

E.T.S. de Ingeniería Industrial, Informática y de
Telecomunicación

Monitorización de señales eléctricas con fibra óptica recubierta con ITO



Trabajo Fin de Grado

Autora: Kontxi Isabel Aginaga Etxamendi
Director: Abián Benter Socorro Leránoz
Pamplona, 10 de junio de 2019

Agradecimientos

Primeramente, quiero agradecer a toda mi familia por ayudarme y tener paciencia conmigo a lo largo de estos años de carrera, sobre todo en los periodos de exámenes. Ya que para cualquier cosa siempre estaban dispuestos a ayudar.

Por otra parte a los amigos ya que el estar con ellos me permitía desconectar de los estudios y pasar buenos momentos.

En lo que respecta a todo este proceso de la realización del proyecto especialmente me gustaría agradecer a mi tutor Abián, y a Omar por haberme dirigido aconsejado y ayudado a lo largo de la realización de este proyecto. También agradecer a todos los del laboratorio de sensores, ya que para cualquier duda estaban dispuestos a echar una mano.

Laburpena

Gradu bukaerako lan honen helburu orokorra zuntz optikozko sentsorearen bidez tentsio aldaketak ikusteko gaitasuna aztertzea da.

Horretarako, eremu elektrikoak detektatzeko aukera ematen duen material erdieroale baten bilaketa egin da.

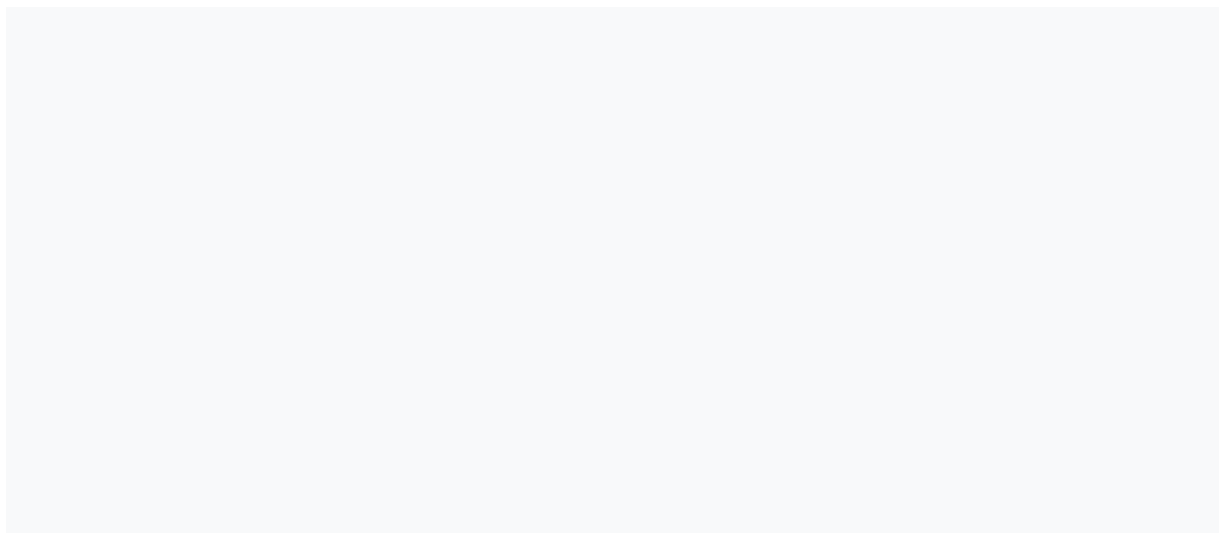
Helburu horretarako, gai honen inguruan artikulu anitz irakurri dira, hauetan oinarriturik sentsorearen egitura erdiesteko.

Horren egitura behin finkatuta, lodiera desberdinetako geruzak ezarriz sentsorean erantzuna aztertu egin da.

Lehenik eta behin, sentsore bakoitza inguru desberdinetan nola erantzuten duen ikertu da.

Ondoren, sentsore hauekin eremu elektrikoarekiko daukaten erantzuna aztertu da. Hemen, seinale tentsio zuzen eta alternoaren bidez sortutako eremu elektrikoak arakatu dira. Seinale hauei frekuentzia anplitudea eta duty cycle parametroak aldatuz.

Azkenik erantzunak aztertzeko datuak algoritmo bitartez prozesatu dira, gainera erantzun bakoitzaren bideoak egin dira



Hitz esanguratsuak

Sentsoreak, zuntz optikoa, tentsio zuzen / alternoa eta material nanoestruturatuak

Abstract

The general objective of this Final Year Project is the study of the detection of variable voltages by fiber optic sensors.

For this, the search for a semiconductor material that gives the possibility to fiber to detect electric fields has been carried out.

To this end, several articles have been read on the subject and based on them to obtain the structure of the sensor.

Once its structure has been defined, it has been analyzed by means of different thicknesses of deposition on it.

First, a study of the displacement of each sensor in different media has been made.

Then, with these sensors the response has been detected by applying an electric field to the sensor.

Electrical fields generated by continuous and alternate signals have been studied. In which the parameters of amplitude, frequency and duty cycle have been varied.

The data has been processed using algorithms and videos of each result have been obtained.

Keywords

Sensors, optical fiber, continuous-variable voltage and Nanostructured materials

Resumen

El objetivo general de este Proyecto de Fin de Carrera es el estudio de la detección de tensiones variables mediante sensores de fibra óptica.

Para ello, se ha realizado la búsqueda de un material semiconductor que diera la posibilidad a la fibra para detectar campos eléctricos.

A tal efecto se han leído varios artículos referentes al tema y se ha basado en ellos para obtener la estructura del sensor.

Una vez definida su estructura, se ha procedido a analizarla mediante diferentes grosores de deposición sobre ella.

Primero se ha hecho un estudio del desplazamiento de cada sensor en diferentes medios.

Después, con estos sensores se ha detectado la respuesta mediante la aplicación de un campo eléctrico al sensor.

Se han estudiado campos eléctricos generados por señales continuas y alternas. En las cuales se les ha variado los parámetros de amplitud, frecuencia y duty cycle.

Se han procesado los datos mediante algoritmos y se han obtenido videos de cada resultado.

Palabras Clave

Sensores, Fibra óptica, Tensión continua-variable y Materiales nanoestructurados

ÍNDICE CONTENIDO

CAPÍTULO 1. MOTIVACIÓN Y ANTECEDENTES	1
1.1 Introducción y estado del arte	1
1.1.1 Sensores de fibra óptica	1
1.2 Fundamentos teóricos	2
1.2.1 Resonancias LMR	2
1.2.2 Sensibilidad de la fibra frente a interferencias de campos electromagnéticos	3
CAPÍTULO 2. OBJETIVOS	4
CAPÍTULO 3. MATERIALES E INSTRUMENTACIÓN.....	5
3.1 Fibras utilizadas y principales características.....	5
3.2 Fusión de fibras	6
3.3 Instrumentación	6
Equipo de sputtering	6
Fuentes de Luz.....	7
Espectrómetros	8
Cortadoras de fibra.....	9
Fusionadora de fibra.....	10
Equipos de instrumentación y medición	11
Material adicional.....	13
Máquina de Plasma	15
Robot 3D	16
CAPÍTULO 4. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS.....	17
4.1 Introducción	17
4.2 Descripción de la configuración óptica sensora	18
4.2.1 Sensor óptico y deposición de la capa de ITO	19
4.2.2 Obtención del grosor de la capa de ITO	19
4.2.3 Configuración óptica detectora y procesamiento de datos	19
4.2.4 Obtención de las medidas de índice de refracción.....	20
4.2.4 Introducción de tensiones DC o AC en la configuración óptica.....	20
4.2.5 Pruebas realizadas en tensión AC, DC en aire, agua y disolución.....	21
4.3. Resultados.....	21
4.3.1. Obtención de los LMRs.....	21
4.3.2. Comportamiento de los LMRs con el cambio de índice de refracción	26
4.3.3 Comportamiento en tensión DC.....	29
4.3.4 Comportamiento en tensión AC	35

4.3.5 Aproximación Bio.....	38
4.3.6 Razonamiento de los resultados obtenidos	39
4.3.6 Consideraciones finales.....	41
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS.....	42
5.1 Conclusiones	42
5.2 Líneas futuras	42
CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA	44

Índice de Figuras

<i>Figura 1. Esquema de una fibra óptica desnuda recubierta con un material generador de LMRs y obtención del correspondiente espectro de salida.</i>	<i>2</i>
<i>Figura 2. Esquema de una fibra óptica desnuda recubierta con un material generador de LMRs y obtención del correspondiente espectro de salida.</i>	<i>5</i>
<i>Figura 3. Equipo de deposición del material. a) Sputter K675XD de Quorum b) Cámara de vacío del Sputter</i>	<i>7</i>
<i>Figura 4. Fuentes de luz. a) ASBN-W-150-H SpectralProducts b)DH-2000 Deuterium-Halogen Light Source c) Light Source AQ4303B ANDO</i>	<i>8</i>
<i>Figura 5. Espectrómetros a) USB2000 FLG b) HR4000 c) USB2000+XR1</i>	<i>9</i>
<i>Figura 6. Cortadoras de fibra. a) S325 de Fitel b) PMA-400 de Vytran c) FC-6S.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 7. Fusionadora FurukawaFitel S178A</i>	<i>10</i>
<i>Figura 8. Polímetro</i>	<i>11</i>
<i>Figura 9. Osciloscopio ektronixTDS2022C</i>	<i>11</i>
<i>Figura 10. Fuente DC Power Supply FAC-662B.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 11. Generador AGILENT Modelo: 33210A</i>	<i>13</i>
<i>Figura 12. Targets Quorum</i>	<i>13</i>
<i>Figura 13. Pegamento CW2400</i>	<i>14</i>
<i>Figura 14. Ultrasonic LC 30 H.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 15. Maquina agua ultrapura.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 16. Plasma ACE 1</i>	<i>16</i>
<i>Figura 17. Robot 3D</i>	<i>16</i>
<i>Figura 18. Configuración óptica sensora. a) Montaje de Monitorización b) Set-up Sensor c) Estructura Sensor.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 19. Montaje índices de glicerina</i>	<i>20</i>
<i>Figura 20. 1º LMR centrado en 700nm.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 21. a) 2º LMR centrado en 600nm b) 3º LMR centrado en 500nm</i>	<i>22</i>
<i>Figura 22. Espectro 4º,5º y 6º LMR centrados en 819nm, 600nm y 480nm</i>	<i>23</i>
<i>Figura 23. Mapa de evolución de la deposición hasta el 4º LMR con paradas en la deposición. 23</i>	
<i>Figura 24. 2º LMR en distintas concentraciones de glicerina</i>	<i>26</i>
<i>Figura 25. 3º LMR en distintas concentraciones de glicerina</i>	<i>27</i>
<i>Figura 26. 4º,5º y 6º LMR en distintas concentraciones de glicerina</i>	<i>27</i>
<i>Figura 27. Comparación entre desplazamientos en glicerina de los LMRs. a) Comparación 2º y 3º LMR b) Comparación entre 4º,5º y 6º LMR.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 28. Tensión DC aire Sensor (4º,5º,6º LMR).....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 29. Tensión DC aire 2º y 3º LMR.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 30. 2º LMR en tensión DC. a) Espectro de desplazamiento b) Histéresis.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 31. 3º LMR en tensión DC en H2O. a) Espectro de desplazamiento b) Histéresis</i>	<i>31</i>
<i>Figura 32. Espectros desplazamiento tensión lamda en H2O a)2º LMR b) 3º LMR</i>	<i>31</i>

Figura 33. Tensión DC Sensor (4 ^o ,5 ^o y 6 ^o LMR) H2O. a) Tensiones positivas b) Tensiones negativas	32
Figura 34. Comparación de desplazamiento 4 ^o ,5 ^o y 6 ^o LMR tensión DC H2O	32
Figura 35. Histéresis H2O a) 4 ^o LMR b) 5 ^o LMR c) 6 ^o LMR	32
Figura 36. 2 ^o LMR tensión DC en disolución salina a) Espectro de desplazamiento b) Desplazamiento tensión-longitud de onda.....	33
Figura 37. 3 ^o LMR tensión DC en disolución salina a) Espectro de desplazamiento b) Desplazamiento tensión-longitud de onda.....	33
Figura 38. 4 ^o ,5 ^o y 6 ^o LMR tensión DC en disolución salina	34
Figura 39. 4 ^o ,5 ^o y 6 ^o LMR tensión DC en disolución salina	34
Figura 40. Desplazamientos con tensión AC 100mVpp 1hz a) 2 ^o LMR b) 3 ^o LMR	35
Figura 41. a) 4 ^o , 5 ^o y 6 ^o LMR 1Vpp y 500mVpp a 1hz. b) 4 ^o LMR c)5 ^o LMR d) 6 ^o LMR.....	36
Figura 42. a) 4 ^o LMR 20,50,80% Duty cycle 1Vpp 1hz b) Duty cycle 20% c) Duty cycle 50% d) Duty cycle 80%.....	37
Figura 43. 4 ^o LMR señal cuadrada Duty cycle 50% 1hz y 4hz	38
Figura 44. Reacción química en el sensor	40
Figura 45. Montaje inducción de campo eléctrico FPI	41

Índice de tablas

Tabla 1. Parámetros básicos de la fibra MMR de 200 μm de núcleo usada en el proyecto.....	5
Tabla 2. Imágenes del grosor de las fibras de los diferentes LMR y Resistencias en aire, agua y disolución salina	25
Tabla 3. Sensibilidad nm/RIU 2 ^o y 3 ^o LMR	28
Tabla 4. Sensibilidad nm/RIU 4 ^o , 5 ^o y 6 ^o LMR	29
Tabla 5. Desplazamiento en tensión negativa nm/V de cada LMR en disolución salina	34

CAPÍTULO 1. MOTIVACIÓN Y ANTECEDENTES

1.1 Introducción y estado del arte

1.1.1 Sensores de fibra óptica

Los sensores de fibra óptica son una tecnología que utiliza luz para analizar las propiedades físicas y/o químicas del medio que las rodea en aplicaciones de teledetección.

Estos sensores se clasifican en dos tipos, intrínsecos y extrínsecos. Los sensores intrínsecos utilizan la fibra óptica como elemento detector, mientras que los sensores extrínsecos utilizan estos cables para transmitir información de luz de un teledetector a un procesador electrónico.

La fibra óptica puede usarse como sensor para medir diferentes magnitudes: temperatura, torsión, presión, humedad, gases y vibraciones, entre otras.

Frente a los sensores eléctricos, estos tienen un pequeño tamaño y bajo peso, por lo que son portables. Una de las peculiaridades de la fibra óptica es que es inmune a interferencias electromagnéticas, sin embargo en este proyecto se trata de hacer que sea sensible a cambios eléctricos exteriores.

Para ello, se ha basado en los artículos que se mencionan a continuación, donde se observa que un sensor de fibra óptica depositado con un material semiconductor puede ser sensible a tensiones variables.

En el artículo [1] se consigue crear una especie de condensador sobre la fibra óptica para detectar variaciones del campo eléctrico. Se propone un filtro sintonizable de fibra óptica basado en resonancias de modo guiado con pérdida (LGMR o LMR), fenómeno que se analizará en la siguiente sección. Consiste en una estructura multicapa depositada sobre la superficie de un revestimiento de plástico que elimina la fibra multimodo. La primera capa se usa para generar el LGMR y para funcionar también como el primer electrodo; el segundo para sintonizar el filtro y la capa exterior forma el otro electrodo. Tanto el electrodo exterior como interior están compuestos por un material semiconductor denominado ITO (óxido de indio y estaño). El filtro fabricado es sensible al voltaje aplicado que muestra un cambio en la longitud de onda de LGMR. Entre otras aplicaciones, este filtro está destinado a ser utilizado como filtro o modulador de longitud de onda electro-óptica.

El siguiente artículo publicado por Smetana [2] también se basa en el fenómeno de resonancia de modo con pérdida (LMR). Se trata de una estructura donde se deposita en una longitud de 2.5cm de la fibra una capa de 950nm de ITO. En él se demuestra que la respuesta óptica del sensor depende en gran medida del potencial aplicado al sensor, así como de la modificación electroquímica de su superficie.

