

UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

TESIS

Construcción de un Sensor de Fibra Óptica con la Técnica Sol-Gel para Medir Oxígeno Disuelto en Agua

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO **EN**
CIENCIAS EN DESARROLLO
SUSTENTABLE

PRESENTA

I.A. ULISES GONZÁLEZ VÁZQUEZ

Director

Dr. Rubén Alejandro Vázquez Sánchez

Co-Director

Dr. Carlos Manuel García Lara

Asesor

Dr. Raúl González Herrera



Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Julio de 2015.

DEDICATORIA

A mis padres:

Jesús H. González

Angelina Vázquez

A mis Hermanos:

Verónica del C. González

Mayra de J. González

Blanca J. González

Fátima Y. González

Eliseo Molina

Miguel A. González

A mi esposa e hija

Cecilia García

Dulce Jade González

Una disculpa a todos, ya que en esta travesía de aprendizaje no pude ser ese hijo, hermano, esposo y padre que merecían, ustedes me han enseñado a luchar y saben que aún sigo en este camino, es por eso que este logro va dedicado para todos ustedes...

Con cariño...

Ulises Glez.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Rubén Alejandro Vázquez Sánchez, Dr. Carlos Manuel García Lara, Dr. Raúl González Herrera y Dr. Francisco Méndez Martínez, por su paciencia, guía y apoyo incondicional en este proyecto de investigación, y por enseñarme esa satisfacción de emprender una investigación.

Al Mtro. José Manuel Gómez, Dr. Hugo Alejandro Nájera y Dra. Rebeca Isabel Martínez, Mtra. Magaly Hilerio, Ing. Fabiola Velasco, Lic. Heydi Montejo, C.P. Abraham Brindis y al Mtro. Juan Antonio Villanueva por la aportación, consejos, apoyo y las porras en el proceso de esta investigación.

A la **Dra. Georgina Beltrán y Mtra. Teresa de la BUAP**, por todo ese apoyo marcado en ese viaje extraordinario en la optoelectrónica y por todas las aportaciones y atención.

Al departamento de posgrado UNICACH a la Mtra. Guadalupe Ramírez por el apoyo durante el estudio de la Maestría.

A mis amigos, aquellos que han estado siempre, tal vez no presencialmente, pero si en muchos momentos difíciles y buenos dándome su apoyo incondicional.

A todas las personas que he tenido la fortuna de conocer y sin querer hoy son parte de todos estos proyectos que he realizado.

P.M., Amílcar, Rafael, Ricardo, Rubí, Rosa Laura, Lidia, Lorena.

Este trabajo fue apoyado en su totalidad a través del proyecto de ciencia básica SEP-CONACYT número 132663.

Investigación teórica y experimental de sensores de fibra óptica basados en rejillas de Bragg y de onda evanescente con posibilidades de aplicarse en el monitoreo de la calidad de agua y aire.

Desarrollado en laboratorio de sensores en la Escuela de Ingeniería Ambiental de la UNICACH.

Construcción de un Sensor de Fibra Óptica con la Técnica Sol-Gel para Medir Oxígeno Disuelto en Agua

Resumen

En esta investigación se presenta un sensor de fibra óptica para la medición de oxígeno disuelto, construido con una fibra multimodo con un núcleo de 50 μm , teniendo 6 cm de longitud como parte sensora donde se le deposita como precursor del oxígeno el Platino II (*cis*-Dichlorobis(pyridine)platinum(II)) utilizando la técnica Sol-Gel, en conjunto de una serie de métodos para mejorar la eficiencia del sensor con una aplicación de la medición de un parametro en el medio ambiente, teniendo en cuenta la calidad del agua. Se realizó un arreglo experimental de un sensor de onda evanescente, a la fibra óptica se le aplicaron tratamientos para depositar la matriz sol-gel, se caracterizó con soluciones como: Solución Buffer, Agua destilada y Agua oxigenada, se construyó un dispositivo para depositar sol-gel en la fibra óptica a distintas velocidades y se evaluó a diferentes capas con la matriz sol gel, logrando medir en un rango de 0.3 a 15 ppm de oxígeno disuelto.

En la sociedad en la que vivimos, cada vez se hace más necesario el desarrollo de pequeños dispositivos de análisis que sean de bajo costo, fiables, selectivos, de fácil manejo y que los materiales usados en el sensor sean amigables con el medio ambiente.

Palabras claves: medio ambiente, sensores ópticos, fibra óptica, platino II, Sol-Gel.

Abstract

In this research we present a fiber optic sensor for measuring dissolved oxygen, built with a multimode fiber with a core of 50 μm , with 6 cm in length sensing portion which is deposited as oxygen precursor Platinum II (cis-Dichlorobis (pyridine) platinum (II)). Using the sol-gel technique, a whole series of methods to improve the efficiency of application of a sensor measuring a parameter in the environment, considering the quality of the water. An experimental arrangement of a sensor evanescent wave, were applied treatments for depositing the sol-gel was performed, was characterized with solutions like: Buffer, distilled water and hydrogen peroxide, a device built for depositing sun -gel in the optical fiber at different speeds and different layers was evaluated with the sol gel matrix, obtaining measured in a range of 0.3 to 15 ppm dissolved oxygen.

In the society in which we live it is becoming more necessary to develop analytical small devices that are inexpensive, reliable, selective, and easy to use and the materials used in the sensor are friendly to the environment.

Keywords: environment, optical sensors, optical fiber, platinum II, Sol-Gel

Índice

CAPÍTULO I	- 11 -
I.1 INTRODUCCIÓN	- 12 -
I.2 JUSTIFICACIÓN	- 16 -
I.3 OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN	- 18 -
I.3.1 GENERAL	- 18 -
I.3.2 ESPECÍFICOS	- 18 -
I.4 HIPÓTESIS	- 19 -
CAPÍTULO II	- 20 -
Antecedentes	- 21 -
ii. Sensores de fibra óptica para el monitoreo medio ambiental	- 22 -
ii.1 Óptodos aplicados al análisis de aguas	- 23 -
II.1 SENSOR	- 24 -
II.2 SENSOR QUÍMICO	- 25 -
II.3 SENSOR QUÍMICO DE FIBRA ÓPTICA	- 26 -
II.4 CLASIFICACIÓN DEL SENSOR QUÍMICO DE FIBRA ÓPTICA	- 27 -
II.4.1 Según la interacción con el analito	- 27 -
II.4.2 Sensores extrínsecos e intrínsecos.	- 28 -
II.4.3 Sensores punto a punto, múltiplex y distribuidos	- 28 -
II.4.4 Sensores basados en su modulación.	- 28 -
II.5 VENTAJAS DE LOS SENSORES DE FIBRA ÓPTICA	- 29 -
II.5.1 Inmunidad a casi todo tipo de interferencia (seguridad)	- 30 -
II.5.2 Baja atenuación (detección remota)	- 30 -
II.5.3 Ancho de banda de transmisión amplia	- 30 -
II.5.4 Análisis multiparamétrico	- 31 -
II.5.5 Pequeño tamaño físico, peso y flexibilidad	- 31 -
II.5.6 Sensado distribuido	- 32 -
II.5.7 No requieren de una señal de referencia	- 32 -
II.5.8 Biocompatibilidad	- 32 -
II.6 DESVENTAJAS DE LOS SENSORES DE FIBRA ÓPTICA	- 32 -
II.6.1 Costo	- 32 -
II.6.2 Deben estar protegidos de la luz ambiente	- 33 -
II.6.3 Largos tiempos de respuesta	- 33 -
II.6.4 Rango dinámico limitado	- 33 -
II.6.5 Irreversibilidad	- 33 -
II.6.6 Estabilidad de los indicadores	- 34 -
II.6.7 Dependencia de la concentración de analito	- 34 -
II.6.8 Limitaciones introducidas por la fibra óptica	- 34 -

II.7 INSTRUMENTOS EMPLEADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE SENSORES DE FIBRA ÓPTICA	- 34 -
II.7.1 Fuente de radiación o una fuente estable de energía radiante	- 35 -
II.7.1.1 Lámparas	- 35 -
II.7.1.3 Láser	- 36 -
II.7.2 Selector de longitud de onda	- 36 -
II.7.2.1 Filtros	- 36 -
II.7.2.2 Monocromadores	- 37 -
II.7.3 FIBRA OPTICA	- 37 -
II.7.3.1 CLASIFICACIÓN DE LA FIBRA OPTICA (MODOS)	- 38 -
Fibra monomodo	- 38 -
Fibra multimodo	- 38 -
FUNCIONAMIENTO DE UNA FIBRA OPTICA	- 39 -
II.7.4 DETECTOR DE ENERGÍA	- 40 -
II.7.5 PROCESADOR DE SEÑALES	- 40 -
II.6 PROCESO DEL SOL-GEL	- 41 -
II.7 MEDIO ÓPTICO DE MEDIDA	- 42 -
CAPÍTULO III	- 44 -
METODOLOGÍA	- 44 -
III.1 Construcción del dispositivo para el método de inmersión.	- 45 -
III.2 Determinación del analito	- 46 -
III.3 Tratamiento de la Fibra óptica	- 47 -
III.5 Preparación de la Fibra Óptica	- 51 -
CAPÍTULO 4	- 54 -
RESULTADOS Y DISCUSIONES	- 54 -
Tratamiento de la Fibra óptica para quitar el revestimiento	- 54 -
Matriz Sol Gel	- 56 -
Método de inmersión	- 57 -
CAPÍTULO 5	- 65 -
CONCLUSIÓN	- 65 -
CAPÍTULO 6	- 68 -
BIBLIOGRAFÍA	- 68 -
6. BIBLIOGRAFÍA	- 69 -

Índice Figuras

Figura II. 1 Esquema de un sensor de fibra óptica.....	- 27 -
Figura II. 2 Esquema del símbolo LED [2].....	- 35 -
Figura II. 3 Componentes de la FO y la representación esquemática de transmisión [54].....	- 37 -
Figura II. 4 Esquema de la fibra óptica monomodo [1].	- 38 -
Figura II. 5 Esquema de la fibra óptica multimodo de índice gradual [1]......	- 39 -
Figura II. 6 Principio de la propagación de la luz en una fibra óptica [54].	- 40 -
Figura II. 7 Muestra de haz de radiación [50].....	- 43 -
Figura III. 1 Dispositivo utilizado para depositar de manera controlada el sol-gel en la fibra óptica _	- 46 -
Figura III. 2 Balanza analítica y pesado del Platino II _____	- 47 -
Figura III. 3 Soluciones de Etanol y Platino II, C (2.5mg), B (2.0mg) y A (1.5mg) _____	- 47 -
Figura III. 4 Fibras ópticas _____	- 48 -
Figura III. 5 Equipo de medición Figura _____	- 49 -
Figura III. 6 Tratamiento HF _____	- 49 -
Figura III. 7 Reactivos para el proceso sol gel _____	- 50 -
Figura III. 8 TEOS más etanol (SOLUCIONES A, B y C) _____	- 51 -
Figura III. 9 Sol gel y las diferentes soluciones (A,B y C) _____	- 51 -
Figura III. 10 Matriz sol gel _____	- 51 -
Figura III. 11 Tratamiento de Ácido Fluorhídrico con determinado tiempo _____	- 52 -
Figura III. 12 Dispositivo de inmersión _____	- 53 -
Figura III. 13 Fibra depositada en sol gel _____	- 53 -
Figura III. 15 Sistema de caracterización en laboratorio de sensores de la Esc. de Ing. Ambiental _____	- 53 -
Figura IV. 1 Pérdida de señal óptica cuando la fibra está sumergida en HF.....	- 56 -
Figura IV. 2 FO 50µm vista 10x, sin recubrimiento, sin tratamiento de HF.....	- 56 -
Figura IV. 3 FO 50µm vista 10x, sin revestimiento, con tratamiento 5.80 min. en HF.....	- 56 -
Figura IV. 4 Enlaces del sol gel vista del microscopio 20X.....	- 57 -
Figura IV. 5 Alta respuesta concentración de 2.0 mg Platino II.....	- 57 -
Figura IV. 6 Sin respuesta concentraciones de 1.5 y 2.5 mg Platino II.....	- 57 -
Figura IV. 7 Determinación de la velocidad de inmersión de la fibra óptica.....	- 57 -
Figura IV. 8 Caracterización con 1 capa.....	- 58 -
Figura IV. 9 Caracterización 2 Capas Figura IV. 10 Caracterización 3 Capas.....	- 58 -
Figura IV. 11 Fibra Óptica 1 capa 40X.....	- 58 -
Figura IV. 12 Fibra Óptica 2 capas 40X.....	- 59 -
Figura IV. 13 Fibra Óptica 3 capas 40X.....	- 59 -
Figura IV. 14 Sensor de fibra óptica sin recubrimiento, sin tratamientos.....	- 60 -
Figura IV. 15 Sensor de fibra óptica con todos los tratamientos y métodos aplicados.....	- 60 -
Figura IV. 16 Grafica del arreglo experimental para caracterizar el sensor de fibra óptica junto con un medidor de oxígeno disuelto.....	- 61 -
Figura IV. 17 Arreglo experimental para caracterizar agua de llave con el sensor y un oxímetro.-	- 62 -
Figura IV. 18 Caracterización al sensor de fibra óptica desarrollado con 3 repeticiones.....	- 63 -
Figura IV. 19 Sensor desarrollado de fibra óptica y caracterización.....	- 64 -
Figura IV. 20 Curva de calibración del sensor propuesto.....	- 65 -

Índice Tablas

<i>Tabla II. 1 Tipo de sensores químicos.....</i>	<i>- 26 -</i>
<i>Tabla II. 2 Clasificación de los LEDs por su longitud de onda emitida.....</i>	<i>- 35 -</i>
<i>Tabla II. 3 Lista de los Ligandos alcoxi más usado [5].....</i>	<i>- 42 -</i>
<i>Tabla III. 1 Materiales para construir un dispositivo para el método de inmersión.....</i>	<i>- 45 -</i>
<i>Tabla III. 2 Cálculo de los volúmenes para el Sol-Gel.....</i>	<i>- 50 -</i>
<i>Tabla III. 3 Para elaborar la matriz sol-gel se empleó el siguiente material:.....</i>	<i>- 51 -</i>
<i>Tabla IV. 1 Velocidades para el método de inmersión</i>	<i>- 57 -</i>

CAPÍTULO I

I.1 INTRODUCCIÓN

La Tierra tiene muchos ecosistemas, dentro de ellos hay una enorme diversidad de especies que interaccionan entre sí, sin olvidar que nosotros los seres humanos, somos una más de las tantas especies de este planeta, por el cual como toda especie requerimos de estos ecosistemas disponibles para satisfacer nuestras necesidades.

Desde que el ser humano ha interactuado siempre con el medio ambiente, aprovechando los recursos para la supervivencia de la especie. Estos y otros factores están en continuidad, lo cual hace que nuestro planeta siga en alteración, es así como aparecen, desaparecen, se remueven, modifica y evolucionan los ecosistemas dejando ver que no es estático, sino que está en un continuo cambio.

