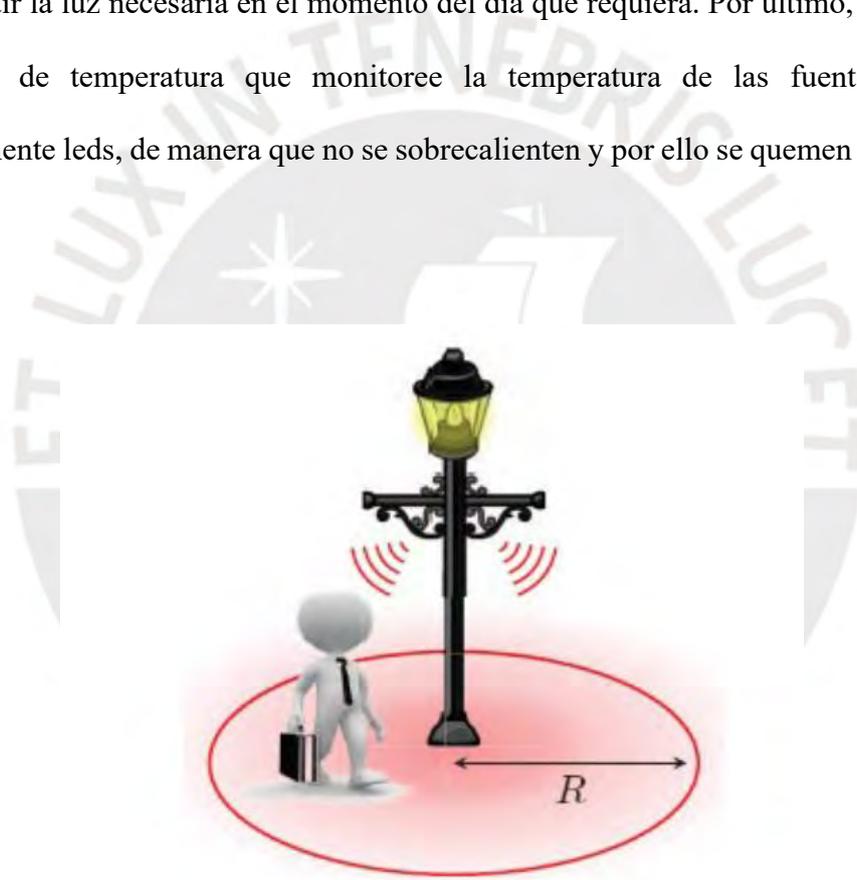


Figura 3.2. Detección de presencia

Fuente [29]

Como se explicó anteriormente, los sensores de rejilla de Bragg pueden ser utilizados como sensores complementarios de presencia para la activación de las luces. Sin embargo, al no ser distribuido se tendría que desplegar en puntos estratégicos que

identifiquen el objeto o la ausencia de este. Sin embargo, a comparación de los sensores inalámbricos que son usados en las aplicaciones actuales, estos serían más difíciles de implementar, debido a que la fibra necesita estar pegada a una superficie para poder sentir, lo cual no es muy viable en las calles por el hecho de que estorbaría el movimiento de las personas. De igual manera sería muy costoso implementar túneles en toda la ciudad con el fin de desplegar la fibra para el sensado. Para el sensado de interiores es más viable la implementación ya que se puede desplegar debajo de alfombras, sin embargo, seguiría teniendo problemas con la detección de presencia al ser multipunto. Por tanto, solo se podría utilizar eficazmente complementando a los sensores inalámbricos para mejorar la precisión.

En el caso de los sensores de temperatura, tanto de Raman como el de Bragg, la implementación es más complicada. Como se explicó anteriormente, el sensado de temperatura en la iluminación inteligente se usa para controlar la temperatura de las fuentes, usualmente leds. Estos son elementos pequeños que usualmente se encuentran en lugares elevados tales como techos en zonas interiores y postes en zonas exteriores. El despliegue de la fibra en zonas exteriores es totalmente inviable pues requeriría que la fibra esté colgando entre los postes manteniendo contacto con las fuentes de luz sí que la emisión se vea interrumpida. En zonas interiores es más viable, pues puede ser desplegada en el techo, sin embargo, es ineficiente respecto a otros sensores de temperatura que se pueden incorporar en los leds directamente. Por parte del sensado en sí, los leds en promedio se encuentran a una temperatura de entre 60°C y 100°C [30] por tanto según Raman, al tener una sensibilidad de $0.18\%/^{\circ}\text{C}$, se necesitaría tener un receptor muy sensible para poder identificar los cambios descritos anteriormente. Similarmente el sensor de rejilla de Bragg al tener una sensibilidad de $14.18\text{pm}/^{\circ}\text{C}$ necesitaría de equipos

muy precisos y caros para poder detectar tales cambios y un buen número de promediados para poder reducir en gran medida el OSNR.

