

# Sensado de pH con FBG. Una alternativa en el campo de los sensores

Juan Olegario Monroy Vásquez  
Ingeniería Electrónica  
Universidad Nacional Abierta y a Distancia,  
Colombia  
[Juan.monroy@unad.edu.co](mailto:Juan.monroy@unad.edu.co)

Sandra Isabel Vargas López  
Ingeniería Electrónica  
Universidad Nacional Abierta y a Distancia,  
Colombia  
[Sandrai.vargas@unad.edu.co](mailto:Sandrai.vargas@unad.edu.co)

**Resumen** - Los sensores basados en fibra óptica se convierten en una alternativa viable en los procesos de medición de señales en entornos que requieren robustez, precisión y también capacidad de transmisión de la información, teniendo en cuenta estos aspectos y los avances tecnológicos del día a día, se indaga la posibilidad de su implementación para mediciones de pH del suelo y así mejorar en aspectos específicos tales como: calibración, rangos de medida, la posibilidad de conformar una red de sensores in situ, robustez en ambientes radioactivos, tóxicos o de difícil acceso. De esta manera se hace una revisión de las aplicaciones, diseños e investigaciones que se han realizado en el campo de la sensorica de niveles de pH con la implementación de las redes de difracción de Bragg FBG, los requerimientos de implementación, los parámetros considerados y las aplicaciones que se han dado en Colombia, esto para conformar un marco de referencia frente a la viabilidad del uso de esta tecnología en la medición de niveles de pH, en entornos de agricultura de precisión y específicamente en el desarrollo de un prototipo de laboratorio remoto que apoye procesos de formación al interior de la Universidad Nacional Abierta y a distancia UNAD.

**Palabras clave**— Red de difracción de Bragg en fibra, PH, sensores FBG, interrogadores

**Abstract**— Fiber optic-based sensors become a viable alternative in signal measurement processes in environments that require robustness, precision and the ability to

transmit information, taking into account these aspects and day-to-day technological advances, the possibility of its implementation is investigated for soil pH measurements and to improve in specific aspects such as calibration, measurement ranges, possibility of forming a sensors network in situ, robustness in radioactive, toxic or difficult to access environments. In this way, a review is made of the applications, designs and investigations that have been carried out in the field of pH level sensors from the use of Bragg FBG diffraction gratings, implementation requirements, considered parameters and applications at the Colombian level, this to form a frame of reference against the feasibility of using this technology in the measurement of pH levels, in agriculture of precision environments and specifically in the development of a remote laboratory prototype that supports training processes inside the National Open and distance University UNAD.

**Keywords**— Fiber Bragg grating, pH, FBG sensors, interrogators.

## I. INTRODUCCIÓN

Los sensores de redes de difracción de Bragg FBG, están cada vez más presente en soluciones de automatización y monitoreo a partir del sensado de diversas señales, así, en este documento se busca presentar su incursión en el campo del sensado de pH para crear un marco de referencia frente a su aplicabilidad en el sensado del pH en el suelo; para ello, en el documento se presenta en la sección II una contextualización

teórica de lo que son las redes de FBG, los sensores FBG, las aplicaciones que han tenido a nivel internacional y nacional en campos relacionados con las mediciones de pH, junto a sus requerimientos y parámetros considerados en su implementación; en la sección III finalmente se presentan las experiencias de dos empresas que han trabajado a nivel internacional y nacional en la implementación y asesoría en este campo.

## II. FBG, APLICACIONES Y ASPECTOS A CONSIDERAR EN SU IMPLEMENTACIÓN

### A. Fiber Bragg Grating FBG.

Físicamente, una red de difracción de Bragg en fibra óptica es una perturbación periódica del índice de refracción a lo largo del eje de la fibra, que se forma por exposición del núcleo a un patrón de interferencia óptica intenso. Estas redes funcionan como filtros pasa banda que reflejan unas longitudes de onda específicas y dejan pasar el resto. Su funcionamiento puede ser explicado a partir de una suma sucesiva de reflexiones coherentes en los saltos de índice de refracción, (Carballar, 1999).

