

Avances en el diseño de un sistema de bajo costo para el monitoreo de la salud estructural, a partir de la medición de deformaciones unitarias, utilizando sensores de fibra óptica.

Advances in the design of a low-cost system for the structural health monitoring, measuring Unit Deformations, using fiber optic sensors.

José Serracín ^{1*}, José Miranda ²

¹ Facultad de Ingeniería Eléctrica, Centro Regional de Chiriquí, Universidad Tecnológica de Panamá,

² Facultad de Ingeniería Civil, Centro Regional de Chiriquí, Universidad Tecnológica de Panamá

¹jose.serracin@utp.ac.pa, ²jose.miranda4@utp.ac.pa

Resumen– Este artículo busca dar a conocer las investigaciones que se realizan para encontrar métodos de bajo costo que permitan la ejecución de monitoreos en diferentes estructuras civiles. Con la ayuda de un primer diseño basado en un sensor de microdeformaciones de fibra óptica, se intenta realizar un análisis matemático que permita establecer las relaciones existentes entre la pérdida de luz y las deformaciones de los materiales, para el futuro cálculo y adquisición de datos que permitan a los encargados de una estructura tomar decisiones adecuadas respecto a los cambios que puedan suceder en esta.

Palabras claves– Arduino, Fibra Óptica, Matlab, Microdeformaciones, Perdidas, Simulink.

Abstract– This article seeks to publicize the research that is carried out to find low cost methods that allow the execution of monitoring in different civil structures. With the help of a first design based on a fiber optic microdeformation sensor, we try to perform a mathematical analysis that allows us to establish the relationships between the loss of light and the deformations of the materials, for the future calculation and acquisition of data that allow the managers of a structure to make adequate decisions regarding the changes that can happen in this.

Keywords– Arduino, Fiber Optics, Matlab, Microbendings, Lost, Simulink.

1. Introducción

La realización y el diseño de un sistema de monitoreo para salud estructural parte de la necesidad de conocer los esfuerzos internos que se tienen en los elementos en una estructura.

La ingeniería civil como disciplina se apoya en la matemática generando modelos sumamente idealizados que surgen de situaciones simplificadas para poder tener una respuesta y crear estructuras que resistan a las necesidades especificadas con la ayuda de otros cálculos.

Sin embargo y como se menciona, estos cálculos parten de simplificaciones de la realidad para ser contruoidos, pero la naturaleza es impredecible y los fenómenos que suceden no pueden cuantificarse en ningún termino posible con total exactitud por lo que los datos reales variarán con el paso del tiempo.

Durante años se ha optado por la experiencia y conocimientos de los especialistas, los cuales detallan de manera visual las condiciones en cómo se encuentra la estructura.

Fisuras, causadas por cortantes y momentos, en el recubrimiento de vigas y columnas tienen patrones conocidos. Así como estas, otras señales pueden aparecer y establecer las posibles causas de los problemas que se den.

La eficacia de esta metodología depende de tres aspectos principales: La frecuencia de muestreo dentro del estudio, la aparición de señales y la pericia del evaluador.

Los sistemas tecnológicos potencian todos estos puntos y muchos otros, la frecuencia de la adquisición de datos puede realizarse semanalmente, diariamente o inclusive en tiempo real; no depende de señales visibles,

las mediciones alcanzan los rangos de microdeformaciones y la experiencia del encargado en conjunto con datos precisos generan mejores resultados.

2. Primer Prototipo

Después de investigaciones entre diferentes tipos de sensores, se decide desarrollar un prototipo de sensor, de bajo costo, de alta precisión y confiable, diseñado con materiales que estuvieran en nuestro medio.

Entonces se profundiza en las nuevas tecnologías basadas en el uso de fibra óptica como sensores.

Las ventajas son apreciables frente a otros tipos de sensores, pudiéndose mencionar entre ellas:

- Inmunidad electromagnética
- Resistencia ambiental
- Alta precisión
- Poco o nulo mantenimiento
- Altas temperaturas de funcionamiento
- Uso en áreas de alcance reducido o embebido en los materiales [1][2].

