

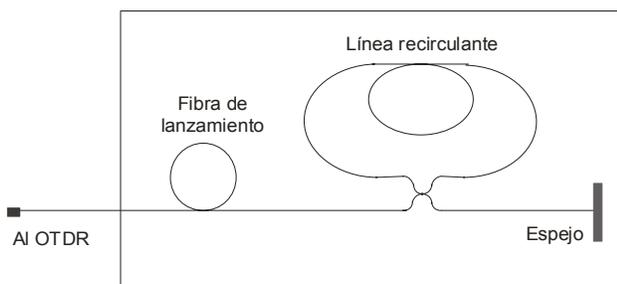
# CARACTERIZACIÓN DE UNA BOBINA DE FIBRA ÓPTICA PARA SER UTILIZADA COMO PATRÓN DE REFERENCIA EN LA CALIBRACIÓN DE OTDRs EN LA ESCALA DE LONGITUD A 1550 nm

J. C. Bermúdez, M. A. López<sup>1</sup>, W. Schmid  
 Centro Nacional de Metrología, km 4,5 carretera a los Cués, El Marqués, Qro.  
 Tel (442) 2110500 ext. 3338, Fax (442) 2110553,  
[jbermude@cenam.mx](mailto:jbermude@cenam.mx) , [marco.lopez@ptb.de](mailto:marco.lopez@ptb.de) , [wschmid@cenam.mx](mailto:wschmid@cenam.mx)

**Resumen:** Se presenta la caracterización de una bobina de fibra óptica para ser utilizada como patrón de referencia en la calibración de Reflectómetros Ópticos en el Dominio del Tiempo (OTDR) en la escala de distancia. El método empleado fue la medición del corrimiento de fase de una señal óptica modulada que viaja a través de la fibra. Las mediciones se realizaron con un analizador de redes y una fuente láser sintonizable en la ventana de 1550 nm alcanzándose una incertidumbre de medición de 0,034 m con un nivel de confianza del 95% .

## 1. INTRODUCCIÓN

En los sistemas de comunicación por fibra óptica, la longitud de la fibra es un parámetro fundamental en la evaluación de las características de transmisión de este medio, tales como el coeficiente de atenuación y el ancho de banda. El Reflectómetro Óptico en el Dominio del Tiempo (OTDR) es uno de los instrumentos más versátiles y más ampliamente usados en la evaluación de redes de fibra óptica. La confiabilidad de un OTDR depende en gran medida de su exactitud en las escalas de atenuación y distancia, [1]. Un método común empleado en la calibración de los OTDRs en la escala de distancia es la medición de una fibra óptica patrón de línea recirculante, el sistema consta de una bobina de fibra óptica (calibrada en distancia) conectada en forma de lazo que genera una serie de reflejos del pulso enviado por el OTDR [2] (Figura 1). Mediante la medición del tiempo de vuelo de los pulsos, el OTDR determina la longitud óptica recorrida por estos a través de la línea recirculante. El resultado reportado por el OTDR se compara con la longitud de la línea calibrada a la misma longitud de onda.



**Fig 1.** Sistema de línea recirculante empleado en la calibración de OTDRs en la escala de longitud.

El objetivo del presente trabajo es determinar la longitud óptica de una bobina de fibra óptica monomodo a 23 °C y 1550 nm. Así como los coeficientes de sensibilidad de los parámetros de mayor influencia, temperatura  $C_T$  y longitud de onda  $C_\lambda$ , en los intervalos de 21 °C a 25 °C y 1530 nm a 1550 nm. La longitud de la bobina puede ser expresada de la forma

$$L(T, \lambda) = L_{ref} + C_T(T - 23^\circ\text{C}) + C_\lambda(\lambda - 1550\text{nm}), \quad (1)$$

donde  $L_{ref} = L(23^\circ\text{C}, 1550\text{nm})$ .

La variación de la temperatura tiene dos efectos principales, la elongación física de la fibra y el cambio del índice de refracción. Aunque estas dos componentes son difíciles de separar, lo que interesa es el efecto combinado de ambas el cual queda incluido en  $C_T$ .

Por otro lado, al ser el índice de refracción una función de la longitud de onda  $n(\lambda)$ , un cambio en  $\lambda$  produce un cambio en la longitud óptica, este cambio se cuantifica mediante  $C_\lambda$ .