Entre los recursos que se han aprovechado son el agua, suelo, aire, flora, fauna, derivados fósiles, entre otros. A lo largo del paso del tiempo nuestro planeta ha sufrido cambios como resultado de la acción acumulada, ya sea por fenómenos naturales como sismos, erupciones volcánicas, erosiones causadas por el viento y el agua, así como también por las actividades de los seres vivos como la tala inmoderada de bosques y selvas, cambio de uso de suelo, urbanización, etc.

La contaminación del medio ambiente está en función del incremento del desarrollo de las actividades humanas, todo esto tiene como consecuencia un desequilibrio ecológico que afecta en primera instancia a nuestro medio ambiente. Un caso más particular que sirve como ejemplo para demostrar la degradación ambiental a gran escala es la contaminación del agua, es un elemento raro, polifacético, que constituye un recurso escaso y básico para la vida, la cual es llevada a cabo por actividades del ser humano en tareas como la agricultura, la industria y las que se realizan en una comunidad urbana, algunos factores de contaminación del agua son por ejemplo: pesticidas, microorganismos, materia orgánica, aceites, grasas, metales pesados, productos radioactivos y detergentes.

En la actualidad se desarrollan investigaciones de cuáles son los problemas que afectan al medio ambiente, así como también las posibles soluciones. Para tener un control ambiental ante estos antecedentes es necesario monitorear constantemente el medio ambiente para evitar desastres ecológicos. La calidad del agua es un tema de suma importancia debido a que forma parte del ecosistema en el cual la vida se desarrolla, como se sabe un ambiente con agua altamente contaminada es un lugar no apto para el progreso de la vida. Uno de los parámetros más relevantes para determinar la calidad del agua es el oxígeno disuelto (OD), debido a que la presencia del OD en el agua es vital para la existencia de la mayoría de los organismos acuáticos, siendo un componente clave para la respiración celular para la vida acuática.

El oxígeno disuelto es considerado como un indicador confiable de medición, siendo uno de los parámetros fisicoquímicos más relevantes de la calidad del agua, si la fuente de agua está contaminada contiene microorganismos, bacterias, materia orgánica y mal olor, la concentración de oxígeno disuelto disminuye lo que indica que el agua es de mala calidad, la presencia de microorganismos aumenta los riesgos a la salud. A gran escala, los bajos niveles de oxígeno disuelto causan problemas para usar dicha agua como fuente de abastecimiento de agua potable, siendo este vital líquido indispensable para el desarrollo del ser humano.

A gran escala, los bajos niveles de Oxígeno Disuelto causan problemas para usar dicha agua como fuente de abastecimiento de agua potable, indispensable para el desarrollo del ser humano. Es por eso la importancia de conocer indicadores que permitan mejorar la interacción hombre-medio ambiente para encontrar un equilibrio en el uso de los recursos naturales apegados en el marco del desarrollo sostenible que de acuerdo con el informe de la comisión Bruntland menciona: “EL desarrollo sostenible es la gestión y conservación de los recursos naturales y el cambio en la orientación tecnológica e institucional que asegure el alcance y la continua satisfacción de las necesidades humanas para las generaciones actuales y futuras [10].

Tal desarrollo sostenible conserva la tierra, el agua, los recursos genéticos de plantas y animales, no degrada el medio ambiente, es técnicamente adecuado, económicamente viable y socialmente aceptable” [27]. Reflejándose tanto en el presente para asegurar su subsistencia en el planeta sin alterarse en las futuras generaciones. Por lo cual es la necesidad de tener equipos de medición para monitorear y conocer indicadores que ayuden a mitigar desastres en el medio ambiente.

Cuando se trata de medir parámetros fisicoquímicos del agua, es para detectar la presencia de algunas o varias sustancias y cuantificarlas esto para conocer en que volumen o cantidad está presente en tal medio, para determinarlo es necesario utilizar algún equipo de medición que proporcione datos confiables, en la actualidad se están desarrollando e implementando nuevas tecnologías que aportan estrategias para prevenir, mitigar y compensar los daños en el medio ambiente siendo estos equipos amigables con el ambiente, donde los más utilizados para medición son mecánicos, electroquímicos y para algunos parámetros ya en aplicación se encuentra los sensores ópticos que también son denominados biosensores, desarrollados con fibra óptica con dopantes orgánicos como analito usando la técnica Sol-Gel.

Muchos de los sensores pertenecen al campo de los sensores químicos ópticos basados en la detección de fluorescencia utilizando moléculas o sustancias indicadoras. Específicamente, a sensores basados en la absorbancia y la emisión de luz por una molécula indicador, donde sus propiedades ópticas se modifican debido a la presencia de un analito particular. Estas moléculas indicadoras se inmovilizan en una sustancia transparente que se expone a la luz, cuando la sustancia es típicamente un sólido, tal como una rígida de sol-gel o de otro polímero. Más específicamente, se trata de un nuevo proceso para la fabricación de un material, (medio o matriz) que contiene o encapsula las moléculas de detección.

Este nuevo proceso produce una matriz o medio para la fabricación de sensores ópticos para el control de presiones parciales pequeñas de oxígeno en el gas y en líquidos (niveles de ppm de oxígeno disuelto). El proceso permite la inmovilización de compuestos de oxígeno altamente sensibles en la matriz.

En la actualidad la producción de sensores basados en fibra óptica ha tenido un crecimiento significativo en la industria y la medicina esto, debido a sus grandes ventajas sobre los sensores eléctricos tradicionales que usan alambres de cobre. Tales ventajas incluyen el bajo costo, la fácil aplicación, los aspectos de seguridad tales como la inmunidad a la interferencia electromagnética y la pasividad eléctrica, la durabilidad, el peso ligero, el tamaño pequeño, la flexibilidad, las posibilidades de multiplexado, etc.

Los sensores de fibra óptica han encontrado aplicaciones en campos muy diversos tales como el monitoreo de la presión, deformación de estructuras aeronáuticas y civiles, el control de la temperatura en procesos industriales y la detección de fugas de hidrocarburos. En especial los sensores químicos de fibra óptica ofrecen muchas ventajas sobre los sistemas convencionales, como la inmunidad a la interferencia electromagnética, la posibilidad de sensado distribuido sobre longitudes largas de fibra, y la capacidad de operaciones de seguridad en ambientes hostiles y peligrosos. En los últimos años han encontrado un creciente desarrollo en la medición de sustancias químicas, tales como el oxígeno disuelto. La medición y control de este parámetro es requerido en prácticamente todas las áreas como: medicina, biología, química, biomedicina, etc. En particular, son estudiados y desarrollados estos sensores ya que permiten realizar el monitoreo *in vivo* y el análisis *in situ*.

La finalidad de esta investigación se espera como resultado la producción de un sensor mejorado con una mayor sensibilidad al gas oxígeno, tal como oxígeno disuelto. Así como encontrar una alternativa sostenible en el confinamiento de equipos de medición elaborados con materiales orgánicos que no genere desequilibrio en el ambiente.

I.2 JUSTIFICACIÓN

El oxígeno gaseoso se disuelve en el agua por diversos procesos como la difusión entre la atmósfera y el agua, oxigenación por el flujo del agua sobre las rocas y otros detritos, la agitación del agua por las olas, el viento y la fotosíntesis de plantas acuáticas. Hay muchos factores que afectan la concentración del oxígeno disuelto en un ambiente acuático. Estos factores incluyen: temperatura, flujo de la corriente, presión del aire, plantas acuáticas, materia orgánica en descomposición y actividad humana, dando como consecuencia contaminación del agua, mal olor y muerte de especies que habitan el medio. Siendo el oxígeno disuelto un indicador importante para determinar la contaminación presente en cuerpos acuosos.

Existen nuevas tendencias tecnológicas en la vida moderna que han hecho nuestra forma de vivir más fácil y más cómoda. El descubrimiento de grandes avances tecnológicos como el teléfono, el transistor, los circuitos integrados, los cables de cobre, las microondas y la fibra óptica, nos han servido para desarrollar logros que antes eran solo ideas.

Con el descubrimiento de la fibra óptica, se ha logrado acelerar en grandes cantidades los procesos de intercambio de información. Las aplicaciones de la fibra óptica llevan consigo el desarrollo de nuevos equipos que interactúen en la calidad, seguridad y garantía de la información como lo son los sensores de fibra óptica, que debido a su eficiencia participan en una nueva gama de equipos que está empezando a sobresalir en el ramo de la transferencia de información a través de ondas de luz y el uso de la fibra óptica como medio de propagación.

Basados en los métodos de determinación de los parámetros químicos que están establecidos en el marco normativo de nuestro país, especificadas en las Normas Mexicanas, denominadas en siglas como NMX-AA, la metodología de estas normas generalmente consisten en una toma de muestras y un análisis posterior en laboratorio.

Se demandan sensores para determinar parámetros como oxígeno, puesto que dispositivos de monitorización facilitan el control de la calidad del agua y la regulación de los umbrales de alerta medioambientales en caso de accidente, estos sensores representan alternativas a los instrumentos de análisis convencionales. El arreglo de un sensor de fibra óptica basado en el método sol-gel tiene características muy importantes como: El análisis en sitio y en tiempo real. Lo cual se traduce en un resultado de mayor confiabilidad ya que evitamos que la sustancia pierda sus características de origen debido, al traslado de esta misma. El sol-gel es un material inerte, es decir presenta resistencias a medios muy hostiles que muchos sensores basados en polímeros no tienen. La fibra óptica por sus características y ventajas, por la capacidad de operaciones de seguridad y eficiencia ante cualquier ambiente.

I.3 OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN

I.3.1 GENERAL

Construir y evaluar un sensor basado en fibra óptica con la técnica sol-gel para medir oxígeno disuelto en agua.

I.3.2 ESPECÍFICOS

- Evaluar diferentes arreglos de sensores (onda evanescente) de fibra óptica.
- Evaluar la técnica sol gel, para utilizarse como sensor.
- Determinar el tratamiento que necesita la fibra óptica para mejorar la adhesión del recubrimiento con sol gel.
- Evaluar, fijar y caracterizar un dopante (analito) con mejor respuesta para medir oxígeno disuelto.

I.4 HIPÓTESIS

Utilizando la fibra óptica y el método Sol-Gel dopado con un analito específico es viable para obtener un elemento de medición donde interactúen señales de luz a longitudes de ondas específicas que permitan determinar la cantidad de oxígeno disuelto en sustancias acuosas.

CAPÍTULO II

Antecedentes

Desde 1982 se reportó el primer sensor luminiscente de pH que fue desarrollado por Saari *et al*, la fase reactiva del sensor, fluoresceinamida, atrapada en un polímero de acrilamida, se inmovilizó covalentemente en el extremo de una fibra óptica. Las principales ventajas de este óptodo son corto tiempo de respuesta al no tener membrana y amplio intervalo de trabajo (pH 2-9) al tener el indicador dos constantes de acidez sucesivas. Su principal inconveniente es la poca precisión [42].

En 2005 Beltrán *et al*, presentaron un sensor de fibra óptica para la medición de pH basado en la técnica de absorción de la onda evanescente. Construido con una fibra multimodo cuyo diámetro del núcleo es de 65 μm y una apertura numérica de 0.2. La región sensora se deposita TiO_2 con dopamientos de colorantes orgánicos utilizando la técnica Sol-Gel. Dentro de los materiales utilizados que mejores resultados se obtuvieron: Rodamina 6G, Coumarin, Cristal Violeta y la Rodamina B. donde se determinó un rango de medición de pH de 3 a 12 [6].

A mediados del 2010 los autores Chu *et al*, reportaron proyecto de la sonda de oxígeno donde tiene la mayor sensibilidad y se detectaron intensidades de fluorescencia en nitrógeno puro y el oxígeno puro, respectivamente. Los resultados experimentales muestran que el sensor de oxígeno tiene una alta sensibilidad, el tiempo de respuesta fue 18,6 segundos en fibra óptica sensor de oxígeno Pt (II). Donde el proceso sol-gel con la superficie de la fibra, también aumenta la sensibilidad, porque un número considerable de moléculas de oxígeno penetran en el sílice poroso haciéndolo más sensible [19].

ii. Sensores de fibra óptica para el monitoreo medio ambiental

Las aplicaciones de los sensores de fibra óptica corresponde a las tareas de monitorización ambiental, el control de procesos industriales, la biomedicina. Se han desarrollado ya con éxito sensores ópticos para la monitorización de oxígeno molecular, dióxido de carbono, pH, hierro, sulfuro de Hidrógeno, alcoholes, humedad, temperatura, detergentes, aceites, pesticidas, glucosa, acetil colina y colesterol, 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), monitoreo del agua y aire [22].

La clara demanda que existe de métodos de exploración que operen in-situ y de forma continua, se pueden clasificar las aplicaciones de detección medioambiental de acuerdo con el área que se va monitorizar: sensores domésticos, monitorizaciones industriales dentro de edificios, sensores al aire libre y en el espacio, sensores marinos o de pureza de agua [12].

La estrategia apropiada para la monitorización medioambiental es fuertemente dependiente del analito a detectar, el medio que contiene la sustancia de interés, la accesibilidad del área a analizar, la peligrosidad de los entornos circundantes, la calidad deseada de la información obtenida, y de la legislación vigente. Cada paso desde la identificación de un problema de contaminación hasta la limpieza y la potencial monitorización posterior requieren diferentes tipos de técnicas de análisis que ponen de manifiesto los potenciales campos de aplicación de sensores en la monitorización medioambiental. Cuando se identifica una zona contaminada, es esencial una caracterización extensiva del lugar, incluyendo la naturaleza y nivel de la contaminación. Son necesarias técnicas de análisis y herramientas de diagnosis para identificar contaminantes esperados y desconocidos. El análisis de los datos obtenidos nos dará las especificaciones de los contaminantes [25].

En ese caso, sensores in-situ que actúen como dispositivos de umbrales de alarma serían altamente efectivos en tiempo y coste comparados con el análisis clásico de laboratorio. La robustez, fiabilidad y el ser inertes a influencias

electromagnéticas hace a los sensores de fibra óptica candidatos ideales para esas tareas. Otra área de interés para sistemas de análisis que operan de manera continua es la observación a largo plazo de parámetros medioambientales, como la contaminación del agua causada por considerables cantidades de fertilizantes agrícolas, herbicidas y pesticidas o por la entrada de aguas residuales industriales [25].

Se demandan sensores para determinar parámetros como oxígeno, pH, dióxido de carbono, amoníaco, nitratos, PAH, etc., puesto que dispositivos de monitorización facilitan el control de la calidad del agua y la regulación de los umbrales de alerta medioambientales en caso de accidente. Los lugares de aplicación para dichos sistemas son estaciones de monitorización continua en ríos, estuarios y aguas costeras superficiales. Debido a su versatilidad y flexibilidad los sensores de fibra óptica representan una alternativa atractiva a las medidas electroquímicas establecidas [25].

ii.1 Óptodos aplicados al análisis de aguas

Entre 1984 y 1986, la EPA (Environmental Protection Agency, agencia de protección del medio ambiente estadounidense) publicó una serie de informes en los que se incluía la valoración y mejora de la calidad del agua con objeto de proteger la salud pública y el ecosistema. Los puntos más destacados en estos informes fueron el endurecimiento de las medidas adoptadas por cada Estado sobre la calidad de las aguas y la creación de una organización encargada de vigilar el cumplimiento estricto de las normas establecidas por la EPA [9].

