

Modelaje y simulación de un sensor de curvatura

Roxana Heredia Ch. ⁽¹⁾ Mónica Murillo P. ⁽²⁾ Germán Vargas L. ⁽³⁾
Facultad de Ingeniería Eléctrica y Computación. ⁽¹⁾
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)
Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral
Apartado 09-01-5863. Guayaquil-Ecuador
rheredia@fiec.espol.edu.ec ⁽¹⁾ tmurillo@fiec.espol.edu.ec ⁽²⁾
Profesor FIEC-ESPOL, gvargas@fiec.espol.edu.ec ⁽³⁾

Resumen

En el presente trabajo se desarrolló el modelaje y simulación de un sensor de curvatura, con el cual se pudo analizar las pérdidas causadas por la deformación geométrica de la estructura del cable de fibra óptica. Para modelar este sensor se revisaron los conceptos de la naturaleza de la luz, propagación de la luz utilizando fibra óptica y sensores ópticos, además tuvimos que recurrir a conocimientos básicos de mecánica de sólidos para poder determinar la relación entre una fuerza externa aplicada a un sistema para generar un radio de curvatura determinado sobre la fibra óptica. Al mismo tiempo MATLAB nos presenta una interfaz grafica bastante atractiva para mostrar los resultados del sensor de curvatura, como lo es GUIDE. Para realizar la simulación se tuvo que poner en práctica los conocimientos antes mencionados y acoplarlos con el lenguaje de programación que utiliza dicha interfaz. Los resultados mostraron de forma clara que para radios menores al radio crítico las pérdidas de curvaturas aumentan y pueden llegar a afectar en su totalidad la fidelidad de la señal transmitida a través del enlace óptico.

Palabras Claves: Pérdidas, curvatura, deformación, fibra óptica.

Abstract

The present work is based on the modeling and simulation of a curvature sensor. The sensor works by analyzing the losses caused by the geometrical deformation of the structure of the fiber optic cable. To model this sensor, some concepts were reviewed such as: the nature of light propagation using fiber optics, optical sensors theory and also we had to review basic solid mechanics to determine the relationship between an external force applied to a system to generate a given radius of curvature on the optical fiber. MATLAB programming language presents a very attractive graphical interface such as GUIDE to show results of our curvature sensor. To do the simulation, we had to put into practice previous knowledge and couple them with aforementioned programming language that uses that interface. The results showed that for radii less than the critical radius of curvature losses increases and they can affect the entire fidelity of the signal transmitted through the optical link.

Keywords: Loss, Curvature, deformation, optical fiber.

1. Introducción

Hoy en día las aplicaciones de la fibra óptica son múltiples, producen grandes avances en el mundo tecnológico. Diversas áreas se han visto beneficiadas, tales como medicina, arqueología, mecánica, telecomunicaciones, etc. La fibra óptica posee características que han superado el uso de componentes convencionales, las bondades de la fibra óptica son innumerables, pero de igual manera posee características que en ciertas situaciones producen atenuación o pérdida en la señal.

Las pérdidas que se producen en la señal son causadas por factores intrínsecos, tales como la composición del material, que se usa en la fabricación de la fibra y factores extrínsecos como geometría de la fibra, defectos de cableado, etc.

El tema de estudio principal es la pérdida por curvatura de carácter extrínseco, en el momento de tener pérdidas se pone en duda la fiabilidad de la transmisión-recepción de la señal, por tanto consideramos oportuno plantear el modelaje y diseño de un sensor que nos permita determinar las pérdidas en la señal a través de una fibra mono-modo.

2. Sensores ópticos

Los sensores compuestos de fibra óptica poseen la capacidad de detección de cambios cuando se somete a la fibra a diferentes parámetros como la tensión mecánica, temperatura, presión, humedad, viscosidad, etc. Imitando así diferentes ambientes hostiles a los que puede ser sometida la fibra y de esta manera realizar un seguimiento continuo de propiedades de la fibra óptica como la intensidad, fase, polarización, longitud de onda o el tiempo de tránsito de la luz en la fibra [1].

Se utiliza la fibra óptica para aplicaciones de detección con el propósito de comunicarse con un dispositivo sensor o para ser usada como el propio sensor. En los sensores de fibra óptica, la información se transmite principalmente a sensores ópticos por un cambio en cualquiera de las fases (modulación), polarización, frecuencia, intensidad o una combinación de los mismos. Sin embargo, el fotodetector siendo un dispositivo semiconductor, se encarga únicamente de medir la intensidad de la luz en la superficie. Así que la detección de la polarización, fase o modulación de frecuencia es a base de circuitos de procesamiento de señales ópticas.

2.1 Clasificación de sensores ópticos.

Existen varios tipos de sensores de fibra óptica. Estos se pueden clasificar como:

- Sensores extrínsecos.
- Sensores intrínsecos.

Sensores extrínsecos.

En los sensores extrínsecos la detección se lleva a cabo en una región fuera de la fibra y la fibra esencialmente sirve como un medio para la transmisión de la luz a la región de detección de manera eficiente y en una forma deseada. En este tipo de sensores las fibras ópticas sirven estrictamente como guías de onda que conectan la fuente, zona de medida y detector.