3. Selección del Sensor

Dentro de las posibilidades que existen entre los variados sistemas de sensores de fibra óptica se decide desarrollar un sensor de microdeformaciones.

En estos sensores ocurre una modulación de la amplitud por pérdidas localizadas. La intensidad lumínica es transmitida por una fuente y las deformaciones causadas dan por resultado que no exista reflexión total interna y por lo tanto ocurran estas pérdidas.

Este tipo de sensores específicamente se usa para la captación de presiones, pequeños desplazamientos y deformaciones.

En la figura 1 la forma básica de un sistema para generar micro deformaciones. Esencialmente los dientes que se encuentran a una distancia L crearán microcurvaturas que a su vez deformarán la fibra óptica que pasa por el medio de la placa dentada y en presencia de una fuerza externa F , mientras que la luz va desde una fuente hasta un receptor o detector y así medir las pérdidas que se producen.

La distancia L a la que se encuentra cada diente dependerá de las características de la fibra que se use, pues se define como el periodo crítico y es la distancia donde mayores pérdidas se generaran con los cambios de

presión y deformaciones. El periodo crítico puede usarse tanto para el diseño como para el pre-dimensionamiento de la placa dentada, debido a que la pérdida de intensidad de luz para una misma deformación es mayor cuando se usa el periodo crítico y menor cuando se usa una distancia mayor a este.

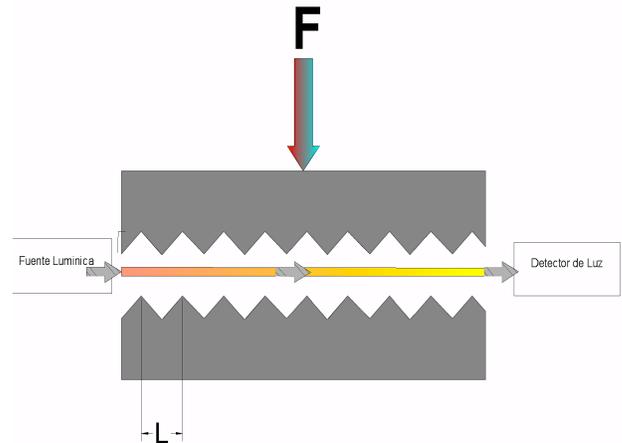


Figura 1. Ilustración del modelo base del sensor de microdeformaciones.

4. Método Experimental

El diseño del sistema se ha desarrollado para cumplir con las propuestas pensadas para la realización de las pruebas. Los cálculos, programas utilizados y los métodos para crear las placas dentadas, así como las pruebas propuestas se desarrollan en esta sección.

4.1 Diseño

Para el diseño del sistema, se requiere conocer el tipo de fibra óptica que se usará como conducto y sensor. La fibra óptica seleccionada tiene un diámetro de núcleo $62.5 \mu\text{m}$, el índice de refracción 1.457, y un número de apertura 0.278.

Remouche, Georges y Meyrueis, muestran dentro de su estudio las fórmulas para el cálculo del periodo crítico en fibra óptica según su modo de dispersión lumínico:

$$\Lambda_c = \frac{\sqrt{2}a\pi n_0}{N.A.} \quad (1)$$

$$\Lambda_c = \frac{2a\pi n_0}{N.A.} \quad (2)$$

Dónde (1), es usada para el cálculo del periodo crítico en fibra óptica multimodo de Índice escalonado y (2), para la fibra óptica multimodo de índice gradual

Para ambas ecuaciones " Λ_c " es el periodo crítico, " a " es el radio del núcleo de la fibra óptica, " n_0 " es el índice de refracción del núcleo y " NA " es el número de apertura numérica de la fibra óptica. El sistema ofrece un resultado de calculado a $\Lambda_c = 1.029$ mm.

