

Sensor basado en fibra óptica para detección de sobrecarga vehicular

Optic fiber-based sensor to detect vehicle overload

SANDRA XIMENA CAMPAGNOLI MARTÍNEZ¹ - LEIDY JOHANA GONZÁLEZ CUADROS² - JUAN CAMILO GÓMEZ RUBIANO³ - JUAN FELIPE MARTÍN ALAFONSO⁴ - HERNÁN PAZ PENAGOS⁵

1. Profesor del Programa de Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
2. Estudiante de Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
3. Estudiante de Ingeniería Electrónica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Grupo de Investigación Ecitrónica.
4. Estudiante de Ingeniería Mecánica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
5. Profesor del Programa de Electrónica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Grupo de Investigación Ecitrónica.

sandra.campagnoli@escuelaing.edu.co - leidy.gonzalez-c@mail.escuelaing.edu.co - juan.gomez-ru@mail.escuelaing.edu.co - juan.martin@mail.escuelaing.edu.co - hernan.paz@escuelaing.edu.co

Recibido: 28/07/2017 Aceptado: 10/08/2017

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista

Resumen

En este artículo se explican los avances que se han obtenido en el proceso de dimensionamiento del problema para el diseño teórico del sensor basado en fibra. El diseño metodológico cubre dos fases: en la primera se revisó el estado del arte y en la segunda se realizaron algunas experiencias de laboratorio y simulación para obtener una primera aproximación al modelo. La investigación parte de un trabajo interdisciplinar de ingeniería mecánica, civil y electrónica. Los aportes de estas disciplinas, tanto en sus modos propios de proceder, como en temas específicos, favorecen la rigurosidad investigativa y aportan más elementos de juicio para resolver el problema.

Palabras claves: fibra óptica, modelo teórico, pavimento asfáltico, propagación, sensor, sobrecarga.

Abstract

This article explains the progress obtained in the problem statement process for the theoretical design of an optic fiber-based sensor. The methodological design has two phases: the first reviews the state of the art and the second deals with some laboratory and simulation experiences to have a first look at the model. The research comes from an interdisciplinary work between mechanical, civil, and electronic engineering. The contributions from these disciplines, both in their procedures and their specific topics, favor the research thoroughness and provide more tools to solve the problem.

Keywords: optic fiber, theoretical model, asphalt pavement, propagation, sensor, overload

INTRODUCCIÓN

Los elevados costos en la implementación, mantenimiento e instalación de los sensores para pesaje vehicular en Colombia limitan el control de sobrecarga por parte de agencias viales en las vías secundarias y terciarias; por ende, es necesario investigar nuevas tecnologías, con el fin de diseñar sensores más económicos.

La presente investigación se refiere al tema de sensores basados en fibra óptica para la detección de sobrecarga vehicular. Mediante este dispositivo se pretende detectar la modificación en la señal del sensor, debido a la carga aplicada por cada uno de los ejes de un vehículo característico. Los datos obtenidos permitirán verificar el cumplimiento o no de la normativa colombiana sobre carga vehicular en la malla vial, que resulta de gran importancia para prevenir el deterioro del pavimento¹.

MARCO TEÓRICO

A continuación, se presentan los aspectos teóricos más relevantes que se encontraron en la investigación.

Problema

La mayoría de los daños en las estructuras de pavimento se generan debido al peso de los vehículos que transitan por ellos. Aun cuando en Colombia las dimensiones y las cargas de los vehículos de transporte terrestre se encuentran reglamentadas por el Ministerio de Transporte, según las resoluciones 4100 del 2004, 2888 de 2005, 6427 y 1782 del 2009 (Ministerio de Transporte, 2004; 2005, 2009), las condiciones de operación de muchos vehículos que transitan por las vías nacionales y urbanas, en especial por las carreteras que no están concesionadas, se apartan de las normas exigidas.

Selección del vehículo característico para el estudio

El tipo de vehículo que circula con más frecuencia en las vías de Colombia y en la ciudad de Bogotá corresponde al C2. Este es un camión de dos ejes, de peso bruto máximo de 17 toneladas, distribuidos en un eje simple direccional de seis toneladas y un eje simple no direccional o eje simple de rueda doble de once toneladas. Por tanto, se escogió este vehículo debido a que

es el que más impacto tiene en la infraestructura vial colombiana.

