

RED DE SENSORES DE FIBRA ÓPTICA PARA LA PREVENCIÓN DE DESASTRES

Claudia Carmona-Rodríguez^{†}, Silvana Castrillón, Juanita Navarro, Sergio Orrego, Ferney Amaya-Fernández**

Universidad Pontificia Bolivariana, Cir. 1 #70-01, of. 11-211, Medellín, Colombia.

Recibido 27 Noviembre 2013; aceptado 19 Marzo 2015
Disponible en línea: 27 Octubre 2015

Resumen: Los sensores de fibra óptica ofrecen bajo consumo de potencia y permiten medir variables físicas, químicas o biológicas de manera distribuida, aprovechando diferentes efectos de propagación a través de la fibra. En este artículo se presenta el diseño de una red de sensores de fibra óptica para la medición de desplazamientos en laderas de montañas, como un mecanismo de prevención de desastres. Se analiza el uso de tres alternativas de sensado: reflectometría en el dominio del tiempo, FBG (*Fiber Bragg Grating*) y el efecto Brillouin.

Palabras clave: Sensores de fibra óptica, redes de sensores

OPTICAL FIBER SENSORS NETWORK FOR DISASTER PREVENTION

Abstract: The optical fiber sensors offer low power consumption, allowing the measurement of physical, chemical and biological variables in a distributed way, taking advantage of different effects of propagation through the optical fiber. In this article, we describe the design of a network of optical fiber sensors to measure mountain slide displacements as a mechanism for disaster prevention. We analyze three sensing alternatives: Time Domain Reflectometry (TDR), FBG (*Fiber Bragg Grating*) and the Brillouin effect.

Keywords: photonics sensor, sensor networks

[†] Autor al que se le dirige la correspondencia:
Tel: (+574) 4488388 ext. 13252.
E-mail: claudia.carmona@upb.edu.co (Claudia Carmona Rodríguez).

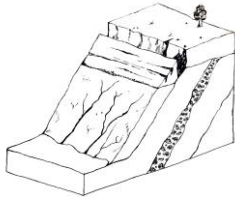
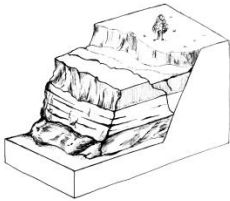
1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático y el aumento en la población han hecho que terrenos y sitios habitados sean susceptibles a movimientos en masa, los cuales sin un sistema de prevención adecuado pueden ocasionar pérdidas humanas, pérdidas en el sector agrícola y ganadero con costos socioeconómicos altos.

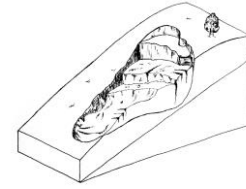
En la actualidad existen diversas alternativas para el monitoreo de movimientos en masa que pueden integrarse a un sistema de alertas tempranas. Entre algunas de las alternativas están el uso de extensómetros, estaciones de geo-posicionamiento global, el uso de imágenes satelitales y la toma de muestras para análisis en laboratorio ([Mayorca, 2013](#)).

En la [Tabla 1](#) se presenta una clasificación de los diferentes movimientos en masa que pueden ser monitoreados por los sistemas de alerta temprana. El tipo de terreno se puede clasificar en rocoso, predominantemente grueso (escombros) o predominantemente fino (tierra) y según el movimiento en masa es posible determinar con antelación desplazamientos de tierra para la prevención de desastres. Sin embargo, en muchas ocasiones los equipos de medida se encuentran expuestos tanto a fenómenos naturales como a las actividades humanas. Por esto es necesario realizar visitas periódicas al sitio de medición para verificar el correcto funcionamiento de los equipos y evitar falsas alarmas ([Mayorca, 2013](#)).

Tabla 1. Clasificación de movimientos en masa.
Fuente: autores.

Tipo de movimientos en masa	
Caída: desplazamiento de rocas y escombros por la ladera.	
Derrumbe: desprendimiento de grandes porciones de la ladera.	

Deslizamiento:
deslizamiento de traslación, planar o lateral de la tierra.



Complejos

Combinación de dos o más movimientos

Los sensores basados en fibra óptica ofrecen ventajas brindando una solución simple que permite detectar el sitio e intensidad del movimiento en áreas extensas. En general, estos sensores modifican una característica de la luz guiada, en respuesta a una variable externa física, química o biológica ([López, 2003](#)). Entre las ventajas del uso de sensores basados en fibra óptica están la no manipulación de señales eléctricas en el punto de medición, ofreciendo inmunidad a la interferencia electromagnética, seguridad al no generar chispa y no requiere alimentación eléctrica.

