

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR
EN CIENCIA DE LOS MATERIALES



KARINA RODRIGUEZ CARMONA.

PROGRAMA: DOCTORADO EN CIENCIA DE LOS MATERIALES.

ASESOR: Dr. ALFREDO MARQUEZ LUCERO.

NOMBRE DE LA TESIS:

**ANALISIS Y MODELACION DEL COMPORTAMIENTO DE ATENUACION NO
ACOMULATIVA DE FIBRAS OPTICAS ENROLLADAS EN BOBINAS CON
PEQUEÑOS RADIOS DE CURVATURA.**

CHIHUAHUA, CHIH A DICIEMBRE DE 2013

INDICE

CAPITULO I. INTRODUCCION

1.1 Introducción.	3
1.2 Marco Teórico.	7
1.3 Antecedentes.	10
1.4 Hipótesis.	15
1.5 Objetivo principal.	15
1.6 Objetivos particulares.	15
1.7 Justificación.	16

CAPITULO II. MATERIALES Y TECNICAS UTILIZADAS

2.1 Materiales utilizados.	17
2.2 Técnicas utilizadas.	20

CAPITULO III. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 Desarrollo experimental.	24
3.2 Resultados experimentales.	26
3.3 Comparación entre los resultados teóricos de modelos evaluados y los datos experimentales.	28
3.4 Conclusiones parciales.	31
3.5 Nuevo modelo propuesto (Rodríguez – Márquez).	33

CAPITULO IV.
ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Análisis y discusión de los resultados flexionando la fibra varias vueltas con diferentes radios de curvatura.	38
4.2 Análisis y discusión de los resultados de la evaluación de los modelos.	39
4.3 Análisis y discusión de los resultados de la evaluación del nuevo modelo propuesto.	40
4.3 Conclusiones fundamentales.	41
4.4 Bibliografía.	42

CAPITULO 1

1.1 Introducción.

Normalmente las fibras ópticas son empleadas en forma tal que se mantengan estiradas en forma lineal o enrollada en grandes carretes, para evitar atenuaciones debidas a la flexión de las mismas. Sin embargo, existen varios diseños de sensores basados en fibras ópticas, que requieren que estas sean enrolladas en bobinas de pequeños diámetros. Este requerimiento es muy reciente y aun hoy no se han desarrollado ni los métodos de caracterización experimental, ni los modelos que predigan adecuadamente el comportamiento de las fibras ópticas en estas bobinas. Lo que representa una muy interesante área de oportunidad.

Las aplicaciones de los sensores de fibra óptica hoy en día son múltiples; Telecomunicaciones, Medicina, Industria militar, Industria aeroespacial, Ingeniería civil [6, 7, 10, 11, 17, 20, 26, 32, 39, 45, 50, 54 y 62]. Estos sensores han estado en constante evolución y se han podido medir a la fecha varios tipos de parámetros químicos y físicos: se puede medir la temperatura, la fuerza y presión aplicada sobre un cuerpo o estructuras de concreto [18, 21, 23, 27, 31, 33, 34, 36, 43, 44, 47 y 48]. También un mismo sensor puede medir simultáneamente dos parámetros distintos [2, 16 y 29]. Este tipo de sensores también se emplean para localizar fugas de hidrocarburos [5 y 40]. Los sensores de fibra óptica pueden operar bajo diversas tecnologías; rejillas de bragg, giroscopios [4, 9, 22, 24, 25, 42, 51 y 61]. También funcionan obedeciendo los siguientes principios físicos; Sagnac effect, Scattering reflection, y Interferometers [28, 37, 38 y 46]. Los

sensores ópticos rotacionales aparte de ofrecer patrones de interferencia producidos por el efecto Sagnac, también proporcionan información cuando cambia su momento angular ya que generan un cambio en su simetría rotacional [35 y 45]. En la última década se han sustituido los giroscopios mecánicos por los ópticos debido a que presentan algunas ventajas (tienen una gran rango dinámico, son de lectura digital, tienen un bajo costo y un tamaño reducido), varios autores han estudiado la aplicación de estos giroscopios ópticos. Se han aplicado para controlar navegaciones no tripuladas y en radio controles de vehículos [59]. Este tipo de sensores también pueden monitorear emisiones ultrasónicas que originan la ocurrencia de microgrietas en grandes estructuras de concreto [30, 58, 59 y 63], así como la generación de gradientes térmicos [9]. A este tipo de sensores también se le pueden implementar rejillas de Bragg para monitorear la distribución de temperaturas en transformadores [1], así como se pueden medir temperaturas bajo el principio del interferómetro de Michelson [60]. Se han diseñado máquinas automatizadas para enrollar fibra, las cuales durante el proceso de devanado tienen tensión controlada, la cual se puede medir de forma muy precisa por bobinas de fibra óptica [41]. Debido a la gran funcionalidad y versatilidad de los sensores de fibra óptica en forma de bobina se ha incrementado el interés por estudiar la atenuación que se produce en estos sensores. Debido a esto es importante evaluar si los actuales modelos para predecir el comportamiento de la atenuación de fibras ópticas flexionadas, en forma de bobinas [8, 12, 13, 14, 15, 52, 54 y 55]. Los modelos que se estudiaron y se evaluaron en este trabajo son;

- a) Dos de estos modelos basados en primeros principios, en especial en la aplicación de soluciones a las ecuaciones de Maxwell en geometrías

cilíndricas como la fibra óptica empleada. El modelo de Dietrich Marcuse [15], el modelo de R. Schermer and J. Cole [53]. Es importante mencionar que el modelo de Dietrich Marcuse [15] es un modelo pionero y que ha sido base de estudio en varios trabajos.

- b) Los otros dos son los modelos fenomenológicos más empleados en la literatura, estos son; el modelo de Mercatili [8] y el modelo de Sami Musa [55].

También se encontraron modelos en la literatura empleados para pronosticar el comportamiento de otras condiciones de la fibra óptica, como calcular el error en la reflexión de la fibra óptica en espiral [49 y 57]. Estos sin embargo salen del propósito de la presente investigación.

Los resultados teóricos de los cuatro anteriores modelos se compararon con los resultados experimentales de atenuación obtenidos con bobinas de fibra óptica; con diferentes números de bucles, hasta diez bucles; y con radios de curvatura distintos.

Un refractómetro de dominio de tiempo equipo (OTDR, por sus siglas en inglés) fue empleado para medir la pérdida de potencia a lo largo de la fibra.

Se observó que; estos modelos no predicen en forma correcta el comportamiento de la atenuación cuando las fibras están enrolladas en forma de bobina con radios de curvatura críticos, menores a 6 mm. Por lo que, se requirió desarrollar un nuevo modelo que prediga con mayor precisión este fenómeno. Así se desarrollo

un nuevo modelo nombrado R-M, en donde se tiene en cuenta la influencia dos factores; del número de vueltas con las cuales se enrolla la fibra óptica en la bobina y el radio de curvatura de la bobina.

El nuevo modelo desarrollado funciona bastante bien para pronosticar el comportamiento de atenuación experimental flexionando la fibra bajo diferentes números de vueltas y con diferentes radios de curvatura.

Es importante mencionar que estos fenómenos no habían sido observados y por lo tanto a la fecha no se encuentra publicados.

1.2 Marco teórico

Tipos de fibras ópticas.

- Fibra monomodo. Es una fibra que, por su diámetro reducido, sólo contiene un modo de onda electromagnética
- Fibra multimodo. Es una fibra por la cual pueden pasar distintos tipos de ondas electromagnéticas, es decir, con diferentes longitudes de onda y amplitudes.
- Fibra con rejillas de Bragg. Las rejillas de Bragg son grabaciones que se le hacen a la fibra en forma de líneas paralelas, estas son similares a un código de barras. Cuando éstas rejillas sufren diferentes grados de deformaciones, dependiendo a la flexión a que estén sometidas, éstas emiten diferentes espectros y cada espectro corresponde a un porcentaje de deformación.
- Fibra moteada. La fibra moteada, cuenta con orificios y por cada orificio, pasa un modo de onda. En la Figura 1 se muestra esta fibra.

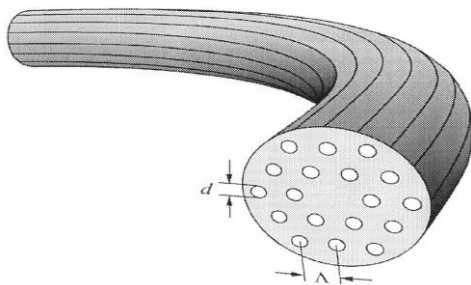


Fig. 1 Fibra moteada.

Conceptos relacionados con el funcionamiento de la fibra óptica.

- Índice de refracción. Cuando un haz de luz que se propaga por un medio ingresa a otro distinto, una parte del haz se refleja mientras que la otra se transmite, sufriendo un cambio con respecto a la dirección del haz original. Se utiliza la letra **n** para representar el índice de refracción y se calcula por la siguiente fórmula:

$$n = \frac{c_0}{v}$$

n : índice de refracción del medio en cuestión

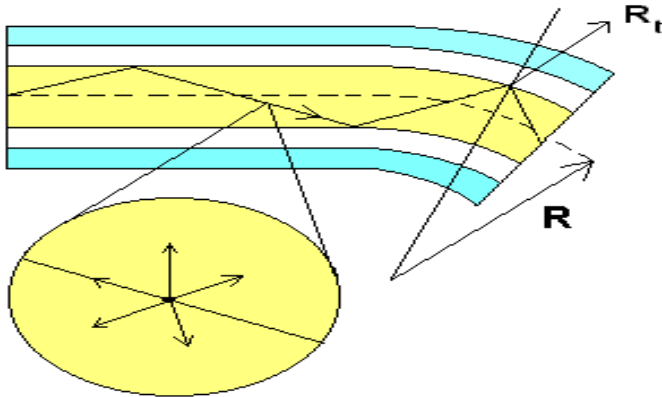
c₀ : velocidad de la luz en el vacío (3×10^8 m/s)

v : velocidad de la luz en el medio en cuestión.

Es decir, es la relación entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz del medio en que la luz se propaga. Dado que la velocidad de la luz en cualquier medio es siempre menor que en el vacío, el índice de refracción será siempre un número mayor que 1.

- Principio de reflexión interna total. Cuando la luz viaja por un medio dado y llega a una superficie de otro medio con un índice de refracción menor, se refleja en gran parte. Cuanto mayor sea la diferencia de índices y mayor el ángulo de incidencia, se habla entonces de reflexión total interna [19]. Cuando la luz tiene un ángulo de incidencia tal que le permite a está, permanecer dentro de la fibra óptica, se le llama modo confinado. Cuando la fibra tiene algún doble que ocasione que el ángulo de incidencia cambie,

una parte de esta luz se refracta (ángulo R_i de la figura 2), irradiante hacia al exterior de la fibra. En la Figura 2 se muestra este principio.



Reflectometría de *Rayleigh*

Fig. 2 Corte transversal de una fibra óptica.

- Longitud de onda. La longitud de onda es el parámetro físico que indica el tamaño de una onda. Entendiendo por tamaño de onda, la distancia entre el principio y el final de una onda completa (ciclo).
- Ángulo de incidencia. El ángulo de incidencia es el ángulo geométrico imaginario que existe entre el plano de un objeto y la línea formada por un rayo de luz que caiga sobre ese objeto.

1.3 Antecedentes.

Como anteriormente se mencionó, en la literatura se encontraron varios modelos; Dietrich Marcuse [15], R. Schermer and J. Cole [53], Mercatili [8] y Sami Musa [55], que fueron desarrollados para pronosticar el comportamiento de la pérdida de potencia luminosa de fibras ópticas curvadas o flexionadas. A continuación se describen estos modelos.

