

VI. Sensores químicos y de parámetros físicos basados en fibra óptica

Rubén Alejandro Vázquez Sánchez

Introducción

En la actualidad se ha tenido una importante inclinación hacia la investigación de problemas que afectan al medio ambiente, así como también de las posibles soluciones. La calidad del aire, del suelo y del agua son áreas que tienen un importante interés debido a que forman parte del entorno en el cual la vida se desarrolla. Como es de nuestro conocimiento, un ambiente con aire o agua altamente contaminados es un lugar no apto para el desarrollo de la vida, de igual forma un suelo contaminado. Cuando se trata de medir uno o varios parámetros físicos ya sea del agua, aire o suelo o si se trata de detectar la presencia de alguna sustancia y cuantificarla, es necesario utilizar primeramente algún tipo de sensor que nos proporcione datos confiables para poder aplicar soluciones que mitiguen los riesgos que existan. Hasta ahora los tipos de sensores más utilizados para estos fines son mecánicos, electroquímicos, y en investigación y, para algunos parámetros ya en aplicación, se encuentran los sensores ópticos.

En este capítulo se hace una revisión a cerca de las aplicaciones de la fibra óptica en sensores, más específicamente, aquellos que pueden aplicarse en la detección y cuantificación de sustancias contaminantes en distintos ambientes, así como en la medición de parámetros físicos.

Antecedentes

El monitoreo del medio ambiente es necesario hoy en día para evitar desastres ecológicos. El dióxido de azufre, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles que proceden de las emisiones de los vehículos, de fábricas, refinerías, industrias en general, laboratorios, están presentes en concentraciones “normales” en el aire que respiramos. Pero ¿qué sucedería si repentinamente esas concentraciones aumentan sin darnos cuenta? La respuesta es: un desastre ecológico. De igual forma, sustancias tales como los pesticidas y herbicidas, partículas microbiológicas, compuestos volátiles orgánicos, se encuentran presentes en el agua de uso doméstico, en ríos, en mantos acuíferos subterráneos, en concentraciones “normales” a las que el ser humano se ha acostumbrado. Pero si esos niveles de concentraciones aumentan, la salud humana estaría en riesgo. Es por ello que es necesario contar con un sistema de monitoreo del medio ambiente a través de sensores para saber si nuestro río está vivo, si nuestro suelo no contiene sustancias tóxicas derramadas accidentalmente o si nuestro aire contiene sustancias que antes no presentaba.

Hoy en día están emergiendo nuevas investigaciones a cerca de las aplicaciones de la fibra óptica en biosensores, sensores bioquímicos y químicos, sensores medioambientales, sensores biomédicos, etcétera. Esto es debido a que los sensores de fibras ópticas tienen importantes ventajas sobre los sensores electrónicos y mecánicos: tienen inmunidad a interferencia electromagnética; estos sistemas explotan a la luz como la portadora de la información, son ligeros, son de tamaño pequeño; pueden tener acceso a lugares inaccesibles para los sistemas electrónicos y mecánicos, alta sensibilidad, gran ancho de banda; se puede transportar gran cantidad de información en una sola fibra, se pueden realizar sensores remotos y distribuidos, naturaleza pasiva; pueden aplicarse en lugares altamente inflamables en donde los sensores electrónicos estarían descartados, como la fibra es hecha de vidrio es inmune a ciertas sustancias químicas; esto es, puede utilizarse en ciertos tipos de suelos o en atmósferas corrosivas, etcétera, por mencionar algunas. Pero a pesar de estas ventajas, la tecnología de los sensores de

fibra óptica tiene una desventaja: su alto costo, aún así, esta tecnología sigue en aumento estimulado por los avances en la optoelectrónica especialmente para aplicaciones en telecomunicaciones: fuentes de luz, fotodetectores, conectores y fibras ópticas pueden fácilmente adaptarse para propósitos de sensores.

Sensores químicos

En los primeros años de la química, la mayor parte de los análisis se realizaban separando los componentes de interés de una muestra (llamados analitos) mediante procedimientos de precipitación, extracción o destilación. Cuando se trataba de un análisis cualitativo, los componentes separados se trataban seguidamente con reactivos originándose unos productos que se podían identificar por su color, su punto de ebullición o de fusión, su solubilidad en una serie de disolventes, su olor, su actividad óptica o su índice de refracción. Cuando se trataba de análisis cuantitativos, la cantidad del analito se determinaba mediante medidas gravimétricas o volumétricas. En las primeras se determinaba la masa del analito o la de algún compuesto generado a partir del mismo. En los procedimientos volumétricos se determinaba el volumen o el peso de algún reactivo patrón que reaccionase completamente con el analito^[1].

Estos métodos clásicos para la separación y determinación de los analitos se usan todavía en muchos laboratorios. Sin embargo su grado de aplicación general va disminuyendo a medida que los métodos instrumentales los van desplazando, esto debido a una remarcada diferencia en el tiempo de análisis. Mientras que un método clásico de análisis puede durar días, un método instrumental puede arrojar resultados en cuestión de minutos.

A principios del siglo XX, para resolver los problemas del análisis, los investigadores químicos empezaron a utilizar fenómenos distintos a los utilizados. Las medidas de sus propiedades físicas tales como la conductividad, el potencial de electrodo, la absorción o emisión de la luz, la fluorescencia; además, en la separación de mezclas complejas, técnicas como la cromatografía y técnicas electroforéticas muy efica-

ces empezaron a reemplazar a la destilación, extracción y precipitación como etapas previas a la determinación cualitativa o cuantitativa. Todos estos métodos modernos de separación y determinación de especies químicas se les conocen en conjunto como métodos instrumentales de análisis^[1].

El desarrollo de estos métodos instrumentales de análisis ha ido paralelo al desarrollo de la electrónica moderna (optoelectrónica) y al de sistemas computacionales.

En una lista de métodos instrumentales de análisis y la propiedad química o física que utilizan se puede mencionar por ejemplo: espectroscopia de emisión que está basada en el análisis de la radiación emitida por el analito, la espectrofotometría y fotometría que están basadas en el análisis de la radiación absorbida, la espectroscopia Raman que está basada en el análisis de la radiación dispersada, etcétera. Dentro de estos métodos instrumentales existen los instrumentos para el análisis, los cuales, por ejemplo en un análisis químico, transforman la información de las propiedades físicas o químicas del analito en información que puede ser interpretada por el ser humano. Esto significa que un instrumento para el análisis es un sistema de comunicación entre el objeto de estudio y el científico^[1]. Un ejemplo de un instrumento para el análisis es un espectrofotómetro, en el cual un haz de luz compuesto por una banda estrecha de longitudes de onda se pasa a través de una muestra de estudio y se determina la razón entre la luz incidente y la emitida lo cual es una medida de la concentración del analito. Otro de los instrumentos de análisis son los sensores químicos o bioquímicos los cuales son dispositivos que proporcionan información cualitativa y cuantitativa de analitos contenidos en una muestra química.