Dispositivos de pesaje vigentes

Para determinar las cargas vehiculares que circulan por el pavimento se utilizan diversos tipos de básculas: fijas o móviles, estáticas o dinámicas. En años recientes han comenzado a usarse en el país básculas de peso en movimiento (WIM, *Weigh In Motion*). Algunos sensores utilizados para pesar los vehículos en movimiento son placas de flexión, sensor piezoeléctrico, sensor de capacitancias y sensores en fibra óptica (Rondón, Delgadillo & Vargas, 2014), los cuales utilizan principios piezoeléctricos, fotoeléctricos y capacitivos.

Fibra óptica

La fibra óptica es un medio de transmisión guiado, que se configura mediante una geometría cilíndrica. En el centro hay un núcleo, con radio a , constituido fundamentalmente por fibra de vidrio, que tiene un índice de refracción mayor que el del recubrimiento (medio circundante al núcleo). Este es un cilindro externo de polietileno, de radio b . Las fibras ópticas, según el número de modos de propagación (trayectorias de luz a través de la fibra óptica), se clasifican en monomodo y multimodo.

Interferometría y reflectometría

Son dos propiedades de la luz que desempeñan papeles importantes en los procesos de detección de variables físicas de los sensores basados en fibra óptica. La interferometría o interferencia de la luz es un principio físico que consiste en la superposición lineal de dos o más ondas en un punto dado, que crean un patrón particular y variable (formación de franjas con zonas de alta, poca o nula actividad ondulatoria).

La reflectometría en un medio es la segunda propiedad de la luz, que permite medir el coeficiente de reflexión (relación entre el nivel de señal de la onda incidente y la onda reflejada), el coeficiente de transmisión (relación entre el nivel de la señal transmitida al medio y la onda incidente), el tiempo que tarda una señal en propagarse de ida y regreso al mismo punto de emisión, la velocidad de propagación y la distancia de la trayectoria (Romero, 2012).

1. Troncoso Rivera & Murillo Feo, 2011.

Sensores basados en fibra óptica

Un sensor es un dispositivo que detecta un cambio en un estímulo físico y lo transforma en una señal que se puede registrar o medir. Los componentes básicos de un sensor son: elemento sensor, transductor y sistema electrónico. Hoy en día, debido a la investigación y al auge de los componentes ópticos, se han explorado el diseño y la construcción de sensores basados en fibra óptica. Los sensores ópticos, comparados con los sensores basados en principios eléctricos, son más inmunes a interferencias electromagnéticas y de radiofrecuencia, presentan bajas pérdidas, tamaños pequeños, alta sensibilidad y fiabilidad a largo plazo. A continuación, se presenta un tipo de sensores óptico.

El tipo de *sensor cuasidistribuidos o sensores de redes de Bragg (FBG: fiber Bragg grating)* es una microestructura que tiene una longitud milimétrica y puede fotoinscribirse en el núcleo de una fibra de telecomunicaciones monomodo estándar. Además, actúa como un espejo selectivo en función de la longitud de onda. Eso significa que, si se inyecta en la fibra óptica la luz procedente de una fuente de banda ancha, la red solo refleja luz con una anchura espectral muy estrecha, centrada en torno a la longitud de onda de la red de Bragg. El resto de la luz se transmite a través de la fibra óptica sin ninguna pérdida, hasta la siguiente red de Bragg impresa en la fibra (figura 1).

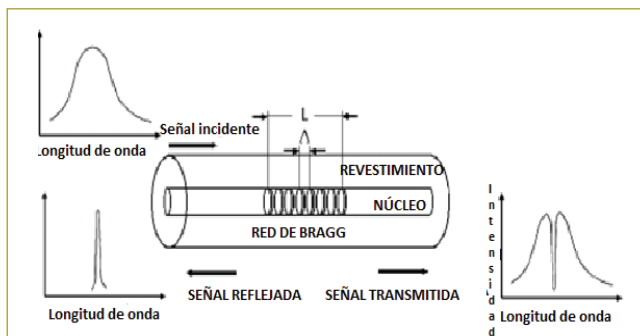


Figura 1. Sensor de red de Bragg.