- Modelo de Marcuse.

El modelo de Dietrich Marcuse [15] se basa en las ecuaciones de Maxwell:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1) \qquad \nabla \times \vec{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2) \qquad \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4)$$

Donde E y H son los campos Magnéticos y Eléctricos, ϵ es la permitividad eléctrica y μ es la permitividad Magnética. Las ecuaciones de los respectivos componentes del campo eléctrico en un sistema cilíndrico son:

$$E_z = A \left[\frac{J_\nu(ka)}{H_\nu^{(1)}(i\gamma\alpha)} \right] H_\nu^{(1)}(i\gamma r') (\cos \nu \theta) e^{-i\beta R \theta} \quad (5)$$

$$E_\phi = \frac{A\gamma}{2\beta} \frac{J_\nu(ka)}{H_\nu^{(1)}(i\gamma\alpha)} \left[H_{\nu+1}^{(1)}(i\gamma r') \sin(\nu+1)\theta + H_{\nu-1}^{(1)}(i\gamma r') \sin(\nu-1)\theta \right] e^{-i\beta R \theta} \quad (6)$$

Donde E_z y E_θ son componentes del campo eléctrico, A es la amplitud de la onda; J_ν es la función de Bessel, H_ν es la función de Hankel de primer orden, k es la

constante de propagación de una onda plana y β es el parámetro del modo de propagación de la fibra óptica por unidad de longitud.

El coeficiente de pérdida luminosa 2α se calcula con la siguiente ecuación:

$$2\alpha = \frac{\sqrt{\pi}\kappa^2 \exp\left[-\frac{2}{3}(\gamma^3/\beta^2)R\right]}{e_v \gamma^{3/2} V^2 \sqrt{R} K_{v-1}(\gamma a) K_{v+1}(\gamma a)}, \quad e_v = \begin{cases} 2, v=0 \\ 1, v \neq 0 \end{cases} \quad (7)$$

Donde κ es la velocidad de la luz en el campo de corazón de la fibra, R es el radio de curvatura y V es un parámetro de frecuencia normalizada y γ es la velocidad de la luz en el cladding de la fibra.

- Modelo de R. y J. Cole Schermer.

El modelo de Schermer R. y J. Cole [53] se basa en el modelo de Marcuse. Este modelo se muestra en la ecuación 6.

$$2\alpha = \frac{\pi^{1/2} \kappa^2 \exp\left[-\frac{2\gamma^3(R+a)}{3\beta^2} - 2\gamma a\right]}{2(R+a)^{1/2} \gamma^{3/2} V^2 K_{m-1}(\gamma a) K_{m+1}(\gamma a)} \quad (8)$$

- Modelo de Mercatili.

El modelo Mercatili es un modelo fenomenológico, el cual predice la atenuación total en una fibra en base a la una longitud correspondiente a una distribución de

curvatura $R(S)$, $R(S)$ son los cambios graduales de curvatura que se producen a lo largo de la fibra, este modelo se muestra en la ecuación 7.

$$Loss(dB) = \frac{10}{\ln 10} \int_L \frac{C_1}{\sqrt{R(S)}} \exp[-C_2 R(S)] ds \quad (9)$$

C_1 y C_2 , son constantes que dependen sólo de las propiedades ópticas de la fibra y longitud de onda de la luz. L es la longitud de la fibra correspondiente a la distribución de las curvaturas.

La ecuación 7 se evaluó de la siguiente forma:

Se propuso un sistema de ecuaciones (intervalo 8 a, 8 b, 8 c y la ecuación 9), se tiene una distribución $R(S)$. En la Figura 3, se observa que el radio de curvatura de la fibra desde su creación en el punto (a), hasta que comienza a la bobina en el cilindro en el punto (b), la curvatura es infinita, también la curvatura es infinita desde el punto (c) hasta el extremo de la fibra en el punto (d). La fibra se dobla sólo en la sección del punto (b) hasta el punto (c) con un radio de curvatura constante (r_1). Así, podemos escribir que la distribución de curvaturas está dada por los siguientes intervalos

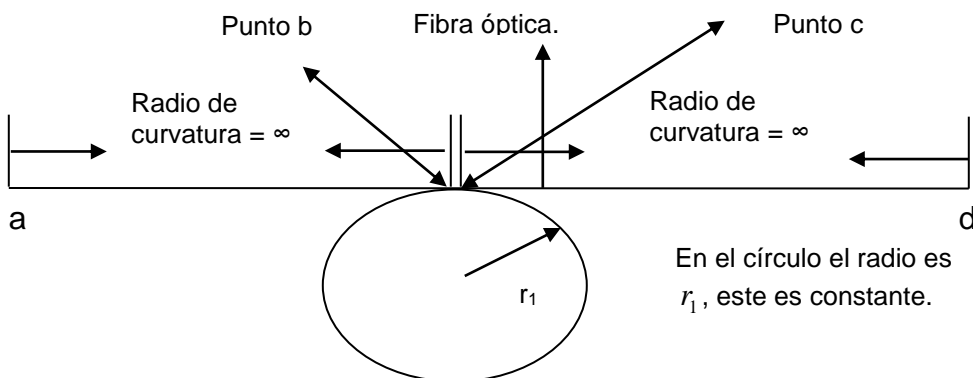


Figura 3. Distribución R(s) de una fibra óptica.

Se escribió una distribución de curvaturas con los siguientes intervalos.

$$a < s < b ; R(S) = \infty \quad \text{Intervalo 10a}$$

$$a \leq s \leq c ; R(S) = r_1 \quad \text{Intervalo 10b}$$

$$c < s < d ; R(S) = \infty \quad \text{Intervalo 10c}$$

Aplicando la distribución de curvaturas a la ecuación 7, se tiene.

$$Loss(dB) = \frac{10}{\ln 10} \int_a^b \frac{C_1}{\infty} \exp[-C_2 \infty] ds + \frac{10}{\ln 10} \int_0^{2\pi} \frac{C_1}{r_1} \exp[-C_2 r_1] ds + \frac{10}{\ln 10} \int_c^d \frac{C_1}{\infty} \exp[-C_2 \infty] ds$$

Para el intervalo 10a

Para el intervalo 10b

Para el intervalo 10c

$$(11)$$

Integrando tenemos;

$$Loss(dB) = \frac{10}{\ln 10} \cdot C_1 \exp[-C_2 r_1] \cdot 2\pi \sqrt{r_1} \quad (12)$$

- Modelo de Musa.

Este autor propone un modelo basado en una función de potencia para predecir el comportamiento de la atenuación de una fibra multimodo cuando está flexionada, este modelo se muestra en la ecuación 11.

$$T = \frac{P_{out}}{P_{in}} = 1 - \frac{1}{2}K - \frac{1}{6}K^2 - \frac{1}{8}K^3 - \frac{1}{8}K^4 + O(K^5) \quad (13)$$

Donde

$$K = w / NA^2 R \quad (14)$$

T es la pérdida de potencia luminosa, w es el ancho del canal, R es el radio de curvatura, y NA es la apertura numérica. En el capítulo 3 de desarrollo experimental, se muestra el estudio y la evaluación de estos modelos.

1.4 Hipótesis.

- 1) Para pronosticar el comportamiento de la atenuación de fibras ópticas enrolladas en forma de bobina de pequeño diámetro, es posible emplear los modelos desarrollados en la literatura científica para este propósito.
- 2) En caso de que estos modelos no pronostiquen en forma correcta el comportamiento de la atenuación, es posible desarrollar un modelo alternativo que prediga correctamente el comportamiento de la atenuación de fibras ópticas enrolladas en forma de bobina.

1.5 Objetivo principal.

Desarrollar un modelo analítico que pronostique en forma correcta el comportamiento de fibras ópticas flexionadas en forma de bobina con diferentes números de vueltas y con distintos radios de curvatura.

1.6 Objetivos particulares.

- Estudiar el comportamiento de la atenuación cuando la fibra es flexionada en forma de bobina con varias vueltas y diferentes radios de curvatura.
- Analizar y evaluar modelos que han sido desarrollados para pronosticar el comportamiento de fibras ópticas en forma de bobina y comparar estos datos teóricos con datos experimentales para verificar la funcionalidad de estos modelos.
- En caso de que los modelos analizados no pronostiquen correctamente el comportamiento de la atenuación, proponer un nuevo modelo.

1.7 Justificación.

En los últimos años se ha incrementado el uso de sensores de fibra óptica. El diseño de estos sensores ha estado en constante evolución, uno de los diseños más empleados por la industria, es el diseño en forma de bobina. Debido a la gran funcionalidad de este tipo de sensores, en este trabajo se ha decidido estudiar y analizar los modelos que han sido desarrollados para predecir el comportamiento de la atenuación cuando las fibras ópticas están flexionadas en forma de bobina. Dentro de los modelos que se van a estudiar, se encuentra el modelo de Marcuse, el cual es un modelo pionero y base de estudio para muchos autores. En caso de que estos modelos no funcionen correctamente se propondrá un nuevo modelo. Este modelo deberá de pronosticar el comportamiento de fibras ópticas flexionadas en forma de bobina con diferentes números de vueltas y distintos radios de curvatura.

CAPITULO II

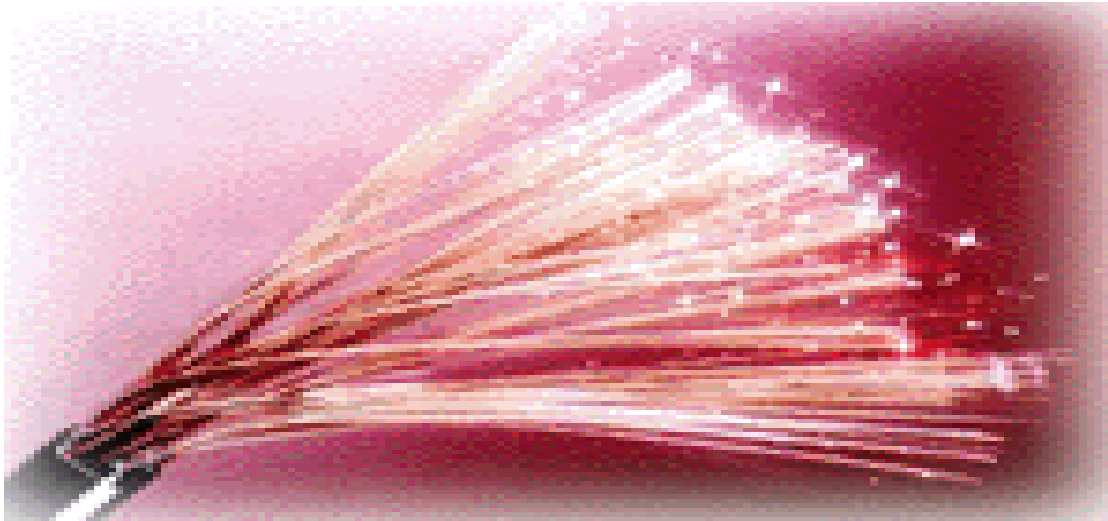


Fig 4. Fibras ópticas multimodo.

MATERIALES y TECNICAS UTILIZADAS.

2.1 Materiales utilizados.

- Fibra óptica.

Se utilizó una fibra multimodo de Thorlabs. Las características de la fibra se mencionan en la tabla 1.