Sensores intrínsecos.

Sensores intrínsecos, usan la fibra como una guía de onda hasta el lugar donde la magnitud de interés se quiere medir, un tramo se somete a un fenómeno externo, en el cual una o más de las propiedades físicas de la fibra sufren un cambios; sin embargo la luz permanece dentro de la fibra en todo momento. A diferencia de los sensores extrínsecos, la magnitud externa actúa directamente sobre la fibra.

2.2 Componentes de un sensor.

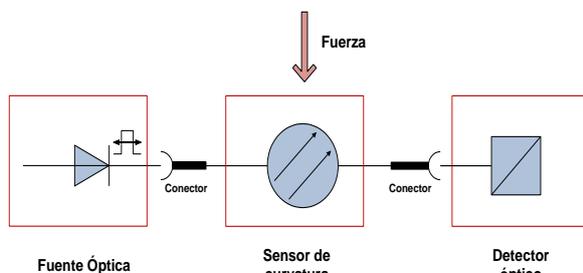


Figura 1. Esquema básico de un sensor intrínseco de fibra óptica.

En la figura 1 se muestra un diseño del sistema de un sensor de curvatura de fibra óptica tipo intrínseco en el que se observa como la fuerza actúa directamente sobre la fibra. Este sistema está compuesto por:

- Fuente de luz.
- Fibra óptica.
- Conectores para acoplar la fibra.
- Detector óptico.

3 Descripción del problema.

En un enlace óptico es importante garantizar que la señal llegue al receptor con un nivel aceptable de potencia para que la transmisión de la información sea fiable, muchas veces en la instalación o tendido de la fibra se producen curvaturas a lo largo de esta, que causan atenuación de la señal, por el hecho de que la interfaz núcleo-revestimiento deja de ser geoméricamente uniforme: la luz se refleja en algunos puntos con ángulos diferentes a los de la trayectoria inicial (figura 2), perdiendo así el principio de la reflexión total interna generándose modos de fuga hacia el revestimiento, lo que implica un riesgo en la recepción de la señal.

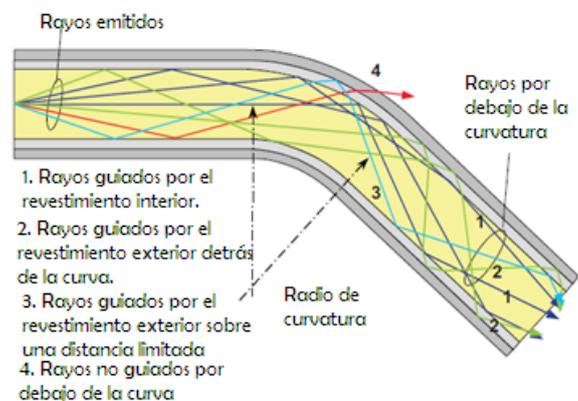


Figura 2. Trayectoria de los rayos de luz.

En la figura 2 se aprecia las diferentes trayectorias de los rayos de luz debido a la flexión de la fibra; la dirección de propagación de cada rayo individual cambia con respecto al eje de la fibra. En el caso de fibras multimodo, una parte de los rayos siempre se pierde ya que los rayos exceden el ángulo de reflexión total en la interfaz entre el núcleo y el revestimiento. Cuando las fibras están dobladas, parte de la luz ya no será guiada por el núcleo; en las curvas más alejadas, esta luz puede ser redirigida de manera que entra en el rango de aceptación del revestimiento. El revestimiento tiene una atenuación significativamente mayor que el núcleo.

Las pérdidas por curvatura se clasifican según el radio de curvatura de la fibra como se muestra en la figura 3:

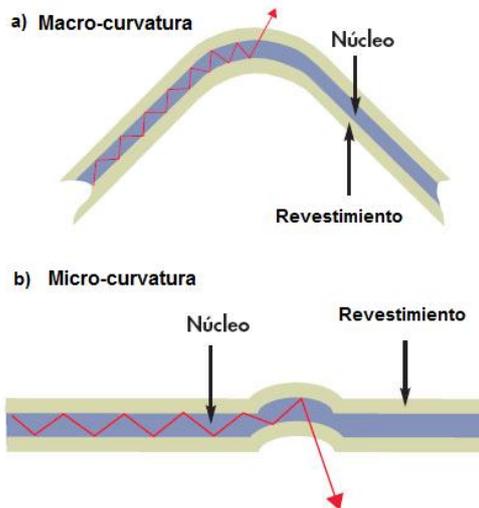


Figura 3. Pérdidas generadas por curvaturas en la fibra óptica a) Macrocurvatura b) Microcurvatura. Ref. [2]

3.1 Pérdidas por macrocurvatura.

Estas pérdidas son ocasionadas por factores externos que producen curvaturas pequeñas en la fibra (radio menor a 4 o 5 cm), la cual provoca que los haces de luz logren escapar del núcleo, debido a que superan el ángulo máximo de incidencia admitido para la reflexión total interna; estas pérdidas suelen ser inapreciables hasta que el radio de curvatura sea menor que el radio crítico. En la figura 3.2a se observa un radio de curvatura reducido que hace escapar a los modos de luz de mayor orden del núcleo y, por lo tanto, provoca pérdida de señal.