En la tabla 3.4 se muestra un resumen de lo descrito anteriormente.

Tabla 3.4. Características de sensores de fibra óptica en iluminación inteligente

Sensores	Facilidad de despliegue	Sensibilidad a los cambios	Costo asociado	Efectividad de sensado
Sensor Bragg de tensión	Baja	Media	Alto	Baja
Sensor Bragg de temperatura	Muy baja	Media	Alto	Baja
Sensor Raman de temperatura	Muy Baja	Baja	Alto	Baja

3.5. Sensores de fibra óptica en detección de incendios

Continuando con las aplicaciones descritas en el capítulo 2.3, una de las más importantes es la detección de incendios, tanto en lugares cerrados tal como almacenes, casas, fabricas, etc. Como en lugares abiertos, principalmente los bosques. Con el fin de evitar o reducir los daños que el potencial siniestro pueda ocasionar.

El objetivo de esta detección es poder identificar patrones comunes en los incendios de forma de poder predecir, en el mejor de los casos, cuando esta por generar un incendio y el motivo de esto. De igual forma, en caso el siniestro ya este generado, aumenta la

velocidad a la que se notifica a los encargados de solucionar el problema, tal como los bomberos o los guarda bosques, de forma que se reducen los daños de esto en gran medida. En la práctica esto se consigue por medio de microprocesadores con conexión inalámbrica que van monitoreando y reportando las variables periódicamente. A continuación, se describen los principales sensores que se usan para esta aplicación [31], [32].

Primero, se usan los sensores de humo, que son usados para identificar tanto para el inicio de un posible incendio como para identificar la presencia de un incendio por medio de los gases que estos emiten al generarse. Además de la identificación del siniestro, también pueden reportar la intensidad del humo a los responsables para que tomen medidas al momento de solucionar el incidente. De igual manera, estos pueden contar o con sensores de temperatura o con cámaras para detectar el incendio. Como se espera, a la presencia de un incendio la temperatura del ambiente aumente considerablemente, pudiendo llegar hasta los 600°C [33], por ende un aumento tan drástico de la temperatura puede ser fácilmente detectado como un incendio. Similarmente, el fuego producido por el incendio presenta un brillo muy alto que puede ser fácilmente identificable con una cámara luego de realizar el procesamiento digital respectivo [31]. Por último se incluyen sensores humedad o lluvia que son factores que afectan en la producción de incendio [34].

Por tanto, los sensores de presión tal como la rejilla de Bragg no tienen mucha aplicación directa en la detección de incendios debido a que, como se desarrolló en el anterior párrafo, no se requiere ningún tipo de sensor que dependa de la presión o derivados, tal como la presencia, la velocidad, etc. Sin embargo, indirectamente se puede utilizar para detectar posibles intrusos que podrían generar los incendios en zonas restringidas o protegidas. Esto se desarrollará más adelante en la sección 3.7.

Por otra parte, el uso de sensores de temperatura de fibra óptica, tal como el de rejilla de Bragg como el Raman, son ideales para este tipo de aplicaciones. Como se explicó anteriormente, un modo de poder identificar la presencia de un incendio es por el aumento drástico de la temperatura. Por tanto, en zonas interiores, se puede desplegar con facilidad la fibra óptica como se observa en la imagen 3.3. En el caso de Raman, al ser distribuido, se puede detectar con facilidad el incremento de temperatura en el largo de la fibra, por ende, se puede identificar con facilidad la ocurrencia del incendio según lo explicado en el capítulo 2. Además. Como la temperatura presente en un incendio (hasta 600°C) es mucho más alta que la temperatura ambiental (hasta 70°C) se puede identificar precisamente el evento. Similarmente, la fibra se puede desplegar en un objeto crítico, como un generador, que no debe llegar a temperaturas altas para no generar un incendio. De igual forma, el sensado de temperatura se puede hacer por la rejilla de Bragg, pero en este caso, al ser fibra multipunto, la distancia respecto a la referencia no determina el punto exacto si no un espacio más amplio, como una habitación.