1.2 Fundamentos teóricos

1.2.1 Resonancias LMR

La propagación de la luz en guías de onda depositadas con determinados tipos de materiales presenta valores máximos de atenuación para algunos valores de espesor específicos del recubrimiento, así como a ciertas longitudes de onda. Esto es debido al acoplamiento entre los modos que se propagan dentro de la guía de onda y un modo con pérdida específico (“lossy mode”, en inglés) de la película delgada depositada. Estas resonancias son las llamadas Lossy Mode Resonances (LMRs), es decir, resonancias de modo con pérdida [3].

Este fenómeno puede observarse al depositar películas delgadas de materiales como óxidos semiconductores (de titanio, de indio, de estaño, ITO,...) o determinados materiales dieléctricos, como polielectrolitos (los conocidos como PAH, PAA, PSS, PDDA,...). Los LMRs se producen cuando la parte real de la permitividad de la película delgada es positiva y mayor, en magnitud, que su propia parte imaginaria y la que la parte real de la permitividad del medio que rodea a la película delgada (guía de onda y medio externo también). Esto se puede observar en la figura 1.

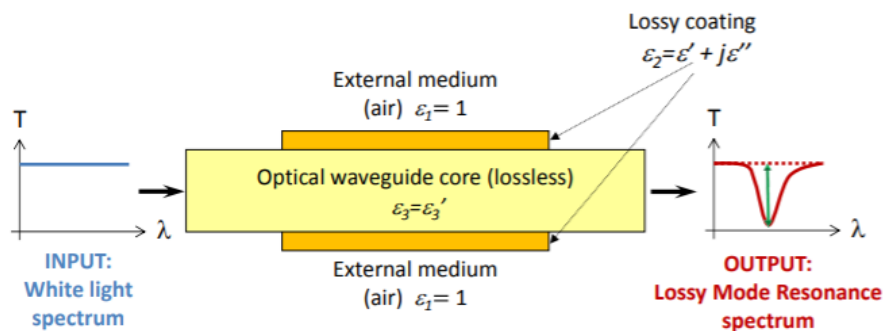


Figura 1. Esquema de una fibra óptica desnuda recubierta con un material generador de LMRs y obtención del correspondiente espectro de salida.

Además, desde el punto de vista óptico, los LMRs tienen unas peculiaridades que son interesantes de analizar:

En primer lugar, los LMRs se pueden observar para las polarizaciones TM (magnético transversal) y/o TE (eléctrico transversal) de la luz, con lo que se puede elegir entre polarizar o no polarizar la luz, en función de la aplicación deseada. En cualquier caso, evitar la utilización de un polarizador óptico simplifica enormemente la configuración experimental de los dispositivos ópticos, ya que únicamente se necesitará una fuente de luz incandescente y un espectrómetro óptico para realizar los experimentos.

Por otro lado, la posición espectral de los LMRs se puede ajustar con precisión simplemente cambiando el grosor del recubrimiento depositado sobre la guía de onda. De hecho, en lugar de tener una única resonancia óptica, pueden aparecer varias resonancias conforme se aumenta el grosor del recubrimiento. Todos estos picos se pueden usar para detección u otras aplicaciones.

Un aspecto interesante a tener en cuenta es, que cuanto menor es el orden del LMR más sensible es. Por lo tanto el primer LMR es el cual presenta mayor sensibilidad frente a cambios externos que modifican la luz que viaja a través de la fibra.

Por lo tanto, para realizar el objetivo de este proyecto se harán uso de las propiedades mencionadas anteriormente para diseñar y caracterizar sensores de fibra óptica basados en resonancias LMR. De esta manera se ajustará el grosor del recubrimiento depositado sobre la

guía de onda para ajustar la posición espectral de los LMRs, al igual que lograr un sensor con mayor sensibilidad posible.

1.2.2 Sensibilidad de la fibra frente a interferencias de campos electromagnéticos

Como se ha mencionado anteriormente, una de las ventajas de la fibra óptica es su inmunidad frente a interferencias de campos electromagnéticos de frecuencias inferiores a las que se propaga la luz por ella. Sin embargo, existe la posibilidad de hacerla sensible a dichas interferencias que se desean detectar. La posibilidad de que esto se lleve a cabo, se basa en la deposición de algún material sobre la fibra que la haga sensible a interferencias de campos electromagnéticos exteriores.

Los materiales electrocrómicos cambian de color o varían la intensidad de la luz que pasa a su través con el paso de una corriente eléctrica. Esto es debido a que la corriente induce en ellos reacciones físicas o químicas que modifican las bandas de energía en las que el material interacciona con la luz visible.

Por otro lado, existen los materiales piezoeléctricos, en los cuales ocurre que al ser sometidos a tensiones mecánicas, adquieren en su masa una polarización eléctrica provocando una diferencia de potencial y cargas eléctricas en su superficie.

El artículo [4] se basa en la propiedad de la luminiscencia para detectar campos eléctricos proximales mediante Quantum Dots. Estos pueden excitarse emitiendo fotoluminiscencia o de electroluminiscencia. En este caso, la aplicación de una tensión o corriente externa redundan en una emisión de luz en una longitud de onda o color.

Como se ha mencionado anteriormente, mediante las resonancias de la fibra óptica depositada con material semiconductor se puede detectar caídas de tensiones. Tal y como mencionan los artículos referenciados antes [1] y [2], en los cuales el material semiconductor utilizado es el óxido de indio y estaño o “indium-tin-oxide” (ITO). El ITO es un óxido metálico, eléctricamente conductor y ópticamente transparente. La conducción eléctrica viene dada por los diferentes mecanismos de dispersión que sufren los electrones debidos a la: red cristalina, impurezas ionizadas, dislocaciones, granos e impurezas neutras.

Teniendo en cuenta la conductividad del ITO y los artículos mencionados en los que se hace uso de él, el campo eléctrico hace que los electrones del ITO se vean arrastrados en el interior del material. En el caso de que este material esté depositado sobre la fibra, esta propagación de los electrones modifica la luz que viaja en la guía de onda creada, obteniendo así una variación en la longitud de onda de las resonancias generadas (LMRs).

CAPÍTULO 2. OBJETIVOS

Este proyecto de fin de carrera tiene como objetivo general desarrollar sensores de fibra óptica capaces de detectar señales variables en tensión mediante recubrimientos semiconductores como el óxido de indio y estaño (ITO).

El funcionamiento del sensor consiste en que un extremo de la fibra óptica del sensor aporta luz en el rango visible a la zona sensible de éste, mientras que el otro extremo recibe la señal después de la interacción con el campo eléctrico. El espectro de la señal de respuesta del sensor muestra si el sensor interacciona con el campo eléctrico observándolo como un desplazamiento del sensor en longitud de onda.

La estructura del sensor está basada en las publicaciones [1] y [5], donde se trata de una estructura en transmisión, en la cual una parte de la fibra ha sido depositada mediante óxido de indio y estaño.

Partiendo de este punto, se ha decantado por hacer un estudio de la monitorización del comportamiento de los diferentes sensores. Se han realizados sensores con diferente grosor del recubrimiento semiconductor. Estos han sido caracterizados desde el punto de vista de parámetros típicos de instrumentación como rango, sensibilidad, resolución, histéresis, tiempos de respuesta y otros tantos valores.

Por último observando las diferentes respuestas se ha hecho un análisis del comportamiento del sensor y se ha realizado un estudio de las razones el porqué de su comportamiento.

El objetivo final ha sido encontrar áreas o aplicaciones en los cuales bien podría interesar la detección del campo eléctrico o el desplazamiento creado a causa de él, además de esbozar líneas futuras ésta fenomenología podría tener aplicaciones en el ámbito de la fotónica y las telecomunicaciones.

CAPÍTULO 3. MATERIALES E INSTRUMENTACIÓN

3.1 Fibras utilizadas y principales características

La fibra que se ha utilizado es una fibra multimodo de diámetro 200 μm de la empresa Thorlabs. Esta fibra tiene una apertura numérica de 0.39. Presenta un diseño de doble revestimiento (Technology Enhanced Clad Silica (TECS) sobre revestimiento de sílice dopado con flúor) el cual permite mejorar el manejo de la potencia, especialmente cuando la fibra está doblada. Estas fibras son ideales para aplicaciones que incluyen espectroscopia, optogenética y diagnósticos médicos.

FT200EMT fiber specifications		
Product Code	FG200UCC	
Unit		
CoreDiameter	200 \pm 8	μm
CladdingDiameter	240 \pm 5	μm
CoatingDiameter	260 \pm 6	μm
Buffer Diameter	400 \pm 30	μm
Proof Test	≥ 100	kpsi
NA	0.22 \pm 0.02	
Max Attenuation @ 808 nm	10	dB/km

Tabla 1. Parámetros básicos de la fibra MMR de 200 μm de núcleo usada en el proyecto

Por otra parte se han utilizado latiguillos de fibra multimodo de la empresa Thorlabs. Se trata de un cordón de más de 200 metros con conectores SMA/SMA en la cual el núcleo de la fibra tiene un diámetro de 200 μm . Está protegido por varios revestimientos, los cuales se muestran en la siguiente imagen.

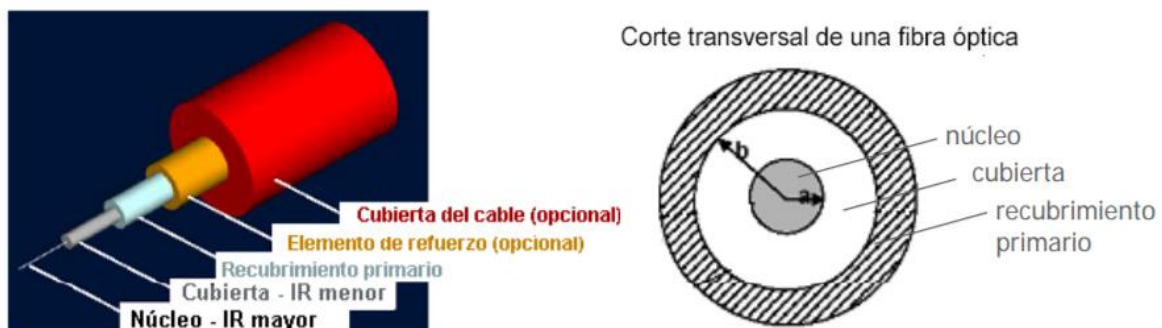


Figura 2. Esquema de una fibra óptica desnuda recubierta con un material generador de LMRs y obtención del correspondiente espectro de salida.

El núcleo está compuesto por dióxido de silicio dopado con aditivos de boro y flúor para aumentar el valor del índice de refracción, rodeado por un recubrimiento de dióxido de silicio.

3.2 Fusión de fibras

La realización de una buena fusión proporciona un buen espectro y pocas pérdidas en la transmisión del haz de luz. Para ello, primero se selecciona un latiguillo de fibra óptica MMF con conector SMA en ambos extremos. A continuación se corta por la mitad el cable y se le quita con el stripper a ambas fibras unos 30 cm del recubrimiento plástico exterior naranja, quedando al descubierto los hilos de aramida y la fibra óptica. Después se cortan los hilos de aramida y se le quita con mucho cuidado el recubrimiento sobre la parte exterior de la fibra óptica. Se limpia con etanol y un papel la superficie de la fibra para quitar impurezas. Se corta con la cortadora automática PMA-400 de Vytran la punta de las fibras para que tengan un corte de 90°.

Para preparar la parte de la fibra donde se deposita se corta un trozo de fibra MMF de 200µm del carrete de Thorlabs y con el stripper se le quita la parte exterior. Se limpia con etanol y un papel la superficie de la fibra para quitar impurezas. A continuación se corta a 90° con la cortadora de fibras ambas puntas dándole una longitud de 3-4 cm. Por último una vez que las fibras están preparadas, nos disponemos a fusionarlas para crear nuestra estructura tratando que las pérdidas al fusionarlas sean de 0 dBs.

3.3 Instrumentación

Equipo de sputtering

El Sputter utilizado en este proyecto es el modelo K675XD de Quorum Technologies Ltd mostrado en la figura 3.

Se trata de un sistema de doble magnetrón que hace aumentar la eficiencia del proceso a bajas tensiones, consiguiendo granulados finos y pulverizaciones frescas.

Cuenta con una cámara de vacío donde se producirá el soplado de Argón (fijado a una presión nominal de 0,7 bares) para la generación del plasma necesario para la deposición.

Por otra parte, una bomba turbo-molecular respaldada por una bomba de vacío rotativa se encarga de aumentar o disminuir la presión de vacío, a través de un micrométrico situado en la parte posterior de la misma, soplar gas y de extraer el oxígeno respectivamente, y que es controlada automáticamente por el instrumento.

Está equipado con dos obturadores o shutter móviles que permiten la limpieza por pulverización catódica o sputter, previa a la deposición, si se ha seleccionado un ciclo oxidante, que permiten una deposición secuencial sin romper el vacío de dos metales distintos.

Los obturadores se moverán a la posición de los targets para llevar a cabo el proceso de limpieza, una vez finalizado éste volverán a su posición inicial, tras lo cual comenzará el ciclo de deposición.

El doble sistema de obturadores facilita la limpieza de los targets por pulverización catódica y previene la contaminación cruzada de los targets cuando se trabaja con deposiciones secuenciales de distintos metales.

Tiene un plato giratorio porta-muestras que gira a una velocidad constante durante la deposición, calibrado respecto a la posición de los targets para conseguir deposiciones uniformes.

Puede utilizarse con metales nobles como el Oro o con metales que necesiten una limpieza previa por oxidación antes de ser depositados como el Cromo.

Está equipado con dos soporta targets de 54 mm de diámetro de fácil manipulación que permiten un cambio rápido de los mismos.

Tiene un panel frontal provisto con un display, por el cual se pueden seleccionar los diferentes parámetros previos a la deposición, de fácil manejo.

Cuenta con un sensor de espesor o Film Thickness Monitor (FTM) más conocido como cristal FTM que permite a través del display seleccionar dos modos de operación: Automático (la deposición se parará cuando el sensor FTM detecte que se ha alcanzado el espesor previamente seleccionado en el display) o Manual (la deposición finalizará cuando finalice el tiempo establecido por el usuario).

a)



b)

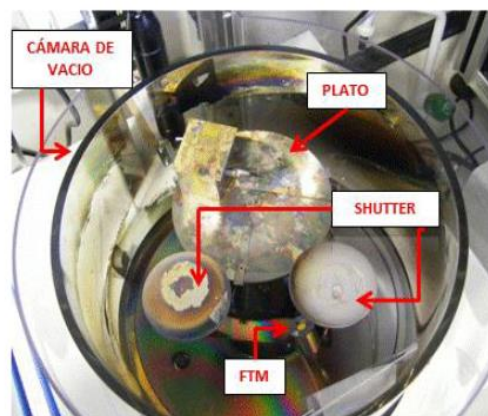


Figura 3. Equipo de deposición del material. a) Sputter K675XD de Quorum b) Cámara de vacío del Sputter

Fuentes de Luz

Estas fuentes proporcionan luz en el rango del espectro requerido. En este caso visible o infrarrojo cercano, de 380 a 1100 nm. Mediante dichas fuentes conectandolas al sensor se obtendrá la modificación de la luz a causa de la deposición aplicada a la fibra, bien en transmitancia, intensidad o absorbancia.

- **ASBN-W-150-H de SpectralProducts**

La fuente de luz ASBN-W-150-H está basada en Tungsteno-Halógeno (TH) de 100W. Esta fuente es utilizada generalmente para aplicaciones espectroscópicas del rango visible e infrarrojo cercano (300 a 2600 nm).

Para la estructura del sensor fabricada esta fuente de luz de SpectralProducts es la más adecuada, ya que proporciona gran potencia de luz y su interfaz de conexión con la fibra es de tipo SMA al igual que el latiguillo del sensor. De esta manera se evita conectores y latiguillos de fibra que provoquen pérdidas.

- **DH-2000 Deuterium-Halogen Light Source**

Esta fuente esta compuesta por dos lámparas de luz. Una de ellas (el boton azul) la Deuterino proporciona luz en el rango 210–400 nm y la otra la Halogena en el rango 300–1500 nm la que interesa para este proyecto. A diferencia de la ASBN-W-150-H de SpectralProducts las potencias nominales de la bombilla son 25 W deuterio y 20W en tungsteno halógeno. Tiene un conector SMA para conectar la fibra evitando conectores y latiguillos adicionales.