## 2. METODO DE MEDICION

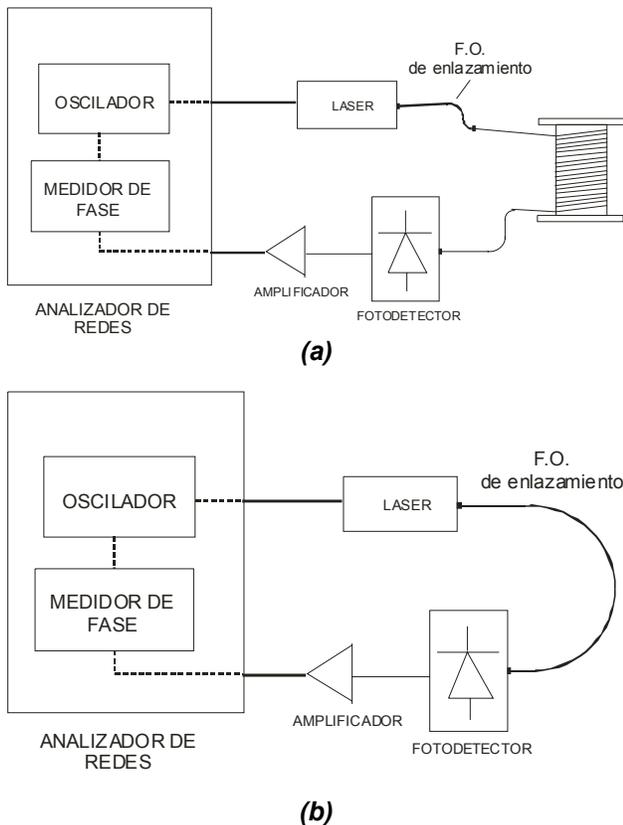
La caracterización de la bobina de fibra óptica se basó en el método de corrimiento de fase (Phase shift) descrito en el anexo E de la norma IEC 60793-1-22 [3] la cual establece los requerimientos para la medición de la longitud y elongación de fibras ópticas. Este método se basa en la medición del cambio de fase en una señal óptica modulada que

<sup>1</sup> actualmente en Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB), Alemania

viaja a través de la fibra al incrementar la frecuencia de modulación. Típicamente este método puede ser aplicado para medir fibras en un alcance de 1m hasta varios cientos de kilómetros [3].

**2.1. Descripción**

La Figura 2 muestra el arreglo esquemático empleado para la medición del cambio de fase. Mediante un analizador de redes, se genera una señal de modulación que es aplicada a la fuente láser. La señal óptica modulada, generada por el láser, viaja a través de la bobina de fibra óptica y es detectada por un fotodiodo. El medidor de fase del analizador de redes compara la fase de la señal del fotodiodo  $\Phi_{sig}$  (Figura 2a) con una fase de referencia  $\Phi_{ref}$  introducida por el sistema de medición. Esta  $\phi_{ref}$  se mide conectando directamente la fibra óptica corta de enlazamiento entre la fuente láser y el fotodiodo, sin pasar por la bobina (ver Figura 2b).



**Fig. 2.** Sistema para la medición de la longitud de una bobina de fibra óptica basado en el método de cambio de fase.

- a) Medición del cambio de fase,  $\phi_{sig}$ .
- b) Determinación de la fase de referencia,  $\phi_{ref}$ .

Para garantizar una correcta medición, es muy importante que la señal de modulación permanezca estable y que contenga una sola componente de Fourier dominante y que, a su vez, el medidor de fase responda únicamente a esta componente. Con el mismo fin la longitud de onda central del láser debe permanecer estable durante todo el proceso de medición.

El analizador de redes es marca Agilent modelo 8714ES. La fuente láser es de la marca Hewlett Packard modelo 8168C y el detector es un fotodiodo PIN marca New Focus modelo 1611 con una frecuencia de corte de 1 GHz. La bobina caracterizada es de fibra óptica monomodo de la marca Corning modelo SMF-28, de aproximadamente 11 km de longitud, con un índice de refracción de 1,4682 a 1550 nm [4].