Parámetros	Fibra Optica
------------	--------------

Diámetro del corazón	125± 0.7 µm.
Diámetro del Cladding	245± 5 µm.
Apertura Numerica	0.275 ± 0.015

Tabla 1. Parámetros de fibra óptica

La fibra óptica tiene forma de filamento, generalmente de vidrio (polisilicio), también puede ser de materiales orgánicos (poli metil metacrilato PMMA). Es capaz de guiar ondas electromagnéticas, generalmente señales láser.

Las fibras utilizadas en telecomunicaciones a largas distancias son siempre de vidrio. Utilizándose las de plástico sólo en algunas redes de ordenadores y otras aplicaciones de corta distancia, debido a que presentan mayor atenuación que las de silicio.

Cada filamento consta de un núcleo central de plástico o vidrio (óxido de silicio y germanio) con un alto índice de refracción, rodeado de una capa de un material similar con un índice de refracción ligeramente menor.

En la Figura 5 se muestran los componentes de la fibra óptica.

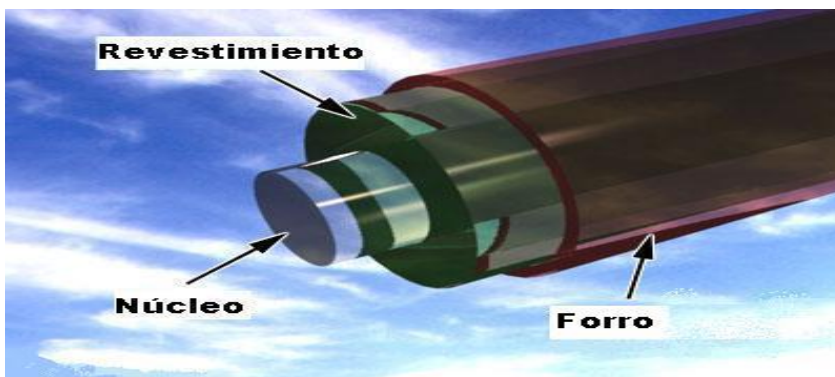


Figura 5. Estructura de la fibra óptica.

Elementos de la estructura de la fibra óptica.

Núcleo: Es propiamente la fibra óptica. El filamento delgado por donde viaja la luz.

Revestimiento: Es una o más capas que rodean a la fibra óptica y están hechas de un material con un índice de refracción menor al de la fibra óptica, de tal forma que los rayos de luz se reflejen por el principio de reflexión total interna hacia el núcleo y permite que no se pierda la luz.

Forro: Es un revestimiento de resina que protege a la fibra y a la capa media, de la humedad y maltratos.

- Otros materiales empleados.

Se emplearon 18 cilindros de acero con diferentes diámetros, el cilindro más pequeño tenía un diámetro de 1.5 mm, y este se fue incrementando en rangos de 0.5mm, el cilindro con el radio más grande fue de 10 mm.

2.2 Técnicas utilizadas.

- Reflectómetro óptico en el dominio del tiempo (OTDR).

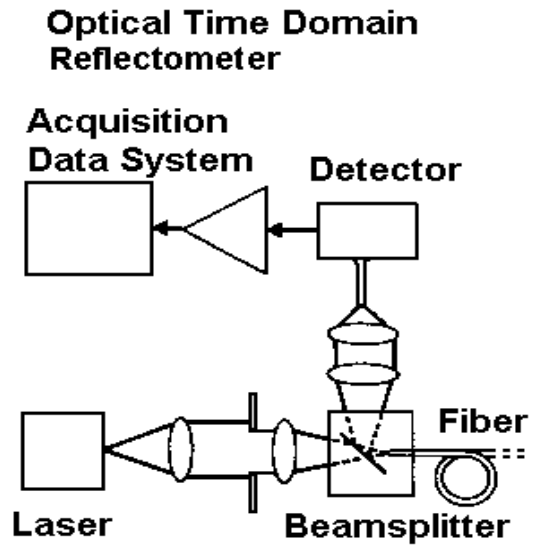
Un reflectómetro óptico en el dominio del tiempo (OTDR), marca textronix, modelo FM8513, fue empleado para este trabajo.



Fig. 6. (OTDR).

En la Figura 6 se muestra una fotografía de este equipo.

La forma de cómo funciona el OTDR, se muestra en la Figura 7.



El OTDR tiene un laser, éste emite un rayo, que pasa por unos componentes

ópticos, que sirven para alinearlos y ampliarlos. El rayo cuando llega al Beamsplitter (separador de rayos), es separado en dos rayos exactamente iguales. Uno de estos rayos es enviado hacia el mezclador, y éste se toma como un blanco. El otro rayo se envía a través de la fibra óptica, y sus reflexiones regresan al beam Fibra y éste lo manda hacia al mezclador, donde se encuentra con el otro rayo.

Una vez que ambos rayos están en el mezclador, las fases de éstos se comparan es decir, como el rayo que se envió a través de la fibra tardo un determinado tiempo en propagarse, la fase de sus reflexiones van a tener un retardo en el tiempo en comparación con la fase del rayo que se mando directamente al mezclador.

Con esta comparación de fases el OTDR, puede determinar si ocurrió algún evento en la fibra y a que distancia ocurrió este.

Los datos de está comparación, son mandados al detector y esté los manda a un sistema de adquisición de datos.

Las características del OTDR se muestran en la tabla 2.

Parámetros	OTDR
Longitud de onda	850 nm a 1300 nm.
Ancho de Pulso	10 μ s /1000m.
Salida del pulso	26.5 dB.
Rango de operación de la Longitude de onda.	850 nm \pm 20 nm.

Tabla 2. Parámetros del OTDR.

La Figura 8, muestra tres espectrogramas del OTDR. Los picos al inicio y final de los espectrogramas significan el inicio y final de la fibra óptica. La línea entre éstos

dos picos significa la potencia luminosa, en el primer espectrograma está se mantiene constante, debido a que no hay ningún dobles a lo largo de la fibra.

En el segundo y tercer espectrograma, esta línea que representa a la señal luminosa, tiene un escalón, este escalón representa una caída de potencia, y esta caída de potencia significa un dobles en la fibra.

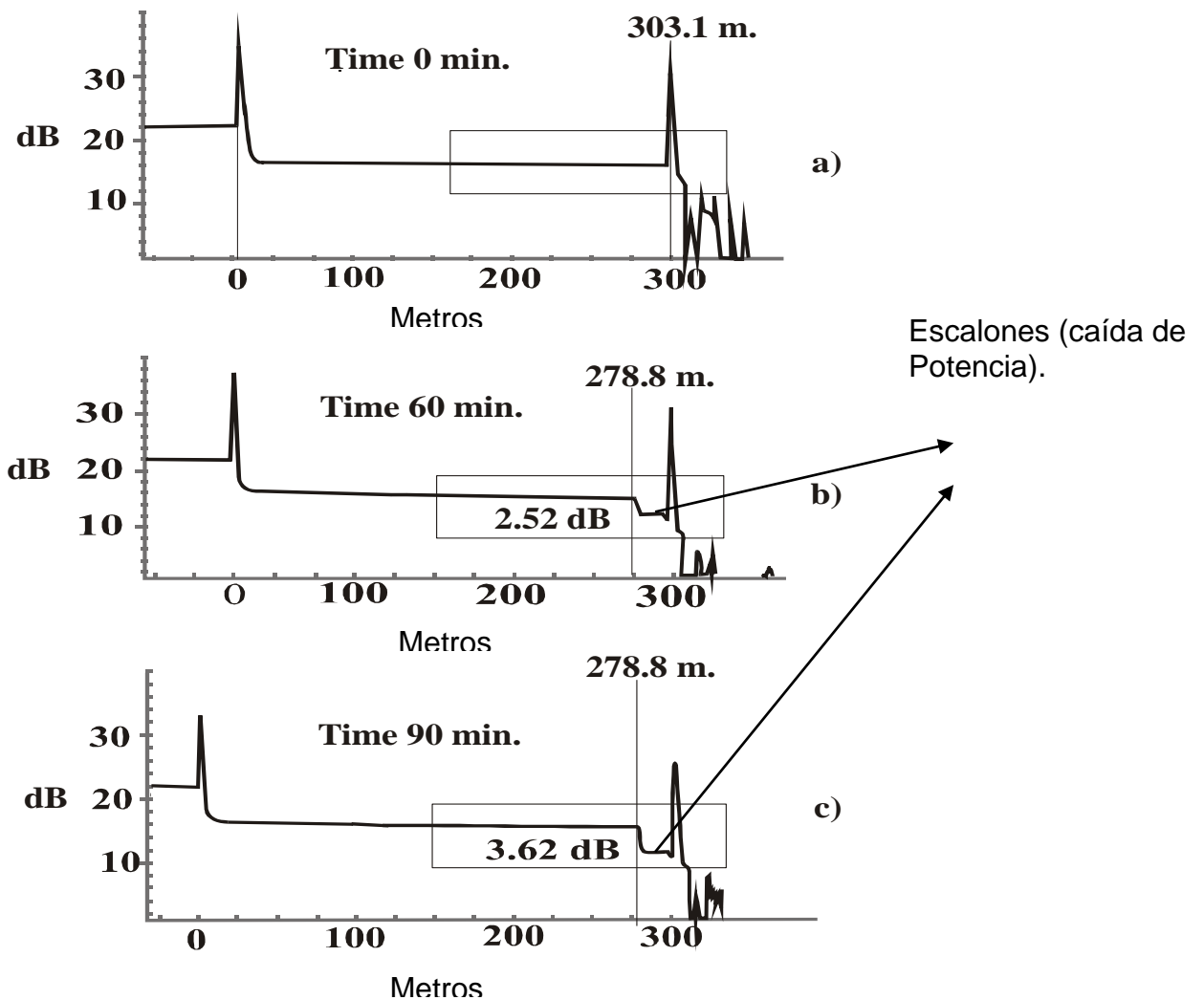


Fig.8 Espectrogramas del OTDR.

CAPITULO III

DESARROLLO EXPERIMENTAL.

3.1 Desarrollo experimental.

La fibra óptica se enrolló alrededor de los cilindros de acero de 18 radios diferentes (1.5mm a 10 mm), y la pérdida de potencia se midió para diferentes números de bucles alrededor de cada cilindro (1 a 10 ciclos), como se muestra en la figura 9. Un Equipo FM8513 OTDR, marca Tektronix, se utilizó para medir la pérdida de potencia del largo de la fibra. Este equipo trabaja con pulsos láser de ancho de 10us y longitudes de onda de 850 nm o 1310 nm, con conectores tipo SC-UPC, sin empalmes de fusión o uniones mecánicas. Trabaja con un software de datos binarios con un formato común (XYASCII). La pérdida de potencia obtenida de cada medición se ensayó tres veces para evaluar el error experimental.