Una red de Bragg en fibra tiene características únicas que permiten utilizarla como sensor. Por ejemplo, si la fibra se estira o se comprime, la red puede medir la deformación. La deformación de la fibra óptica produce un cambio en el periodo de la microestructura y, en consecuencia, también en la longitud de onda de Bragg. La longitud de onda de la red de Bragg (λ_B) se expresa

en términos del periodo de la microestructura (Λ) y del índice de refracción del núcleo (n_{cp}).

SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE TRABAJO

Terminada la revisión del estado del arte de la investigación, se continuó con la fase de experimentación. El objetivo de las primeras experiencias de laboratorio fue transmitir señales analógicas y digitales, banda base, moduladas a través del kit de fibra óptica DL 2570. Con lo anterior se buscaba identificar la señal que presentara menor atenuación, desfase y variación de frecuencia, para seleccionarla como señal de referencia.

Especificaciones del equipo de experimentación

El panel DL 2570 de fibra óptica está constituido por sendos transmisores y receptores analógico y digital, respectivamente. Tanto los módulos analógicos como los digitales se enlazan mediante una fibra monomodo con longitudes de fibra de 50 cm y 5 m. Esta fibra está compuesta por un núcleo de fibra de plástico ULV-0: ABS-PC, con alta resistencia a los impactos y al calor (con diámetro de 1 mm), y un recubrimiento de polietileno PE (con diámetro de 2,2 mm). La fuente emisora de luz es un diodo LED a 660 nm. El receptor cuenta con un diodo PIN con amplificación de transimpedancia integrado. A través del panel se transmite onda electromagnética (luz) en la primera ventana de transmisión: 950 nm. La atenuación de la fibra óptica es de 2,3 (dB/Km). Al panel se le puede ingresar cualquier señal analógica o digital externa con nivel de amplitud entre 0 y 650 mVpp; el rango de frecuencia debe estar entre 0 y 20 MHz. El panel de fibra óptica DL 2570 puede trabajar en el rango de temperatura entre 0 y 70 °C.

Pruebas de transmisión de tonos y señales moduladas

Inicialmente, se efectuaron pruebas de transmisión de señales a través del kit. Con el empleo de osciloscopios, generadores y fuentes, se acondicionaron tonos a distintas frecuencias y amplitudes para transmitirlos y visualizarlos en el extremo receptor. También se afectó el medio de transmisión con dobleces, tensiones y pesos; a través de éstos, se buscaba identificar variaciones en la amplitud, ancho de banda y desfase de la señal banda base transmitida.

Posteriormente, se transmitieron señales moduladas analógica (en amplitud, frecuencia y fase) y digitalmente

(FSK). En la experimentación con señales moduladas se usaron dos generadores de funciones: uno de ellos para extraer la señal moduladora —representa el mensaje— y el otro para generar la función portadora. El segundo generador también se utilizó para hacer el producto de las dos señales mencionadas: modulación tanto analógica (AM, FM, PM) como digital (FSK). La salida de este último generador se conectó al panel DL 2570 y la señal modulada se transmitió a través del kit para las dos longitudes de fibra óptica (50 cm y 5 m) (figura 2).

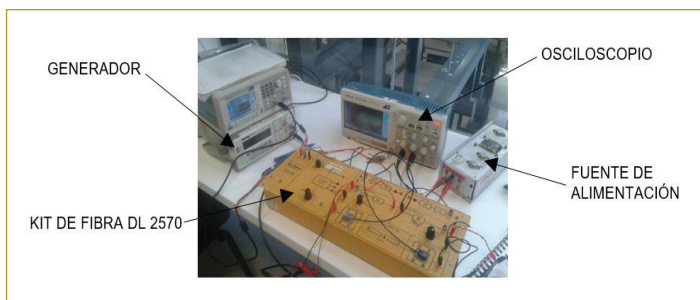


Figura 2. Pruebas de transmisión de luz a través del kit de fibra óptica DL 2570 con el uso de osciloscopios, generadores y fuentes.

