



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

SISTEMA DE DETECCIÓN DE EVENTOS GEOLÓGICOS MEDIANTE FIBRA  
ÓPTICA PARA LA GESTIÓN GEOLÓGICA DEL OLEODUCTO DE CRUDOS  
PESADOS DEL ECUADOR

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos  
establecidos para optar por el título de Ingeniero en Electrónica y Redes de  
Información

Profesor Guía  
Ing. Diego Paredes Páliz

Autor  
Alfredo Maldonado González

Año  
2016

## **DECLARACIÓN PROFESOR GUÍA**

“Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con el (los) estudiante(s), orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.

---

Diego Paredes Páliz

Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

C.C.: 0603014143

### **DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE**

“Declaro (amos) que este trabajo es original, de mi (nuestra) autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.”

---

Alfredo Maldonado González

C.C.: 171370190-0

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres y hermanos que son mi motivación diaria para seguir adelante y superar todas mis metas.

A mi primo Cheo por apoyarme en mis estudios.

A mi tutor el Ing. Diego Paredes Páliz por su paciencia, conocimiento y valioso asesoramiento que me brindó en la realización de este trabajo de titulación.

A la Universidad de las Américas y a todos los docentes que me formaron académica y profesionalmente.

## **DEDICATORIA**

A mis padres y hermanos, a ellos les debo todo.

## RESUMEN

El Ecuador cuenta con un oleoducto que permite el transporte de crudo liviano y pesado desde la región oriental hasta la región litoral del Ecuador. En su trayectoria el Oleoducto cruza por zonas de alta actividad geológica lo que afecta y desgasta constantemente las tuberías del oleoducto, siendo esta una de las principales causas de derrames de petróleo en varias zonas del Ecuador.

Este proyecto de titulación tiene como objetivo principal desarrollar un sistema capaz de realizar un monitoreo constante del oleoducto basándose en la medición del fenómeno de refracción de la fibra óptica, con esto se puede detectar con antelación posibles eventos geológicos que a futuro puedan poner en riesgo la integridad del oleoducto. Este sistema será capaz de detectar cambios en la señal de la fibra y enviar alertas vía correo electrónico a la persona encargadas de la seguridad del oleoducto.

Para el desarrollo de este sistema fue fundamental una amplia recolección de información e investigación de temas relacionados con las tecnologías a utilizar, esta información se utilizó como respaldo para la realización de este proyecto. El sistema desarrollado comprende de dos partes principales: El Hardware que consta de un instrumento óptico eléctrico (OTDR) para la obtención de datos y El Software de monitoreo de eventos geológicos que es el encargado de realizar el procesamiento, análisis y comparación de datos obtenidos previamente por el OTDR para el envío de alertas. Mediante pruebas de funcionamiento del software se puede verificar que el sistema presentado en este proyecto de titulación cumple con los objetivos principales.

Con este proyecto se busca mejorar significativamente la gestión geológica del oleoducto mediante la automatización de obtención de datos y detección de riesgos geológicos con el fin de evitar las pérdidas económicas que conllevan los derrames de crudo así como también evitar los daños a la flora, fauna y poblaciones cercanas al oleoducto.

## ABSTRACT

Ecuador has a pipeline that allows the transport of light and heavy crude oil, from the East to the coastal region of the Ecuador. In his path the pipeline crosses areas of high geological activity which affects and constantly wears out piping of the oil pipeline, being one of the main causes of oil spills in several areas of the Ecuador.

This degree project aims to develop a system able to perform a constant monitoring of the pipeline based on the measurement of the phenomenon of refraction of optical fiber, this can be detected in advance possible geological events that future can jeopardize the integrity of the pipeline. This system will be able to detect changes in the signal of the fiber and send alerts via e-mail to the person responsible for the safety of the pipeline.

The development of this system was instrumental in a wide collection of information and research on issues related to the technologies used, this information was used as a support for the realization of this project. Developed system comprises two main parts: The Hardware consisting of a electric optical instrument (OTDR) for obtaining data and the Software of monitoring of geological events that's is responsible for the processing, analysis and comparison of data obtained previously by the OTDR for sending alerts. Through performance tests of the software you can verify that the system presented in this degree project meets the main objectives.

This project seeks to significantly improve the geological management of the pipeline by automating data collection and detection of geological hazards in order to prevent economic losses involving spills of crude oil as well as also to prevent damage to the flora, fauna and towns near the pipeline.

## ÍNDICE

Alcance .....	1
Justificación.....	1
Objetivo general .....	1
Objetivos específicos.....	2
<b>1. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>2</b>
1.1 Introducción .....	2
1.2 Arquitectura de un sistema de fibra óptica .....	3
1.3 Estructura de la fibra óptica.....	4
1.4 Propagación de la luz.....	5
1.4.1 Principio de reflexión.....	5
1.4.2 Reflexión de Fresnel.....	5
1.4.3 Refracción de la luz .....	6
1.5 Atenuación .....	7
1.5.1 Atenuación Intrínseca .....	9
1.5.2 Atenuación Extrínseca.....	11
1.6 Reflectómetro óptico en el dominio del tiempo (OTDR).....	13
1.7 Eventos registrados en un enlace de fibra óptica .....	15
1.7.1 Tipos de medición con el OTDR.....	16
1.8 Conceptos Geológicos .....	19
1.9 Importancia de un evento geológico.....	19
1.9.1 Regiones geológicas del Ecuador .....	22
1.9.2 Tipos de movimientos en masa que se pueden medir por el método OTDR.....	22
1.9.3 Movimientos en masa.....	24
1.10 Principio de medición de movimientos de masa con el método OTDR .....	24
<b>2. DESARROLLO DEL SISTEMA.....</b>	<b>29</b>
2.1 Funcionamiento actual del OCP.....	29
2.2 Tecnología a utilizar .....	33

2.3	Ventajas de la fibra óptica frente a otras tecnologías .....	33
2.4	Esquema del sistema .....	34
2.5	Componentes de Hardware .....	35
2.5.1	Fibra óptica mono-modo de 12 hilos.....	35
2.5.2	OTDR.....	37
3.	DESARROLLO DE SOFTWARE .....	38
3.1	Análisis de Requerimientos .....	38
3.1.1	Determinación de los requerimientos de información .....	39
3.1.2	Diagrama de Flujo .....	40
3.2	Lenguaje de Programación .....	41
3.3	Sistema de adquisición de datos.....	42
3.4	Ambiente de simulación .....	47
3.5	Sistema de envío de Alertas .....	48
3.5.1	Comparación de señales .....	49
4.	PRUEBAS Y COSTOS DEL PROYECTO .....	51
4.1	Pruebas del Sistema .....	51
4.2	Análisis de Costos.....	53
4.2.1	Costos de la Solución propuesta por OCP ECUADOR S.A.....	53
4.2.2	Análisis de la solución propuesta por OCP ECUADOR S.A en comparación con los servicios de una empresa extranjera.....	55
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	59
5.1	Conclusiones .....	59
5.2	Recomendaciones .....	60
	REFERENCIAS.....	62
	ANEXOS .....	64

## **Alcance**

El alcance de este proyecto de titulación es realizar un sistema de monitoreo de eventos geológicos para el oleoducto de crudos pesados del Ecuador, para evitar derrames de petróleo mediante el uso de fibra óptica y el desarrollo de un programa que envíe alertas cuando exista un evento geológico detallando el lugar exacto donde se produjo el evento en la fibra.

Para lograr cumplir este objetivo se desarrollará un ambiente simulado de fibra óptica, con esto se podrá monitorear con un OTDR virtual el cual almacenará los valores de la señal de la fibra, cuando exista un corte de fibra o atenuación en la señal por un evento geológico, torsión, estiramiento o ruptura en el tubo, el programa que se desarrollará realizará una correlación de señales con los valores de la traza del OTDR y enviará un mail con los detalles del lugar exacto donde ocurrió el corte de la fibra.

## **Justificación**

El incremento de los derrames de crudo que han sucedido en los últimos años causados por eventos geológicos ha sido el principal motivo para el desarrollo de este proyecto de titulación. A pesar de que este trabajo se lo realiza manualmente y no es muy exacto se busca automatizar y optimizar el tiempo en el que se detectan estos eventos geológicos, logrando así disminuir los daños causados por los derrames de petróleo.

## **Objetivo general**

- Desarrollar un sistema de detección de eventos geológicos en un ambiente simulado para evitar y prevenir derrames de petróleo en el Oleoducto de crudos pesados del Ecuador.

### **Objetivos específicos**

- Analizar los requerimientos necesarios para el funcionamiento y uso adecuado de la tecnología a utilizar (fibra óptica) para la monitorización de eventos geológicos.
- Diseñar y desarrollar el software de escritorio con el fin de que envíe alertas a la persona encargada del monitoreo con el lugar exacto donde se produjo el evento.
- Realizar pruebas piloto para determinar si el sistema funciona correctamente.
- Realizar una evaluación de desempeño del proyecto.

## **1. MARCO TEÓRICO**

### **1.1 Introducción**

Ecuador, al ser un país dependiente de la exportación de materia prima para su economía, el petróleo es su principal fuente de riqueza representando el 46% de los productos que se exportan en el país. Es por eso que hubo la necesidad de construir un oleoducto en el Ecuador que permita el transporte de crudo liviano desde la región oriental donde es extraído el crudo hasta la región litoral del Ecuador donde es despachado a los buques cargueros.

Actualmente el oleoducto de OCP.S.A atraviesa el territorio ecuatoriano, de Este a Oeste, desde la zona de explotación petrolera en la Amazonia hasta el puerto de Esmeraldas. Consiste en una tubería de acero con una longitud de 500 km y con diámetros variables entre 24 y 36 pulgadas. Su capacidad es de 410.000 barriles de crudo por día. Cuenta con cinco estaciones de bombeo, dos estaciones reductoras de presión y dos terminales, de gran capacidad de almacenamiento en sus puntos extremos.

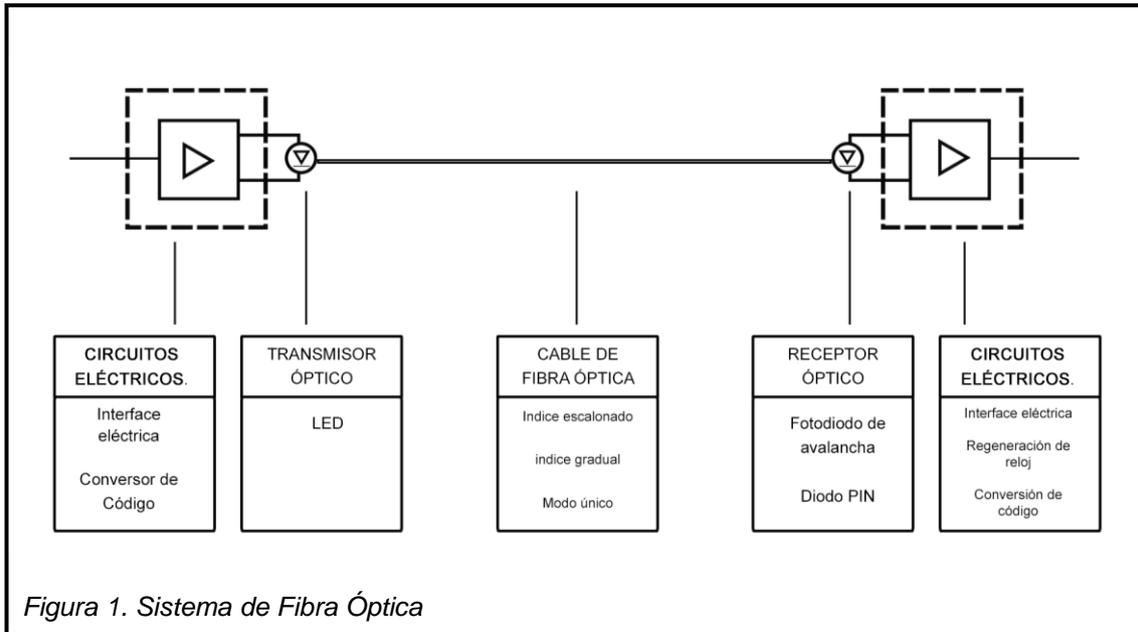
En su construcción se realizaron estudios geológicos e investigaciones geotécnicas para recomendar variantes del oleoducto en algunos tramos donde la estabilidad del terreno podía ser afectada por sismos o vulcanismos, sin embargo estos fenómenos geológicos han provocado varios derrames de petróleo en varias zonas del Ecuador afectando de manera permanente la flora y fauna del país. Como solución a estos problemas, el sistema de monitoreo de eventos geológicos por medio de fibra óptica busca realizar una constante monitorización de eventos geológicos para poder actuar con antelación y corregir a tiempo posibles derrames de crudo.

La fibra óptica al ser un medio de transmisión de información como ningún otro nos permite obtener datos en tiempo real gracias a su rapidez. OCP S.A actualmente cuenta con una conexión de fibra óptica a lo largo del oleoducto lo cual facilita la implementación de este servicio.

## **1.2 Arquitectura de un sistema de fibra óptica**

Un sistema de fibra óptica consiste en el envío de información análoga o digital mediante señales de luz modulada. Para realizarlo se compone de un dispositivo foto-emisor que transforma los impulsos eléctricos en rayos de luz, un medio de transmisión óptico por donde transita la luz y un dispositivo foto-receptor que transforma la señal de luz en pulsos eléctricos.

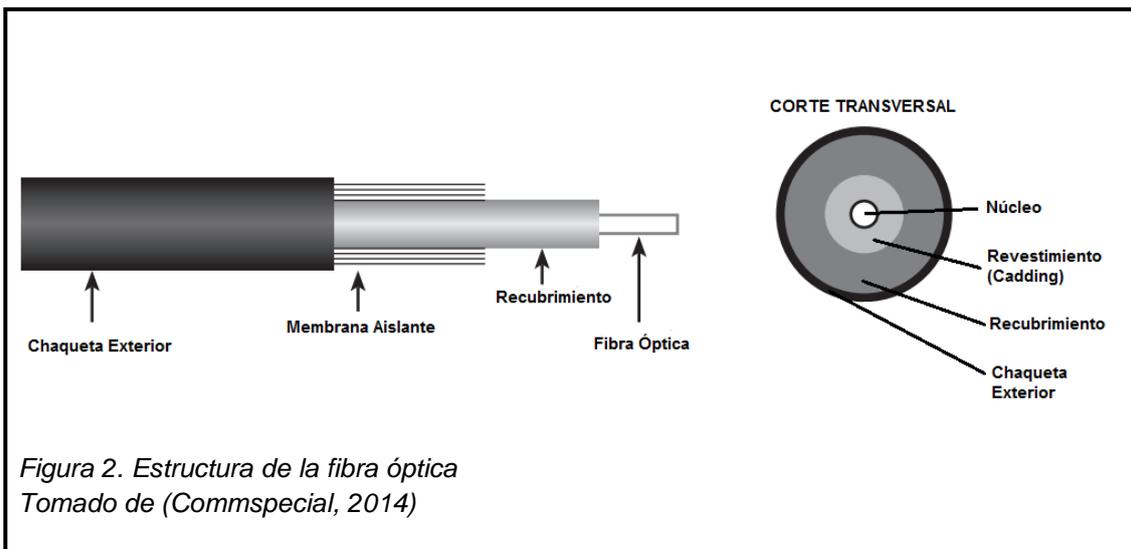
Los sistemas ópticos de comunicación se diferencian de los sistemas de microondas solo por su rango de frecuencias de la onda utilizada para llevar la información.



### 1.3 Estructura de la fibra óptica

La fibra óptica es un fino hilo de vidrio sumamente transparente o de plástico que tiene la capacidad de conducir luz, está compuesta por 3 partes:

- **Núcleo:** Es la parte interior de la fibra por donde se transmite la luz, está fabricado de materiales dieléctricos, normalmente de vidrio de sílice.
- **Revestimiento:** Es la capa óptica del exterior de la fibra que se encarga de mantener y conducir la luz dentro del núcleo incluso en curvaturas, está fabricado con los mismos materiales que el núcleo pero con un índice de refracción distinto para que se produzca el fenómeno de la refracción total interna y así asegurar la conducción total de la luz en el interior del núcleo.
- **Recubrimiento:** Es una capa de material resistente que protege al vidrio de la fibra del daño mecánico.

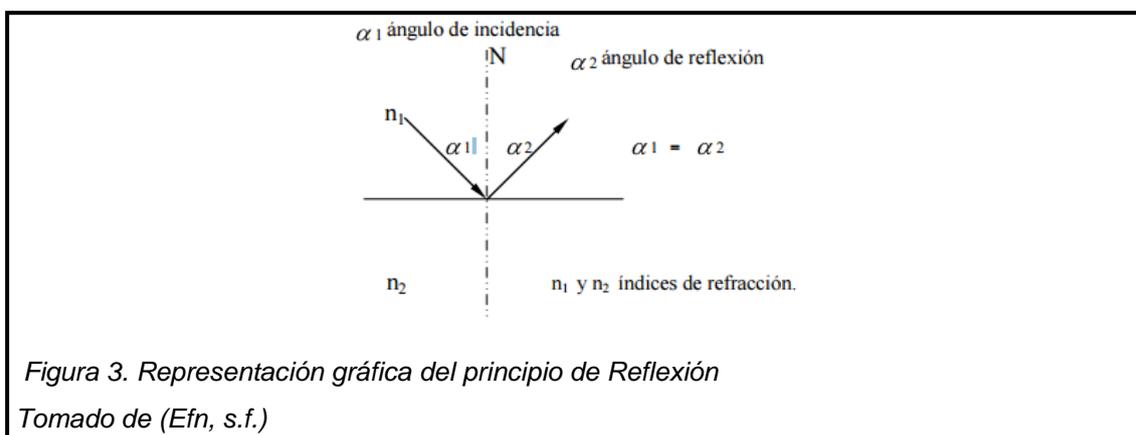


## 1.4 Propagación de la luz

### 1.4.1 Principio de reflexión

Cuando un rayo de luz choca contra una superficie de separación entre dos sustancias reflectantes, el rayo de luz es reflejado con un ángulo igual al ángulo de incidencia. Ambos ángulos se miden con respecto a la Normal de la superficie. (EFN,s.f.)

$$\text{LEY DE REFLEXIÓN } \alpha_1 = \alpha_2 \quad (\text{Ecuación 1})$$



### 1.4.2 Reflexión de Fresnel

La reflexión de Fresnel relaciona las amplitudes, fases y las polarizaciones de la transmisión y reflejo de las ondas que surgen cuando la luz entra en una interfaz entre dos medios transparentes con diferentes índices de refracción. Estas

ecuaciones fueron derivadas por Augustin Jean Fresnel en 1823 como parte de su teoría completa de la onda de la luz. Las ecuaciones de Fresnel describen el comportamiento de la luz en superficies ópticas. (Lvovsky A, 2013)

Para un rayo normal, la refracción de la potencia incidente reflejado está dada por:

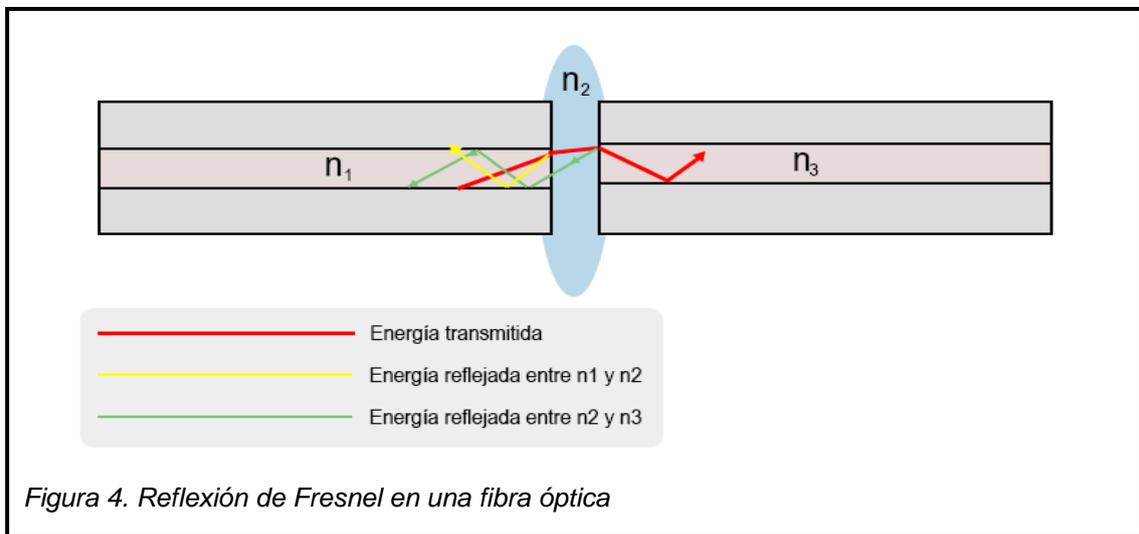
$$R = \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

$R$  Es el coeficiente de reflexión

$n_1$  Y  $n_2$  Son los índices de refracción de los dos medios respectivamente

En general, A mayor ángulo de incidencia con respecto a la normal, mayor es el coeficiente de reflexión de Fresnel. (Hyperphysics, s.f.)



### 1.4.3 Refracción de la luz

Es el cambio de dirección del rayo de luz que al colisionar con micro partículas son las causantes de la mayor parte de pérdidas en la fibra.

Se define al índice de refracción como la velocidad de la luz en el vacío, dividido por la velocidad de la luz en el medio. (Tomasi, 2003)

$$n = \frac{c}{v} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

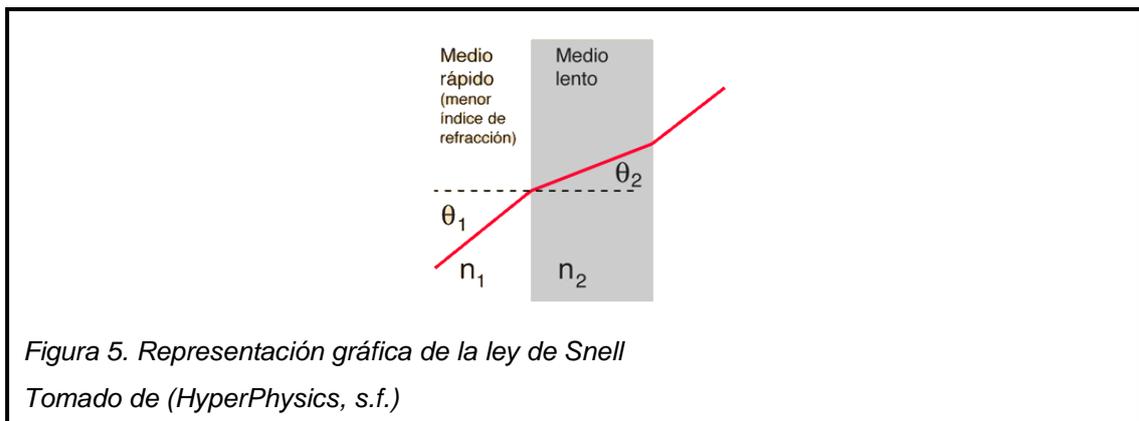
$n$  Es el índice de refracción

$c$  Es la velocidad de la luz en el vacío

$v$  Es la velocidad de la luz en el medio.

La ley de Snell pone en relación los índices de refracción “ $n$ ” de los dos medios, con las direcciones de propagación en términos de los ángulos con la normal.

$$\text{LEY DE SNELL} \quad \frac{n_1}{n_2} = \frac{\text{sen } \theta_2}{\text{sen } \theta_1} \quad (\text{Ecuación 4})$$



La relación del seno del ángulo de incidencia al seno del ángulo de refracción es inversamente proporcional a la respectiva relación de los índices de refracción entre dos sustancias.

El material que es más denso es aquel que tiene un índice de refracción mayor y una velocidad de la luz menor.