Aunque no se ha conseguido dar una definición de sensor que englobe a las diversas áreas en donde se utiliza, básicamente, se denomina sensor al dispositivo analítico capaz de responder en continuo, *in situ*, en tiempo real y de modo reversible a los cambios producidos en un parámetro físico o en la concentración de una especie química.

Definición

O. S. Wolfbeis *et al* ^[2] definen un sensor químico como un pequeño dispositivo analítico que puede proporcionar información en tiempo real e *in situ* sobre la presencia de compuestos específicos o iones en una muestra compleja. En una forma más fácil, un sensor químico es una sonda que se inserta dentro de la muestra de interés para obtener una señal analítica que puede ser convertida a unidades de concentración.

Valcárcel *et al* ^[3] proponen dos definiciones de sensor químico de acuerdo a su operación y a su composición (estructura). Así en una primera definición, un sensor es un dispositivo analítico (no un instrumento ni un aparato) que responde de forma directa, reversible, continua, rápida, exacta, en tiempo real, e *in situ* a los cambios en la concentración (actividad) de especies químicas (ver figura 1). Basándonos en la estructura, un sensor químico se puede definir como un dispositivo analítico que está formado de tres partes:

- a. Una fase o terminal sensible, que es un elemento de reconocimiento capaz de interactuar selectivamente con la especie de interés, con el resultado de un cambio físico o químico del sistema cuya intensidad estará relacionada con la concentración de la especie a analizar.
- b. Un transductor de tipo óptico, eléctrico, térmico, magnético, etcétera, encargado de transformar la interacción química en una señal física que pueda ser medida.
- c. Un sistema electrónico, que está encargado de amplificar y procesar las señales físicas de forma tal que puedan ser desplegadas en un display u ordenador.

De esta forma se puede tener lecturas confiables de pH, molaridad, cantidad de sustancia, presión, etcétera.

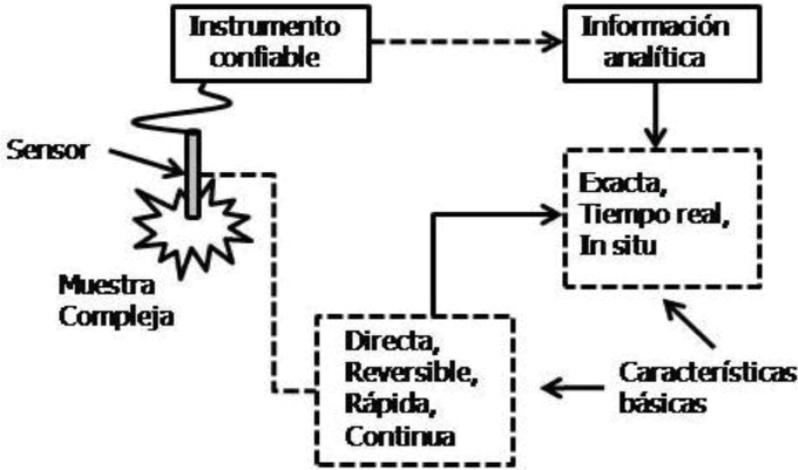


Figura 1. Características de un sensor químico ideal. Valcárcel *et al* ^[3]

En la figura 1 se muestra un sensor con todas las características deseables. Debido a que una gran variedad de sensores descritos en la literatura no cumplen con ciertas características como precisión, sensibilidad, selectividad requeridas para asegurar resultados confiables, el término tiempo real o *in situ* carece de significado por lo que las dos definiciones anteriores están consideradas en términos ideales.

Clasificación

Valcárcel *et al* ^[3] realizan una clasificación de los sensores químicos de acuerdo a varios criterios, se excluyen aquellos sensores que son diseñados para monitorear un parámetro físico tal como temperatura, presión o viscosidad, figura 2:

- Según el parámetro de medida el sensor puede ser químico o bioquímico: Una primera clasificación general de los sensores químicos puede hacerse atendiendo a la naturaleza química o bioquímica del analito (y ocasionalmente de la muestra). Esto estaría en aparente contradicción con otra clasificación basada en la naturaleza del elemento de reconocimiento. Así, un sensor

que emplea una enzima inmovilizada para determinar un analito de interés biológico (glucosa por ejemplo) puede ser considerado un biosensor. Por otra parte, si se utiliza un ligando cromogénico para determinar un ión metálico hablaríamos de sensor químico. Sin embargo, se puede utilizar el término sensor químico o biosensor indistintamente para referirnos a aquél dispositivo que incorpora materiales biológicos para analizar un sustrato químico (o un inhibidor en una muestra biológica).

- La existencia o no de un proceso químico: Los sensores químicos pueden ser activos o pasivos dependiendo de si incorporan o no una “fase sensible” donde tiene lugar la reacción química de reconocimiento. Hay que mencionar que los sensores pasivos no cumplen en principio los requisitos incluidos en la definición de sensor en cuanto a su estructura (existencia de una fase sensible) puesto que simplemente se trata de una medida directa de una propiedad físico-química del analito; sin embargo, son los más fáciles de realizar, operan de forma similar a los sensores activos y tienen la ventaja añadida de una completa reversibilidad, por lo que son los más utilizados en la mayoría de las aplicaciones industriales.
- La inclusión o no de un proceso de separación adicional: muchos sensores están basados en un proceso de separación que tiene lugar en la fase sensible. El proceso es usualmente el de absorción y secuencial o simultáneamente con la detección en presencia o ausencia de una reacción química.
- El tipo de transductor empleado: esta clasificación es sin duda la más intuitiva ya que está basada en el tipo de transductor empleado para revelar los cambios físico químicos que ocurren en la fase sensible en la presencia del analito. Estos transductores pueden ser ópticos, electroquímicos, mecánicos, acústicos, magnéticos, etcétera, históricamente, los transductores ópticos y mecánicos han ganado terreno debido a muchos factores entre ellos su uso en ambientes hostiles y peligrosos en donde un transductor eléctrico no se puede emplear.