3.2 Pérdidas por microcurvatura.

La microcurvatura es causada por imperfecciones microscópicas en la geometría de la fibra resultantes del proceso de fabricación, como los cambios menores en el diámetro del núcleo, o límites desiguales entre el núcleo y el revestimiento. El estrés mecánico, la tensión, la presión o la torsión de la fibra también pueden causar microcurvaturas. La figura 3.2b describe la microcurvatura en una fibra y su efecto en el camino de la luz.

3.3 Radio crítico de curvatura (Rc).

La atenuación de la fibra varía exponencialmente con el radio de curvatura, estas pérdidas son inapreciables hasta que se sobrepasa un radio de curvatura (bending radius) menor al permitido, este radio crítico se establece en unas 10 a 12 veces el diámetro exterior del cable y para la fibra monomodo

utilizada en la simulación el radio crítico tiene un valor de 15mm [3].

Cuando la curva de la fibra es menor que el radio crítico, la velocidad de fase del modo se debe aumentar a una velocidad mayor que la velocidad de la luz para que todos los rayos de luz tengan el mismo frente onda y como esto es imposible provoca que algunos rayos de luz dentro de la fibra se convierta a los modos de orden superior. Estos modos de orden superior se pierden o irradian fuera de la fibra [4]. En consecuencia la intensidad de luz de salida está relacionado con el radio de curvatura, por lo tanto, mediante la detección de la relación de la curvatura en función de la fuerza se pueden medir los cambios de intensidad de la luz en la salida, formando así un sensor.

Coefficiente de atenuación (Modelo Marcuse).

Al pasar los rayos de luz a través de la fibra se produce atenuación en la potencia de la señal, por tanto se debe hablar de un coeficiente de atenuación.

La expresión matemática para calcular la potencia óptica es:

$$P_L = P_0 \cdot e^{-\alpha' \cdot L} \quad (1)$$

Donde P_L y P_0 son valores de potencia de la señal que viaja a través de un tramo L y el extremo inicial de fibra óptica respectivamente; α' es el valor del coeficiente de atenuación.

Para no caer en errores de cálculos se debe tener en cuenta las unidades de medición de los parámetros: longitud del tramo de fibra (L) en [Km] y coeficiente de atenuación (α') [Km⁻¹].

En casos prácticos la pérdida de potencia de la señal o atenuación se mide en dB/Km, entonces usaremos la siguiente expresión:

$$\alpha = \frac{10}{L} \log \frac{P_L}{P_0} = 4.343 \cdot \alpha' \quad (2)$$

Se puede llegar a otra expresión del coeficiente de atenuación utilizando la ecuación para fibra monomodo de Dietrich Marcuse [5], quien derivó las ecuaciones de las componentes del campo eléctrico de modo guiado y usando un poco de matemáticas avanzadas llegó a la siguiente expresión para el coeficiente de atenuación:

$$\alpha = \frac{(\pi^{1/2})k^2}{2(\gamma^{3/2})V^2(R^{1/2})[K_1(\gamma a)]^2} e^{[-\frac{2}{3}(\gamma^3/\beta^2)R]} \quad (3)$$

Donde R es el radio de curvatura de la fibra óptica, K_1 es una función de Bessel modificada que posee como argumento a la multiplicación entre $\gamma = (\beta^2 - n_2^2 k^2)^{1/2}$ y el radio de la fibra, $k = (n_1^2 k^2 - \beta^2)^{1/2}$, V es la frecuencia normalizada, y β es la parte real del modo fundamental.

4. Simulación del sensor de curvatura.

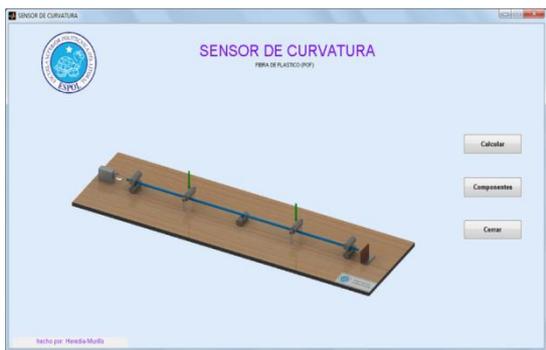


Figura 4. Ventana inicial del programa.

El modelo del sensor de curvatura se divide en dos partes: la parte mecánica y la parte opto-electrónica del sistema.

La parte mecánica (sistema de rodillos) describe la relación entre el radio de curvatura generado en la fibra y la fuerza externa aplicada al sistema, esta fuerza produce una distorsión en la geometría de la estructura de la fibra óptica y gracias a las características de la fibra se la modeló como una viga empotrada en ambos extremos. A partir de este punto se podrá definir cuanta fuerza se debe aplicar al sistema para que supere el radio crítico de la fibra monomodo.

La parte opto-electrónica representa el sistema formado por la fuente de luz, la fibra óptica y el fotodetector. Cada uno de los componentes tiene sus propias características, las cuales se analizaron para poder utilizarlos de forma adecuada.