En 1994, en el seno del IV Programa Marco de I+D de la Unión Europea, en el subprograma de Medio Ambiente, se establecieron dos objetivos prioritarios: (a) identificar y evaluar los efectos de la actividad humana sobre el ecosistema y (b) contribuir al desarrollo tecnológico necesario para la observación, monitorización e investigación del medioambiente, incluyendo las metodologías y tecnologías para la vigilancia, prevención y gestión de los riesgos naturales. En este último punto, la

unión europea hace especial hincapié en el desarrollo de sensores en todas aquellas aplicaciones donde los sistemas convencionales de medida están limitados por sensibilidad, selectividad, precisión, fiabilidad y/o coste, así como en procesos industriales que contemplen una producción menos contaminante. En la actualidad y hasta el año 2002, está en vigor el V Programa Marco (1999) en el que se vuelve a remarcar la necesidad de un control de la contaminación de los recursos hídricos a través de la analítica de las aguas y los sistemas de vigilancia de fuentes contaminantes puntuales o accidentales [9].

Para que un sensor de fibra óptica pueda reemplazar a los tradicionales métodos de medida, es necesario que los óptodos introduzcan mejoras en diversos parámetros analíticos, como la sensibilidad, selectividad, precisión y tiempo de respuesta. Además, deben ser competitivos en cuanto a costes de mercado con los métodos ya implantados, lo cual se suele lograr cuando se fabrican óptodos multiparamétricos.

II.1 SENSOR

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 la concentración de una especie química [9]. Varios autores lo definen como: un dispositivo que produce una salida utilizable en respuesta a un mensurando especificado [20] [21].

En esencia, son tres partes: un terminal sensible, elemento de reconocimiento del sistema que responde selectivamente a los cambios que se producen en el analito objetivo, un transductor encargado de transformar las variaciones detectadas por el anterior en señales físicas, amplificadas y procesadas a continuación por un sistema electrónico [18] [31].

La zona de reconocimiento o terminal sensible se puede basar en diferentes principios:

a) Principio físico: no se produce reacción química. Ejemplos típicos son aquellos basados en medidas de absorbancia, luminiscencia, índice de refracción, conductividad, temperatura, cambio de masa, etc.

b) Principio químico: una reacción química donde participa el analito, este genera la señal analítica.

c) Principio bioquímico: un proceso bioquímico es la fuente que genera la señal analítica. Ejemplos típicos son los sensores potenciométricos microbianos y los inmunosensores [2][17][29].

Hoy en día, los sensores son más a menudo clasificados por el tipo de mensurando (magnitud a medir), es decir, físicos, químicos o biológicos [3].

Los sensores físicos incluyen temperatura, tensión, fuerza, presión, desplazamiento, posición, velocidad, aceleración, radiación óptica, sonido, velocidad de flujo, viscosidad, y campos electromagnéticos; los sensores químicos incluyen la concentración de iones, la masa atómica, la frecuencia de las reacciones, los potenciales de oxidación-reducción, y la concentración de gas; los biosensores (sensores biológicos) son sustancias de origen biológico, tales como anticuerpos, glucosa, hormonas y enzimas [4].

II.2 SENSOR QUÍMICO

Un sensor químico es un dispositivo que puede utilizarse para medir la concentración o actividad de una especie química en una muestra de interés. Idealmente, el dispositivo es capaz de operar en forma continua y reversible directamente en la matriz de la muestra [8].

Otra definición de sensor químico es, un dispositivo que transforma la información química, que van desde la concentración de un componente específico para el análisis de la muestra total de la composición, en una señal analíticamente útil. La información química, mencionado anteriormente, puede originarse a partir de una reacción química del analito o de una propiedad física del sistema investigado [33]. De los diversos tipos de sensores disponibles muy pocos pueden ser utilizados para la detección de productos químicos, conocidos comúnmente como sensores químicos. De los sensores químicos (sensores de enzimas, sensores catalíticos, transistor de efecto de campo químico “chemfets” y resistores químicos

“Chemiresistors”, sensores ópticos). Los sensores ópticos y los chemfets son las tecnologías de sensores más comúnmente utilizados [8].

Tabla II. 1 Tipo de sensores químicos

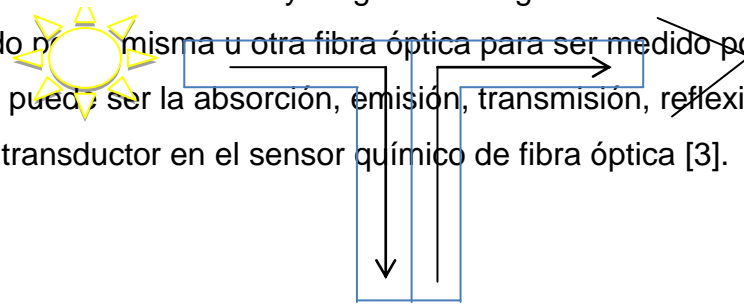
Clasificación de los sensores químicos	
Óptico	Absorbancia, reflectancia, luminiscencia, fluorescencia, índice de refracción, efecto optotérmico, dispersión de la luz
Electroquímico	Voltamétrico, potenciométrico, CHEMFETS, potenciométrico de electrolito sólido
Eléctrico	Semiconductor de óxido metálico, semiconductor orgánico, conductividad, permitividad
Másico	Piezoeléctrico, onda acústica de superficie
Magnético	Propiedades paramagnéticas
Termométrico	Calor
Otras propiedades físicas	Radiaciones X, γ , β (alfa, gamma beta y)

II.3 SENSOR QUÍMICO DE FIBRA ÓPTICA

El principio de funcionamiento básico del sensor de fibra óptica es que cuando se expone a un estímulo químico o físico, las características de la señal de la luz que viaja a través de la fibra óptica sufre un cambio. Por lo tanto, los sensores de fibra óptica proporcionan un medio por el cual la luz guiada dentro de una fibra óptica puede ser modificada en respuesta a influencias externas físicas, químicas, biológicas, o de otro tipo. Los sensores ópticos químicos se basan en la interacción de la radiación electromagnética con la materia, lo que resulta en la alteración de alguna propiedad de la radiación [11].

El reconocimiento molecular o iónico se lleva a cabo por el transductor que contienen reactivos inmovilizados y la medición consiste en señales ópticas que se

transmite la información. De hecho la luz es lanzada a partir de una fibra óptica a partir de una fibra óptica lanzada y dirigida a la región de interés. La luz devuelta es recaudada por la misma u otra fibra óptica para ser medido por el detector. Esta señal óptica puede ser la absorción, emisión, transmisión, reflexión o dispersión de la luz por el transductor en el sensor químico de fibra óptica [3].



Mensurando

Figura II. 1 Esquema de un sensor de fibra óptica

II.4 CLASIFICACIÓN DEL SENSOR QUÍMICO DE FIBRA ÓPTICA

II.4.1 Según la interacción con el analito

Pueden ser reversibles, cuando la interacción química del analito con la zona de reconocimiento del sensor no se consume [5]. Por otra parte pueden ser irreversibles: la fase reactiva se consume durante la medida [9]. Este último a su vez se clasifica en:

- a) Regenerables: se puede recuperar (con un tratamiento adecuado) el estado inicial del sensor, por lo que son reutilizables.
- b) Desechables: de un solo uso, se inactivan tras la interacción con el analito, ejemplo tiras de papel indicadoras de pH.

II.4.2 Sensores extrínsecos e intrínsecos.

Extrínsecos: Sensores en los que la fibra óptica no es el elemento sensor, si no que se encarga de transportar la luz desde la fuente al elemento sensor y de este al analizador. Es en el elemento sensor donde se produce la interacción con el medio, alterando las propiedades de la luz en función de la variable a medir. En estos sensores encontramos entre otros: Sensores basados en transmisión-recepción, reflexión, fluorescencia, termometría infrarroja, etc. [13].

Los parámetros significativos de la fibra en este caso son: la eficiencia de la transmisión de la luz (transmitancia) y el ángulo de aceptación [6].

Por otro lado, en un sensor intrínseco una o más de las propiedades físicas de la fibra va sufrir un cambio. Las perturbaciones actúan sobre la fibra y esta a su vez cambia alguna característica de la luz dentro de ella [30]. En estos sensores la propia fibra óptica es el elemento sensor y de referencia [37].

II.4.3 Sensores punto a punto, múltiplex y distribuidos

En el sensor de tipo punto a punto existe un punto de medición individual en el extremo del cable de conexión de fibra óptica, de manera similar a la mayoría de los sensores eléctricos. Los sensores multiplexados permiten la medición en varios puntos a lo largo de una línea de fibra única y los sensores distribuidos son capaces de sentir en cualquier punto a lo largo de una línea de fibra única [40].

II.4.4 Sensores basados en su modulación.

Es una forma de clasificar los sensores de acuerdo al tipo de modulación que se genera en la señal óptica. Se tienen cuatro subclases principales:

a) Sensores de Amplitud o Intensidad: Sensores en los que la medida se realiza comparando la intensidad recibida con la transmitida [42].

Hay muchos mecanismos de transducción, que pueden resultar en el cambio de la intensidad de la luz. Estos mecanismos pueden incluir: pérdida de la Microflexión, Rotura, acoplamiento fibra a fibra, modificación del revestimiento, reflectancia, absorción, atenuación, dispersión molecular, efectos moleculares, campos evanescentes [42].

b) Sensores de Espectro: Sensores en los que la variable a medir modula el espectro de la señal transmitida [37].

Ejemplos de estos tipos de sensores de fibra incluyen los basados en la radiación del cuerpo negro, absorción, fluorescencia, etalones y rejillas de dispersión o Bragg [7].

c) Sensor Polarimétrico: Sensores en los que la variable a medir causa una modulación en la polarización de la señal transmitida [2]. Mediante técnicas de medición polarimétricas, se relacionan los cambios inducidos en el estado de polarización de la luz que viaja en una fibra óptica para mensurandos de interés [42].

Los diferentes tipos de estados de polarización de la luz son el campo de los estados de polarización lineal, elíptica y circular [40].

d) Sensor de Fase o Interferometría: Sensores en los que la variable a medir causa una modulación en la fase de la señal transmitida [37].

Utilizan los cambios en la fase de la luz para la detección. Esta modulación de fase se detecta entonces interferométricamente, mediante la comparación de la fase de la luz en la señal de la fibra y la señal de referencia de la fibra. En un interferómetro, la luz se divide en dos haces, donde se expone un haz con el medio ambiente de detección y se somete a un cambio de fase y el otro está aislado del entorno de detección y se utiliza como referencia. Una vez que los haces se recombinan, interfieren unas con otras [44].

Ejemplos: Sensor de fibra óptica basado en el Interferómetro de Mach–Zehnder, Interferómetro de Michelson, Interferómetro de Fabry–Perot, Interferómetro de Sagnac [42].

II.5 VENTAJAS DE LOS SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

Los sensores de fibra óptica son excelentes candidatos para el monitoreo de los cambios del medio ambiente y ofrecen muchas ventajas sobre los convencionales sensores electrónicos las cuales se indican a continuación:

II.5.1 Inmunidad a casi todo tipo de interferencia (seguridad)

Como los fotones no tienen carga eléctrica, no se ven afectados por las tormentas eléctricas o campos eléctricos que se encuentran normalmente en entornos de alta tensión. También son inmunes a altos campos magnéticos causados por transformadores, motores, etc. no tendrá ningún efecto sobre las propiedades de la fibra de transmisión óptica. Puesto que el medio de transmisión utilizado en la fibra óptica es el vidrio, el cable de fibra óptica se puede ejecutar a través de entornos ruidosos, tales como huecos de los ascensores o los túneles del metro, sin degradación o atenuación de la calidad de la señal [49].

Pueden soportar muy altas temperaturas, gracias al alto punto de fusión de la fibra y a recubrimientos especiales [51].

II.5.2 Baja atenuación (detección remota)

Una señal eléctrica transmitida a través de un cable coaxial, dependiendo de su frecuencia, ha perdido casi la mitad de su poder después de sólo unos pocos cientos de metros, mientras que una señal óptica transmitida a través de una fibra óptica (con bastante frecuencia se refiere como una guía de onda óptica) será, en función a la longitud de onda de transmisión, siendo perfectamente aceptable después de 20 kilómetros [49].

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 [43].

Si es necesario, la señal procedente de un sensor óptico puede ser transmitida a través de una distancia considerable evitando ambientes peligrosos [56].

II.5.3 Ancho de banda de transmisión amplia

La habilidad de llevar mucha más información y entregarla con mayor fidelidad que ya sea el alambre de cobre o el cable coaxial es una consideración muy pertinente. Por ejemplo, al momento, las tasas de transmisión máxima de alrededor de 1 Gbit-1 son posibles mediante un cable coaxial convencional, mientras que las tasas de transmisión de más de 10 Gbits-1 es actualmente posible con conductores de fibra óptica y los experimentos están en curso para aumentar esta cifra a 40 Gbits-1 y quizás hasta 80 Gbits-1 en un futuro próximo [49].

II.5.4 Análisis multiparamétrico

Las fibras ópticas pueden transmitir mucha más información que los cables eléctricos, debido a su mayor ancho de banda. Las señales ópticas originadas por la presencia de diferentes analitos en la muestra pueden diferir unas de otras en longitud de onda, fase, modulación de intensidad o polarización. Todas estas características de la señal pueden ser transmitidas simultáneamente por una misma fibra, posibilitando la detección de distintos analitos a la vez (multiplexado) [9].

La ventaja más significativa del enfoque óptico resultará ser la posibilidad de utilizar la información en más de una longitud de onda. Esto puede ser explotado de varias maneras. Mediante el uso de múltiples reactivos inmovilizados con diferentes propiedades espectrales es posible diseñar sensores que responden a dos o más analitos simultáneamente [54].

II.5.5 Pequeño tamaño físico, peso y flexibilidad

Fácil integración en una amplia variedad de estructuras debido a su pequeño tamaño y geometría cilíndrica. [42]. Las fibras ópticas también pueden ser incorporados en, o ser parte de casi cualquier infraestructura de red existente con poca o ninguna dificultad [49].

Las pequeñas dimensiones de las fibras ópticas y la disponibilidad de componentes de pequeño tamaño y bajo costo permiten la miniaturización de

estos dispositivos [52].