El objetivo de la transmisión de señales banda base y moduladas (pasabanda), a través de dos longitudes de fibra óptica (50 cm y 5 m), era comparar las señales enviadas con las señales recibidas para evaluar atenuaciones, desfases y variaciones de frecuencia (anchos de banda) en el medio de transmisión.

Software para la simulación de la fibra

Otra actividad investigativa realizada en el grupo, que implicó las características de la fibra (panel DL 2570), fue simular el comportamiento intrínseco de la fibra óptica en entornos con presencia de cargas (sometido a deformaciones) y condiciones ambientales variables. Para este propósito se usó el *software* SolidWorks® (2017).

Con la simulación se pretende evaluar la respuesta del cable de fibra a una carga distribuida de 29,43 kN (tres toneladas) en una sola dirección paralela a su eje transversal. La fuerza máxima especificada será la ejercida por un neumático del semieje simple de rueda simple de un camión C2 sobre la vía. Se presume que el neumático se encuentra a una presión de inflado de 100 psi y que éste deja una huella circular sobre el pavimento, por lo que se puede conocer el área de aplicación de las fuerzas.

Para evitar que la fibra esté expuesta a condiciones adversas sobre el pavimento, se recubre con un material que evite el desgaste por humedad y gradientes de temperatura que garanticen mayor vida útil.

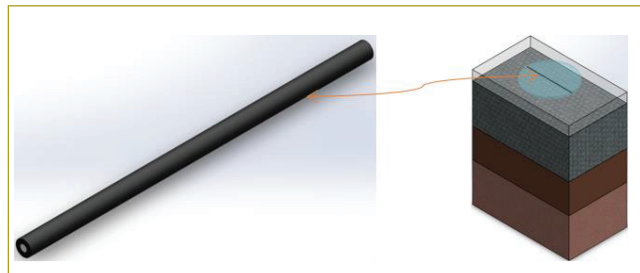


Figura 3. Geometría de la pieza de longitud 230 mm (izquierda). Montaje de la fibra cubierta por placa de polipropileno, apoyada sobre la capa asfáltica (derecha).

Con las actividades llevadas a cabo durante las dos primeras fases de investigación se espera reunir los elementos de juicio suficientes para iniciar el proceso de modelamiento del sensor.

RESULTADOS

Como se muestra en la tabla siguiente (tabla 1), al transmitirse analógicamente un tono (señal banda base) a través del panel DL 2570, con longitudes de fibra óptica de 5 m y 50 cm, se evidencia en la señal recibida una réplica exacta de la señal transmitida. En consecuencia, no se experimentan atenuación, desfase y variación de frecuencia. Sin embargo, cuando se transmite el mismo tono por medio del mismo panel, pero en este caso el medio de transmisión sufre dobleces, la señal recibida atenúa 2.66 veces las señales transmitidas, además de que no hay desfases ni variaciones de frecuencia.

En la primera columna de la izquierda se especifican los tipos de señales con los parámetros que intervinieron en el proceso de modulación, tanto analógica como digital; en las columnas siguientes, se pueden apreciar las gráficas en el dominio del tiempo y la frecuencia de las señales recuperadas en el receptor. En estas últimas (gráficas en el dominio del tiempo) se evidencian reducciones de potencia promedio de señales moduladas (AM, FM, PM y FSK) cuando fueron propagadas a través de la fibra óptica con longitud de 5 m. En cuanto a variaciones de frecuencia, los esquemas FM y PM cambian para longitudes de 50 cm y 5 m.