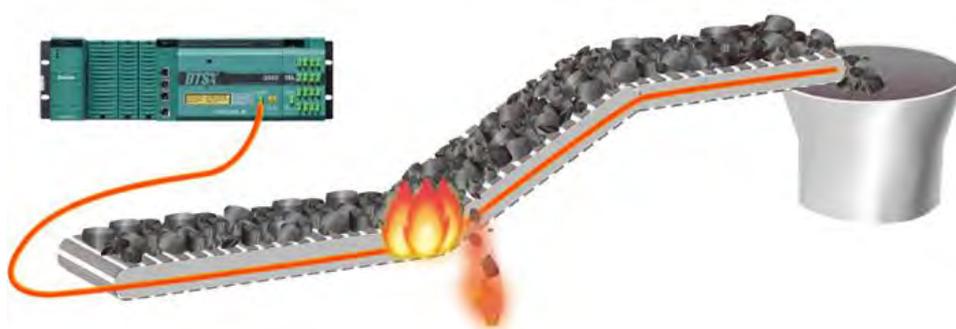


Figura 3.3. Detección de incendios con fibra óptica

Fuente [35]

Para aplicaciones externas, tal como incendios forestales, el despliegue de la fibra para el sensado de temperatura también es viable, sin embargo, hay que tener en consideración la protección del cable frente a los agentes externos, tales como los animales en un bosque. De igual forma, al ser un área grande se tendrían que desplegar distintas fibras con el fin de garantizar el monitoreo a lo largo de toda el área deseada. Para el sensado con Raman, el beneficio es que al ser distribuido se puede detectar con alta precisión la ubicación del siniestro, sin embargo, debido a sus bajas potencias, la longitud es limitada o se tiene que invertir en receptores altamente sensibles. Por otra parte, los sensores de rejilla de Bragg, al ser multipuntos, una vez identificado el siniestro se tiene un área de incidencia, menos precisa respecto a la de Raman. Sin embargo, la potencia recibida es mayor, lo que permite llegar a mayores distancias o conseguir equipos más económicos.

En la tabla 3.5 se muestra un resumen de lo descrito anteriormente.

Tabla 3.5. Características de sensores de fibra óptica en detección de incendios

Sensores	Facilidad de despliegue	Sensibilidad a los cambios	Costo asociado	Efectividad de sensado
Sensor Bragg de tensión	Media	Baja	Medio	Muy baja
Sensor Bragg de temperatura	Media	Alta	Bajo	Alta
Sensor Raman de temperatura	Media Alta	Alta	Medio	Muy alta

3.6. Sensores de fibra óptica en control del agua

En el IoT se monitorea el agua con dos objetivos principales. En primer lugar, se busca poder controlar la calidad del agua de forma que las personas puedan beber de ella [36]. Para ello se deben evaluar las características que definen si el agua está en un buen estado para beber o no, las cuales la mayoría son químicas. Para el sensado se obtiene información del PH, conductividad, nivel de turbiedad, contenido de oxígeno disuelto, nutrientes de sodio y potasio y temperatura [37]. La mayoría de estas características definen si el agua se encuentra contaminada o no, mientras que la temperatura es un indicador que, dado que el agua se encuentre en buen estado, las personas pueden beberla, ya que en condiciones ideales el agua debe encontrarse en un rango de 20°C a 30°C para poder hidratar de la mejor manera. De igual forma, si el agua tiene una temperatura menor a 5°C o mayor a 50°C no genera efectos hidratantes [38]. Similarmente, se busca controlar la calidad de agua en peceras de forma que los animales que vivan ahí se encuentren saludables tal como se aprecia en la figura 3.4.