Las redes de difracción de Bragg han demostrado a lo largo de los últimos años ser unos dispositivos de gran potencial para el área de los sensores fotónicos. Las principales causas que explican el éxito de este tipo de sensores son, por un lado, sus pequeñas dimensiones y reducido peso (debido a que son dispositivos en fibra) y, por otro, el hecho de que la información viene codificada en longitudes de onda, lo cual los hace inmunes a fluctuaciones de potencia, y asimismo ofrece la capacidad de multiplexar varios de estos sensores en un mismo ramal, (Jáuregui Misas, 2000).

Así, estas redes de difracción en fibra están incursionando en campos como: Filtrado y selección de canales ópticos, cancelación de la dispersión cromática, aplanado de la curva de ganancia de los amplificadores de fibra dopados con erbio, estabilización de la salida en los láseres de semiconductor, Monitorización de red, Espejos para láseres en fibra y Multiplexores “add and drop” entre otros, que limitan actualmente a las redes de comunicaciones ópticas (Giles, 97).

Ahora, los sensores de fibra óptica tipo redes de Bragg consisten en una pequeña longitud de fibra óptica en cuyo núcleo se graban una serie de franjas (red de Bragg) que hacen que el índice de refracción del núcleo no sea constante, sino que varíe periódicamente en la dirección longitudinal de la fibra. Las franjas se graban mediante un láser de luz UV de alta potencia, acompañado de una máscara de fase, o bien de técnicas de interferencia. Así las redes de Bragg funcionan como un filtro que refleja una determinada longitud de onda de la luz que ilumina la fibra óptica y deja pasar todo el resto del espectro óptico, (Frövel, 2006).

### B. Aplicaciones y aspectos por considerar en su implementación.

Dentro de los espacios en los que se ha aplicado el sensado a partir de fibra óptica o sensores FBG para mediciones de pH, o temas relacionados, se han encontrado los siguientes:

1) Parches de sensores de pH. Aunque no utiliza propiamente la tecnología FBG como tal para el sensado, es importante considerarlos, dada la innovación que presenta en la forma de medir el pH y el trabajo que han desarrollado a nivel investigativo, el cual sirve como marco de referencia para los requerimientos en las mediciones de pH en los suelos.

La empresa Ocean Optics Inc., provee sensores de pH con sondas que emplean una formulación de sol-gel patentada infundida con un químico indicador colorimétrico del pH. Este material se aplica sobre parches exclusivos para reflejar la luz a través de la fibra de lectura central o para transmitir la luz, con el fin de detectar el cambio de color del parche a una longitud de onda específica. Los sensores ópticos de pH típicos son susceptibles a cambios drásticos en el rendimiento en diversas soluciones de fuerza iónica, la capa sensorial de Ocean Optics ha sido modificado químicamente para permitir la detección precisa en muestras tanto de suelos con alta y baja salinidad (nivel de sales disueltas), (Ocean Optics Inc, 2012).

Esta empresa ofrece sensores de pH no invasivos y se presenta como la próxima evolución de línea de productos sensores de pH,

en donde se utiliza malla electroformada para metalizar el material sensor de pH, proporcionando una membrana permeable ópticamente reflectante de iones entre el sensor y el medio ambiente. El proceso de galvanoplastia crea láminas de malla de alta precisión mediante electrodeposición átomo por átomo en un baño de recubrimiento. Los tamaños de los orificios y el alambre que se pueden conseguir son del orden de unas pocas micras, con la sub-micras repetibilidad, (Ocean Optics Inc, 2012).

Para su implementación se requiere un sistema que incluya: sonda de pH transmisiva: manga T-300 / TP-300 , espectrómetro Ocean Optics VIS/NIR o Jaz spectrometer, Fuente de luz VIS/NIR: HL-2000, LS-1, LLS Series, etc., Software: SpectraSuite, Parches de transmisión de pH: pH-BCG-TRANS, Calibración de pH a nivel alto y bajo, solución para el proceso, y dispositivo de almacenamiento para campo: Ocean Optics handheld Jaz spectrometer.