Tabla 1
Señales de tonos transmitidas y recibidas en el kit de fibra óptica

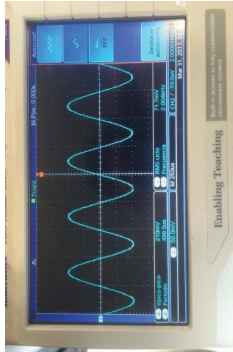
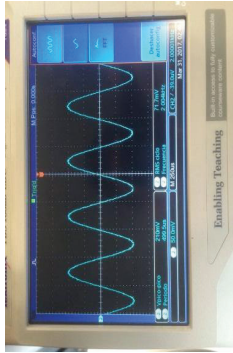
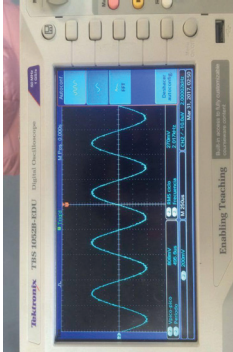
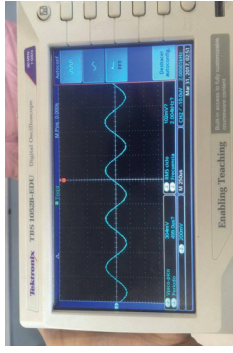
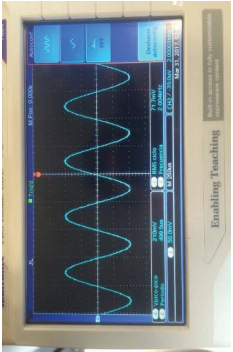
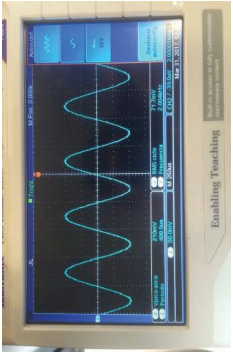
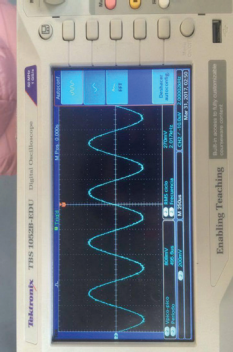
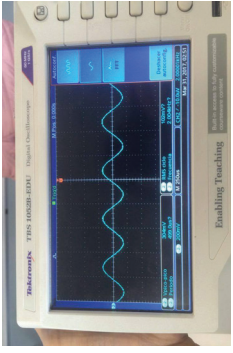
Parámetros	Señal de entrada	Señal de salida	Señal de salida, cuando la fibra fue sometida a deformación ligera	Señal de salida, cuando la fibra fue sometida a deformación mayor
Parámetros de la señal de entrada: $V_m = 210$ mVpp $f_m = 2$ KHz Longitud de la fibra óptica 50 cm				
Parámetros de la señal de entrada: $V_m = 210$ mVpp $f_m = 2$ KHz Longitud de la fibra óptica 5 m				

Tabla 2
Señales moduladas transmitidas y recibidas en el kit de fibra óptica

Parámetros	Señal modulada en el dominio de t		Señal modulada en el dominio de f	
	Long. FO: 50cm	Long. FO: 5 m	Long. FO: 50cm	Long. FO: 5m
<p>AM</p> <p>Parámetros de las señales de entrada:</p> <p>Vm=400 mVpp</p> <p>fm=5 KHz</p> <p>Vc=500 mVpp</p> <p>fc=200 KHz</p>				
<p>FM</p> <p>Parámetros de las señales de entrada:</p> <p>Vm=400 mVpp</p> <p>fm=5 KHz</p> <p>Vc=500 mVpp</p> <p>fc=69.44 KHz</p>				
<p>PM</p> <p>Parámetros de las señales de entrada:</p> <p>Vm=400 mVpp</p> <p>fm=15 KHz</p> <p>Vc=500 mVpp</p> <p>fc=50 KHz</p>				
<p>FSK</p> <p>Parámetros de las señales de entrada:</p> <p>Vm=400 mVpp</p> <p>fm=15 KHz</p> <p>Vc=500 mVpp</p> <p>fc=50 KHz</p>				

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se evidencia que someter la fibra óptica a diferentes tensiones y curvaturas cambia la señal recibida en amplitud respecto de la transmitida: se presenta atenuación por reflexión frente al esfuerzo. La tensión o curvado de la fibra óptica ocasiona que la luz que viaja en el núcleo se refleje y refracte, pero la pérdida es reversible cuando desaparece el doblado; este principio es el que vamos a utilizar para que, dependiendo de la tensión a la que se someta la fibra, se pueda evaluar el impacto sobre ésta y decir cuándo se presenta una sobrecarga (tabla 1).