Mientras que el diámetro de un típico cable coaxial de cobre moderno será de aproximadamente 10 mm, una varilla de fibra sólo 0.1 a 0.2 mm y hasta con una capa protectora de plástico alrededor de él, esto no sería más de 0.25 a 0.5 mm. Además, el peso de un cable coaxial puede variar cualquier cosa, desde 350 a 1100kgkm⁻¹ en función del tipo usado, pero una sola fibra, (a menos que tenga miembros de fortalecimiento muy pesados), sólo pesa unos 12kgkm⁻¹ [49].

II.5.6 Sensado distribuido

La posibilidad de utilizar la fibra óptica misma como un transductor distribuido es una de las ventajas sobresalientes de los sensores de fibra óptica. Esto es posible mediante técnicas que permiten conocer el estado de una fibra óptica en toda su longitud y da lugar a cierta variedad de sensores distribuidos [1].

II.5.7 No requieren de una señal de referencia

A diferencia de los electrodos potenciométricos y amperométricos, los sensores ópticos no requieren una referencia [1].

II.5.8 Biocompatibilidad

La biocompatibilidad, fiabilidad y la naturaleza no intrusiva de la fibra, junto con la posibilidad de crear sensores muy pequeños, los hacen ideales para aplicaciones médicas, tanto para medición directa dentro del cuerpo como para ser integrados en otros dispositivos médicos [2].

II.6 DESVENTAJAS DE LOS SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

II.6.1 Costo

El precio de los sensores de fibra óptica es, en muchos casos, superior a otros fabricados con otras tecnologías. Esto es debido al costo de los componentes, que en la mayoría de los casos están fabricados a medida o en pequeñas series. Este inconveniente es típico en una tecnología que se está introduciendo en un

mercado, pero ya cuenta con soluciones. A pesar de que este inconveniente cada vez tiene menos peso, explica perfectamente que no exista tanta variedad de sensores de fibra óptica en el mercado como sería tecnológicamente posible [2].

II.6.2 Deben estar protegidos de la luz ambiente

Algunos sensores de fibra óptica pueden ser demasiado sensibles a más de un estímulo, lo cual puede repercutir en errores de medida o a cierta dificultad para saber de qué tipo es el estímulo. Por suerte este problema se soluciona gracias a los algoritmos de análisis de datos y generalmente porque se puede integrar más de una fibra óptica sensora con diferentes recubrimientos y configuraciones, que permiten separar con exactitud las medidas, aumentar la precisión y eliminar errores [42].

La señal óptica detectada por el equipo de medida debe proceder única y exclusivamente del indicador. Por este motivo, debe evitarse la exposición del terminal sensible a la luz ambiente, o bien modular la señal procedente del indicador con objeto de poder diferenciarla de la luz externa [56].

II.6.3 Largos tiempos de respuesta

Los tiempos de respuesta pueden ser lentos ya que dependen de la transferencia de masa (transferir una sustancia a través de otra a escala molecular) antes de alcanzar el estado de equilibrio, tanto de analito para el reactivo y la cinética de la interacción analito/reactivo [1].

II.6.4 Rango dinámico limitado

Rangos dinámicos de respuesta son generalmente pequeños en comparación con los sensores eléctricos [16].

II.6.5 Irreversibilidad

La existencia de pocos procesos en los que la interacción analito-indicadora sea completamente reversible condiciona el carácter desechable [9].

II.6.6 Estabilidad 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. 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 [53].

II.6.7 Dependencia de la concentración de analito

Una de las principales desventajas que presentan los optodos, es que no miden actividad, sino concentración, siendo por ello su señal analítica fuertemente dependiente de la fuerza iónica del medio [37].

II.6.8 Limitaciones introducidas por la fibra óptica

Algunas fibras ópticas comerciales poseen algunas impurezas que pueden originar fenómenos de absorción, emisión o dispersión Raman. El material con que se fabrican estas fibras (plástico, vidrio o cuarzo) determina el intervalo útil de medida [56].

II.7 INSTRUMENTOS EMPLEADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

Básicamente se cuenta con los siguientes elementos: fuente estable de energía radiante, selector

de longitud de onda, medio de transducción, detector de energía y un procesador de señales.

II.7.1 Fuente de radiación o una fuente estable de energía radiante

Una fuente debe generar un haz de radiación con potencia suficiente para que se detecte y se mida con facilidad para poderla utilizar en estudios espectroscópicos. Además su potencia de salida debe ser estable durante periodos de tiempo razonables [2].

Fuentes de luz típicas incluyen lámparas, diodos emisores de luz (LEDs), y láseres.

II.7.1.1 Lámparas

Región Ultravioleta 190-320 nm. Para espectrometría de absorción, una lámpara de arco rellena de deuterio produce un espectro continuo con algunas líneas de emisión. Para espectrometría de fluorescencia, se utilizan lámparas de mayor intensidad como las lámparas rellenas con xenón o vapor de mercurio a alta presión.

Región Visible 320-750 nm. Para espectrometría de absorción se utiliza una lámpara incandescente [42].

II.7.1.2 Diodos emisores de luz (LEDs)

El diodo emisor de luz es un dispositivo semiconductor que tiene la capacidad de emitir luz cuando este se polariza directamente y conduce una corriente eléctrica a través de él (Figura II.2).

□

Figura II. □ SEQ Figura_II. * ARABIC □2□ Esquema del símbolo LED [2]

Un LED es un muy eficiente diodo semiconductor que convierte la energía eléctrica a luz en un proceso conocido como emisión espontánea [2].

Los materiales usados en la construcción de LED'S (aluminio (Al), galio (Ga), indio (In), fósforo (P) y arsénico (As)) influyen en la longitud de onda emitida y la cantidad de energía liberada. En la tabla II.2 se muestran los diferentes materiales utilizados para la construcción de LEDs y sus respectivas longitudes de onda [42].

Tabla II. □ SEQ Tabla_II. * ARABIC □2□ Clasificación de los LEDs por su longitud de onda emitida

□

II.7.1.3 Láser

Los láseres son fuentes muy útiles en la instrumentación analítica debido a su elevada intensidad, a su estrecha anchura de banda y a la naturaleza coherente de su señal de salida. El término “láser” es un acrónimo de light amplification by stimulated emission of radiation (amplificación de luz mediante la medición estimulada de radiación). Los láseres se han convertido en fuentes bastantes utilizadas en la región ultravioleta, visible e infrarroja del espectro [20].

Un láser funciona como un oscilador, o resonador, en el sentido de que la radiación producida por el funcionamiento del láser se la obliga a pasar muchas veces a través del medio en ambos sentidos con ayuda de un par de espejos. En cada recorrido se generan fotones adicionales, lo que da lugar a una gran ampliación. El paso repetido produce también un haz muy paralelo, ya que la radiación no paralela escapa por los lados del medio después de reflejarse unas pocas veces [20].

II.7.2 Selector de longitud de onda

Para la mayoría de análisis espectroscópicos, se necesita una radiación constituida por un grupo limitado, estrecho y continuo de longitudes de onda denominado banda. Una anchura de banda estrecha aumenta la sensibilidad de las medidas de absorbancia, puede proporcionar selectividad tanto a los métodos de absorción como a los de emisión y, con frecuencia, es un requisito para obtener una relación lineal entre la señal óptica y la concentración [1]. No existe ningún selector de longitud de onda que tenga una señal de salida con una única longitud de onda, en su lugar, lo que se obtiene es un ancho de banda. Cuanto más estrecha es un ancho de banda la resolución será mejor. Existen 2 tipos de selectores: los filtros y el monocromador [56].

II.7.2.1 Filtros

Los instrumentos de filtros seleccionan las longitudes de onda interponiendo entre la fuente y la muestra materiales que permiten el paso de determinadas longitudes de onda. Los más sencillos son los de absorción que transmiten longitudes de onda de forma selectiva según el material de que están hechos. Se limitan a la región Visible del espectro [1].

Otro tipo de filtros son los de interferencia óptica (de Fabry-Perot) que filtran longitudes de onda según el índice de refracción del filtro y su grosor. Operan en la región ultravioleta, visible y buena parte del infrarrojo [44].

II.7.2.2 Monocromadores

Son dispositivos que descomponen la luz policromática que proviene de la fuente de radiación en longitudes de onda discretas. La radiación entra en forma de haz estrecho y un elemento dispersante, que puede ser un prisma o una red de difracción, la descompone. Los más utilizados actualmente son los que incorporan una red de difracción, ya que son más baratos, proporcionan mejor separación de longitudes de onda y dispersan linealmente la radiación [24].

En muchos métodos espectroscópicos es necesario o deseable poder variar, de forma continua y en un amplio intervalo, la longitud de onda de la radiación. Este proceso se llama barrido, de un espectro. Los monocromadores se diseñan para realizar barridos espectrales [11].

II.7.3 FIBRA OPTICA

Una fibra óptica es un cable cilíndrico, cuyo diámetro puede variar desde menos de uno a varios cientos de micras (μm). Los materiales más utilizados en la fabricación de las fibras son plásticos, vidrios, y el cuarzo. Como se muestra en la Figura, la fibra se compone de un eje interno, conocido como el núcleo, de un determinado índice de refracción, rodeado de un segundo material de índice de refracción ligeramente menor, conocida como revestimiento. Para dar más resistencia y flexibilidad a la fibra, una envoltura (recubrimiento), generalmente de un material polimérico y flexible, se utiliza [23].

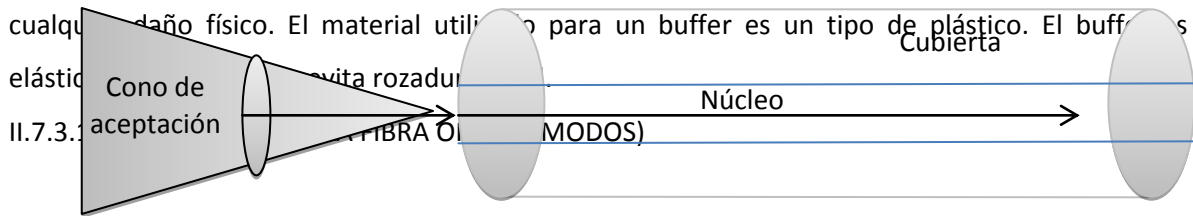
El núcleo es una barra cilíndrica de material. La luz se propaga principalmente a lo largo del núcleo de la fibra [2].

La capa de revestimiento está hecha de un material dieléctrico con un índice de refracción. El índice de refracción del material de revestimiento es menor que la del material del núcleo. En el revestimiento se ejecutan funciones como la disminución de la pérdida de la luz del núcleo en el aire circundante, disminuyendo la pérdida de la dispersión en la superficie del núcleo, que protege la fibra de la absorción de los contaminantes de la superficie y la adición de la resistencia mecánica [56].

□

Figura II. □ SEQ Figura_II. * ARABIC □3□ Componentes de la FO y la representación esquemática de transmisión [54].

El recubrimiento o buffer es una capa de material utilizado para proteger a una fibra óptica de



Las fibras ópticas se clasifican en función de la cantidad de rayos (monomodo y multimodo) y también en función de su índice de refracción (índice escalonado y gradual).

Fibra monomodo

Se utilizan para telecomunicaciones de gran distancia y capacidad. Se diferencian de las fibras multimodo en que tienen un diámetro de núcleo pequeño del orden de $10\mu\text{m}$. En cuanto a su forma de transmisión sólo se propaga un modo por el núcleo [54].

?

Figura II. ? SEQ Figura_II. * ARABIC ?4? Esquema de la fibra óptica monomodo [1].

Fibra multimodo

En comparación con la fibra de modo único, la fibra multimodo tiene un núcleo relativamente grande (típicamente $50\text{-}60\ \mu\text{m}$) y una gran apertura numérica (NA). Como su nombre implica, fibras multimodo son capaces de transmitir más de un modo a la vez [49].

a) Fibra multimodo de índice escalonado: En una fibra de índice escalonado el índice de refracción del revestimiento es típicamente 01 por ciento menor que el índice de refracción del núcleo.

La principal desventaja de las fibras de índice escalonado es que las diferentes longitudes ópticas causadas por los diversos ángulos en el que la luz se propaga en relación con el núcleo, hace que el ancho de banda de transmisión a ser bastante pequeño.

b) Fibra multimodo de índice gradual: Una manera de reducir la dispersión modal en una fibra multimodo es modificar el índice de refracción del cristal, de modo que la luz viaje a velocidades diferentes. Este sistema encuentra su aplicación en un tipo de fibra óptica denominada fibra multimodo de índice gradual. Debido a ello la velocidad que tendrán será mayor allí que en el centro de la fibra. Los modos de orden bajo, que circulan muy próximos al eje, durante todo su camino verán un índice de refracción de valor alto y, en consecuencia su velocidad será mayor” [1].

Con la fibra multimodo de índice gradual, el índice de refracción del núcleo disminuye gradualmente desde el centro al borde exterior, dando como resultado una flexión lenta de la luz en lugar de un rebote, y debido a estas variaciones en el índice de refracción, la trayectoria de la luz es sinusoidal en oposición a zigzag y los rayos de luz siguen trayectorias curvas [49].

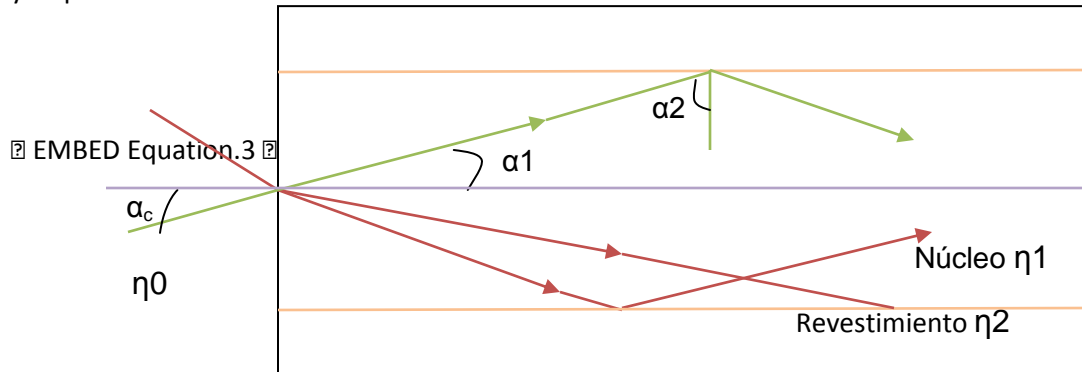
☐

Figura II. ☐ SEQ Figura_II. * ARABIC ☐5☐ Esquema de la fibra óptica multimodo de índice gradual [1].

FUNCIONAMIENTO DE UNA FIBRA OPTICA

El principio de la transmisión de la luz a lo largo de las fibras ópticas es el de la reflexión total interna, que se puede describir utilizando rayos diferentes, como se ilustra en la Figura II.6. Para que un rayo quede de manera eficaz "atrapado" en el núcleo de la fibra, se debe lograr la interfaz del núcleo / revestimiento en un ángulo θ mayor que el ángulo crítico θ_c [54]. Este ángulo crítico se relaciona con los índices de refracción del núcleo de n_1 y el revestimiento n_2 por la ley de Snell

y se puede calcular como:



□

Figura II. □ SEQ Figura_II. * ARABIC □6□ Principio de la propagación de la luz en una fibra óptica [54].