- **Light Source AQ4303B ANDO**

Se trata de una fuente de luz blanca altamente estable, que emplea una lámpara halógena de alta potencia. Tiene una salida de banda ancha y alta estabilidad y cubre una banda de 400 a 1800 nm proporcionando luz tanto en el rango visible como en el infrarrojo,

El interfaz para conectar la fibra es FC por lo que al utilizar dicha fuente se tiene que utilizar un conector FC/SMA junto con un latiguillo de fibra de 200 micras para tener que conectar al sensor proporcionando pérdidas adicionales en la fibra a cambio de una fuente de mayor potencia.



Figura 4. Fuentes de luz. a) ASBN-W-150-H SpectralProducts b)DH-2000 Deuterium-Halogen Light Source c) Light Source AQ4303B ANDO

Espectrómetros

Un espectrómetro óptico, es un instrumento que sirve para medir la intensidad de la luz en una determinada porción del espectro electromagnético. Los espectrómetros utilizados en este proyecto abarcan un rango de longitudes de onda de entre 300 y 1000 nm. En este proyecto

se han utilizado para monitorizar las pruebas que se hacen con las estructuras de fibra multimodo, usando el software Spectra Suite de OceanOptics.

- **USB2000-FLG Fiber Optic Gated Spectrometer**

El espectrómetro USB2000-FLG es un espectrofluorímetro de alta sensibilidad que es preconfigurado para aplicaciones fluorescentes dentro del rango del espectro UV-NIR de 380 nm a 1050 nm con una resolución óptica de ~ 10.0 nm (FWHM). Tiene un interfaz de conector para la fibra tipo SMA.

- **HR4000 and HR4000CG-UV-NIR Series High-Resolution Fiber Optic Spectrometers HR4000 / HR4000CG-UV-NIR**

El espectrómetro HR4000 de alta resolución de OceanOptics es el espectrómetro más pequeño con más alta resolución disponible en el mercado. Responde de 200 a 1100 nm. Tiene un interfaz de conector para la fibra tipo SMA.

- **USB2000+XR1-ES UV-NIR**

Es un espectrómetro en miniatura de la marca OceanOptics. es útil para mediciones UV-NIR. Su rejilla de difracción proporciona una cobertura en el rango de 200 a 1025 nm. Con este espectrómetro se obtiene una resolución óptica de $\sim 1,7-2,1$ nm FWHM. Tiene un interfaz de conector para la fibra tipo SMA.



Figura 5. Espectrómetros a) USB2000 FLG b) HR4000 c) USB2000+XR1

Cortadoras de fibra

A lo largo del proyecto se han utilizado dos cortadoras de fibra manuales y una automática. Las cortadoras se han utilizado para obtener cortes perpendiculares a los latiguillos de fibra, que son fusionados a la fibra sobre la que se haya depositado el recubrimiento, o a las fibras utilizadas como sustrato en las deposiciones en punta. Los cortes tienen que ser perfectamente perpendiculares de lo contrario es sumamente difícil fusionar con otra fibra o provoca pérdidas de luz.

Las cortadoras utilizadas son: Cortadora manual S325 de Fitel, Cortadora automática PMA-400 de Vytran y Cortador FC-6S.



Figura 6. Cortadoras de fibra. a) S325 de Fitel b) PMA-400 de Vytran c) FC-6S

Fusionadora de fibra

En este proyecto tanto para realizar la estructura del sensor como para hacer pruebas se ha hecho uso de una fusionadora bien para empalmar fibra como para verificar si los cortes de la fibra son de 90°.

La fusionadora FurukawaFitel S178A sirve para fusionar cualquier tipo de fibra:

- SM (ITU-T G.652)
- MM (ITU-T G.651)
- DS (ITU-T G.653)
- NZDS (ITU-T G.655)
- BIF/UBIF (ITU-T G.657b)

El rango del diámetro de cladding para el que sirve es de 80 ~150 μm y el de coating de 100~1,000 μm , por lo que es válido para el tipo de fibra con el que se trabaja.



Figura 7. Fusionadora FurukawaFitel S178A

Equipos de instrumentación y medición

Debido a que el objetivo del proyecto es ver qué cambios produce en la luz de la fibra el campo eléctrico se han hecho uso de algunos instrumentos que miden parámetros eléctricos.

Polímetro

Mediante el polímetro se ha podido obtener tanto la resistencia en la zona depositada de la fibra como la corriente que circula en el circuito realizado con el sensor.



Figura 8. Polímetro

Osciloscopio

El osciloscopio que se ha utilizado es TektronixTDS2022C 200 MHz, 2 CH, 2 GS/s. Mediante este instrumento se ha verificado cuál era la señal generada en la disolución mediante el generador de funciones. Por otra parte para obtener la señal tiene un terminal coaxial con dos sondas en la extremidad.



Figura 9. Osciloscopio ektronixTDS2022C

Fuentes de tensión-corriente

En este proyecto se han utilizado los dos tipos de fuente. Una fuente de tensión continua que proporciona altas caídas de tensión y un generador de funciones en la cual se puede optar por el tipo de señal que se desee.

- **POWER SUPPLY FAC-662B promax**

Las dos salidas principales (S1 y S2) de la fuente pueden utilizarse como dos fuentes independientes, o conectarse en serie, en paralelo o como fuente doble simétrica (tracking), simplemente accionando el pulsador apropiado del panel frontal.

Cada una de las salidas principales puede actuar como fuente de tensión, con salida ajustable de forma continua entre 0 y 30 V, por medio de dos controles, grueso y fino para mejorar la resolución. O como fuente de corriente, con salida ajustable de forma continua, entre 0 y 1A.

En nuestro caso se ha utilizado como fuente de tensión con salida ajustable para poder obtener a la salida una tensión de 30V en las pruebas iniciales.

Para llevar la señal hasta el sensor se han utilizado los cables cables con extremos de cocodrilo.



Figura 10. Fuente DC Power Supply FAC-662B

- **Generador de funciones Marca: AGILENT Modelo:33210A**

El generador de funciones da opción de generar distintos tipos de onda modificados por el usuario. Crea ondas sinusoidales con baja distorsión, estables y precisas, así como ondas cuadradas con rápidos tiempos de subida y bajada de hasta 10 MHz y ondas de rampa lineal de hasta 100 kHz. En el caso de las formas de onda definidas por el usuario, la opción 002 incorpora generación de formas de onda arbitrarias de 14 bits, 50Mmu/s y 8000 puntos.

Para obtener la señal de salida del generador se ha utilizado un cable coaxial con dos terminales de cocodrilo. Uno para llevar la señal y el otro con contacto a la tierra del generador.



Figura 11. Generador AGILENT Modelo: 33210A

En este proyecto se ha utilizado para generar ondas sinusoidales y cuadradas de diferente amplitud frecuencia y duty cycle.

Material adicional

Targets

Para la deposición de los materiales en la fibra se han utilizado Targets Quorum de óxido de estaño, ITO y Oro.



Figura 12. Targets Quorum

Placas de Zinc

Para introducir el campo eléctrico en el sensor se ha hecho uso de unas placas de zinc de dimensiones 1cm x 4cm. De esta manera en ellas se han conectado las sondas del generador de funciones y de la fuente continua.

Pegamento conductivo

Para obtener la conductividad desde el sensor y las placas de zinc se ha utilizado el pegamento conductivo CW2400 CircuitWorks Conductive Epoxy. Este pegamento de plata consta de dos partes A y B las cuales se mezclan durante 2 minutos y se dejan secar 8 minutos

antes de utilizarlas. Una vez puesto se deja secar dependiendo de la temperatura al que esta expuesto. En nuestro caso un minimo de 8 horas a temperatura ambiente.



Figura 13. Pegamento CW2400

Ultrasonidos

A lo largo de este trabajo se ha utilizado la máquina de ultrasonidos: LC 30 H de ElmaUltrasonic. Mediante este equipo se realizan baños en agua ultrapura y detergente correspondientes al tratamiento de la fibra óptica previo a la deposición.



Figura 14. Ultrasonic LC 30 H

Máquina de agua ultrapura

La máquina de marca NANO Pure Diamond Analytical Water Purification System D11901 de Barnstad realiza un tratamiento al agua a través de varios filtros de diversos tipos para eliminar del agua que llega al laboratorio sustancias o partículas no deseadas que puedan interferir en los experimentos.

Proporciona el agua destilada y desionizada que se usa para preparar las distintas disoluciones. El agua que suministra tiene una resistividad entre 17,8 y 18.2 $\Omega \cdot \text{cm}$.



Figura 15. Maquina agua ultrapura

Agitadores

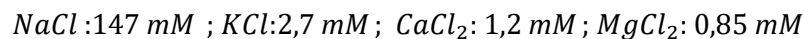
Los agitadores como su propio nombre indica, se utilizan para agitar disoluciones, fundamentalmente en su preparación. Estos instrumentos requieren de la presencia de un imán dentro de la disolución, ya que están basados en la atracción magnética del imán que contiene en la base porta muestras y que girará a la velocidad indicada por el usuario, y el imán que está dentro de la disolución, que ejercerá como agitador. El agitador que se ha utilizado en la realización de este trabajo es

Glicerina

Para preparar los diferentes índices de refracción se ha hecho uso de la glicerina. El propan 1,2,3-triol, glicerol o glicerina (C₃H₈O₃) es un alcohol con tres grupos hidroxilos (-OH). Este compuesto en temperatura ambiente esta fase liquida con un índice de refracción de $n = 1,473$ para un 100% de pureza. Mediante la variación del porcentaje de glicerina en disolución acuosa, se ha conseguido obtener disoluciones con índices de refracción variables. Esto ha permitido la caracterización de los sensores ante el cambio de índice de refracción externo.

Disolución de sales

Para la preparación de la disolución de sales que simula el líquido cefalorraquídeo se han utilizado las siguientes sales en sus respectivas concentraciones:



Máquina de Plasma

El equipo Plasma ACE 1 de Gala Instrumente elimina posibles sustancias orgánicas que pudieran haberse adherido a sustratos como portas y obleas de silicio así como para cargar dicho sustrato cuando la técnica de deposición es LbL. En él se puede regular el tiempo que dura el ataque, la potencia del mismo y la presión a la que se realiza.



Figura 16. Plasma ACE 1

Robot 3D

El Robot 3D se ha utilizado en modo automático para obtener los distintos espectros del sensor en distintas concentraciones de glicerina. Ha sido utilizado junto a la fuente negra y el espectrómetro usb2000+XR1-ES para poder obtener los datos a través del SpectraSuite.

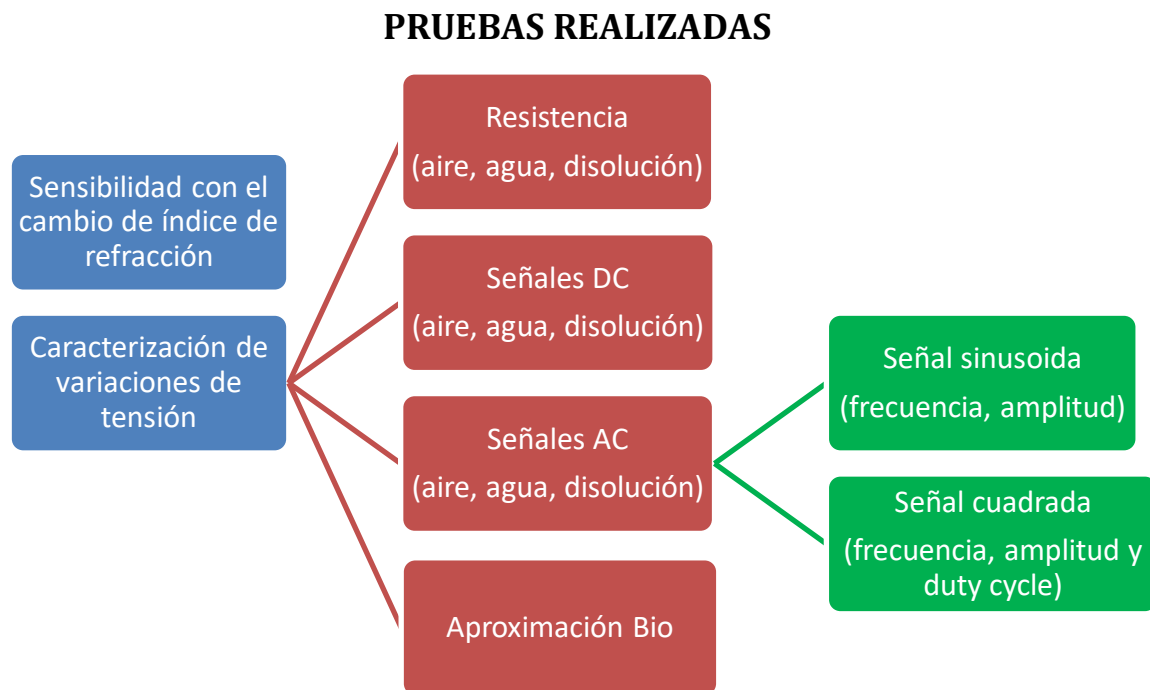


Figura 17. Robot 3D

CAPÍTULO 4. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

4.1 Introducción

Una vez que tenemos clara la estructura del sensor se analizarán los cuatro sensores diferentes según el grosor de deposición: 1ºLMR, 2ºLMR, 3ºLMR y 4º, 5º y 6º LMRs siguiendo el Esquema 1:



Esquema 1.

1. Índices de refracción: Se estudiará el desplazamiento de los LMRs causados por sumergirlos en diferentes medios de concentración de glicerina, así como su sensibilidad (nm/RIU)
2. Caracterización de variables de tensión: Los sensores serán medidos en tres medios diferentes: aire, agua ultrapura y disolución acuosa de sales.
 - 2.1 Resistencia: Se medirá mediante el polímetro las resistencias de cada sensor en cada medio.
 - 2.2 Señal DC: Se obtendrá la respuesta de los sensores en los diferentes medios variando la amplitud de una señal continua.
 - 2.3 Señal AC: Se analizará la detección de señales alternas en los tres medios:
 - 2.3.1 Sinusoidal: Se analizará la respuesta de una señal sinusoidal variando la amplitud y frecuencia de ella.
 - 2.3.2 Cuadrada: En este caso también se analizará la respuesta generando señales cuadradas de diferente frecuencia, amplitud y duty cycle.

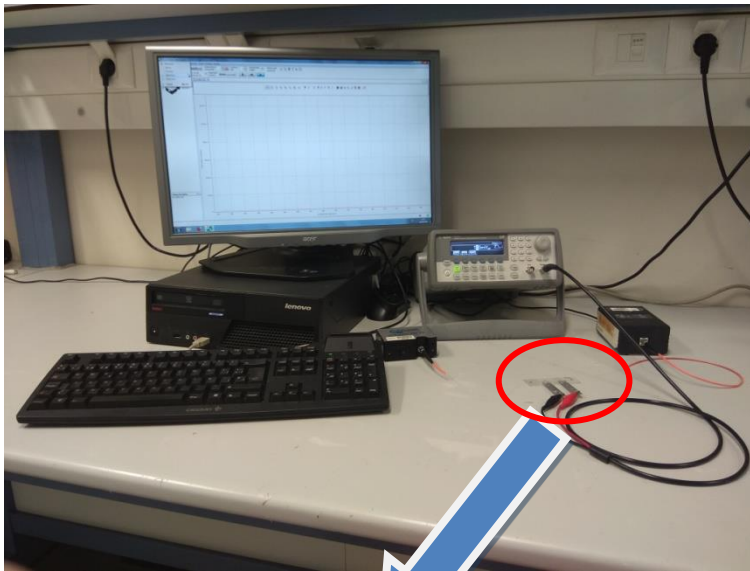
2.4 Aproximación Bio: Por último, se intentará detectar mediante el sensor con más grosor de deposición una señal que imita la señal de los impulsos neuronales.

4.2 Descripción de la configuración óptica sensora

Una vez que se tiene la estructura del sensor, se prepara la configuración, experimental con la que se realizarán las detecciones.