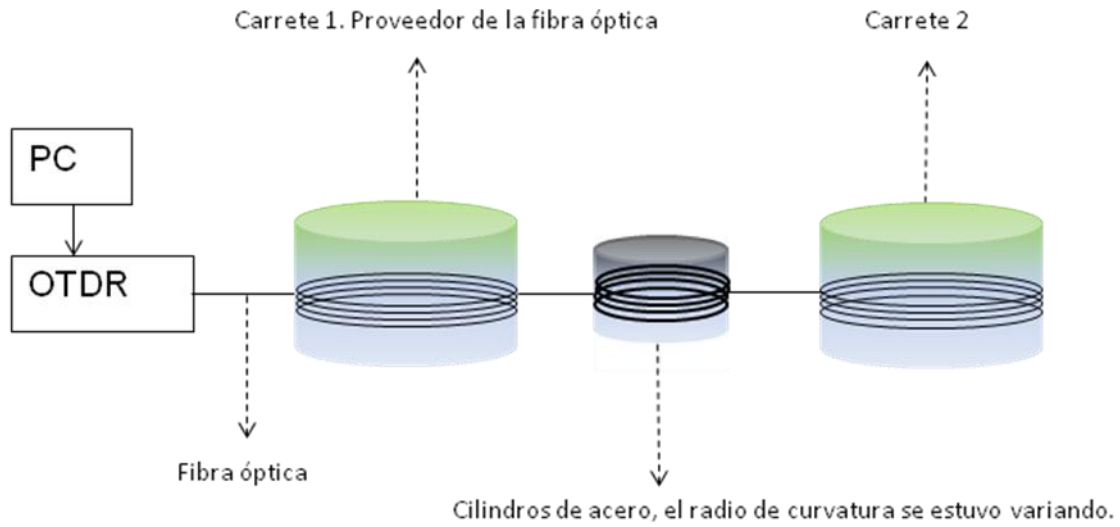


Figura 9. Diagrama que muestra una fibra óptica envuelta alrededor de varios cilindros con diferentes diámetros.

En la Figura 10 se muestra como se enrolla la fibra óptica en los cilindros de acero.



Figura 10. Fibras ópticas enrolladas alrededor de cilindros de acero.

3.2 Resultados experimentales.

La Figura 11 muestra los resultados de la pérdida de potencia de las bobinas de fibra óptica con un solo bucle y diferentes radios de curvatura. Se puede observar que los resultados son muy similares. Como era de esperar, los radios de curvatura más pequeños producen las mayores pérdidas. Sin embargo, se observa que para cualquier radio menor que 5 mm, la pérdida de potencia se incrementa significativamente, especialmente con un radio de 1.5 mm.

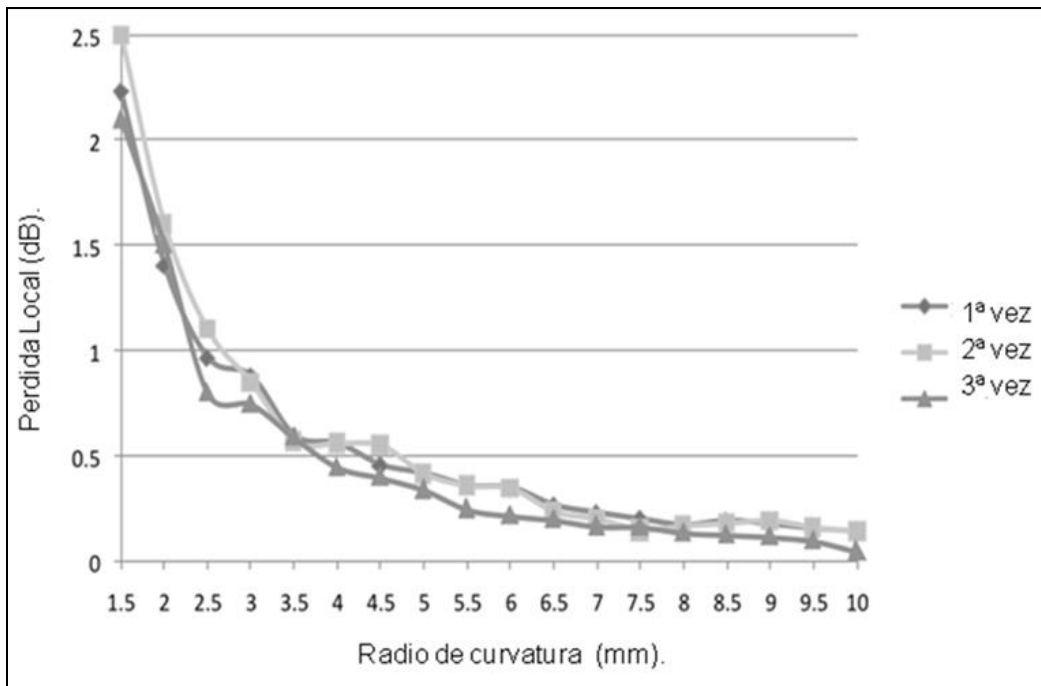


Figura 11. Pérdida de potencia en una bobina de fibra óptica de un solo bucle y radios de curvatura diferentes. El experimento se repitió tres veces. El error experimental es de aproximadamente + 10%.

La Figura 12 muestra los resultados de las pérdidas de potencia de las bobinas de fibra óptica con varios bucles y diferentes radios de curvatura. Es interesante observar que para radios pequeños por debajo de 2.5 mm, las pérdidas de energía producidas por un nuevo bucle tienen un incremento medio de 30% con respecto

al bucle anterior, en lugar del 100% de que los modelos actuales predicen. También inesperadamente la pérdida de potencia apenas aumenta después del cuarto bucle. Este comportamiento no acumulativo está en contradicción con los modelos actuales de pérdida de potencia (Dietrich Marcuse [15], R. Schermer and J. Cole [53], Mercatili [8] y Sami Musa [55]).

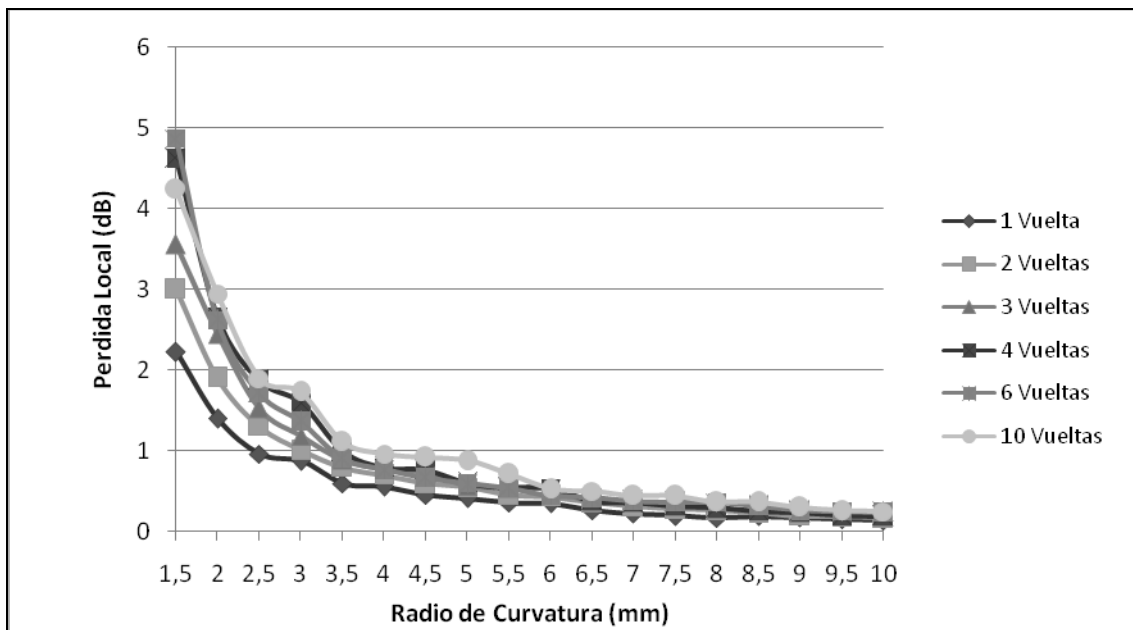


Figura 12. Resultados de pérdida de potencia.

Los modelos actuales predicen el comportamiento de pérdida de potencia total en una fibra como pérdidas locales aritméticamente acumuladas. Los presentes resultados muestran que esta consideración no es válida para las bobinas de fibra óptica.

3.3 Comparación entre los resultados teóricos de modelos evaluados y los datos experimentales.

- Comparación entre los resultados teóricos de los modelos de Dietrich Marcuse [15] y R. Schermer and J. Cole [53] con los datos experimentales.

Con el fin de obtener los valores de potencia 2α parámetro de pérdida de energía, definido en el artículo de Marcuse [15], los datos de las pérdidas experimentales se dividieron por la longitud de la fibra enrollada en cada cilindro (Es importante mencionar que la pérdida de potencia producida por la sección recta de la fibra se desprecia, así como la sección en los carretes proveedor, en este trabajo, entonces la sección de fibra única responsable de pérdidas es la bobina.) Los datos experimentales se compararon con los valores predichos de los modelos de Dietrich Marcuse [15] y R. Schermer and J. Cole [53]. La Figura 13 muestra esta comparación, se observa que el parámetro 2α calculado para un solo bucle es mayor que los calculados para bucles adicionales. Además, puede verse claramente que el modelo de Dietrich Marcuse [15] subestima la pérdida de potencia para cualquier radio menor que 6.0 mm. Aunque este modelo funciona muy bien en una guía de ondas ligeramente flexionada, es evidente que no funciona en bobinas de fibra óptica de radios inferiores a 6.0 mm. La Figura 14 ilustra el comportamiento de los datos experimentales y los datos del modelo de Dietrich Marcuse [15] para los radios de curvatura de 1,5 mm, 2 mm y 4 mm. Es importante resaltar los puntos siguientes: a) El parámetro de pérdida de potencia 2α no es una constante, sino una función de la cantidad de bucles (o más correctamente una función de la longitud del arco en espiral) b) Como se ha

mencionado anteriormente, el parámetro 2α calculado para un solo bucle es mayor que cualquier otro calculado para bucles adicionales.

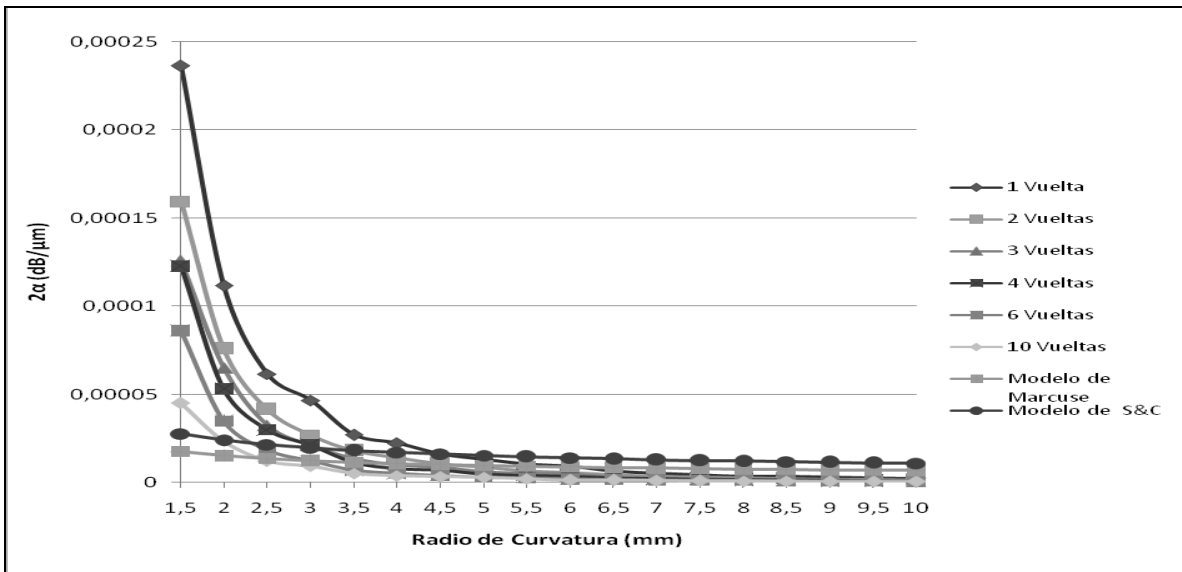


Figura 13. Comparación entre las predicciones del modelo Dietrich Marcuse de pérdida de potencia, el Sherman Ross y modelo James Cole, y los datos experimentales en una fibra óptica enrollada con varias vueltas. 2α es el coeficiente de pérdida de potencia.