- La relación entre la fase sensible y el transductor: otra clasificación de los sensores químicos establece dos categorías en función de la forma de acoplamiento del elemento de reconocimiento y el transductor. Estos dos elementos esenciales pueden estar conectados ópticamente, por ejemplo mediante el empleo de una fibra óptica, o eléctricamente; o bien el transductor y la fase sensible pueden estar integrados en un único elemento.
- El tipo de interacción con el analito: en función del tipo de interacción con el analito, los sensores se pueden clasificar en: reversibles, cuando la fase reactiva no se consume durante su interacción con el analito. Este tipo de sensores responden tanto a altas como a bajas concentraciones de analito y proporcionan una respuesta nula en ausencia del mismo. De esta forma un sensor químico reversible debe responder al igual que un sensor físico, por ejemplo un termómetro^[2]. Irreversibles: cuando existe consumo de la fase reactiva. A su vez, se pueden subdividir en regenerables y no regenerables. Los primeros son aquéllos que dan lugar a una respuesta similar a la de un sensor reversible, pero con la diferencia de que no operan de forma continua, ya que requieren una etapa de regeneración para poder ser utilizados de nuevo. En el caso de los sensores irreversibles no regenerables, también denominados “sondas” para diferenciarlos de los auténticos sensores, sólo responden a incrementos en la concentración del analito saturándose con facilidad, por lo que se suelen emplear para una única medida.
- Su forma externa o configuración: de acuerdo a la apariencia externa o configuración del sensor y a la forma como la fase sensible interacciona con la muestra podemos distinguir entre: sensores tipo sonda, sensores planos y sensores tipo célula de flujo. En el primer caso, la fase reactiva está localizada en el extremo del terminal sensible (electrodo o fibra óptica), que a su vez se encuentra en contacto directo con la muestra. En el caso de los sensores planos, el elemento sensor está localizado sobre una superficie plana sobre la que se depositan unas gotas de la muestra, un

ejemplo típico es el sensor comercial utilizado por pacientes diabéticos para el monitoreo del nivel de glucosa en sangre. Finalmente, en los sensores tipo célula de flujo, la muestra es aspirada (o inyectada) y transferida a una célula de flujo donde se sitúa la fase sensible. Su principal característica es que la fase sensible se dispone en el sistema de detección, es decir, los procesos de reacción y detección son simultáneos.

- El modo de operación: en cuanto al modo de operación, los sensores químicos pueden trabajar en modo discontinuo o discreto y en modo continuo. Mientras que los sensores tipo sonda pueden ser utilizados tanto en modo continuo como en modo discontinuo, los sensores tipo célula de flujo sólo pueden operar en régimen continuo.
- Finalmente, según el número de especies detectadas: los sensores químicos pueden clasificarse de acuerdo al número de analitos que son capaces de monitorear en una misma muestra. Así, la mayoría de los sensores responden a la concentración de una única especie (uniparamétricos), mientras que existen algunos capaces de determinar simultáneamente varios analitos (multiparamétricos). Entre éstos últimos podemos distinguir dos tipos: (1) aquéllos que incorporan un elemento de reconocimiento por cada analito en la misma fase sensible; (2) aquéllos que hacen uso de un único elemento de reconocimiento conectado o integrado a un transductor capaz de realizar un análisis de señales diferentes generadas por cada analito.

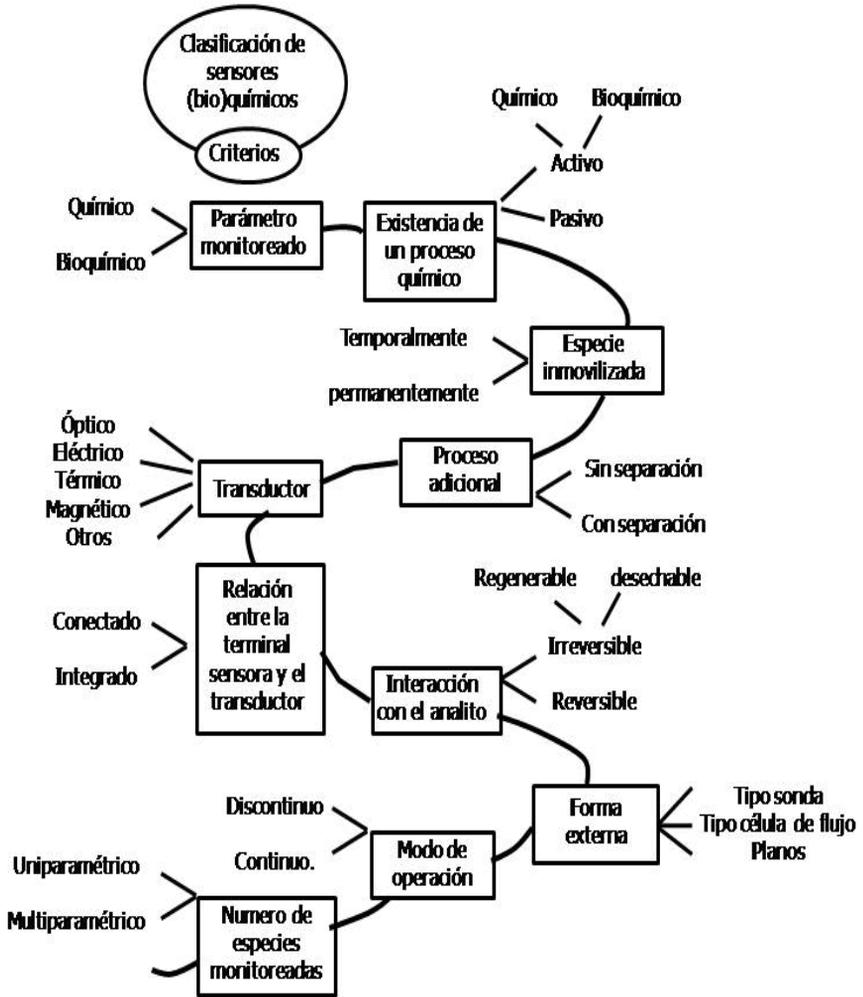


Figura 2. Clasificación de un sensor químico basada en varios criterios. Valcárcel *et al* [3].

Propiedades

La gran diversidad de sensores químicos que existen es fácilmente atribuible al conjunto de propiedades que poseen todos ellos, estas propiedades están basadas en características analíticas, características de operación y características temporales^[4,5].

- Selectividad, sensibilidad y resolución en las medidas: la selectividad describe el grado al cual el sensor responde a solamente una especie deseada en una muestra con poca o nula interferencia de especies no importantes. La sensibilidad describe la mínima concentración y cambios en la concentración que pueden ser detectadas por el dispositivo en forma exitosa y repetida. Se puede decir que para sensores químicos la sensibilidad es un sinónimo de resolución.
- Pequeño tamaño: requisito imprescindible para la fabricación de sistemas de medida portátiles, necesarios en medidas de campo en donde se puede utilizar una simple batería como fuente de alimentación, facilitando al mismo tiempo el contacto entre el terminal sensible y la muestra en lugares de difícil acceso.
- Durabilidad: esta propiedad se refiere al tiempo de vida del sensor, es decir, el sensor debe mantenerse activo sin perder ninguna de sus propiedades, el mayor tiempo posible. No obstante, una menor durabilidad del sensor puede verse compensada, en ocasiones, con la fabricación de terminales de corto tiempo operacional pero económicamente rentables. Además, esta propiedad incluye el intervalo de tiempo que existe entre el momento de fabricación del sensor y su utilización.
- Bajo costo: depende fundamentalmente de la electrónica de los equipos de medida y, generalmente, constituye un obstáculo insalvable para la comercialización de sensores ya optimizados a nivel de laboratorio. Esta propiedad es una desventaja de los sensores de fibra óptica ya que los componentes, por ejemplo, diodos láser, acopladores, WDM's, rejillas de Bragg, etcétera, son aún de alto costo.
- Reversibilidad: idealmente un sensor debe ser completamente reversible, es decir, tras la interacción con el analito o especie de interés debe ser capaz de recuperar las condiciones iniciales. Este requisito no constituye, sin embargo, una limitación para sistemas fácilmente regenerables e incluso en aquellos completamente irreversibles cuyo bajo costo permita la fabricación de sensores desechables.