Conectamos la fuente DH2000 de luz blanca (AQ4303B) a un lado del sensor y el analizador de espectros ópticos (OceansOptics USB2000+XR1) al otro.

a)



b)



c) $L=2,5\text{ cm}$; $D=200\mu\text{m}$

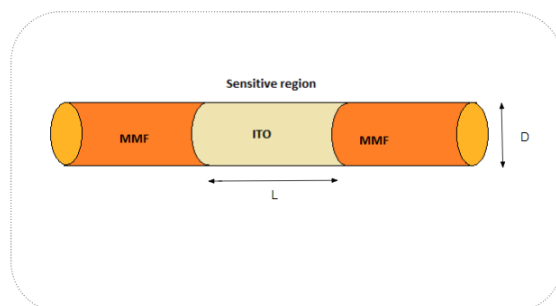


Figura 18. Configuración óptica sensora. a) Montaje de Monitorización b) Set-up Sensor c) Estructura Sensor

4.2.1 Sensor óptico y deposición de la capa de ITO

El sensor óptico diseñado para la detección de tensión es una fibra óptica multimodo de 200 micras en la cual en el centro se le ha quitado 2.5 cm del revestimiento interior de la fibra dejando únicamente el núcleo en el cual se depositara tal y como se muestra en la figura 18.

Antes de depositar se prepara la fibra fusionando ambos extremos con latiguillos, quitando el revestimiento en el tramo requerido.

Una vez obtenida la estructura anterior, se inserta en la máquina de Sputtering para depositar ITO en la región que no tiene cladding. Los parámetros de deposición se han introducido teniendo en cuenta que el objetivo es que la capa de ITO tenga una resistencia mínima. Por lo tanto la corriente de deposición se ha ajustado a 140mA y la presión de deposición a $5\text{-}6\cdot 10^{-2}$ mbar. De esta manera la deposición es más lenta creando una capa más homogénea sobre la fibra. Los diferentes sensores se han insertado distintos tiempos de deposición con el objetivo de obtener sensores de distintos grosores de deposición de ITO.

4.2.2 Obtención del grosor de la capa de ITO

En esta parte se ha realizado el proceso para poder encontrar el grosor de la capa de ITO de los distintos sensores utilizados a lo largo del proyecto.

Para ello se han preparado cuatro fibras en las cuales se ha depositado el material semiconductor en distintos tiempos para obtener los LMRs desde el primero hasta el sexto:

- 1º LMR: con un tiempo de deposición de entre 1min y 2 min monitorizándolo para obtenerlo centrado en el rango visible en 650nm.
- 2º LMR: con un tiempo de deposición de unos 4 minutos monitorizando para obtenerlo centrado en 550-600nm.
- 3º LMR: con tiempo de deposición de aproximadamente 6min para centrarlo en 550nm.
- Una sola fibra en la cual se han depositado unos 13-14 min para obtener en el rango visible el 4º, 5º y 6º LMRs. Como en este caso, ver 3 LMRs supone que no todos estén centrados en la misma longitud de onda, se trató de que, al menos, pudieran estar visibles los tres, para caracterizar cada uno en su rango y establecer las posibles diferencias existentes.

Una vez obtenidas las cuatro fibras se han cortado por la mitad la parte depositada para poder obtener las fotos del grosor de cada una mediante el microscopio SEM.

4.2.3 Configuración óptica detectora y procesamiento de datos

Para la obtención de los datos del comportamiento del sensor se ha hecho uso de Matlab y Excel. Los espectros obtenidos mediante el programa SpectraSuite se han guardado en ficheros con extensión “.txt” los cuales han sido procesados mediante los algoritmos de Matlab.

Para obtener la longitud de onda del punto mínimo del LMR, se ha utilizado un algoritmo basado en mínimos cuadrados, que calcula la parábola que mejor se ajusta a cada LMR, ajustando previamente las ventanas en las cuales aparecen. De esta manera se han obtenido tanto los desplazamientos en longitud de onda en las diferentes concentraciones de glicerina como los desplazamientos debidos a las variaciones de tensión.

Una vez obtenidos estos gráficos se han realizado las gráficas longitud de onda - transmitancia y tensión - longitud de onda en Excel.

4.2.4 Obtención de las medidas de índice de refracción.

Para la obtención de las medidas de índice de refracción se ha utilizado el Robot 3D. Para ello se ha realizado el montaje que aparece en la figura 19.

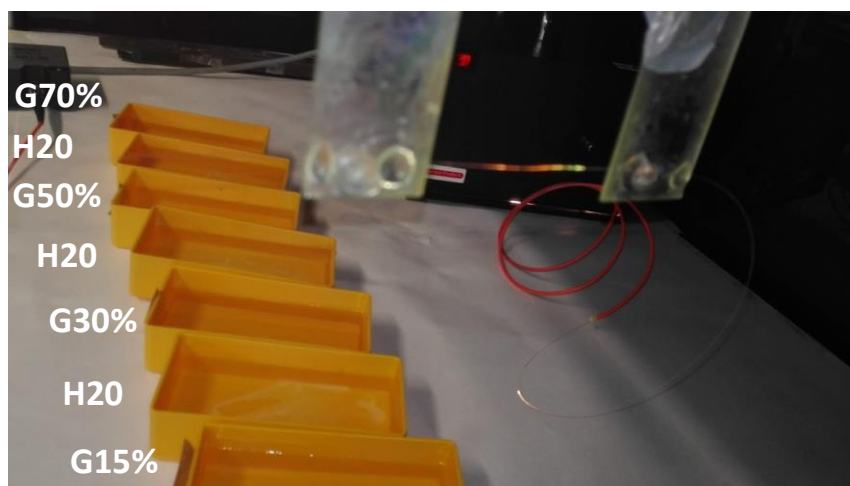


Figura 19. Montaje índices de glicerina

Los recipientes amarillos contienen las diferentes concentraciones de glicerina colocadas de orden de menor concentración de glicerina 15% hasta mayor concentración 70% intercalando recipientes de agua destilada para limpiar la fibra entre la transición de los diferentes medios de glicerina.

Por lo tanto, se ha realizado el montaje anterior con la fuente de luz y el espectrómetro para poder observar los espectros en el programa SpectraSuite. Se ha puesto el Robot 3D en marcha, ajustando los parámetros para que el set-up del sensor se sumerja en los diferentes medios mientras los datos de los espectros son guardados, para después procesarlos en Matlab.

4.2.4 Introducción de tensiones DC o AC en la configuración óptica.

Para introducir las señales eléctricas en el sensor se ha realizado el montaje de la figura 18.

En un porta se ha pegado la parte sensora de la fibra mientras que en paralelo en el mismo porta se han pegado las dos placas de zinc. Para unir los dos extremos de la parte depositada de la fibra con las dos placas de zinc, se ha hecho uso del pegamento conductivo mencionado anteriormente. De esta manera, la señal que viene a través de la salida del generador mediante el cable coaxial es conectada a los bornes de las placas de zinc mediante los cocodrilos, tal y como aparece en la figura 18.b. Por lo tanto, la señal a través de la placa de zinc llega hasta el pegamento, el cual está en contacto directo con la capa depositada de ITO. La tensión generada hace que los electrones viajen a través de la capa de ITO y llega hasta el otro extremo de la deposición el cual está conectado con la salida de la tierra del generador.

4.2.5 Pruebas realizadas en tensión AC, DC en aire, agua y disolución.

Una vez realizado el set-up para inducir las señales al sensor se han realizado las pruebas del campo eléctrico que se mencionan en el esquema 1:

1. Pruebas en tensión DC: en esta parte se ha analizado el sensor en aire y sumergido en agua y en la disolución mientras que se le inducía a través de una fuente continua tensiones negativas y positivas.
 - 1.1 Se han cogido los datos variando la amplitud de 0V a tensiones positivas y de 0V a tensiones negativas.
 - 1.2 Se ha analizado la histéresis en los tres medios aumentando la magnitud partiendo de 0V en diferentes valores y una vez obtenido el valor máximo disminuyéndolo pasando por los mismos puntos de tensión de la subida. De esta manera se ha observado si en la disminución de la amplitud (la vuelta) ha pasado por los mismos puntos que en la subida.
2. Pruebas en tensión AC: Para las pruebas de tensión alterna se han realizado las mismas para los tres medios. Mediante el generador de señales se ha generado una señal sinusoidal la cual ha sido variada en amplitud y frecuencia, y una señal cuadrada la cual se le ha variado el duty cycle, frecuencia y amplitud.
3. Por último, mediante el generador de señales se ha generado una señal de impulsos cuadrada aproximando a la señal neuronal.

4.3. Resultados

4.3.1. Obtención de los LMRs

Para obtener los distintos LMRs se ha realizado un set-up con el cual obtener los distintos LMRs seguidos posicionando todas las fibras en paralelo bajo el target para depositarlas. El set-up de las fibras se ha introducido en la máquina de sputtering para ser depositado mientras que se monitoriza. De esta manera, cada vez que se llega al tiempo de deposición de cada LMR se saca una fibra correspondiente al LMR. Se han ajustado los valores de deposición mencionados anteriormente y se han obtenido los espectros de monitorización mediante el SpectraSuite.

Primero se ha obtenido el espectro del primer LMR depositando entre uno y dos minutos (dependiendo del desgaste del Target) en el visible para intentar caracterizarlo. Sin embargo, en la figura 20 se puede ver que, en este rango, dicho LMR presenta una anchura de más de 200nm. Por otro lado, al ser muy sensible con el cambio de índice de refracción, al sumergirlo en un medio con mayor índice de refracción que el aire se desplaza hasta el rango NIR donde el LMR todavía es más ancho, aumentando la complejidad de poder analizar su evolución correctamente. En vista de ello, se ha decidido trabajar con LMRs de órdenes superiores, con la premisa de que cuanto mayor es su orden, menor ancho de banda y menor sensibilidad presentarán.

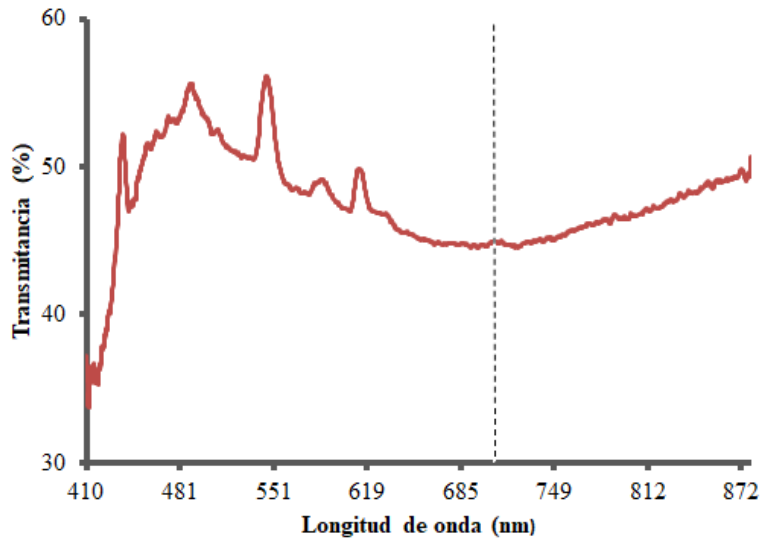


Figura 20. 1º LMR centrado en 700nm

En la figura 20 se puede ver como el primer LMR centrado en 700nm tiene una anchura de más de 200nm.

El segundo LMR se ha obtenido con un tiempo de deposición de en torno a 4 minutos centrado en torno a los 600nm, mientras que el 3º LMR a los 6 minutos centrado en 500nm.

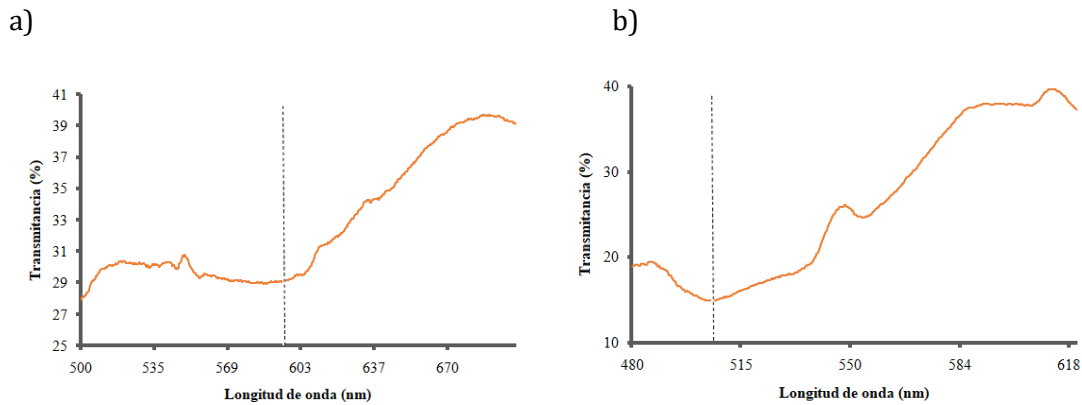


Figura 21. a) 2º LMR centrado en 600nm b) 3º LMR centrado en 500nm

Por último se ha dejado el tercer ciclo completo hasta llegar a un tiempo de deposición de unos 13-14 min donde el 4º LMR está centrado en el vacío de la máquina de Sputtering en torno a 700-750nm, teniendo en cuenta que fuera del Sputtering se desplazará unos 100nm.