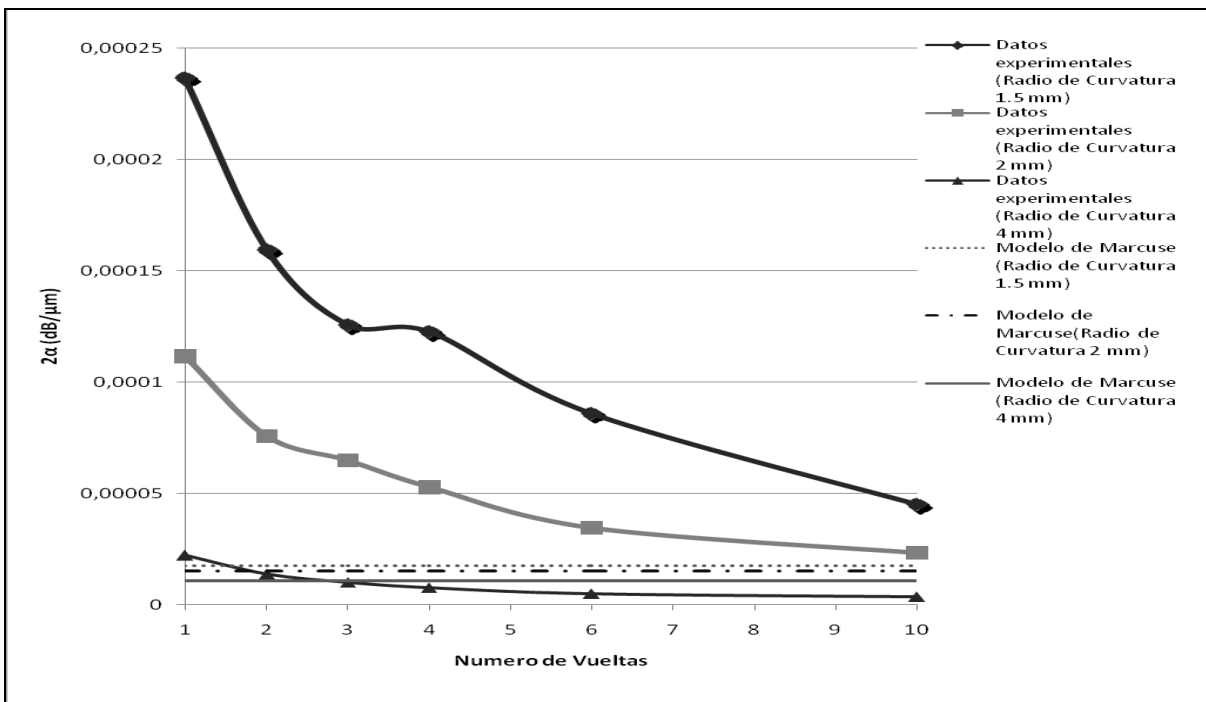


Figura 14. Comparación entre las predicciones del modelo de Marcuse de pérdida de potencia, el modelo de Sherman y Cole, y los datos experimentales en una fibra óptica enrollada con varias vueltas. 2α es el coeficiente de pérdida de potencia.

- Comparación entre los resultados teóricos del modelo de Marcuse [15] con los datos experimentales.

Comparando los datos teóricos con los datos de pérdida de potencia experimental, se observa que no hay una buena correlación entre ellos. Los resultados se muestran en la figura 15.

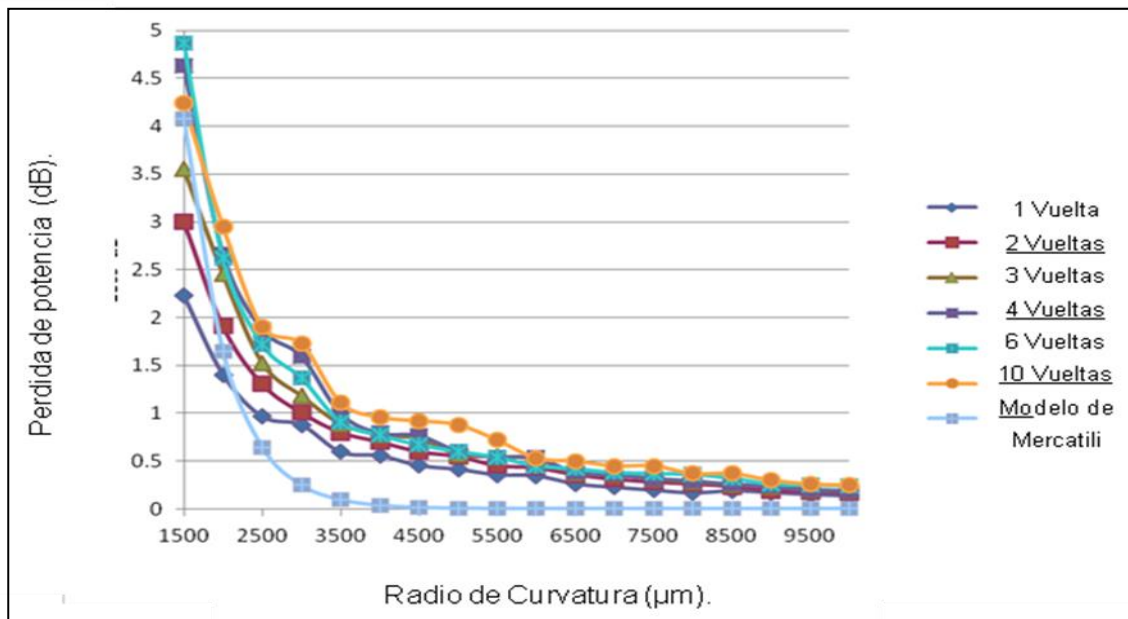


Figura 15. Comparación entre las predicciones del modelo Mercatili de pérdida de potencia y los datos experimentales en una espiral de fibra óptica con varios lazos.

- Comparación entre los resultados teóricos del modelo de Sami Musa [55], con los datos experimentales.

Los datos teóricos del modelo Musa, tienen una similitud con los datos de pérdida de potencia experimental. Es importante especificar que este modelo es fenomenológico, ya que se basa en una función polinomial. Los resultados se muestran en la figura 16. Este modelo tampoco explica la diferencia que hay en atenuación para los diferentes bucles. En realidad dice un solo comportamiento sin importar el número de bucles.

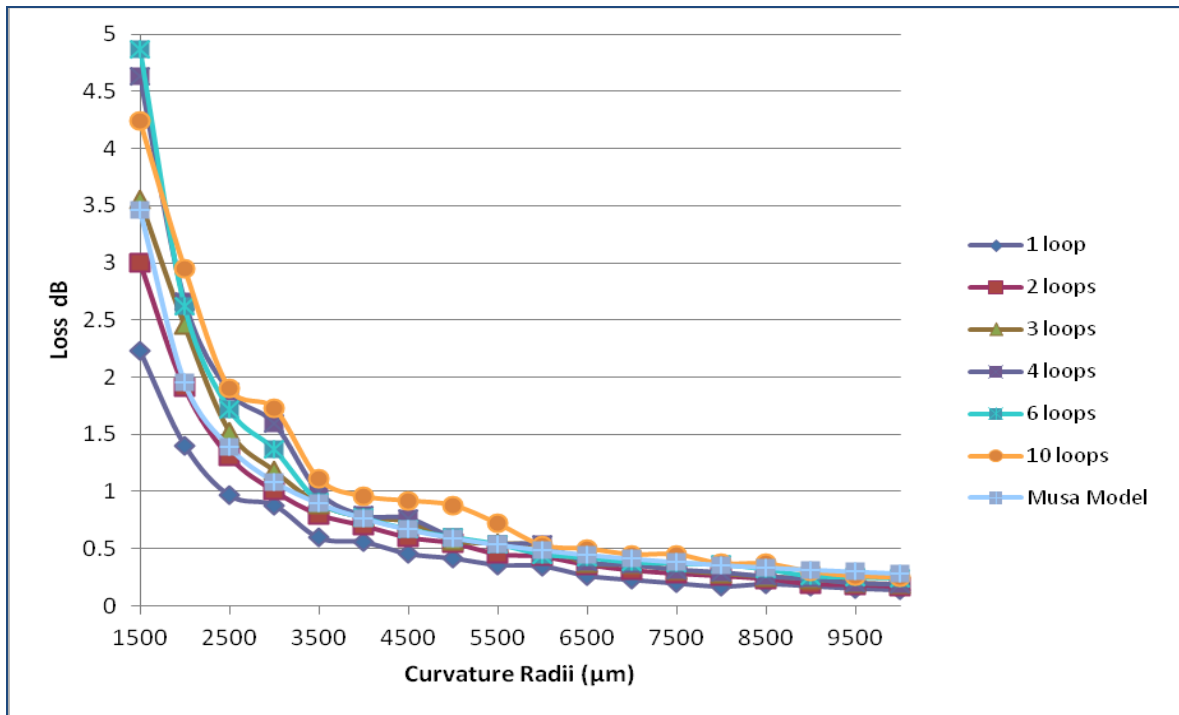


Figura 16. Comparación entre las predicciones del modelo de Sami Musa de pérdida de potencia y los datos experimentales en una espiral de fibra óptica con varias curvaturas.

3.4 Conclusiones parciales.

Los modelos de Dietrich Marcuse [15] y R. Schermer and J. Cole [53], siguen siendo el mejor intento fundamental para explicar las pérdidas de potencia de fibras ópticas flexionadas.

Los anteriores resultados nos indican que ambos modelos fallan en un punto crucial, predicen el comportamiento de la atenuación de una forma linealmente acumulativa y en la realidad la atenuación no tiene este comportamiento, sino que depende del camino óptico previamente recorrido. Estos modelos únicamente pronostican el comportamiento de atenuación para radios de curvatura mayores a 6 mm.

Los modelos de Mercatili [8] y el modelo de Sami Musa [55], se analizaron y se evaluaron, el comportamiento teórico del modelo de Mercatili no tiene una buena correlación con los datos experimentales, el comportamiento del modelo sobrestima los valores de los datos experimentales. El modelo de Sami Musa predice correctamente los valores de los datos experimentales, pero es importante mencionar que el modelo de Sami Musa se basa en una función polinomial.

Debido a lo mencionado anteriormente en este trabajo se presenta un modelo basado en el modelo de Dietrich Marcuse para pronosticar el comportamiento de pérdida de potencia cuando las fibras ópticas están flexionadas en forma de

bobinas, con diferentes números de vueltas y distintos radios de curvatura. Este se presenta en la siguiente sección.

3.5 Nuevo modelo propuesto (Rodríguez – Márquez).

El modelo Rodríguez – Márquez, se basa en una modificación del modelo de Marcuse y consiste en una fórmula analítica que predice la pérdida de potencia del coeficiente 2α . Para calcular este parámetro se usa la ecuación 5, la cual involucra el valor β , parámetro de modo de propagación del camino de la fibra óptica.

Marcuse define al parámetro β , con la ecuación 13.

$$\beta \approx n_2 k$$

En este trabajo, primero se evaluó el parámetro β de las curvas experimentales a través de la siguiente expresión;

$$\beta = n_{cl} k \pm d$$

Donde n_{cl} es el índice de refracción del revestimiento, $k = 2\pi / \lambda$ es la constante de propagación en el espacio libre, y d es un valor ajustado a los datos experimentales.