### 1.5 Atenuación

La atenuación está dada por la reducción de la potencia de la señal de luz que se propaga por el núcleo de la fibra en función de la distancia recorrida, la cual

experimenta una pérdida de energía expresada en decibelios (dB). La atenuación de una fibra óptica se expresa como coeficiente de atenuación o atenuación por unidad de longitud (dB/km). (The Fiber Optics Association, 2014)

El cálculo de la pérdida en un cable está establecido como la razón entre la potencia de entrada y la potencia de salida en watts. (Avalos e Inclan, s.f.)

$$\text{Pérdida (dB)} = -10 \log_{10} \left( \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} \right) \quad (\text{Ecuación 5})$$

Debido a que la atenuación de la fibra incrementa su efecto proporcionalmente a la longitud de la misma, dicha atenuación está representada por (dB/km):

$$A = \frac{10}{L} \log_{10} \left( \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} \right) [\text{dB}/\text{km}] \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde:

$A$  = atenuación en decibeles por kilómetros

$L$  = longitud de la fibra en kilómetros

$P_{OUT}$  = potencia de salida

$P_{IN}$  = potencia de entrada

Las fibras ópticas varían considerablemente su atenuación en función a la longitud de onda de la luz. Existen zonas en las que la atenuación es mínima, estas pertenecen a las ventanas de transmisión 2 y 3 (entre los 1330 nanómetros y 1550 nanómetros). La ventana de transmisión número 1 (850 nanómetros) es una zona de transmisión habitual en ciertos tipos de fibra, tiene pérdidas que al contrario de las ventanas antes mencionadas no son mínimas, sin embargo son constantes, lo que es fundamental para la transmisión de información. (Cárdenas, A., 2008)

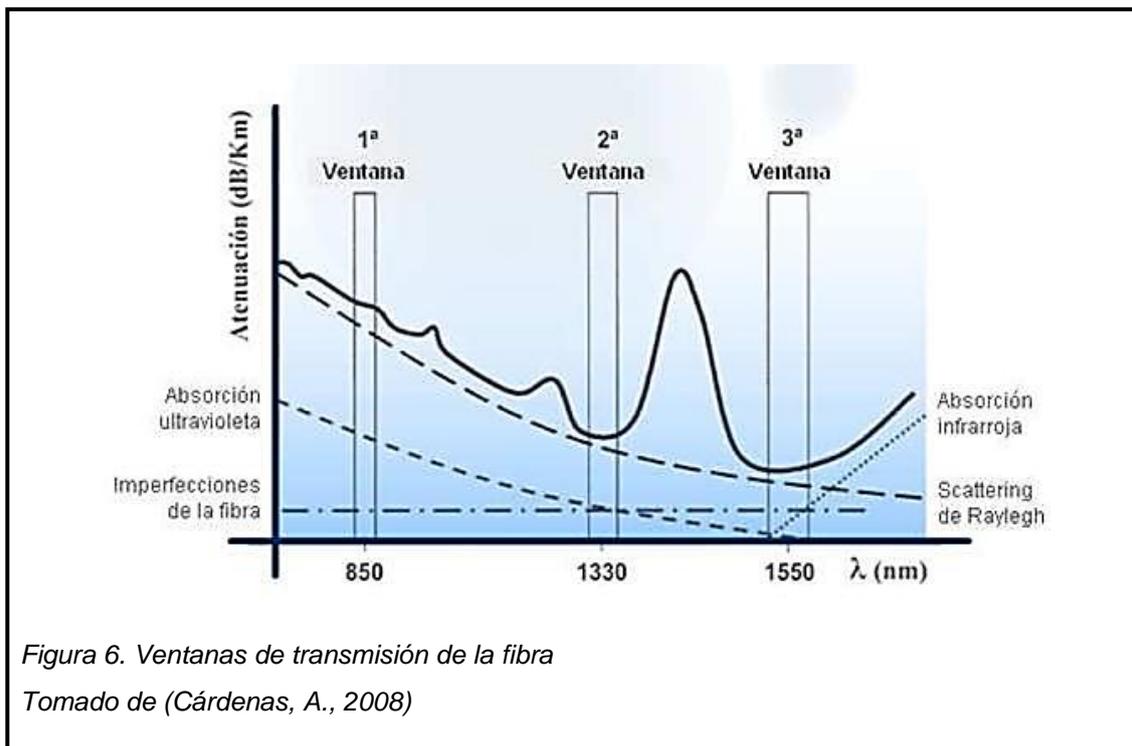


Figura 6. Ventanas de transmisión de la fibra

Tomado de (Cárdenas, A., 2008)

En la Figura 6 podemos apreciar las pérdidas de señal óptica con respecto a las ventanas de transmisión. En la ventana de los 850 nanómetros existen pérdidas de 3 a 4 dB por kilómetro (un 60% a 75% de pérdida por km).

En la segunda ventana de transmisión con longitud de onda de 1310 nanómetros, las pérdidas se reducen 1 a 2 dB (50% a 60% de pérdida por km).

En la ventana de los 1550 nanómetros, la atenuación es aún más baja, 0.5 dB (10% de pérdida por km).

Las causas de atenuación en una fibra óptica se dan por varios factores y a estos se los ha clasificado en dos categorías: atenuación intrínseca y atenuación extrínseca.

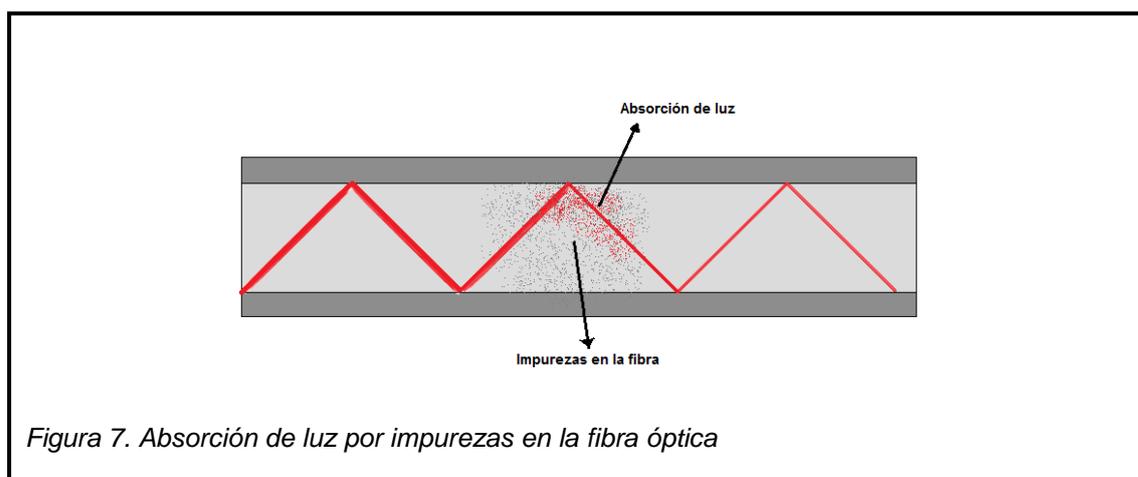
### 1.5.1 Atenuación Intrínseca

La atenuación intrínseca se produce por los materiales inherentes de la fibra, es causada por las impurezas del vidrio durante el proceso de fabricación. Pese a todos los avances tecnológicos no se ha logrado eliminar todas las impurezas y las pérdidas son inevitables. Cuando la luz choca contra una impureza en la fibra,

una de dos cosas puede ocurrir: que se dispersa o sea absorbida. Adicionalmente las pérdidas intrínsecas pueden caracterizarse por dos componentes: La absorción del material y la dispersión de Rayleigh. (Pereda. M, 2002)

### Absorción del material

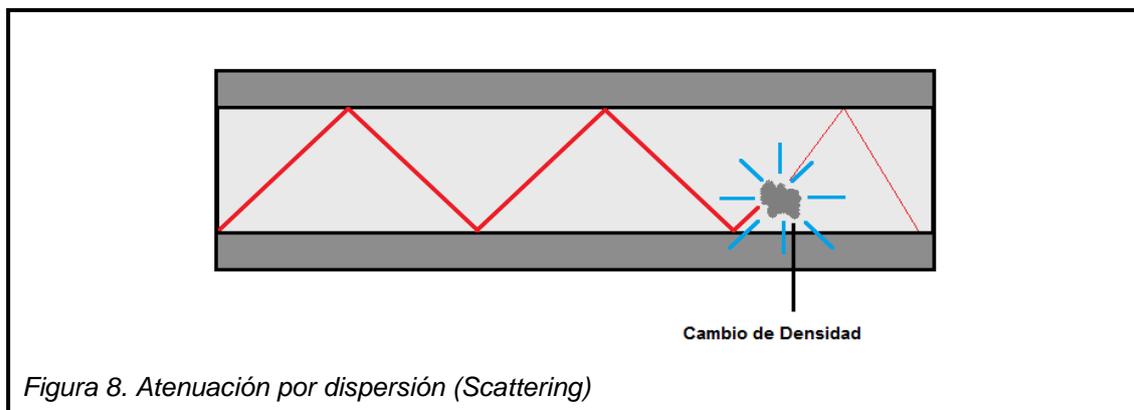
Ocurre como el resultado de una imperfección o impureza en la fibra. La impureza más conocida es la molécula de hidroxilo (OH<sup>-</sup>), que permanece como un residuo a pesar de las técnicas de fabricación estrictas. La absorción representa de 3% a 5% de la atenuación de la fibra. Este fenómeno causa que la señal de luz sea absorbida por las impurezas naturales del vidrio y sea convertida en vibraciones de energía u otra forma de energía como calor. A diferencia de la dispersión, la absorción puede ser limitada controlando la cantidad de impurezas durante el proceso de fabricación. Dado a que la mayoría de fibra es extremadamente pura, la fibra no se calienta por la absorción.



### Dispersión de Rayleigh

Cuando la luz viaja por la fibra, interactúa con las moléculas de sílice dentro del núcleo. La dispersión Rayleigh es el resultado de las colisiones elásticas entre las ondas de luz y las partículas de sílice en la fibra. La dispersión Rayleigh representa el 96% de la atenuación en la fibra óptica. Parte de la luz dispersada es reflejada de vuelta a la fuente de luz, esta propiedad es usada por el OTDR

(Reflectómetro óptico en el dominio del tiempo) para analizar pérdidas, eventos localizados, empalmes. (Mahlke. G, 2010)



Las longitudes de ondas cortas se dispersan más que las longitudes de onda largas. Cualquier longitud de onda debajo de los 800 nanómetros es inservible para comunicaciones ópticas debido a que la atenuación causada por la dispersión Rayleigh es muy alta. Al mismo tiempo, la propagación sobre los 1700 nanómetros no es posible debido a las altas pérdidas por la absorción de la luz infrarroja.

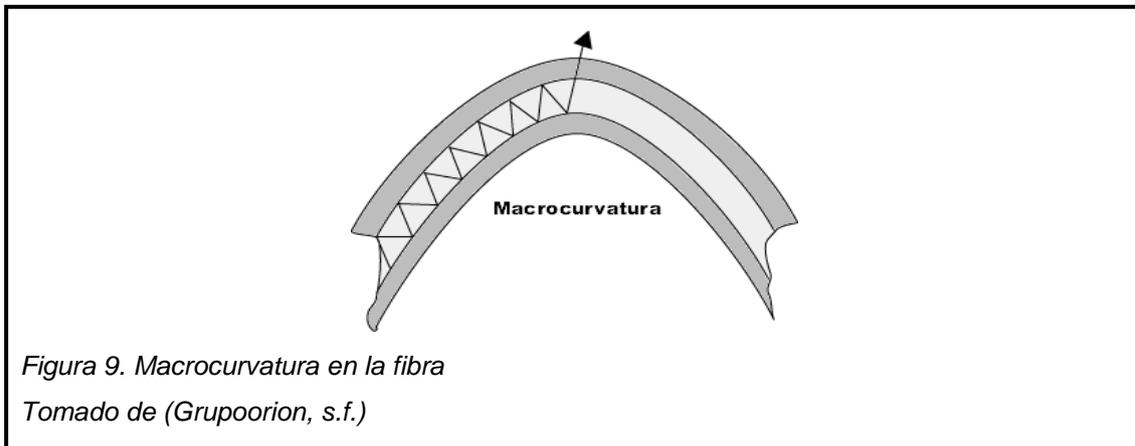
### 1.5.2 Atenuación Extrínseca

La atenuación extrínseca puede ser causada por dos mecanismos externos: macrocurvaturas o microcurvaturas. Ambas causan la reducción de potencia óptica. Si una curvatura es aplicada en una fibra óptica, se produce una tensión en la fibra en la región donde está deformada. Los efectos de deformación por doblado afectan en el índice de refracción y en el ángulo crítico del rayo de luz en el área afectada. Como resultado, la luz que viaja por el núcleo puede refractarse hacia afuera y pueden ocurrir pérdidas. (Sendra. J, 1999)

#### Macrocurvatura

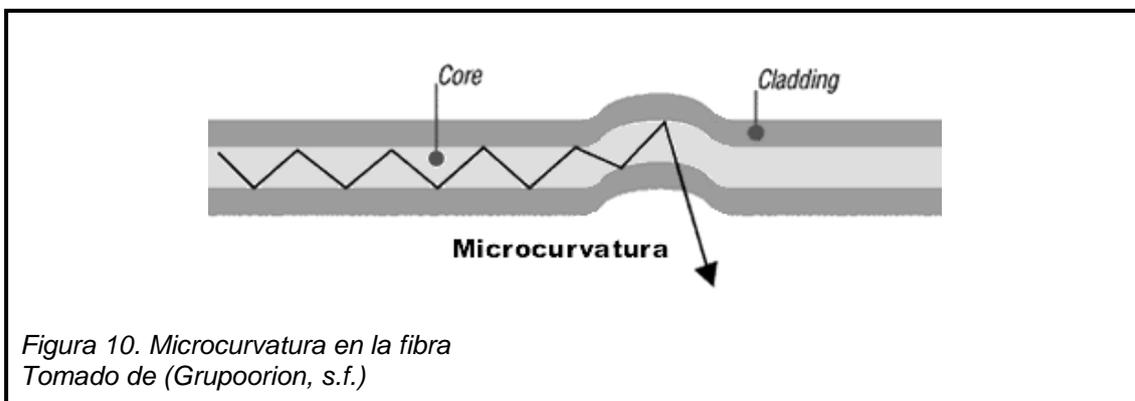
Una macrocurvatura es una deformación en la fibra a larga escala que es visible, y las pérdidas son generalmente reversibles después de que las deformaciones

son corregidas. Para prevenir macrocurvaturas, todas las fibras ópticas tienen un radio de curvatura mínimo que no debe ser excedido. Esto es una restricción en cuanto una fibra puede aguantar antes de experimentar problemas en el rendimiento de transmisión óptica o en la fiabilidad mecánica.



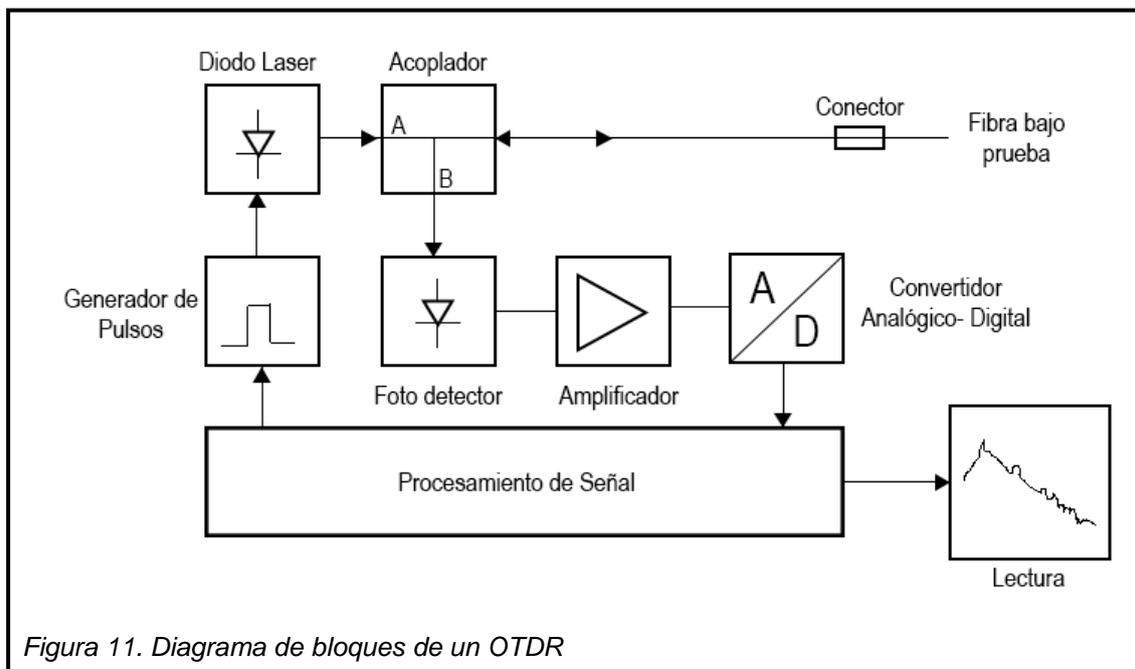
### Microcurvatura

Una microcurvatura es causada por imperfecciones en la geometría cilíndrica de la fibra durante el proceso de fabricación. Las microcurvaturas pueden estar relacionadas a la temperatura, estrés durante la tensión de la fibra, o fuerza de aplastamiento. Al igual que las macrocurvaturas, las microcurvaturas causar reducción en la potencia óptica. Las microcurvaturas son muy localizadas, y puede que la curvatura no sea claramente visible en la inspección. Con la fibra pelada, las microcurvaturas pueden ser reversibles. (Ciscopress, 2016)



## 1.6 Reflectómetro óptico en el dominio del tiempo (OTDR)

El reflectómetro óptico en el dominio de tiempo o por sus siglas en inglés OTDR (Optical time domain reflectometer) es un instrumento de precisión optoelectrónica que envía un pulso de luz de corta duración por un medio de transmisión y mide en función del tiempo, la señal óptica que ha sido retrodispersada, esto sucede gracias a la dispersión de Rayleigh y reflexión de Fresnel, cuando una señal óptica se propaga a lo largo de la fibra, parte de la señal es reflejada de vuelta en la dirección opuesta al haz incidente de luz, gracias a las características de la luz retrodispersada es muy útil a la hora de probar la integridad de un cable de fibra óptica. Puede verificar pérdidas por conectores, mediciones de longitud y fallos ocasionados en la fibra.



En la figura 11 podemos apreciar el diagrama de bloques de un OTDR para su funcionamiento. El generador de pulsos es el encargado de alimentar al diodo láser, que a su vez convierte la señal eléctrica en pulsos de luz. El acoplador se encarga de separar la señal enviada de la señal que se refleja devuelta.

La señal que pasa por el acoplador hace que la foto-detector convierta la señal de luz en señal eléctrica. Luego se convierte la señal analógica a digital y finalmente los datos son procesados y se mostrarán en la pantalla.

Este instrumento de medición es comúnmente usado para tomar muestras de la traza de señal de una fibra cuando se instala por primera vez. Luego, se pueden realizar mediciones comparativas entre la traza original y trazas tomadas a futuro si surgen problemas en la transmisión de datos.

Las mediciones del OTDR son más efectivas cuando se realizan pruebas con cables de fibra con una longitud superior a los 200 metros. Los datos que produce el OTDR son utilizados para crear un gráfico llamado "traza" y tiene información valiosa que puede ser almacenada para futuras referencias o para comprobar con un plan de acciones cuando se presenten problemas en la red.

Los OTDRs muestran simplemente la longitud donde termina el cable y confirman la calidad de la fibra, conectores y empalmes. Por supuesto, las trazas del OTDR también se utilizan para la resolución de problemas, ya que pueden mostrar donde se ha producido un corte en la fibra o donde se están produciendo pérdidas importantes de potencia.

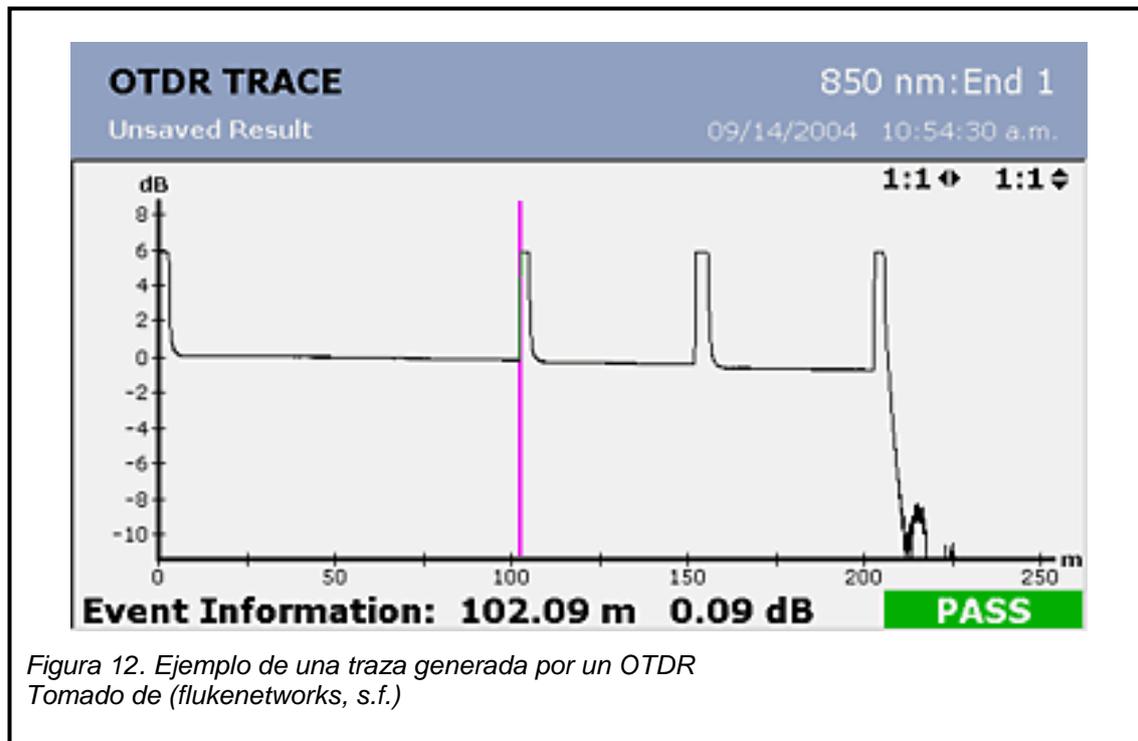


Figura 12. Ejemplo de una traza generada por un OTDR  
Tomado de (flukenetworks, s.f.)

## 1.7 Eventos registrados en un enlace de fibra óptica

La pendiente del gráfico atenuación vs distancia de una traza muestra el coeficiente de atenuación de la fibra que se está calibrando en dB/km por el OTDR. Cuando se utiliza el OTDR para medir una fibra podemos encontrar 2 tipos de eventos:

- **Eventos reflectivos:** Ocurren cuando ha ocurrido un cambio abrupto en el índice de refracción en la fibra, causado por conectores, empalmes mecánicos y microcurvaturas.
- **Eventos no reflectivos:** Ocurren generalmente por empalmes por fusión y macrocurvaturas en la fibra.

Ambos muestran pérdidas en la fibra, pero los conectores, microcurvaturas y empalmes mecánicos muestran eventos reflectivos. La altura del pico indica la cantidad de reflexión que causa el evento, a menos que sea tan grande que esta sature al foto-detector del OTDR, causando que el pico tenga una parte superior plana y una cola en el otro extremo, esto indica que el receptor fue sobrecargado.

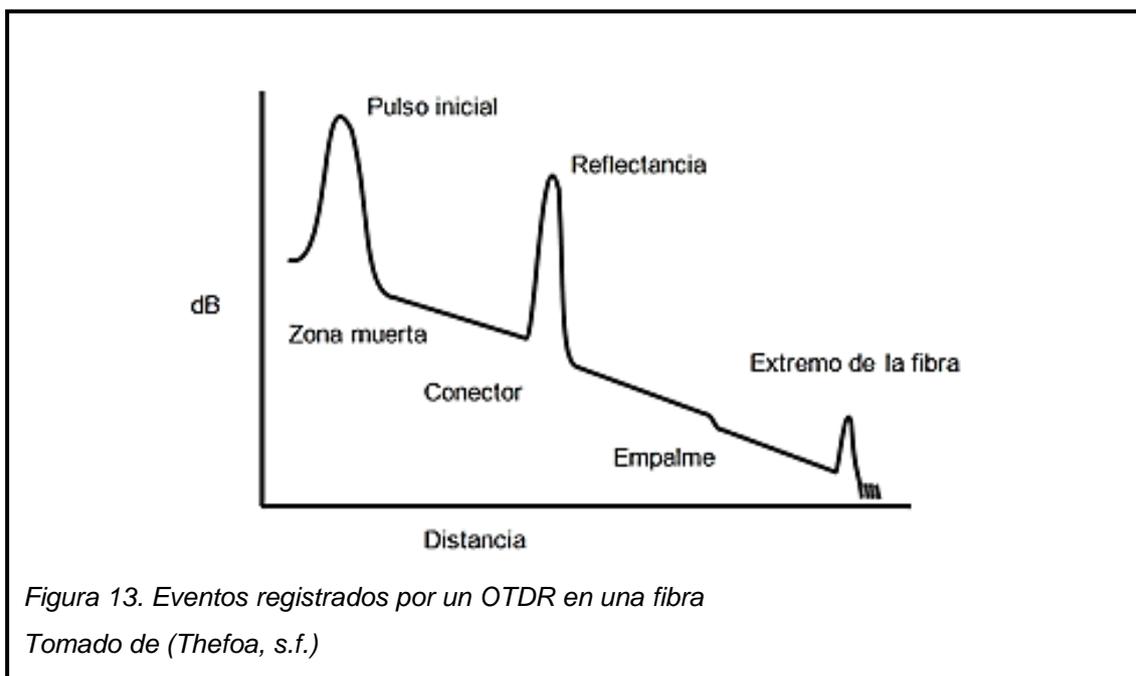


Figura 13. Eventos registrados por un OTDR en una fibra

Tomado de (Thefoa, s.f.)

## 1.7.1 Tipos de medición con el OTDR

### 1.7.1.1 Principio de Medición de la retrodispersión (backscattering)

En este punto se describe el método de medición para el coeficiente de atenuación de fibra óptica basado en mediciones de retrodispersión. Esta técnica se aplica para verificar uniformidad de la atenuación, continuidad óptica, discontinuidades físicas, empalmes y longitud de la fibra.

Con el fin de mejorar la relación señal ruido y el rango dinámico de medición se debe utilizar una fuente de luz estable, de alta potencia, de longitud de onda adecuada y de una longitud de pulso consistente para obtener una mejor resolución en la gráfica del OTDR. (ITU, 2010)

El poder de retrodispersión  $P(z)$  que es recibido de vuelta en el fotoemisor en una posición  $z$  en una fibra está expresado como: (Ohashi, M.,2013)

$$P(z) = P_0 \alpha_s(z) B(z) e^{-2 \int_0^z \gamma(z) dz} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde:

$P_0$	Es la potencia de entrada
$\alpha_s(z)$	Es el coeficiente de retrodispersión
$B(z)$	Es la fracción de captura de la retrodispersión
$\gamma(z)$	Es el coeficiente de atenuación

El coeficiente de retrodispersión  $\alpha_s(z)$  no es una constante, depende de la atenuación de la fibra y del diámetro del núcleo de la fibra.