En este artículo se presentan propuestas de implementación de redes de sensores empleando tres métodos que usan la fibra óptica como sensor: el método OTDR (*Optical Time Domain Reflectometry*), el método BOTDA (*Brillouin Optical Time Domain Analysis*) y empleando FBGs (*Fiber Bragg Gratings*). Estas propuestas pueden ser empleadas para medir movimientos en masa para la prevención de desastres.

2. METODO DE SENSADO

A continuación se describen cada uno de los métodos de sensado que utilizan fibra óptica. Cada uno de ellos ofrece características diferentes que pueden ser útiles dependiendo del tipo de terreno a medir.

2.1. Método OTDR

En el método OTDR se envía un pulso a través de la fibra óptica, el cual se refleja en el sitio donde ocurre una perturbación. Si a una distancia L de la fuente ocurre una perturbación en un segmento de ancho W (ver [Fig. 1](#)), la potencia que regresa hacia la fuente dP_{ζ} debido a la dispersión en un intervalo infinitesimal dz es ([López, 2003](#)):

$$dP_S(z) = \alpha_S SP(z)dz, \quad (1)$$

donde α_S es el coeficiente de dispersión y S es el coeficiente de retrodispersión. El producto $\alpha_S S$ representa la fracción de la luz dispersada que regresa en dirección de la fuente desde el sitio de la perturbación.

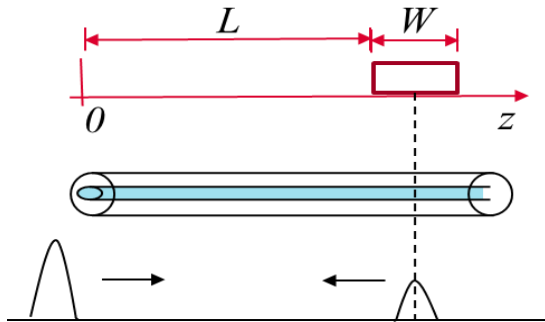


Fig. 1. Retrodispersión causada por una perturbación. Fuente: Autores

La potencia en función de la distancia en el segmento de fibra se calcula como:

$$P(z) = P_L e^{-\alpha z}, \quad (2)$$

donde α es el coeficiente de atenuación de la fibra óptica.

Reemplazando (2) en (1) e integrando en el intervalo de 0 a W , se obtiene la potencia dispersada por el segmento donde ocurre la perturbación:

$$P_S = \alpha_S SP_L (1 - e^{-\alpha W}) / \alpha, \quad (3)$$

donde P_L es la potencia al inicio del segmento y es igual a $P_L = P_0 e^{-\alpha L}$, siendo P_0 la potencia a la entrada de la fibra.

La potencia dispersada desde el segmento que está a una distancia L que es detectada al inicio de la fibra puede calcularse como:

$$P(L) = \alpha_S SP_0 e^{-2\alpha L} (1 - e^{-\alpha W}) / \alpha. \quad (4)$$

Con esta ecuación el receptor puede calcular la atenuación ocurrida en el segmento a partir de la potencia reflejada.

2.2. FBG

Una FBG se construye en un segmento de fibra óptica al que se le varía el índice de refracción en función de la longitud (ver Fig. 2). En condiciones normales de funcionamiento una FBG refleja una longitud de onda λ_D . Cuando ocurre una perturbación mecánica, cambia la longitud de onda reflejada permitiendo detectar la intrusión (Allwood, 2011).

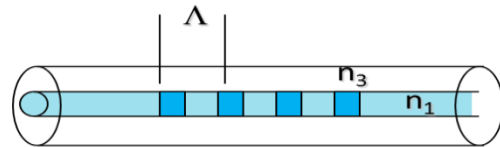


Fig. 2. Gráfico de FBG. Fuente: Autores

El modelo de propagación considera dos modos con amplitudes complejas $A(z)$ y $B(z)$ propagándose en dirección contraria. La interacción de las dos ondas en una FBG puede describirse mediante (5) (Erdogan, 1997).