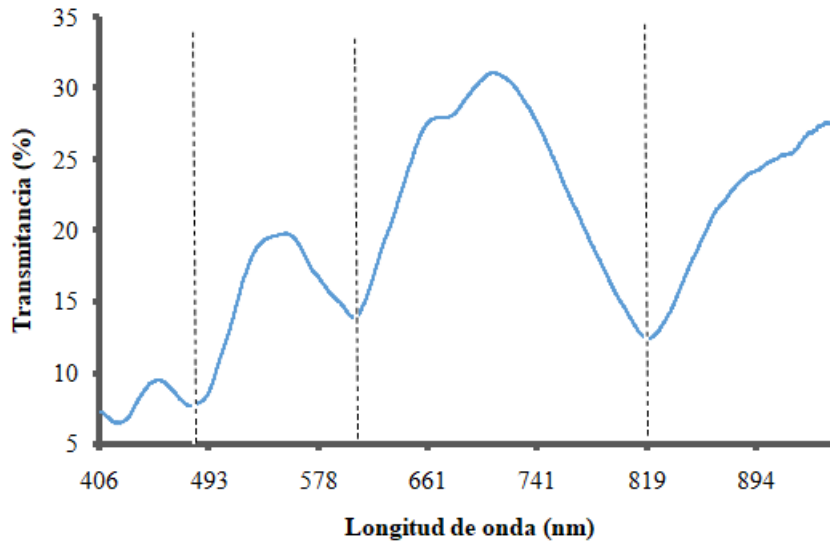


Figura 22. Espectro 4^o,5^o y 6^o LMR centrados en 819nm, 600nm y 480nm

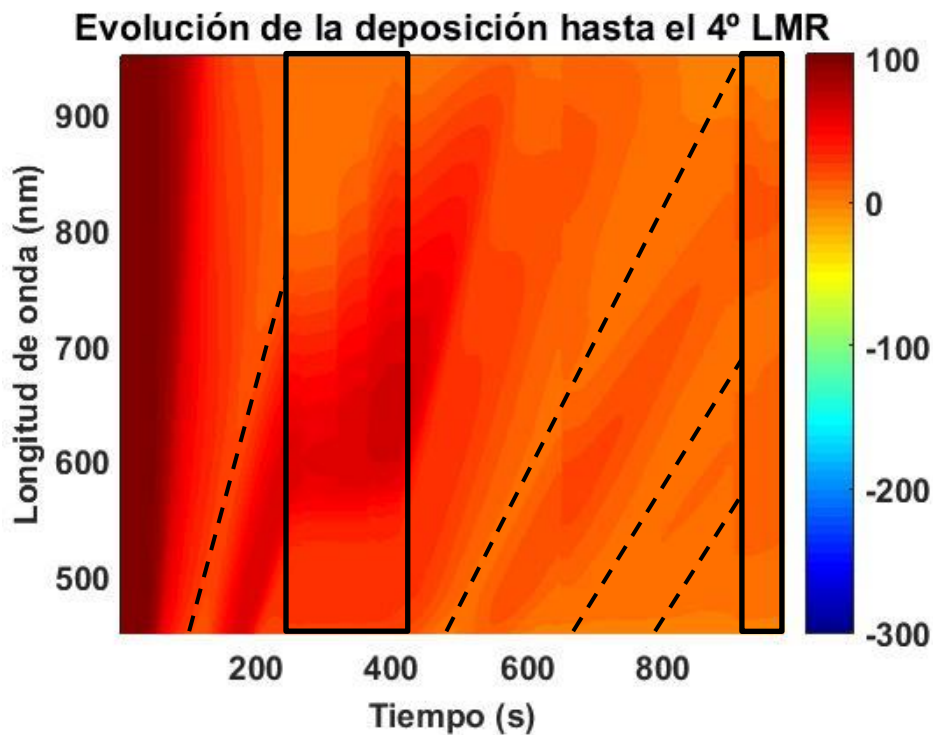
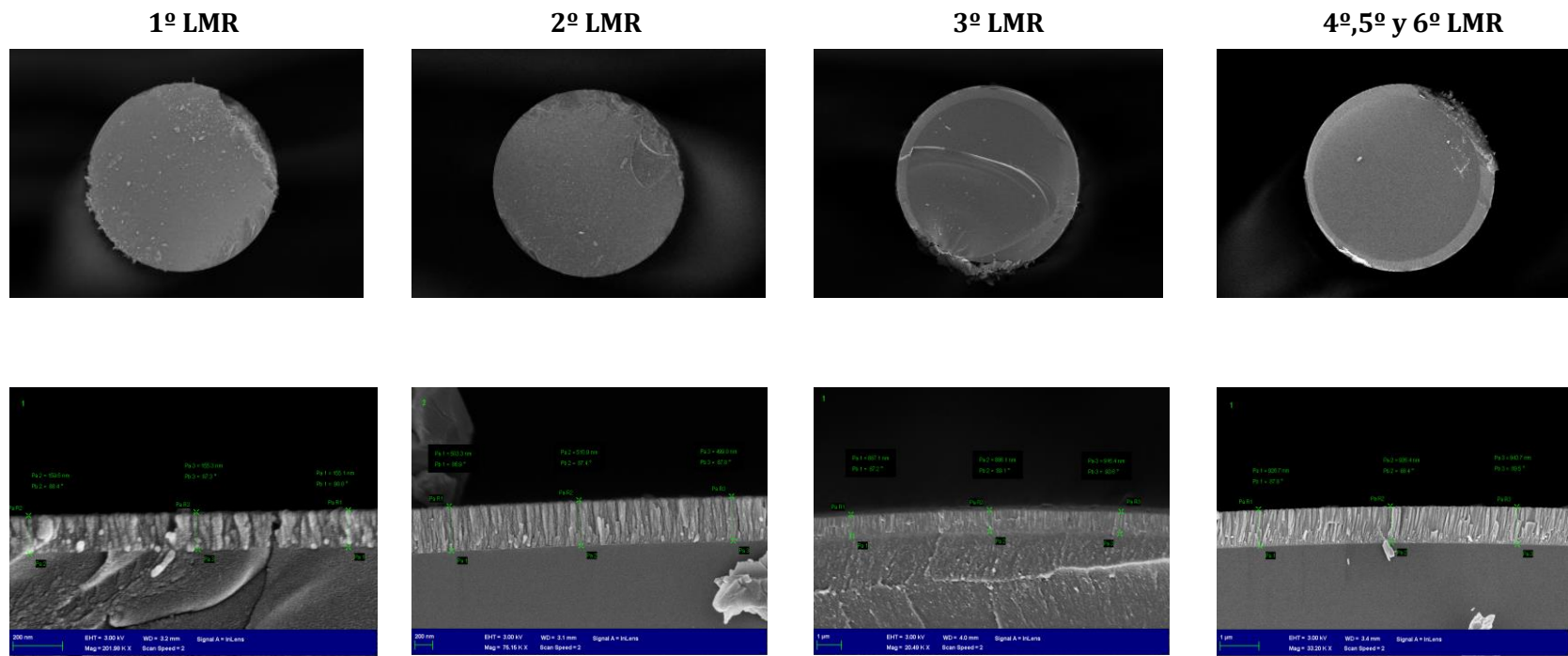


Figura 23. Mapa de evolución de la deposición hasta el 4^o LMR con paradas en la deposición.

El en Video 1 se muestra el espectro de la fibra mientras que es monitorizada a lo largo del tiempo. En él, se aprecian algunas pausas referenciadas en la figura 23 y cambios debido a que se hacen varios ciclos con la máquina de Sputtering por lo que se decide pausar la monitorización. Por otra parte, los cambios en el espectro son debido a los cambios de índice de refracción que sufre la fibra a causa de la inserción del nitrógeno y argón en el proceso de deposición.

Una vez obtenidas las fibras con los distintos órdenes de LMRs se ha decidido analizarlas con más profundidad según la relación de su grosor con la resistencia. De esta manera en la tabla 4 se muestran las imágenes obtenidas de la deposición de cada LMR junto con el cálculo de su grosor.

Para obtener la resistencia de cada fibra, se ha medido con el polímetro la resistencia entre los dos extremos de la parte depositada del sensor. De esta manera hemos obtenido los resultados de la figura 25, donde se observa que cuanto mayor es el grosor de la capa de ITO menor es la resistencia que se obtiene. Además se observa que en agua las resistencias disminuyen considerablemente respecto en el aire. Más aun en la disolución salina se obtiene la mínima resistencia pasando de $M\Omega$ a incluso Ω en el caso de mayor deposición.



Aire	$R = 1 M\Omega$	$R = 0.291 M\Omega$	$R = 37,6 K\Omega$	$R = 5 K\Omega$
Agua		$R = 11,5 K\Omega$	$R = 7,4 K\Omega$	$R = 881\Omega$
Disolución salina		$R = 7,5 K\Omega$	$R = 3,1 K\Omega$	$R = 342 \Omega$

Tabla 2. Imágenes del grosor de las fibras de los diferentes LMR y Resistencias en aire, agua y disolución salina

4.3.2. Comportamiento de los LMRs con el cambio de índice de refracción

Una vez caracterizada la aparición de los LMRs, se procede a caracterizar el comportamiento de los mismos ante el cambio de índice de refracción.

En concordancia a lo dicho, el primer LMR es el más sensible a cambios en el medio externo. Conforme van apareciendo el resto de resonancias, se va perdiendo en sensibilidad. Asimismo, también se sabe que conforme una resonancia va desplazándose en longitud de onda, mayor es el ancho de banda que abarca. En este sentido, los LMRs caracterizados en el rango visible del espectro deberían de ser más resolutivos pero menos sensibles que en el infrarrojo. Por disponibilidad de los equipos en el laboratorio, se decidió realizar las mediciones en el visible, predominantemente, si bien este documento también mostrará mediciones en el infrarrojo cercano dados los diferentes espectrómetros usados.

Tal y como se ha mencionado anteriormente se ha procedido a analizar la respuesta de las tres estructuras en diferentes medios donde cambia su índice de refracción. Por lo tanto se han preparado cuatro soluciones con distintas concentraciones de glicerina: 15%, 30%, 50% y 70%. En las figuras 26 y 27 se muestran los espectros de los LMRs en los distintos medios.

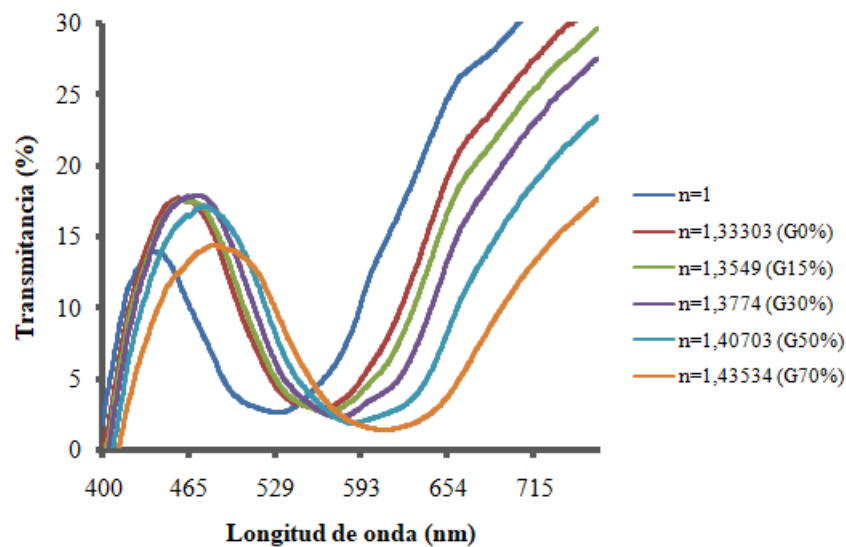


Figura 24. 2º LMR en distintas concentraciones de glicerina

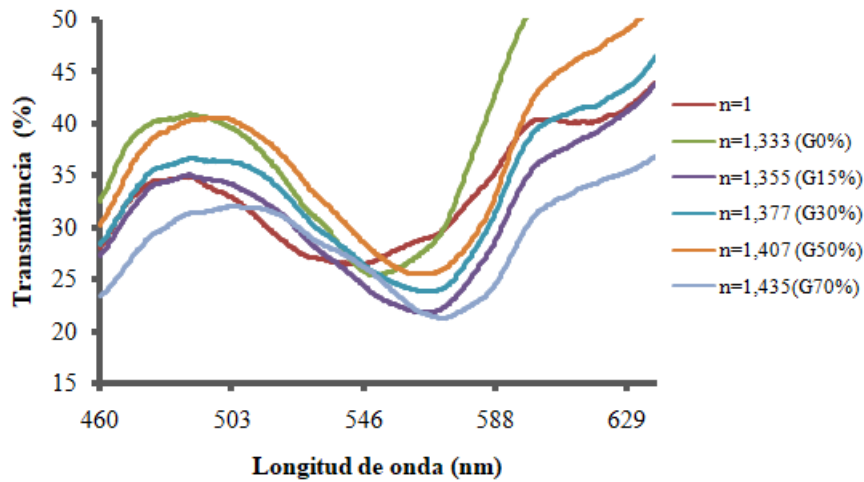


Figura 25. 3º LMR en distintas concentraciones de glicerina

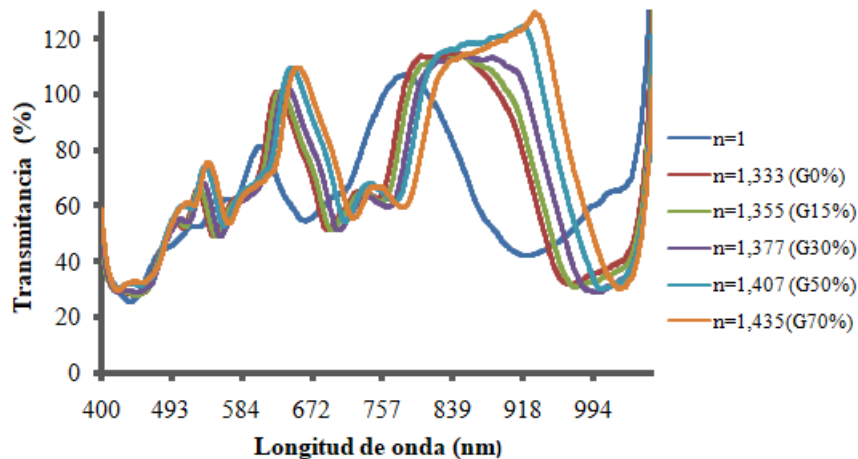


Figura 26. 4º,5º y 6º LMR en distintas concentraciones de glicerina

Se puede observar que cuanto mayor es el índice de refracción, es decir, más aumenta la concentración de glicerina frente al agua, los LMRs se desplazan más hacia longitudes de onda mayores. En este sentido, se puede plantear una gráfica en la que se muestre los resultados de la evolución del cambio en longitud de onda respecto al índice de refracción.

En la figura 27 se muestran diferentes órdenes de LMR posicionados en diferentes longitudes de onda. Por una parte, en la figura 27.a se observan el segundo y tercer LMR posicionados en aire ($n=1$) en 540nm y 530nm. En la gráfica se aprecia claramente que el

segundo LMR tiene mayor desplazamiento que el tercer LMR cuando ambos están sumergidos en el mismo medio.

Se observa en la figura 26 que el 4º LMR en concentraciones altas de glicerina, se desplaza hacia el NIR con lo que los valores mínimos del LMR no son muy fiables para obtener el desplazamiento. Pese a ello se ha hecho una aproximación viendo el desplazamiento cuando las líneas de los LMRs cruzan el 80% de transmitancia. Teniendo en cuenta esa aproximación, en la figura 26 se muestran el 4º, 5º (en sus dos polarizaciones TE y TM) y 6º LMR. Pese a que los tres LMRs no están centrados en la misma longitud de onda, ya que pertenece a la medición del propio sensor, se puede apreciar la diferencia de desplazamiento entre ambos.

Respecto del quinto y sexto LMRs, el cuarto tiene una pendiente más pronunciada, con lo que el desplazamiento en los diferentes medios es mayor. En cuanto al quinto LMR en el cual se pueden observar sus dos diferentes polarizaciones TE y TM se observa que ambas dos muestran la misma tendencia de desplazamiento. Por último, el 6º LMR presenta una línea más recta, significando que su sensibilidad respecto el cambio de índice de refracción es menor.

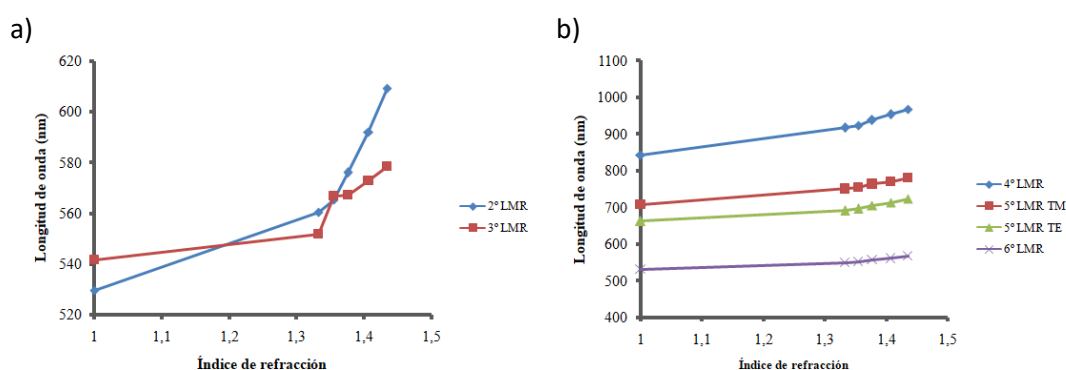


Figura 27. Comparación entre desplazamientos en glicerina de los LMRs. a) Comparación 2º y 3º LMR b) Comparación entre 4º,5º y 6º LMR

En las tablas 2 y 3 se muestran la sensibilidad nm/RIU de cada LMR respecto a las gráficas de las figuras 27 a y b.

	2º LMR	3º LMR
Sensibilidad total (n=1 - n=1,435) nm/RIU	183,407816	84,7687356
Sensibilidad (n=1,333-n=1,435) nm/RIU	480,405882	259,741176

Tabla 3. Sensibilidad nm/RIU 2º y 3º LMR

	4 ° LMR	5° LMR TM	5° LMR TE	5° LMR promedio	6° LMR
Sensibilidad total (n=1- n=1,435) nm/RIU	288,298851	169,333793	138,205517	153,769655	85,9170115
Sensibilidad (n=1,333- n=1,435) nm/RIU	499,117647	299,085294	309,490196	304,287745	187,234314

Tabla 4. Sensibilidad nm/RIU 4º, 5º y 6º LMR

Primeramente se observa que la longitud de onda en la cual cada LMR está centrado afecta en su sensibilidad. No obstante para la tabla 2 en la cual el 2º y 3º LMR están aproximadamente centrados en la misma longitud de onda, la sensibilidad disminuye conforme aumenta el orden del LMR.

4.3.3 Comportamiento en tensión DC

Una vez calculada la resistencia de cada estructura, se procede a analizar su respuesta frente a una tensión inducida. Primeramente, a las distintas estructuras de los sensores se les ha alimentado con una tensión DC.

- AIRE

Como se puede observar en las figuras 28 y 29 el único que ha dado resultado frente a la tensión ha sido el sensor con mayor deposición, el cual empieza a actuar una vez alcanzados los 10V (pequeño desplazamiento en 7.3V-8V).