La fracción de captura de la retrodispersión  $B(z)$  se expresa como:

$$B(\lambda, z) = \frac{3}{2} \left( \frac{\lambda}{2\pi n(z)w(\lambda, z)} \right)^2 \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde:

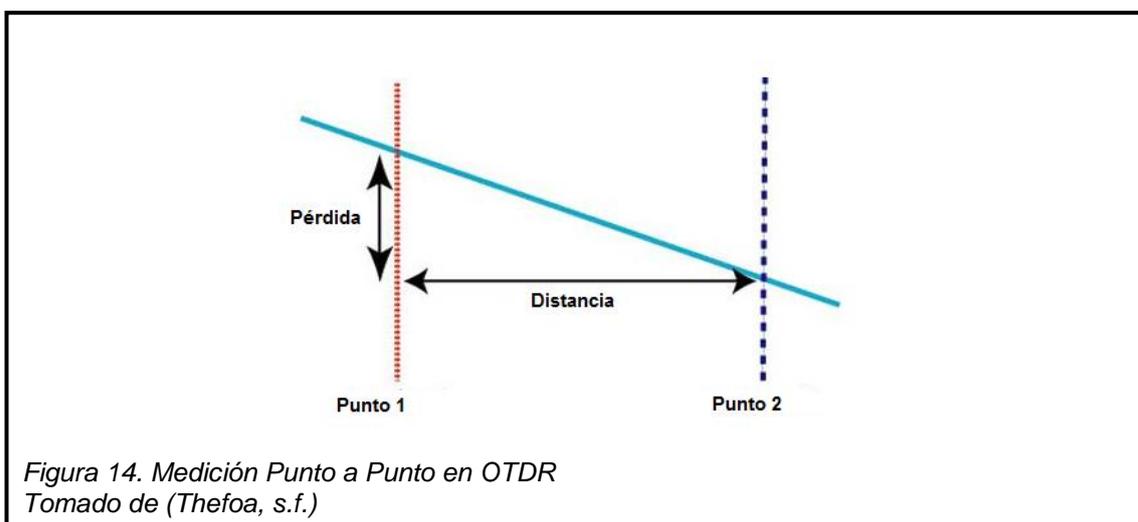
$n(z)$	Es el índice de refracción del núcleo de la fibra mono-modo
$\lambda$	Es la longitud de onda en la que funciona la fibra.

$2w(\lambda, z)$  Es el diámetro del campo modal de la fibra.

El coeficiente de atenuación  $\gamma(z)$  de la fibra es sensible a la longitud de onda, por lo tanto se debe calibrar bien la longitud de onda en el OTDR para una correcta medición. (The Fiber Optics Association, s.f)

### 1.7.1.2 Método de medición de atenuación en la fibra Punto a Punto

La medición punto a punto mide la pérdida y la distancia entre dos marcadores. Este método se utiliza para medir la pérdida en un tramo de la fibra, donde el OTDR calculará el coeficiente de atenuación de la fibra y las pérdidas por conectores y empalmes.

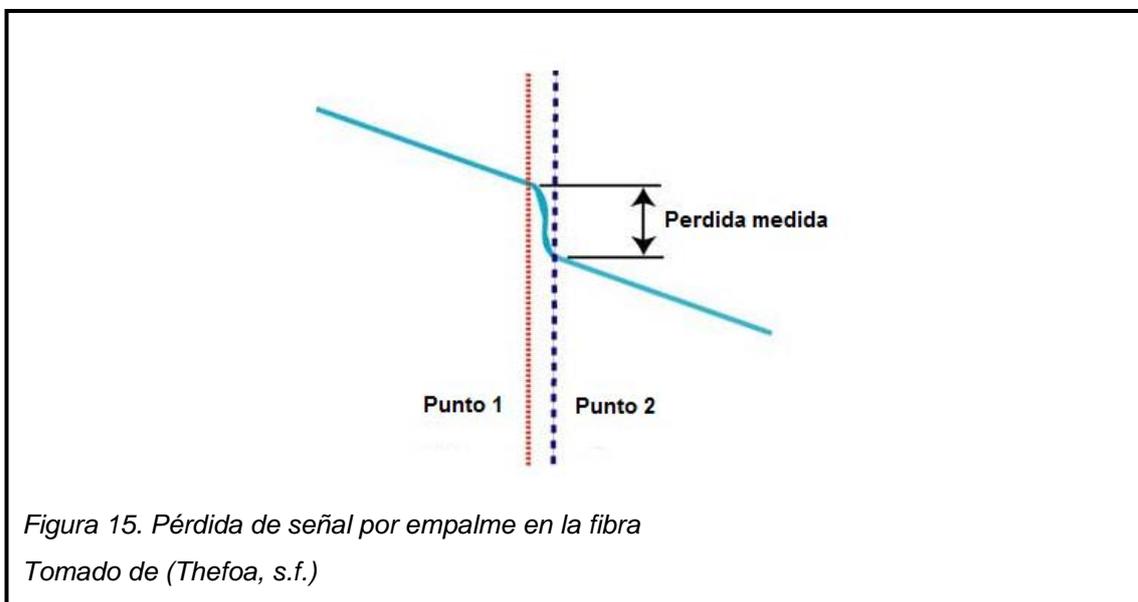


### 1.7.1.3 Coeficiente de atenuación de la fibra

Como se explicó en el punto anterior, el OTDR mide la distancia y la pérdida entre dos marcadores pero calcula el mejor ajuste entre dos puntos matemáticamente utilizando el método de estimación de “mínimos cuadrados” para reducir el ruido. Cuando los marcadores están situados sobre un tramo con ruido en la traza, la estimación por mínimos cuadrados calcula la pérdida en dB entre los dos cursores. Este método traza una línea imaginaria entre los marcadores indicando el mejor ajuste en la traza, promediando el ruido.

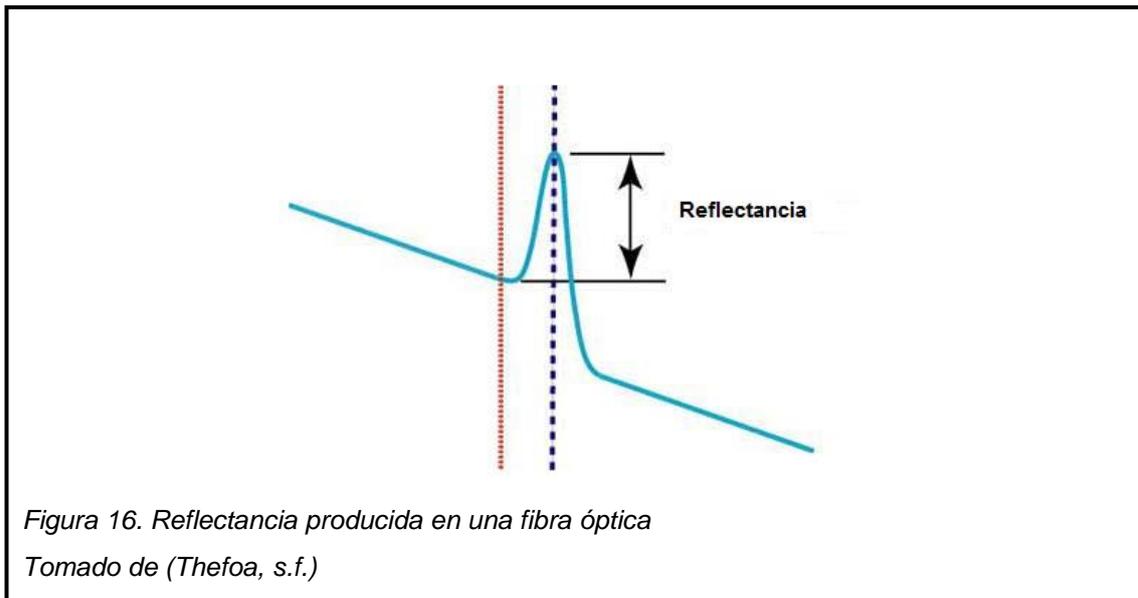
#### 1.7.1.4 Método de medición de pérdida por dos puntos de empalme

El OTDR mide la distancia hasta y la pérdida de señal hasta un evento (conector o empalme) entre dos puntos o marcadores. Para medir la pérdida por empalmes, se debe mover los marcadores cerca del empalme que se va a medir, teniendo la misma distancia desde el centro del empalme hasta los marcadores. Los empalmes no siempre se verán iguales en todas las mediciones, esto dependerá de la resolución de medición y el ruido provocado en el enlace. El OTDR calculará la pérdida en dB entre los dos puntos dando la lectura final en dB.



#### 1.7.1.5 Reflectancia

El OTDR mide la cantidad de luz que es retornada por la retrodispersión en la fibra y la reflexión creada por los conectores y los empalmes. La cantidad de luz reflejada se determina por la diferencia entre índices de refracción entre las dos fibras fusionadas, en función de la composición del vidrio de la fibra, o del aire que existe entre los espacios generados por los empalmes de las fibras, esto es muy común en conectores y empalmes mecánicos.



## 1.8 Conceptos Geológicos

La geología al ser una ciencia muy compleja y con una gran cantidad de información, en este punto solo se definirán conceptos muy básicos correspondientes a temas de importancia que tienen relación con el desarrollo de este trabajo de titulación.

## 1.9 Importancia de un evento geológico

El Ecuador tiene una geología muy dinámica, marcada por grandes terremotos y episodios volcánicos. El propósito del análisis geológico es proveer una descripción detallada de la geología que se encuentra a lo largo del Oleoducto de Crudos Pesados (OCP) y en sus alrededores.

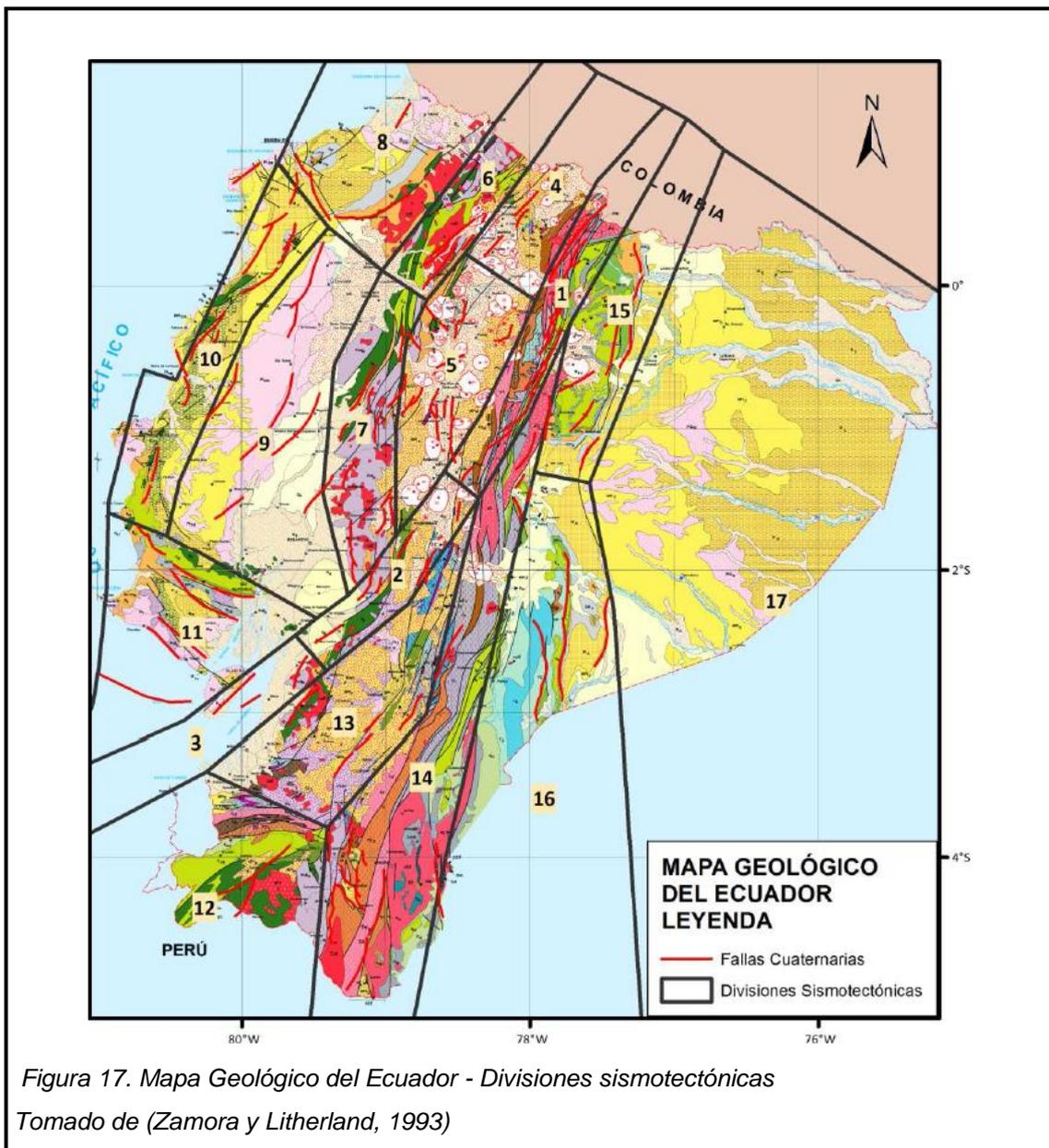
La actividad sísmica en el país representa una amenaza potencial a las obras realizadas en el Oleoducto de Crudos Pesados del Ecuador. Gracias a las investigaciones realizadas por OCP.SA se tiene a disposición nuevos datos sísmicos y tectónicos que han sido reconocidos en el área de influencia para el proyecto OCP, el estudio se basó en la revisión y análisis de estudios realizados anteriormente sobre peligrosidad sísmica, así como publicaciones de varios

autores sobre sismicidad en el Ecuador y de la parte noroccidental de Sudamérica. (OCP, 2001)

El riesgo volcánico también es un peligro potencial para el OCP y sus áreas de influencia, en su ruta, el OCP se puede ver afectado por los siguientes volcanes: Reventador, Antisana, Complejo Volcánico de Chacama, Ninahuilca, Guagua Pichincha y Pululahua.

El oleoducto atraviesa en sentido Este-Oeste la parte septentrional del país, por lo que a su paso se encuentra con todos los sistemas de fallas que afectan al territorio como son el sistema de fallas inversas del callejón Interandino, en especial la falla de Quito y del sistema de fallas del Frente Andino Oriental, con su mayor expresión en la zona del Volcán Reventador. (Estudios Ambientales OCP S.A, 2001)

Dentro de estos sistemas se identifica un total de 94 fallas que se pueden observar en el mapa sismotectónico del Estudio Ambiental realizado por OCP para la construcción del Oleoducto de Crudos Pesados.



Es por eso que las políticas de planificación y planes de contingencia en la empresa OCP S.A. son indispensables a la hora de disminuir significativamente los impactos al OCP por daños geológicos. La geología juega un papel fundamental en la identificación y evaluación de estas amenazas. Mediante el desarrollo de nuevas tecnologías y con un monitoreo continuo de los potenciales riesgos geológicos, podemos restringir los parámetros responsables de sus impactos, prevalencia y su impacto físico. Tal comprensión es fundamental para la planificación futuros eventos e implementación de nuevas políticas para mitigar sus impactos.

### 1.9.1 Regiones geológicas del Ecuador

La ruta del OCP recorre el territorio ecuatoriano entre los 0° y 1° latitud Norte aproximadamente, atravesando las principales regiones morfo-estructurales del país. Las regiones geológicas en el Ecuador son:

- Costa
- Cordillera Occidental (Sierra Andina)
- Graben (Fosa tectónica) de Quito
- Cordillera Real (Sierra Andina)
- El Oriente

Cada región geológica es diferente y reflejan un ambiente particular en función a sus diferentes estados de evolución.

### 1.9.2 Tipos de movimientos en masa que se pueden medir por el método OTDR

En este punto se presenta una breve descripción de los tipos de movimientos en masa que se pueden ser medidos por medio del OTDR.

*Tabla 1. Tipos de movimiento de masa Tomado de (GEMMA, 2007)*

<b>Tipo</b>	<b>Subtipo</b>
<b>Caídas</b>	Caída de roca
<b>Volcamiento</b>	Volcamiento de roca Volcamiento flexural de roca
<b>Deslizamiento de roca o suelo</b>	Deslizamiento translacional Deslizamiento rotacional
<b>Propagación lateral</b>	Propagación lateral lenta Propagación lateral rápida

## **Volcamiento**

El volcamiento es producido por la fuerza de gravedad, esta ejerce una presión en la tierra superficial hacia delante de uno o varios bloques de roca, lo cual genera grietas en la superficie y volcamiento de rocas.

## **Deslizamiento**

El deslizamiento es el movimiento en masa que más a menudo ponen en riesgo a la integridad del oleoducto y colocan en riesgo la vida de muchas personas. Estos movimientos se producen por la inestabilidad de la tierra, produciendo un asentamiento sobre tierra estable, que arrastra consigo rocas y árboles. Estos deslizamientos pueden ser rápidos, los cuales son muy peligrosos, o a su vez pueden ser lentos, estos se pueden prevenir realizando un estudio en sus etapas iniciales. Existen dos tipos de deslizamiento que son muy comunes:

- **Deslizamiento rotacional:** ocurre internamente en el material, su ruptura es de forma circular o cóncava.
- **Desplazamiento traslacional:** Es un tipo de deslizamiento en el cual la masa de tierra se desplaza a lo largo de una superficie de falla plana u ondulada. En general, estos movimientos suelen ser más superficiales que los rotacionales.

## **Propagación lateral**

La propagación lateral es un tipo de movimiento en masa cuyo desplazamiento se produce por la deformación interna del material causando fragmentación en el terreno. Las propagaciones laterales pueden considerarse como la etapa final en una serie de movimientos.

### 1.9.3 Movimientos en masa

El término movimiento en masa se define como “...*todo movimiento de ladera debajo de una masa de roca, detritos o de tierras por efectos de la gravedad...*” (Cruden, 1991). Estos movimientos en masa suelen ser lentos, a veces imperceptibles y confusos, en tanto que otros pueden llegar a desarrollar velocidades altas. (Glade y Cozier, 2005). Cabe recalcar que estos movimientos en masa son más propensos a ocurrir cuando la tierra es sometida a cargas accidentales extremas como lluvias torrenciales, sismos, vulcanismos, entre otros.

### 1.10 Principio de medición de movimientos de masa con el método OTDR

Como ya se explicó anteriormente el OTDR es un instrumento de medición óptica que mide en función del tiempo la luz que es retrodispersada en la fibra. Gracias a estas propiedades que ofrece el OTDR podemos medir el lugar de perturbación en una fibra relacionando las pérdidas por curvatura de la fibra ocasionados por los eventos geológicos descritos en el punto anterior.



Como se observa en la Figura 18, al ocurrir un movimiento de tierra produce una curvatura o estrés en el cable de fibra óptica. Esto produce una reflexión en el pulso de luz que envía el OTDR cuando se realiza mediciones. Con esta reflexión producida se puede calcular la distancia en la que ocurrió el evento. A mayor perturbación mayor será la atenuación de la señal. (Salinas, 2003)

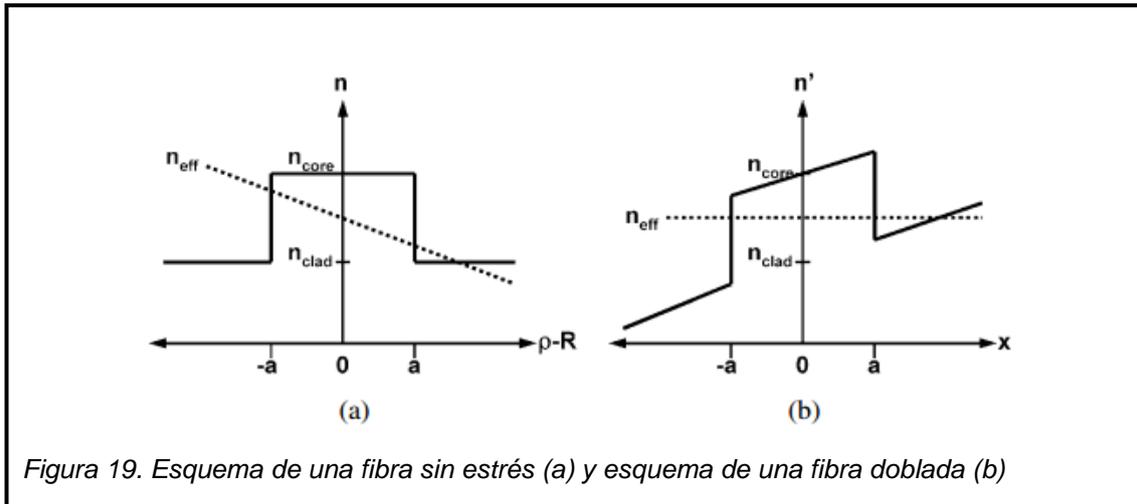


Figura 19. Esquema de una fibra sin estrés (a) y esquema de una fibra doblada (b)

Las pérdidas por curvaturas y estrés en una fibra mono-modo de longitud  $L$ , se obtienen a partir de la siguiente expresión matemática: (Faustini. L, y Martini. G, 1997)

$$L_s = 10 \log(\exp(2\alpha L)) = 8.686\alpha L \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde:

$\alpha$  Es el coeficiente de pérdida por doblado de la fibra, y esta depende del radio de curvatura, la longitud de onda, y también de la estructura y el material de la fibra.

El modelo matemático simplificado para hallar el coeficiente de pérdida por doblado de la fibra ( $2\alpha$ ) (dB/Km) que fue propuesto en la teoría de acoplamiento modal propuesta por Marcuse y está expresado como: (Marcuse, 1984)

$$2\alpha = 4.343 \frac{\pi^{1/2} k^2 \exp\left(\frac{2\gamma^3 R_{eff}}{3\beta_z^2}\right)}{2R_{eff}^{\frac{1}{2}} \gamma^{\frac{3}{2}} V^2 K_{m-1}(\gamma a) K_{m+1}(\gamma a)} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde:

$2\alpha$  Es la pérdida de potencia en dB/Km.

$k$  Es el decaimiento de potencia en el núcleo.

$\beta_z$  Es la constante de propagación.

$R_{eff}$  Es el radio de curvatura equivalente.

$V$	Es el número $V$ de la fibra.
$K$	Es la función de Bessel modificada.
$m$	Es el número azimutal.
$\gamma$	Es el decaimiento de potencia en el recubrimiento.

El decaimiento de potencia en el núcleo y en el recubrimiento están expresados como:

$$\kappa = \sqrt{k_{core}^2 - \beta_z^2} \quad (\text{Ecuación 11})$$

$$\gamma = \sqrt{\beta_z^2 - k_{clad}^2} \quad (\text{Ecuación 12})$$

La variable  $k$  tanto como para el núcleo y revestimiento está definida como el número de onda y se expresa como:

$$k = \omega/c \quad (\text{Ecuación 14})$$

Donde:

$\omega$	Es la frecuencia de la onda.
$c$	Es la velocidad de la onda.

La frecuencia de onda está expresada como:

$$\omega = 2\pi c/\lambda \quad (\text{Ecuación 15})$$

Donde:

$c$	Es la velocidad de la onda.
$\lambda$	Es la longitud de onda de la fibra.

El índice de propagación  $\beta_z$  varía dependiendo a su posición en la curvatura de la fibra (Figura 13) y se puede definir como:

$$\beta_z(x) = \frac{u}{(R+x)_{eff}} \quad (\text{Ecuación 16})$$

Donde  $u$  es la constante de propagación angular y  $(R + x)_{eff}$  está definido como una analogía al radio de curvatura equivalente. El radio de curvatura Equivalente  $R_{eff}$  es una constante que depende del material de construcción del medio, en este caso para la fibra de sílice toma valores aproximados de  $R_{eff}/R \approx 1.28$  (Marcuse, 1976)

El número  $V$  de la fibra es un parámetro adimensional y está definido por:

$$V = \beta_z a \sqrt{n_{core}^2 - n_{clad}^2} \quad (\text{Ecuación 17})$$

Donde:

- $\beta_z$  Es el índice de propagación.
- $a$  Es el radio del núcleo de la fibra.
- $n_{core}$  Es el índice de refracción del núcleo de la fibra.
- $n_{clad}$  Es el índice de refracción del recubrimiento de la fibra.

Matemáticamente la función modificada de Bessel K está expresada como:

$$\frac{d^2u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} - \left( \gamma \frac{l^2}{r^2} \right) u = 0, r > a \text{ (recubrimiento)} \quad (\text{Ecuación 15})$$

Donde:

- $l$  Es el tipo y orden de la función de Bessel
- $r$  Es la posición radial
- $\gamma$  Es el decaimiento de potencia en el recubrimiento.

Las pérdidas por curvaturas en fibra no suelen ser altas, pero cuando se sobrepasa el umbral de curvatura las pérdidas son considerables, el radio crítico de curvatura en una fibra mono-modo está definido por: (Duton, 1998)

$$R_c = \frac{3n_{core} \cdot \lambda}{4\pi (NA)^3} \quad (\text{Ecuación 18})$$

Donde:

- $n_2$  Es el índice de refracción del recubrimiento de la fibra.

- $\lambda$  Es la longitud de onda de operación.
- $NA$  Es la apertura numérica de la fibra.

Aunque en situaciones realistas y bajo varios factores reales que influyen en este fenómeno desafortunadamente no existe ninguna solución exacta basándose en las ecuaciones de para este tema. Así que diferentes enfoques han sido empleados para la evaluación de pérdidas por curvatura de la fibra óptica.

Estas curvaturas producidas en la fibra se representan en las mediciones por OTDR como pérdidas en la señal y dependiendo a su magnitud se muestran de diferentes formas en la traza obtenida por el OTDR.

Es imposible asociar de manera fija un evento geológico a un valor de pérdidas en la señal, por ejemplo; no se puede concluir que al tener una pérdida de señal específica esta esté relacionado concretamente a un volcamiento de piedras o un deslave, existen sistemas de monitoreo geológico que trabajan conjuntamente con sistemas de video vigilancia para tener un mejor diagnóstico de los eventos que se puedan detectar. El sistema que se ha desarrollado en este proyecto está diseñado para monitorear mediante las lecturas de trazas de un OTDR el movimiento de la tierra y poder realizar trabajos preventivos para posibles eventos geológicos que puedan poner en riesgo el oleoducto.