II.7.4 DETECTOR DE ENERGÍA

Son detectores que convierten la energía radiante en una señal eléctrica. Existen dos tipos generales de detectores de radiación: uno responde a los fotones y el otro al calor [1].

Los detectores de fotones (también denominados detectores fotoeléctricos o cuánticos) tienen una superficie activa, que es capaz de absorber radiación. Los detectores de fotones son muy usados para medir las radiaciones ultravioleta, visible e infrarroja cercana [45].

Los detectores térmicos son adecuados para la región infrarrojo, en estos, la radiación incide sobre un pequeño cuerpo negro y es absorbida por él; se mide el aumento de temperatura resultante [45].

II.7.5 PROCESADOR DE SEÑALES

Es generalmente un dispositivo electrónico que amplifica la señal eléctrica del detector. Además,

puede cambiar la señal de corriente continua a corriente alterna (o a la inversa), cambiar la fase de la señal y filtrarla para eliminar los componentes no deseados. Además, el procesador de señal puede utilizarse para llevar a cabo operaciones matemáticas en la señal como diferenciar, integrar o convertir a logaritmo [1].

II.6 PROCESO DEL SOL-GEL

Un coloide es una suspensión en la que la fase dispersa es tan pequeño que las fuerzas gravitacionales son despreciables y las interacciones están dominadas por fuerzas de corto alcance, como la atracción de van der Waals y las cargas superficiales. Un sol es una suspensión coloidal de partículas sólidas en un líquido [8]

En el proceso sol-gel, los precursores (compuestos de partida) para la preparación de un coloide constan de un elemento metálico o metaloide rodeado de varios ligandos. Por ejemplo, los precursores comunes de óxido de aluminio incluyen compuestos inorgánicos (que no contiene carbono), tales como las sales de $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ y los compuestos orgánicos, tales como $\text{Al}(\text{OC}_4\text{H}_9)_3$. Este último es un ejemplo de un alcóxido, la clase de los precursores más utilizados en sol-gel de la investigación [50].

Un alcano es una molécula que sólo contienen carbono e hidrógeno vinculado exclusivamente por enlaces simples, como el metano (CH_4) y etano (C_2H_6); la fórmula general es $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$. Un grupo alquilo es un ligando formado por la eliminación de un átomo de hidrógeno (protones) a partir de una molécula de alcano produciendo, por ejemplo, metilo ($.\text{CH}_3$) o etil ($.\text{C}_2\text{H}_5$) (donde el punto. Indica un electrón que está disponible para formar un enlace) [5].

Un alcohol es una molécula formada por la adición de un grupo hidroxilo (OH) a un grupo alquilo (u otras) moléculas, como en (CH_3OH) o etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Un alcoxi es un ligando formado por la eliminación de un protón del hidroxilo en un alcohol, como en metoxi ($.\text{OCH}_3$) o etoxi ($.\text{OC}_2\text{H}_5$). Una lista de los ligandos alcoxi más utilizados se presenta en la Tabla II.3.

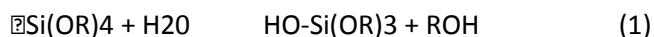
Tabla II. Lista de los Ligandos alcoxi más usado [5]

Los	ligandos	de	uso
común	Alquilo	Alcoxi	Metilo
	CH ₃	Metoxi	OCH ₃
	Etilo	CH ₂ CH ₃	Etoxi
	OCH ₂ CH ₃	n-propilo	CH ₂ CH ₂ CH ₃
	n-propoxi	O(CH ₂) ₂ CH ₃	iso-propilo
	H ₃ C(.C)HCH ₃	iso-propoxi	H ₃ C(.O)CHCH ₃
	n-butilo	CH ₂ (CH ₂) ₂ CH ₃	n-butoxi
	O(CH ₂) ₃ CH ₃	sec-butilo	H ₃ C(.C)HCH ₂ CH ₃
	sec-butoxi	H ₃ C(.O)CHCH ₂ CH ₃	iso-butilo
	CH ₂ CH(CH ₃) ₂	ter-butilo	C(CH ₃) ₃
	ter-butoxi	OC(CH ₃) ₃	Punto (.) Indica sitio de unión.

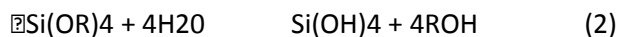
n = normal (es decir, una cadena lineal), sec = secundario, ter= terciario.

Los alcóxidos metálicos son miembros de la familia de compuestos metalorgánicos, que tienen un ligando orgánico unido a un átomo de metal o metaloide. El ejemplo más estudiado es el silicio tetraetóxido (o Tetraetoxisilano, o Tetraetilortosilicato, TEOS), Si(OC₂H₅)₄.

Los Alcóxidos metálicos son precursores populares, ya que reaccionan fácilmente con agua. La reacción se denomina hidrólisis, ya que un ión hidroxilo se une al átomo de metal, como en la siguiente reacción:



La R representa un protón u otros ligando (si R es un alquilo, entonces .OR es un grupo alcoxi), y ROH es un alcohol, la barra (-) se utiliza a veces para indicar un enlace químico. Dependiendo de la cantidad de agua y catalizador presente, la hidrólisis puede ir hasta el final (para que todos los grupos OR son reemplazados por OH),



o parar, mientras que el metal es sólo parcialmente hidrolizada, Si(OR)_{4-n}(OH)_n. Dos moléculas parcialmente hidrolizadas pueden ligarse en una reacción de condensación tal como



Como se observa en la relación anterior, la condensación libera una pequeña molécula tal como agua o alcohol. Conforme este tipo de reacción se lleva a cabo el silicio tiende a formar moléculas de forma lineal que ocasionalmente se entrecruzan, estas cadenas de moléculas se entrelazan y forman ramificaciones adicionales dando como resultado una red tridimensional esto es el proceso de polimerización [50].

II.7 MEDIO ÓPTICO DE MEDIDA

El sensor químico de fibra óptica de onda evanescente ha sido incluido en los sensores basados en la absorción, en los cuales el campo evanescente de la luz guiada es absorbido por el producto químico de interés.

Desde hace muchos años se ha utilizado el color para reconocer las sustancias químicas; al reemplazar el ojo humano por otros detectores de radiación se puede estudiar la absorción de sustancias, no solamente en la zona del espectro visible, sino también en ultravioleta e infrarrojo.

Se denomina espectrofotometría a la medición de la cantidad de energía radiante que absorbe un sistema químico en función de la longitud de onda de la radiación, y a las mediciones a una determinada longitud de onda.

La teoría ondulatoria de la luz propone la idea de que un haz de luz es un flujo de cuantos de energía llamados fotones; la luz de una cierta longitud de onda está asociada con los fotones, cada uno de los cuales posee una cantidad definida de energía.

?

Figura II. SEQ Figura_II. * ARABIC 77 Muestra de haz de radiación [50]

La figura II.7 muestra un haz de radiación paralela antes y después de que ha pasado a través de una capa de solución que tiene un espesor de b cm y una concentración c de una especie absorbente. Como consecuencia de interacciones entre los fotones y las partículas absorbentes, la potencia del haz es atenuada. La transmitancia T de la solución es entonces la fracción de la radiación incidente transmitida por la solución:

EMBED Equation.3

Se define la absorbancia: es un concepto más relacionado con la muestra puesto que nos indica la

cantidad de luz absorbida por la misma, y se define como el logaritmo de $1/T$, en consecuencia:

☐ EMBED Equation.3 ☐☐☐

CAPÍTULO III
METODOLOGÍA

III.1 C



Existe
inmer
atomi
inmer

ón,
se
de
del

recubrimiento se define por la velocidad que esta, sea cubierta; y por flujo en este caso, las piezas se mueven a través de un depósito con liquido cerrado, donde una serie de boquillas bañan la superficie [60].

Beltrán et al., menciona que el método de inmersión es el más viable para definir el espesor de la película líquida de sol gel que va adherida en la fibra óptica, siendo un factor que depende de la velocidad en que este se someta [6], se determinó construir (Tabla III.1) un dispositivo donde se pueda controlar la velocidad para llevar a cabo dicho proceso (Figura III.1).

Tabla III. SEQ Tabla_III. * ARABIC 1111 Materiales para construir un dispositivo para el método de inmersión

EMBED Excel.Sheet.12

?

Figura III. SEQ Figura_III. * ARABIC 1 Dispositivo utilizado para depositar de manera controlada el sol-gel en la fibra óptica

III.2 Determinación del analito

Derivado de varias investigaciones que han realizado con respecto a sensores de fibra óptica para medir el oxígeno, donde han usado como matriz el sol gel y xero gel, dopados con analitos como el rutenio (II) y el platino (II), los resultados experimentales de esos sensores mostraron que el sensor óptico con el analito de platino (II) tiene una mayor sensibilidad debido a que tiene muchas características favorables de detectar la concentración de oxígeno basado como indicador fluorescente de longitudes de onda de excitación y emisión, teniendo una respuesta más rápida, esto parte del efecto inducido por el oxígeno ambiente y además determinan que la matriz sol gel recubre una mayor superficie por unidad de masa de la superficie del sensor (Fibra óptica), donde atrapado el analito en el núcleo las nanopartículas de sílice también aumenta la sensibilidad, considerando que las moléculas de oxígeno penetran el sílice poroso y el analito atrapado es más propenso a temple oxígeno [19].

En base a las anteriores investigaciones se determinó el Platino II (cis-Dichlorobis(pyridine)platinum(II)) como precursor para medir oxígeno disuelto [19], siendo este reactivo soluble con el alcohol se decidió realizar una mezcla con el etanol, el cual es parte fundamental para el desarrollo de la matriz sol gel, y para definir cuál es la mejor concentración, se realizaron tres mezclas a diferentes concentraciones.

Para realizar las soluciones con las tres diferentes concentraciones primeramente se utilizaron 3 crisoles de porcelana, se colocaron a peso constante cada una en una balanza analítica marca A&D modelo HR-250A, después se metieron a la mufla marca FELISA modelo FE-340, a los 60 minutos

se sacaron y c
analítica cada u
mg, 2.0 mg y 2.
Se elaboraron
100/97, dando
de etanol, en m
en un tiempo
definidos como
matriz sol gel.



en la balanza
fueron de 1.5
na relación de
eron en 20 ml.
es magnéticos
no II (analito),
ara elaborar la

□

Figura III. □ SEQ Figura_III. * ARABIC □2□ Balanza analítica y pesado del Platino II

□

Figura III. □ SEQ Figura_III. * ARABIC □3□ Soluciones de Etanol y Platino II, C (2.5mg), B (2.0mg) y A (1.5mg)

III.3 Tratamiento de la Fibra óptica



men
el r
ue
y ch
ó ha
me



Se cortaron dos tramos de 20 cm de cada una de las Fibras, de diferentes núcleos una 50 μm y la otra de 105 μm donde se les quito de 2 a 5 cm el recubrimiento del punto medio de las fibras; se empalmaron por un lado a una luz en potencia determinada y por el otro extremo a un equipo de medición óptica conectada a una computadora para recibir y procesar los datos usando un software THOR LABS PM320. Después de conectado se usaron tapas de garrafón de un plástico tipo "2 PEAD" que es un plástico de alta densidad, que contiene propiedades que no fácilmente corroe el ácido Fluorhídrico. Después se le agrego el ácido a la parte sin recubrimiento de la fibra óptica estando dentro de la tapa y se dispuso hacer la medición de la perdida de luz que interactuaba mientras el ácido realizaba su función en el degaste del núcleo de la fibra óptica.

?

?

Figura III. ? SEQ Figura_III. * ARABIC ?4? Fibras ópticas



modo de medición Figura

Figura III. SEQ Figura_III. * ARABIC 66 Tratamiento HF

III.4 Preparación SOL-GEL

La técnica Sol-Gel es proceso sencillo, accesible para desarrollar y muy económico por el cual se puede elaborar películas delgadas a temperaturas muy bajas, permitiendo que puedan incorporarse analitos durante el proceso de elaboración sin recurrir a temperaturas elevadas, las películas de Sol-Gel son peculiares y apropiadas para producir películas delgadas con índices de refracción que van de 1.4 a 2.0, con espesores $\geq 0.1\mu\text{m}$, y con alto grado de porosidad que permiten a las moléculas a difundirse en las películas [38].

Para realizar el dopaje con el Sol-Gel de las fibras ópticas, se preparó una solución utilizando como principal el tetraetilortosilicato (TEOS) por su alta pureza y debido a la formación de una estructura porosa, y que tiene un efecto barrera en contra la corrosión, es de bajo costo en comparación con otros y es amigable con el medio ambiente; se usó el agua destilada como solvente del dopante y el etanol como el solvente común del precursor y por ultimo ácido clorhídrico esto para obtener una mejor ampliación de los poros, usando la razón molar 1:2:3.8:3.6x10⁻³ [50] [38].

Después se determinó el número de moles de Teos a partir de la ecuación:

$$\rho = m / v$$

Donde ρ es densidad, m es masa y v es volumen. Despejando a m obtenemos la siguiente ecuación

$$m = \rho v$$

Se empleó la fórmula

□

Donde □ QUOTE □ □

molar; sustituyendo

□

Una vez obtenido

sustancias restante

volumen de las sus

resultando:

□

Para facilitar el cálculo de los volúmenes de cada reactivo, se desarrollaron las ecuaciones anteriores, quedando de la siguiente manera:



OTE □ □□□ es masa

de moles de las

se obtuvieron el

ecuación anterior

Tabla III. □ SEQ Tabla_III. * ARABIC □□□ Cálculo de los volúmenes para el Sol-Gel

Cálculo	de	volumen	para	el	Sol-Gel	Razón	molar	Volumen									
(ml)	□□□	TEOS	□	AGUA	□	ETANOL	□	HCL	□	TOTAL	□□□	□3.3	□0.53	□3.28	□0.001	□7.12	□□

□

Figura III. □ SEQ Figura_III. * ARABIC □□□ Reactivos para el proceso sol gel

Tabla III. SEQ Tabla_III. * ARABIC 3 Para elaborar la matriz sol-gel se empleó el siguiente material:

CANTIDAD MATERIAL Vaso de precipitado de 20 ml Vaso de precipitado de 50 ml Pipeta graduada de 10 ml Jeringa de 1ml Agitadores magnéticos 0.001 ml Ácido clorhídrico 3.28 ml soluciones A,B y C Etanol (96%) 0.53 ml Agua destilada 3.3 ml TEOS Espátula de metal Parrilla magnética

El procedimiento que se llevó para elaborar la matriz sol-gel fue en un vaso de precipitado se le vierte con una pipeta graduada de 10 ml; 3.28 ml de etanol (Soluciones A, B y C) (Figura III.9). mas 3.3 ml de TEOS (tetra etil orto silicato), seguido se colocó en una parrilla magnética durante 25 minutos, en una velocidad 650 revoluciones por minuto (RPM) (Figura III.8).