**2.2. Procedimiento**

El procedimiento de medición empleado es una variante del método establecido por la norma anteriormente mencionada. Consiste básicamente en determinar la longitud óptica de la bobina en base a 3 parámetros, la frecuencia de modulación, la longitud de onda de la señal óptica y la temperatura de la fibra ( $f_i, \lambda_j, T_k$ ). En la tabla 1 se muestran los valores empleados de estos parámetros en el proceso de medición.

$i,j,k$	1	2	3	4	5	6	7	8
$f_i$ [MHz]	0,5	1	5	10	20	30	40	50
$\lambda_j$ [nm]	1530	1533	1536	1540	1550			
$T_k$ [°C]	21,6	23,4	25,1					

**Tabla 1.** Valores de los parámetros empleados en el proceso de medición de la bobina.

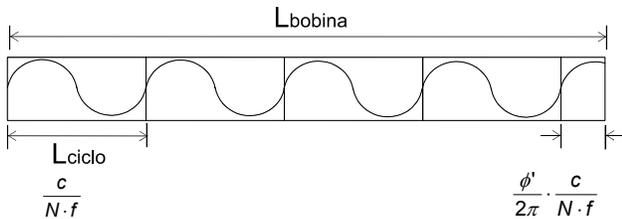
Comenzando a la temperatura  $T_1$  y a la longitud de onda  $\lambda_1$  se va incrementando la frecuencia  $f_i$  hasta 50 MHz, midiéndose en cada caso la fase de la señal  $\Phi_{sig(i)}$  y la fase de referencia  $\Phi_{ref(i)}$ . Posteriormente se incrementa la longitud de onda  $\lambda_j$  y se repite el proceso. Esto se realiza para cada una de las temperaturas  $T_k$ .

El cambio de fase total introducido por la bobina a la frecuencia  $f_i$  es:

$$\phi_{tot(i)} = \phi_i' + m_i \cdot 2\pi, \tag{2}$$

donde:  $\phi_i' = \Phi_{sig(i)} - \Phi_{ref(i)}$ .

$m_i$  es el número de ciclos o periodos completos (cambios de fase igual a  $2\pi$ ) que hay en la longitud total de la bobina a la frecuencia  $f_i$ , (ver Figura 3).



**Fig. 3.** La longitud total de la bobina está dada por el número de ciclos completos y el cambio de fase  $\phi'$

De esta forma la longitud de la bobina está dada por

$$L = \left( m + \frac{\phi'}{2\pi} \right) \cdot L_{ciclo} = \left( m + \frac{\phi'}{2\pi} \right) \cdot \frac{c}{N \cdot f} \quad (3)$$

donde  $L$  longitud óptica de la bobina,  
 $L_{ciclo}$  longitud de un ciclo,  
 $N$  índice de grupo de la fibra,  
 $c$  velocidad de la luz en el vacío.

El número de ciclos  $m_i$  debe ser calculado sin ambigüedad ya que, un error de un solo ciclo produce un error en la medición igual a la longitud de ese ciclo. A las frecuencias aquí empleadas, este error puede ser desde 4 m hasta 40 m dependiendo de  $f_i$ .

### 2.3. Método iterativo para determinar m

La estimación de  $m$  requiere un conocimiento previo aproximado de  $L$ . El riesgo de un error en  $m$ , por la estimación previa de  $L$  incrementa con la frecuencia debido a que  $L_{ciclo}$  disminuye. Para lograr una exactitud suficiente en la estimación previa de  $L$  se empleó un método iterativo en el cuál, el cálculo de  $m_i$  a la frecuencia  $f_i$  emplea la longitud  $L_{i-1}$  calculada en el paso anterior, incrementando de esta forma la exactitud en la estimación de  $L$  en cada paso hacia frecuencias más altas:

$$m_i = \text{Entero} \left[ \frac{(L_{i-1} \cdot N \cdot f_i)}{c} \right] \quad (4)$$

$$L_i = \frac{(\phi'_i + m_i \cdot 2\pi) \cdot c}{N \cdot f_i \cdot 2\pi} \quad (5)$$

donde  $L_0$  fue medida con un OTDR.