Los complejos análisis matemáticos referenciados en este punto se toman como sustento teórico para relacionar las pérdidas de potencia por curvatura de la fibra y la detección de eventos geológicos mediante estas ecuaciones. En el capítulo 3 se explica de manera detallada como se relaciona la traza de un OTDR con la detección de eventos geológicos.

NOTA: Ahondar en el estudio de modelos matemáticos no consta en el alcance de este proyecto de titulación, sin embargo es de gran importancia tener un sustento científico como respaldo de este proyecto. Todos los análisis y estudios matemáticos completos se encuentran en el ANEXO 1 y 2.

## 2. DESARROLLO DEL SISTEMA

### 2.1 Funcionamiento actual del OCP

El Oleoducto de Crudos Pesados del Ecuador está compuesto de una tubería de acero API 5L-X70 con diámetros variables durante su recorrido 24", 32", 34" y 36". Con una extensión de 485 kilómetros sobre el territorio ecuatoriano, el 99% del oleoducto se encuentra enterrado. Tiene una capacidad de transporte de 410.000 barriles por día. Cuenta con 4 estaciones de bombeo, 2 estaciones reductoras de presión y 1 terminal marítimo. Todas estas instalaciones poseen certificación ISO 14001:2004 (certificación para sistemas de gestión ambiental) El Oleoducto cuenta con una red de fibra óptica en todo su recorrido, un sistema satelital como sistema de comunicación de backup, Sistema de Vigilancia por Video y un Sistema de Adquisición de Datos (SCADA) para control de válvulas y monitoreo de flujo del crudo.

El funcionamiento del oleoducto inicia con el arribo de hidrocarburo de los usuarios por medio de un sistema de oleoductos secundarios a la estación Amazonas, que está situada a 5 kilómetros de la ciudad de Nueva Loja en la provincia de Sucumbíos. Para iniciar el transporte, el crudo es calentado de manera indirecta por un sistema de recirculación de aceite térmico e intercambio de calor. La estación de bombeo da el impulso necesario para que el crudo tenga la presión suficiente para poder iniciar su recorrido.

Después de pasar por la estación Amazonas, el crudo llega a la estación Cayagama ubicada también en la provincia de Sucumbíos cantón Gonzalo Pizarro. En esta estación el horno de calentamiento se encarga de recuperar la presión perdida por el ascenso del crudo, y continua con el proceso de bombeo del crudo hacia Esmeraldas. El Crudo continúa su ascenso hasta la tercera estación de bombeo: Sardinias ubicada en la provincia de Napo. Esta estación tiene 4 tanques API para almacenamiento de crudo combustible. Al igual que en todas las estaciones de bombeo se calienta el crudo en hornos para aumentar la presión para que el crudo siga con su recorrido.

Posteriormente el crudo llega a la última estación de bombeo: Páramo que es la encargada de dar el último impulso al crudo para llevarlo al punto más alto del oleoducto 4.064 msnm en el sector de la virgen. Luego de pasar por el punto más alto, el crudo inicia su descenso hasta la costa ecuatoriana por lo que es indispensable iniciar un proceso de reducción de presión en el oleoducto para disminuir la velocidad de caudal del crudo, este proceso se logra mediante estaciones de reducción de presión que están estratégicamente ubicadas.

Las dos estaciones de reducción Chiquilpe y Puerto Quito están ubicadas en la provincia de Pichincha estas tienen 5 válvulas controladoras de presión, 1 tanque de alivio y 2 bombas de reinyección. Finalmente el crudo llega a la provincia de Esmeraldas, su punto de destino. El terminal Marítimo de OCP está ubicado en Punta Gorda a 15 kilómetros de la ciudad de Esmeraldas, esta estación tiene la capacidad de almacenar 3 millones 750 mil barriles de crudo distribuidos en 5 tanques de almacenamiento.

El terminal Marítimo de OCP tiene salida al mar, éstas tienen tuberías que están conectadas a los tanques de almacenamiento, y estos a su vez están conectados al sistema PLEM (Pipe Line end Manifold). Es un sistema de carga por gravedad, desde este sistema salen dos mangueras submarinas que se conectan a 2 boyas: Charlie o Papa, desde cada boya salen dos mangueras de 24" y 16" que se conectan con el buque tanquero de carga y se procede a despachar el crudo.

En la actualidad OCP S.A monitorea permanentemente desde el cuarto de control principal (MPCC) ubicado en la ciudad de Quito la operación del oleoducto, este cuarto cuenta con sistemas de monitoreo para la detección de fugas de crudo (LDS) y el sistema (SCADA), pero no cuentan con un sistema de detección de eventos geológicos que permita la detección temprana de alertas que pongan en riesgo la integridad del oleoducto, al no tener un sistema automatizado se deben realizar inspecciones periódicas, que conllevan la movilización de personal capacitado mediante recorridos terrestres y aéreos a lo largo del oleoducto. (OCP, 2013)

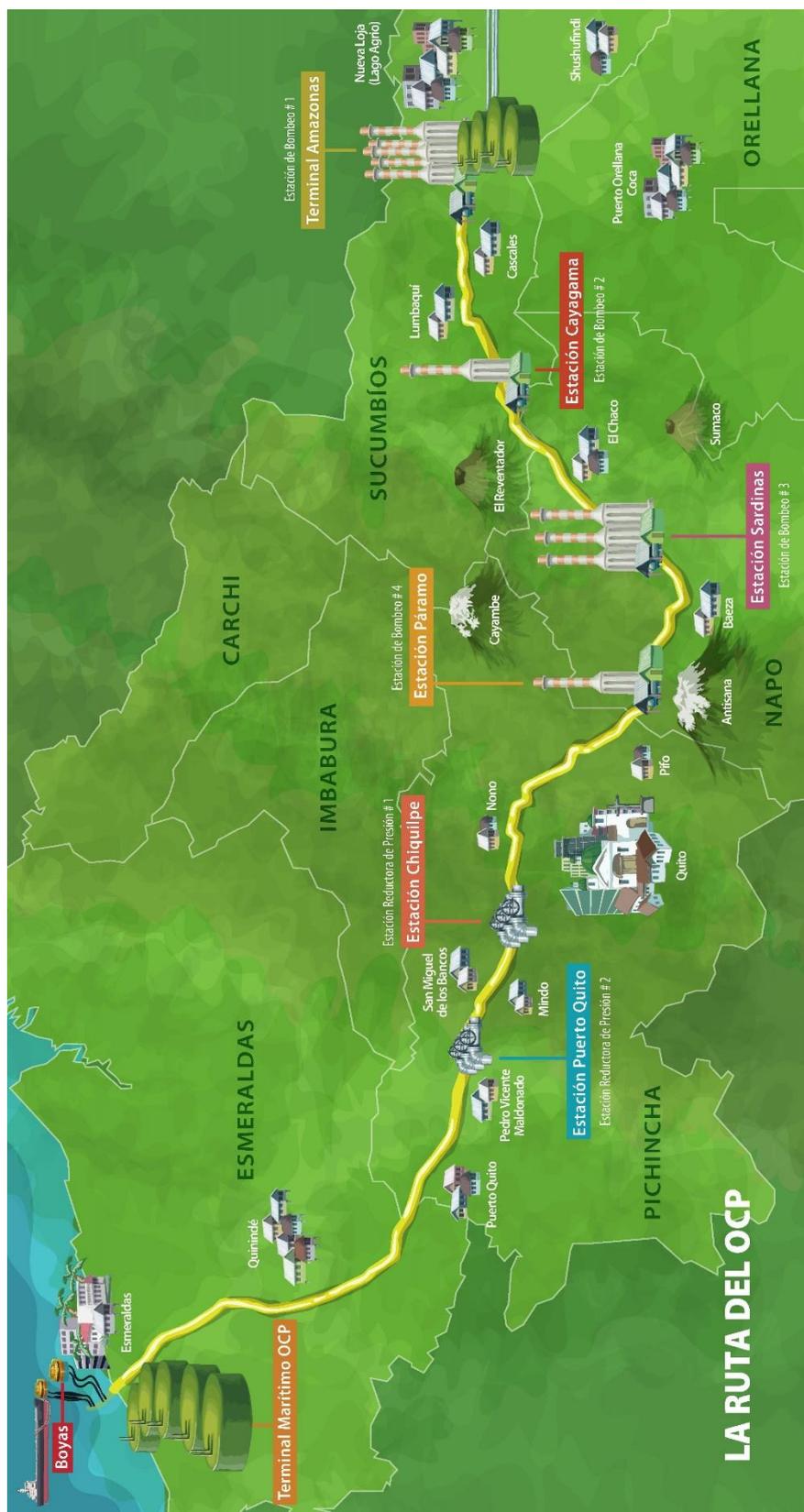


Figura 20. Ruta del OCP



## **2.2 Tecnología a utilizar**

El control y monitoreo del transporte de crudo a través del oleoducto es uno de los procesos más importantes ya que garantiza que el crudo sea transportado de principio a fin sin ningún tipo de problema.

Tomando en cuenta el funcionamiento actual del MPCC y las problemáticas asociadas a este como, la carencia de un sistema de detección de eventos geológicos para prevenir derrames de crudo, es necesario que la tecnología a utilizar sea capaz de detectar automáticamente posibles movimientos de masa que pongan en riesgo la integridad del oleoducto, que sea capaz de administrar la información de forma inmediata y que sobre todo sea una solución de bajo coste para la empresa.

La tecnología que cumple con todos los requerimientos anteriores es la fibra óptica. OCP S.A al tener ya una red de fibra óptica existente que está enterrada junto al oleoducto hace que los costos de la implementación de este sistema sean muy bajos.

## **2.3 Ventajas de la fibra óptica frente a otras tecnologías**

La tecnología de fibra óptica presenta ventajas notables frente a otras tecnologías de transmisión de datos como lo son el cable de cobre, y las conexiones inalámbricas.

Entre las principales ventajas están las siguientes:

- La velocidad de transmisión de datos por fibra es mucho más rápida comparado a un cable de cobre o una conexión inalámbrica.
- La fibra óptica se tiene la capacidad de ser utilizada como sensor de deformación, temperatura y detección de sustancias químicas.
- Es inmune a interferencias electromagnéticas.

- El cable de fibra óptica es dieléctrico, es decir, no lleva conductores eléctricos lo cual lo hace un medio intrínsecamente seguro.
- La fibra óptica es resistente a condiciones adversas, altas temperaturas, mal clima y humedad excesiva.
- Su duración de vida es de aproximadamente 30 años o más dependiendo el tipo de cable.

Gracias a las ventajas indiscutibles de la fibra óptica se utilizó esta tecnología ya que cumple con los requerimientos de la empresa para la realización de este proyecto. Cabe recalcar que dependiendo de la aplicación a realizarse, cada sistema de transmisión tiene sus ventajas y desventajas.

## 2.4 Esquema del sistema

El esquema del sistema de detección de eventos geológicos requiere de un cable de fibra óptica, un OTDR, una PC y el software de detección de eventos geológicos.

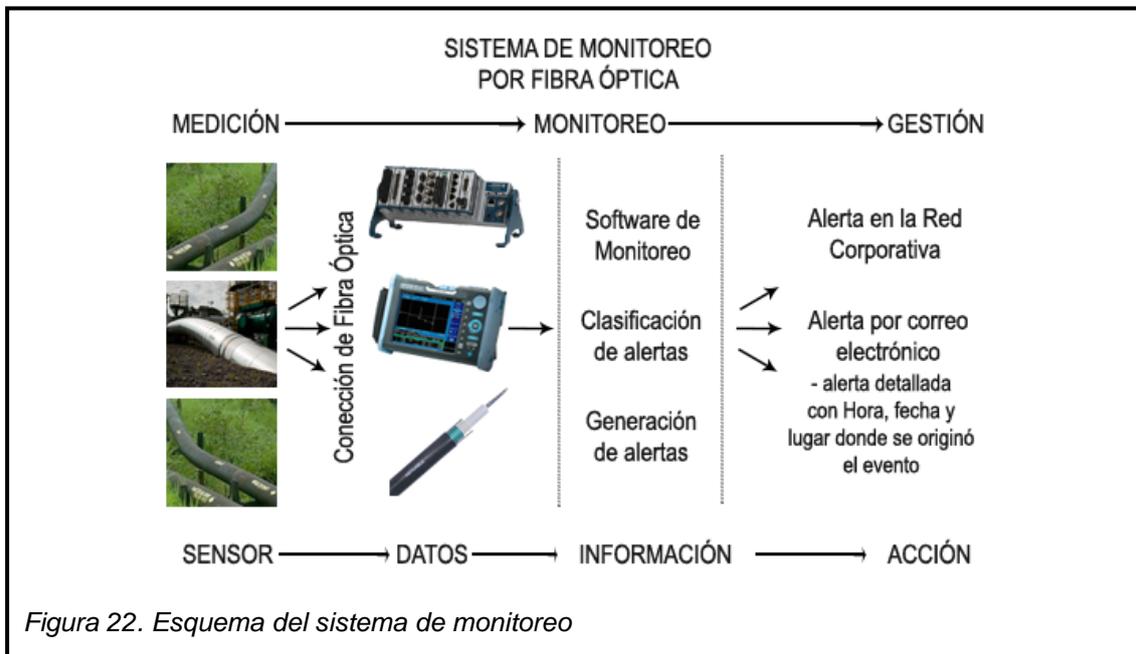


Figura 22. Esquema del sistema de monitoreo

El OTDR analiza la fibra que está conectada en el puerto de prueba, estos datos son enviados al software diseñado en LabView para su análisis y generación de alertas.

Los elevados costos del hardware que se necesita para la implementación del proyecto han ocasionado que las pruebas de hardware de este trabajo de titulación se realicen en un ambiente simulado. Sin embargo el objetivo principal del proyecto no se verá alterado por este inconveniente y queda a disposición de la empresa para ser aplicado a futuro en la infraestructura existente de OCP Ecuador S.A.

## **2.5 Componentes de Hardware**

Todo el sistema de adquisición de datos para el software de gestión de eventos geológicos está conformado por 2 elementos: el cable de fibra óptica mono-modo que ya está instalado en el oleoducto que actuará como sensor de deformación y el OTDR que se encarga de interpretar los datos obtenidos por la fibra y lo transmiten a la PC.

### **2.5.1 Fibra óptica mono-modo de 12 hilos**

La red de OCP ECUADOR S.A cuenta con un cable de fibra óptica mono-modo marca Corning, este cable de alta duración está compuesto de 12 hilos en su interior, está enterrado junto al oleoducto y posee 29 nodos a lo largo de su trayectoria, desde Lago Agrio hasta Esmeraldas estos 29 nodos están interconectados formando una topología de doble anillo.

Esta red de fibra es de vital importancia para la empresa ya que por esta se transmiten los datos de la red corporativa, datos del control de monitoreo del MPCC y la comunicación de voz y datos entre estaciones.

Para el desarrollo de este sistema de monitoreo de eventos geológicos no hace falta la intervención de obra civil o técnica que tenga que ver con la remoción de tierra o manipulación de la fibra que pueda poner en riesgo la integridad de la fibra y el oleoducto. Simplemente se debe iluminar una de las fibras que no estén operativas para el uso exclusivo del sistema de monitoreo para la gestión geológica del OCP.



*Tabla 2. Especificaciones técnicas de la fibra instalada en el oleoducto*

Especificaciones Generales	
Ambiente	Exterior
Aplicación	Enterrado directo, ducto, aéreo
Tipo de cable	Tubo suelto
Tipo de producto	Blindado
Categoría de la fibra	50 micrómetros MM (OM3)
Diseño del Cable	
Elemento central	Dieléctrico
Número de hilos	12
Fibras por tubo	12
Color de los hilos	Azul, Naranja, Verde, Café, Plata, Blanco, Rojo, Negro, Amarillo, Violeta, Rosado, Aqua.
Número de tubos activos	1
Diámetro del Buffer	2.5 mm
Cinta	Repelente de agua
Número de ripcords	2
Elemento de tensión interna	Armadura corrugada
Material del recubrimiento externo	Polietileno
Color de la chaqueta externa	Negro
Características mecánicas del cable	
Máx. fuerza de tensión a corto plazo	2700 N
Máx. fuerza de tensión a largo plazo	890 N
Peso	129 kg/km
Tipo de producto	blindado
Categoría de la fibra	50 micrómetros MM (OM3)
Código de fibra	T

Código de rendimiento	80
Longitudes de onda soportados	850nm/1300nm/1550nm
Atenuación máxima	1.0 db/Km
Radio de curvatura mínimo de instalación	182 mm
Radio de curvatura mínimo de operación	121 mm

Tomado de (Corning, 2016)

## 2.5.2 OTDR

El reflectómetro óptico en dominio del tiempo (OTDR) es sin duda el componente más importante para la realización de este sistema, ya que este equipo se encarga de recolectar toda la información necesaria de la fibra para poder ser procesada en el software. Por eso que se debe elegir un OTDR que cumpla con aspectos necesarios para alcanzar un óptimo funcionamiento a largo plazo.

Para elegir el mejor OTDR que se ajuste a las necesidades de este proyecto se realizó la valoración del equipo a utilizar (potencia de transmisión, ventanas de operación, puntos de muestreo, aplicaciones para enlaces ultra largos de fibra, testeo para cables submarinos de fibra, compatibilidad con LabView) además de aspectos referentes al entorno donde va a trabajar este equipo.

El OTDR elegido por cumplir todos los requisitos del sistema fue el EXFO FTB-500 OTDR. A continuación se detalla las características técnicas de este equipo.



Figura 24. OTDR EXFO FTB-500  
Tomado de (EXFO,2016)

Tabla 3. Especificaciones técnicas OTDR

Especificaciones técnicas	
Modelo	FTB-500 OTDR
Longitud de onda (nm)	1310 ± 20/1550 ± 20/1625 ± 10
Rango dinámico a 20 us (dB)	50/50/48
Zona muerta	1/1.5/1
Atenuación en zona muerta (m)	5/5/5
Rango de distancia (km)	1.25-400
Ancho de pulso (ns)	5-20.000
Umbral de pérdida (dB)	0.01
Resolución de pérdida (dB)	0.001
Resolución de muestreo (m)	0.04 a 5
Cantidad de muestras	Hasta 256.000
Tiempo de medición	Definido por el usuario (5 seg. Mínimo hasta 60min. Máximo)
Potencia de salida estable (dBm)	5

Tomado de (EXFO, 2016)

### 3. DESARROLLO DE SOFTWARE

#### 3.1 Análisis de Requerimientos

La primera etapa para el desarrollo de software es la obtención de los requerimientos y necesidades del cliente para el diseño del sistema, los requisitos describen los servicios detallados que debe ofrecer el sistema desarrollado y sus restricciones. El Análisis de requerimientos se orienta en la visión que tiene el cliente de cómo debe funcionar su sistema, muchas veces el cliente plantea una idea confusa y muy ambigua de los requerimientos del programa, es aquí donde el ingeniero encargado de desarrollar el sistema actúa como la persona que puede guiar al cliente para lograr una idea clara de los requerimientos necesarios para el sistema.

Para el desarrollo de este sistema se tomaron en cuenta varias alternativas con respecto al lenguaje de programación que se iba a utilizar antes de comenzar su implementación. Después de realizar una comparación de tantos tipos de

lenguajes de programación que existen en la actualidad, la alternativa con mayores ventajas para realizar este proyecto fue el software de la empresa National Instruments LabView con un lenguaje de programación visual de bloques para la virtualización de instrumentos.

### **3.1.1 Determinación de los requerimientos de información**

El sistema de detección de eventos geológicos consiste en llevar a cabo un monitoreo y control de eventos geológicos que puedan poner en riesgo la integridad del oleoducto y así evitar derrames de petróleo a lo largo de su trayectoria.

El software registrará todos los datos adquiridos por el OTDR, analizará los valores obtenidos y enviará alarmas en caso de que sea necesario, la persona encargada de la gestión geológica del oleoducto será la encargada de interpretar la información entregada por el software, generar reportes de las alertas obtenidas y en caso de una alarma de alto riesgo enviar a la escuadrilla de emergencia para realizar los respectivos trabajos correctivos, preventivos o predictivos.

El ingeniero del área de IT será el encargado de administrar el funcionamiento correcto del software, monitorear el enlace de fibra óptica en el OTDR y realizar cambios en el software si es necesario.

Los obreros que trabajan en las diferentes estaciones podrán observar los errores detectados por el programa desde las pantallas informativas en sus estaciones de trabajo, si se produce alguna alarma cerca de su estación estos podrán informar al encargado de la gestión geológica del oleoducto.

La escuadrilla de respuesta a emergencias son los encargados de acudir al lugar donde se localizó la alarma para realizar los trabajos correctivos de acuerdo al manual de respuesta de emergencias proporcionado por la empresa.

### 3.1.2 Diagrama de Flujo

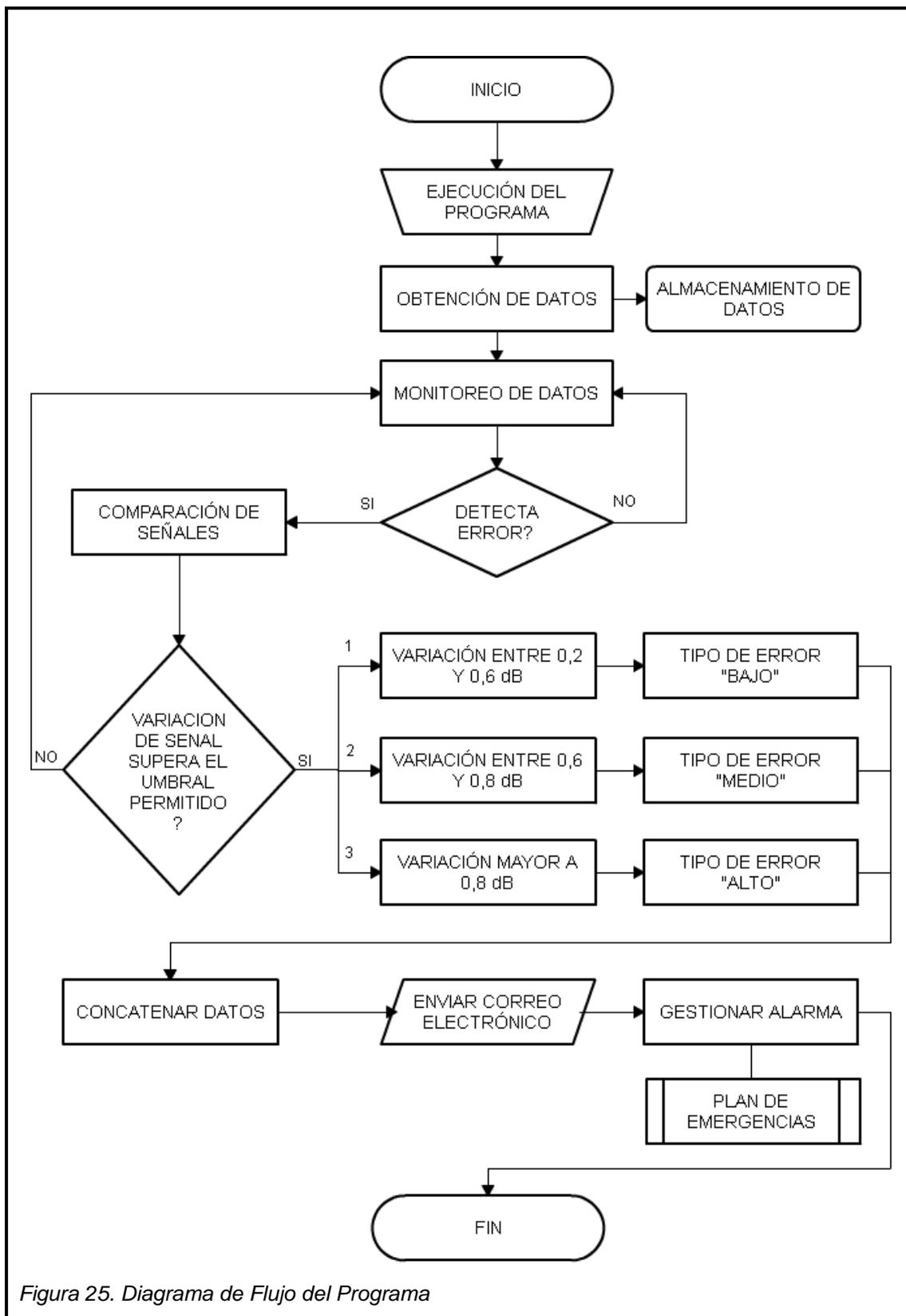


Figura 25. Diagrama de Flujo del Programa

### 3.2 Lenguaje de Programación

LabView es software para el desarrollo de sistemas, enfocado a desarrollar programas de ingeniería y ciencia. Las aplicaciones de esta herramienta de software son muy amplias y se enfocan en la creación sistemas para la adquisición de datos, análisis de datos, control de instrumentos autónomos, sistemas de monitoreo, sistemas de automatización, aplicaciones de inteligencia distribuida enfocado al internet de las cosas, entre muchas otras.

A diferencia de los otros lenguajes de programación por líneas de código, LabView está basado en programación por bloques en un entorno gráfico que facilita significativamente al usuario la forma de crear, visualizar y codificar sistemas. LabView tiene la ventaja indiscutible sobre todos los lenguajes de programación al poder integrarse a infraestructuras de hardware sin complejas configuraciones con líneas de código, fácil implementación de interfaces gráficas de usuario y simulación en ambientes simulados. Además se pueden desarrollar instrumentos virtuales que realizan las mismas funciones que instrumentos reales, en este proyecto se desarrolló un OTDR virtual que cumple con las funciones de un OTDR real y un simulador de eventos en fibra óptica, con lo cual se soluciona el problema de los altos costos en la adquisición de los equipos reales. Estas han sido las principales razones por la cual se eligió LabView como el lenguaje de programación a utilizar en todo el proyecto.