$$dR/dz = i\hat{\sigma}R(z) + i\kappa S(z) \quad (5.a)$$

$$dS/dz = -i\hat{\sigma}S(z) - i\kappa^*R(z) \quad (5.b)$$

Las funciones $R(z) = A(z)\exp(i\delta z)$ y $S(z) = B(z)\exp(i\delta z)$ y las variables κ y $\hat{\sigma}$ representan el factor de acoplamiento entre los dos modos y el coeficiente de auto acoplamiento respectivamente, que para una rejilla monomodo sin chirp se definen como (Erdogan, 1997):

$$\hat{\sigma} \equiv \delta + \sigma, \quad (6.a)$$

$$k = k^* = \pi v \overline{\delta n_{eff}} / \lambda, \quad (6.b)$$

donde (Erdogan,1997):

$$\delta = 2\pi n_{eff} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_D} \right), \quad (7.a)$$

$$\sigma = \frac{2\pi}{\lambda} \overline{\delta n_{eff}}, \quad (7.b)$$

$$\lambda_D = 2n_{eff}\Lambda, \quad (7.c)$$

En las ecuaciones anteriores, λ_D es la longitud de onda de diseño, n_{eff} es el índice de refracción efectivo y Λ es el periodo de la rejilla, que indica la periodicidad del cambio espacial en el índice de

refracción. Para una rejilla uniforme los parámetros son constantes y las ecuaciones de propagación de los modos pueden resolverse en forma analítica. Sin embargo, en forma general, estas ecuaciones pueden ser resueltas numéricamente empleando el algoritmo Shoot con el método Runge-Kutta (Liu, et al, 2003).

Pueden emplearse las ecuaciones presentadas en esta sección para calcular la respuesta en frecuencia de una FBG, como se observa en la Fig. 3. Para esto se resuelve la Ecuación (5) con el algoritmo Shoot y el método Runge-Kutta, con 100 pasos en el eje z y un paso de 0.01 nm.

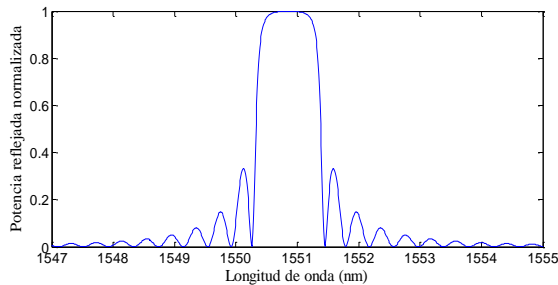


Fig.3. Respuesta en frecuencia de la señal reflejada por la FBG. Fuente: autores

En la Tabla 2 se presentan los parámetros empleados en la simulación.

Tabla 2. Parámetros empleados en la simulación de FBG.

Parámetro	Componente	Valor
L	Longitud	2 mm
n_{eff}	Índice de refracción efectivo	1.45
Δn_{eff}	Cambio en el índice de refracción	8×10^{-4}
λ_D	Longitud de onda de diseño	1550 nm
IL_{FBG}	Pérdidas de inserción	3 dB

2.3. Método BOTDA

El método BOTDA emplea el efecto no lineal de Brillouin. Mediante este método se envía una señal de bombeo consistente en un pulso de corta duración por uno de los extremos de la fibra. Por el otro extremo se envía una señal de prueba que consiste en una señal de onda continua (*Continuous Wave, CW*). Si la señal de prueba se coloca a la frecuencia de Stokes, fluye energía desde el

bombeo a la señal de prueba. La ganancia puede medirse en función de la posición de la fibra. La ganancia de Brillouin depende de la deformación y la temperatura en un punto específico de la fibra, convirtiendo a la fibra en un sensor (Rodríguez, 2010).

Para distancias mayores a 10 km. se tienen limitaciones por la potencia de la señal, por lo que puede usarse amplificación Raman para incrementar los niveles de potencia (Rodríguez, 2010). Las ecuaciones en estado estable que permiten modelar el efecto Raman y Brillouin, para la señal de bombeo de Raman P_p^+ (co o contra propagante), la señal de bombeo de Brillouin P_B^+ y la señal de prueba de Brillouin P_B^- se presentan en (8); donde α es el coeficiente de atenuación de la fibra, g_R es el coeficiente de ganancia de Raman, g_B es el coeficiente de ganancia de Brillouin y ν es la frecuencia de la señal. El subíndice P indica bombeo de Raman y el subíndice B indica bombeo de Brillouin. Este sistema de ecuaciones se resuelve numéricamente empleando el algoritmo Shoot con el método Runge Kutta (Liu, et al, 2003).