Figura 5. Ventana componentes del sensor.

En la figura 5 se puede observar la ventana del programa que contiene los componentes del sensor, al presionar uno de los botones correspondiente a un componente como por ejemplo FUENTE se desplegará una nueva ventana con las curvas correspondientes a las características de dicho elemento.

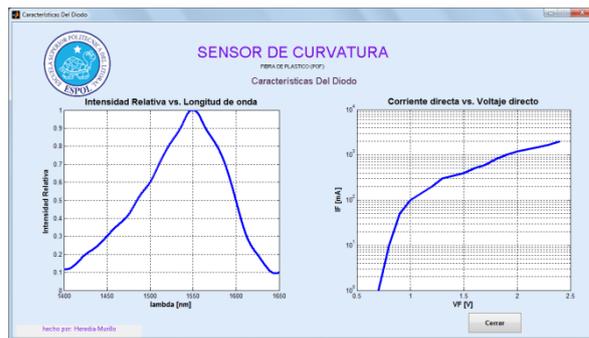


Figura 6. Ventana de las características de la fuente (diodo led).

En la figura 6 se muestran las gráficas I vs λ e I_F vs V_F correspondientes a la fuente de luz (LED infrarrojo L1550-36), las cuales son replicas de las curvas que nos da el fabricante en la hoja de datos del componente [6].

Al desplegarse la ventana principal (figura 4) y escoger la opción de calcular se abre la ventana mostrada en la figura 7, en la cual se puede ingresar la magnitud de fuerza externa deseada para luego mostrar los valores resultantes, tales como: radio de curvatura generada, potencia inicial, coeficiente de atenuación (curvatura), potencia óptica (2m), potencia óptica (4m) y voltaje en el fotodetector.

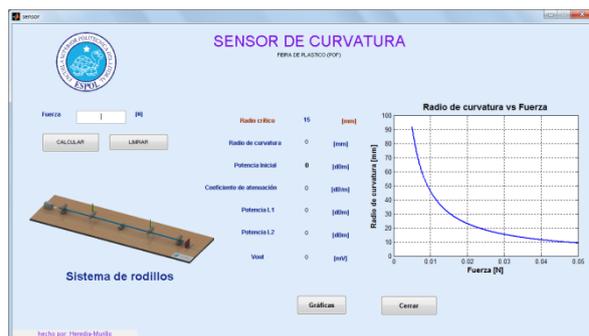


Figura 7. Ventana de simulación del programa.

Al ingresar el valor de la fuerza en el programa y presionar el botón de calcular la ventana mostrada en la figura 7 da apertura a una ventana nueva como se muestra a continuación.

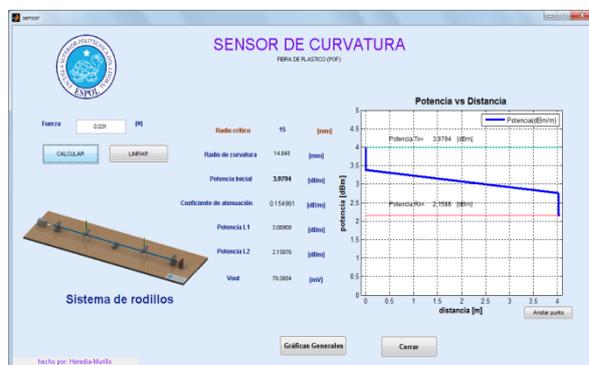


Figura 8. Ventana de resultados de simulación del programa.

Al mismo tiempo se genera la gráfica de Potencia vs. Distancia la cual nos muestra la magnitud y pérdidas de la potencia óptica a lo largo de todo el enlace.

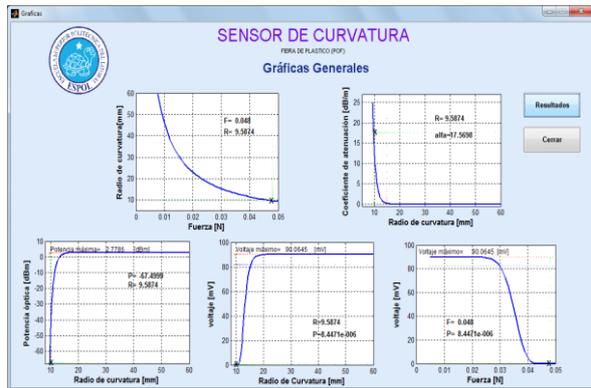


Figura 9. Ventana de gráficas generales resultantes de la simulación del programa.

En la figura 9 se observan las gráficas de los parámetros y las variables ingresados en la simulación al seleccionar el botón denominado “Gráficas Generales” mostrado en la ventana de resultados de la simulación.

5. Análisis de resultados.

Una parte importante para la simulación es la relación del radio de curvatura con la fuerza aplicada, por tanto se utilizó el modelo mecánico de viga empotrada en ambos extremos para obtener la gráfica de Fuerza vs. Radio de curvatura mostrada en la figura 10.