2) Patente de un sensor FBG para medir niveles de pH: en este trabajo se busca que, a partir de la dilatación o contracción de hidrogeles, se afecte el nivel de presión ejercido sobre la fibra y específicamente sobre la red BRAGG, para deformarla y así traducir esa deformación en función del nivel de pH que afecta al hidrogel. Los hidrogeles están formados por una combinación de una cadena polimérica reticulada sólida y una solución acuosa vecina. (Junior, 2007), -“La reticulación es una reacción química por la que los polímeros se unen en cadenas tridimensionalmente formando una especie de red.” El sensor FBG está compuesto por una carcasa rígida que contiene un primer compartimento donde se inserta un conjunto de discos compuestos por un sensor sensible al pH hidrogel y, separado de dicho primer compartimento por cualquier dispositivo, un segundo compartimento conectado mecánicamente al primero y que tiene una fibra óptica con una rejilla de Bragg. El hidrogel debe ser sensible al rango de pH que se desea medir. Por lo tanto, el sensor de la invención no se limita a un hidrogel específico, por el contrario, contempla el uso de varios hidrogeles, que pueden ser sensibles a amplios rangos de pH desde alrededor de 2.0 y hasta alrededor de 12.0.

(Junior, 2007). Los aspectos a considerar en su implementación deben tener en cuenta: niveles de pH a medir, longitud de onda a reflejar, elasticidad del resorte de acople mecánico entre 50 N / m y 200 N / m, cantidad de discos de hidrogel para conducir a un cambio de longitud de onda de Bragg de al menos 60 pm, y protocolo de armado para evitar introducir tensiones e hidratación inicial de los polímeros para calibración.

Los parámetros que aseguran la aplicabilidad industrial del sensor de pH es el tiempo de respuesta, se encontró que este tiempo es de alrededor de 24 horas para una superficie de hidratación de polímero disponible del 18% (porcentaje de área expuesta del hidrogel a la solución), la temperatura del medio donde está inmerso el sensor que para los experimentos estuvo entre 22.0 ° C y 70.0 ° C y han demostrado que, si se observa un cambio en el volumen del hidrogel libre con la temperatura, dicho cambio es inferior al 5%, a pH 3.0 y a pH 6.0 y la fuerza ejercida por el polímero sobre la FBG.

Para su implementación se requiere que el FBG acoplado mecánicamente al transductor se interrogue utilizando un sistema óptico compuesto por: una fuente de luz, que puede ser un láser sintonizable de longitud de onda o una fuente de luz de banda ancha, como un LED (diodo emisor de luz) o un ASE (emisión espontánea amplificada ) Fuente, acoplada al núcleo de fibra , un sistema para la medición de la longitud de onda de Bragg, que puede consistir en un analizador de espectro o por un sistema que contenga filtros espectrales de cualquier tipo y un fotodetector para medir la concentración de la señal del FBG con el del filtro.

Una vez se ilumine el FBG, se puede detectar luz en la transmisión o en la reflexión, en caso de que la detección se lleve a cabo en la transmisión, se debe detectar la longitud de onda a la que la pérdida de potencia óptica es máxima, en caso de que se detecte la señal reflejada, se debe recuperar la potencia óptica máxima y medir la longitud de onda en ese punto. En este caso, generalmente se usa un acoplador de fibra del 50% al 50%, a través del cual la luz de la fuente se envía al sensor y el espectro reflejado por el FBG se envía al sistema

de medición. Para aplicaciones de fondo de pozo o en cualquier circunstancia que presente dificultades de acceso, las mediciones deben realizarse en reflexión. A partir de la medición de la longitud de onda de Bragg, es posible recuperar el valor de mensurando deseado mediante una curva de calibración preparada antes de instalar el sensor en el campo.