3. DISEÑO

A continuación se presentan tres propuestas de implementación de redes de sensores que pueden ser empleadas para medir movimientos en masa para la prevención de desastres.

3.1. Red de sensores de bajo costo empleando FBGs

Una red de sensores con FBGs permite mediciones de eventos en puntos estratégicos o críticos en un terreno.

Una fibra óptica cubriría el terreno e interconectaría los FBGs colocados en varios puntos de medición. En la Fig. 4 se presenta una propuesta de esquema de conexión de los FBGs empleando esta alternativa. En esta se emplean 4 sensores FBG cada uno en un extremo de la fibra óptica y una fuente de amplio ancho espectral. Al producirse una perturbación en algún sensor, este cambia la longitud de onda reflejada, disminuyendo la potencia óptica detectada, generándose una alarma. En este caso los FBGs se sintonizarían a la misma frecuencia de trabajo.

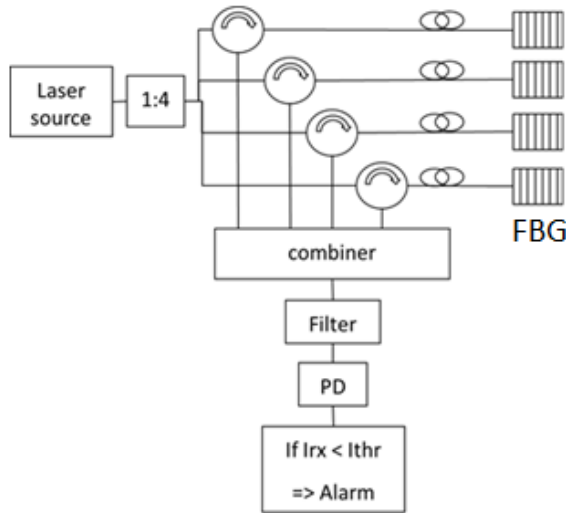


Fig. 4. Propuesta utilizando sensores FBG. Fuente: autores.

El empleo de FBGs permite una medición localizada en el sitio donde se encuentra el sensor. Este método puede combinarse con el método OTDR para lograr una mayor precisión en la medición.

$$\pm \frac{dP_p^\pm}{dz} = -\alpha_p P_p^\pm(z) - g_R \frac{v_p}{v_B} P_p^\pm(z) [P_B^+(z) + P_B^-(z)] \quad (8.a)$$

$$\frac{dP_B^+}{dz} = -\alpha_B P_B^+(z) + g_R P_B^+(z) [P_p^+(z) + P_p^-(z)] - g_B P_B^+(z) P_B^-(z) \quad (8.b)$$

$$-\frac{dP_B^-}{dz} = -\alpha_B P_B^-(z) + g_R P_B^-(z) [P_p^+(z) + P_p^-(z)] + g_B P_B^-(z) P_B^+(z) \quad (8.c)$$

3.2. Red de sensores usando FBG con mayor resolución espacial

Esta propuesta complementa la anterior, permitiendo realizar mediciones a lo largo de la fibra en diferentes puntos del terreno. En esta propuesta se añaden anillos de fibra óptica con radios de algunos centímetros. Cada anillo se forma enrollando un trozo de fibra en forma circular de radio r . Cuando ocurre un desplazamiento de longitud x en el terreno se decreta el radio del anillo incrementando la atenuación, lo que es detectado por el sitio de sensado (ver Fig. 5). Se realizó la prueba de atenuación para un anillo de fibra con diferentes radios de curvatura. Para realizar las pruebas se inició con un radio de 1 cm ($r = 1\text{cm}$, $x = 0\text{cm}$). Se midió la atenuación para diferentes valores de desplazamiento x , los resultados se presentan en la [Tabla 3](#).

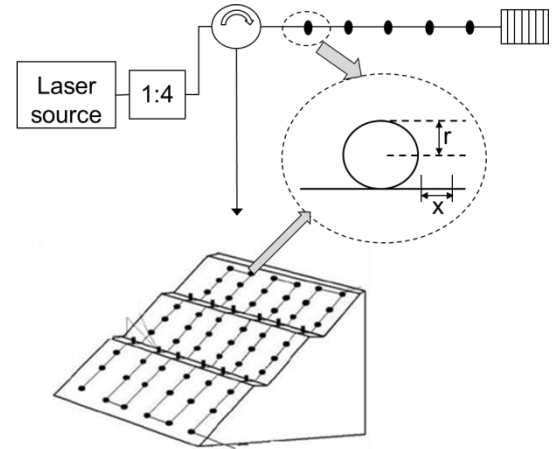


Fig. 5. Propuesta utilizando sensores de rejilla de Bragg y el método OTDR Fuente: Autores.