El modelo presentado por Ross Schermen y James Cole [53] fue también revisado, este modelo tiene algunas suposiciones de simplificación realizadas al modelo de Dietrich Marcuse [15], para mejorar la precisión de este. Sin embargo este nuevo modelo es incapaz de describir el incremento significativo en la pérdida de potencia en bobinas de fibra óptica de radios de curvatura pequeños como se muestra en la Figura 10.

El modelo de Dietrich Marcuse [15], se modificó con el fin de hacerlo predecir con precisión la alta atenuación en curvaturas pequeñas y la pérdida de energía regular ya predicha por los modelos.

Cuando se obtuvieron los datos experimentales de pérdida de potencia se observó que esta no tiene un comportamiento lineal con respecto al radio de curvatura. Debido a esta razón, se modificó el modelo de Marcuse para que este pueda predecir el comportamiento pérdida de potencia en una función del radio de curvatura y del número de bucles que esta enrollada la fibra óptica.

Con las técnicas de regresión no lineal, el término β ha sido modificado con el fin de que se convierta en una función del radio de curvatura y del número de bucles. Se presenta una nueva fórmula para evaluar el parámetro β .

$$\beta = n_{cl}k + \exp\left[\frac{\theta_1}{R} + \frac{\theta_2}{2m\pi R} + \theta_3\right]$$

Donde R es el radio, m es el número de bucles y, en el caso particular de nuestra experimentación, los términos de ajuste tienen los siguientes valores:

$$\theta_1 = 9472.400 \quad \theta_2 = 73010.000 \quad \text{y} \quad \theta_3 = -34.765$$

Es muy importante mencionar que esta nueva fórmula es más que una primera aproximación al comportamiento real de la atenuación en la fibra óptica en espiral, tanto en los radios grandes y pequeños de curvatura. La ecuación del factor (β) tiene términos de la forma a / b , porque esta forma tiene un comportamiento exponencial negativo, la cual tienen los modos LP.

Los resultados obtenidos con este modelo se muestran en las Figuras 17-22:

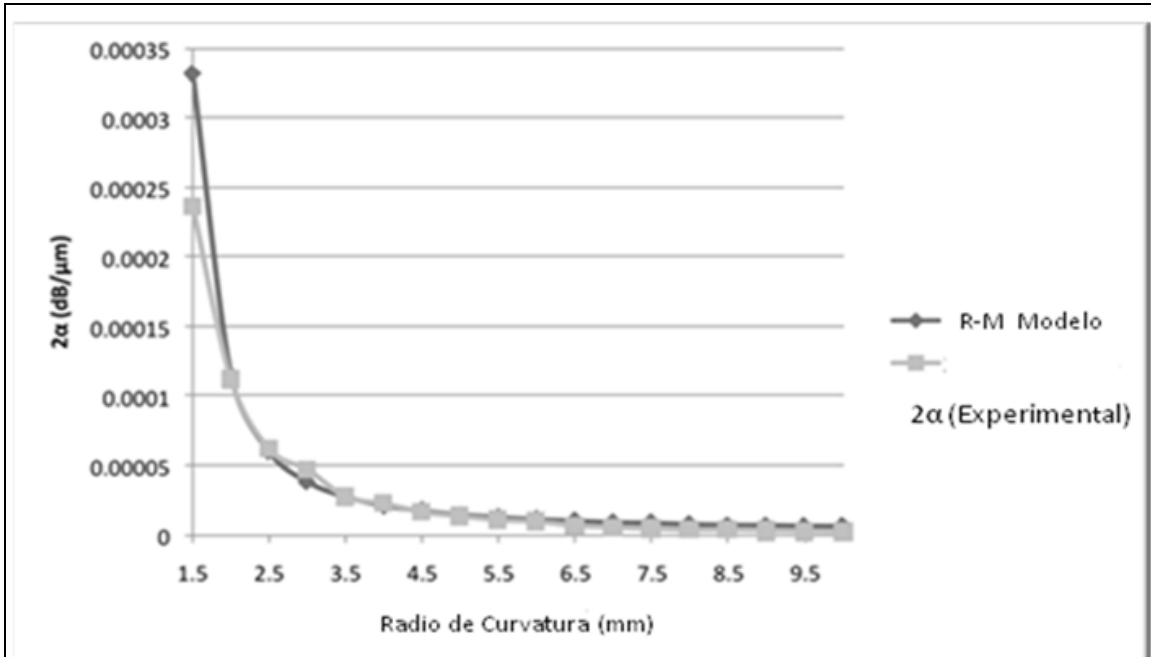


Figura 17. Comparación entre las predicciones del modelo RM de pérdida de potencia y los datos experimentales en una fibra óptica enrollada con un bucle.

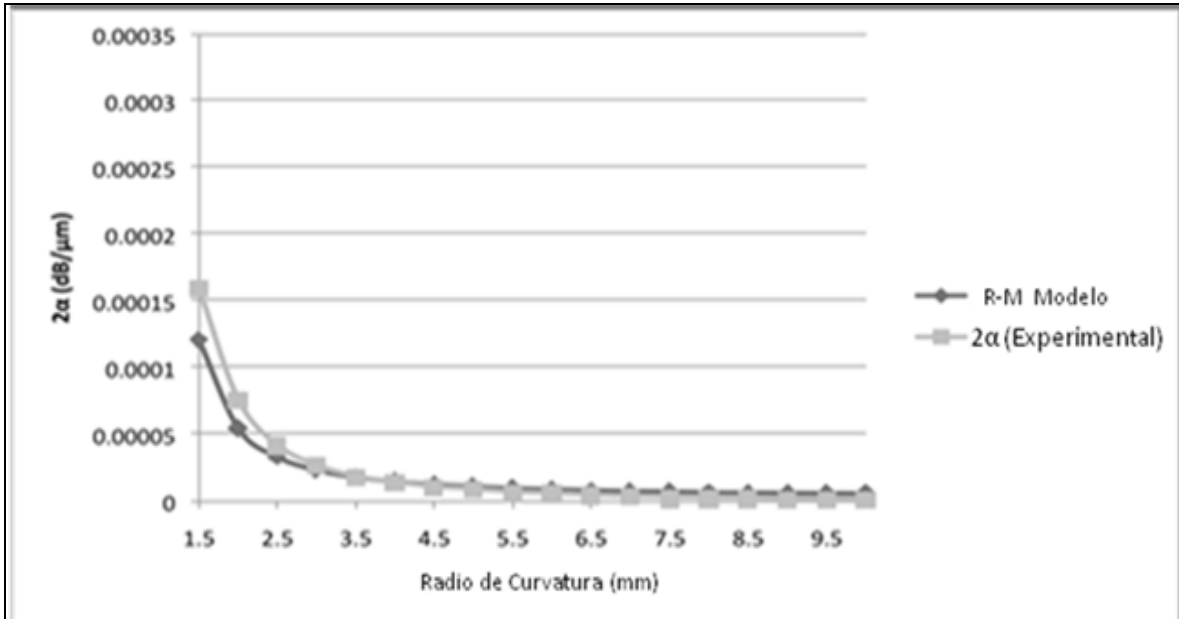


Figura 18. Comparación entre las predicciones del modelo RM de pérdida de potencia y los datos experimentales en una fibra óptica enrollada con dos bucles.

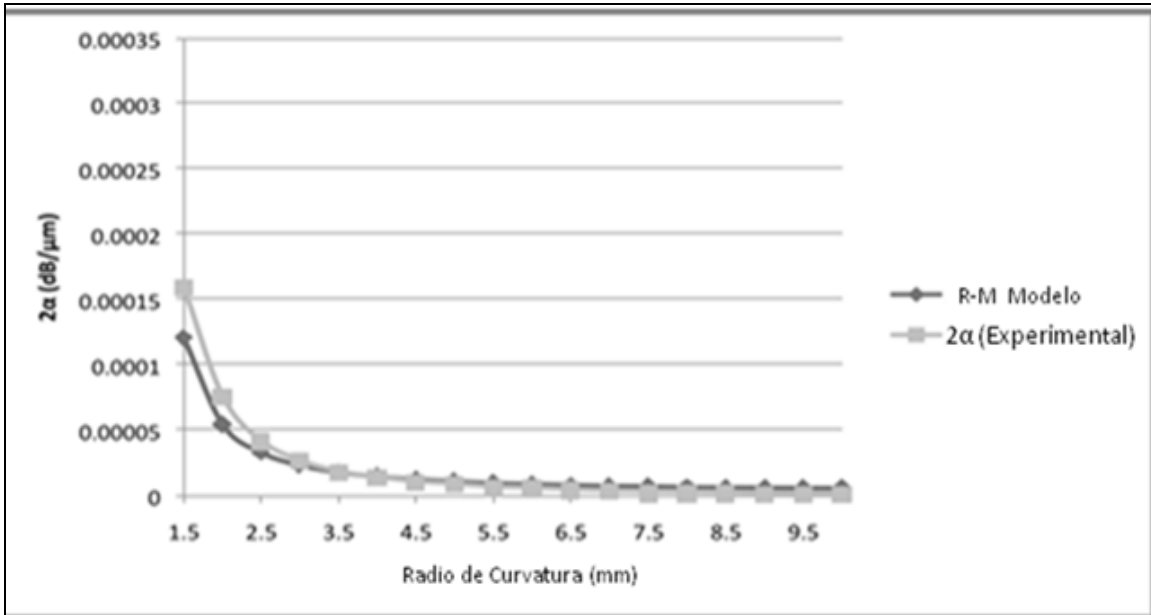


Figura 19. Comparación entre las predicciones del modelo RM de pérdida de potencia y los datos experimentales en una fibra óptica enrollada con tres bucles.

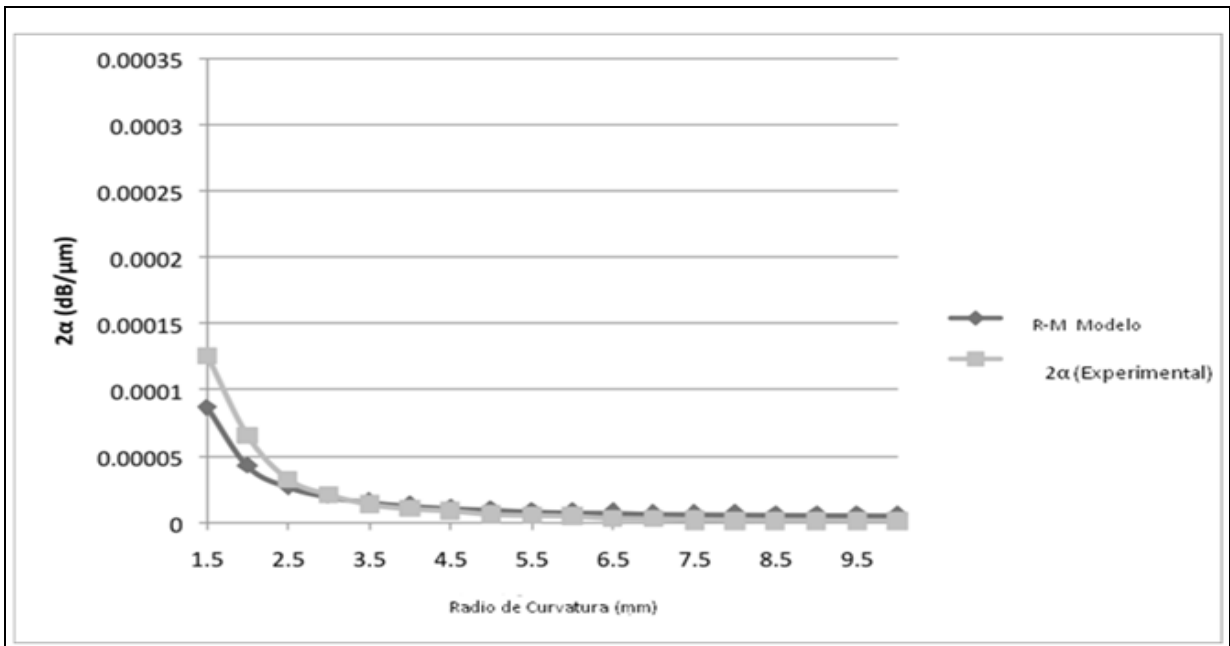


Figura 20. Comparación entre las predicciones del modelo RM de pérdida de potencia y los datos experimentales en una fibra óptica enrollada con cuatro bucles.