3) Sensor FBG para medir pH con hidrogel y recubrimiento elastomérico: en esta investigación, a consideración de los autores, se busca mejorar el diseño complicado y voluminoso de Junior, 2007 por un diseño de sensor de pH basado en FBG con un recubriendo hidrogel sensible al pH en el FBG, la detección se realizó a través de cambios de longitud de onda resultantes de la tensión inducida en la FBG debido a la expansión mecánica del hidrogel. Se aplicó un recubrimiento elastomérico antes del recubrimiento de hidrogel para mejorar la sensibilidad. El rendimiento del sensor se investigó simulando el hinchamiento del hidrogel y la tensión inducida en la FBG. El hinchamiento del hidrogel debido al cambio de pH se modeló utilizando una función de energía libre y se resolvió utilizando el método de elementos finitos. Con el caucho de silicona como material elastómero, los resultados muestran que la sensibilidad se mejoró hasta en un 66% en comparación con la del sensor de pH FBG sin recubrimiento elastomérico. (Yulianti, 2011).

4) Sensor de pH en fibra con hidrogel de vidrio poroso: como parte de una tesis doctoral se presenta el trabajo sobre el sensado de pH con fibra óptica mediante la utilización de un material denominado hidrogel, para medir pH, dicho hidrogel entra en contacto con la solución a la que se le pretende medir el pH a través de una membrana de vidrio poroso, que permite el paso inmediato y de forma repetitiva de disoluciones acuosas, no se hincha, el hidrogel no se filtra a través de sus poros y está comercialmente disponible en la forma y tamaño deseados para la aplicación directa al dispositivo. (Bueno, 2012)

### III. INNOVACIÓN TECNOLÓGICA EN COLOMBIA FRENTE A LA APLICACIÓN DE LOS SENSORES FBG

A través de una jornada de actualización en avances y aplicaciones de los FBG, se invitaron a las dos empresas que han apoyado estas incursiones en Colombia, ya sea en asesoría a través de venta de equipos o en la implementación de sistemas que incluyen esta tecnología en la solución de problemas que requieran procesos de automatización y monitoreo:

A. Micron optics/luna. (Mendez, 2019).

Micron Optics es una empresa fundada en 1990, su oficina matriz en Atlanta, con oficinas a nivel mundial. Es una empresa líder mundial en Instrumentación para sensores de fibra óptica tipo FBG. La empresa ha venido trabajando con FBG desde 1995, fue una de las primeras empresas en producir y comercializar equipos interrogadores (1997). Posee un portafolio extenso con más de 28 patentes, recientemente fue adquirida por otra empresa denominada LUNA. Esta empresa tiene presencia internacional y en Colombia está representada por Salazar Ferro Ingenieros S.A.

En cuanto a aplicaciones, son variadas en distintas industrias, en sectores de riesgo de explosión, o de interferencia electromagnética, como en la Industria petrolera, en industria energética, industria aeronáutica etc. En Ingeniería Civil, para monitoreo de salud estructural, a través de ensayos no destructivos y mediciones en tiempo real se determine su condición estructural para brindar a los interesados seguridad y confiabilidad de las estructuras, por ejemplo, en caso de eventos sísmico o sobrecargas y determinar si es necesario realizar reparaciones o mantenimientos. Se ha implementado en edificios, puentes, represas, auditorios, en suelos como aplicaciones geotécnicas. Se hace mención a diferentes estructuras que están siendo monitoreadas con esto sensores actualmente: puente en México, piscina y el estadio en Beijing construidos para los juegos olímpicos, edificaciones antiguas, como iglesias, catedrales o sitios históricos, monumentos como estatuas, en la estructura de los trenes, como en rieles y vagones. En aplicaciones médicas, se han utilizado en medidores de fuerza, por ejemplo, para medir la fuerza con la cual un cirujano está realizando una

presión, en ortopedia, para medir la presión en la suela de un zapato, en medidas de respiración y temperatura corporal etc.

Para el caso de medición de pH, se clasifican dentro de los sensores bioquímicos, lo cual puede manejarse cambiando la cubierta de los sensores, de manera que respondan a la variación de parámetros externos, y produzcan algún cambio en la fibra, la empresa tuvo participación con la universidad de Virginia, en donde los sensores FBG se recubrieron con celulosa, para medir el potencial de hidrógeno detectando cambios espectrales.