- Respuesta rápida: al contrario que otras técnicas analíticas clásicas que requieren una toma de muestra previa al análisis en el laboratorio, los sensores permiten detectar situaciones de alarma en tiempo real respondiendo en cuestiones de minutos a segundos.
- Sencillez: el sistema de medida y la fabricación del sensor deben facilitar un correcto manejo del mismo por personal no especializado, permitiendo al mismo tiempo la construcción de terminales sensibles reproducibles.
- Robustez: tanto del principio de medida, que debe permanecer inalterable, como de la fase sensible, imprescindible en medidas de campo donde el sensor se enfrenta en numerosas ocasiones a medios hostiles o peligrosos. Esta propiedad es característica de los sensores de fibra óptica, especialmente los pasivos o directos, ya que al no incluir una fase sensible son capaces de trabajar en tales ambientes, por ejemplo en centrales nucleares.

Aplicaciones

La aplicación de los sensores químicos es muy amplia y va desde el monitoreo de contaminantes en el medio ambiente hasta la detección de explosivos en aplicaciones militares^[67]. En ciencia e investigación, estos sensores son utilizados para caracterizar muestras de gas en experimentos de laboratorio y para el seguimiento de derrames químicos peligrosos en el suelo y el agua. Nuevas aplicaciones incluyen la localización y seguimiento de infestaciones de insectos, tales como las termitas, las cuales dejan un olor característico debido a la digestión de la celulosa y para el monitoreo de los ciclos menstruales del ganado, esto último para mejorar la efectividad de la inseminación artificial. En la industria, los sensores químicos son utilizados para el proceso y control de calidad en la fabricación de plásticos y en la producción de metales en donde los gases que se liberan en la fundición pueden afectar las características del metal, tales como el carácter quebradizo. Los sensores químicos encuentran nuevas aplicaciones como narices electrónicas y son empleados para la prueba y control en la industria

alimenticia, para monitorear la distribución de pesticidas en la agricultura y para graduar bebidas. En la medicina, los sensores son utilizados para determinar la salud del paciente monitoreando el oxígeno y ras- tros de gas contenidos en los pulmones y en las muestras de sangre, así mismo, son empleados como indicadores en los problemas de digestión en pacientes. Estas son algunas aplicaciones de los sensores químicos, se puede seguir nombrando más áreas de aplicación, pero se cubriría todo un capítulo.

Sensores químicos de fibra óptica

Los primeros desarrollos de la fibra óptica fueron los pasos iniciales para el desarrollo de los sensores de fibra óptica. Desde el momento en que se comprobó que se podía guiar radiación luminosa a través de la fibra óptica con pérdidas mínimas, se pensó que era posible que una o varias de las propiedades de la radiación fueran modificadas en forma predecible y controlada ante los cambios en las condiciones físicas del medio. Así surgieron los sensores de fibra óptica, los cuales ya se comercializan para medir ciertos parámetros. Con la utilidad de la fibra óptica en sensores físicos, la aplicación en sensores químico no se hizo esperar y es que debido a la atractiva posibilidad de realizar los análisis *in situ* en lugar de recoger y, posteriormente, analizar las muestras en el laboratorio, además de combinar las ventajas de las fibras ópticas con la selectividad y especificidad de los sistemas químicos, impulsó el nacimiento de los sensores químicos de fibra óptica. Desde aquel momento el científico dispone de la opción de permanecer en el laboratorio mientras se reciben, a gran velocidad y de manera continua, todos los datos del análisis químico del medio a controlar.

En forma general, esta subclase de sensores químicos consta de una estructura que se caracteriza por tener una fase sensible situada en la terminal sensible que en algunas ocasiones puede ser la misma fibra óptica en donde puede o no encontrarse inmovilizado un indicador, cuyas propiedades ópticas (absorbancia, luminiscencia, reflectancia) se modifican en función de la concentración de analito presente en la muestra. La señal óptica así generada es transmitida por la misma fibra

óptica hasta un detector, para luego ser amplificada y procesada convenientemente.

Los sensores de fibra óptica y en especial los sensores químicos son más conocidos dentro de la comunidad científica como optodos u optrodos. El primer término fue utilizado originalmente en 1975 por los investigadores alemanes Optiz y Lübbers haciendo referencia a un sistema óptico de medida de CO_2 [2-4]. El segundo término se refiere más bien a un electrodo óptico, pero nombrado incorrectamente debido a que estos sensores analizan una señal óptica y no eléctrica.

Ventajas y limitaciones de los sensores químicos de fibra óptica

Los sensores de fibra óptica presentan las mismas ventajas atribuibles al resto de los sensores, a las que se unen adicionalmente algunas propiedades características de los optodos que los hace particularmente atractivos en áreas tan dispares como la biotecnología, el medio ambiente, la química clínica o el control de procesos industriales^[5]:

- No requieren señal de referencia. A diferencia de, por ejemplo, los electrodos potenciométricos y amperométricos que miden diferencias absolutas de potencial, los optodos no necesitan una señal de referencia.
- Posibilidad de construir sensores remotos. La utilización de fibras ópticas de baja pérdida como guías de luz posibilita la medida a grandes distancias, facilitando el acceso del sensor a los lugares de medida. Las grandes profundidades en lagos o medios expuestos a interferencias electromagnéticas o radiación ionizante, al contrario que en sensores eléctricos convencionales, no constituyen un problema para estos sistemas, ya que la distancia entre el terminal sensible y el transductor puede adaptarse a las condiciones de medida sin que ello suponga pérdida de información. En Química Clínica, la utilización de este tipo de sensores evita la conexión directa del paciente al equipo eléctrico y, al no interferir sobre las fibras la radiación externa, son especialmente útiles en radioterapia^[4-8].

- Medición multiparamétrica. Debido al gran ancho de banda de las fibras ópticas, es posible transmitir mucha más información que los cables eléctricos. Esto es, las señales ópticas que se originan por la presencia de diferentes analitos en la muestra pueden diferir unas de otras en longitud de onda, fase, modulación de intensidad o polarización, por lo tanto se puede hacer un multiplexado de estas señales para que se pueda tener un sensor multiparamétrico.
- Terminales sensibles fácilmente intercambiables. El análisis multiparamétrico puede llevarse a cabo también por intercambio de terminales sensibles específicos, cuyos indicadores basados en el mismo principio de medida permitan la utilización de un solo dispositivo instrumental. Esta ventaja de los sensores químicos de fibra óptica es particularmente útil en Química Clínica, ya que facilita la esterilización de los terminales y posibilita la utilización de sensores desechables^[4 5].