Figura III. SEQ Figura_III. * ARABIC 8 TEOS más etanol (SOLUCIONES A, B y C)

Una vez concluido el tiempo, se le agrego 0.53 ml de agua destilada junto a 0.001 ml de ácido clorhídrico (HCL), se agito por 50 minutos en la parrilla magnética a 650 RPM (Figura III.9), dentro de la campana de extracción. Después de todo el proceso se obtuvo una matriz de sol-gel (Figura III.10), listo para que la fibra óptica sea depositada con el método de inmersión.

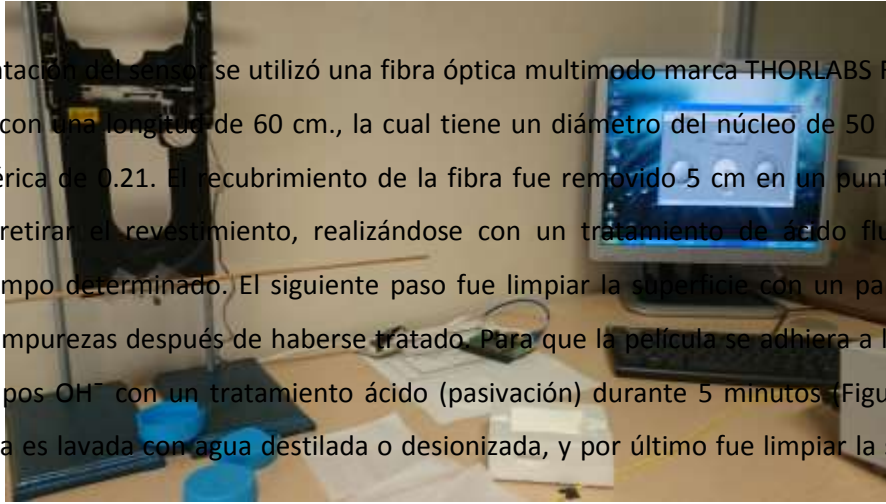
Figura III. SEQ Figura_III. * ARABIC 9 Sol gel y las diferentes soluciones (A,B y C)

Figura III. SEQ Figura_III. * ARABIC 10 Matriz sol gel

Figura III. SEQ Figura_III. * ARABIC 10 Matriz sol gel

III.5 Preparación de la Fibra Óptica

Para implementación del sensor se utilizó una fibra óptica multimodo marca THORLABS FG050LCA (Figura III.13), con una longitud de 60 cm., la cual tiene un diámetro del núcleo de 50 μm y una apertura numérica de 0.21. El recubrimiento de la fibra fue removido 5 cm en un punto medio. Seguido fue retirado el revestimiento, realizándose con un tratamiento de ácido fluorhídrico durante un tiempo determinado. El siguiente paso fue limpiar la superficie con un papel suave para remover impurezas después de haberse tratado. Para que la película se adhiera a la fibra se activan los grupos OH^- con un tratamiento ácido (pasivación) durante 5 minutos (Figura III.14), después la fibra es lavada con agua destilada o desionizada, y por último fue limpiar la superficie con acetona.



□

Figura III. □ SEQ Figura_III. * ARABIC □11□ Tratamiento de Ácido Fluorhídrico con determinado tiempo

III.6 Depósito de la película en la fibra óptica

La película de sol-gel será depositada en la fibra por el método de inmersión, este proceso se llevará a cabo en la parte sin revestimiento (núcleo expuesto), siendo esta sumergida en la solución sol gel hasta que sea cubierta en su totalidad a una velocidad de 0.30 mm/s definida y establecida después de varias pruebas; ya que el espesor de la película dependerá de la velocidad de inmersión. El material inicial para la fabricación de la película es el platino II usado como principal precursor debido a alta sensibilidad al oxígeno, el cual es agregado en el etanol, solución principal para fabricar el Sol-Gel; La solución es preparada con 0.001 ml de Ácido Clorhídrico, 3.28 ml de Etanol (Soluciones A, B y C), 0.53 Agua destilada y 3.3 ml de TEOS, todos estos son mezclados a temperatura ambiente resultando una matriz transparente mate (sol gel).

☐

Figura III. ☐ SEQ Figura_III. * ARABIC ☐12☐ Dispositivo de inmersión

☐

Figura III. ☐ SEQ Figura_III. * ARABIC ☐13☐ Fibra depositada en sol gel

III.7 Arreglo Experimental

En la figura III.18 se muestra el arreglo experimental del sistema en general para la caracterización del sensor desarrollado; el cual está compuesto por 5 partes principales: Diodo LED M940F1 como fuente de luz con una longitud de onda centrada en 940 nm Y 6.5 mW de potencia (1), un dispositivo para llevar a cabo el método de inmersión que sea preciso y que la velocidad sea controlada; esta fue desarrollada con un software LABVIEW 2010 y un servomotor marca POLOLU 250:1 micro metal gearmotor (2), equipo empalmadora de fibra óptica marca Fujikura modelo FSM-18S, para la unión de los sensores que conecta una parte al emisor y otra al receptor (3), equipo de medición de potencia óptica (4) y por ultimo una computadora para recibir y procesar datos usando un software THOR LABS PM320 (5).

☐

Figura III. ☐ SEQ Figura_III. * ARABIC ☐14☐ Sistema de caracterización en laboratorio de sensores de la Esc. de Ing. Ambiental

Con las fibras dopadas se realizó la caracterización con tres tipos de agua, durante 5 minutos por

cada solución, tales como: Solución Buffer para Oxígeno Disuelto, Agua Destilada y Agua Oxigenada. Estas sustancias tienen un valor fijo de oxígeno disuelto, por lo tanto fueron la base para la calibración del sensor.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Tratamiento de la Fibra óptica para quitar el revestimiento

En el tratamiento que se le aplicó a la fibra óptica para eliminar al revestimiento, se tomaron en cuenta tres diferentes métodos tal cual mencionan Beltran et al. un tratamiento con una solución $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2$ al 50% durante 5 minutos [6]; y Chu et al. que es remojar la fibra en NaOH durante 24 h. [19]. Sin embargo se optó por aplicar un tratamiento con ácido fluorhídrico (HF) al 51%, debido a que este reactivo ejerce un mecanismo químico sobre todo tipo de material de silicato [32].

Se determinó este proceso químico con el HF (ácido fluorhídrico) debido al mecanismo que este ejerce, además que realiza una corrosión, resultante de la fuerte disociación del ácido en el medio, desplazando del lugar los iones OH (hidroxilos), sustitución que es favorecida para la fibra óptica. Y así llegar al núcleo de la fibra óptica para realizar el depósito de la película sol gel y obtener una mejor adhesión.

Se llevó a cabo la caracterización durante 20 minutos. Se dejó la FO (Fibra Óptica) con el tratamiento de HF, hasta que se desintegrara por completo. Este proceso se monitoreo con el equipo de medición y se encontró el tiempo donde hay una pérdida total de luz (Figura IV.1). Se tomó el tiempo en el cual la señal óptica cae a la mitad, quedando la siguiente grafica representada en la figura IV.1, donde se determina que el tiempo para el tratamiento es de 348 s lo equivalente a 5 minutos con 48 segundos. Esto significa que la fibra óptica se va a sumergir en ácido fluorhídrico un tiempo de aproximadamente 6 minutos para que el núcleo quede descubierto y en esa parte degradada de la fibra es en donde se va a hacer el depósito de sol-gel dopado con platino II.

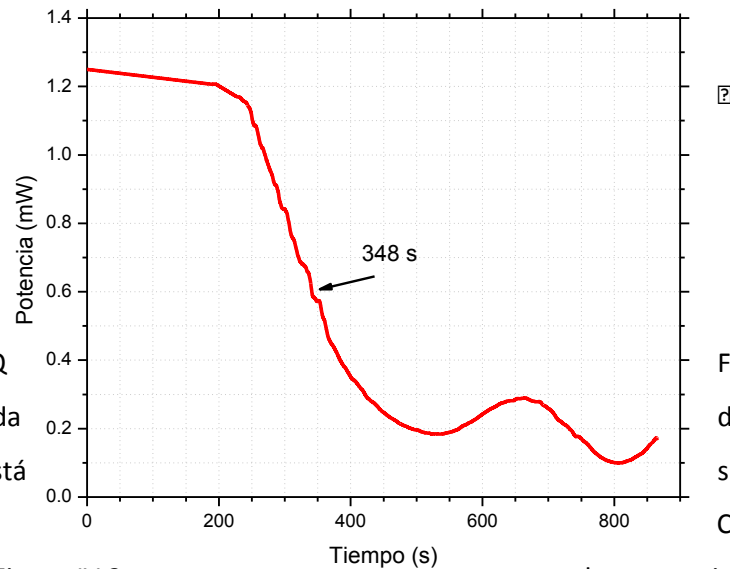


Figura IV. 2 SEQ ARABIC 1 Pérdida cuando la fibra está

Figura_IV. 2 de señal óptica sumergida en HF Comparado la

Figura IV.2 con la Figura IV.3 se muestra como el tratamiento de ácido fluorhídrico es efectivo al degradar en la fibra óptica la parte del revestimiento con el tiempo determinado de 5.48 minutos.

Después del tratamiento para la fibra óptica, se inicia un segundo proceso para activar los grupos OH (hidroxilos), ya que en el tratamiento con HF se desactivan, la fibra se enjuaga con abundante agua desionizada y después es limpiada con acetona y se deja un tiempo de 10 minutos a secar a temperatura ambiente; guardándose en un recipiente térmico [6] [7] [19], quedando lista para que en la parte degradada se deposite la película sol gel.

2

Figura IV. 2 SEQ Figura_IV. 2 ARABIC 2 FO 50µm vista 10x, sin recubrimiento, sin tratamiento de HF

2

Figura IV. 2 SEQ Figura_IV. 2 ARABIC 3 FO 50µm vista 10x, sin revestimiento, con tratamiento 5.80 min. en HF

Matriz Sol Gel

Para la película sol gel se usó la razón molar 1:2:3.8:3.6x10⁻³ [50], debido a que han presentado mejores resultados en la densidad óptica, físicamente se obtuvo una película transparente mate [38], siendo esta la más certera para realizar la matriz cumpliendo con los requerimientos para llevar a cabo el depósito en la FO, se realizó un depósito del sol gel en un portaobjeto para ver si la matriz era factible en su aspecto físico de acuerdo a los enlaces propios del sol gel, y con lo reportado en otras investigaciones concuerdan con las características, siendo positivo como lo

muestra la figura IV.4

?

Figura IV. ? SEQ Figura_IV. * ARABIC ?4? Enlaces del sol gel vista del microscopio 20x

En relación a las caracterizaciones del sol gel depositada en la FO, pero desarrollada con los tres tipos de concentraciones de platino II que se denominaron como Solución A (1.5 mg), Solución B (2.0 mg) y Solución A (2.5 mg), se realizaron las mediciones con 6 repeticiones de cada solución, estas fibras dopadas con el platino II en sus diferentes concentraciones se encontró que la de mejor respuesta es la Solución B, con una concentración de 2.0 mg de platino II, como tal lo reporta chu et al. en sus investigaciones [19]. A las fibras dopadas se les realizaron caracterizaciones con tres tipos de soluciones, tales como: Solución Buffer para Oxígeno Disuelto, Agua Destilada y Agua Oxigenada.

? EMBED Origin50.Graph ???

Figura IV. ? SEQ Figura_IV. * ARABIC ?5? Alta respuesta concentración de 2.0 mg Platino II

? EMBED Origin50.Graph ???

Figura IV. ? SEQ Figura_IV. * ARABIC ?6? Sin respuesta concentraciones de 1.5 y 2.5 mg Platino II
Método de inmersión

En el método de inmersión algunas investigaciones reportan velocidades de 1.6 mm/s [6] y en otras una velocidad de 0.25 mm/s [19]. Siguiendo estos criterios de velocidad, se optó por caracterizar tres velocidades con el dispositivo construido, quedando así, de la siguiente manera (tabla IV.1).

Tabla IV. ? SEQ Tabla_IV. * ARABIC ?1? Velocidades para el método de inmersión

Fuente?Servomotor 250:1??Velocidad (RPM)?20?10?0?mm/s?0.6?0.3?0.09??

Se realizó la caracterización de estas tres velocidades con una serie de 6 repeticiones y en base a los resultados evaluados en las fibras ópticas dopadas, se determinó que la mejor velocidad es de 0.3 mm/s, debido a que en este tiempo se encontró la mejor sensibilidad en conjunto con el depósito de la película sol gel y el platino II en la medición del Oxígeno Disuelto en agua.

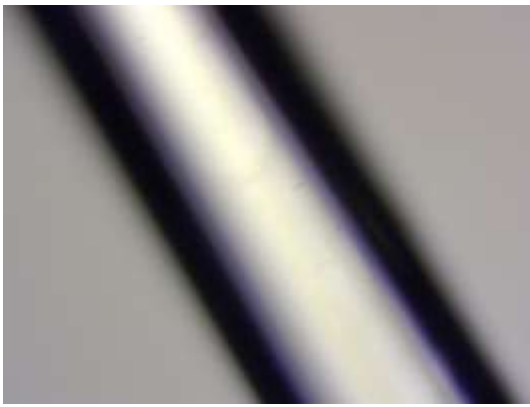
? SHAPE * MERGEFORMAT ?

Figura IV. ? SEQ Figura_IV. *

óptica



Figura IV. ? SEQ Figura_IV. * velocidad de inmersión de la fibra



sol gel, se doparon con v
 ra IV.12) y 3 capas (Figura
 con respecto al grosor del
 , tales como: Solución Buffer para Oxígeno Disuelto, Agua

Destilada y Agua Oxigenada reflejando resultados relevantes para el sensor como lo representa las gráficas (Figura IV. 8).

Donde se define que el sensor más sensible para medir oxígeno disuelto es el de 1 capa (Figura IV.8).

EMBED Origin50.Graph

Figura IV. 8 Caracterización con 1 capa

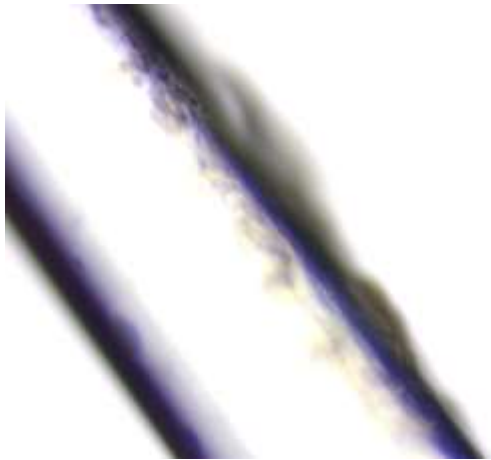
EMBED Origin50.Graph EMBED Origin50.Graph

Figura IV. 9 Caracterización 2 Capas Figura IV. 10 Caracterización 3 Capas

En las Figuras IV.11 a la Figura IV.13 se muestran imágenes de las fibras depositadas con la película sol gel, con recubrimientos de 1, 2 y 3 capas respectivamente, se observa que la fibra de 3 capas es más robusta, seguida de la de 2, y en comparación a la de 1 capa donde se aprecia una ligera y delgada película adherida a la fibra; en base a la caracterización donde se encontró más sensibilidad fue en la de 1 capa, tal y como se presentan en las gráficas (FiguraIV.8, Figura IV.9 y Figura IV.10).