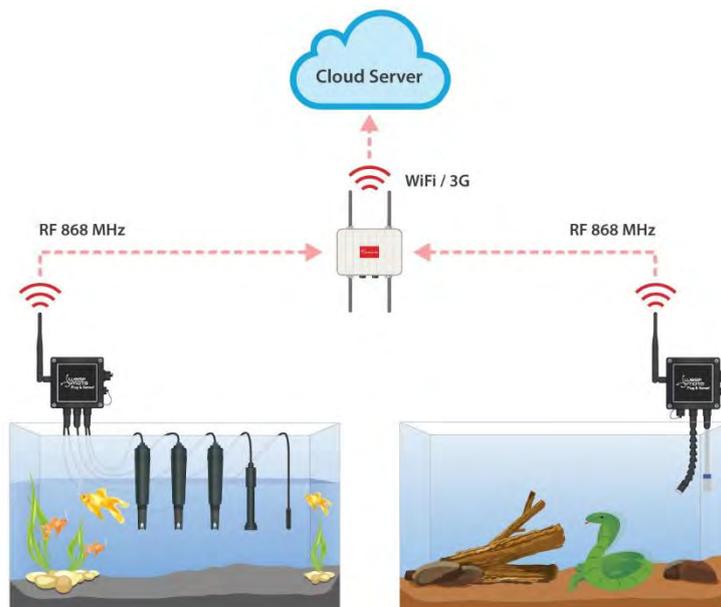


Figura 3.4. Monitoreo de calidad del agua en peceras con IoT

Fuente [39]

En segundo lugar, otro tipo de control de agua se basa en evitar que el agua supere distintos niveles con el fin de que no se rebalse de una fuente y así evitar un desastre [40]. Este tipo de control se realiza por sensores de nivel de agua, que son sensores de presión y temperatura.

Por tanto, a partir de lo descrito anteriormente, se puede identificar que los sensores de Bragg, tanto el de tensión como el de temperatura son ideales para el segundo tipo de aplicación. Al ser un sensor multipunto, se pueden implementar distintas rejillas de Bragg a lo largo de la fibra, la cual se encuentre sumergida donde se desee monitorear. Al agua tener distinta temperatura que el aire y al mismo tiempo al agua ejercer una presión distinta al cable que el aire, se generará una respuesta diferente que en el aire. De esta forma se puede detectar el nivel del agua. De igual manera, en caso supere un umbral, se puede detectar con facilidad y comunicar por medio de la red IoT. Sin embargo, para la primera aplicación, este tipo de sensores no son muy eficientes. Este tipo de sensores no

pueden medir los cambios químicos. El sensor de temperatura de bragg puede ser usado para medir la temperatura del agua, sin embargo, esta tarea lo puede realizar cualquier sensor de temperatura sin necesidad de una alta precisión, puesto que, como se describió anteriormente, solo se necesita identificar si se encuentra a una temperatura hidratable (menor a 50°C y mayor a 5°C) o no.

De forma similar el sensor Raman puede ser utilizado para ver el nivel del agua a partir de la diferencia de las temperaturas del aire y el agua. Sin embargo, depender de esta única variable puede traer malinterpretaciones con corrientes de aire o si la temperatura del aire y del agua llegan a estar a la misma temperatura. Sin embargo, el beneficio sería la opción de saber el nivel del agua de forma distribuida. Otra aplicación que se le podría dar sería el de monitorear la temperatura en peceras en función de la profundidad. A diferencia de los sensores de temperatura convencionales que solo monitorean la temperatura cercana a un punto fijo, el sensor Raman distribuido permitiría monitorear la temperatura en función de la profundidad, de forma de garantizar la calidad de vida a los distintos animales en las distintas profundidades y tener mejores datos estadísticos.

La evaluación descrita anteriormente se resume en la tabla 3.3.

Tabla 3.6. Características de sensores de fibra óptica en monitoreo del agua

Sensores	Facilidad de despliegue	Sensibilidad a los cambios	Costo asociado	Efectividad de sensado
Sensor Bragg de tensión	Alta	Alta	Bajo	Alta
Sensor Bragg de temperatura	Alta	Alta	Bajo	Alta
Sensor Raman de temperatura	Alta	Alta	Bajo	Alta

3.7. Sensores de fibra óptica en detección de intrusos

El último tema que se desarrolla en esta investigación es el uso del IoT para detectar intrusos en zonas restringidas, o en lugares no deseados. Para ello es importante saber identificar con claridad los miembros permitidos de los potenciales intrusos [41].

Principalmente en el IoT se utilizan sensores ópticos y de sonido con procesamiento de imagen y sonido digital, de tal forma que a través de una red neuronal se pueda predecir si las personas que se encuentran en una determinada zona son deseables o no [41]. De forma similar, se utilizan sensores de presencia infrarrojos para definir el área de evaluación y en caso se desee poder identificar cualquier persona que ingrese a un área restringida.