El diseño inicial se propone como un sistema que funcione primordialmente para comprobar las pérdidas de luz que se darán cuando el elemento se deforme cuando se aplique la carga. De esta manera se harán las modificaciones pertinentes al software de control, adquisición y proceso de datos.

Pensando que las variaciones de fuerzas serán muchas, y con el objetivo de hacer pruebas rápidas que generen datos para ajustar y optimizar la precisión del sensor se adaptará una serie de resortes que ejerzan la fuerza necesaria para poder que regrese a su posición normal, en el cual la fibra óptica está alejada de los deformadores lo suficiente como para no registrar variaciones en los datos sensados, pero siendo esta fuerza totalmente despreciable para cuando una carga sea aplicada.

Los diseños fueron realizados con la ayuda del software Inventor de Autodesk que brinda las herramientas para el diseño mecánico en 3D, permitiendo la simulación de esfuerzos para diferentes materiales. En nuestro caso, se dibujaron los detalles y luego se guardaron para imprimirse en 3D con la ayuda de una impresora EcubMaker Fantasy Pro II. Conseguimos una pieza con muy buenos detalles al usar este dispositivo.

El material plástico que usa esta impresora es el PLA. Es un polímero biodegradable que podemos encontrar en el mercado fácilmente. Miguel Ampudia Castro [4], define al PLA como uno de los plásticos en mayor estudio y desarrollo por sus múltiples aplicaciones en el mercado. "Este interesante polímero tiene su origen en el almidón proveniente de vegetales como: maíz, yuca, trigo, remolacha o caña de azúcar, lo que facilita su fuente de extracción alejándola de los procesos de transformación de los hidrocarburos que caracterizan la obtención de otros polímeros. Al ser biodegradable, este poliéster termoplástico, se descompone lentamente en moléculas más simples al entrar en contacto con compuestos como el agua u óxidos de carbono. De esa forma se asegura una reinsertación natural a lo largo de su ciclo de vida, al contrario que plásticos derivados de hidrocarburos como el ABS".

Es muy importante mencionar que el tipo de PLA que usamos al enfriarse se endurece y esto es necesario para que al aplicar una fuerza se distribuya lo más uniformemente posible a lo largo de la pieza.

La pieza final que será usada se presenta a continuación en la figura 2 detallándose el modelo del diseño. Cada placa dentada se compone de cuatro orificios pequeños de 3 mm y cuatro hendiduras circulares grandes de 5mm. Los orificios de 3 mm servirán para que mediante tornillos se mantenga la posición del sistema sirviendo como pasadores. Estos tornillos deben ser algo más delgados para que no exista fricción. En las hendiduras se colocarán cuatro resortes suaves que mantengan el sistema de dientes abierto cuando no exista una fuerza. Los dientes se encuentran a la distancia obtenida según la fórmula de periodo crítico (1.316 mm). El tamaño total de cada pieza es de 80 mm de largo, 30 mm de ancho y 15 mm de alto.

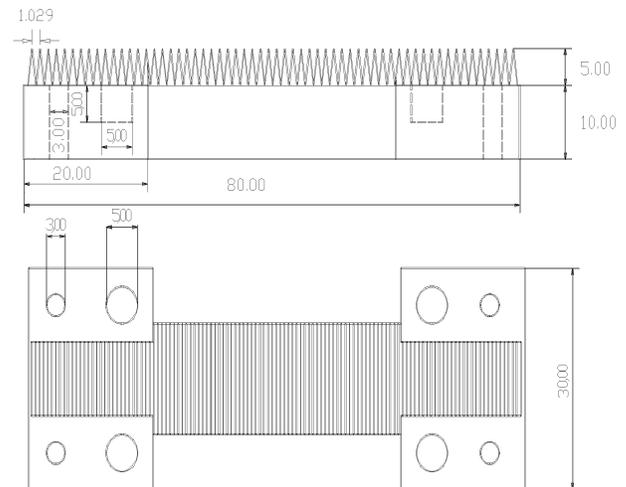


Figura 2. Detalles de las medidas de la placa dentada.