Para desarrollar este sistema se lo ha dividido en 3 partes:

- 1) Sistema de adquisición de datos
- 2) Ambiente de simulación
- 3) Sistema de envío de alertas

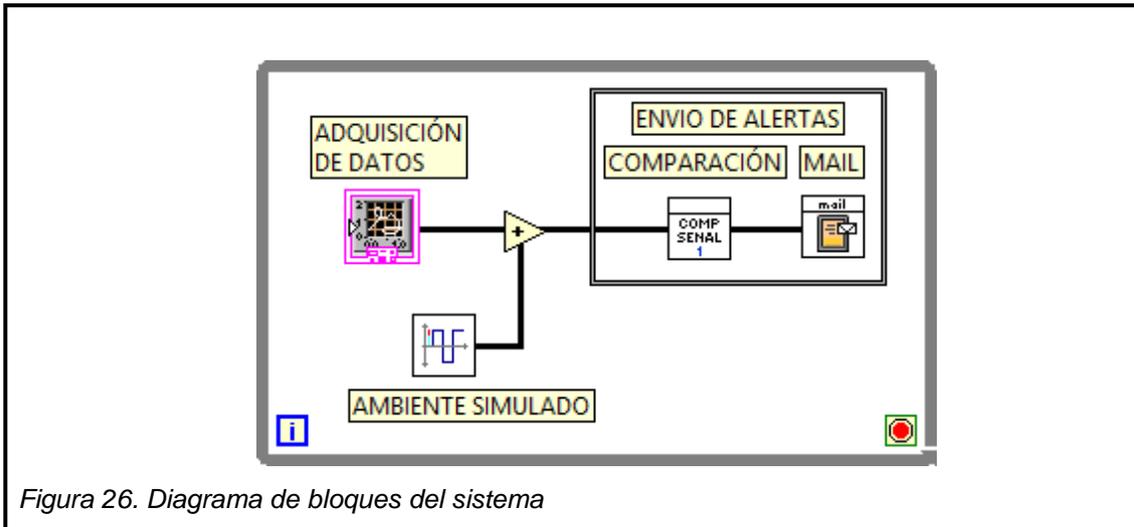


Figura 26. Diagrama de bloques del sistema

En LabView los datos con los que se trabajan tienen un tipo de dato específico y son distinguidos por su color y decoración.

A continuación se detallan los tipos de datos y sus funcionalidades.

**abc** **Tipo de cadena de caracteres (String):** este tipo de datos está representado por el color ROSA y permite formar cadenas de caracteres ASCII.

**DBL** **Tipo de dato numérico (Double):** este tipo de dato está representado por el color NARANJA y permite ingresar números de punto fijo, enteros, números complejos, números de punto flotante y enteros sin signo.

**I8** **Tipo de dato numérico (Integer):** este tipo de dato está representado por el color AZUL y solo permite ingresar números enteros.

**TF** **Tipo de dato booleano (Boolean):** este tipo de dato está representado por el color VERDE y genera valores de 1 o 0 y Verdadero o Falso.

### 3.3 Sistema de adquisición de datos

Para la adquisición de datos es necesario poseer un medio de transmisión que funcione como sensor (fibra óptica) y un OTDR, este debe ser compatible con el

software de desarrollo. Al no tener acceso a estos instrumentos por sus altos costos, se puede utilizar LabView para crear instrumentos virtuales, que pueden tener las mismas funcionalidades que los instrumentos reales. En el caso de este sistema se ha desarrollado un OTDR virtual que tiene la capacidad de medir las atenuaciones en una fibra.

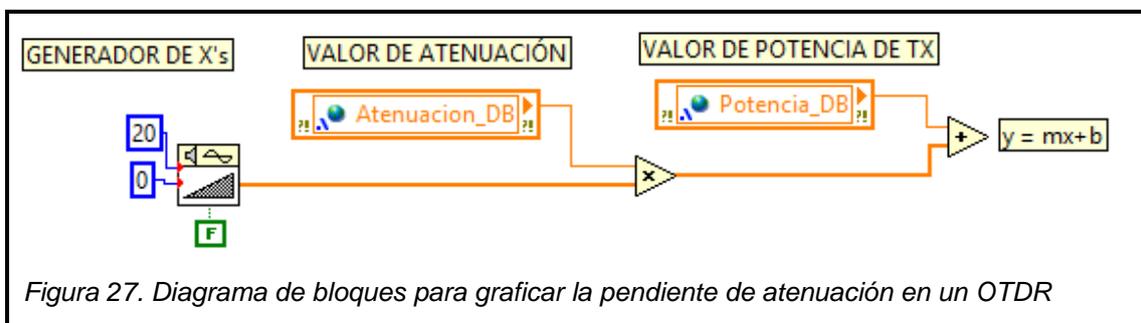
Para la creación del OTDR virtual en LabView se necesita simular datos de atenuación y graficar estos valores en función de una distancia determinada. La gráfica de la pendiente de atenuación en función de la distancia está dada por la siguiente expresión matemática:

$$y = mx + b \quad \text{(Ecuación 17)}$$

Donde:

- $m$  Es el factor de atenuación dada por la fibra óptica
- $x$  Es el valor de distancia en un punto  $x$  determinado
- $b$  Es la potencia de transmisión del sistema

En diagrama de bloques:



Como se puede observar en la Figura 28, el bloque de rampa en el lado izquierdo genera el número de valores que se desea tener en el eje  $X$ , este valor corresponden a la distancia de la fibra en kilómetros. Por defecto este bloque genera un arreglo de datos con 128 muestras en un rango asignado por el usuario con un valor inicial y un valor final, el número de muestras que genera la rampa puede ser modificado para obtener más datos, esto nos permite tener una mayor definición y precisión en la gráfica.

La atenuación y la potencia de transmisión son variables globales compartidas en red de tipo numérico doble estas son ingresadas por el usuario en la interfaz gráfica de la simulación. Una vez que ya se tienen configurados las distancias de los tramos que han sido asignados por OCP Ecuador S.A, se proceden a graficar.

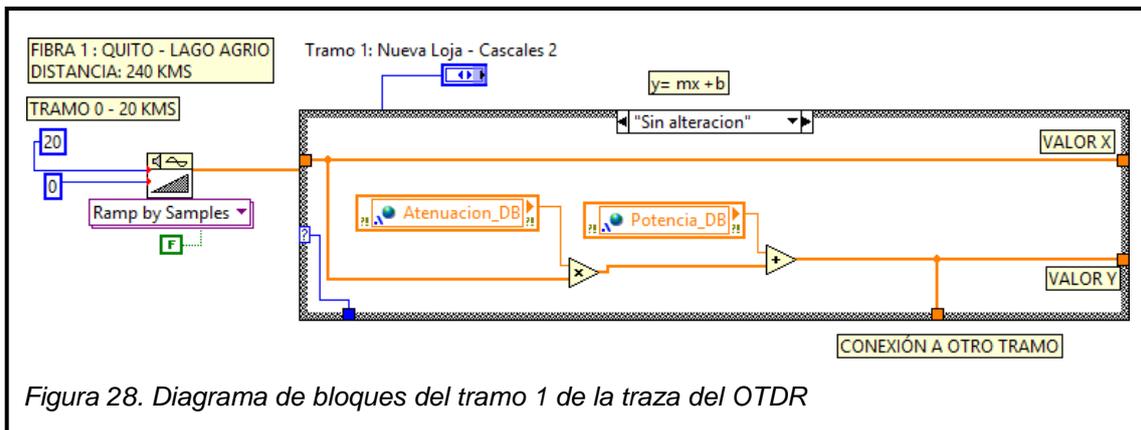
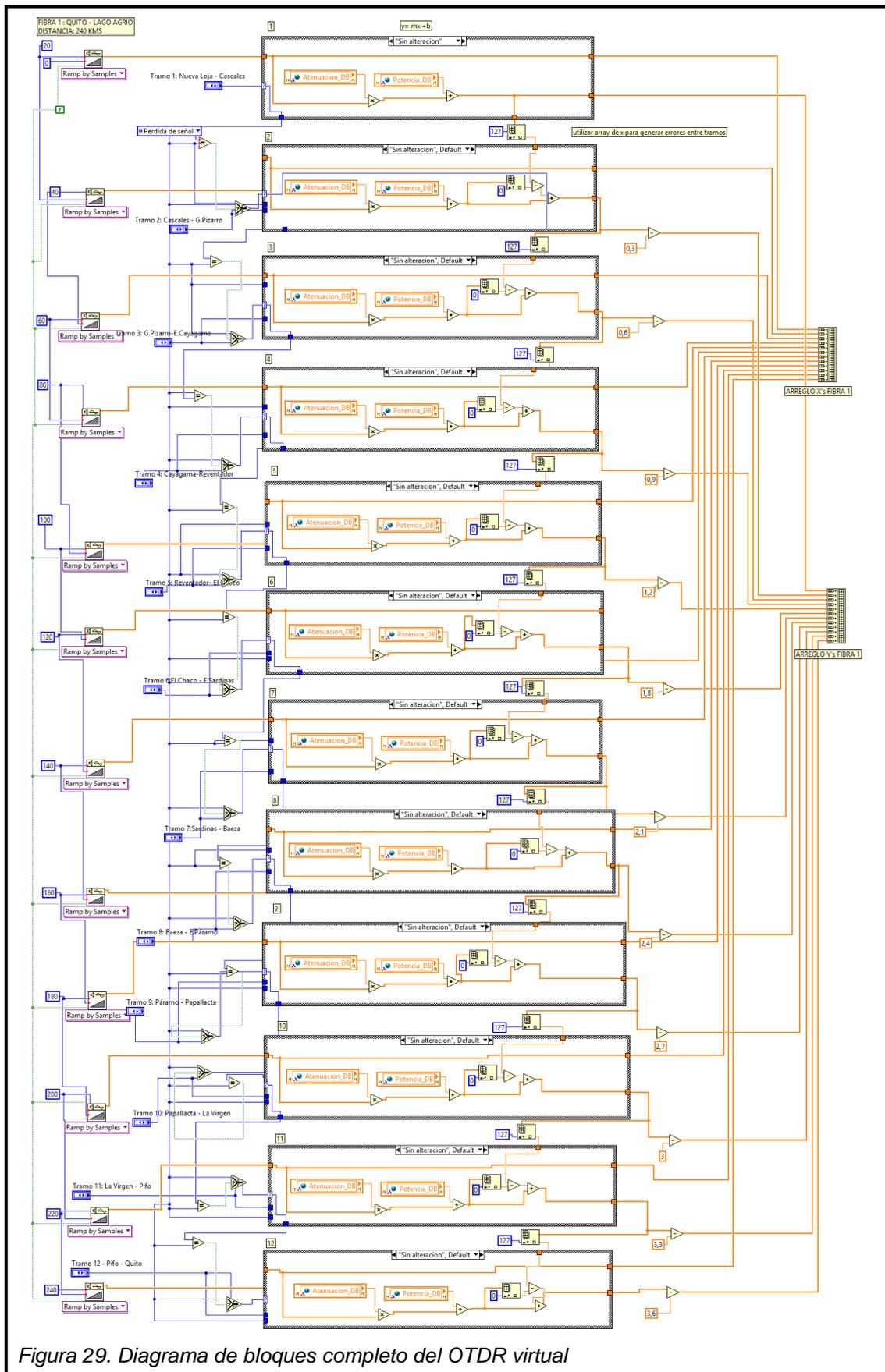


Figura 28. Diagrama de bloques del tramo 1 de la traza del OTDR

Al interconectar los 12 tramos de fibra tendremos un diagrama de bloques compuesto como indica la Figura 29, después de cada tramo se resta a la señal de "Y" un valor constante que representa una pérdida en la señal por empalme de la fibra.



Luego de obtener los valores de distancia del eje “X” y los valores de atenuación del eje “Y” se almacenan en un bloque de arreglo de datos, posteriormente estos se juntan en un bloque condensador de arreglos y este los separa para ser graficados en pares ordenados.

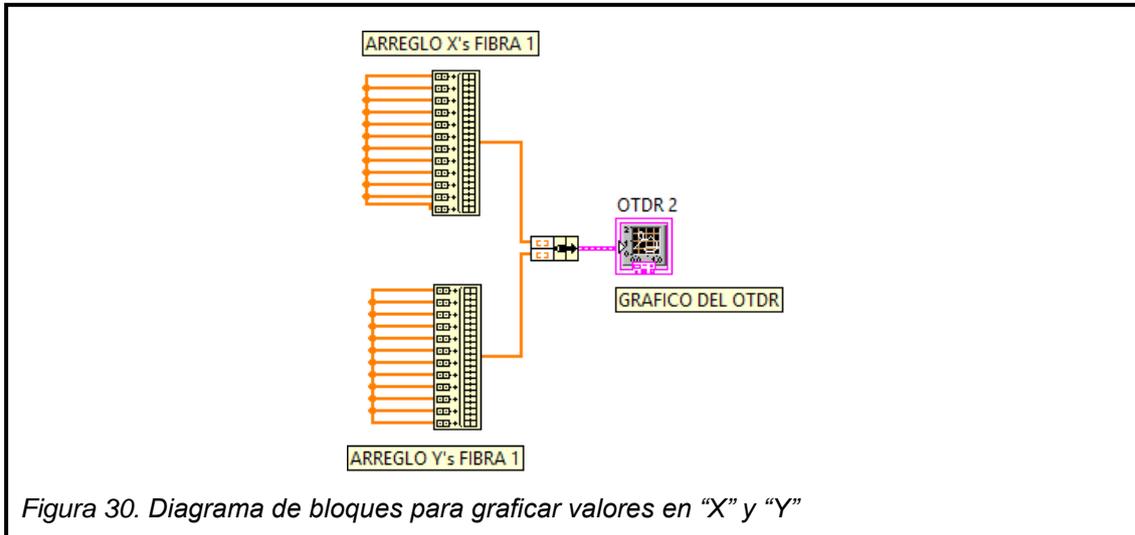


Figura 30. Diagrama de bloques para graficar valores en “X” y “Y”

Como resultado obtenemos una gráfica de la traza con la pendiente característica de la atenuación de la fibra en función de la distancia en kilómetros. Como se puede observar en la Figura 30 se pueden diferenciar los tramos de fibra cada 20 kilómetros simulando un empalme por fusión entre cada tramo, cada empalme tiene una pérdida de señal programada de -0.3 dB.

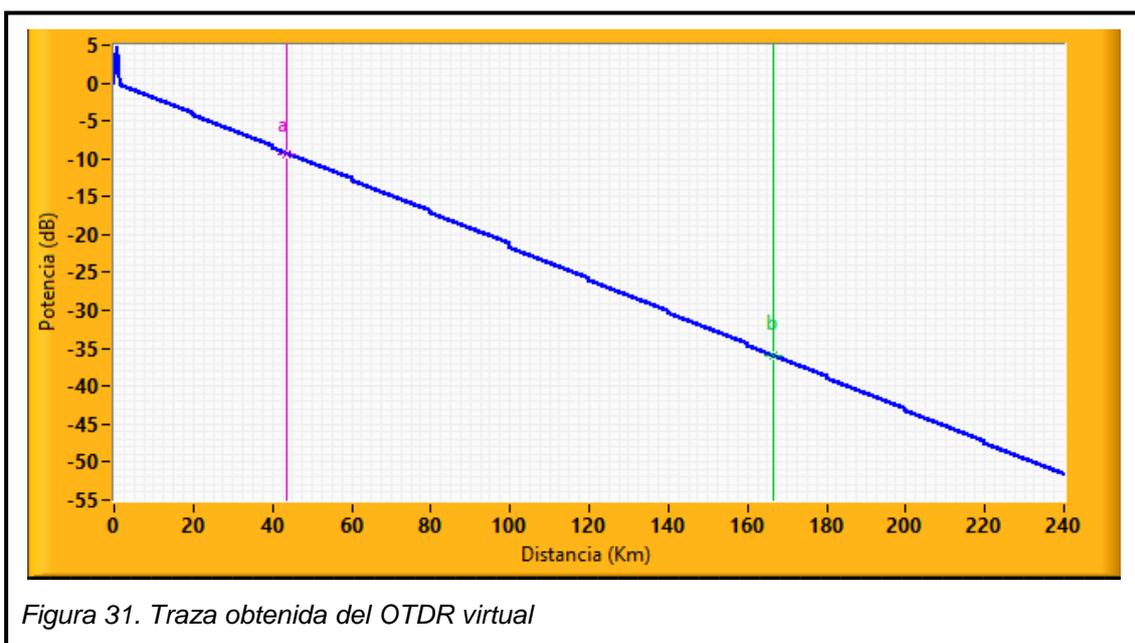


Figura 31. Traza obtenida del OTDR virtual

La traza obtenida será nuestra señal ideal a comparar ya que no presenta ningún tipo de pérdida de señal por factores externos, este gráfico se utilizará para hacer la comparación en futuras mediciones y poder detectar eventos geológicos que se hayan detectado por la atenuación de señal en la fibra.

Para la interfaz gráfica de usuario del OTDR se diseñó un ambiente de trabajo intuitivo y que muestre al usuario solamente información necesaria para poder obtener un análisis de la traza obtenida.

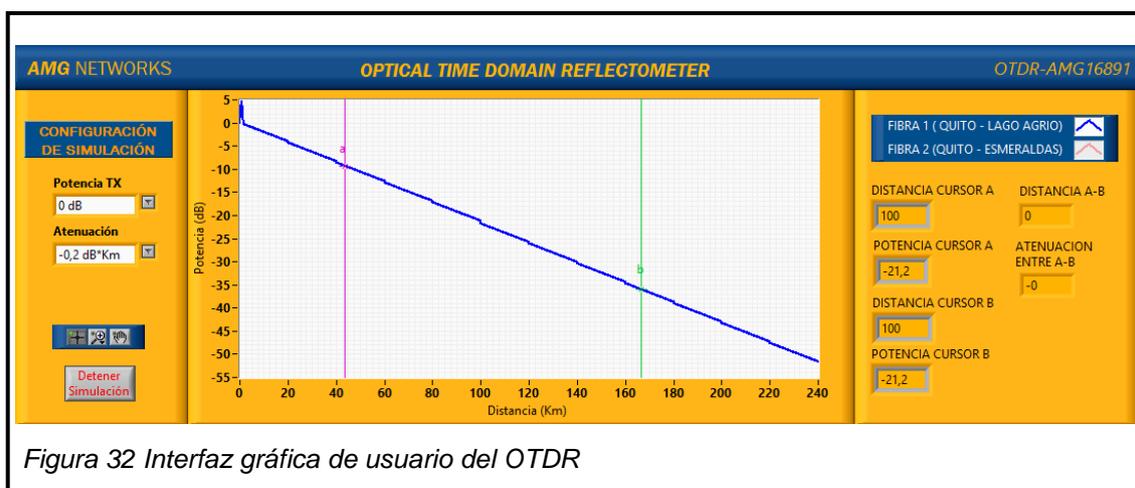


Figura 32 Interfaz gráfica de usuario del OTDR

### 3.4 Ambiente de simulación

La empresa de Oleoducto de Crudos Pesados del Ecuador S.A tiene varias políticas de seguridad, privacidad y confidencialidad de la información susceptible de la empresa, es por eso que no se pueden realizar pruebas reales en la red de fibra del oleoducto, a cambio, para la demostración de este trabajo de titulación fue necesario realizar un ambiente simulado de pruebas, con los mismos parámetros técnicos que dispone la red actual del oleoducto y que han sido suministrados por OCP Ecuador S.A.

La implementación de un ambiente simulado que sea capaz de simular fallas geológicas nos facilita la demostración del funcionamiento del sistema y las tareas de obtención de datos, ya que con este programa se pueden generar

múltiples eventos sin necesidad de intervenir físicamente en el cable de fibra ni poner en riesgo la integridad de la red de información de todo el oleoducto.

Para realizar el generador de eventos geológicos fue necesario implementar bloques con funciones que permitan modificar la gráfica de la atenuación simulando los eventos que se pueden generar en una fibra por efectos de eventos geológicos

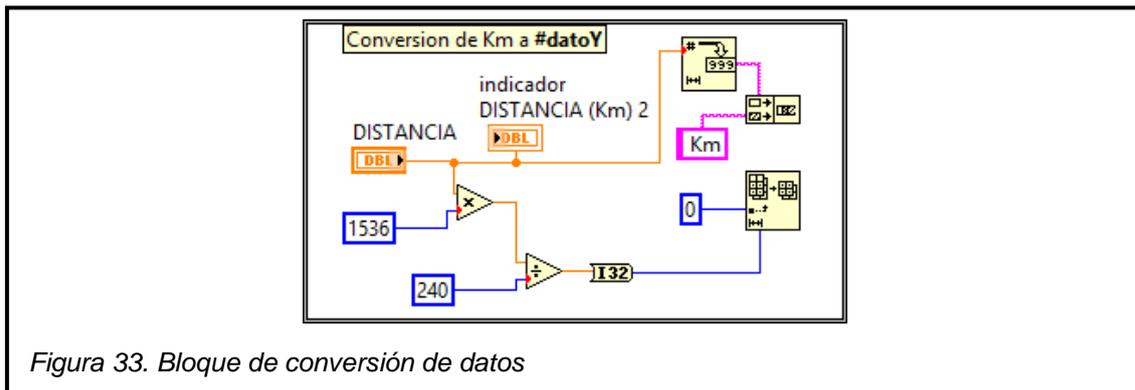


Figura 33. Bloque de conversión de datos

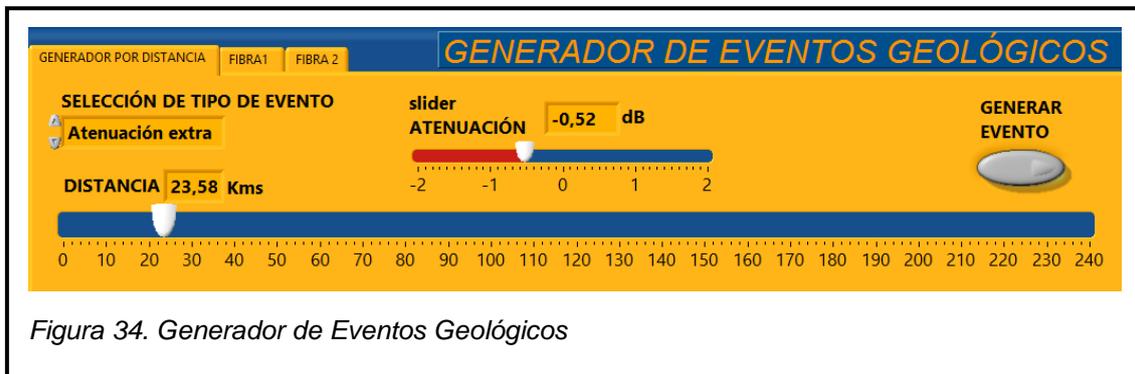
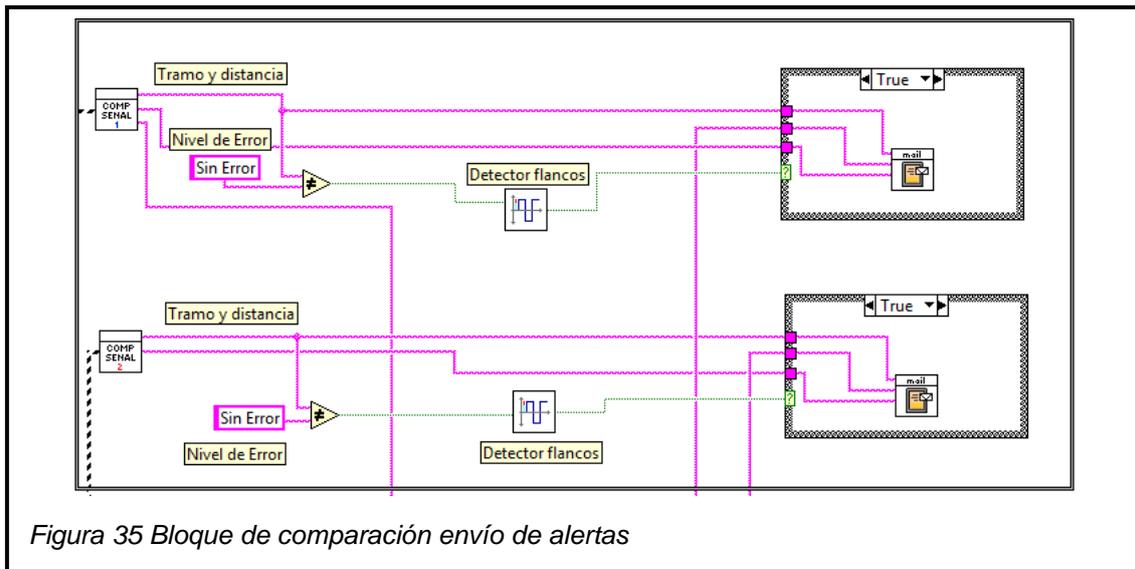


Figura 34. Generador de Eventos Geológicos

### 3.5 Sistema de envío de Alertas

El bloque de detección de alertas es la parte final del software y la más importante ya que aquí se concatena toda la información obtenida y donde será procesada para realizar la comparación de señales que mide el OTDR y el envío de alertas por e-mail a las personas encargadas de la gestión geológica del oleoducto.



En la figura 36 podemos observar el bloque final del programa, aquí se realiza la comparación de señales y posteriormente el envío de alertas en caso de que se detecte un error en la señal. Como se observa en la figura todos los datos que llegan al bloque final son cadenas de caracteres.