En el caso de los sensores de tensión con rejilla de Bragg, pueden ser usados para detectar la presencia de intrusos en una determinada área. Se puede desplegar la fibra en el piso del área a proteger e implementar las rejillas de Bragg en puntos estratégicos donde se predice que las personas van a cruzar. De este modo, como la presión se puede transformar en un cambio de presión como se describió anteriormente, se podría identificar la presencia de una persona. Sin embargo, este tipo de sensado trae problemas al ser multipunto, puesto que este sistema de seguridad puede llegar a tener puntos ciegos que tienen que ser cubiertos. Similarmente, se necesitaría más de una capa de fibra para asegurar la correcta detección [42]. En la práctica, el sensor de tensión de Bragg no es el mejor, pero existen otros tipos de sensores de fibra óptica que no fueron evaluados en esta investigación, tal como el Brillouin y el DAS que al ser distribuidos permiten hacer esta tarea sin tener puntos ciegos y con gran precisión. Adicionalmente, este tipo de sensor no permite identificar la identidad de la persona que cruza el área, por tanto, se necesitarían mecanismos adicionales.

Por otra parte, los sensores de temperatura, tanto Raman como el sensor de temperatura con la rejilla de Bragg, no tienen mucha aplicación en el tema de detección de intrusos. Se podrían utilizar para detectar el calor que emiten las personas en un área cerrada, sin embargo, no se puede garantizar con precisión la presencia de un individuo por este método. Por tanto, para este tipo de aplicación los sensores de temperatura no aportarían.

En la tabla 3.7 se aprecia el resumen de los explicado anteriormente.

Tabla 3.7. Características de sensores de fibra óptica en la detección de intrusos

Sensores	Facilidad de despliegue	Sensibilidad a los cambios	Costo asociado	Efectividad de sensado
Sensor Bragg de tensión	Media	Media Baja	Medio Alto	Media Baja
Sensor Bragg de temperatura	Muy Baja	Muy Baja	Muy Baja	Nula
Sensor Raman de temperatura	Muy Baja	Muy Baja	Muy Baja	Nula

Conclusiones

- El uso de los sensores de fibra óptica descritos anteriormente no llegan a aportar considerablemente en la mayoría de las aplicaciones necesarias del IoT. Sin embargo, si existe trae beneficios considerables en las aplicaciones de monitoreo del agua, detección de incendios para los sensores de temperatura y detección de fallas de estructura para los sensores distribuidos Raman.
- Existen pocas aplicaciones del IoT que requieran de un sensado distribuido. Sin embargo, en las aplicaciones que si lo requieren es necesario el uso de un sensor de fibra óptica.
- El sensor de fibra óptica de Bragg trae más beneficios que el sensor de fibra óptica de Raman cuando se prioriza el nivel de recepción de la señal que el sensado distribuido. Además, otro beneficio de este sensor es su capacidad para sensar la presión además de la temperatura.
- La principal ventaja del sensor de Raman respecto al sensor de Bragg es el beneficio de poder sensar distribuidamente. Además, como el cambio se presenta en la amplitud la detección es más sencilla.

Bibliografía

- [1] M. Gracia, “¿Qué es IoT (Internet Of Things)? .”
<https://www2.deloitte.com/es/es/pages/technology/articles/IoT-internet-of-things.html> (accessed Dec. 02, 2020).
- [2] R. Sharma, “Top 15 Sensor Types Used By IoT Application Development Companies.” <https://www.finoit.com/blog/top-15-sensor-types-used-iot/> (accessed Dec. 01, 2020).
- [3] Statista, “Number of IoT devices 2015-2025 | Statista.”
<https://www.statista.com/statistics/471264/iot-number-of-connected-devices-worldwide/> (accessed Dec. 22, 2020).
- [4] J. SENIOR, *Optical Fibre Communications Principles and Practice*, 3rd ed. 2009.
- [5] G. Junyet and J. Comellas, “Optical Time Domain Reflectometry (OTDR).”
- [6] M. Toca García, “Influencia de la forma del pulso de bombeo en la resolución de sensores distribuidos basados en dispersión estimulada de Brillouin en fibra óptica,” 2011.
- [7] G. Junyet and J. Comellas, “Raman-DTS.”
- [8] G. Skander, “Understanding of rayleigh scattering in optical fibers | LinkedIn.”
<https://www.linkedin.com/pulse/understanding-rayleigh-scattering-optical-fibers-gharbi-skander/> (accessed Dec. 22, 2020).
- [9] G. Junyet and J. Comellas, “Raman DTS System.” .