4.2 Descripción de pruebas

Las pruebas a las que se sometieron los sensores se realizaron con la ayuda de un cilindro de concreto de pruebas de 6 pulgadas de diámetro en la máquina para ensayos de compresión de concreto, en el cual se adaptó un deformímetro. Una placa de acero de media pulgada o más de espesor, se colocó entre el cilindro y el pistón de la máquina de ensayos. Esta placa transmitía las deformaciones del cilindro a la punta de contacto del deformímetro y permitiendo ser comparadas con las pérdidas de luz.

El sensor se ubicó por debajo de la misma placa de acero para que la fuerza se distribuya a lo largo de toda la pieza de plástico. El sensor debía hacer contacto con la placa de metal de manera uniforme, pero sin estar sometido a presión, diseñándose para este fin una base metálica con tres tornillos ajustables ubicados en la parte inferior de esta con el objetivo de posicionar y sostener el sensor justo por debajo de la placa de acero.

Para la determinación de los valores de las pérdidas lumínicas se usó un medidor de pérdidas para fibra óptica y un láser para localización de fallas visuales de 30mW, con una frecuencia de 650 nm.

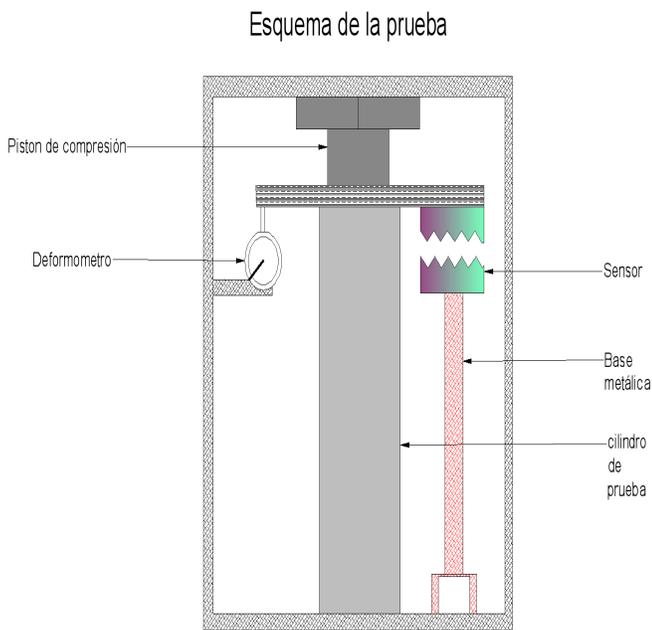


Figura 3. Esquema de pruebas para la obtención de resultados.

5. Primeros resultados

La figura 4 muestra un valor de R^2 o coeficiente de determinación de 0.902. Este valor muestra que existe una fuerte dependencia entre las pérdidas de luz y las deformaciones en el elemento, precisamente una de las más importantes respuestas que se tienen de esta investigación porque permite asegurar que esto sucede y

que el sistema de monitoreo propuesto reporta una alta viabilidad para ser perfeccionado.

Se comparó el valor que genera la ecuación que rige la gráfica obtenida y el valor real medido con el deformómetro para hacer el análisis de