### 3.5.1 Comparación de señales

Para realizar la comparación de las señales se necesita ingresar los valores de potencia correspondientes a la señal sin alteraciones en un cluster de datos que nos va a servir como referencia para compararlas con los valores cuando existan alteraciones en la fibra óptica.

Tabla 4. Demostración de comparación de valores

#	SEÑAL NORMAL		SEÑAL MODIFICADA	
	VALORES X (km)	VALORES Y (dB)	VALORES X (km)	VALORES Y (dB)
1	0	-10	0	-10
2	1	-9.6	1	-9.6
3	2	-9,4	2	-9.3
4	3	-9.1	3	-8
5	4	-8.9	4	-7.3
6	5	-8,7	5	-7

Para motivos de demostración de como se realiza la comparación de los datos en el programa se ha creado la Tabla17 que demuestra de manera fácil como los datos se comparan de dato en dato. En la fila número 3 podemos observar que la señal original no coincide con la señal simulada pero está en un rango de aceptación para no considerarlo como falla, en el dato 4 los valores de la señal simulada no coinciden con los datos de la señal original y sobrepasan los rangos de aceptación, es aquí cuando el programa dispara la alerta y envía el correo con los datos de donde ocurrió la alerta.

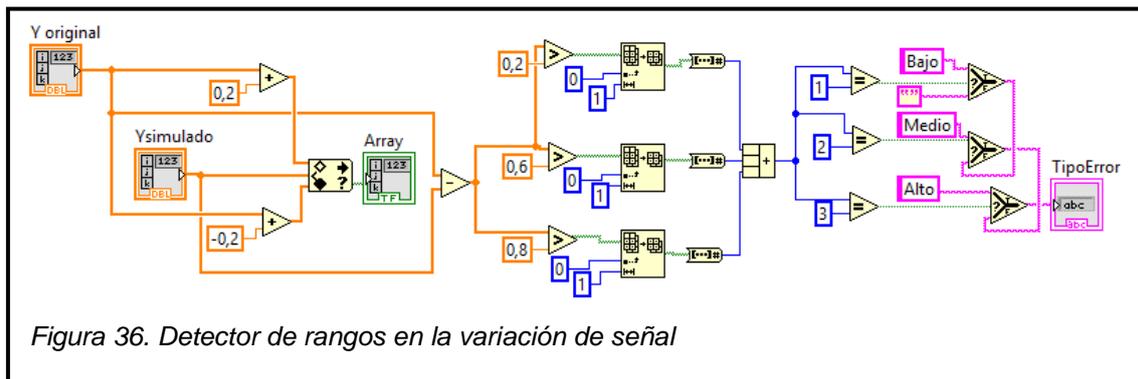


Figura 36. Detector de rangos en la variación de señal

En la figura 36. Podemos observar los rangos con los que compara cada valor antes de tomar el dato como error.

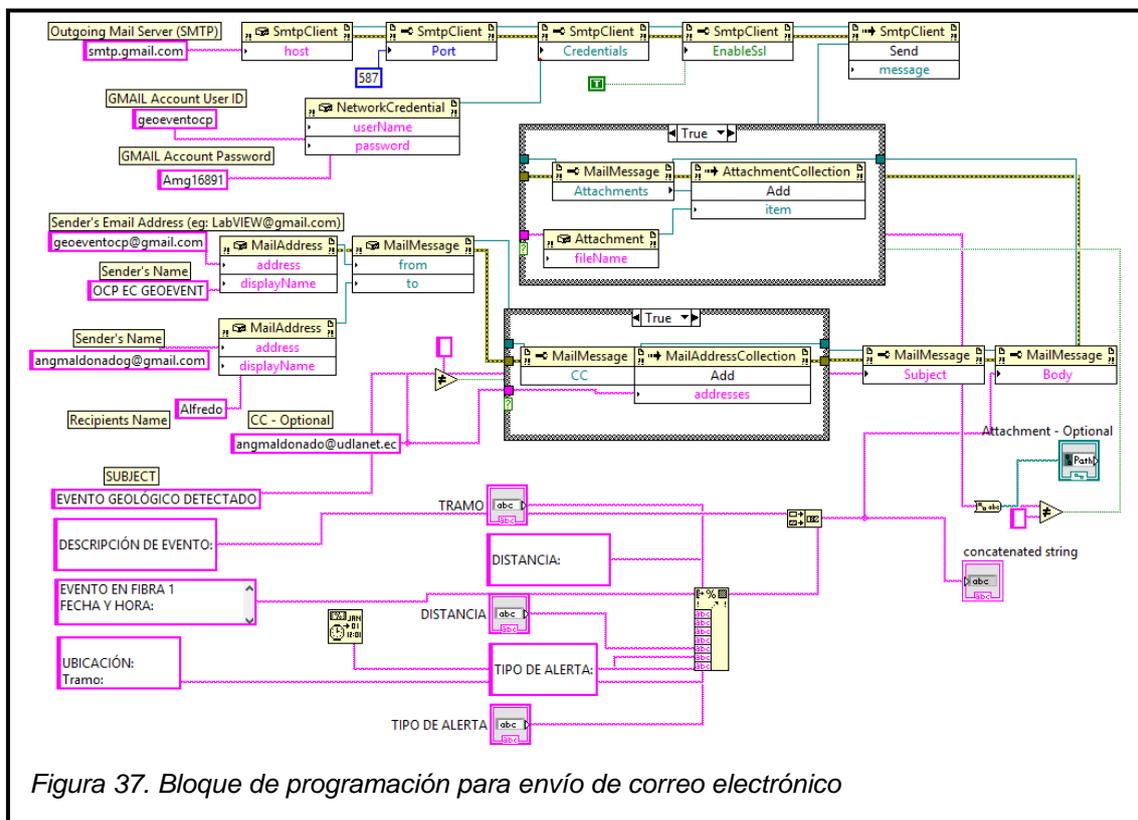


Figura 37. Bloque de programación para envío de correo electrónico

En la figura 37 observamos la concatenación de datos para ser enviados por correo electrónico, se definen también los parámetros del correo electrónico de salida (servidor SMTP, cuenta de correo, puerto de envío, nombre del remitente)

## 4. PRUEBAS Y COSTOS DEL PROYECTO

### 4.1 Pruebas del Sistema

El desarrollo del software para la gestión geológica del OCP permite tener un sistema de monitoreo y control de los eventos geológicos a lo largo de las zonas por donde cruza el oleoducto a través de la tecnología de fibra óptica. El software cumple con la simplicidad y coherencia necesaria para que su manejo sea sencillo y entendible para cualquier persona.

A continuación se detallan las pruebas realizadas en el programa de medición junto con el programa de ambiente simulado.

Al ejecutar el programa tendremos dos ventanas con los instrumentos desarrollados. El OTDR se inicializa con sus parámetros iniciales y realizando medidas en tiempo real y el Generador de eventos geológicos en estado apagado.

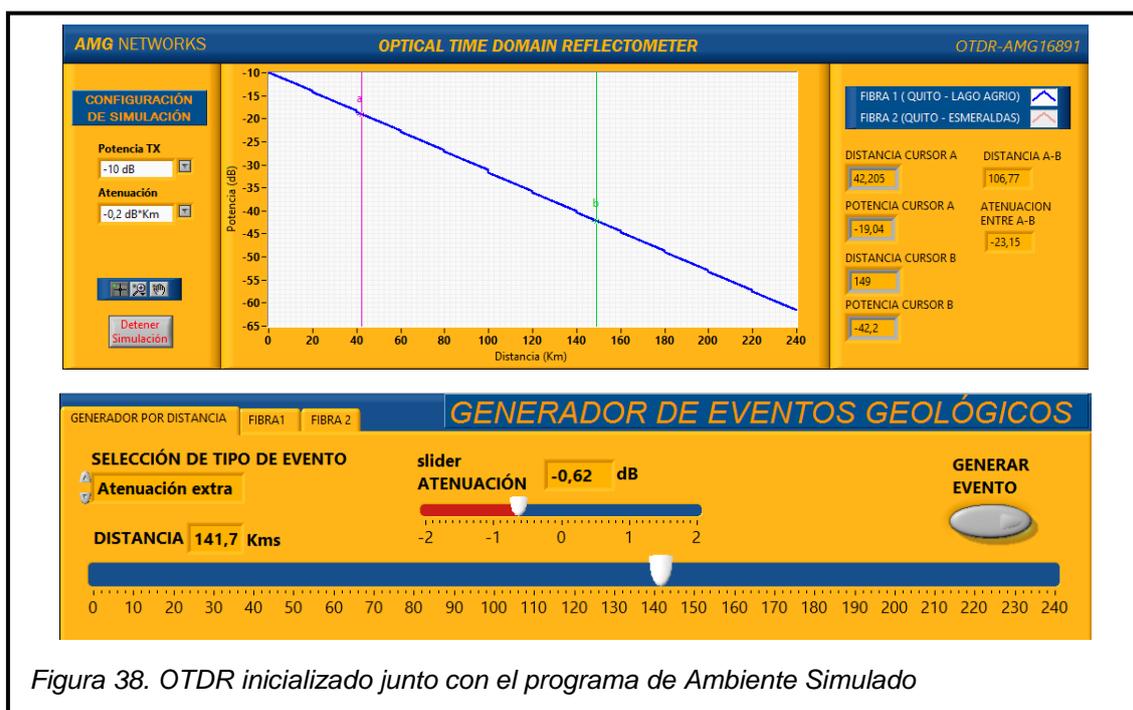


Figura 38. OTDR inicializado junto con el programa de Ambiente Simulado

Cuando se genera un evento geológico se tiene que primero configurar el tipo de evento que se quiere generar (tipo de evento, distancia, nivel de atenuación) y seguido aplastar el botón de generar evento.

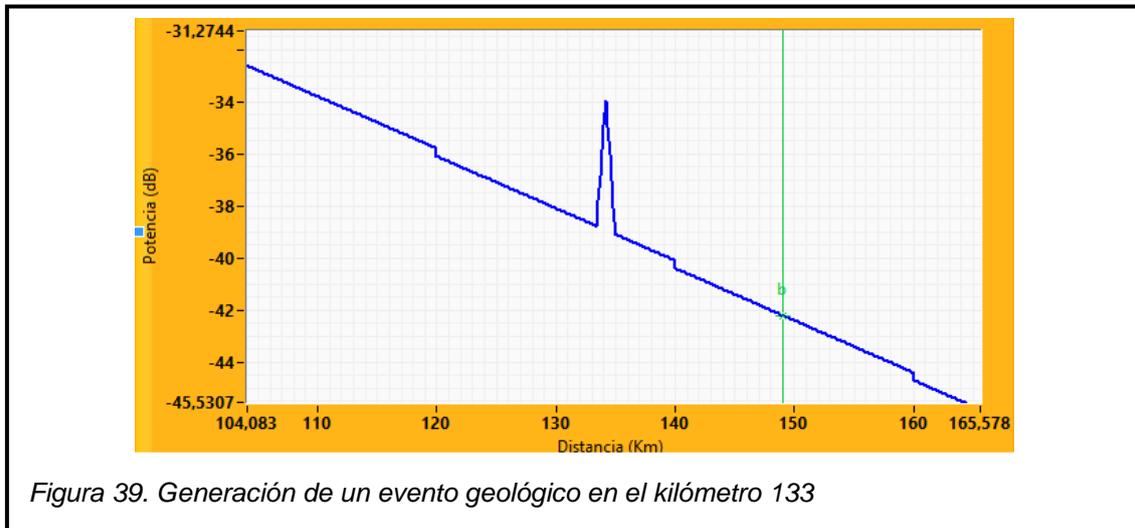


Figura 39. Generación de un evento geológico en el kilómetro 133

Al realizar la comparación de señales inmediatamente se envía un correo electrónico a la persona encargada de la gestión geológica del oleoducto y una alarma a las pantallas informativas de cada estación.

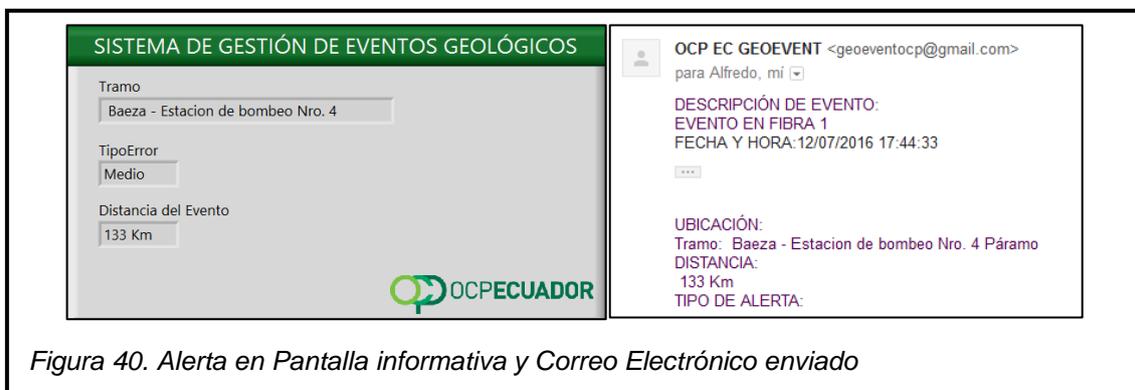


Figura 40. Alerta en Pantalla informativa y Correo Electrónico enviado

Con estas pruebas realizadas en simulación podemos certificar que el software diseñado realiza las funciones requeridas por el usuario:

1. Analizar los datos de la red de fibra del oleoducto
2. Detectar alertas en la fibra en caso de eventos geológicos.
3. Enviar alertas detalladas del error por correo electrónico y por red interna.

## **4.2 Análisis de Costos**

Actualmente en el mercado local no existen empresas que brinden los servicios o soluciones requeridos para realizar este proyecto, sin embargo hay empresas extranjeras que brindan servicios de monitoreo de eventos geológicos para empresas de hidrocarburos enfocados en tecnología de fibra óptica.

Para la ejecución de este proyecto, OCP ECUADOR S.A realizó los estudios de viabilidad del proyecto y se seleccionó la mejor propuesta que cumplía con las exigencias del proyecto.

En el año 2013 OCP ECUADOR S.A tuvo un fallo en la sentencia de los juicios contra el SRI por elusión del Impuesto a la Renta, lo que dejó a la empresa y accionistas con una deuda de más de 250 millones de dólares, siendo este el principal motivo para que la realización de este y otros proyectos de la empresa sean cancelados.

En el año 2014 el departamento de Tecnologías de Información junto con el departamento de Seguridad, Salud y Ambiente propusieron continuar con el proyecto de monitoreo geológico del oleoducto con recursos propios de la empresa y con la ayuda de los contratistas de la empresa, de esta manera se continuaría con el proyecto abaratando de manera significativa los costos de implementación.

### **4.2.1 Costos de la Solución propuesta por OCP ECUADOR S.A**

Para poder implementar este sistema es necesario el desarrollo de un software que se pueda adaptar a la infraestructura existente de fibra óptica que está instalada actualmente en el oleoducto, la adquisición de un reflectómetro óptico en el dominio del tiempo (OTDR) que sea compatible con el software a desarrollar, adquirir la licencia de LABVIEW PRO y la mano de obra para realizar trabajos de cableado en campo.

En este análisis de costos se ha dividido en 4 las fases de desarrollo de este proyecto:

## 1. Levantamiento de requerimientos

Tabla 5. Levantamiento de requerimientos

Elemento/Ítem	Cantidad/ horas	Precio unitario	Precio total
Ingeniero Junior	20	\$8,00/hora	\$160,00
Ingeniero Electrónico	10	\$20,00/hora	\$200,00
Ingeniero Geólogo	10	\$20,00/hora	\$200,00
<b>TOTAL</b>			<b>\$560,00</b>

## 2. Programación de la lógica de negocio

Tabla 6. Programación de lógica de negocio

Elemento/Ítem	Cantidad/ horas	Precio unitario	Precio total
Ingeniero Junior en programación	150 horas	\$8,00/hora	\$1.200,00
LabView Advanced Signal Processing Toolkit	1	\$1.710,00	\$1.710,00
OTDR EXFO	1	\$4.295,00	\$4.295,00
<b>TOTAL</b>			<b>\$ 7.205,00</b>

## 3. Diseño de la interfaz gráfica del sistema

Tabla 7. Diseño de la interfaz gráfica del sistema

Elemento/Ítem	Cantidad/ horas	Precio unitario	Precio total
Ingeniero Junior en programación	40 horas	\$8,00/hora	\$320,00
Software LabView PRO	1	\$5.500,00	\$5.500,00
<b>TOTAL</b>			<b>\$5.820,00</b>

## 4. Pruebas de campo

Tabla 8. Pruebas de campo

Elemento/Ítem	Cantidad/ horas	Precio unitario	Precio total
Ingeniero Junior en programación	30 horas	\$8,00/hora	\$240,00
Escuadrilla de técnicos certificados	30 horas	\$8,00/hora	\$240,00
Chofer y Automóvil de la empresa	5 días	\$50/día	\$250,00
<b>TOTAL</b>			<b>\$5.820,00</b>

Total desarrollo del Software de Monitoreo de Eventos Geológicos

\$ 9.290,00

Tabla 9. Total del costo estimado del proyecto

Elemento/Ítem	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Software de Monitoreo de Eventos Geológicos	1	\$9.290,00	\$9.290,00
OTDR EXFO	1	\$4.295,00	\$4.295,00
Mano de obra por fusión fibra óptica (escuadrilla de 3 técnicos)	40	\$21,00 x 3	\$2520,00
<b>COSTO ESTIMADO TOTAL DEL PROYECTO</b>			<b>\$ 13.985,00</b>

#### 4.2.2 Análisis de la solución propuesta por OCP ECUADOR S.A en comparación con los servicios de una empresa extranjera

En este punto se detallan los costos de la implementación del sistema propuesto como una solución por parte de OCP ECUADOR S.A y los costos de implementación del sistema propuesto por la empresa de soluciones de monitoreo geológico especializada en oleoductos y gasoductos.

En la siguiente proforma de precios no incluyen los costos de viáticos, hospedaje y alimentación que serán valorados según el coste del lugar al momento de la asistencia.

Proforma de Hardware y Software presentada por la empresa SICURALIA

Tabla 10. Proforma de empresa extranjera

Elemento/Ítem	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Analizador de sensor de protección ENTERRADA con cable de fibra óptica MILES PIPELINE. Caja rack 19", conexión LAN y protección hasta 25Km de longitud de fibra óptica sensor. Incluye software de análisis de señal y ajuste. Salidas de alarma x relés y protocolo serie.	20	\$239.926,15	\$4.798.523,08
Cable NO sensor de fibra óptica armado. (Metro)	1000	\$4,67	\$4.665,23
Start Box	20	\$1.599,51	\$31.990,15
End Box	20	\$1.599,51	\$31.990,15
Pantalla formato rack de 19", para el control y parametrización local de sensores perimetrales MILES	1	\$5.938,17	\$5.938,17
Security Control Software. Plataforma de programación y gestión de sensores perimetrales MILES	1	\$49.984,62	\$49.984,62
<b>TOTAL</b>			<b>\$ 4.923.091,40</b>

En la proforma se eliminaron los costos correspondientes a la compra de 500kms de fibra óptica, ya que OCP cuenta con una red de fibra actualmente enterrada junto al oleoducto.

### Servicios - Costes Estimados

Tabla 11. Servicios - Costes estimados

Elemento/Ítem	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Asistencia diaria para formación de instalador, supervisión, ayuda a la puesta en servicio, asistencia técnica, formación de operadores, etc...	1	\$3.624,19	\$3.624,19
Pruebas de aceptación	1	\$3.513,25	\$3.513,25
Embalajes según estándares internacionales de exportación	5	\$1.849,08	\$9.245,38
<b>COSTO ESTIMADO TOTAL</b>			<b>\$ 16.382,82</b>

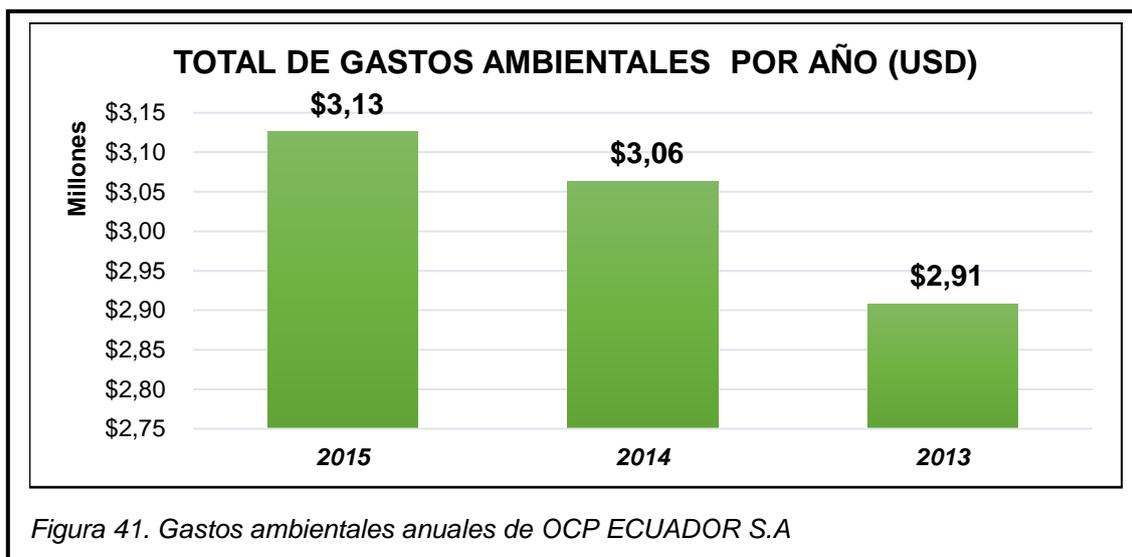
El costo total del proyecto

Tabla 12. Costo total del proyecto

Elemento/Ítem	Precio total
Hardware y Software	\$ 4.923.091,40
Servicios	\$16.382,82
SUMA	\$ 4.939.474,22
DESCUENTO 30% INSTALACIÓN	-\$1.481.842,27
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 3.457.631,95</b>

\*La empresa SICURALIA propone un descuento del 30% del costo del proyecto al no tener que realizar trabajos de obra civil para la instalación de fibra óptica, construcción de casetas, racks, entre otros.

\*\*Se eliminó de la proforma original los costos correspondientes a la compra de 500 Km de fibra óptica



Las inversiones ambientales están relacionadas con:

- Costos de salarios de todos los trabajadores del personal del departamento de Seguridad, Salud y Ambiente que trabajan en las oficinas de Quito como en estaciones de campo.
- Equipos de protección para el personal.
- Pago de patentes de áreas naturales protegidas.
- Capacitación.
- Servicios externos de consultoría.
- Certificaciones.
- Calibración de equipos.
- Seguros de responsabilidad ambiental.
- Monitoreo geológico, monitoreo de ruido, monitoreo de calidad del aire, monitoreo de descargas líquidas, monitoreo de emisiones atmosféricas, tratamiento de desechos.

A continuación podremos ver un cuadro comparativo entre los precios de las dos soluciones propuestas.

*Tabla 13. Cuadro comparativo de costos*

	<b>CUADRO COMPARATIVO COSTOS</b>	
	<b>PROPUESTA CICURALIA</b>	<b>PROPUESTA OCP</b>
AÑO 1	\$ 1.152.543,98	\$ 4.661,67
AÑO 2	\$ 1.152.543,98	\$ 4.661,67
AÑO 3	\$ 1.152.543,98	\$ 4.661,67
total	\$ 3.457.631,95	\$ 13.985,00

Desde el punto de vista netamente económico no existe comparación entre las dos propuestas, la propuesta de OCP es indiscutiblemente mucho más

económica, lo que lo hace más conveniente para la situación económica actual de la empresa.

Desde el punto de vista técnico la propuesta de la empresa CICURALIA es mucho más completa y robusta, ya que utiliza equipos y software de última tecnología desarrollados específicamente para brindar servicios de monitoreo geológico.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

El objetivo general de este proyecto de titulación es desarrollar un sistema de monitoreo de eventos geológicos mediante el uso de fibra óptica para la gestión geológica del Oleoducto de Crudos Pesados del Ecuador, utilizando la infraestructura de la empresa para implementar este sistema en escala real, no obstante, al ya no estar vinculado con la empresa de OCP ECUADOR S.A y al no tener los recursos económicos necesarios para la adquisición de los equipos requeridos para la implementación de este proyecto, se decidió modificar una parte del alcance de este proyecto y desarrollar el sistema en un ambiente simulado que represente los fenómenos de atenuación que puede sobrellevar un enlace de fibra óptica por la influencia de eventos geológicos.

Con el monitoreo constante se puede evitar derrames de petróleo debido a eventos geológicos que pueden paralizar el transporte de crudo y causar pérdidas millonarias para la empresa.

Gracias al Software de Monitoreo de Eventos Geológicos junto con una correcta gestión geológica se puede observar e identificar con antelación posibles eventos geológicos que a futuro se puedan convertir en un riesgo para la integridad del oleoducto, con esto se puede evitar daños permanentes a la flora, fauna y poblaciones cercanas al oleoducto.

El software desarrollado para el monitoreo de eventos geológicos pese a no haber sido implementado a escala real es aplicable a escenarios reales y puede ser adaptado fácilmente en cualquier infraestructura para trabajar junto a otros sistemas de control, adquisición de datos, automatización, análisis y procesamiento de señales.

El Sistema de Monitoreo de Eventos Geológicos es escalable, al usar un lenguaje de programación por bloques este puede cambiar su tamaño y configuración sin comprometer su funcionamiento.

El envío de alertas con los detalles de localización exacta del evento y el tipo de alerta facilita y agiliza los trabajos de las personas encargadas de la gestión geológica del oleoducto.