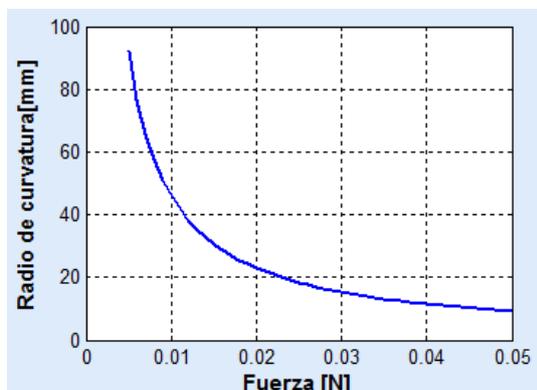


Figura 10. Gráfica Radio de curvatura vs.fuerza externa.

Se observa en la figura 10 que a partir de una fuerza aplicada, se genera un radio de curvatura en la fibra, la relación que hay entre estas variables es inversa, es decir que a mayor fuerza aplicada el valor del radio de curvatura decrece.

La fibra monomodo utilizada para esta simulación a una longitud de onda de 1550nm posee como dato un radio crítico de 15mm, por tanto se aprecia en la gráfica que, al aplicar una fuerza de 0.03N se obtiene un radio de curvatura aproximado al radio crítico

establecido por el fabricante. Podemos decir que fuerzas mayores a 0.03 N generan radios menores al valor del radio crítico, entonces se observan pérdidas apreciables de curvatura en la fibra.

A continuación se muestran los resultados de la parte óptica del sistema, en la figura 11 se presenta la variación del coeficiente de atenuación con relación al radio de curvatura.

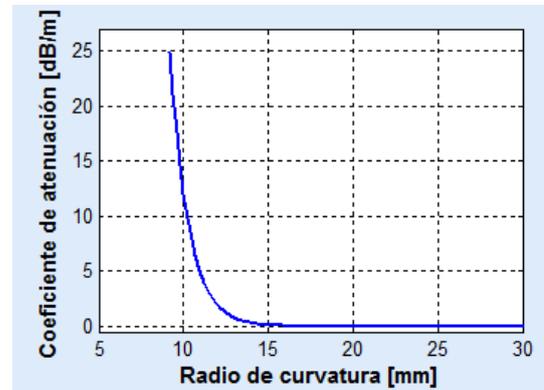


Figura 11. Coeficiente de atenuación vs. Radio de curvatura.

En la Gráfica Coeficiente de atenuación vs. Radio de curvatura se puede verificar que para valores de radios menores al radio crítico se presenta el aumento en el coeficiente de atenuación, también se puede notar que mientras el valor de radio va aumentando hasta aproximarse a 15mm se observa que el coeficiente de atenuación va disminuyendo hasta llegar a cero.

Después de analizar las gráficas de la relación del radio de curvatura con la fuerza aplicada y el coeficiente de atenuación, se muestra en la figura 12 la gráfica de la Potencia óptica final vs. Radio de curvatura



Figura 12. Potencia óptica vs. Radio de curvatura.

Los valores de potencia óptica que se muestran en la figura 12 han sido calculados a la entrada del receptor por tanto se puede decir que la potencia a recibir es igual a la potencia de la fuente de luz menos las

pérdidas por: conectores, longitud de la fibra y curvaturas. Las pérdidas por curvatura son producidas en dos ocasiones a lo largo de la fibra, debido a que el sistema mecánico produce dos curvaturas, ambas con igual coeficiente de pérdidas puesto que en el modelaje del sistema mecánico se consideró a la fibra como una viga empotrada en ambos extremos por esta razón la fuerza que se aplica en los apoyos para generar cada una de las curvas deben tener igual magnitud. Además en la gráfica se observa que el valor máximo de la potencia en el receptor es 2.77dBm, también se puede ver que el valor de la potencia disminuye para valores menores al radio crítico de curvatura en la fibra.

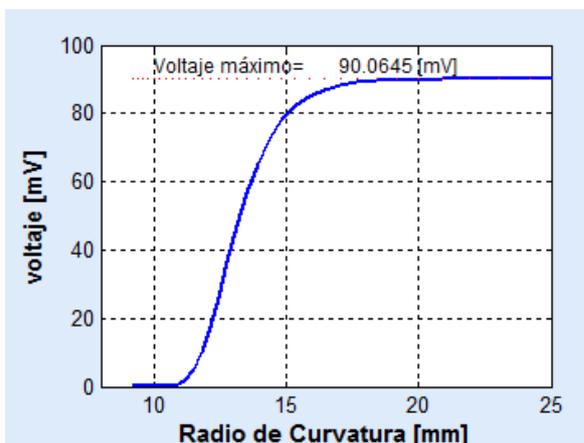


Figura 13. Voltaje vs. Radio de curvatura.

La figura 13 muestra la variación del voltaje del fotodetector con respecto al radio de curvatura, en esta gráfica se puede observar una disminución en el voltaje de la señal que llega al fotodetector al llegar a 15mm, concuerda con lo que se observó al analizar la figura 13 puesto que llegando a este radio crítico se distingue como la señal se ve afectada por las pérdidas, mientras que para valores mayores al radio crítico la señal se mantiene en un valor estable de 90mV aproximadamente.