Tabla 3. Medidas experimentales con cambio en el radio de curvatura.

x (cm)	ATENUACIÓN (dB)
0 (r = 1cm)	0,108
0,5	0,155
1,0	0,282
1,5	0,579
2,0	0,959
2,5	2,046
3,0	5,416
3,5	14,824
4,0	19,394

La fibra empleada para realizar las mediciones fue fibra monomodo estándar. Se empleó un láser con una longitud de onda de 1550 nm y una potencia de 1 mW para realizar la medición. Se midió la atenuación para valores de desplazamiento cada 0.5 cm.

Se observa que para detectar desplazamientos de 0.5 cm, se requiere un instrumento con una resolución de 0.05 dB para pasar de un valor x de 0 a 0.5 cm. Sin embargo, se requiere menor precisión para pasar de un desplazamiento x de 3.5 a 4.0 cm, siendo suficiente detectar cambios de 4.5 dB en la atenuación.

3.3 Red de sensores usando el método BOTDA

Se realizaron simulaciones empleando el método BOTDA con la configuración presentada en la Fig. 6. Los parámetros empleados en las simulaciones se presentan en la Tabla 4.

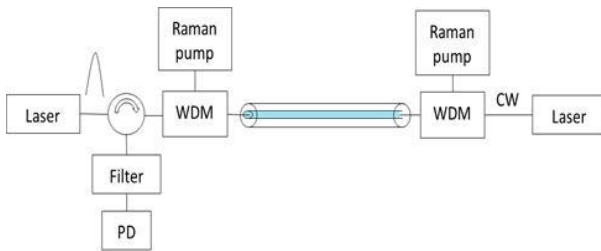


Fig. 6. Propuesta utilizando BOTDA. Fuente: autores

En la Fig. 7 se presenta la Ganancia de Brillouin obtenida mediante simulaciones para diferentes longitudes de fibra óptica y dos valores de potencia de bombeo de Raman. En este caso la potencia de la señal de prueba y la de bombeo de Brillouin son de -4 y 0 dBm respectivamente. Se observan ganancias menores a 1 dB, con valores que se incrementan al incrementar la potencia de bombeo de Raman, mejorando la sensibilidad del receptor óptico o permitiendo extender la longitud de la fibra óptica. Al extender la longitud de la fibra se extiende la cobertura de la red de sensores.

Tabla 4. Parámetros usados en las simulaciones con el método BOTDA.

Parámetro	Componente	Valor
g_B	Coefficiente de ganancia de Brillouin.	$8.2e-8$ 1/m
λ_P	Longitud de onda de bombeo	1480 nm
α_P	Atenuación a la longitud de onda de bombeo	0.25 dB/km
α_B	Atenuación a la longitud de onda de Brillouin	0.20 dB/km

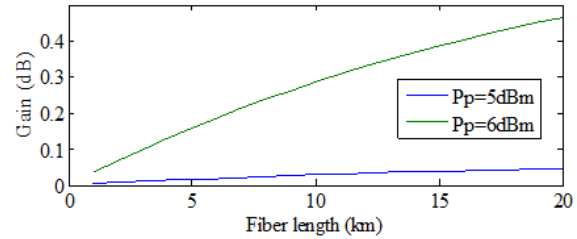


Fig. 7. Ganancia Brillouin para dos potencia de bombeo.

En la Fig. 8 se presenta la ganancia de Raman en función de la potencia de bombeo para las configuraciones de Raman: co-propagante, contra-propagante y bidireccional. Se empleó una longitud de fibra de 20 km, con una señal de prueba y de bombeo de Brillouin de -4 y 0 dBm respectivamente. Puede observarse una igual ganancia para el caso co y contrapropagante y como era de esperarse, una mayor ganancia para el caso bidireccional. Con el caso bidireccional pueden obtenerse ganancias hasta de 6 dB, que al emplear fibra monomodo, permite teóricamente extender el alcance de la red en más de 20 km. Esto en aplicaciones de sensado en laderas de montañas implica sensar áreas más extensas con el mismo transmisor receptor, que generalmente es el dispositivo más costoso en el sistema.