Estas y otras ventajas mas existen para este tipo de sensores como son la flexibilidad de la fibra, la no dependencia de la fibra con la temperatura, las dimensiones pequeñas de la fibra, etcétera. Pero a pesar de las enormes ventajas que poseen los sensores ópticos, para poder optimizar un método basado en los diferentes tipos de medidas es necesario tener en cuenta una serie de factores limitantes, de difícil solución en algunos casos pero no insalvables, gracias a los continuos avances de la técnica y la química, estos son:

- Se deben proteger de la luz del ambiente. La señal óptica detectada por el equipo de medida debe proceder única y exclusivamente del indicador, ya que es esta señal la que se encuentra en relación directa con la concentración de la sustancia determinante. Por este motivo, debe evitarse la exposición de la terminal sensible a la luz ambiente, o bien modular la señal procedente del indicador con objeto de poder diferenciarla de la luz externa^[4 5 9].
- Lavado o fotodegradación de los indicadores. La exposición durante horas del sensor a fuentes de luz puede provocar la fotodegradación de los indicadores. Por otro lado, éstos se encuentran

generalmente inmovilizados en membranas o soportes poliméricos en los que, en algunas ocasiones, puede producirse lavado. Los avances introducidos en el campo de los sensores ópticos han subsanado estos dos inconvenientes introduciendo nuevos métodos de medida en los que la cantidad de analito presente en la muestra no depende de la cantidad de indicador inmovilizado en el terminal sensible (sensores basados en medidas de la cinética de luminiscencia del indicador). En el resto de métodos ópticos se evita, en la medida de lo posible, la influencia de estos factores mejorando los procedimientos de inmovilización, utilizando indicadores fotoestables o bien con la oportuna calibración del sensor^[4].

- Tiempos de respuesta, en ocasiones, elevados. Esto es porque la transferencia de masa del analito al indicador es lenta, además de la cinética de interacción entre ambos^[9].
- Irreversibilidad. La existencia de pocos procesos en los que la interacción analito-indicador sea completamente reversible condiciona el carácter desechable o de obligada regeneración del sensor^[4].
- Además de estas limitaciones existen otras como son: dependencia de la concentración de analito, interferencias o limitaciones introducidas por la fibra óptica, dependencia del método de la optoelectrónica del equipo; en esto último el alto costo de la instrumentación empleada como son fuentes luminosas estables y de larga duración, láseres de semiconductor, fibras ópticas especiales, etcétera, incrementa el costo total de los sensores. Pero comparado a las ventajas que poseen, se espera un incremento en la aplicación de estos sistemas.

Clasificación de los sensores químicos de fibra óptica

Para clasificar a estos sensores se debe tomar en cuenta diferentes criterios al igual que los basados en otras tecnologías, pero una clasificación general que se presenta es la siguiente^[4 5 8]:

a) Dependiendo del tipo o naturaleza del analito o parámetro objetivo:

- Sensores químicos: son sensores que detectan especies químicas o bioquímicas (pH, O₂, CO₂...). Dentro de estos se encuentran los biosensores los cuales son empleados para detectar ciertos tipos de bacterias.
- Sensores físicos: son sensores que responden a parámetros físicos, tales como la temperatura, presión, tensión, movimiento (vibración), espesor, tamaño de la partícula...etcétera.

b) Dependiendo de la propiedad óptica medida los sensores pueden dividirse en:

- Sensores de absorbancia.
- Sensores de reflectancia.
- Sensores de luminiscencia.

1) Fluorescencia.

2) Fosforescencia.

3) Quimioluminiscencia.

c) Dependiendo de la función de la fibra óptica en el sensor y la configuración de la terminal sensible:

- Sensores extrínsecos: sensores en los que la fibra óptica actúa únicamente como guía de luz. Esto es, la fibra óptica es utilizada solamente para transportar radiación luminosa hacia y desde la región en donde la radiación es influenciada por la medición. Dentro de los sensores extrínsecos se puede dar la siguiente clasificación:
 1. Sensores extrínsecos directos (de 1ª generación): sensores que detectan una propiedad óptica del analito mismo, proporcional a su concentración y directamente medible. Se han utilizado para realizar análisis espectrofotométricos a grandes distancias como por ejemplo, para aquellas aplicaciones en las que no es posible el contacto físico con la muestra. Entre las ventajas de su empleo se puede destacar su resistencia, simplicidad, estabilidad, durabilidad y que no necesitan ser calibrados. Sin embar-

go, pueden ser poco selectivos y el número de analitos para los que pueden utilizarse es limitado. Para su aplicación es necesario considerar parámetros tales como el índice de refracción del medio o la apertura numérica de la fibra que determina su cono de luz. También se denominan sensores pasivos remotos^[2,4,5,10].

2. Sensores extrínsecos indirectos: la sustancia objeto de la determinación (el analito) no posee ninguna propiedad óptica intrínseca que pueda ser medida directamente. Esto es, se necesita de una fase sensible en un extremo de la fibra óptica en donde se aloja un indicador (transductor) cuyas propiedades ópticas se modifican en función de la concentración del analito presente en la muestra (sensores de 2^a generación) o el sensor requiere la presencia de una biomolécula que, o bien es generada por el analito y es detectada por el indicador, o de lo contrario interacciona con la sustancia a determinar para que ésta pueda detectarse (sensores de 3^a generación)^[4,8].

Los sensores de 2^a y 3^a generación también se denominan sensores activos. Podemos destacar de ellos que son más selectivos que los pasivos y no se van a ver afectados por el índice de refracción del medio. Las desventajas incluyen el posible lavado o fotodescomposición del indicador en contacto con la muestra, mayores tiempos de respuesta, la mayor complejidad de construcción y en algunos casos la presencia de artefactos originados por el hinchamiento de la membrana o resinas utilizadas en su construcción^[5]. En la figura 3 se puede ver un esquema típico de un sensor químico de fibra óptica. La fuente de luz provee el medio en donde se va a imprimir la información. La salida del acoplador divisor se envía hacia un fotodetector y luego hacia un sistema de adquisición de datos en donde se procesan adecuadamente. También, se puede utilizar un espectrómetro conectado directamente en la salida del acoplador. La terminal sensible puede ser de tres tipos si se trata de un sensor extrínseco.