Las gráficas mostradas han sido bastantes generales con respecto a la variable radio de curvatura, a continuación mostraremos el análisis de diferentes escenarios para ilustrar de mejor manera el funcionamiento de la simulación del sensor de curvatura.

- Primer escenario: la fuerza aplicada genera un radio mayor al radio crítico de 15mm.

Tabla 1 Simulación de una fuerza aplicada= 0.01N.

Fuerza Aplicada	0.01 N
Radio de curvatura	46.02 mm
Potencia Inicial del sistema	3.97 dBm
Coefficiente de atenuación	$2.11 \cdot [10]^{(-13)}$ dB/m

Pérdida de conectores	0.3 dB
Potencia (L1=2m)	3.37 dBm
Potencia (L2=4m)	2.77 dBm
Voltaje en fotodetector	90mV

En la tabla 1 se puede apreciar que al aplicar una fuerza de 0.01 N, el radio de curvatura generado es de aproximadamente 4cm con el cual el coeficiente de atenuación es aproximadamente cero, por tanto las pérdidas a considerarse en el sistema son las producidas por los conectores.

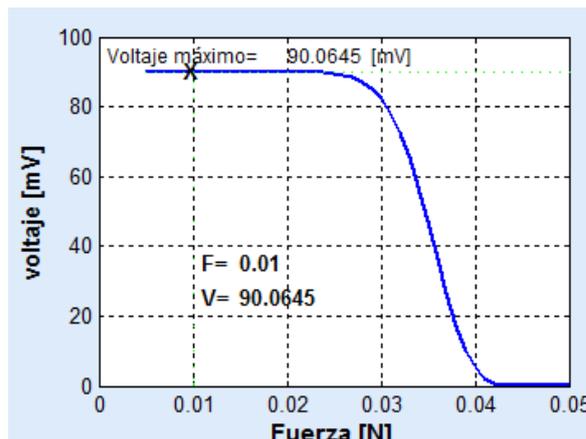


Figura 14 Gráfica Voltaje en el fotodetector vs. Fuerza

En esta grafica se expresa la relación del voltaje en el fotodetector con la fuerza, se muestra el valor de voltaje esperado en el fotodetector (90.06mV) al haber aplicado una fuerza de 0.01 N.

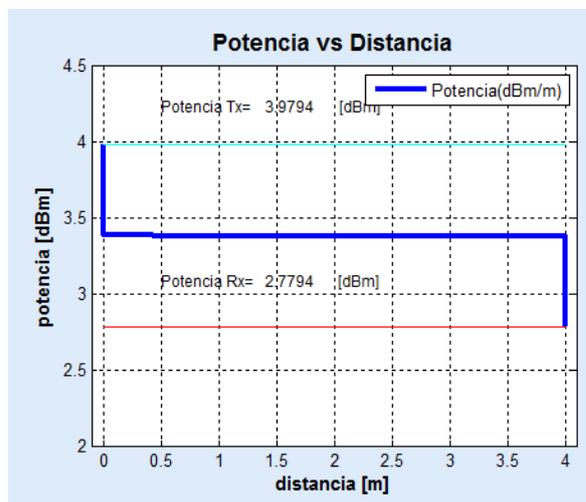


Figura 15 Gráfica Potencia vs. Distancia con una fuerza de 0.01 N.

En la figura 15 se puede apreciar de mejor forma los valores expresados en la tabla 1, además podemos observar que la potencia de la señal es afectada únicamente para este escenario por las pérdidas de los conectores en los extremos del sistema, por otro lado se puede concluir que 90 mV es el máximo valor de voltaje que se puede obtener en el receptor.

- Segundo escenario: la fuerza aplicada genera un radio igual aproximado al radio crítico de 15mm.

Tabla 2 Simulación de una fuerza aplicada= 0.03 N.

Fuerza Aplicada	0.03 N
Radio de curvatura	15.33 mm
Potencia Inicial del sistema	3.97 dBm
Coefficiente de atenuación	0.099 dB/m
Pérdida de conectores	0.3 dB
Potencia (L1=2m)	3.18 dBm
Potencia (L2=4m)	2.38dBm
Voltaje en fotodetector	82.17 mV

En la Tabla 2 se puede verificar que para un radio con valor igual al del radio crítico el coeficiente de atenuación ha aumentado y deja de ser inapreciable como sucedió en el escenario anterior en el cual la atenuación era aproximadamente nula.

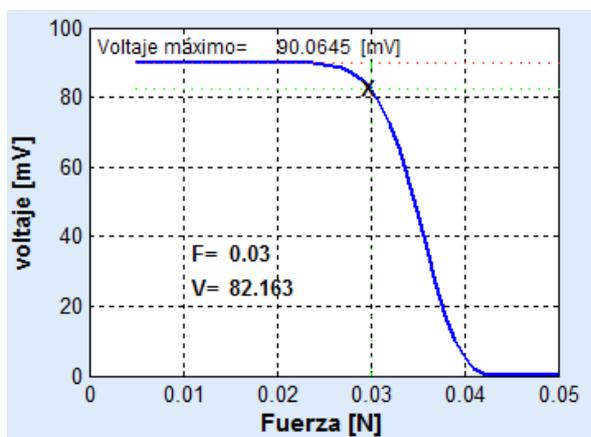


Figura 16 Gráfica de Voltaje en el fotodetector vs. Fuerza

Con esta grafica se corrobora el valor del voltaje en el fotodetector al aplicar una fuerza de 0.03 N, además se observa como el voltaje empieza a disminuir aceleradamente.