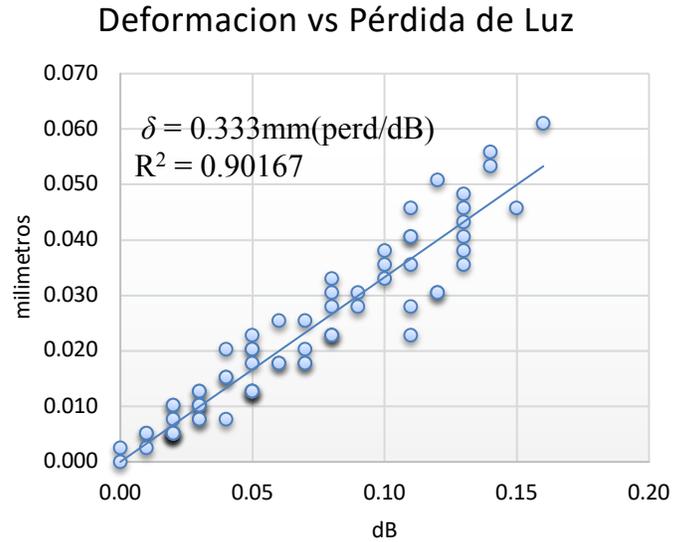


Figura 4. Gráfico de los datos de las pruebas realizadas con el sensor de microdeformaciones.

En cuanto al promedio de la desviación respecto de la media del valor de la razón de la ecuación con valor real que rige el comportamiento del sensor es de 1.046, es bastante cercano al uno, lo que indica un valor aceptable.

El valor de la desviación media es de 0.216 y la desviación estándar es de 0.269.

La covarianza indica el grado de variabilidad de un grupo de datos respecto a la media. El resultado del coeficiente de variación de 0.261.

El error relativo promedio en el sistema es de 0.214, es un error aceptable para las primeras pruebas, sin embargo, alto en comparación con otros sensores para monitoreo estructural en el mercado, por lo que se debe referenciar para futuras investigaciones, con los mínimos aceptados en estos sistemas comerciales, buscando mejorar así la eficiencia y precisión del sensor.

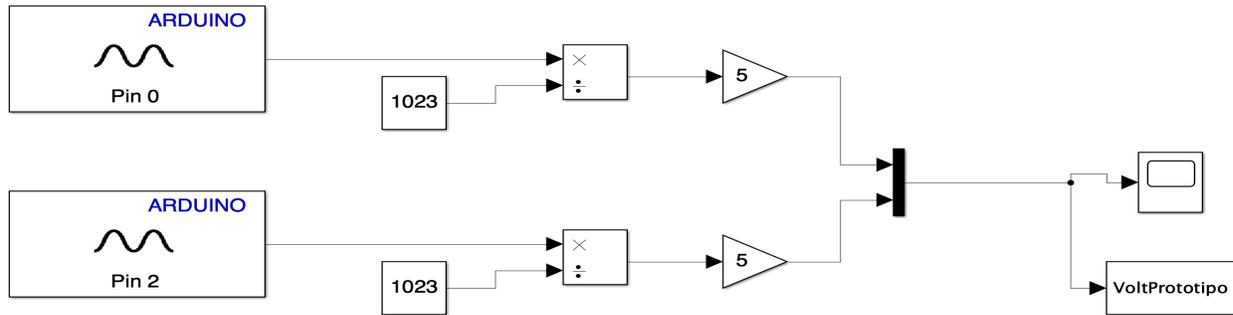


Figura 5. Programación de Simulink para la captación de datos mediante la tarjeta Arduino.

6. Propuesta futura de un sistema de programación

Para la programación del dispositivo se usará Matlab y Simulink, ambas herramientas poderosas y que facilitaran la lectura y análisis de los datos.

Simulink es un espacio para programar de manera visual con diagramas de bloque para Model-Based Design. Dentro de él se pueden realizar simulaciones automáticas de código y pruebas continuas de alto nivel. Esta herramienta viene a ser una solución y una simplificación de los procesos externos o con cierto grado de abstracción de los fenómenos físicos envueltos además de poder generar el código en lenguaje C o HDL de calidad de producción que se comporta igual que el modelo creado en Simulink [6][7]

La programación realizada desde este entorno en conjunto con la tarjeta Arduino es muy sencilla, pues se resumen muchos de los códigos a bloques cuyas funciones ya están programadas o a los cuales hay que cambiarles parámetros para que ejecuten una tarea de la manera en que necesitamos que se haga.