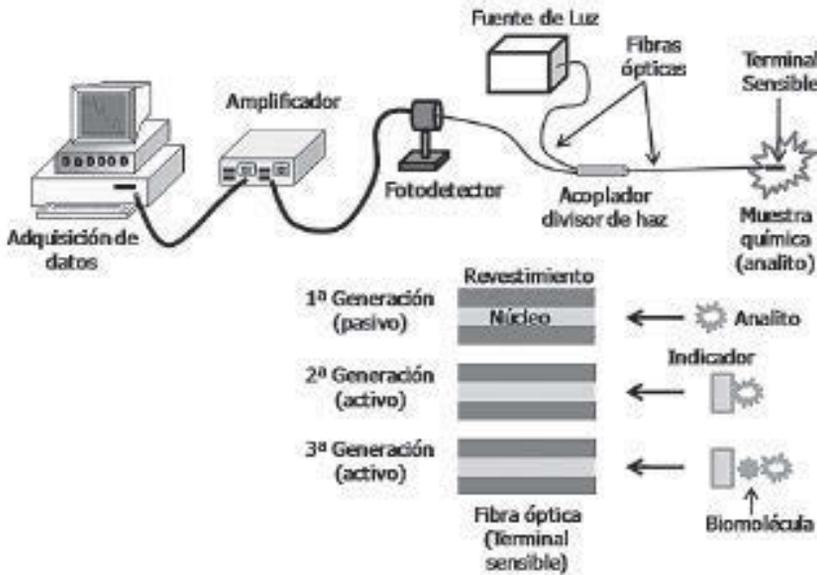


Figura 3. Esquema típico de un sensor químico de fibra óptica. La terminal sensible pertenece a un sensor extrínseco y se muestran las tres formas en que se puede estructurar dependiendo de la aplicación.

Sensores intrínsecos (activos o de onda evanescente): Muchos de los sensores de fibra para la detección de vapores orgánicos son intrínsecos. Dentro de esta categoría se pueden distinguir diferentes tipos de sensores dependiendo de la modulación de la señal óptica guiada a través de la fibra. En estos sensores el parámetro objetivo interactúa con el núcleo o la superficie de la fibra, modificando alguna de las propiedades de ésta. En este caso el dispositivo que actúa como guía de luz es, al mismo tiempo, el propio sensor. Una característica muy importante de estos sensores es que se pueden utilizar como sensores distribuidos, es decir, la medida puede realizarse en cualquier punto de la fibra óptica determinándose tanto su magnitud como su posición en la misma^[4-5]. Dentro de este grupo de sensores se puede hacer la siguiente clasificación.

1. Sensores refractométricos: la onda evanescente, transmitida desde el núcleo hacia el exterior de la fibra, interacciona con el analito (generalmente un líquido) cuyo índice de refracción modifica las constantes de propagación de la fibra.
2. Sensores de campo evanescente: las características espectrales del campo evanescente, interfaz situada entre el núcleo y el revestimiento externo de la fibra, se ven modificadas debido a la absorción de luz por parte de moléculas situadas en él.
3. Sensores basados en la modificación del núcleo de la fibra: en este caso el analito modifica directamente las propiedades del núcleo, zona de mayor densidad de luz. La respuesta del sensor depende directamente de la accesibilidad del analito al núcleo^[3-5].

d) Otro tipo de clasificación de los sensores químicos de fibra óptica es la que considera la forma, según la cual el sistema transductor modula la señal^[5].

- Sensores de amplitud (o modulados en intensidad): la sustancia objeto de análisis modifica la intensidad de la señal óptica observada (absorción, reflexión, luminiscencia...).
- Sensores interferométricos: en este tipo de sensores se produce un cambio en el patrón de interferencia de la radiación electromagnética conducida a través de la fibra óptica.
- Sensores de tiempo de vida: la cinética de desactivación del estado excitado, emisor del indicador situado en el terminal sensible, varía en función de la concentración de analito presente en la muestra.
- Sensores de modulación modal: el transductor modula en estos sensores los rayos que viajan a distintos ángulos en la fibra.
- Sensores polarimétricos: el cambio se produce en el ángulo de polarización de la luz.

Aplicaciones de los sensores químicos de fibra óptica

Dentro de las aplicaciones de estos sensores puede mencionarse las siguientes: la monitorización ambiental, el control de procesos industriales, la biomedicina y la defensa. Se han desarrollado ya con éxito

sensores ópticos para la monitorización de oxígeno molecular, dióxido de carbono, pH, hierro, sulfuro, alcoholes, humedad, temperatura, detergentes, aceites, pesticidas, glucosa, acetil colina y colesterol, etcétera, además, de la unión de los sensores ópticos con moléculas biológicas (enzimas, anticuerpos, ADN...) se construyen los biosensores los cuales son empleados en diferentes áreas como diagnósticos médicos, aplicaciones biológicas (detección de bacterias)^{[10][11]}, monitoreo del agua y aire, etcétera.

Sensores físicos de fibra óptica

Existe una amplia variedad de sensores físicos hoy en día y son llamados así porque miden parámetros como la velocidad, presión, tensión, campo magnético, temperatura, campo eléctrico, niveles de ruido, resistencia, vibraciones (movimiento), nivel de líquidos, etcétera, por nombrar sólo algunos, ya que existe una inmensa cantidad de parámetros. Asimismo, se utilizan diversas formas de transductores para llevar a cabo la medición. Estos pueden ser: mecánicos, eléctricos, ópticos, químicos, magnéticos, etcétera, así como optoelectrónicos, electroquímicos, optomecánicos. Dentro de los sensores del tipo óptico se encuentran los de fibra óptica, los cuales utilizan la radiación luminosa como el medio en donde se imprime la información codificada del parámetro medido. Estos sensores son robustos y estables a diferencia de los sensores químicos^[9]. Al igual que los sensores químicos, estos sensores los podemos clasificar en sensores extrínsecos en donde la fibra óptica solamente transmite y colecta la información codificada, esto es, la fibra óptica no interacciona con el medio y sensores intrínsecos en donde la fibra, además de ser el medio transmisor de luz, es el sensor. Dentro de los sensores intrínsecos están los de onda evanescente, los sensores de microcurvaturas y los basados en rejillas de Bragg. En esta sección sólo hablaremos de los basados en rejillas de Bragg, los cuales han tenido éxito debido a la flexibilidad de ser aplicados en diversas áreas.

Sensores físicos basados en rejillas de Bragg de fibra óptica

Las rejillas de Bragg de fibra óptica son dispositivos en los cuales el índice de refracción del núcleo de una fibra monomodo ha sido modulado debido a la radiación intensa de luz ultravioleta cuando la fibra es expuesta en forma transversal. En la figura 4 se observa el esquema de una rejilla de Bragg. De la radiación incidente sólo se refleja la parte que corresponde a la longitud de onda de Bragg, la otra parte es transmitida.