## 3. PARAMETROS DE INFLUENCIA

### 3.1. Primera aproximación

En una primera aproximación, sin tomar en cuenta las variaciones en la longitud de onda y la temperatura, se consideran 3 magnitudes de entrada con contribución a la incertidumbre de la medición de la longitud de la fibra, estas son; la fase de la señal  $\phi_{sig}$ , la fase de referencia  $\phi_{ref}$  y la frecuencia de modulación  $f$ , ver ecuación (6):

$$L = \frac{(2\pi \cdot m + \phi_{sig} - \phi_{ref}) \cdot c}{N \cdot 2\pi \cdot f} \quad (6)$$

Los parámetros  $m$  y  $N$  se consideran sin incertidumbre. Por un lado  $m$  debe ser determinado sin ambigüedad y por lo tanto no tiene incertidumbre. Por otro lado, como se mencionó al inicio, el OTDR mide en realidad el tiempo de vuelo de los pulsos que viajan por la fibra y solamente emplea el índice de refracción como un factor constante para calcular la longitud [1]. En consecuencia la fibra óptica patrón para la calibración del OTDR debe ser caracterizada en tiempo de vuelo, respectivamente longitud óptica, utilizando  $N$  de la misma manera solo como un valor nominal.

La tabla 2 muestra un ejemplo del balance de incertidumbre con los parámetros de influencia en la primera aproximación.

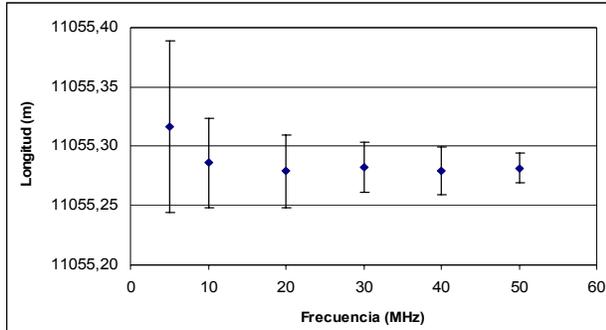
Fuente de Incertidumbre	Incertidumbre estándar	Coefficiente de sensibilidad	Contribución [m]
Repetibilidad fase referencia	0,00603 rad	0,65 m/rad	0,00392
Repetibilidad fase señal	0,00603 rad	0,65 m/rad	0,00392
Resolución fase	0,00005 rad	0,65 m/rad	0,00003
Calibración fase	0,00504 rad	0,65 m/rad	0,00327
Frecuencia de modulación	0,29 1/s	0,00022 m*s	0,00006
Incertidumbre combinada			0,00644
Incertidumbre expandida			<b>0,013</b>

**Tabla 2.** Contribuciones a la incertidumbre en la primera aproximación. Valores con  $f=50$  MHz.

La incertidumbre de la frecuencia de modulación incluye resolución, estabilidad y calibración del analizador de redes. Se puede observar que la repetibilidad de la fase tiene la mayor contribución.

El cambio de fase total introducido por la bobina  $\phi_{tot}$  tiene dos componentes, el cambio de fase respecto a la fase de referencia  $\phi'$  y el número de ciclos completos ( $m \cdot 2\pi$ ), ecuación (2). A frecuencias más altas, el peso del número de ciclos aumenta

sobre el cambio de fase total, y debido a que el número de ciclos no tiene incertidumbre, la incertidumbre final de la medición disminuye. Este comportamiento se observa en la Figura 4.



**Fig. 4.** Valor estimado de la longitud óptica de la bobina con su incertidumbre expandida en la primera aproximación ( $k=2$ ).

**3.2. Influencia de la temperatura y la longitud de onda**

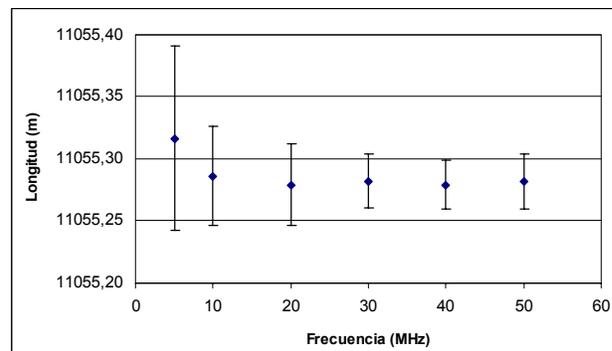
Para estimar la contribución de la incertidumbre de  $T$  y  $\lambda$  en la incertidumbre de  $L$  es suficiente contar con una primera estimación de los coeficientes de sensibilidad  $C_T$  y  $C_\lambda$ . Esta se realizó con los datos obtenidos a 50 MHz. En la sección 5 se presentará la estimación exacta de estos coeficientes.