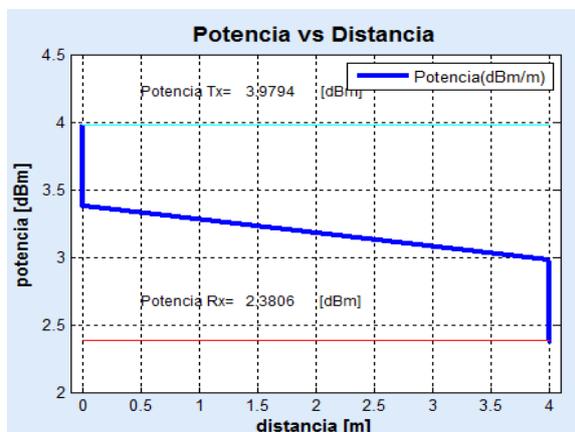


Figura 17 Potencia vs. Distancia con una fuerza de 0.03 N.

En la figura 17 se aprecian como hay un decremento en la potencia por las pérdidas de los conectores en los extremos, mientras que en el tramo de 0-4m seguir disminuyendo a razón de 0.099 dB/m, por causa de las curvas generadas.

- Tercer escenario: la fuerza aplicada genera un radio menor al radio crítico de 15mm.

Tabla 3 Simulación de una fuerza aplicada= 0.034N.

Fuerza Aplicada	0.034 N
Radio de curvatura	13.53 mm
Potencia Inicial del sistema	3.97dBm
Coefficiente de atenuación	0.4994 dB/m
Pérdida de conectores	0.3dB
Potencia (L1=2m)	2.380dBm
Potencia (L2=4m)	0.781dBm
Voltaje en fotodetector	56.86mV

En esta tabla se observa que el valor del coeficiente de atenuación es mayor que la pérdida por un conector y que la diferencia entre la potencia inicial y la potencia medida a la distancia de 4m es de aproximadamente 3dB, esto quiere decir que el voltaje del fotodetector debe ser aproximadamente la mitad, como se puede apreciar en la Tabla 3.

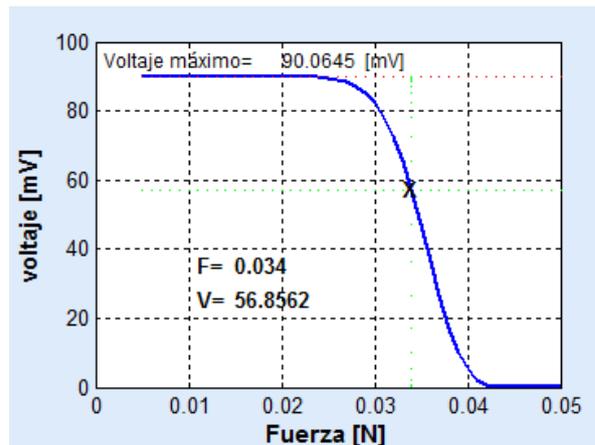


Figura 18 Gráfica de Voltaje en el fotodetector vs. Fuerza.

En la gráfica se observa como disminuye el valor del voltaje en el fotodetector al aplicar una fuerza de 0.034 N, ha disminuido a casi la mitad; esto era de esperarse ya que la potencia calculada a los 4m posee un decremento de 3dB comparada con la potencia inicial.

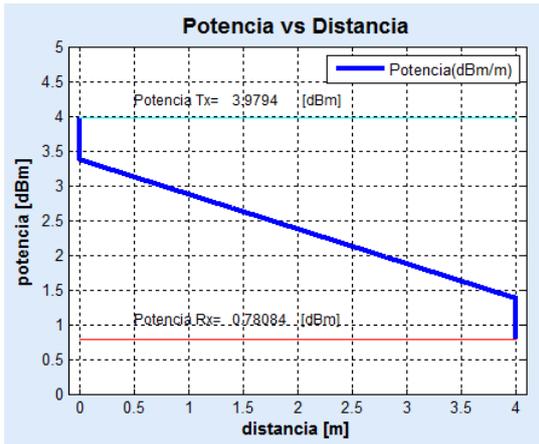


Figura 19 Potencia vs. Distancia con una fuerza de 0.034N.

En esta grafica se aprecia como nuestra potencia en la fibra decae 3dBm aproximadamente, esto significa que el voltaje esperado en el fotodetector es la mitad.

- Cuarto escenario: la fuerza aplicada genera un radio, con el cual sobrepasa el valor de la sensibilidad del receptor (-58.97dBm).

Tabla 4 Simulación de una fuerza aplicada= 0.048N.