Esta programación ha sido desarrollada con un modelo que condensa el entorno que debe controlarse para hacer posible la obtención de datos autónoma. Con el uso de dos potenciómetros alimentados con 5 voltios, que se conectan a la tarjeta Arduino se envían dos señales que representan la señal de control y la señal del sensor.

En primer lugar, se usará Arduino como un receptor de los pulsos captados por el sensor de luz (señal de los potenciómetros). Para esto se usará el bloque de entrada analógica (Analog Input), que se abrirá, configurará y controlará la tarjeta desde el inicio de la ejecución del

modelo. Con este bloque se puede adquirir datos en cada paso de tiempo o una vez por ejecución del modelo, analizar los datos o usar como entrada a un sistema en el modelo y opcionalmente mostrar resultados con la ayuda de otros bloques [8].

Después de haberse captado la información necesaria esta debe procesarse. Arduino uno tiene una resolución de 10 bits, es decir valores entre 0 y 1023, en el caso de un Arduino Uno, el valor de 0 voltios analógico es expresado en digital como B0000000000 (0) y el valor de 5V analógico es expresado en digital como B111111111 (1023). Se usa el botón Dividir (Divide) este bloque divide el valor entre 1023[9] y lo envía a un conector que toma todas las demás señales captadas por las demás entradas análogas. Este se llama Mux (Mux), el bloque Mux combina sus entradas en la salida de un solo vector. Una entrada puede ser un escalar o vector de señal. Todas las entradas deben ser del mismo tipo de datos y de tipo numérico. Para obtener información sobre la creación y descomposición de vectores, ver señales de Mux [10]. Ver figura 5.

Por último, es pasada a un bloque llamado Scope (Scope) que no es más que una gráfica en tiempo real de las señales que se deseen, mostrada en la pantalla y para la cual es posible guardar datos de las diferentes variables para ser posteriormente estudiadas. [11]

La variable puede ser mostrada en Matlab escribiéndose las líneas mostradas en la figura 6, mostrando la estructura de esta variable en la primera y séptima línea. En la quinceava línea se pueden visualizar los datos respecto al tiempo (figura 7) que se estuvieron graficando durante un periodo de pruebas. Estos datos

pueden ser analizados posteriormente si se tratara de una prueba realizada con el sensor. Aunque no es un proceso automático, da solución a un área que abarca el proceso de análisis autónomo.

```

Command Window
>> Voltaje
Voltaje =
  struct with fields:
    time: [10175x1 double]
    signals: [1x1 struct]
    blockName: 'Grafica_senal_analog_001/Scope'
>> Voltaje.signals
ans =
  struct with fields:
    values: [10175x2 double]
    dimensions: 2
    label: ''
    title: []
    plotStyle: [1 1]
fx >> Voltaje.sinals.value
    
```

Figura 6. Estructura de programación usada en Matlab para visualizar la data obtenida con Simulink.

Command Window	
0.7074	1.0802
0.8407	1.6325
0.9238	1.5787
0.9971	1.5347
1.0753	1.4858
1.1486	1.4516
1.2463	1.4125
1.3245	1.3685
1.3978	1.3245
1.4712	1.2757
1.5347	1.2414
1.6129	1.1926
1.6569	1.1535
1.7351	1.1193
1.7937	1.0802
1.8573	1.0411
1.9404	1.0068
2.0088	0.9677
2.0577	0.9286

Figura 7. Datos captados y guardados por Simulink mostrados desde Matlab

7. Conclusiones

Una vez hechas las pruebas y analizados los datos se puede concluir que:

El modelo probado utilizo un $\Lambda_c=1.029$ mm para una fibra Óptica Multimodo de Índice Gradual 62.5/125, permitió adquirir datos de deformación de un elemento (cilindro de pruebas).

El sensor desarrollado se fundamenta en una reducción de la amplitud por perdidas localizadas, la intensidad lumínica es emitida por una fuente y las deformaciones causadas dan por resultado que no exista reflexión total interna, lo que se comprueba con el valor R2 de 0.902 indicando que esta relación Perdida-Deformación es sumamente alta.