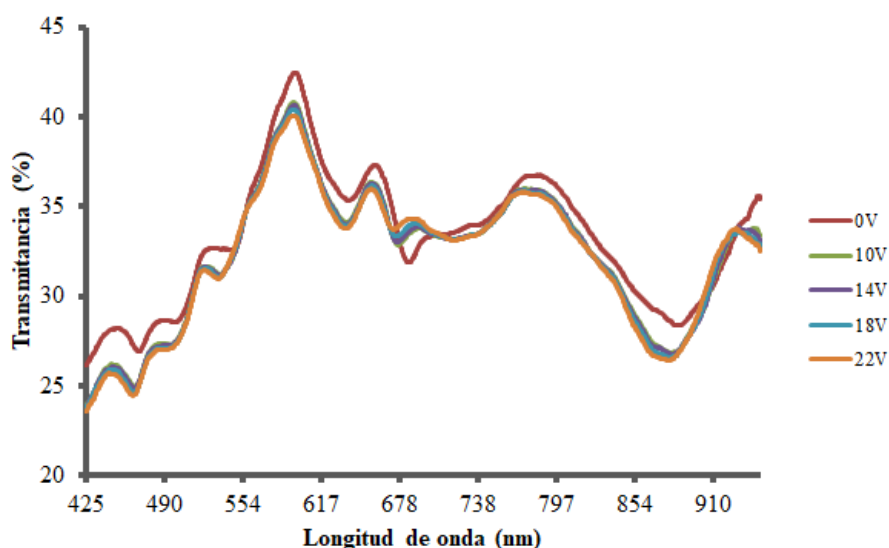


Figura 28. Tensión DC aire Sensor (4º,5º,6º LMR)

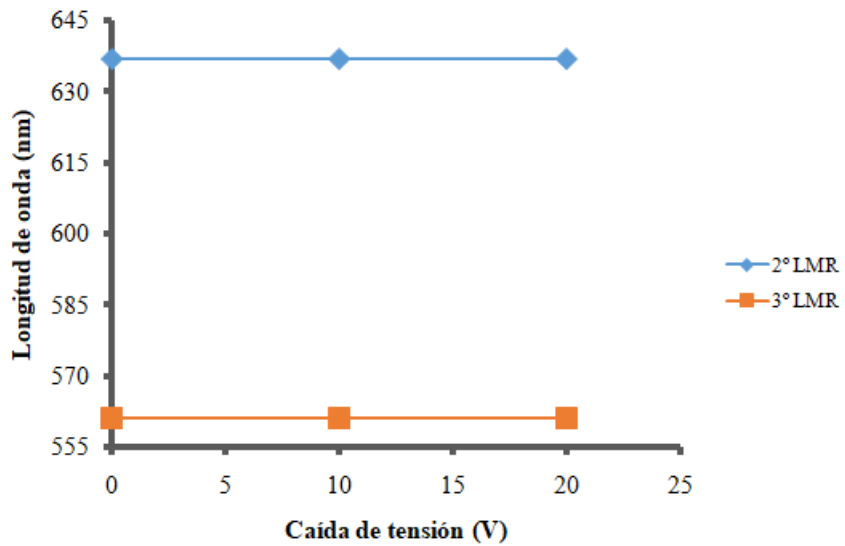


Figura 29. Tensión DC aire 2º y 3º LMR

- AGUA:

A continuación se analizan el 2º, 3º, 4º, 5º y 6º LMR aplicando una caída de tensión en continua mientras las distintas estructuras de los sensores están sumergidas en agua destilada.

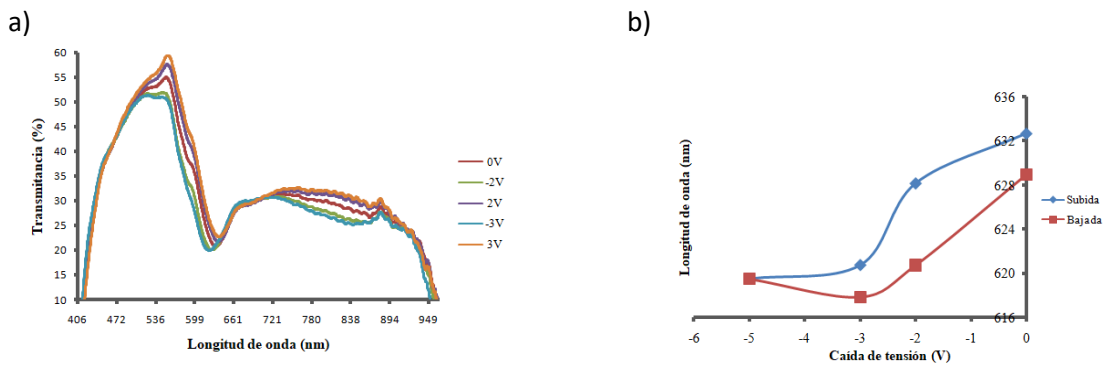


Figura 30. 2º LMR en tensión DC. a) Espectro de desplazamiento b) Histéresis

Se puede observar que en un sentido de polarización de tensión, el desplazamiento es más notorio que en el otro. En este caso, se aprecia que para caídas de tensiones negativas el desplazamiento del LMR es mayor.

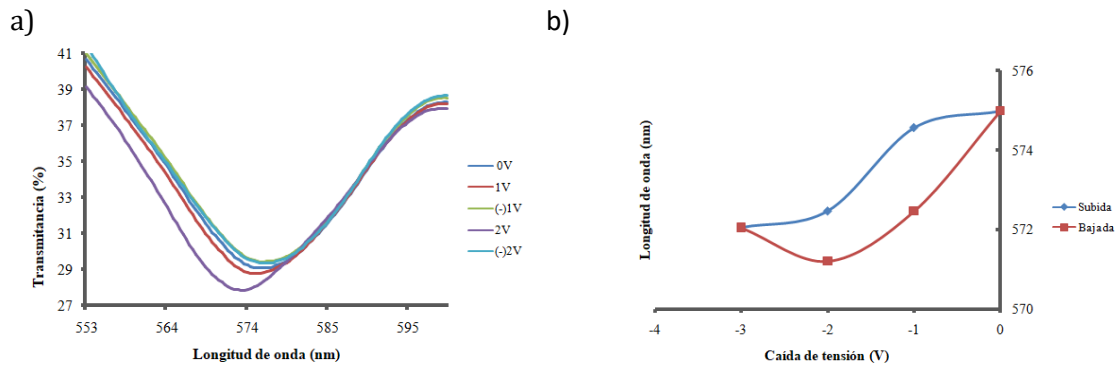


Figura 31. 3^o LMR en tensión DC en H₂O. a) Espectro de desplazamiento b) Histéresis

Como se ha mencionado anteriormente el desplazamiento a causa de sumergirlo en agua ocurre en el mismo sentido que el desplazamiento debido a alimentar al sensor con tensiones negativas. Por lo que, el LMR parece más sensible para caídas de tensiones negativas.

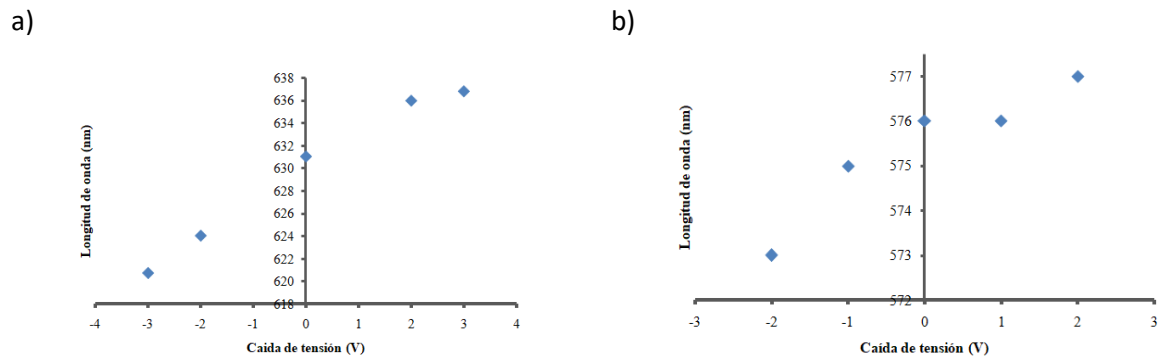


Figura 32. Espectros desplazamiento tensión lambda en H₂O a) 2^o LMR b) 3^o LMR

Si se comparan las figuras 32 a y b se observa que principalmente para tensiones negativas el 2^o LMR tiene más desplazamiento que el 3^o LMR. En cuanto al sensor que contiene el 4^o, 5^o y 6^o LMR se muestran las gráficas del desplazamiento en tensiones positivas y negativas.

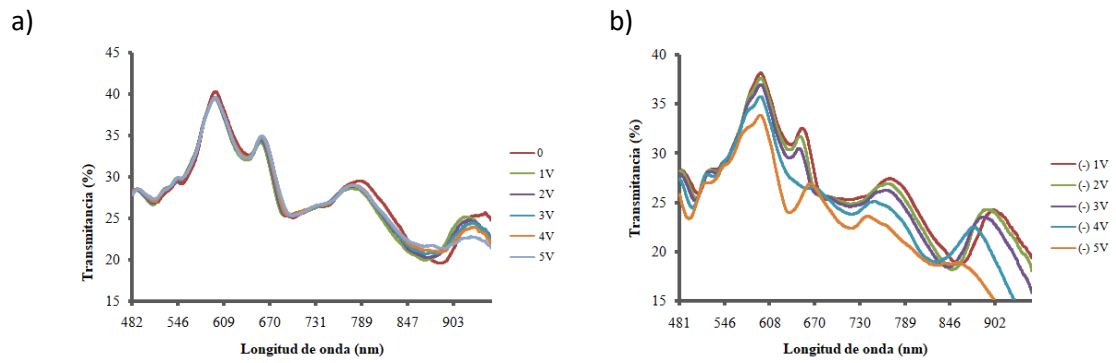


Figura 33. Tensión DC Sensor (4^o,5^o y 6^o LMR) H₂O. a) Tensiones positivas b) Tensiones negativas

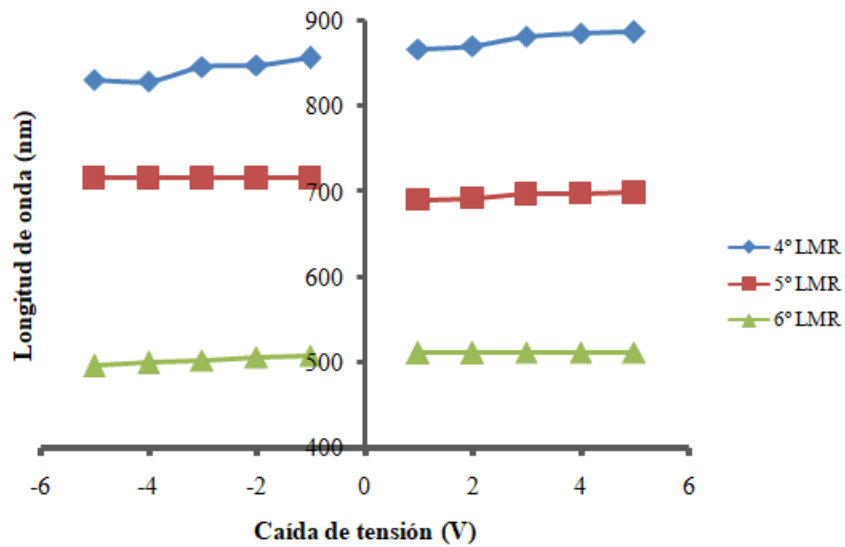


Figura 34. Comparación de desplazamiento 4^o,5^o y 6^o LMR tensión DC H₂O

La figura 34 muestra que al igual que en el caso anterior, a medida que va aumentando el orden del LMR, menor es el desplazamiento.

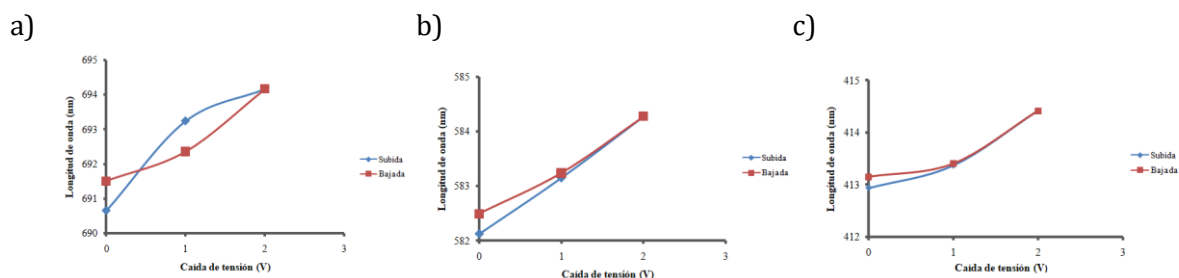


Figura 35. Histéresis H₂O a) 4^o LMR b) 5^o LMR c) 6^o LMR

La figura 44 muestra la histéresis para el 4º,5º y 6 LMR del sensor. En estas graficas se observa claramente que la señal de bajada, línea roja, en todos los casos se queda por encima de los 0V de los cuales se ha partido.

- DISOLUCIÓN SALINA

A continuación se analizan el 2º,3º,4º,5º y 6º LMR aplicando una caída de tensión en continua mientras las distintas estructuras de los sensores sumergidas en una disolución de sales.

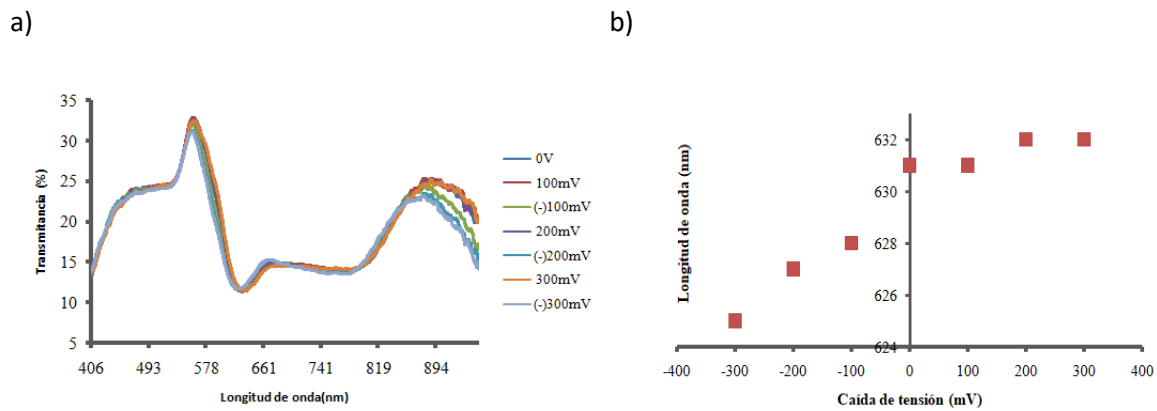


Figura 36. 2º LMR tensión DC en disolución salina a) Espectro de desplazamiento b) Desplazamiento tensión-longitud de onda

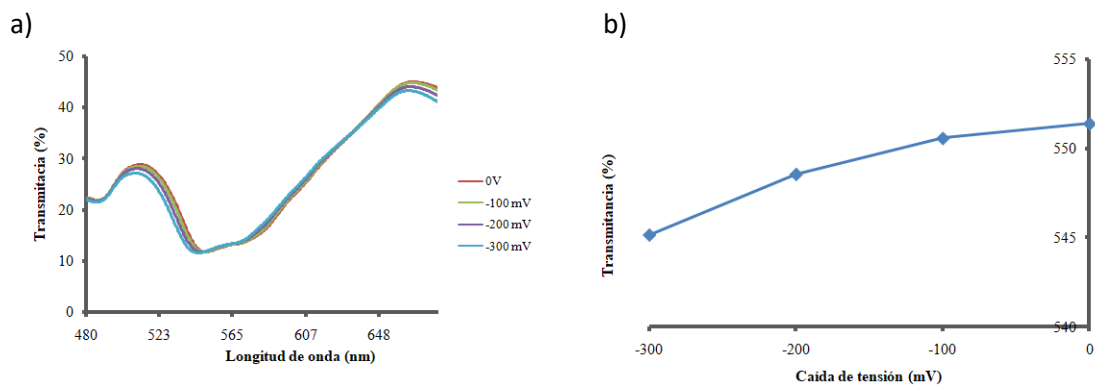


Figura 37. 3º LMR tensión DC en disolución salina a) Espectro de desplazamiento b) Desplazamiento tensión-longitud de onda