- [10] BWTEK, "Theory of Raman Scattering - B&W Tek." <https://bwtek.com/raman-theory-of-raman-scattering/> (accessed Dec. 02, 2020).
- [11] L. Romero, "Reflectometría óptica en el dominio de la frecuencia (OFDR) para la caracterización de componentes y dispositivos ópticos," 2012.
- [12] D. Bhor, "How Fiber Optic Temperature Sensor Works | by Daisy Bhor | Medium." <https://medium.com/@daisybhor/how-fiber-optic-temperature-sensor-works-86480abf2112> (accessed Nov. 30, 2020).
- [13] A. Güemes, A. Fernández-López, P. F. Díaz-Maroto, A. Lozano, and J. Sierra-Perez, "Structural health monitoring in composite structures by fiber-optic sensors," *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 4, pp. 1–11, 2018, doi: 10.3390/s18041094.
- [14] ToolBoom, "Fiber Optic Measurements, OTDR Trace Recording and Analysis - ToolBoom." <https://toolboom.com/en/articles-and-video/fiber-optic-measurements-otdr-trace-recording-and-analysis/> (accessed Nov. 30, 2020).
- [15] Electrical Theorems, "OTDR - Optical Time Domain Reflectometer | ELECTRICAL THEOREMS." <http://electricaltheorems.blogspot.com/2015/09/otdr-optical-time-domain-reflectometer.html> (accessed Nov. 30, 2020).
- [16] Y. Muanenda, "Recent Advances in Distributed Acoustic Sensing Based on Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometry," *J. Sensors*, vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/3897873.
- [17] S. Pérez, G. Georgina, E. A. Andrade, G. Eduardo, S. Romero, and J. Adolfo,

- “Fuente Sintonizable de Fibra Óptica para Aplicaciones en Banda-C,” pp. 1–14, 2017.
- [18] G. Junyet and J. Comellas, “Bragg Gratings in Optical Fibers,” pp. 0–46.
- [19] IPAC-SA, “Sensores por Fibra Óptica.” <http://www.ipac-sa.com.ar/fibraoptica.html> (accessed Dec. 01, 2020).
- [20] S. Aleksic, “A survey on optical technologies for IoT, smart industry, and smart infrastructures,” *J. Sens. Actuator Networks*, vol. 8, no. 3, 2019, doi: 10.3390/jsan8030047.
- [21] D. Sehrawat and N. S. Gill, “Smart sensors: Analysis of different types of IoT sensors,” *Proc. Int. Conf. Trends Electron. Informatics, ICOEI 2019*, no. Icoei, pp. 523–528, 2019, doi: 10.1109/ICOEI.2019.8862778.
- [22] Think Big Empresas, “Aparca tu coche con IoT.” <https://empresas.blogthinkbig.com/aparca-tu-coche-con-iot/> (accessed Nov. 09, 2020).
- [23] R. Kanan and H. Arbess, “An IoT-Based Intelligent System for Real-Time Parking Monitoring and Automatic Billing,” *2020 IEEE Int. Conf. Informatics, IoT, Enabling Technol. ICIoT 2020*, pp. 622–626, 2020, doi: 10.1109/ICIoT48696.2020.9089589.
- [24] Libelium, “New Smart Parking by Libelium includes Double Radio with LoRaWAN and Sigfox | Libelium.” <https://www.libelium.com/libeliumworld/smart-parking-surface-sensor-lorawan-sigfox-lora-868-900-915-mhz/> (accessed Dec. 22, 2020).