Así mismo, se puede inferir que la transmisión de la señal modulada (sucede tanto para los tipos AM, FM y PM –modulación analógica–, como para FSK –modulación digital–) a través del panel del DL 2570 de fibra óptica (fibra óptica de longitud 5 m) presenta ligeras pérdidas en relación con la transmisión de la misma señal por fibra óptica con longitud de 50 cm. La modulación por fase PM es la que presenta mayor atenuación de la señal de salida con respecto a la de entrada después de ser transmitida; ésta es del orden del 63 % para una longitud de fibra óptica de 5 m, y depende de la frecuencia de la portadora.

Tabla 3

Comparación de los parámetros de amplitud y frecuencia de las señales transmitidas frente a las señales recibidas para tres tipos de modulación analógica y una digital

Modulación	Long. FO	Medidas de entrada		Medidas de salida	
		F (KHz)	Amplitud (Vpp)	F (KHz)	Amplitud (Vpp)
AM	50 cm	200	0,472	200	0,472
	5 m	200	0,472	200	0,304
FM	50 cm	69,44	0,422	67,55	0,422
	5 m	69,44	0,422	69,44	0,280
PM	50 cm	50	1,24	60,98	1,24
	5 m	50	1,24	60,98	0,78
FSK	50 cm	50	0,448	50	0,407
	5 m	50	0,448	50	0,245

La disminución en la amplitud de la señal modulada era la esperada a causa de la relación cuadrática entre la distancia y la potencia. En lo que respecta a la susceptibilidad de la señal modulada al ruido, se observó

que ningún tipo de señal modulada fue contaminada con ruido debido a que el tipo de energía (señal de luz) resiste cualquier interferencia electromagnética externa.

También se pudo observar que la frecuencia varía sólo para algunos tipos de modulación, como FM y PM. Es lógico pensar que estos tipos de modulación modifiquen la frecuencia y la fase de la onda, ya que el mensaje se va a codificar en dichos parámetros de la señal portadora.

En las señales recibidas no se evidencia distorsión de la onda modulada a causa de que la transmisión fue de señal modulada de banda estrecha. Este fenómeno es inversamente proporcional al ancho de banda y a la alinealidad del canal.

En lo que respecta a la simulación, más adelante se muestran los efectos que la carga distribuida tiene sobre la fibra óptica (figuras 8 a 10). Así mismo se evidencia, a través de colores, los esfuerzos a los que esté expuesto el cable de fibra: la zona de color azul es la de menor esfuerzo, y la de color rojo, la de mayor esfuerzo (figura 4).

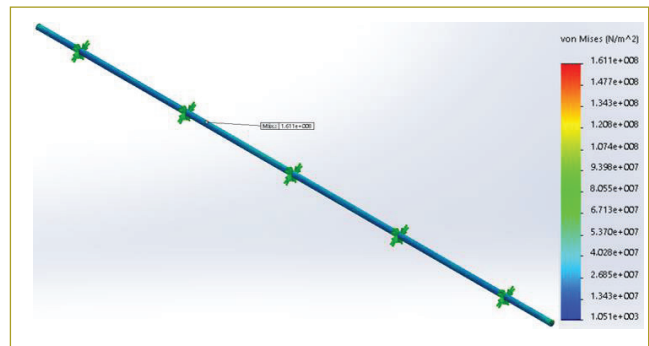


Figura 4. Distribución de esfuerzos de un semieje de tres toneladas (vista isométrica).