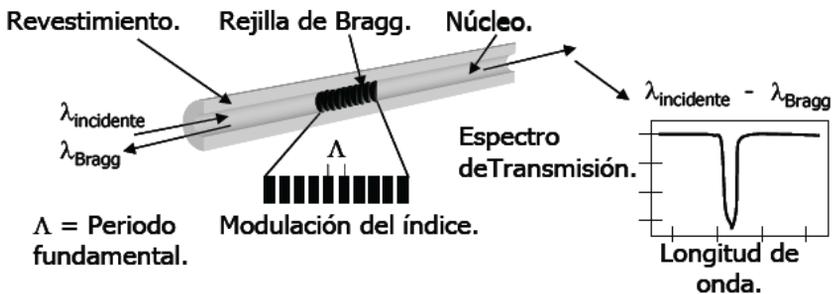


Figura 4. Estructura de una rejilla de Bragg de fibra óptica. Se muestra el espectro de transmisión y la modulación del índice de refracción^[12].

La ecuación que relaciona los parámetros de la rejilla con la longitud de onda de Bragg reflejada es la siguiente.

$$\lambda_B = 2 n_{\text{eff}} \Lambda \quad (1)$$

En donde n_{eff} es el índice de refracción efectivo de la rejilla, Λ es el periodo de la modulación y λ_B es la longitud de onda de Bragg de la radiación incidente que la rejilla reflejará.

Si analizamos la ecuación (1), podemos ver que la longitud de Bragg puede manipularse si cambiamos ciertos parámetros de la rejilla. Si incrementamos o disminuimos la temperatura o si aplicamos presión o tensión a la rejilla, cambiamos tanto el periodo Λ como el índice de refracción efectivo n_{eff} cambiando con ello la longitud de Bragg λ_B . De esta forma podemos hacer lo siguiente.

$$\Delta\lambda = 2\left(\Lambda \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial l} + n_{\text{eff}} \frac{\partial \Lambda}{\partial l}\right)\Delta l + 2\left(\Lambda \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} + n_{\text{eff}} \frac{\partial \Lambda}{\partial T}\right)\Delta T \quad (2)$$

Esto es, si modificamos la longitud o la temperatura tenemos un cambio en ambos índices de refracción efectivo y en el periodo de modulación. El primer término corresponde al efecto de tensión en la fibra. Esto corresponde a un cambio en el espaciamiento de la rejilla. Se puede expresar como:

$$\Delta\lambda_{\sigma} = \lambda_{\sigma}(1 - p_{\epsilon})\mathcal{E}_z \quad (3)$$

Donde p_{ϵ} es una constante de la tensión óptica efectiva definida como:

$$P_{\epsilon} = \frac{n_{\text{eff}}^2}{2}[p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \quad (4)$$

P_{11} y P_{12} son componentes del tensor de tensión óptica, y ν es la razón de Poisson. De esta forma, una fibra óptica de germanio-silicio con $p_{11} = 0.113$, $p_{12} = 0.252$, $\nu = 0.16$ y $n_{\text{eff}} = 1.482$, experimenta un cambio en la longitud de onda central λ_B de 1.2 pm como resultado de aplicar $1 \mu\epsilon$ a la rejilla de Bragg. Se debe aclarar que $1 \mu\epsilon$ es igual a modificar la longitud de la rejilla en una millonésima parte de su tamaño total.

El segundo término de la ecuación 2 representa el efecto de la temperatura en la rejilla de Bragg. Debido a la expansión térmica la rejilla experimenta un cambio en el periodo de modulación o espaciamiento de la rejilla y del índice de refracción efectivo. Esto provoca un cambio en la longitud de onda de Bragg. Así, el cambio fraccional de la longitud de onda para un cambio ΔT puede escribirse como:

$$\Delta\lambda_{\sigma} = \lambda_{\sigma}(\alpha_{\Lambda} + \alpha_n)\Delta T \quad (5)$$

Donde α_{Λ} es el coeficiente de expansión térmica de la fibra y para el silicio es de aproximadamente 0.55×10^{-6} . El otro término α_n es el coeficiente termo-óptico, el cual es aproximadamente 8.6×10^{-6} para la fibra de germanio con núcleo de silicio. De esta forma, para una rejilla centrada a $\lambda_B = 1550$ nm se espera un cambio de 13.7 pm por cada $^{\circ}\text{C}$ de

aumento en temperatura^[13]. En la siguiente figura se presentan los espectros de reflexión de tres rejillas centradas en una longitud de onda λ_B de 1535.04, 1535.4 y 1536.4 nm. La rejilla de 1535.4 nm es sometida a cambios de temperatura observándose un desplazamiento hacia la derecha de su espectro hasta que alcanza a la rejilla de 1536.4 nm.

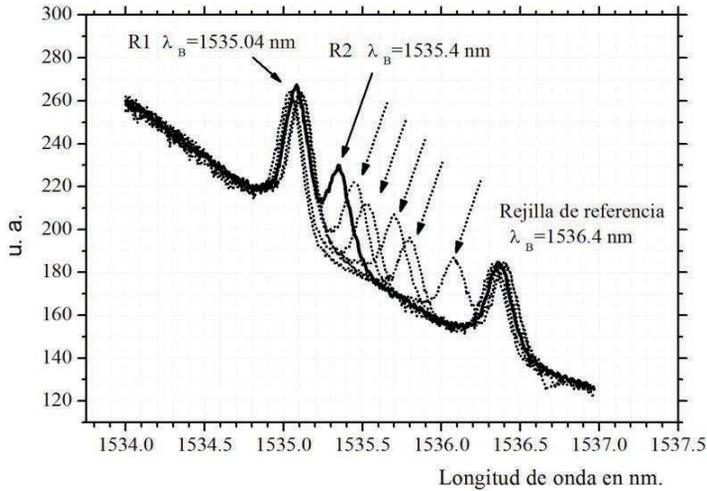


Figura 5. Espectros de reflexión de tres rejillas de Bragg monitoreadas con un monocromador. La rejilla R2 es sometida a cambios de temperatura.

La aplicación de las rejillas de Bragg en sensores radica en lo anterior, esto es, la rejilla puede colocarse en ambientes donde se desea medir temperatura o en estructuras donde se desea medir tensión o presión y codificar la medida en términos de longitudes de onda. En la figura 6 se muestra el esquema típico de un sensor puntual con una rejilla de Bragg. La rejilla es expuesta a cambios de temperatura o tensión y se puede monitorear tanto el espectro reflejado como el transmitido. La rejilla debe ser iluminada con una fuente de banda ancha y se utiliza un acoplador en el caso de que se quiera monitorear la señal reflejada.