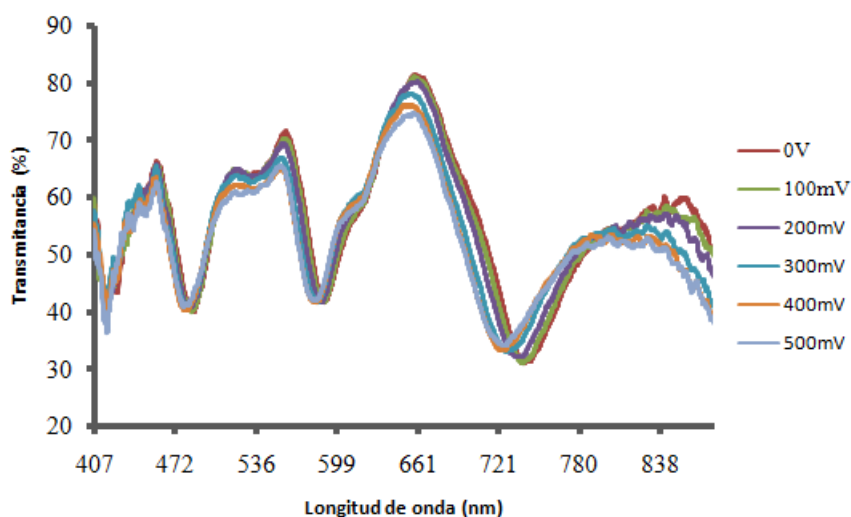


Figura 38. 4^o, 5^o y 6^o LMR tensión DC en disolución salina

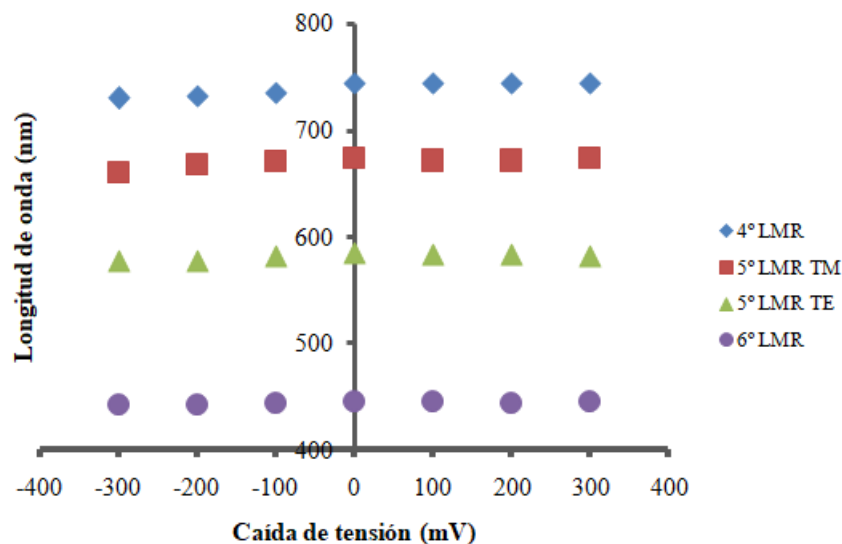


Figura 39. 4^o, 5^o y 6^o LMR tensión DC en disolución salina

Sin embargo tal como muestran las gráficas de comparación en caídas de tensiones positivas apenas hay desplazamiento. La diferencia de desplazamiento entre caídas de tensiones negativas y positivas aun es mayor que en el caso del agua. Por lo que, el LMR parece más sensible para caídas de tensiones negativas.

En la tabla 5 se muestran los desplazamientos nm/V de cada LMR en desplazamiento en tensión negativa.

	2 ^o LMR	3 ^o LMR	4 ^o LMR	5 ^o LMR TM	5 ^o LMR TE	6 ^o LMR
nm/V	20	20,7643	47,5	47,4	26,5	11,6

Tabla 5. Desplazamiento en tensión negativa nm/V de cada LMR en disolución salina

Se puede observar que el desplazamiento depende mayormente de la posición del LMR. De esta manera el 2º, 3º y 5º LMRs centrados entorno 550-600nm muestran un parecido desplazamiento mientras que el 4º LMR muestra el mayor estando centrado en torno a 750nm.

4.3.4 Comportamiento en tensión AC

En esta sección se analizan las mismas estructuras de sensores que en el caso anterior tanto en aire, agua como en la disolución aplicando caídas de tensiones en alterna. Por lo tanto, se generarán mediante el generador de funciones ondas sinusoidales y cuadradas variando la amplitud, frecuencia y duty cycle.

Sin embargo el aire no ha dado resultados en tensiones alternas y en agua se observaba una pequeña variación en los picos del sensor.

La disolución de sales ha sido el medio que ha mostrado resultados más claros del sensor en tensión AC, por lo que a continuación se muestra su comportamiento.

SEÑAL SINUSOIDAL

Primeramente se analizan el 2º y 3º LMR con una señal sinusoidal:

En el Video 2. Se muestra la monitorización del 2º LMR respecto a una señal sinusoidal de 100mVpp, offset 0V y 1Hz.

En el Video 3. Se muestra la monitorización del 3º LMR con la misma señal que para el caso anterior. 100mVpp, offset 0V y 1Hz.

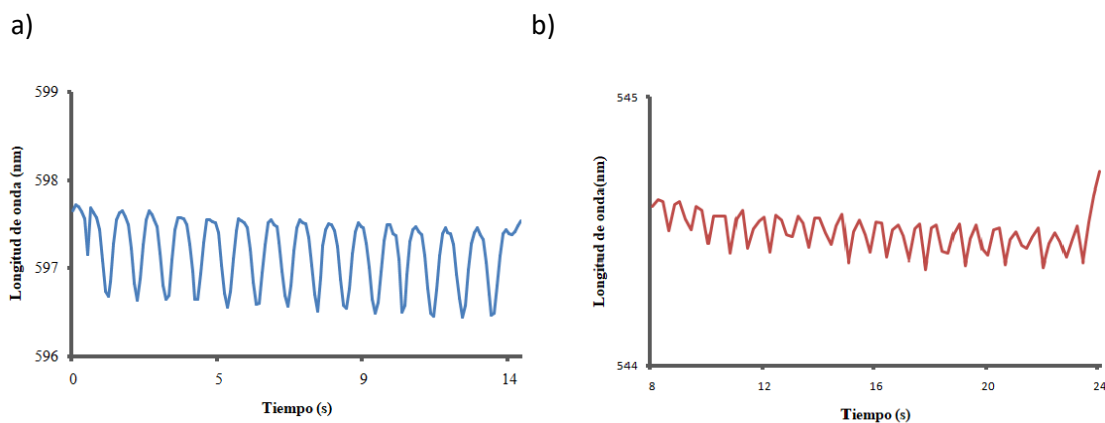


Figura 40. Desplazamientos con tensión AC 100mVpp 1hz a) 2º LMR b) 3º LMR

En la figura 40 se muestran las gráficas del desplazamiento en función del tiempo del 2º y 3º LMR para una señal sinusoidal de 100mVpp a 1Hz. Se observa que la Figura a) muestra mayor magnitud de desplazamiento que la Figura b). Es decir, el 2º LMR muestra desplazamiento de aproximadamente 1 nm mientras que el 3º LMR muestra un desplazamiento diez veces menor.

En el siguiente Video 4 se muestra la señal del sensor debida una señal sinusoidal de 750 mVpp a 1Hz con un offset de 0V.

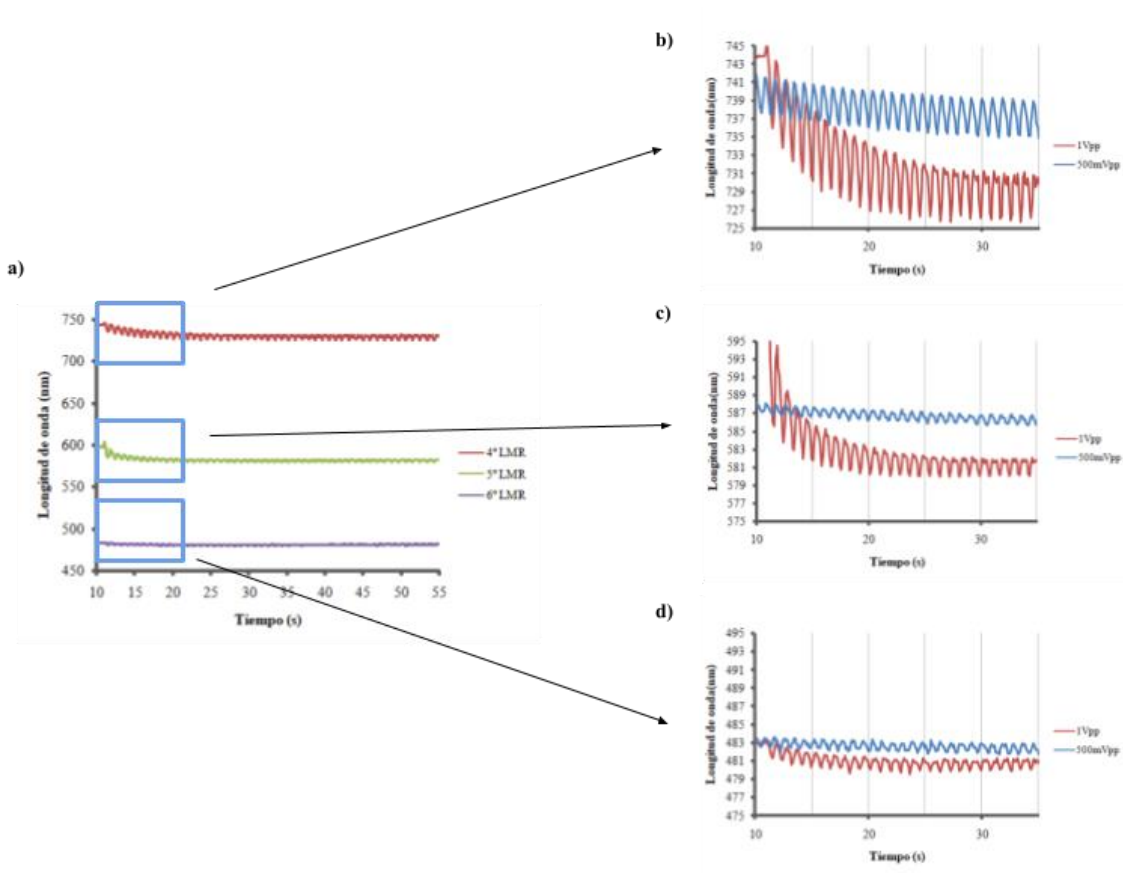


Figura 41. a) 4^o, 5^o y 6^o LMR 1Vpp y 500mVpp a 1hz. b) 4^o LMR c) 5^o LMR d) 6^o LMR

En la figura 41 se hace una comparación del 4^o, 5^o y 6^o LMR del sensor con una señal sinusoidal de 1Vpp y 1Hz. La figura a) muestra la sensibilidad de cada LMR, lo cual como se puede apreciar cuanto mayor es el orden del LMR mayor es la amplitud. No obstante, hay que tener en cuenta que a longitudes de onda más altas los LMRs tienen más sensibilidad, por lo que favorece a la diferencia de sensibilidad de cada LMR.

Por otra parte, en las figuras b, c y d se observan los tres LMRs individualmente. En las gráficas se han superpuesto dos señales de diferente amplitud para mostrar las diferencias entre distintas amplitudes.

No se muestra una relación directa entre el valor de amplitud generada con la amplitud detectada por el sensor. Para 1Vpp la amplitud de la señal no es dos veces la amplitud de la señal de 500mVpp.

SEÑAL CUADRADA

En la siguiente figura se muestra el 4^o LMR en el cual se ha generado una onda cuadrada de 1Vpp a 1Hz con distintos duty cycle.

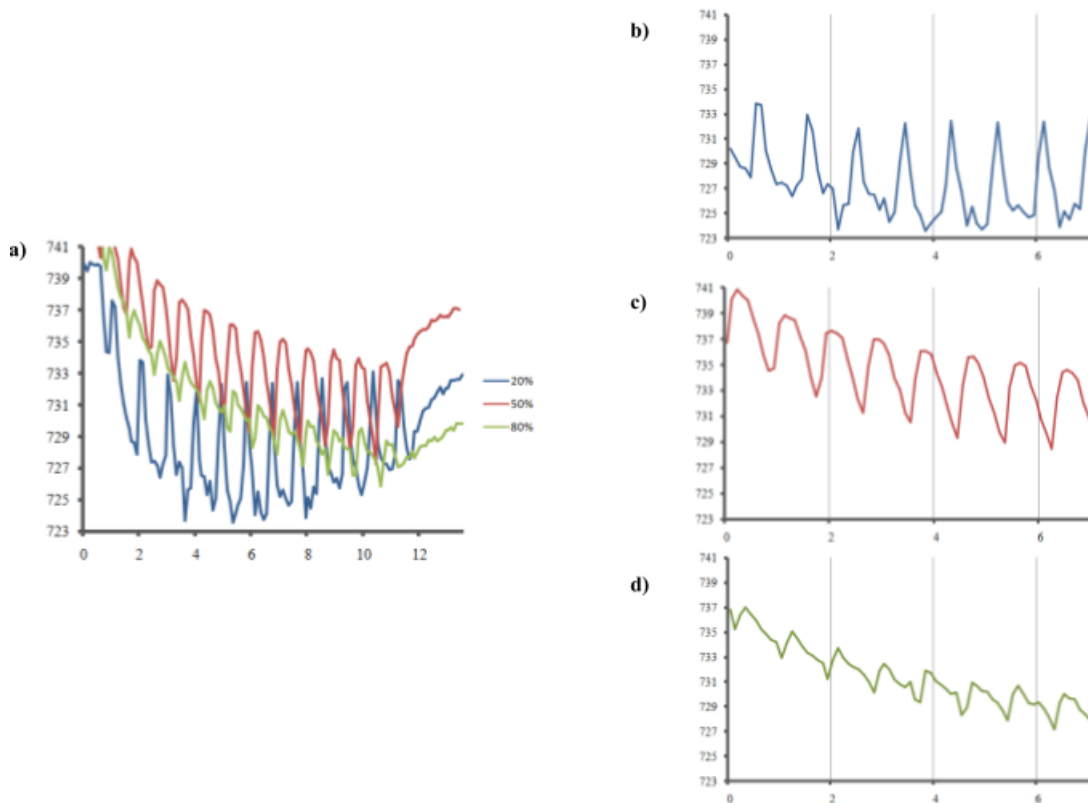


Figura 42. a) 4^º LMR 20,50,80% Duty cycle 1Vpp 1hz b) Duty cycle 20% c) Duty cycle 50% d) Duty cycle 80%

Se muestra que el sensor detecta diferentes ondas cuadradas. Para el caso de la señal de 20% de duty cycle tanto en la magnitud de desplazamiento como en la forma.

Primeramente, la Figura b) el muestra un desplazamiento de 7nm aproximadamente, mostrando variaciones bruscas en ellos.

A continuación, Figura c) tiene un desplazamiento de aproximadamente 6nm. Muestra variaciones en longitud de onda más suaves que la anterior, similar a la respuesta del sensor frente a señales senoidales.

Por último, la Figura d) presenta el menor desplazamiento de 3nm. Se aprecia que el desplazamiento sigue una forma de onda parecida a unos pulsos cuadrados anchos.

VARIACIÓN EN FRECUENCIA

En la siguiente figura se observa una parte de la señal de respuesta del 4^º LMR aplicándole una frecuencia de 1hz y 4hz ha 250mpps.