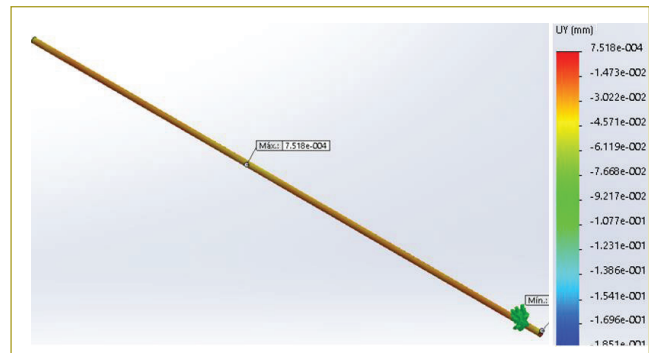


Figura 5. Desplazamiento con respecto al eje vertical Y de un semieje de tres toneladas (vista isométrica).

Los esfuerzos máximos son cercanos a 0,16 Mpa y se presentan sobre el núcleo, en una zona cercana al límite con el recubrimiento. En consecuencia, el recubrimiento será el material menos afectado.

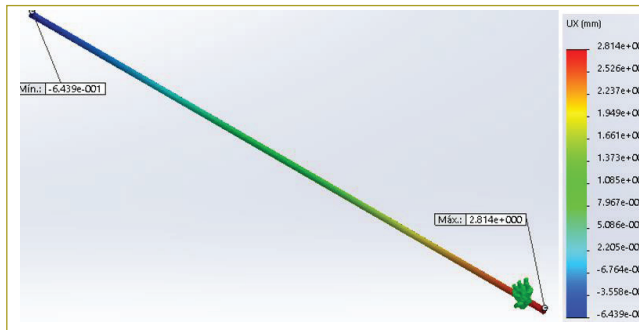


Figura 6. Desplazamiento respecto al eje horizontal X de un semije de tres toneladas (vista isométrica).

Los desplazamientos transversales máximos que se presentan en la fibra son cercanos a los 53,14 m; estas deformaciones son proporcionales a la distancia al punto de aplicación de la fuerza, por lo que la zona que se encuentra en la parte inferior será la más afectada. Los desplazamientos longitudinales máximos son de 2,81 m, situados en los extremos del cable de fibra.

CONCLUSIONES

Para llegar al modelo teórico se partirá de la compresión del fenómeno físico de sobrecarga sobre el pavimento. Se construirá un prototipo a escala (modelo físico lo más aproximado a la realidad), sobre el cual se realizarán pruebas y ajustes de no conformidad; posteriormente se tomarán medidas, se construirán curvas y se harán regresiones para acercarse al modelo teórico buscado. Este mismo procedimiento se llevará a cabo mediante simulación; sólo que en lugar de transmitir una señal electromagnética (luz), se inyectará un fluido como analogía de la luz.

El modelo teórico de sensor basado en fibra óptica se diseñará inicialmente para cargas estáticas correspondientes a vehículos C2 de peso vehicular bruto máximo de 17 toneladas, distribuido en el eje simple direccional y en un eje simple no direccional. La investigación continuará en su proceso, mediante simulación y precisión teórica del principio de reflectometría, con el fin de detectar sobrecarga vehicular.

A partir de las experiencias realizadas en laboratorio en condiciones controladas, se puede concluir lo siguiente:

- Los esfuerzos máximos generados por un vehículo C2 no superan los límites de elasticidad de los materiales que componen la fibra (2410 y 1070 MPa), por lo que el montaje utilizado para la aproximación al modelo teórico de un sensor de fibra óptica cumple con los criterios de diseño necesarios para soportar condiciones extremas de carga y temperatura.
- Son insignificantes las deformaciones axiales que sufre la fibra para considerar que afecten su correcto funcionamiento; sin embargo, para lograr variación de la señal de salida con respecto a la de entrada en el modelo, se debe pensar en una modificación en el montaje que permita amplificar la deformación axial existente y así lograr que el sensor detecte más fácilmente las sobrecargas.
- Al trabajar bajo el principio de la reflectometría se requiere interrumpir parcialmente la emisión de la señal, alterando las condiciones físicas de un cable de fibra. Se observó que al someter la fibra a deformaciones por fuerzas externas (tensión, compresión, flexión) se logra atenuar la señal que llega al receptor. Teniendo en cuenta lo anterior se puede hacer un mecanismo de prueba que permita realizar estas deformaciones de manera sencilla y poder evaluar las atenuaciones de la señal con respecto a las fuerzas aplicadas a la fibra.