El software desarrollado en este proyecto de titulación no busca competir con las soluciones propuestas por empresas especializadas en monitoreo de oleoductos que brindan servicios de alto costo con equipos muy robustos y sensores de última tecnología. La propuesta de este trabajo de titulación se realiza como una alternativa de muy bajo costo que se ajusta a la situación económica actual de la empresa, pero cumple con los objetivos requeridos.

## **5.2 Recomendaciones**

En caso de implementar este sistema se debe tomar en cuenta los requisitos técnicos de los equipos que se debe utilizar para no tener problemas de compatibilidad con el programa.

El rango de variación para la detección de errores en la señal debe ser correctamente calibrado para obtener los mejores resultados en la medición de datos.

El encargado de administrar el programa debe realizar re calibraciones periódicas de la onda referencial con el fin de actualizar los datos con los que se va a comparar la señal cada vez que el OTDR realice mediciones en la fibra.

Al momento de la implementación del proyecto se debe optar por adquirir un OTDR que realice lecturas a largas distancias (superiores a los 200 Km) y que funcione con las especificaciones técnicas de la fibra instalada.

Se recomienda en futuras versiones del programa, la implementación de auto generación de reportes, historial de mediciones, integración con el sistema SCADA e integración con el sistema de video vigilancia.

## REFERENCIAS

- Avalos, A. e Inclan, O. (s.f). *Mediciones a realizar en la fibra óptica*. Recuperado el 11 de marzo del 2016 de <http://148.206.53.84/tesiuami/UAMI10802.pdf>
- Blum, J. (2010). *Development of sensors and techniques to assess earthquake hazards and submarine slope stability*. (California, United States Of America) University of California, San Diego
- Cárdenas, A. (2008). *Fibras Ópticas*. Recuperado el 11 de marzo del 2016 de <http://slideplayer.es/slide/1698078/>
- Ciscopress, (s.f.). *Fibre-Optic Technologies*. Recuperado el 11 de marzo del 2016 de <http://www.ciscopress.com/articles/article.asp?p=170740>
- Efn. (s.f.). *Elementos y Equipos Eléctricos*. Recuperado el 5 de diciembre del 2015 de [http://www.efn.uncor.edu/departamentos/electrotecnia/cat/eye\\_archivos/apuntes/a\\_practico/Cap%205%20Pco.pdf](http://www.efn.uncor.edu/departamentos/electrotecnia/cat/eye_archivos/apuntes/a_practico/Cap%205%20Pco.pdf)
- Entrix, (s.f.). *Estudios Ambientales Oleoducto de Crudos Pesados*. Recuperado el 5 de julio del 2015 de [http://www.estade.org/desarrollosustentable/EIA%20OCP/indexeia\\_ocp.html](http://www.estade.org/desarrollosustentable/EIA%20OCP/indexeia_ocp.html)
- EXFO, (s.f.). *Ultra-Long-Haul OTDR*. Recuperado el 11 de marzo del 2016 de <http://www.exfo.com/products/field-network-testing/bu3-optical/otdr-iolm-testing/ftb-7600e#ressources>
- Faustini, L y Martini, G. (1997). *Bend Loss in single-mode fibers*. (Pavia, Italia) Universidad de Pavia.
- Finaltest, (s.f.). *FlukeNetworks OF-500M OTDR*. Recuperado el 12 de marzo del 2016 de <http://www.finaltest.com.mx/product-p/of-500-m.htm>
- Hyperphysics, (s.f.). *Fresnell Equations* Recuperado el 12 de marzo del 2016 de <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/freseq.html>

- ITU. (2010). *G.651 Definitions and test methods for linear deterministic attributes of single-mode fibre and cable*. (Ginebra, Suiza) International Telecommunication Union
- Lvovsky, A. (2013). *Fresnel Equations In Encyclopedia of Optical Engineering*. (Alberta, Canada) Department of Physics and Astronomy, University of Calgary, Canada
- Mahlke, G. y Gösing, P. (2000). *Fiber Optic Cables (2<sup>nd</sup> Edition)*. (Alemania) Corning
- Marcuse, D. (1976). *Curvature loss formula for optical fibers*. (New Jersey, USA).
- National Instruments Corporation, (s.f.). *Tipos de datos y estructuras*. Recuperado el 8 de junio del 2016 de <http://www.ni.com/academic/students/learnlabview/esa/datatypes.htm>
- Ohashi, M. (2013). *Fiber Measurement Technique Based on OTDR*. (Osaka, Japan) Osaka Prefecture University, Gakuen-cho, Sakai, Osaka
- Power, J. (2001). *An introduction to fiber optic systems*. (USA) McGraw Hill
- Sharma, A y Halme J (1984). *Constant curvature loss in monomode fibers: An experimental investigation*.
- Thefoa. (2014). *Guide To Fiber Optics & Premises Cabling*. Recuperado el 11 de marzo del 2016 de [http://www.thefoa.org/ESP/Fibra\\_optica.htm](http://www.thefoa.org/ESP/Fibra_optica.htm)
- Tomasi, W. (2003). *Sistemas de comunicación electrónica (4ed)*. (Mexico) Mexico: Prentice Hall
- Zamora, A. y Litherland, M (1993). *Mapa Geológico de la República del Ecuador 1:1'000.000*. Ministerio de Energía y Minas Ecuador (Ecuador)

## **ANEXOS**

# Improved Bend Loss Formula Verified for Optical Fiber by Simulation and Experiment

Ross T. Schermer, *Member, IEEE*, and James H. Cole

**Abstract**—This paper presents an improved curvature loss formula for optical waveguides, which is shown to accurately predict the bend loss of both single-mode and multimode fibers. The formula expands upon a previous formula derived by Marcuse, greatly improving its accuracy for the case of multimode fiber. Also presented are the results of bent fiber simulations using the beam propagation method (BPM), and experimental measurements of bend loss. Agreement among simulation, formula and measurement support the validity of both theoretical methods. BPM simulations showed that the lowest order modes of the bent fiber were reduced to their linearly polarized constituents prior to the onset of significant bend loss. This implies that certain LP mode orientations should propagate with much lower loss than previously expected, and should impact the mode stripping ability of bent large mode area fibers, as employed in fiber lasers and amplifiers.

**Index Terms**—Dielectric waveguides, laser amplifiers, optical fiber amplifiers, optical fiber lasers, optical waveguide theory, waveguide bends.

## I. INTRODUCTION

VARIOUS theoretical methods exist to predict curvature loss in optical waveguides. The usual approach is to use a simplified formula introduced by Marcuse [1], applicable to weakly guided waveguides, including most optical fibers, for sufficiently large radii of curvature. This formula agrees well with experiment for single-mode fiber, after adjustments are made for bend-induced stress [2]. However, for multimode fiber it can be quite inaccurate [3]. Other analytical bend loss formulae are similarly limited, in that none are known to reliably predict mode-dependent bend loss in multimode fibers. This has become a significant problem with the development of the coiled multimode fiber amplifier [4], which uses bend loss to strip out the higher order fiber modes, and thereby achieve single-mode, large mode area operation. Optimizing these devices, and understanding their ultimate limitations, requires that mode-dependent bend loss be predicted accurately.

An alternative to analytical formulae for predicting bend loss is to use numerical simulation. Various methods have been developed to simulate field propagation in dielectric waveguides [5]. The beam propagation method (BPM) [5], in combination with conformal mapping [6], is well-suited to curved waveguides because it allows one to rapidly determine the modes of

a structure, and then propagate them over large distances, while using relatively little computer memory. Both tasks may be done with the same software package. However, although bend loss has been studied with BPM in the past [7], [8], the accuracy of this method has yet to be firmly established.

This paper studies bend loss in step-index, single-mode and multimode fibers using BPM and conformal mapping, and compares these results to both analytical models and experiment. One aim is to establish the accuracy of the BPM simulations at predicting bend loss, for both the fundamental and higher order modes of a simple waveguide. Another is to clarify the sources of error in Marcuse's simplified bend loss formula, and seek to improve its accuracy for multimode fiber. The final goal is to demonstrate an accurate, quasi-analytical formula for bend loss, which is reliable provided that the mode field distribution of the bent waveguide is known.

Section II begins by describing the simulation method used in this paper, as well as the modes calculated for the bent fiber and typical propagation results. Section III compares the simulated bend loss to analytical predictions and experimental results. The simulations are shown to accurately predict experimentally measured fundamental mode bend loss, for both single-mode and multimode fibers. By comparison, the simplified loss formula is only in agreement for the single-mode case. Section IV analyzes this discrepancy in detail, and finds that by removing an unnecessary term in the loss formula, its accuracy is greatly improved. The BPM-simulated bend loss is then shown to be in excellent agreement with a quasi-analytical formula, modified from Marcuse's original derivation. This latter result holds for both the fundamental and higher order modes. This knowledge is used in Section V to gauge the dominant sources of error in the simplified bend loss formula, and is followed by a discussion and summary of results.

## II. BENT FIBER SIMULATION

Bent fiber simulations were performed in this paper using a finite difference approach, the beam propagation method (BPM), in conjunction with the conformal mapping technique. The first step in the process was to transform the circularly curved fiber to an equivalent, straight fiber by the process of conformal mapping [6], [9]. This process is shown schematically in Fig. 1. Coordinate transformation allowed the bent fiber to be represented by an equivalent, straight fiber, with modified refractive index distribution,  $n'(x, y)$

$$n' = n_{\text{material}} \exp\left(\frac{x}{R}\right) \approx n_{\text{material}} \left(1 + \frac{x}{R}\right), \quad (1)$$

Here  $n_{\text{material}}(x, y)$  is the refractive index of the bent waveguide cross-section, and the exponential term accounts for the increase

Manuscript received January 22, 2007; revised April 19, 2007. This work was supported by a Postdoctoral Research Associateship from the National Research Council.

The authors are with the Optical Sciences Division of the U.S. Naval Research Laboratory, Washington, DC 20375 USA (e-mail: schermer@ccs.nrl.navy.mil; jim.cole@nrl.navy.mil).

Color versions of some or all figures are available online at <http://ieeexplore.ieee.org>.

Digital Object Identifier 10.1109/JQE.2007.903364

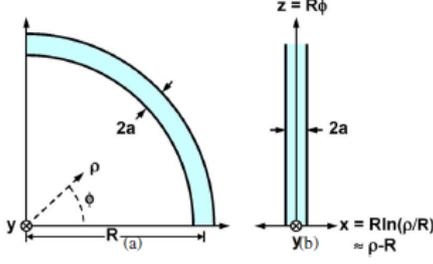


Fig. 1. (a) Schematic diagram of a circularly bent fiber and (b) the equivalent, straight fiber after conformal mapping. Light is guided along the  $\phi$  and  $z$  directions, respectively.

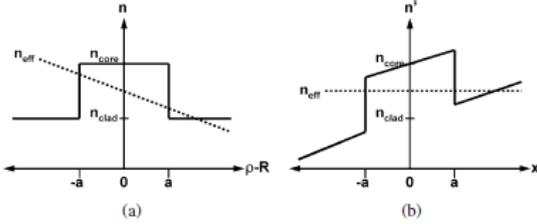


Fig. 2. (a) Refractive index distribution of an unstressed, bent fiber and (b) that of its equivalent, straight fiber after conformal mapping. The slice shown is through the center of the fiber. The refractive index of the conformal mapped fiber increases away from the center of curvature. Variation in the modal effective index,  $n_{\text{eff}}$ , is also shown in each case.

in optical path length along the fiber with distance from the center of curvature. Relatively slow bends ( $x \ll R$ ) were assumed in this paper to allow the first-order approximation used in (1). The resulting index distribution was tilted with respect to the original, increasing away from the center of the bend, as shown in Fig. 2.

An additional change occurs to the physical refractive index of the fiber upon bending, due to stress-optic effects. Compression along the inner half of the fiber, towards the center of the bend, and tension along the outer half, cause the material refractive index to vary according to the relation [10], [11]

$$n_{\text{material}} = n \left[ 1 - \frac{n^2 x}{2R} [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \right]. \quad (2)$$

Here  $n(x, y)$  is the refractive index of the straight fiber,  $\nu$  is Poisson's ratio, and  $P_{11}$  and  $P_{12}$  are components of the photoelastic (or elasto-optical) tensor. Again, the refractive index tilts with bending, but in this case it typically decreases toward the outside of the bend.

Combining (1) and (2), defining the equivalent bend radius as

$$R_{\text{eff}} \equiv \frac{R}{1 - \frac{n^2}{2} [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})]} \quad (3)$$

and simplifying to first order then leads to an expression similar to (1), but in terms of the unperturbed index  $n(x, y)$

$$n' = n \left( 1 + \frac{x}{R_{\text{eff}}} \right). \quad (4)$$

This is the refractive index distribution pertaining to the equivalent, straight waveguide that was used for the BPM simulations

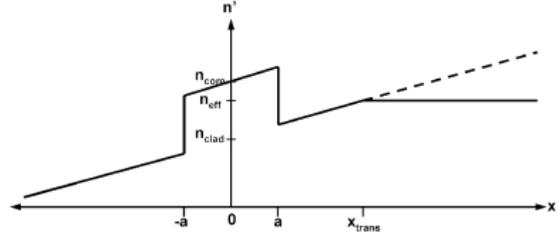


Fig. 3. Conformal mapped index distribution used for BPM mode calculations (solid line). The sloping index distribution was truncated at the point  $x = x_{\text{trans}}$  in order to prevent significant loss to the cladding during the mode calculations. By setting  $x_{\text{trans}}$  just within the caustic boundary, error due to this perturbation was minimized.

in this paper. The bracketed term represents the net effects of bending, and the effective bend radius accounts for the dominant stress effects. Note that for silica fiber,  $R_{\text{eff}}/R \approx 1.28$  [2], so stress actually counteracts the effects of bending compared to curvature alone [12].

Given the equivalent, straight fiber represented by (4), it was not difficult to determine the modes of the structure, and then simulate their propagation, using standard BPM techniques. Since the beam propagation method has been well-documented elsewhere [5], it should suffice to state that the approach solves Maxwell's equations numerically, by representing the fields and refractive index distribution on a uniform transverse ( $\Delta x, \Delta y$ ) grid, and stepping in equal steps ( $\Delta z$ ) along the waveguide

to simulate wave propagation. Of the various BPM versions available, a semi-vectorial variation was used in this paper, as described in [13]. At the simulation boundaries, transparent boundary conditions were used to minimize unwanted reflections [14].

The semi-vector BPM was chosen over a full-vector alternative because it proved to be faster, more stable, and less sensitive to step size. An apparent disadvantage was that it did not account for polarization coupling within the fiber. This limited analysis to the linearly polarized (LP) modes, rather than the more precise hybrid (HE and EH) fiber modes [15]. However, as will be seen, this limitation proved to be inconsequential when the fiber was bent to the point of significant loss.

The lowest order LP modes of the bent fiber were calculated using the imaginary-distance BPM technique [5], with the refractive index distribution given by (4). This was done for a variety of core radii ( $a$ ), effective bend radii ( $R_{\text{eff}}$ ), unperturbed core and cladding indices ( $n_{\text{core}}$  and  $n_{\text{clad}}$ ), and wavelengths ( $\lambda_0$ ). In order to prevent loss to the cladding during the mode calculations, which was inevitable for tight bends, and which hindered convergence, the cladding refractive index was truncated for larger values of  $x$  as shown in Fig. 3. Although this perturbation represented a source of error in the mode calculations, the error was minimized by moving the transition point,  $x_{\text{trans}}$ , as far out as possible without introducing significant loss. This meant setting  $x_{\text{trans}}$  just within the caustic boundary, given by [16]

$$x_{\text{caustic}} = R_{\text{eff}} \left( \frac{n_{\text{eff}}}{n_{\text{clad}}} - 1 \right) \quad (5)$$

where  $n_{\text{eff}} = \text{real}(\beta_z)/k_0$ ,  $\beta_z$  is the modal propagation constant, and  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ . At the caustic boundary the mode speed matches the speed of light in the cladding, and beyond it the fields become radiative. Approximate mode solutions were first calculated by setting  $x_{\text{trans}} = a$  in the simulations, and the resulting propagation constant was used to estimate  $x_{\text{caustic}}$ . Then the simulations were repeated with  $x_{\text{trans}}$  just within the caustic boundary, in order to obtain the modes of the bent fiber. Step sizes used in the simulations were typically  $\Delta x = \Delta y = 0.1 \mu\text{m}$  and  $\Delta z = 0.5 \mu\text{m}$ . For core radii greater than  $25 \mu\text{m}$ , however, the transverse step was increased to  $\Delta x = \Delta y = 0.2 \mu\text{m}$  to allow a larger simulation area. In each case, increasing or decreasing the step sizes had negligible impact on the propagation constants and simulated loss, so they appeared to be adequate.

Fig. 4 displays typical results of mode calculations for the lowest order fiber modes. Conditions for this example were  $a = 12.5 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_0 = 1.064 \mu\text{m}$ ,  $\text{NA}_{\text{index}} = 0.1$ , where

$$\text{NA}_{\text{index}} = \sqrt{n_{\text{core}}^2 - n_{\text{clad}}^2} \quad (6)$$

and  $n_{\text{clad}} = 1.52$ , which corresponded to a particular fiber of interest. For the case of the bent fiber, the effective bend radius of  $1.24 \text{ cm}$  was chosen to display the modes when the fundamental mode was relatively stable, while the others exhibited significant loss. As expected from previous work [3], bending tended to distort the fiber modes, and caused them to shift away from the center of curvature. Furthermore, the two orientations of each LP mode, denoted here as  $\text{LP}_{\text{mno}}$  and  $\text{LP}_{\text{mno}}$  for whether they were even or odd along the  $y$  direction, became noticeably different upon bending. Whereas in the straight fiber they were identical other than a  $\pi/2$  rotation, bending destroyed this rotational symmetry.

Such profound changes in the fiber mode distributions also manifested themselves in significant changes in the modal propagation constants compared to the straight fiber. A useful measure of this effect was the normalized propagation constant, defined for the bent fiber as

$$b_{\text{bent}} = \frac{n_{\text{eff}}^2 - n_{\text{clad}}^2}{n_{\text{core}}^2 - n_{\text{clad}}^2} \Big|_{x=a} \quad (7)$$

So defined, all the guided modes of the bent fiber must satisfy the relation  $0 < b_{\text{bent}} < 1$ . Fig. 5 plots  $b_{\text{bent}}$  versus  $R_{\text{eff}}$  for the modes in Fig. 4. As shown, the propagation constants of the  $\text{LP}_{11\text{e}}$  and  $\text{LP}_{11\text{o}}$  modes deviated substantially from each other when the fiber was adequately bent. The same was true of the  $\text{LP}_{21\text{e}}$  and  $\text{LP}_{21\text{o}}$  modes, although to a lesser extent. Fig. 5 also notes the effective bend radius where each mode began to radiate appreciably ( $0.1 \text{ dB/m}$ ). This shows that by the time the even-odd mode pairs reached the point of significant loss, they had significantly different propagation constants, and were therefore no longer velocity-matched.

An important implication of this is that without precise velocity matching, the even-odd mode pairs of the fiber should not be expected to maintain significant polarization coupling with one another. The  $\text{TE}_{01}$ ,  $\text{TM}_{01}$ , and  $\text{HE}_{21}$  modes of the straight

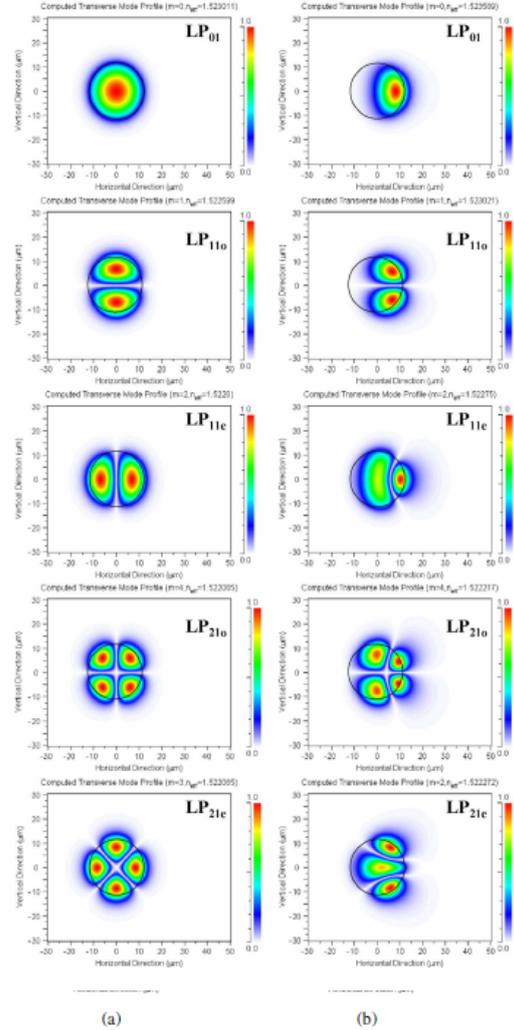


Fig. 4. Simulated mode field distributions of the lowest order fiber modes, for (a) straight fiber and (b) bent fiber. Electric field magnitude is displayed on the scale to the right, and the core-cladding interface is denoted by the circular outline. For bent fiber modes, the center of curvature is located to the left of each figure. The subscripts “e” or “o” added to the mode labels denote whether the mode is even or odd with respect to the  $x$  axis, respectively. In the straight fiber the  $\text{LP}_{\text{mno}}$  and  $\text{LP}_{\text{mno}}$  modes of opposite polarization are coupled. In the bent fiber they are no longer degenerate, which can prevent significant polarization coupling.

fiber, which are comprised of different combinations of polarization-coupled  $\text{LP}_{11\text{e}}$  and  $\text{LP}_{11\text{o}}$  distributions, should therefore be expected to transition into their LP constituents given adequate bending. The same also holds for higher order modes (although at discrete values of  $R_{\text{eff}}$ , velocity matching may be possible, as may be inferred from Fig. 9). Simulations also showed that as fiber  $V$  number was increased, where  $V$  is defined

$$V = k_0 a \sqrt{n_{\text{core}}^2 - n_{\text{clad}}^2} \quad (8)$$

the LP mode degeneracy was more readily broken.

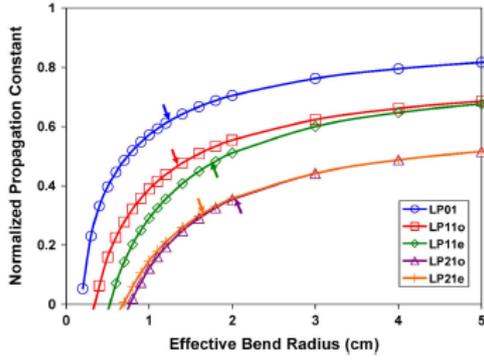


Fig. 5. Simulated normalized propagation constants  $b_{\text{eff}}$  of the lowest order fiber modes of a bent fiber. For large bend radii, the propagation constants of the  $LP_{mn,e}$  and  $LP_{mn,o}$  modes are similar. However, with adequate bending they can differ substantially. The deviation is less pronounced for higher order modes. The arrows mark the bend radii where simulated bend loss was 0.1 dB/m. The propagation constants of the even and odd modes differed substantially before the onset of significant bend loss.

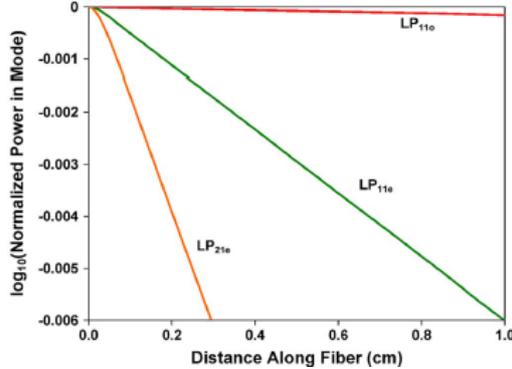


Fig. 6. Mode power versus distance from various BPM simulations. For each simulation, the mode field distribution was launched and propagated with the BPM. Power in the launched mode was monitored using the overlap integral between the propagating fields and the mode field distribution. Bend loss was inferred from the slope of each curve.

Having shown that the relevant modes of the fiber were the LP modes as far as bend loss was concerned, the next step was to simulate their propagation loss. This was accomplished by launching a given mode field distribution into the fiber (the initial condition), and then monitoring its power as the fields were propagated with the BPM. Power was monitored by calculating the overlap integral of the fields in the simulation region with those of the mode field distribution, at uniform steps along the fiber. Results of a typical loss measurement are shown in Fig. 6. Pure exponential power decay was typical of higher order modes as well as the fundamental mode. This was possible because the modes were well-orthogonalized by the mode solver, with typical inter-mode overlaps less than  $-30$  dB. As a result, measured decay corresponded to that of an individual mode rather than their combination.

The propagation simulations were performed using the same transverse and longitudinal step sizes as the mode calculations. Simulation regions were  $120 \times 60 \mu\text{m}^2$  for core radii  $25 \mu\text{m}$  or less, and  $240 \times 120 \mu\text{m}^2$  for larger cores. This allowed the modes to be propagated about 1 cm along the fiber before reflections from the boundaries began to impact the measurements. Given the high accuracy of the overlap calculation, bend loss could be simulated with this technique down to about 0.01 dB/m.

Simulations performed for different polarizations showed that there was no clear polarization dependence to the loss, in agreement with theoretical predictions for weakly guided fiber [17]. Selected simulations were also repeated with  $n'$  expanded to second order in  $x/R$ . These did not exhibit substantial variations in losses or propagation constants compared to the first-order approximation in (1).