Fuerza Aplicada	0.048 N
Radio de curvatura	9.58 mm
Potencia Inicial del sistema	3.97dBm
Coefficiente de atenuación	17.57 dB/m
Pérdida de conectores	0.3
Potencia (L1=2m)	-31.76 dBm
Potencia (L2=4m)	-67.49 dBm
Voltaje en fotodetector	8.44708nV

En la tabla 4 se muestra que para una fuerza aplicada de 0.048N el radio de curvatura generado es aproximadamente un 1cm, cabe notar que la pérdida por metro causada por estas curvaturas es un valor bastante elevado.

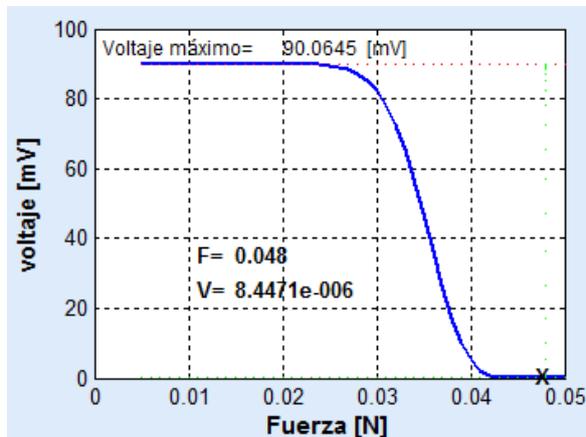


Figura 20 Gráfica voltaje en el fotodetector vs. Fuerza.

En esta gráfica se nota que al aplicar fuerzas mayores a 0.04N el voltaje en el fotodetector es cercano a cero.

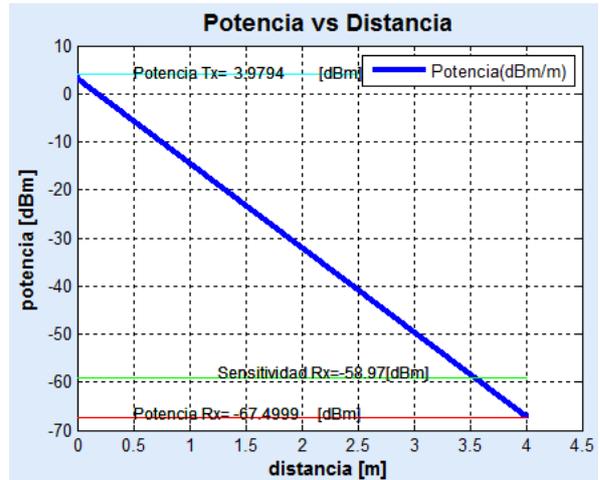


Figura 21 Potencia vs. Distancia con una fuerza de 0.048 N.

En la figura 21 se puede apreciar que el coeficiente de atenuación es grande que las pérdidas potencia a causa de los conectores ya no se visualizan para este caso, y a una distancia de 4m la potencia en la fibra es menor a lo que puede detectar el receptor sin cometer errores.

6. Conclusiones

1. Se analizó las pérdidas ocasionadas debido a las curvaturas generadas por el sistema de rodillos a lo largo del tramo de fibra SMF-28, realizando las simulaciones con diferentes valores de fuerza externa aplicada al sistema se pudo observar y corroborar que al tener radios menores a radio crítico, 15mm, el coeficiente de atenuación aumenta a medida que el radio disminuye, la potencia óptica de la señal transmitida se ve comprometida al igual que la fidelidad de la misma cuando la potencia sobrepasa el valor de la sensibilidad del receptor, -58.97dBm, este caso se evidenció al aplicar una fuerza de 0.048N.
2. Se ilustró como la fuerza externa aplicada al sistema mecánico guarda una estrecha relación con el radio de curvatura generada en el tramo de fibra óptica, dicha relación fue descrita en la ecuación 3.14, luego de haber realizado un análisis estático del sistema y definir según la mecánica de sólidos al sistema del sensor como una viga con ambos extremos empotrados.
3. Se observó a través de una gráfica Potencia vs. Distancia como disminuye la potencia de la señal al pasar por los conectores y al transitar por el tramo de fibra afectada por un factor extrínseco, como lo es la fuerza aplicada al sistema generador de curva, puesto que al modificar la geometría del cable de fibra monomodo se ve modificada la trayectoria del rayo de luz, por esta razón se producen pérdidas, las cuales fueron calculadas mediante la ecuación del coeficiente de atenuación por pérdidas de curvatura (D. Marcuse).

7. Referencias

- [1] Bahareh Gholamzadeh, and Hooman Nabovati - Fiber Optic Sensors - World Academy of Science, Engineering and Technology 42- -2008
- [2] Hinojosa Gómez Luis Carlos - Tópicos selectos de fibra óptica-Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo - -2007
- [3] Proaño Julio, Serrano Xavier - Sistema de monitoreo (fibra óptica)- Capítulo 4 - Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador -2008
- [4] Edsel Enrique Urueña León - INTRODUCCIÓN A LA FIBRA ÓPTICA-Comunicación con Fibra Óptica
- [5] .D. Marcuse - Curvature loss formula optical fibers - J. Op. Soc. Am, Vol. 66, pp. 216-220, 1976.
- [6] Epitex- PRODUCTOS
http://epitex.com/products/led_plastic_mold/pdfs/L1550-36.pdf, fecha de consulta febrero 2012.