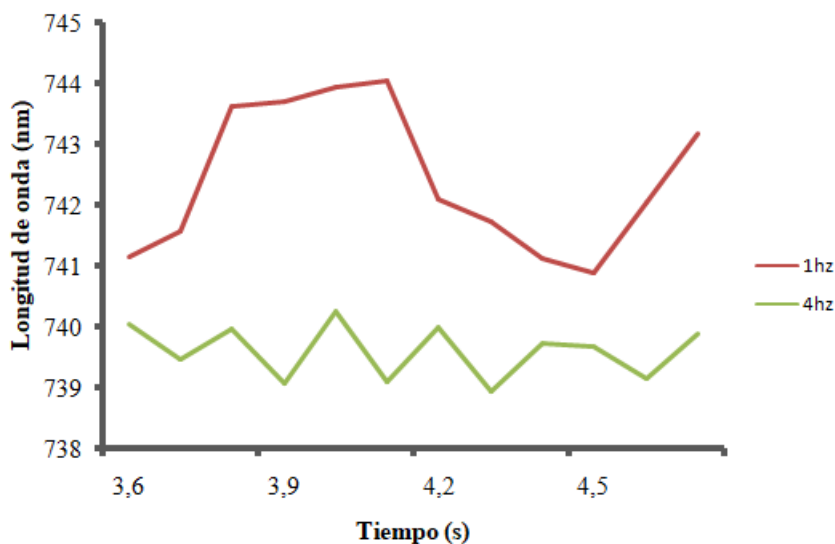


Figura 43. 4ª LMR señal cuadrada Duty cycle 50% 1hz y 4hz

Se observa que para caídas de tensiones iguales el aumento de frecuencia provoca una disminución del desplazamiento.

En el Video5 se observa claramente la respuesta del sensor frente a una señal de 500mVpp, offset 0V y 1Hz. A diferencia que en otros videos, en este se ve claramente la variación de 0V a 250mV y 0V a -250mV.

PRUEBA EN INFRAROJO

En el Video 6 se muestra la señal obtenida introduciendo una sinusoidal de 2Vpp con offset 0V a 1Hz en el NIR. El desplazamiento en rango infrarrojo es ligeramente mayor que en el visible.

4.3.5 Aproximación Bio

Las pruebas realizadas en disolución salina tienen la peculiaridad de que tratan de imitar las condiciones interiores del tejido neuronal, ya que dentro de el existen iones sodio, cloro, magnesio y potasio que son los encargados de transportar las señales eléctricas en el interior de las neuronas.

En el Video 7 se visualiza la respuesta del sensor con mayor deposición frente a una señal que simula la señal que transmiten las neuronas. Una señal cuadrada con +70mV -40mV con el offset 0V, duty cycle 10% y una frecuencia de 1hz.

Por último, en el Video 8 se muestra la misma respuesta del sensor en el SpectraSuite visualizando la adecuación de los parámetros en el generador de señales.

4.3.6 Razonamiento de los resultados obtenidos

En cuanto a los resultados obtenidos en las gráficas de desplazamiento en distintas concentraciones de glicerina, los datos concuerdan con lo dicho teóricamente. Se muestra que a medida que va aumentando el orden del LMR, éste es menos sensible. Las tablas 2 y 3 muestran dicha comparación de desplazamiento. Sin embargo se observa que el 4º LMR presenta mayor sensibilidad que el 2º LMR y el 5º LMR mayor que el 3º. Esto se debe a que no están centrados en la misma longitud de onda. El 4º LMR está cerca del NIR lo que hace que aumente su sensibilidad, el 3º LMR también resulta estar posicionado en longitud de onda superiores que en el caso del 2º LMR provocando el mismo efecto.

Las medidas obtenidas midiendo la resistencia de cada LMR muestran que cuanto mayor es el grosor de la deposición, menor es su resistencia. Esto es debido a que como muestra la fórmula

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

donde ρ en este caso es la conductividad del ITO.

L la longitud del hilo conductor creado (zona depositada del sensor)

S la sección del material depositado

Por lo tanto cuanto mayor sea la sección del material depositado menor será la resistencia.

En el comportamiento DC en aire se observa que los sensores, sobre todo dependiendo de su grosor de deposición es casi inmune al efecto de la tensión. Esto es debido a que el aire es un medio aislante por lo que para ionizarlo hay que generar campos eléctricos muy elevados.

Por otra parte, el comportamiento del sensor en el agua, muestra una mayor sensibilidad que en el aire, ya que las moléculas de agua presentan una polaridad y pueden orientarse según el campo eléctrico. Sin embargo las tensiones alternas no parecen detectarse.

En lo que respecta a la disolución de sales, se trata de sales basadas en cloruros, fácilmente disociables en sus iones básicos Na^+ , Mg^{2+} , K^+ y Cl^- . Estos iones, en realidad, son cargas que se pueden desplazar en el agua, con lo que facilitan la conductividad. En este sentido, esta libertad de movimiento de iones permite la detección de tensiones AC, dado que pueden transportar las cargas a lo largo del ITO.

Sin embargo, hay que destacar que existe una gran limitación en la variación de la frecuencia con la magnitud de la amplitud. La disolución está compuesta por iones de un cierto tamaño, con lo que cuanto mayor es la frecuencia de la señal, mayor es la dificultad con la que pueden moverse, con independencia de la amplitud de la señal. De esta manera, a frecuencias elevadas y amplitudes muy elevadas no se ve variación alguna en el espectro tal y como se muestra en la figura 43.

A lo largo de las pruebas con tensión AC y DC, se ha observado que para tensiones negativas el desplazamiento es mayor que para positivas. Dado que hay varios metales en contacto en la configuración detectora, posiblemente esté dándose un fenómeno electroquímico entre ellos. Esto puede deberse a varios factores que se mencionan a continuación:

El primero de ellos es que tenemos un montaje con distintos materiales conductores: cobre en los generadores de tensión, zinc para llevar la electricidad al ITO y plata para pegar el zinc a la fibra recubierta de ITO a través del pegamento conductor. Esto podría ser un factor que provoque que la sensibilidad del sensor sea más favorable a tensiones negativas a causa de las propiedades electroquímicas de estos materiales. Por otro lado, el hecho de que los LMRs se desplacen hacia longitudes de onda menores casi siempre suele significar que el recubrimiento (en este caso el ITO) se está desprendiendo con el tiempo.

Sin embargo, se visualizan dos fenómenos. Por un lado, al cesar la actividad eléctrica, el LMR parece retornar a su longitud de onda previa a la inducción de las señales eléctricas, y más con el paso del tiempo. Según esto, no parece que hubiera desprendimiento masivo de la capa de ITO. Por otro lado, una deposición paulatina de color negro comienza a aparecer desde los laterales de la fibra hacia el centro hasta prácticamente recubrirlo. Y junto con el aumento de la tensión, se visualizan burbujas de gas saliendo de la zona de trabajo. Este gas, presumiblemente, es hidrógeno, posiblemente liberado por tras la reducción de los iones H^+ presentes en las moléculas de agua al llevarse a cabo algunas de las reacciones redox que están ocurriendo en el interior del líquido. A ello hay que añadir que hay iones cloro disueltos en el agua dispuestos a reaccionar, tanto con el zinc que se haya podido sumergir en ella como con la plata del pegamento conductor aplicado. A su vez, el propio pegamento de plata puede liberar iones Ag^+ al agua que, en su reducción con los electrones que puedan estarse propagando por el ITO, se conviertan en átomos de plata que se van depositando sobre la fibra, dando lugar al recubrimiento negruzco que se ve en la figura 44. Dicho material se estaría depositando sobre la fibra recubierta de ITO, quizás disminuyendo el índice de refracción global y, con ello, desplazando el LMR hacia la izquierda. Al cabo de un tiempo, de seguir en esta situación, los LMRs desaparecen.

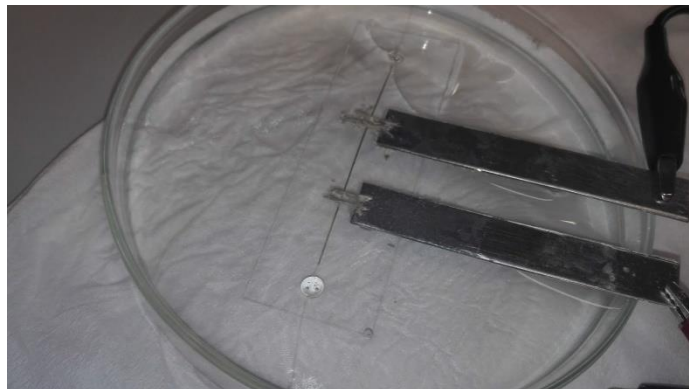


Figura 44. Reacción química en el sensor

En conclusión, pueden estar ocurriendo algunas reacciones de oxido-reducción que den lugar a los comportamientos observados y que, a su vez, lleven a que el sensor sea más sensible a tensiones negativas. Dichas reacciones estarían produciéndose de manera espontánea, solo que cuando se le aplican tensiones con amplitudes crecientes, se realizarían con mayor velocidad. Es por ello que los sensores funcionan adecuadamente al comienzo, pero van perdiendo su funcionalidad con el paso del tiempo y el incremento de la tensión generada. Esto es algo que se deja para posteriores investigaciones que puedan surgir en el futuro en relación a estos fenómenos.

4.3.6 Consideraciones finales

Como se ha visto a lo largo del proyecto la estructura en transmisión mediante resonancias de LMR ha dado resultado frente al campo eléctrico. Partiendo de esto, se han hechos dos pequeñas pruebas fabricando un sensor nFPI con ITO y otro con estaño

Se trata de un interferómetro en el cual como es su debido funcionamiento, la luz que viaja a través de la fibra al llegar al extremo en el cual está depositado un material se generan multiples reflexiones. Estas reflexiones dependiendo de la fase se anulan o superponen obteniendo espectros en los cuales se observan filtrados en ciertas longitudes de onda.

En cuanto a la fabricación del sensor es bastante simple.

En el caso de ITO, se ha depositado con los mismos parámetros utilizados para el sensor en transmisión: 140mA y $5 \cdot 6 \cdot 10^{-2}$ mbar. Sin embargo, se ha decidido depositar unos 16 minutos hasta lograr una capa gruesa con el objetivo de aumentar la potencia de la señal y la conductividad sobre el material.

En cuanto al estaño se depositó con la misma presión de deposición y una corriente () entre 3 minutos y 4 minutos en la punta.

En ambos casos se ha utilizado fibra de 200 micras de diámetro Thorlabs, la misma utilizada en el proyecto.

En cuanto a la inducción del campo eléctrico el montaje varia bastante respecto al sensor de transmisión. Con esta estructura resulta imposible inducirle directamente la señal del generador a la deposición de ITO de la fibra, ya que su sección es muy pequeña. Por lo tanto, se ha realizado el montaje de la figura 45. Se trata de un conductor y una resistencia que se ponen en paralelo con la fibra óptica y muy cerca de ella, para inducirle la tensión lo mejor posible.

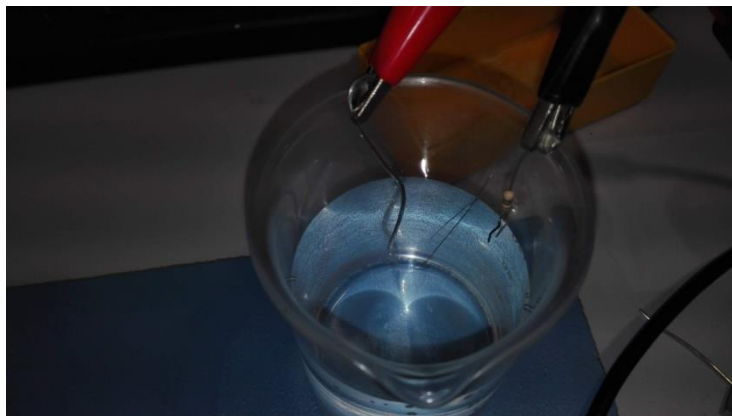


Figura 45. Montaje inducción de campo eléctrico FPI

El sensor nFPI presenta un espectro en el cual se observa como actua como filtro para algunas longitudes de onda. Sin embargo la variación del interferómetro debido a cambios de índice de refracción respecto a las resonancias de LMR es mucho menor.

En cuanto a la respuesta del campo eléctrico es nula. Esto puede ser debido a que se opera con un area de de detección muy pequeña. Es decir, la parte expuesta a la estimulación es únicamente la sección frontal de la fibra.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

La estructura de fibra realizada en este proyecto, ofrece gran sensibilidad al igual que una fabricación con un bajo coste y proceso simple.

Considerando los resultados de los experimentos realizados en el capítulo 4, se puede decir que la estructura del sensor es capaz de detectar tanto caídas de tensiones continuas como alternas.

El grosor de la capa depositada sobre la fibra tiene relación directa con el orden del LMR. Es decir, cuanto más grosor tiene la capa mayor orden de LMR se obtiene. En relación a esto, tal y como se ha observado en el apartado 4.3.1 cuanto mayor es el orden del LMR menor es su anchura y mayor profundidad tiene.

Por otra parte, la capa de grosor del material depositado sobre la fibra afecta en la resistencia del sensor. Como se ha visto en la tabla 4. Cuanto más tiempo se ha depositado, es decir, cuanto más capa de ITO la resistencia del sensor disminuye considerablemente.

En las tablas 3.2 y 3.4 se muestra que cuanto menor sea el orden del LMR mayor es su desplazamiento a causa de someterlos en distintos medios con distintos índices de refracción.

Lo mismo ocurre en el caso de aplicarle una señal eléctrica.

En cuanto a la respuesta del sensor frente a un campo eléctrico la óptima se obtiene en la disolución salina debido a su composición. Además, el sensor es capaz de distinguir distintas formas de onda con distintas amplitudes, frecuencias y duty cycles. No obstante, tal y como se ha mencionado anteriormente, el tamaño de las moléculas de la disolución salina limita en el caso de frecuencias y amplitudes altas.

Por último, el sensor de ITO es capaz de detectar señales tan pequeñas como los que transmiten las neuronas.

5.2 Líneas futuras

Este experimento podría conducir a abrir nuevas líneas de investigación en la detección de campo electromagnético por medio de sensores de fibra óptica simples y fáciles de manejar.

Una futura línea interesante es poder crear un modulador. Se ha visto que la inducción de una señal AC provoca una variación en el desplazamiento del LMR acorde con la frecuencia de la señal generada. De esta manera ocurre una modulación de la luz de salida del sensor en función de la frecuencia. Sin embargo, habría que analizar el medio adecuado para el cual el sensor es más sensible, es decir, el impedimento de las moléculas grandes para moverse, y la posibilidad de impedir la reacción química mencionada anteriormente.

Otra línea podría ser utilizarlo como un detector de formas de onda, pero sin llegar a ser un osciloscopio. Parece claro que, en función de la forma de onda introducida, tenemos un comportamiento diferente, pero no se consigue reconstruir la forma de onda original. No obstante, se podría seguir estudiando este comportamiento por si se pudiera llegar a obtener sensores de fibra óptica que funcionaran como osciloscopios.

Por último, en relación con el objetivo de en un principio podría utilizarse para detectar la señal neuronal. En el capítulo 4 se ha comprobado que el sensor es capaz de detectar un tren de impulsos muy estrecho en un rango de magnitud de amplitud acorde con los potenciales neuronales. Para poder hacer uso de él, habría que mejorarlo en su configuración en reflexión, donde se ha logrado detectar tensión variable. Sin embargo, habría que realizar una investigación para lograr la mayor sensibilidad posible con la menor área de sensorial de la fibra, ya que esta se introducirá en el cerebro. Por otra parte, se podría optimizarlo haciéndole etching a la punta de la fibra para poder focalizar distintas áreas del cerebro. Esto es algo que se deja también para futuras investigaciones.

CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Corres Sanz et.al., “Tunable electro-optic wavelength filter based on lossy-guided mode resonances”, *Optics Express*, Vol. 21, Issue 25, pp. 31668-31677 (2013).
- [2] Michał Sobaszek et.al., “Optical Monitoring of Electrochemical Processes With ITO-Based Lossy-Mode Resonance Optical Fiber Sensor Applied as an Electrode”, *IEEE Journal of Lightwave Technology* (Volume: 36, Issue: 4, Feb.15, 15 2018). doi :10.1109/JLT.2018.2797083.
- [3] Ignacio Del Villar et.al., “Optical sensors based on lossy-mode resonances”, *Sensor and Actuators B:chemical* (Volume: 240, March 2017). doi: 10.1016/j.snb.2016.08.126.
- [4] Alexander L. Efros et.al.,” Evaluating the potential of using quantum dots for monitoring electrical signals in neurons” , *Nature Nanotechnology* 13, 278–288 (2018).
- [5] Michał Sobaszek et.al., “Study on Combined Optical and Electrochemical Analysis Using Indium-tin-oxide-coated Optical Fiber Sensor”, *Electroanalysis*, ISSN 1040 0397. doi:10.1002/elan.201800638.