DEscripcion de la figuras

Figura IV. 11 Fibra Óptica 1 capa 40X



ra Óptica 2 capas 40X

Figura IV. SEQ Figura_IV. * ARABIC 13 Fibra Óptica 3 capas 40X

Las partes del sensor ya determinado con todas las características y métodos, como el de inmersión a 0.30 mm/s, y la razón molar a $1:2:3.8:3.6 \times 10^{-3}$ es la más apropiada y la mejor para desarrollar la matriz sol gel, y la determinación del analito como precursor para el Oxígeno Disuelto es el Platino II (*cis*-Dichlorobis(pyridine)platinum(II)); y la concentración dentro la matriz sol gel es mejor de 2.0 mg de Platino II; y que el depósito de sol gel en la fibra óptica tiene una mejor respuesta con 1 capa de recubrimiento; haciendo que estos factores influyan para desarrollar un sensor de fibra óptica altamente sensible para medir Oxígeno Disuelto usando la matriz sol gel, tal como representan los resultados de caracterizaciones en distintas soluciones con 6 repeticiones de cada sensor como se muestra en las siguientes gráficas. Fibra óptica caracterizado sin tratamiento y sin métodos no reflejan respuesta alguna en las mediciones de las soluciones (Figura IV.14); a comparación (Figura IV.15) del sensor desarrollado con implementación de todos lo métodos y tratamientos ya antes mencionado, siendo este caracterizado, muestra resultados de alta sensibilidad y contundentes para medir Oxígeno Disuelto.

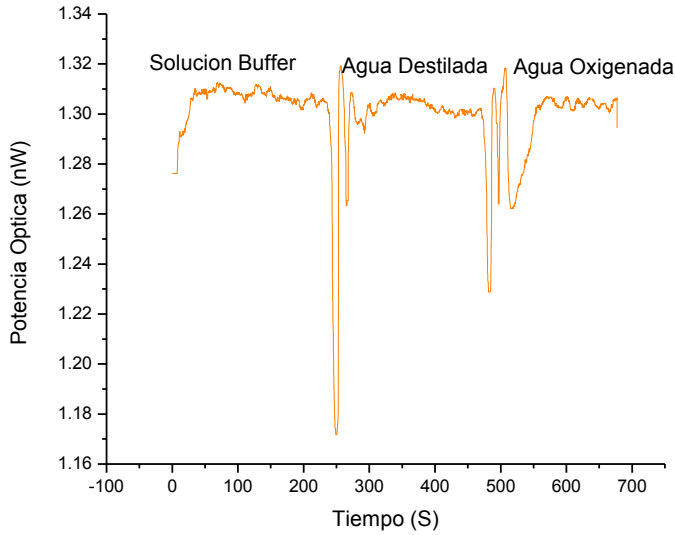


Figura IV. 14 Sensor de fibra óptica sin recubrimiento, sin tratamientos

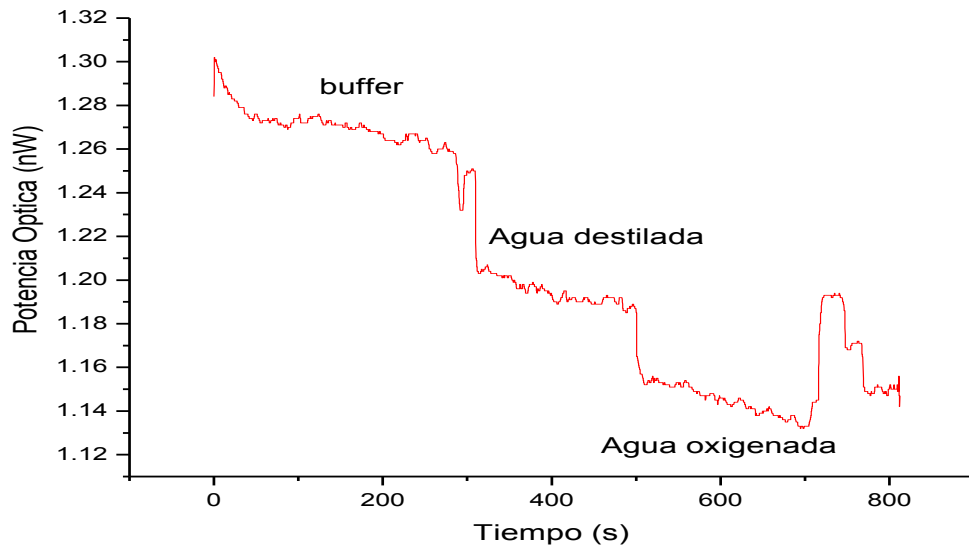


Figura IV. 15 Sensor de fibra óptica con todos los tratamientos y métodos aplicados

Por último se realizó un arreglo experimental, donde se colocó un medidor de oxígeno disuelto modelo 407510 de la marca Extech Instruments, y por el otro lado se colocó el sensor de Fibra óptica desarrollado y se le colocó una bomba de aire para saturar de oxígeno el agua (Figura IV.16); esto se elaboró para caracterizar

agua de llave puesto en una garrafa de 10 litros, para comparar y demostrar que el sensor de fibra óptica tiene la capacidad de detectar presencia de oxígeno disuelto en el agua. En esta caracterización se reflejaron resultados contundentes tales como una mejor estabilidad, sensibilidad y rapidez para el sensor de fibra óptica (Figura IV.17).

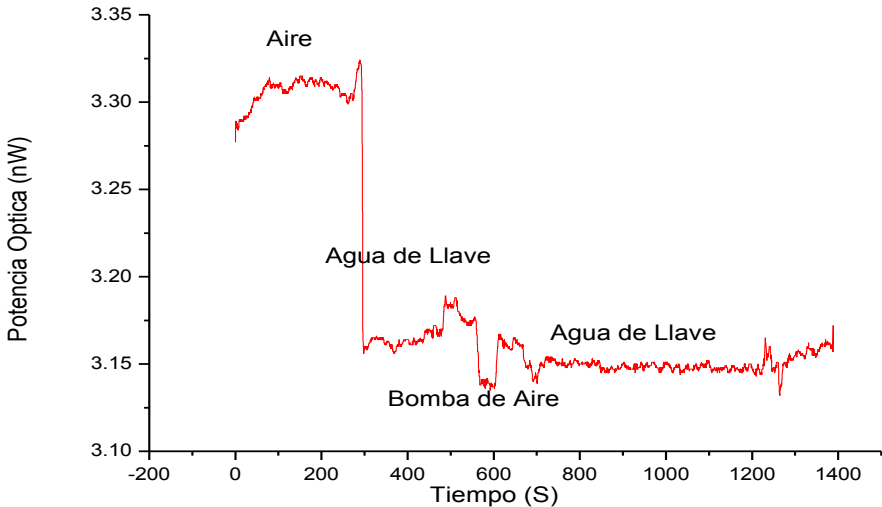
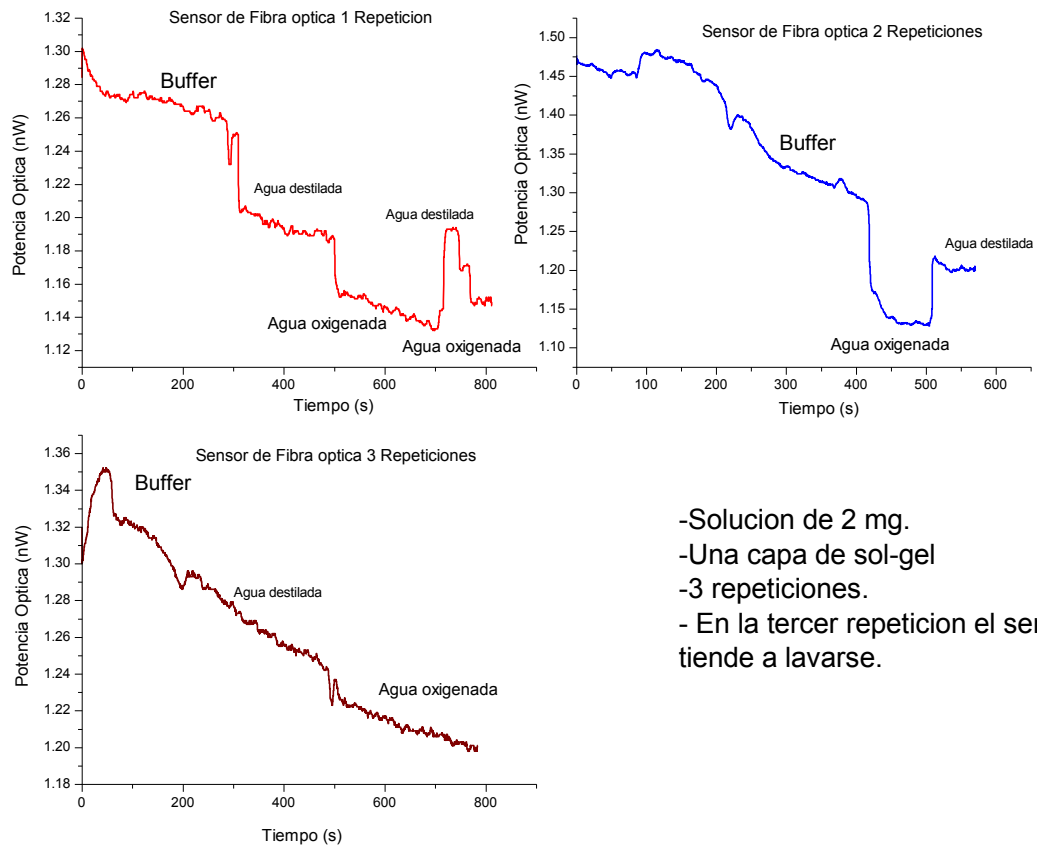


Figura IV. 16 Grafica del arreglo experimental para caracterizar el sensor de fibra óptica junto con un medidor de oxígeno disuelto



Figura IV. 17 Arreglo experimental para caracterizar agua de llave con el sensor y un oxímetro.

Al sensor de fibra óptica desarrollado se le realizaron 3 repeticiones más, con las soluciones, donde se determinó que la primera y segunda repetición el sensor es sensible y estable, pero en la tercera da resultados da poca sensibilidad, esto se define que la a la tercera repetición en uso, la fibra tiende a lavarse tal y como y se ve reflejado en la graficas siguientes (Figura IV.18).



- Solucion de 2 mg.
- Una capa de sol-gel
- 3 repeticiones.
- En la tercer repeticion el sensor tiende a lavarse.

Figura IV. 18 Caracterización al sensor de fibra óptica desarrollado con 3 repeticiones

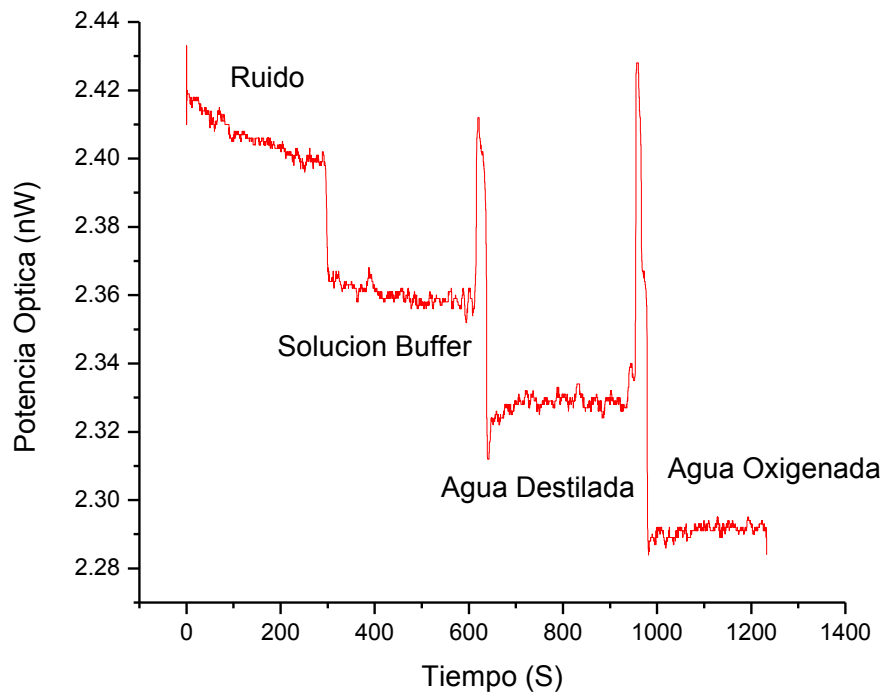


Figura IV. 19 Sensor desarrollado de fibra óptica y caracterización

En base a las últimas caracterizaciones de los sensores de fibra óptica, se obtuvieron resultados similares como los que se muestran en la Figura IV.19. Esta grafica fue la base para una curva de calibración del sensor propuesto. En esta curva se consideraron puntos promedio de la intensidad para cada solución y dos puntos más de otros resultados para agua de llave, y agua de llave saturada con una bomba de aire. Las mismas soluciones fueron caracterizadas con un oxímetro y se relacionaron con la intensidad que mide el sensor, la cual se muestra en la figura IV.20, donde se definen los rangos alcanzados por el sensor propuesto que va de 0.30 a 15 ppm de Oxígeno disuelto.

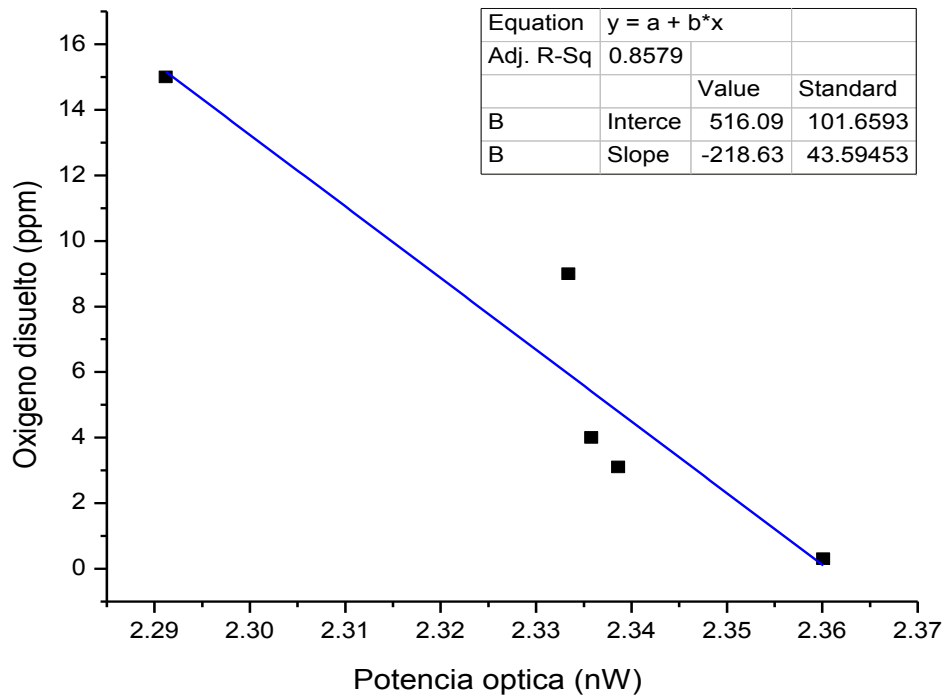


Figura IV. 20 Curva de calibración del sensor propuesto

CAPÍTULO 5

CONCLUSIÓN

Este trabajo de investigación, está enfocado a la construcción y evaluación de un sensor de fibra óptica con la técnica Sol-Gel para medir oxígeno disuelto en agua, los resultados son contundentes y resalta el alto potencial y sensibilidad que este sensor tiene para medir este parámetro.