La impresión tridimensional permite crear piezas que pueden ser usadas en sensores de fibra óptica de microdeflexión, con buenos resultados.

El software de AutoCAD, Inventor, es una útil herramienta de diseño, facilitando el proceso constructivo del sistema. Además, Inventor permite hacer modificaciones sumamente fáciles a los primeros diseños para mejorarlos o para ser usados con una fibra de diferentes propiedades a la que se utilizó inicialmente.

Se estructuraron pruebas que permitieron obtener la data suficiente para establecer una ecuación que rige el comportamiento del sensor. La ecuación para nuestro modelo es $\delta=0.333\text{mm(perd/dB)}$. El rango actual máximo medido por el sensor es de 0.45 dB de pérdida lumínica.

El análisis de la data registro un valor de la desviación media de 0.2163 y una desviación estándar de 0.269, un error Relativo promedio de 0.214 y un Coeficiente de varianza de 0.261 Estos valores son buenos y aceptables, sin embargo, en futuras investigaciones deben perfeccionarse y mejorar la precisión del dispositivo de monitoreo apuntando a valores de error de dispositivos comercial de monitoreo estructural.

Se observa una marcada relación entre el uso del sensor y su capacidad de respuesta debido a las deformaciones generadas por las primeras cargas, donde a mayor cantidad de ciclos de carga es menor la capacidad de monitoreo, pero los valores se hacen más constantes.

8. Referencias Bibliográficas

- [1] °I. García, J. Zubia, G. Durana, G. Aldabaldetrek, M. Illarramendi and J. Villatoro, "Optical Fiber Sensors for Aircraft Structural Health Monitoring", Sensors, vol. 15, no. 7, pp. 15494-15519, 2015.
- [2] A. Lopez, Sensores de Brillouin de alcance extendido, Universidad de Alcalá, Madrid, España., 2014.
- [3] A. Kishen and A. Rafique, "Tooth structural health monitoring with a fiber optic microbend sensor", Lasers in Dentistry XII, 2006.
- [4] M. Castro, "PLA. Material, interés y consejos de impresión", Impresión 3D Prototipado | 3D Printing Prototyping | Dima 3D,

2015. [Online]. Available: <http://www.dima3d.com/pla-material-interes-y-consejos-de-impresion-3/>. [Sept. 3, 2017].
- [5] J. Zubia, "Plastic Optical Fibers: An Introduction to Their Technological Processes and Applications", *Optical Fiber Technology*, vol. 7, pp. 101-140, 2001.
- [6] "Simulink - Simulación y diseño basado en modelos", *La.mathworks.com*, 2018. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/products/simulink.html>. [Feb. 1, 2018].
- [7] J. Aracil and F. Gomez-Estern, "Introducción a Matlab y Simulink", *Esi2.us.es*, 2018. [Online]. Available: http://www.esi2.us.es/~fabio/apuntes_matlab.pdf. [Nov 16, 2017].
- [8] "Analog Data Acquisition- MATLAB & Simulink", *Mathworks.com*, 2017. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/daq/analog-data-acquisition.html>. [Feb. 1, 2018].
- [9] "Divide one input by another - Simulink- MathWorks America Latina", *La.mathworks.com*, 2017. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/help/simulink/slref/divide.html>. [Feb. 4, 2018].
- [10] "Virtual Signals- MATLAB & Simulink- MathWorks Italia", *It.mathworks.com*, 2017. [Online]. Available: <https://it.mathworks.com/help/simulink/ug/virtual-signals.html>. [Feb. 4, 2018].
- [11]"Virtual Signals- MATLAB & Simulink- MathWorks Italia", *It.mathworks.com*, 2017. [Online]. Available: <https://it.mathworks.com/help/simulink/ug/virtual-signals.html>. [Feb. 4, 2018].