REFERENCIAS

1. Castellanos, A.P. & Rojas, J.P. (2014). Espectros de carga vehicular para la zona urbana de Bogotá, D.C. Universidad de los Andes. Recuperado el día 8 de marzo de 2017, en https://www.researchgate.net/publication/242614976_Espectros_de_carga_vehicular_para_la_zona_urbana_de_Bogota_DC
2. Instituto del Transporte. Buenos Aires, República de Argentina (agosto del 2015). Del control de las cargas en las rutas y de las dimensiones de los camiones. Recuperado el 9 de abril de 2017, en <http://www.acadning.org.ar/Institutos/IT%20ANI%20N9%20Control%20de%20cargas.pdf>
3. Jiménez, R. & Fabela, M.J. (2014). Diseño y construcción de un prototipo para determinar el peso de vehículos ligeros en movimiento. Instituto Mexicano del Transporte. Recuperado el 15 de marzo de 2017, en <http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt247.pdf>
4. León, R.O. (2000, 8 de junio). Sobrecarga en vías. *El Tiempo*. Recuperado el 6 de abril de 2017, en <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-1292151>

5. Macea, L.F., Fuentes, L.G. & Álvarez, A.E. (2013). Evaluación de factores camión de los vehículos comerciales de carga que circulan por la red vial principal colombiana. Recuperado el 20 de febrero de 2017, en <https://aprendeenlinea.udea.edu.co/revistas/index.php/ingenieria/>.
6. Ministerio de Transporte de Colombia (2004). Resolución 004100 de 2004. Recuperado el 3 de marzo de 2017, en <https://www.mintransporte.gov.co/Documentos/Normatividad/Resoluciones>.
7. Ministerio de Transporte de Colombia (2009). Resolución 001782 de 2009. Recuperado el 3 de marzo de 2017, en <https://www.mintransporte.gov.co/Documentos/Normatividad/Resoluciones>.
8. Ministerio de Transporte de Colombia (2009). Resolución 006427 de 2009. Recuperado el 3 de marzo de 2017, en <https://www.mintransporte.gov.co/Documentos/Normatividad/Resoluciones>.
9. Ministerio de Transporte de Colombia (2005). Resolución 2888 de 2005. Recuperado el 3 de marzo de 2017, en <https://www.mintransporte.gov.co/Documentos/Normatividad/Resoluciones>.
10. Muñoz Moner, A.F., Carreño, Y. & Pardo, A.G. (2012). Sistemas de control inteligentes para tráfico vehicular. Universidad Autónoma de Bucaramanga. Recuperado el 12 de mayo del 2017, en http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home_40/recursos/04_v19_24/revista_20/05112012/02.pdf.
11. Rodríguez-Zurita, G. (2013). *Apuntes de interferometría óptica contemporánea: ideas fundamentales*. Puebla, México.
12. Rondón, H., Delgadillo, E. & Vargas, W. (2014). Diseño, construcción y funcionamiento de un prototipo para medir cargas vehiculares en un pavimento flexible. *Revista Ingeniería de Construcción*, 29(1). Recuperado el 5 de abril de 2017, en <https://doi.org/10.4067/S0718-50732014000100005>.
13. Troncoso Rivera, J.R. & Murillo Feo, A. (2011). Evaluación del espectro de carga y coeficientes de daño en el corredor de la avenida Boyacá. Bogotá, D.C. Trabajo final de maestría para optar por el título de magister en Ingeniería Geotecnia. Universidad Nacional de Colombia. Recuperado el 20 de abril del 2017, en <http://www.bdigital.unal.edu.co/5337/2/juanricardotroncosorivera.2011.pdf>.
14. Vélez, F.J., Serpa, C.M. & Gómez, N.D. (2010). Medición de microdeformaciones en las losas de hormigón con sensores de fibra Bragg. *Ingeniería y Ciencia*, 6. Universidad Eafit. Recuperado el 2 de mayo de 2017, en <http://www.scielo.org.co/pdf/ince/v6n11/v6n11a02.pdf>.