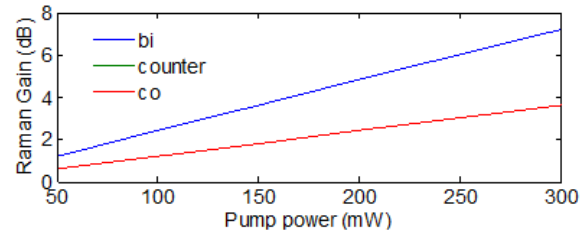


Fig. 8. Ganancia Brillouin en configuraciones de bombeo Raman co, contra y bidireccional.

4. CONCLUSIONES

En este artículo se presentaron propuestas para el uso de sensores de fibra óptica en la detección de movimientos en masa. Para el sensado puntual puede emplearse FBGs y para el sensado distribuido a través de varios puntos en una ladera de una montaña pueden emplearse anillos de fibra óptica. El empleo de FBGs puede emplearse a la misma longitud de onda, requiriendo medir solo cambios en la atenuación para detectar

desplazamientos. Los anillos de fibra permiten medir desplazamientos en las inmediaciones de la fibra óptica. La combinación de los dos métodos permiten realizar mediciones más complejas, tanto puntuales como distribuidas dependiendo de las características particulares del área a monitorear.

De otro lado, si se emplea BOTDA, a través de simulaciones se comprobó que el posible extender el área de cobertura a sensar empleando amplificación Raman.

AGRADECIMIENTO

Se agradece al CIDI – UPB por el apoyo al proyecto “Consolidación Línea de Investigación en Fotónica – UPB”.

REFERENCIAS

- Allwood, G. (2011). Fibre Optic Acoustic Sensing for Intrusion Detection Systems. *Proceedings of Acoustics*, **89**.
- Liu, Xueming and Lee, Byoung-ho. (2003). Effective shooting algorithm and its application to fiber amplifiers. *Optics Express*, **11**(12): 1452-1461.
- López, R.M. (2003) *Sensor de fibra óptica distribuido para medición de fugas de hidrocarburo*. [Tesis doctoral], Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, México.
- Mayorca, T. (2013). Determinación de la deformación del terreno por movimientos en masa usando interferometría SAR (Radar de Apertura Sintética). Universidad Nacional de Córdoba, 2013. En línea: [http://aulavirtual.ig.conae.gov.ar/moodle/pluginfile.php/512/mod_page/content/68/TesisMaestriaCONAE_Tannia_Mayorga.pdf].
- Rodríguez Barrios, F.; Martín López, S.; Carrasco Sanz, A.; Corredera, P.; Ania-Castanon, J.D.; Thevenaz, L.; González Herraiz, M. (2010). Distributed Brillouin Fiber Sensor Assisted by First-Order Raman Amplification. *Journal of Lightwave Technology*, **28** (15): 2162-2172.
- Erdogan, Turan. (1997). Fiber Grating Spectra. *Journal Of Lightwave Technology*, **15** (8): 1277-1294.

SOBRE LOS AUTORES

Claudia Carmona-Rodríguez.

Docente asociada de la Facultad de Ingeniería en Tecnologías de Información y Comunicación de la Universidad Pontificia Bolivariana. Ingeniera Electrónica y Especialista en Telecomunicaciones de la Universidad Pontificia Bolivariana. Magister en Ingeniería de Telecomunicaciones de la Universidad de Antioquia

Silvana Alejandra Castrillón Zuluaga

Estudiante de octavo semestre de Ingeniería de Telecomunicaciones en la Universidad Pontificia Bolivariana. Actualmente desempeña el cargo de presidente de la Rama Estudiantil IEEE UPB y recibió recientemente a mención a estudiante distinguida en la Facultad de Ingeniería de Telecomunicaciones 2013.

Juanita Navarro Jaramillo.

Estudiante de octavo semestre de Ingeniería de telecomunicaciones en la Universidad Pontificia Bolivariana.

Sergio Iván Orrego González

Estudiante de octavo semestre de Ingeniería de telecomunicaciones en la Universidad Pontificia Bolivariana.

Ferney Amaya-Fernández

Docente asociado de la Facultad de Ingeniería en Tecnologías de Información y Comunicación de la Universidad Pontificia Bolivariana. Miembro del grupo de investigación GIDATI de la misma universidad. Ingeniero Electrónico, Magister en Ingeniería de la Universidad del Valle y Doctor en Ingeniería de la Universidad Pontificia Bolivariana.