En Colombia se realizó una aplicación con ECOPETROL, en donde se instalaron sensores en las tuberías para monitorear los puntos críticos de inestabilidad, determinando deformaciones y vibraciones.

B. HBM con representación en Colombia mediante la empresa Colsein S.A.S. (Vergara 2019).

HBM es una empresa alemana con 69 años de experiencia, líder tecnológico del mercado de productos para ensayos y medición, como sensores y equipos para medición de deformación, temperatura, inclinación, acelerometría, masa, fuerza, torque, desplazamiento etc., también maneja adquisición de datos y el software. La empresa ha trabajado con diferentes instituciones, entre ellas varias universidades en el desarrollo de proyectos. Frente a los sensores, se maneja los de deformación y temperatura, que presentan diferentes tipos de encapsulado, dependiendo la aplicación, pero también se dispone de sensores de inclinación, desplazamiento y aceleración.

HBM ha realizado diferentes aplicaciones con sensores FBG, entre ellos las de monitoreo estructural, por ejemplo, la realizada en Brasil en un puente antiguo considerado como un monumento, se colocó un sistema híbrido con más de 300 sensores, para monitorear el estado de puente durante la restauración. Se instalaron sensores soldables de temperatura y deformación, sensores adheribles y en el cuarto de control tres interrogadores para la detección de las señales. En este proyecto se utilizaron más de 1000 metros de

cable de fibra. En Colombia, estos sensores se han usado en el monitoreo estructural de edificios, monumentos, puentes, túneles, tuberías, represas, ferrocarriles, estructuras subterráneas, entre otros

## IV. CONCLUSIONES

Las redes de difracción de Bragg son dispositivos con grandes posibilidades de aplicación en diversos campos, dadas sus características en cuanto a la inmunidad al ruido, a la interferencia electromagnética, la posibilidad de armar redes de sensores, la multiplexación a gran escala, sus dimensiones, bajo número de calibraciones, durabilidad, y peso reducido, sin embargo, los elementos que no han permitido su masificación, están en el costo tanto de los sensores, como de los equipos (interrogadores) y software requerido para su implementación. Uno de los aspectos que hace elevados estos costos, es el hecho de que, tanto los sensores como los interrogadores son diseñados, ajustados o adquiridos de acuerdo a las necesidades particulares de la señal a trabajar, específicamente de la longitud de onda, la frecuencia a la cual se va a detectar la deformación y el medio en el cual se van a implementar.

Ahora, en el campo de las mediciones de pH, igual aplica la consideración anterior, y adicional es importante indicar que de base se requiere de una alta inversión, superior a los \$50 millones de pesos, dado que es necesario el estudio y diseño de los sensores FBG para el rango de mediciones de pH de los suelos (3-10), el equipo interrogador, la fuente de luz y el software que permita el análisis de las señales con longitudes de onda en el orden de los nanómetros, por ello se considera viable plantear una investigación macro que cubra varios aspectos, entre ellos:

La construcción de los equipos interrogadores, basado en experiencias de algunas universidades que han incursionado en este campo buscando una disminución de costos y que respondan específicamente para el manejo de las respuestas de los niveles de pH de los suelos.

El estudio de las membranas de vidrio poroso que se ha empleado para separar el hidrogel de la solución a la que se le debe medir el nivel de pH, y verificar si es aplicable para las mediciones del

pH de los suelos, considerando las diferentes alternativas que existen para medir esos niveles de acidez de los suelos, que eventualmente pueden afectar la efectividad de la membrana al producir taponamiento de los poros

Alternativa de emplear los sensores de FBG, a partir de su modelamiento para determinar su comportamiento en función de la acústica (e acuerdo a la investigación del sensor acústico FBG subacuático (Ni, 2007) y/o temperatura y determinar cómo ésta puede llegar a afectar o deformar las redes de Bragg en función de los niveles de pH que haya en el suelo donde se desean medir de acuerdo con los métodos analíticos de los laboratorios de suelos del IGAC

## REFERENCIAS

Bueno Martínez, A. (2012). Diseño de técnicas de interrogación y sensores en fibra para el sector de la construcción (Doctoral dissertation).