Este tipo de sensor a base de fibra óptica es de gran importancia debido al uso de medición que tiene, como la forma continua, tiempo real e in situ para el monitoreo de las concentraciones de oxígeno disuelto (O.D), siendo el O.D. un parámetro fundamental que tiene como referencia ser un indicador del crecimiento de vida acuática.

En este sentido, se abren nuevos campos de investigación enfocados a la determinación de parámetros de la calidad del agua, debido en el cual el uso de métodos químicos y otros que se utilizan para llevar a cabo la determinación de análisis con algunos parámetros en el agua, estos provocan algunos contaminantes al medio, y por el uso de esas sustancias químicas en ocasiones son altamente nocivas y agresivas al ecosistema, es por ello la importancia de utilizar un sensor de fibra óptica que proporcione datos confiables, con la finalidad de poder aplicar medidas que mitiguen los riesgos posibles que existan, o bien para conocer y desarrollar planes de contingencias y compensaciones para no

seguir alterando el nivel medioambiental del agua.

Empleando materiales amigables con el medio ambiente como la fibra óptica por su eficiencia y diseño; el uso de materiales orgánicos para el desarrollo del Sol-Gel, y el platino II que se usa a concentraciones muy bajas ($\ll 2\text{mg}$) que no alteran o agreden al medio ambiente. Esto es significativo y relevante por desarrollar equipos de medición de bajo costo, con materiales que no alteran al medio y la precisión en traducir un parámetro como indicador importante para el desarrollo de algunas especies en cierto ecosistema.

Se encontró que el rango dinámico del sensor fue de 0.30 a 15 ppm, siendo este un rango amplio, resultando un sensor aplicable para medir o detectar oxígeno disuelto presente en diferentes sustancias.

CAPÍTULO 6

BIBLIOGRAFÍA

6. BIBLIOGRAFÍA

Álvarez, E.; C. G. Hernández; G. A. Quiroz. Transmisiones ópticas mediante el uso de solitones. (2007). México, D.F. Instituto Politécnico Nacional. Escuela de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Tesis de Maestría. 137 pp.

Arenas, I. y J. L. López. Espectrofotometría de Absorción. (2004). Cuernavaca, México. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ciencias Bioquímicas. Tesis de Maestría. 162 pp.

Arenas G., Noriega, S., Russo, N. & Duchowicz R. (2004). Estudio de las propiedades de un sensor de fibra óptica Fabry-Perot. An. AFA. pp. 78-81

Arenas, G. F. (2009). Desarrollo de sensores de fibra óptica: aplicación de un interferómetro: Fizeau al estudio de polímeros. Universidad Nacional de Plata. Argentina.

Attia, S., Wang, J., Wu, G., Shen, J. & Ma, J. (2002). Review on sol-gel derived coatings: process, tecnicques and optical aplicaciones. J. Mater. Sci. Technol., pp. 211-218.

Beltrán, P. G., López, H. F., Palomino, M. R. (2005). Estudios experimentales de un sensor de fibra óptica para la medición de pH mediante la técnica sol-gel. II encuentro participación de la mujer en la ciencia. CIO. pp. 2-5.

Beltrán, P. G., Duran, S. M., Castillo, M. J., Muñoz, A. S. (2006). Medidor óptico de flujo de agua a base de rejillas de Bragg. IBERSENSOR.

Brinker, J. & G. Scherer. (1990). Sol-Gel Science: The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing. San Diego, California. U.S.A. 912 pp.

Bustamante, N. (2001). Sensores de temperatura, pH y detergentes para control medioambiental con un prototipo que utiliza fibra óptica y luminiscencia con resolución de fase. Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Ciencias Químicas. Tesis doctoral. Madrid, España. 231 pp.

Bustos, C. y G. Chacón. (2009). El desarrollo sostenible y la agenda 21, Telos, Vol. 11, Núm. 2, Venezuela. Pp. 164-181.

Bernabeu, M., E. & Sanchez, S., L. (1987). Sensores optivos. España. Sociedad española de óptica, pp. 268.

López, H. J.M. (2002). Handbook of optical fibre sensing technology. John Wiley & Sons LTD. Pp. 89-98.

Ciaurriz, Z., (2003). An experimental study about hydrogels for the fabrication of optical fiber humidity sensors. Sensors and actuators. B, Chemical. pp. 165-172.

Comisión Económica Para América Latina y El Caribe (CEPAL). (2011). Panorama Social de América Latina. Santiago de Chile. 212 pp.
<http://www.eclac.org/publicaciones/xml/5/48455/PanoramaSocial2012.pdf>

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2006). Capital natural y bienestar social. México.
http://www.conabio.gob.mx/2ep/index.php/Capital_natural_y_bienestar_social

Córdova, C., Mera, J., Paredes, O., & Benavides, J. (2004). Sensor óptico para mediciones de pH obtenido por el método sol-gel con moléculas orgánicas dopadas en matriz vitre. Revista Sociedad de Química de México. pp. 203-207.

Coller, R., D. & Bundy K., J. (2003). Biosensors using enzyme inhibition principles for in vivo, environmental and defense aplicaciones. IEEE. Annual Technical Conference. pp. 11-14.

Cui, L.-J., Chen, Y.-P., & Zhang, G. (2009). An optical fiber hydrogen sensor with Pd/Ag film. Optoelectronic letters, V(3). pp. 220-223.

Chu, C.-S., Lo, Y.-L., & Sung, T.-W. (2010). Enhanced oxygen sensing properties of Pt (II) complex and ye entrapped core-shell silica nanoparticles embedded in sol-gel matrix. Talanta 82. Elsevier. pp. 1044-1051.

Dakin, J., & Culshaw, B. (1996). Optical fiber sensors volumen three components and subsystems. Artech House.

Dorf, R. (2006). The Electrical Engineering Handbook Third Edition. Sensors, Nanoscience, Biomedical, Engineering and Instruments. University of California U.S.A. 453 pp.

Espinoza B. A. J., Ruíz S. F., Sánchez R., and Bosch O. C. (2007). Recent Development in Optical Fiber Biosensors. Sensors, 7, pp. 797-859

Eugene, H. (2000). Optica (3ª. Edicion). España. Adelphi University. pp. 384-340.

Fidanboyu, K. & H. Efendioglu. (2009). Fiber optic sensors and their applications. 5th International Advanced Technologies Symposium. Karabuk, Turkey. 85 pp.

Herrera, D. N. (2005). Desarrollo de sensores de fibra óptica para el control in situ de parámetros físicos del medio acuático. Tesis de Doctorado, Universidad Complutense de Madrid. Pp. 141-153.

Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM). (2000). Contribuciones del Fondo para el Medio Ambiente Mundial Al Programa 21. Washington, EE.UU. <http://www.cambioclimatico.gub.uy/index.php/unidad-cambioclimatico/antecedentes?start=1>

Food and Agriculture Organization (FAO). (2005). Global Forest Resources Assessment. Roma. <http://www.fao.org/docrep/008/a0400e/a0400e00.htm>

Guevara, A. (2003). Pobreza y Medio Ambiente: reflexiones teóricas. México. Pp. 8-46.

http://www.semarnat.gob.mx/informacionambiental/Documents/pdf/indice_portada.pdf

Gupta, B.D., & Sharma, N.K. (2004). Fabrication and characterization of a fiber-optic pH sensor for the pH range 2 to 13. Fiber and integrated optics. pp.327-335.

Gupta, B.D., & Sharma, N.K. (1997). Evanescent wave absorption based fiber optic pH sensor prepared by dye doped sol-gel immobilization technique. Optics communications. pp.32-35.

Gupta, B.D., & Sharma, N.K. (1998). A long-range fiber optic pH sensor prepared by dye doped sol-gel immobilization technique. Optics communications. pp. 282-284.

Fernández, N. J. M., Duran C. (1985). Tratamiento de la superficie del vidrio. Boletín sociedad española de cerámica de vidrio. pp. 299-314.

Fraden, J. (2010). Handbook of modern sensor: physic, designs and aplicaciones. USA. Springer, pp 302.

Illich, I. (1996). Diccionario del desarrollo: Una guía del conocimiento como poder. NECESIDADES, Edit. Pratec. Perú. Pp 157-175.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2011). Definición, aplicación de la geografía y representaciones de la tierra. México. 21 pp. http://www.inegi.org.mx/inegi/spc/doc/INTERNET/1-GeografiaDeMexico/MANUAL%20DEF_APLI_GEO_REPR_TIERRA-VS__.pdf

Jiménez, C. (2005). La contaminación ambiental en México: Causas, efectos y tecnología apropiada (1ª. Edición). México. Limusa pp 33.

Jeon, D., Yoo, W. J., Seo, J. K., Shin, S., Han, K., y otros. (2013). Fiber-optic pH Sensores base don sol-gel film immobilized with neutral red. Optical review. pp. 209-213.

López, C. J., Porraz, C. T. Caracterización de películas delgadas del sol-gel dopadas con nitrato de paladio para monitorear pH e Hidrogeno. (2014). Tuxtla Gutierrez, Chiapas. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Escuela de Ingeniería Ambiental. Tesis de Licenciatura. 87 pp.

Naciones Unidas (ONU). (2011). La sostenibilidad del desarrollo a 20 años de la Cumbre para la Tierra. Avances, Brechas y Lineamientos Estratégicos Para América Latina y El Caribe. Santiago, Chile. 238 pp. <http://www.iadb.org/intal/intalcdi/PE/2011/08958.pdf>

Orellana, M. G., (2010). Monitorización de calidad de aguas y control de procesos mediante sensores químicos de fibra óptica. Tecnia 20. pp. 37-49.

Organización Panamericana de la Salud (OPS). (2005). Diagnóstico de la situación del manejo de residuos sólidos municipales en América Latina y el Caribe. Perú. 130 pp. http://disciplinas.stoa.usp.br/pluginfile.php/80818/mod_resource/content/2/Diag_Manajeo%20Resid%20Sol%20Municipales%20America%20Latina%20y%20Caribe_1997.pdf

Pérez, C., C. (2001). Sensores ópticos. España. Arts grafiques soler, S.A. pp. 130-140.

Roblero, G. J. B. Investigación de un sensor de fibra óptica para la cuantificación de corriente alterna monofásica. (2011). Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Escuela de Ingeniería Mecatrónica. Tesis de Maestría. 111 pp.

Rodríguez, G. J., % Virgos, R. M., (1998). Fundamentos de óptica ondulatoria. España. Universidad de Oviedo. pp 207.

Rovati, L., Fabbri, L. & Pilati, F. (2012). Plastic Optical fiber pH sensor using a sol-gel sensing matrix. Fiber optic sensores, pp. 415-438

Ruiz, A., Díaz, A., & Reyes, E. (2009). Espectrofotometría: Espectros de absorción y cuantificación colorimétrica de biomoléculas. Obtenido de <http://www.slideshare.net/asaor/espectrofotometria-presentati>.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2011). Impacto humano en el medio ambiente Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales, SEMARNAT. México.

Tanaka, N. Y., & NTakeda. (2003). Temperature-compensated strain measurement using fiber Bragg grating sensors embedded in composite laminates. Smart materials & structures 12.6: pp. 940-946.

Trick, R. (2002). Optoelectronics and fiber optic technology. Edit. Newnes. New York, U.S.A. 320 pp.

Torres, Z., V. (2007). Desarrollo de películas delgadas sol-gel híbridas con efectos de optica no lineal. UNAM. Facultad de Ingenierías. México. pp. 20-43.

Vázquez, S. (2009). Construcción y caracterización de un sensor de fibra óptica con rejillas de Bragg para aplicación en la medición de consumo de energía eléctrica. Congreso de instrumentación SOMI XXIV. Mérida, Yucatán.

Woerdeman, D., L. & Parmas, R., S. (2001). Model of a fiber-optic evanescent-wave fluorescence sensor. Appl Spectrosc. pp.331-337.

Yabre, G. (2000). Theoretical investigation on the dispersion of graded-index polymer optical fibers. Journal of lightwave technology. pp. 869-877.

Yappert, M. (1996). A Tutorial on Fiber-Optic Chemical Sensors. Department of

Chemistry University of Louisville. New York, U.S.A. 367 pp.

Yari, A., & Dinarvand, M. (2011). Sol-gel film doped with bromopyrogallol red as a highly sensitive sensing element for a new pH sensor. *Journal of the Iranian chemical society*, VIII (4). pp. 1091-1097.

Yu, F. T. & Yin, S. (2002). *Fibers optics sensores*. CRC Press. USA.

Zhao, Y. & Ansari, F. (2001). Quasi-distributed fiber-optic strain sensor: príncipe and experiment. *Appl. Opt.* pp. 3176-3181.

Luffiego; M. y V. Rabadan. (2000). *Enseñanza de las Ciencias, la evolución del concepto de sostenibilidad y su introducción en la enseñanza*, Santander, pp. 473-486.

Sachs, W. (1996). *Diccionario del desarrollo. Una guía del conocimiento como poder*. Edit. Pratec. Perú. 399 pp.

Pérez, V. C. A. *Evaluación mediante técnicas electroquímicas del comportamiento de recubrimientos alquídicos utilizados en la protección anticorrosiva del acero*. (2011). Quito. Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria. Tesis de Licenciatura. 196 pp.

Esteva, G. (1996). *Diccionario del desarrollo; Una guía del conocimiento como poder*. Desarrollo. Edit. Pratec. Perú. 52-78 pp.

Centro Latinoamericano y Caribeño de Demografía (CELADE). (2005). *División de Población Proyecto Regional de Población. Dinámica Demográfica y Desarrollo en América Latina y El Caribe*. Santiago de Chile. 330 pp. <http://www.facso.uchile.cl/observa/dinamica%20demografica.pdf>

Fondo de Población de Las Naciones Unidas (UNFPA). (2011). *Estado de la Población Mundial*. Santiago De Chile. http://www.unfpa.org.mx/pyd_ispd.php