- [25] F. Samboni, S. Bedoya, F. Y. Vivas, and O. M. Caicedo, "MEC IoT: Monitorización de estructuras civiles en el contexto IoT," *2017 IEEE Colomb. Conf. Commun. Comput. COLCOM 2017 - Proc.*, 2017, doi: 10.1109/ColComCon.2017.8088203.
- [26] Profesor de Química, "Ecuación del gas ideal."
<https://profesorparticular68.wordpress.com/ecuacion-del-gas-ideal/> (accessed Dec. 01, 2020).
- [27] R. Prasad, "Energy Efficient Smart Street Lighting System in Nagpur Smart City using IoT-A Case Study," *2020 5th Int. Conf. Fog Mob. Edge Comput. FMEC 2020*, pp. 100–103, 2020, doi: 10.1109/FMEC49853.2020.9144848.
- [28] PHILIPS, "Iluminación inteligente y el Internet de las cosas."
<https://www.lighting.philips.es/soporte/contacto/tendencias-en-iluminacion/smart-city/iot-iluminacion-inteligente> (accessed Dec. 03, 2020).
- [29] M. Caroline Viola Stella Mary, G. Prince Devaraj, T. Anto Theepak, D. Joseph Pushparaj, and J. Monica Esther, "Intelligent energy efficient street light controlling system based on IoT for smart city," *Proc. Int. Conf. Smart Syst. Inven. Technol. ICSSIT 2018*, no. Icssit, pp. 551–554, 2018, doi: 10.1109/ICSSIT.2018.8748324.
- [30] LIFX, "How hot are LED light bulbs? – LIFX UK."
<https://uk.lifx.com/blogs/the-latest/how-hot-are-led-light-bulbs> (accessed Dec. 03, 2020).
- [31] B. Prabha, "An IoT Based Efficient Fire Supervision Monitoring and Alerting System," *Proc. 3rd Int. Conf. I-SMAC IoT Soc. Mobile, Anal. Cloud, I-SMAC*

- 2019, pp. 414–419, 2019, doi: 10.1109/I-SMAC47947.2019.9032530.
- [32] Agenda País, “Desarrollan solución IoT para detección temprana de incendios - El Mostrador.” <https://www.elmostrador.cl/agenda-pais/2019/11/22/desarrollan-solucion-iot-para-deteccion-temprana-de-incendios/> (accessed Dec. 03, 2020).
- [33] LibroDar, “Incendios forestales.” https://noticias-librodar.com.ar/index.php?option=com_content&view=article&id=870:incendios-forestales&catid=36:informacion-util-en-medio-ambiente&Itemid=56 (accessed Dec. 03, 2020).
- [34] K. Jayaram, K. Janani, R. Jeyaguru, R. Kumaresh, and N. Muralidharan, “Forest Fire Alerting System with GPS Co-ordinates Using IoT,” *2019 5th Int. Conf. Adv. Comput. Commun. Syst. ICACCS 2019*, pp. 488–491, 2019, doi: 10.1109/ICACCS.2019.8728383.
- [35] Yokogawa, “Conveyor Belt Fire Detection | Yokogawa Electric Corporation.” <https://www.yokogawa.com/library/resources/application-notes/conveyor-belt-fire-detection/> (accessed Dec. 22, 2020).
- [36] Consumotic, “Medirán calidad del agua con soluciones de IoT .” <https://www.consumotic.mx/tecnologia/49863/> (accessed Dec. 06, 2020).
- [37] S. Krishna, T. V. Sarath, M. S. Kumaraswamy, and V. Nair, “IoT based water parameter monitoring System,” *Proc. 5th Int. Conf. Commun. Electron. Syst. ICCES 2020*, no. Icces, pp. 1299–1303, 2020, doi: 10.1109/ICCES48766.2020.09138001.
- [38] Bebidas Naturales, “¿A qué temperatura debemos beber el agua?”

- <https://bebidas-naturales.com/a-que-temperatura-debemos-beber-el-agua/>
(accessed Dec. 06, 2020).
- [39] Libelium, “Water Quality Monitoring in Europe’s Largest Fluvial Aquarium | Libelium.” <https://www.libelium.com/libeliumworld/success-stories/water-quality-monitoring-europe-largest-fluvial-aquarium-zaragoza/> (accessed Dec. 22, 2020).
- [40] T. Perumal, M. N. Sulaiman, and C. Y. Leong, “Internet of Things (IoT) enabled water monitoring system,” *2015 IEEE 4th Glob. Conf. Consum. Electron. GCCE 2015*, pp. 86–87, 2016, doi: 10.1109/GCCE.2015.7398710.
- [41] K. Lashmi and A. S. Pillai, “Ambient Intelligence and IoT Based Decision Support System for Intruder Detection,” *Proc. 2019 3rd IEEE Int. Conf. Electr. Comput. Commun. Technol. ICECCT 2019*, 2019, doi: 10.1109/ICECCT.2019.8869327.
- [42] G. Junyet and J. Comellas, “Distributed Acoustic Sensing (DAS).”