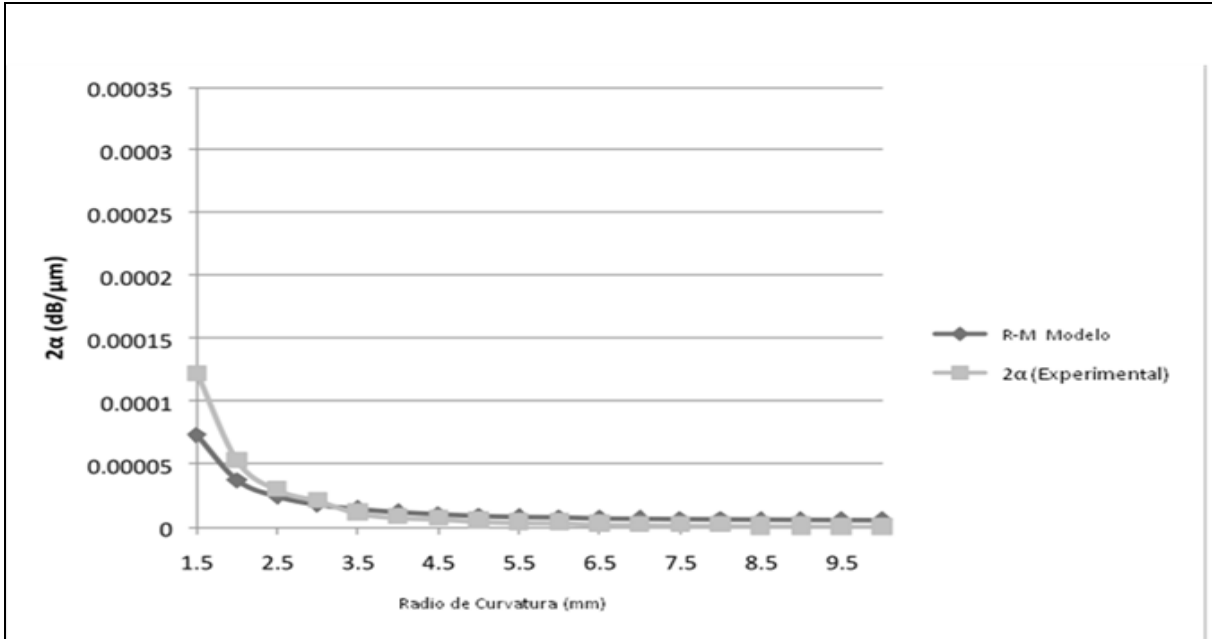


Figura 21. Comparación entre las predicciones del modelo RM de pérdida de potencia y los datos experimentales en una fibra óptica enrollada con seis bucles.

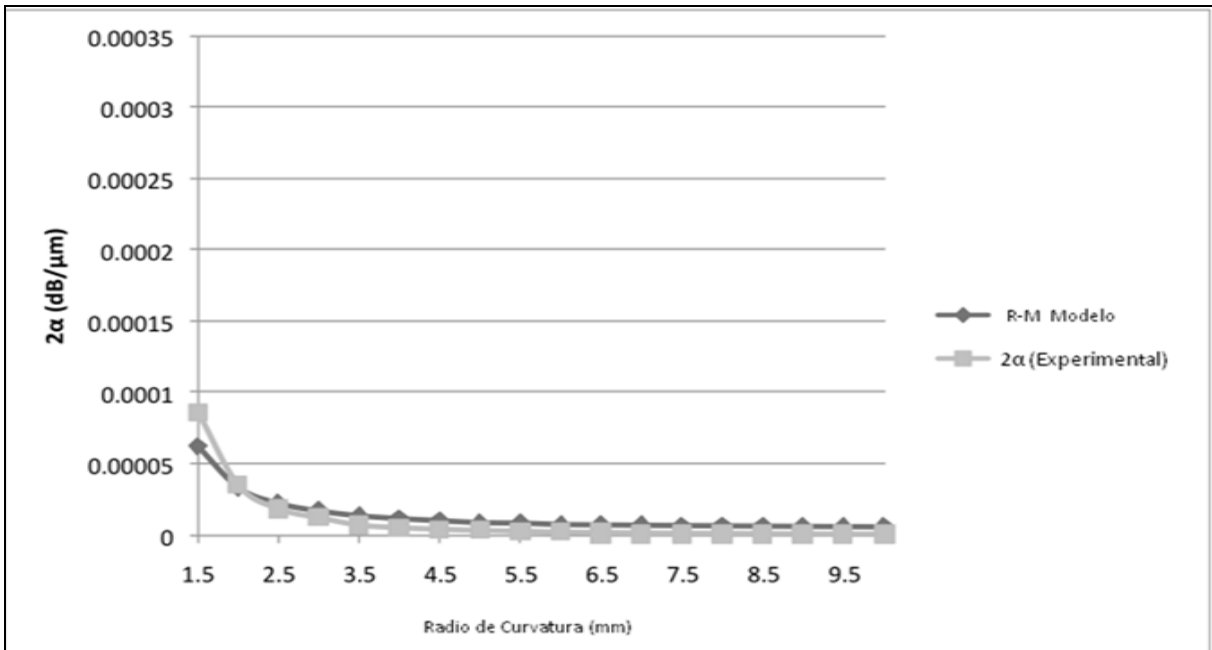


Figura 22. Comparación entre las predicciones del modelo RM de pérdida de potencia y los datos experimentales en una fibra óptica enrollada con diez bucles.

Se puede observar que el nuevo modelo predice con precisión la pérdida de potencia en una fibra óptica enrollada con un número diferente de bucles y radios de curvatura. Se reconoce que todavía hay espacio para la mejora en el modelo con un radio de curvatura de 1.5 mm.

CAPITULO IV. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Análisis y discusión de los resultados flexionando la fibra varias vueltas con diferentes radios de curvatura.

La pérdida de potencia se incrementa significativamente cuando el radio de curvatura es menor de 6 mm. De hecho, la pérdida de potencia no se duplica con dos lazos, ni se triplica con tres lazos. Las pérdidas aumentan sólo un aproximado del 33% con cada bucle, y se vuelve casi constante después de 6 ciclos. Estos resultados experimentales se compararon con los datos teóricos de cada uno de los modelos evaluados.

4.2 Análisis y discusión de los resultados de la evaluación de los modelos.

Al comparar los resultados obtenidos de la evaluación de los modelos de Dietrich Marcuse [15] y R. Schermer and J. Cole [53] con datos experimentales, se presentan nuevos mecanismos que afectan a las fugas de luz en una fibra en espiral con una serie de bucles que no habían sido publicados anteriormente. Estos mecanismos son interacciones de modos que producen en el primer bucle una pérdida de potencia (un valor de 2α) y en los subsecuentes bucles los valores de 2α van disminuyendo. Cuando los radios de curvatura son pequeños el valor de 2α es más fuerte. Estos mecanismos de las interacciones de los modos a la vez producen que después de que se haya producido un valor de 2α inicial la luz continúe confinada conforme la fibra se valla flexionando con más bucles, pareciera que la luz se pierde más lentamente en los bucles subsiguientes, produciendo la disminución del parámetro 2α .

Es importante mencionar que los valores del parámetro 2α no son linealmente acumulativos. Se ha demostrado que el comportamiento de la pérdida de potencia en una guía de ondas óptica curvada se pierde debido a la forma del acoplamiento de los modos.

Se encontró que el comportamiento teórico obtenido de evaluar el modelo de Mercatili [8], no tiene una buena correlación con los datos experimentales, el comportamiento del modelo sobrestima los valores de los datos experimentales.

El modelo de Sami Musa predice correctamente los valores de los datos experimentales, pero es importante mencionar que el modelo de Sami Musa se basa en una función polinomial y este pronostica el comportamiento de la pérdida

de potencia de una fibra curvada, pero no considera flexiones de varios bucles. Los modelos de Mercatili y Sami Musa no están fundamentados en teorías electromagnéticas como lo están los modelos de Marcuse [15] y R. Schermer and J. Cole [53].

4.3 Análisis y discusión de los resultados de la evaluación del nuevo modelo propuesto.

Debido a que los modelos anteriormente mencionados no predicen correctamente el comportamiento de la pérdida luminosa cuando las fibras ópticas están flexionadas en forma de bobina con distintos radios de curvatura, se propone un nuevo modelo nombrado R-M. Este modelo va estar basado en el modelo de Marcuse [15].

Este modelo consiste en cambiar el parámetro β , para que en vez de que este sea constante, este depende la distancia (número de bucles que esta flexionada la fibra) y del radio de curvatura.

Se encontró que este modelo predice con precisión el comportamiento de la pérdida de potencia en una fibra óptica enrollada con un número diferente de bucles y radios de curvatura. La originalidad de este modelo es que los valores de 2α no son acumulativos. Es modelo en comparación con los modelos de Dietrich Marcuse [15] y R. Schermer and J. Cole [53], predice de manera correcta el comportamiento de la pérdida de potencia en radios grandes y pequeños de

curvatura (1.5 mm a 9.5 mm). Cuando el radio es de 1.5mm, el modelo se puede ser mejorado.

4.4 Conclusiones fundamentales.

Los modelos de Mercatili [8], Sami Musa [55], Dietrich Marcuse [15] y R. Schermer and J. Cole [53], se pusieron a prueba como una herramienta para predecir el comportamiento de atenuación de la fibra óptica flexionada en forma de bobina con diferentes radios de curvatura. Se encontró que el modelo de Mercatili subestima el comportamiento de los datos experimentales y el modelo Musa estima correctamente el comportamiento de los datos experimentales, pero este modelo es un modelo fenomenológico, no está fundamentado en teorías electromagnéticas como lo están los modelos de Mercatili [8] y R. Schermer and J. Cole [53].

En cuanto a los modelos de Dietrich Marcuse [15] y R. Schermer and J. Cole [53], se encontró que esos modelos sólo predicen con precisión la pérdida de potencia cuando la fibra está flexionada con radios de curvatura mayores a 6000 mm. Para los valores de pérdida de potencia de radios menores a 6000 mm el comportamiento teórico del modelo subestima los valores experimentales.

El modelo R-M, predice en forma correcta el comportamiento de atenuación de las fibras ópticas flexionadas en forma de bobina con radios de curvatura desde 1.5 mm hasta 10 mm. Este modelo predice el comportamiento de la atenuación en una forma no acumulativa, es decir este modelo no duplica la pérdida de potencia inicial que se da en una primera vuelta, cuando la fibra esta flexionada dos vueltas, ni la triplica la cantidad de potencia cuando la fibra esta flexionada 3 vueltas. Se reconoce que hay oportunidad de mejorar el modelo cuando se predice el comportamiento de atenuación cuando la fibra esta flexionada con radios de curvatura de 1.5mm.