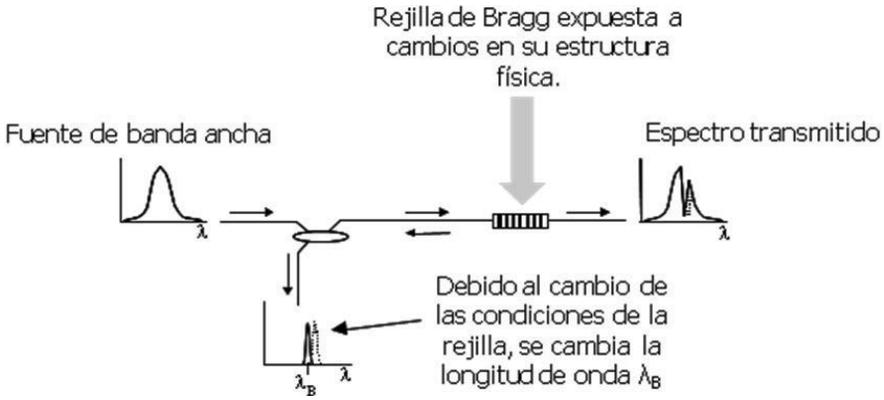


Figura 6. Esquema típico de un sensor de fibra óptica puntual con una sola rejilla.

Si se desea medir en varios puntos, se construye un sensor multipunto con varias rejillas con diferente longitud de onda central, como se muestra en la figura 7. Para seguir la longitud de onda central, es necesario un arreglo o sistema de escaneo^[14], como el de la figura 7, o en su caso, disponer de un analizador de espectros ópticos (OSA).

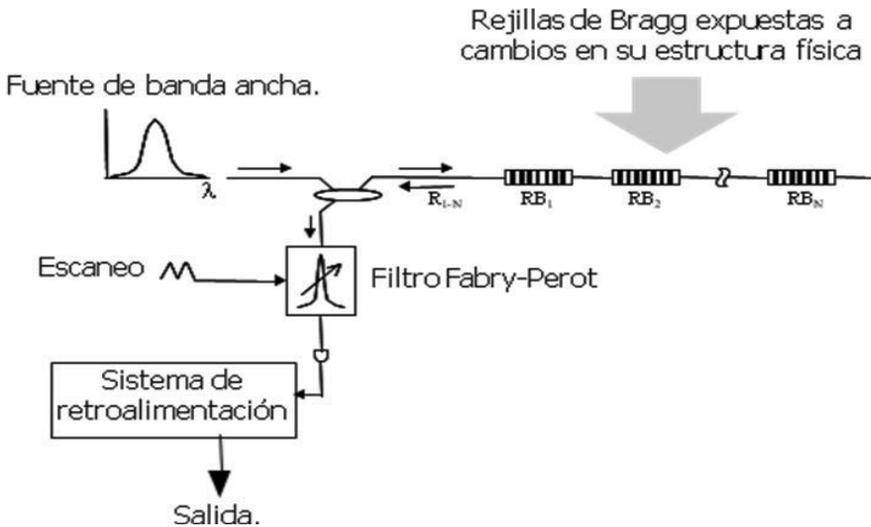


Figura 7. Esquema típico de un sensor de fibra óptica multipunto con varias rejillas.

Aplicaciones de los sensores físicos de fibra óptica

Como se menciono anteriormente, estos sensores pueden utilizarse en diversas áreas, tales como control de procesos industriales, aplicaciones en Ingeniería civil para el monitoreo de la tensión dinámica en estructuras tales como puentes o edificios, para aplicaciones médicas como sensores de temperatura en el tratamiento del cáncer (hipertermia) en donde los sensores de tipo eléctrico se ven afectados por la radiación electromagnética, como sensores de fuga de corriente en transformadores de alta potencia, en centrales nucleares donde se necesita el monitoreo de forma remota, aplicaciones en acelerómetros, como sensores de campo magnético, incluso como sensores químicos en donde la rejilla es fijada a un material polímero que al contacto con la sustancia a detectar induzca una tensión o presión a la rejilla, etcétera.

Conclusiones

Se presentaron las diversas características, de forma general, que poseen los sensores de fibra óptica, en especial los utilizados para monitorear sustancias químicas y parámetros físicos. Se expusieron las diversas aplicaciones que pueden tener en el área de Ingeniería ambiental para el monitoreo del medio ambiente, en lo que respecta a estudios de la calidad del agua, suelo y aire. Asimismo, se presentó la habilidad que tienen estos sensores para trabajar en ambientes hostiles en donde los sensores de tipo eléctrico simplemente no funcionarían.

Bibliografía

- [1] Skoog D. A., Holler F. J. and Nieman T. A., 2001, “Principios de análisis instrumental”, Ed. Mc Graw Hill, 5ª Ed. . pág. 1-2.
- [2] Otto S. Wolfbeis and Bernhard M. Weidgans, 2006, “Fiber optic chemical sensors and biosensors. A view back”, en *Optical chemical sensors*, springer, Chap. 2.
- [3] Valcárcel M., and Luque de Castro M. D., 1994, “Flow-through (bio) chemical sensors”, en *Elsevier Science B. V.* Capítulo I.
- [4] Bustamante Álvarez Nelía, 2001, *Sensores de temperatura, PH y detergentes para control medioambiental con un prototipo que utiliza fibra óptica y luminiscencia con resolución de fase.* tesis de doctorado, Universidad Complutense de Madrid.
- [5] Marazuela Lamata María Dolores, 1997, *Diseño, caracterización y aplicación analítica de (bio)sensores de fibra óptica para la determinación de co2, O2 y metabolitos de interés clínico,* tesis de doctorado, Universidad Complutense de Madrid.
- [6] Handbook of Modern Sensors : Physics, designs, and applications / Jacob Fraden.–3rd ed. Cap. 17
- [7] Alois Tipek, Modern sensors handbook, s.f., edited by Pavel Ripka.

- [8] Lobnik Aleksandra, Turel Matejka, Mojca Korent Spela, 2006, "Optical chemical sensors and personal protection" en *Proceedings of the Symposium on Photonics Technologies for 7th Framework Program*, pág. 299 - 303.
- [9] Rudolf Seitz W., 1999, "Chemical sensors based on fiber optics". *Sensors*.
- [10] Arnold M. A., "Fiber-optical chemical sensors". *Analytical Chemistry*, vol. 64, No. 21, Nov. 1, 1992, Pp. 1015-1025.
- [11] M. Espinosa Bosch, A. J. Ruiz Sánchez, F. Sánchez Rojas and C. Bosch Ojeda. 2007. "Recent Development in Optical Fiber Biosensors", *Sensors*, 7, 797 – 859.
- [12] Hayman R. B., "Fiber optic biosensors for bacterial detection". Editado por M. Zourob. *Springer Science*, Cap. 7, 2008.
- [13] Libro del Cuerpo Académico: *Estudios Ambientales y Riesgos Naturales. "Aportaciones al sureste de México"*, Editorial UNICACH, Cap. 6, pp. 188.
- [14] Andreas Othonos, Kyriacos Kalli. 1999. *Fiber Bragg Grating: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*. Artech House Boston – London.
- [15] A. D. Kersey, T. A. Berkoff and W. W. Morey. "Multiplexed Fiber Bragg Grating Strain-Sensor System with a Fiber Fabry-Perot Wavelength Filter", *Optics Letters*, Vol. 18, No. 16, Pp. 1370-1372, August 1993.