Carballar Rincón, A. (1999). Estudio de redes de difracción en fibra para su aplicación en comunicaciones ópticas (Doctoral dissertation, Telecomunicacion, Universidad Politécnica de Madrid).

Córdoba, 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 vítrea. *Rev. Soc. Quím. Méx*, 48, 203-207

Frövel, M. (2006). Sensores de fibra óptica tipo redes de Bragg embebidos en material compuesto para medir deformaciones y temperaturas criogénicas (Doctoral dissertation, Aeronauticos).

Giles, C. R. (1997). Lightwave Applications of Fiber Bragg Gratings. *Journal of Lightwave Technology*, 15(8), pp. 1391 – 1404.

Hu, Z., & Hu, Y. (2012). Dynamic monitoring the strain of composites due to high speed collisions using fiber bragg grating network. *Mechanics*, 18(1), 35-39.

Jáuregui Misas, C., Quintela Incera, A., González Fernández, D. A., & López Higuera, J. M. (2000). Unidad de interrogación de redes de Bragg de bajo coste usando el borde de responsividad de fotodiodos semiconductores.

Junior M F D S, D'Almeida A R, Ribeiro F P, Valente L C G, Braga A M B and Triques A L C 2007 Optical fiber pH sensor Brazil Patent US 7251384 B2

Méndez A. (2019). Instrumentación en FBG, aplicaciones e implementaciones de proyectos. Jornada de actualización: Avances y aplicaciones de los FBG. UNAD Sogamoso.

Moyo, P., Brownjohn, J. M. W., Suresh, R., & Tjin, S. C. (2005). Development of fiber Bragg grating sensors for monitoring civil infrastructure. *Engineering structures*, 27(12), 1828-1834.

Ni, X., Zhao, Y., & Yang, J. (2007). Research of a novel fiber Bragg grating underwater acoustic sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*, 138(1), 76-80.

Ocean Optics Inc. (2012). Fiber Optic pH Sensors. Extraído el 15 de Mayo de 2020, de: <http://www.oceanopticsensors.com/products/patches.html>

Oreggioni, J. (2006). Métodos de medida del pH para estudios invasivos prolongados: ISFET y fibra óptica. XV Seminario de Ingeniería Biomédica-Facultades de Medicina e Ingeniería-Universidad de la República Oriental del Uruguay, 1-5.

Vergara V. (2019). Instrumentación en FBG, aplicaciones e implementaciones de proyectos. Jornada de actualización: Avances y aplicaciones de los FBG. UNAD Sogamoso.

Yulianti, I., Supa'at, A. S. M., Idrus, S. M., Kurdi, O., & Anwar, M. R. S. (2011). Sensitivity improvement of a fibre Bragg grating pH sensor with elastomeric coating. *Measurement Science and Technology*, 23(1), 015104

## Autores

Juan Olegario Monroy Vásquez

Ingeniero Electrónico, Especialista en Multimedia Educativa. Magister en Tecnologías de la información aplicadas a la educación. Docente asistente en el programa de ingeniería Electrónica de la UNAD, Investigador del grupo de investigación GIDESTEC, con más de 20 años de experiencia en educación superior, director del curso Software avanzado para ingeniería, Diseñador del MOOC “Entendiendo Matlab” y hace parte de la red de Programación de la cadena ETR.

Sandra Isabel Vargas López.

Ingeniero Electronico, Magister en Tecnologías de la Información Aplicadas a la Educación. Docente ocasional en el programa de Ingeniería Electrónica de la UNAD con 15 años de experiencia en educación superior, Investigadora del grupo de investigación GIDESTEC, directora de los cursos Robótica y Metrología, pertenece a la red de control de la cadena ETR.