4.4 Bibliografía.

1. Alessandra F. Picanco, Manuel L.B. Martinez, Paulo C. Rosa, Bragg system for temperature monitoring in distribution transformers, Electric Power Systems Research., Brazil, (2010), pp.77- 83.
2. Alexander Kalamkarov, GobindaSaha, SrujanRokkam, John Newhook and AnastasisGeorgiades. Strain and deformation monitoring in infrastructure using embedded smart FRP reinforcements. December 2004.
3. Andre Sharon, Stephen Lin, Development of an automated fiber optic winding machine for gyroscope production, Robotics and Computer Integrated Manufacturing., Boston, (2001), pp.223-231.
4. A novel distributed optical crack sensor for concrete structures, Engineering Fracture Mechanics., Hong Kong, (2000), pp.133-148.
5. Antonio Carrillo, Enrique Gonzalez, Armando Rosas, Alfredo Marquez, New distributed optical sensor for detection and localization of liquid leaks part 1. Experimental studies, Sensors and Actuators., Chihuahua, (2002), pp. 229-235.
6. A.T.Augousti, F.-X Malettras, J. Mason, The use of a figure –of-eight coil fibre optic respiratory plethysmography: Geometrical analysis and experimental Characterization, Optical Fiber Technology., Kingston, (2005), pp.346-360.
7. ByoungHo Lee, Review of the present status of optical fiber sensors, Optical Fiber Technology., Seoul, (2003), pp. 57-79
8. Christopher K.Y.Leung, Niell Elvin, Noah Olson, Theodore F. Morse Yi-Fei. A novel distributed optical crack sensor for concrete structures. January 2000.
9. Chunxi Zhang, Shisen Du, Jing Jin, Zhonggang Zhang, Thermal analysis of thermally induced nonreciprocity in fiber optic gyroscope sensing coils, Optik., Beijing, 2010.
10. C. Lekakou, S.Cook, Y. Deng, T.w.Ang. and G.T.Reed. Optical fibre sensor for monitoring flow and resin curing in composites manufacturing. June 2006.

- 11.C.K.Y. Leung, Fiber optic sensors in concrete: the future?, NTD&E international., Hong Kong, (2001), pp. 85-94.
- 12.C.Winkler, J.D. Love, A. K. Ghatak, Loss calculations in bent multimode optical waveguides, Optical and Quantum Electronics., Australia, 1978, pp. 173-183.
- 13.D. Gloge, Bending Loss in Multimode Fibers with Graded and Ungraded Core Index, Applied Optics., New Jersey, 1972, pp. 2506-2513.
- 14.D. Gloge, Weakly Guiding Fibers, Applied Optics., New Jersey, 1971, pp. 2252-2258.
- 15.Dietrich Marcuse, Curvature loss formula for optical fibers, Optical Society of America., New Jersey, 1976, pp. 216-220.
- 16.Fabiano Colpo, Laurent Humbert, John Botsis. Characterisation of residual stresses in a single fibre composite with FBG sensor. July 2007.
- 17.F. Baldini, A Falai A.R. De Gaudio, D. Landi, A. Lueger, A. Mancaglia, D. Scherr and W. Trettnak. Continuous monitoring of gastric carbon dioxide with optical fibres. July 2003.
- 18.F. Colpo, L. Humbert, P. Giaccari, J. Botsis. Characterization of residual strains in an epoxy block using an embedded FBG sensor and the OLCR technique. April 2006.
- 19.Fundamentals of Optical Fibers. John A. Buck. Wiley Series in Pure and Applied Optics. Joseph W. Goodman, Series editor. 1995.
- 20.Beltran-Perez, E.A. Kuzin, J. Camas-Anzueto, R. Lopez, V.V. Spirin, A. Marquez-Lucero, Fiber bend losses produced by soft and swellable materials for hydrocarbon detection, Optics Communications., Puebla, (2002), pp. 145-150.
- 21.G. Kister, D.Wintera, R.A. Badcocka, Y.M. Gebremichaelb, W.J.O. Boyleb, B.T. Meggittc, .T.V.Grattanb, G.F. Fernandod. Structural health monitoring of a composite bridge using bragg grating sensors. Part 1: Evaluation of adhesives and protection systems for the optical sensors. July 2007.
22. G. Kister, R.A. Badcock, Y.M, Gebremichael, W.J.O. Boyle, K.T.V. Grattan, G.F. Fernnado, L. Canning. Monitoring of an all-composite bridge using bragg grating sensors. July 2007.
- 23.H. Golnabia, P.Azimib. Design and performance of a plastic optical fiber leakage sensor. August 2006.
- 24.H. Hernandez Moreno, B. Douchin, F. Collombet, D.Choqueuse. Monitoring of filament wound composite cylinders using bragg grating sensors. 2006.
- 25.H.L.Ho, W.Jin, C.C.Chan, Y.Zhou, X.W.Wang. A fiber Bragg grating sensor for static and dynamic measurands. October 2001.
- 26.Hong-Nan Li, Dong-Sheng Li and Gang-Bing Song. Recent applications of fiber sensors to health monitoring in civil engineering. May 2004.
- 27.Huimin Cao, Youping Chen, Zude Zhou, Gang Zhang. Theoretical and experimental study on the optical fiber bundle displacement sensors. May 2007.

28. Igor A, Goncharenko, Stefan F. Helfert and Reinhold Pregla. Radiation loss and mode field distribution in curved holey fibers. June 2005.
29. J.Tapia-Mercado,A.Garcia-Weidner,M.L.Galindo-Cavazos,A.V.Kahomenko.M.A. Garcia-Zarate. Sensor diferencial de fibra óptica. August 2003.
30. Kai Tai Wan and Christopher K.Y. Leung. Applications of a distributed fiber optic crack sensor for concrete structures. April 2007.
31. Kai Tai Wan, Christopher K.Y. Leung, Fiber optic sensor for the monitoring of mixed mode cracks in structures, *Sensors and Actuators*. Hong Kong, 2006, pp. 370-380.
32. Kazuo Hotate, Invited paper fiber sensor technology today, *Optical Fiber Technology*., Tokyo, (1997), pp. 356-402.
33. Kin-Tak Lau, Chi-chiu Chan, Li-min Zhou, Wei Jin. Strain monitoring in composite-strengthened concrete structures using optical fibre sensors. March 2002.
34. Kin-Tak Lau, Libo Yuan, Li-min Zhou, Jingshen Wu, Chung-ho Woo. Strain monitoring in FRP laminates and concrete beams using FBG sensors. December 2002.
35. Libo Yuan, Li-min Zhou, Wei Jin, Detection of acoustic emission in structure using Sagnac-like fiber-loop interferometer, *Sensors and actuators*., China, (2005), pp.6-13.
36. Li-bo Yuan, Li-min Zhou, Wei Jin, K.T. Lau, and Chi-Kin Poon. Effect of thermally induced strain on optical fiber sensors embedded in cement-based composites. January 2001.
37. Li-bo Yuan, Li-min Zhou, Jing-Sheng Wu, Fiber optic temperature sensor with Michleson interferometric technique, *Sensors and actuators*., Republic of china, (2000), pp. 2-7.
38. Libo Yuan, Optical path automatic compensation low-coherence interferometric fibre-optic temperature sensor, *Optics & Laser Technology*., Republic of china, (1998), pp. 33-38.
39. L.G. Melin, K. Levin, S. Nilson, S.J.P. Palmer, P. Rae. A Study of the displacement field around embedded fibre optic sensors. January 2007.
40. Monica Mendoza, Antonio Carillo, Alfredo Marquez, New distributed optical sensor for detection and localization of liquid hydrocarbons part II: Optimization of the elastomer performance, *Sensors and actuators*., Chihuahua, (2004), pp.154-165.
41. M. Sumetsky, Y. Dulashko, S. Ghalmi, Fabrication of miniature optical fiber and microfiber coils, *Optics and Lasers in Engineering*., USA, (2010), pp. 272-275.
42. Mustafa Demirel, Laurent Robert, Jerome Molimard, Jean-José Orteu, Alain Vautrin. Strain gradient measurement using fiber bragg grating sensor in composite material. June 2007.
43. Noah Olson, Christopher K.Y. Leung, Aidong Meng, Crack sensing with a multimode fiber: experimental and theoretical studies, *Sensors and Actuators*., Hong Kong, 2004, pp. 268-277.
44. Nobuo Takeda. Characterization of microscopic damage in composite laminates and real-time monitoring by embedded optical fiber sensors. June 2002.

45. Optical Fiber Sensor Technology. Volumen 3, applications and systems. Edited by K.T.V. Grattan and B.T. Meggitt, 1999.
46. Qingbin Li, Guang Li and Guanglun Wang. Effect of the plastic coating on strain measurement of concrete by fiber optic sensor. May 2003.
47. Qingbin Li, Guang Li, Guanglun Wang and Libo Yuan. CTOD measurement for cracks in concrete by fiber optic sensors. May 2004.
48. Qingbin Li, Guang Li and Libo Yuan. Calibration of embedded fiber optic sensor in concrete under biaxial compression. December 2003.
49. Qingbin Li, Libo Yuan, Farhad Ansari. Model for measurement of thermal expansion coefficient of concrete by fiber optic sensor. June 2002.
50. Réseau de recherche 3is Canada. Innovations en structures avec systèmes de détection intelligents. La poursuite de l'excellence en génie civil. August 2002.
51. R. Falciai, C. Trono, G. Lanterna and C. Castelli. Continuous monitoring of wooden works of art using fiber Bragg grating sensors. May 2005.
52. R. Maaskant, T. Alavie, R.M. Measures, G. Tadros, S.H. Rizkalla, A. Guha-Thakurta. Fiber-optic Bragg Grating sensors for bridge monitoring. 1997.
53. Ross, T., Schermer, C. (2007). Improved Bend Loss Formula Verified for Optical Fiber by Simulation and Experiment. IEEE Journal of Quantum Electronics, 43, 187-196.
54. Ruggero Micheletto, Katsumi Hamamoto, Shoji Kawai, Yoichi Kawakami. Modeling and test of fiber-optics fast sensor for biological investigation. April 2005.
55. Sami Musa, Albert Borreman, Abigail A. M. Kok, Mart B. J. Diemeer, Alfred Driessen, Experimental study of bent multimode optical waveguides, Optical Society of America., Netherlands, 2004, pp. 5705-5707.
56. Understanding Fiber Optics. Third Edition. Jeff Hecht. Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey. Columbus, Ohio. 1999.
57. W.B. Lyons, H. Ewald and E. Lewis. An optical fibre distributed sensor based on pattern recognition. September 2002.
58. Wonseok Chung, Sungil Kim, Nam-Sik Kim and Hee-up Lee. Deflection estimation of a full scale prestressed concrete girder using long-gauge fiber optic sensors. October 2006.
59. W. R. Habel, D. Hofman, B. Hillemeier. Deformation measurements of mortars at early ages and of large concrete components on site by means of embedded fiber-optic microstrain sensors. May 2004.
60. Xiaobin Xu, Chunxi Zhang, Xiong Pan, Study of reflection error in closed-loop polarization-maintained interferometric fiber optic gyroscope., Beihang, 2008, pp. pendiente.
61. Yoji Okabe, Ryohei Tsuji, Nobuo Takeda. Application of chirped fiber Bragg grating sensors for identification of crack locations in composites. January 2004.
62. Yu-Lung Lo, Hsin-Yi Lai, Ming-Hong Tsai. Mathematical modeling of the wall effect on drag forces in molding flow using optical fiber sensing data. January 2000.
63. Zhijun Zhang and Farhad Ansari. Crack tip opening displacement in micro-cracked Concrete by embedded optical fiber sensor. June 2001.