### III. COMPARISON WITH EXPERIMENT

In order to test the accuracy of both the BPM simulations in this paper and the simplified bend loss formula presented by Marcuse, both were compared to experimental bend loss data. The simplified bend loss formula for optical fiber [1], modified here to include fiber stress through use of the effective bend radius, is given by

$$2\alpha = \frac{\pi^{1/2} \kappa^2 \exp\left(-\frac{2\gamma^3 R_{\text{eff}}}{3\beta_z^2}\right)}{2R_{\text{eff}}^{1/2} \gamma^{3/2} V^2 K_{m-1}(\gamma a) K_{m+1}(\gamma a)}, \quad (9)$$

Here  $2\alpha$  is the power loss coefficient,  $\kappa$  and  $\gamma$  are the field decay rates in the core and cladding

$$\kappa = \sqrt{k_{\text{core}}^2 - \beta_z^2} \quad (10)$$

$$\gamma = \sqrt{\beta_z^2 - k_{\text{clad}}^2} \quad (11)$$

the  $K$  terms are modified Bessel functions, and  $m$  is azimuthal mode number (equal half the number of azimuthal zeros), corresponding to the subscript in  $LP_{mn}$ . Note that this formula is only applicable to even LP modes. Bend loss in units of dB/length is obtained by multiplying  $2\alpha$  by the factor 4.343.

The first fiber tested was Corning SMF-28, a step-index, single mode fiber. Two sets of experimentally measured bend loss data [18] are shown in Fig. 7, for the wavelengths 1320 and 1550 nm. Also shown are bend loss curves calculated by BPM simulation, and by (9). As can be seen, both theoretical methods agree well with each other, as well as with the measured data. Fiber parameters used for the theoretical predictions were  $2a = 8.2 \mu\text{m}$ , and  $n_{\text{clad}} = 1.447$  and  $1.440$  at  $\lambda_o = 1.32 \mu\text{m}$  and  $1.55 \mu\text{m}$ , respectively. The quantity  $\text{NA}_{\text{index}}$  was estimated from specifications for fiber cutoff wavelength and mode field diameters to be 0.117, as discussed in Appendix B. The propagation constants used in (9)–(11) were determined using standard numerical techniques for straight fiber [19], and were in good accord with simulated values for straight SMF-28 fiber. Note that it was necessary to account for stress in the predictions, through use of the effective bend radius, to obtain such agreement between theory and experiment.

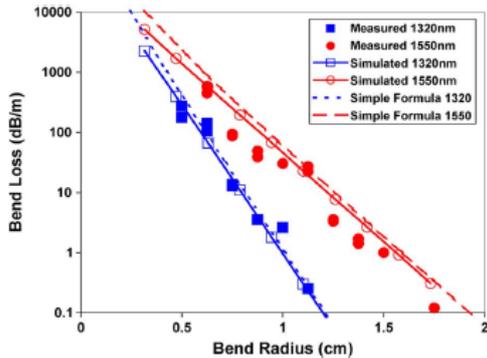


Fig. 7. Comparison of bend loss data for SMF-28 fiber, from measurement, BPM simulation, and simplified loss formula, (9). Simulated data points are as marked. For this single mode fiber ( $V = 2.28$  at 1320 nm,  $V = 1.94$  at 1550 nm), the simulated and formulaic bend loss was quite similar. Both agreed with experiment at the wavelength 1320 nm, and reasonably well at 1550 nm. Stress was accounted for in both simulation and formula, which was necessary for the good agreement.

Measurements were also performed on a multimode fiber from Liekki, model Passive 25/240DC. This fiber had a 25- $\mu\text{m}$  core diameter, cladding index of 1.46, and  $\text{NA}_{\text{index}}$  of 0.06, yielding  $V$  numbers of 7.44 and 5.67 at the test wavelengths of 633 and 830 nm, respectively. Due its multimode nature ( $V > 2.405$ ), loss measurements were restricted to the fundamental mode, which experiences the least amount of loss when the fiber is bent. This allowed the higher order modes to be stripped out, leaving predominantly the fundamental mode in the core at the output. To test the bend loss, the fiber was wound on rods of various sizes, and its transmission measured with a laser and photodetector. Since light guided by the cladding was a source of error in the measurements, the low-index fiber jacket was removed before winding the fiber, and replaced by a coating of black ink. This adequately extinguished the light in the cladding before

it reached the spool, and removed the light lost to the cladding while traversing the bend. The photo-detector was mounted directly on the rod so that transmission measurements could be taken while winding the fiber. This minimized variations in the transition loss between the bent and straight fiber regions. Error in the measurement due to higher order modes and transition loss was also minimized by neglecting the initial portion of the decay, and fitting only the pure exponential. Typically, the length of fiber was adjusted to provide 20 dB of pure fundamental mode loss for each bend radius measured. Results of the bend loss measurements are shown in Fig. 8, and exhibit the usual exponential dependence on bend radius.

Also shown in Fig. 8 are bend loss curves from BPM simulations and the simplified bend loss formula, (9). As indicated in the figure, and discussed previously in [3], (9) vastly overestimates the fundamental mode bend loss in multimode fiber. In contrast, the results of the BPM simulations were in good agreement with the measured data.

Such agreement between BPM simulations and measurement, for both single-mode and multimode fiber, strongly suggests the accuracy of the BPM approach. This is interesting because the simulations were not based on any assumptions

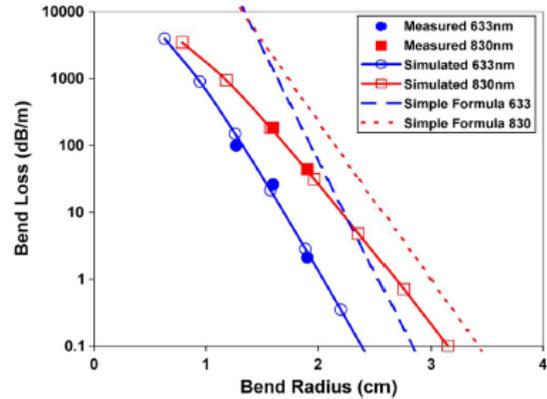


Fig. 8. Comparison of fundamental mode bend loss data for Liekki passive 25/240DC fiber, from measurement, BPM simulation, and simplified loss formula, (9). Simulated data points are as marked. The simulated data was in good agreement with experiment at both wavelengths. However, for this multimode fiber ( $V = 7.44$  at 633 nm,  $V = 5.67$  at 830 nm), the simplified formula drastically overestimated the loss, with greater error for larger fiber  $V$  number. Stress was accounted for in both simulation and formula, which was necessary for the good agreement between simulation and experiment.

about the mode distributions themselves, other than that they be localized near the fiber core. We may therefore proceed with some confidence in the ability of the BPM to predict bend loss, not only for the fundamental mode, but also those of higher order. In the next section, this ability is utilized to gauge the accuracy of different analytical bend loss formulae. As will be seen, excellent agreement between theory and simulation, for a variety of fiber modes, provides further support for this claim.

#### IV. COMPARISON WITH ANALYTICAL FORMULAS

In order to examine the discrepancy between the simplified bend loss formula and the simulated and experimental results for

multimode fiber, it is useful to consider the derivation of (9), [1], [19]. A number of simplifying assumptions were made to arrive at this formula, most notably that the modes must not change appreciably due to bending. The modal propagation constants, which vary with position in the bent fiber as shown in Fig. 2(a), were also assumed to match those of the straight fiber at  $x = 0$ .

If instead the mode field distributions in the bent fiber are not assumed, and the fact that the propagation constant varies with position

$$\beta_z(x) = \frac{\mu}{(R+x)\epsilon_{\text{eff}}} \quad (12)$$

is considered, then a more broadly applicable formula for bend loss may be derived. In (12)  $\mu$  is the angular propagation constant of the mode as it rotates about the center of curvature, and  $(R+x)\epsilon_{\text{eff}}$  is defined in analogy to  $R_{\text{eff}}$ . Following a derivation based on [1] and [19], it may be shown that a relatively general formula for bend loss is given by

$$2\alpha = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\Im_y(U_{\bar{r}=a})}{H_{\nu}^{(2)}[\beta_z(R+a)\epsilon_{\text{eff}}]} d\beta_y}{\pi^2 k_{\text{clad}}(R+a)\epsilon_{\text{eff}}}. \quad (13)$$

Here  $\mathfrak{F}_y$  is the Fourier transform

$$\mathfrak{F}_y(U_{x=a}) = \int_{-\infty}^{\infty} U_{x=a} \exp(iy\beta_y) dy. \quad (14)$$

$\beta_y$  is the angular spatial frequency in the  $y$ -direction,  $U(x, y)$  is the normalized mode field distribution of the bent fiber

$$U = \frac{E\sqrt{n}}{\sqrt{\int \int n |E|^2 dx dy}} \quad (15)$$

and  $E$  is the electric field. The numerator in the integral of (13) is therefore the spatial Fourier power spectrum of the mode, along the boundary surface  $x = a$ . The denominator in the integral of (13) is a Hankel function of the second kind, where

$$\beta_x = \sqrt{\beta_y^2 + \beta_z^2(x=a) - k_{\text{clad}}^2}. \quad (16)$$

The only major assumptions leading to (13) are those of weak guidance ( $\text{NA}_{\text{index}}^2 \ll 2n_{\text{core}}^2$ ) and slow bending ( $a \ll R$ ).

In the derivation of (9), the Hankel function of (13) was originally approximated as [19]

$$H_{\mu}^{(2)}[\beta_x(R+a)_{\text{eff}}] \approx i\sqrt{\frac{2}{\pi\gamma R_{\text{eff}}}} \exp\left[\left(\frac{\gamma^3}{3\beta_z^2} + \frac{\gamma\beta_y^2}{2k_{\text{clad}}^2}\right)R_{\text{eff}} - \gamma a_{\text{eff}}\right]. \quad (17)$$

This approximation was reached by expanding the argument of the Hankel function about  $x = 0$  and dropping higher order terms. The propagation constant and  $\gamma$  were also evaluated at  $x = 0$  in (17). However, the fields and propagation constant most relevant to the bend loss in (13) are those at  $x = a$  rather than the origin. It would therefore seem more appropriate to expand the argument of the Hankel function about  $x = a$ , which leads to the modified approximation

$$H_{\mu}^{(2)}[\beta_x(R+a)_{\text{eff}}] \approx i\sqrt{\frac{2}{\pi\gamma(R+a)_{\text{eff}}}} \exp\left[\left(\frac{\gamma^3}{3\beta_z^2} + \frac{\gamma\beta_y^2}{2k_{\text{clad}}^2}\right)(R+a)_{\text{eff}}\right] \quad (18)$$

where  $\beta_z$  and  $\gamma$  are evaluated instead at  $x = a$ .

For small values of  $\gamma a$ , this modification to the Hankel function approximation has relatively little impact on the computed bend loss. However, for larger core sizes, the difference amounts of many orders of magnitude. To test the accuracy of the different forms, the calculated modes from the BPM simulations, and their simulated propagation constants, were used to numerically evaluate (13). The results using the modified expansion of the Hankel function in (18) are presented in Figs. 9 and 10. As can be seen, the BPM simulations agreed extremely well with the loss formula in (13), given the modified Hankel function expansion. The relative error between simulation and formula averaged less than 1%, for all data points, with an average deviation of 10%. This was extremely good agreement considering a

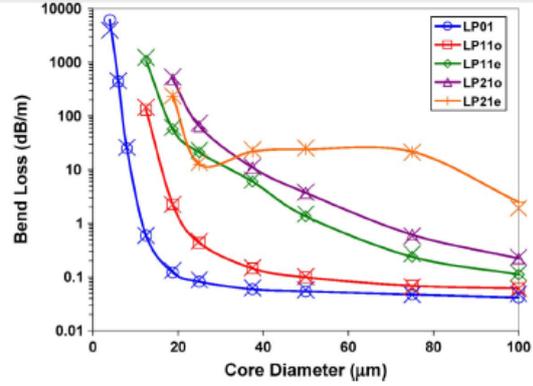


Fig. 9. Comparison of theoretical bend loss data for the lowest order fiber modes. BPM simulated loss is marked by symbols as indicated in the legend, connected by solid lines. Loss calculated directly from the simulated mode field distributions, using (13) and the modified Hankel function approximation (18) is indicated by  $\times$  markers. Loss calculated directly from the mode field distributions was in excellent agreement with that obtained by propagation simulations with the BPM. If the usual Hankel function approximation in (17) was instead used, it overestimated the loss by many orders of magnitude, by a factor  $\exp(2\gamma a) \sim \exp(2V)$ . The loss of each mode was seen to stabilize with increasing core diameter, contrary to predictions made by the simplified loss formula. Loss of the different modes also converged with increasing core diameter. Simulation parameters were  $\lambda_0 = 1064$  nm,  $\text{NA}_{\text{index}} = 0.1$ , at  $R_{\text{eff}} = 1.24$  cm.

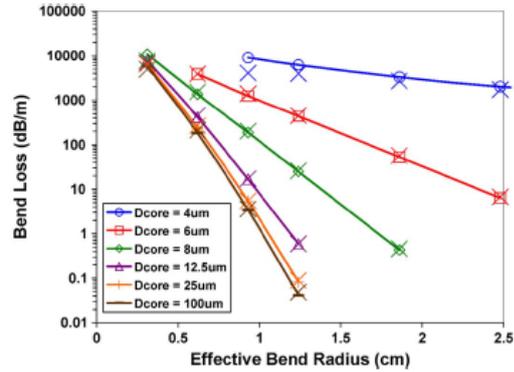


Fig. 10. Comparison of theoretical bend loss data for the fundamental fiber mode. BPM simulated loss is marked by symbols as indicated in the legend, connected by solid lines. Loss calculated directly from the simulated mode field distributions, using (13) and the modified Hankel function approximation (18), is indicated by  $\times$  markers. Loss calculated directly from the mode field distributions was in excellent agreement with that obtained by propagation simulations with the BPM. If the usual Hankel function approximation in (17) was instead used, it overestimated the loss by the factor  $\exp(2\gamma a) \sim \exp(2V)$ , many orders of magnitude. Simulation parameters were  $\lambda_0 = 1064$  nm and  $\text{NA}_{\text{index}} = 0.1$ .

variation of over five orders of magnitude in the data. By comparison, when the Hankel function expansion of (17) was instead used, the predicted loss was overestimated by the factor  $\exp(2\gamma a) \sim \exp(2V)$ . For the largest simulated core diameter, 100  $\mu\text{m}$ , this amounted to an error of 25 orders of magnitude. In light of this, the modified Hankel function approximation in (18) was the clear favorite.

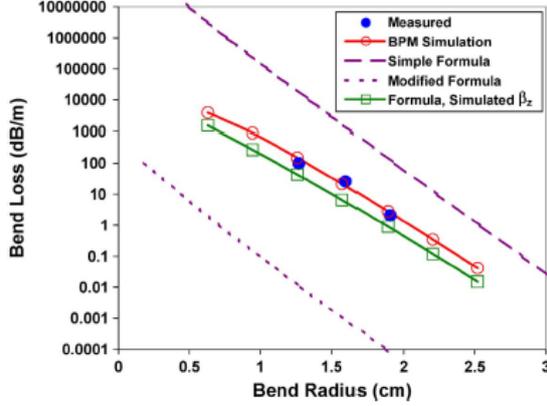


Fig. 11. Comparison of different theoretical predictions and experimental data for the fundamental mode bend loss of Liekki passive 25/240DC fiber at 633 nm. BPM simulated loss ( $\circ$ ) is in good agreement with measured data ( $\bullet$ ). The simplified loss formula, (9), overestimated the loss by orders of magnitude. Using the modified Hankel function approximation, (20) underestimated the loss by orders of magnitude. However, when the propagation constant of the bent fiber, rather than the straight fiber, was used in the modified formula ( $\square$ ), the agreement was much better, within a factor of about 2.5. The remaining factor of 2.5 was due to the modified, simplified formula not accounting for mode field distortion due to the bend.

When the modified Hankel function approximation (18) is inserted into (13), the loss formula becomes

$$2\alpha = \left( \frac{\gamma}{2\pi k_{\text{clad}}} \right) \exp \left[ \frac{-2\gamma^3 (R+a)_{\text{eff}}}{3\beta_y^2} \right] \times \int_{-\infty}^{\infty} |\Im_y(\mathcal{U}_{x=a})|^2 \exp \left[ \frac{-\gamma\beta_y^2 (R+a)_{\text{eff}}}{k_{\text{clad}}^2} \right] d\beta_y. \quad (19)$$

Agreement between simulation and this formula was excellent. The only discrepancy occurred for weakly confined, tightly bent fiber ( $2a = 4 \mu\text{m}$ ,  $V = 1.18$ ), as shown in Fig. 10. This was attributed to error in the simulated mode distribution, due to the truncated index profile.

## V. ERROR IN THE SIMPLIFIED FORMULA

If we were to use the modified Hankel function expansion in (18) to re-derive the simplified bend loss formula, the following modified formula would result

$$2\alpha = \frac{\pi^{1/2} \kappa^2 \exp \left[ \frac{-2\gamma^3 (R+a)_{\text{eff}}}{3\beta_y^2} - 2\gamma a \right]}{2(R+a)_{\text{eff}}^{1/2} \gamma^{3/2} V^2 K_{m-1}(\gamma a) K_{m+1}(\gamma a)}. \quad (20)$$

The bend loss predicted by this modified formula for the Liekki multimode fiber is shown in Fig. 11. As can be seen, although the original formula overestimated the bend loss, using the modified Hankel function approximation caused the simplified formula to underestimate it by a similar amount.

The fact that the modified Hankel function approximation did not provide better results when used in the simplified formula,

while it did in the previous section, provides insight into the limitations of the simplified formula itself. This formula accounts for neither the mode field deformation, nor the weaker mode confinement (as expressed by the reduced propagation constant at  $x = a$ ), that occurs within the bent fiber [1]. We can gauge the relative importance of these two simplifications, however, by inserting the correct propagation constants from BPM simulations into (20). Fig. 11 illustrates the results. By using the correct propagation constant in (20), the relative error in the loss predictions was reduced from a few orders of magnitude to a factor of about 2.5. The remaining error was attributable to not accounting for the mode field deformation. Clearly, not adjusting the propagation constant was the dominant source of error in this case.

This result helps explain why the simplified bend loss formula in (9) works relatively well for single-mode fiber, but not multimode. Although (20) includes the preferred Hankel function approximation, it tends to underestimate the loss by not accounting for the change in propagation constant. Equation (9), on the other hand, is greater than (20) by the factor  $\exp(2\gamma a)$ . For single-mode fiber this factor is sufficient to make up the difference, providing a reasonably good estimate of the bend loss. For multimode fiber, however, this factor grows much too large to provide a good assessment.

## VI. DISCUSSION

Before concluding it is worth commenting on the physical interpretation of these results. Equation (13) states simply that fiber bend loss may be determined by expanding the fields on the boundary cylinder, defined by  $x = a$ , as a superposition of outgoing cylindrical waves in the cladding. The amount of loss depends upon the strength of the mode fields on this surface, and which cylindrical waves (Hankel functions) the fields

excite. The latter are determined by the propagation constant at the boundary surface, as well as the field variation in the  $y$ -direction. Note also that there is no requirement that the waveguide be a simple step-index fiber in this formula. Equation (19) is therefore generally applicable to waveguides that have both a uniform dielectric, and modal caustic boundaries, located in the region  $x > a$ .

It is also worth comparing the results of this paper to conclusions drawn previously about field deformation in bent fibers. A previous interpretation was that field deformation decreases the fundamental mode bend loss in multimode fibers [3]. This is despite the fact that the fields became stronger on the boundary surface, and was based on a comparison between numerical predictions and (9). The alternate interpretation offered here would seem more intuitive: that the modified simplified formula of (20) underestimates the loss, but the corrections of field deformation toward the outer edge of the fiber and weaker confinement (reduced propagation constant at  $x = a$ ) cause it to increase. The tendency for modal loss to stabilize with increasing core size in Figs. 9 and 10 is also in stark contrast to previous predictions based on the simplified formula. This is due to the fiber modes transitioning to whispering gallery modes at sufficiently large core diameter.

The loss of the odd LP modes is also quite notable, given that bending causes them to decouple from the even LP modes in the bent fiber. If one uses the simplified loss formula, their loss is predicted to be negligible. This is not significant if each of these modes is coupled to one of the lossy, even LP modes, because the total loss is then averaged over the even and odd constituents [1]. However, when uncoupled, the odd LP modes can have significantly lower loss, which can be quite important. This is apparent in Fig. 9, which shows that the losses of the  $LP_{01}$  and  $LP_{11o}$  modes become similar at larger core sizes. This has serious implications for the effectiveness of mode stripping using bend loss in multimode fiber amplifiers. For example, at a core diameter of  $25 \mu\text{m}$ , the differential bend loss between the fundamental and  $LP_{11o}$  modes was simulated to be  $0.35 \text{ dB/m}$ . The simplified formula, in contrast, predicts differential loss on the order of  $5 \text{ dB/m}$  [4].

Lastly, it is important to note that by assuming an infinite cladding, (19) does not account for possible back reflections from the fiber jacket, or from additional cladding layers. Thus, although this loss formula predicts the power flow away from the fiber core, it cannot predict the fraction of the power that may eventually return. However, (19) may be readily extended to fibers with high-index jackets ( $n_{\text{jacket}} > n_{\text{clad}}$ ) using the approach detailed in [20]. This results in an oscillatory loss spectrum, with maxima and minima given by

$$2\alpha_{\text{coated}} = \begin{cases} 2\alpha\eta^{1/2}, & \text{max} \\ 2\alpha\eta^{-1/2}, & \text{min} \end{cases} \quad (20)$$

where  $2\alpha$  is determined from (19), and

$$\eta = \left( \frac{n_{\text{clad}}}{n_{\text{jacket}}} \right)^{4/3} \left[ \frac{2\Delta\alpha k_{\text{jacket}}^2 - R_{\text{eff}}\beta_{xp}^2}{2\Delta\alpha k_{\text{clad}}^2 - R_{\text{eff}}\beta_{xp}^2} \right]. \quad (21)$$

applicable, but should be used with caution when applied to low-index jacketed or doubly clad fibers.

## VII. CONCLUSION

Although the BPM simulations presented in this paper, and the analytical formula of (19), represent vastly different theoretical approaches to predicting bend loss, they agreed remarkably well for both single-mode and multimode fibers, and fundamental and higher order modes. This strongly suggests the soundness of both approaches. Their agreement with experiment also indicates a good degree of accuracy.

One consequence is that this demonstrates the ability of the beam propagation method with conformal mapping to accurately predict both the modes of a bent fiber, and their propagation characteristics. This suggests that the BPM may also be able to handle more complicated bent waveguide structures, which are currently not well understood.

A second consequence is that the loss formula introduced in (19) can accurately predict waveguide bend loss, without the need for BPM simulation. This offers a simple approach, which only requires prior knowledge of the mode field distribution and the propagation constant. Various mode-solving techniques may therefore be used in conjunction with (19) to predict bend loss. This approach is also broadly applicable to more complicated fiber geometries.

Lastly, the results of this paper provide revised guidelines for use of simplified bend loss formulae. For single-mode fiber, the unmodified, simplified formula works well provided that stress is accounted for through the effective bend radius. For multimode fiber, the modified formula in (20) provides reasonable results, but requires some knowledge of the propagation constant variation with bending.

Here  $\Delta a$  is the difference between the core and cladding radii ( $a_{\text{clad}} - a_{\text{core}}$ ), and  $\beta_{xp}$  is similar to (16) but with  $\beta_y$  replaced by the peak spatial frequency from the modal Fourier expansion (14), which is zero for even LP modes, but nonzero for odd. The extremities in the bend loss correspond to the conditions

$$\frac{4a_{\text{clad}}\beta_{xp}}{3\pi} \left( \frac{R_{\text{eff}}}{R_c} \right) \left( \frac{R_c}{R_{\text{eff}}} - 1 \right)^{3/2} = \begin{cases} 2m - 1/2, & \text{max} \\ 2m - 3/2, & \text{min} \end{cases} \quad (22)$$

where

$$R_c = \frac{2a_{\text{clad}}k_{\text{clad}}^2}{\beta_{xp}^2}. \quad (23)$$

Furthermore, these oscillations disappear for large bend radii,  $R > R_c$ , such that the caustic boundary lies outside of the fiber cladding.

For low-index fiber jackets ( $n_{\text{jacket}}^2 < n_{\text{clad}}^2 - \text{NA}_{\text{index}}^2$ ) on the other hand, leakage from cladding to jacket is relatively weak, so light radiated from the core can accumulate substantially in the cladding. In such cases, (19) merely describes the rate of outward power flow from the fiber core. This must be balanced against the inward flow due to reflections from the cladding-jacket interface, which is rather complicated, and beyond the scope of this paper. Equation (19) is therefore quite

## APPENDIX A SIMULATION ACCURACY

To estimate the impact of simulation grid size on the mode calculations, a series of simulations were performed for the fundamental mode of the straight fiber discussed in Fig. 4, using different transverse ( $\Delta x, \Delta y$ ) and longitudinal ( $\Delta z$ ) steps and a launched Gaussian distribution. The resulting normalized propagation constants ( $b_{\text{sim}}$ ) are compared to the exact value ( $b_{\text{exact}} = 0.9177957658$ ) computed from the characteristic equation [19] in Fig. 12. As shown, the simulations were extremely accurate at the step sizes used in this paper ( $\Delta x = \Delta y = 0.1 \mu\text{m}$  and  $\Delta z = 0.5 \mu\text{m}$ ), as well as for somewhat larger grids.

To estimate the impact of truncating the refractive index profile on the mode calculations, a series of simulations were performed for the fundamental mode of the fiber in Fig. 4, using various refractive index transition points,  $x_{\text{trans}}$ , and bend radii. The resulting normalized propagation constants ( $b_{\text{sim}}$ ) are compared to those computed with  $x_{\text{trans}}$  just inside the caustic boundary ( $b_{\text{caustic}}$ ) in Fig. 13. Noting that  $b_{\text{caustic}}$  should approach the exact value as the caustic boundary moves farther outward, it is evident that the curve for  $R_{\text{eff}} = 1.24$  must closely approximate the relative error in the calculation caused by truncating the index profile. Furthermore, since the other