Para el monitoreo y control de la temperatura de la fibra, esta fue colocada dentro de un estuche de plástico, que provee un cierto grado de aislamiento térmico, en el cual se introdujo un sensor. En 3 días distintos se estabilizó la temperatura del laboratorio a cada una de las temperaturas, respectivamente y se monitoreó la temperatura de la fibra durante el proceso de medición. La variación durante el ciclo de medición fue menor a  $\pm 0,2$  °C (en cada día).

La tabla 4 muestra el balance de incertidumbre completo incluyendo las contribuciones de  $T$  y  $\lambda$ . Se observa que la mayor contribución (a 50 MHz) es debida a la temperatura, sin embargo, a bajas frecuencias, la incertidumbre de la fase sigue siendo predominante. El resultado combinado de estas dos contribuciones es que a bajas frecuencias hay una incertidumbre grande, dominada por la fase, y disminuye al aumentar la frecuencia hasta cierto límite a partir del cual la incertidumbre de la temperatura comienza a dominar haciendo que la incertidumbre combinada sea aproximadamente constante. Este comportamiento se observa en la Figura 5.

Fuente de Incertidumbre	Incertidumbre estandar	Coefficiente de sensibilidad	Contribución [m]
Repetibilidad fase referencia	0,00603 rad	0,65 m/rad	0,00392
Repetibilidad fase señal	0,00603 rad	0,65 m/rad	0,00392
Resolución fase	0,00005 rad	0,65 m/rad	0,00003
Calibración fase	0,00504 rad	0,65 m/rad	0,00327
Frecuencia de modulación	0,29 1/s	0,00022 m*s	0,00006
Temperatura $T$	0,12 C	0,077 m/C	0,00894
Longitud de onda $\lambda$	0,029 nm	0,035 m/nm	0,00102
Incertidumbre combinada			0,01106
Incertidumbre expandida			<b>0,022</b>

**Tabla 4.** Balance de incertidumbre incluyendo las contribuciones debido a la temperatura y la longitud de onda (valores a  $f = 50$  MHz). Los coeficientes de sensibilidad de  $T$  y  $\lambda$  son absolutos para una fibra de una longitud de 11,056 km.



**Fig. 5.** Incertidumbre expandida ( $k=2$ ) incluyendo contribuciones de  $T$  y  $\lambda$ .

**4. LONGITUD PONDERADA**

Aunque la medición a la frecuencia más alta tiene la menor incertidumbre, existe información en las mediciones a frecuencias intermedias que debe ser tomada en cuenta. Por ejemplo la variación de la temperatura durante el proceso de medición se ve reflejada en las mediciones a frecuencias intermedias. Para incluir esta información se tomó el promedio ponderado  $L_{pond}$  de todas las mediciones a partir de 5 MHz como el mejor estimado:

$$L_{pond} = \frac{\sum_{i=3}^8 L_i / u_i^2}{\sum_{i=3}^8 1 / u_i^2}, \quad u_{pond} = \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=3}^8 1 / u_i^2}} \quad (9)$$

No se incluyeron las mediciones a 0,5 MHz y 1 MHz debido a que su incertidumbre es muy grande comparada con las mediciones a frecuencias superiores y por lo tanto su peso en el promedio ponderado no es significativo. La tabla 5 muestra los 15 valores obtenidos  $L_{pond}(\lambda_j; T_k)$ :

$\lambda_j$ [nm]	21,6	23,4	25,1	$T_{media}$ [°C]
	21,71	23,48	24,99	$T_k$ [°C]
1529,57	11054,942	11055,078	11055,203	$L_{pond}$ [m]
	21,67	23,46	25,21	$T_k$ [°C]
1532,57	11055,043	11055,177	11055,307	$L_{pond}$ [m]
	21,68	23,43	25,13	$T_k$ [°C]
1535,57	11055,155	11055,282	11055,426	$L_{pond}$ [m]
	21,56	23,40	25,13	$T_k$ [°C]
1539,57	11055,281	11055,424	11055,570	$L_{pond}$ [m]
	21,58	23,32	24,84	$T_k$ [°C]
1549,60	11055,653	11055,791	11055,918	$L_{pond}$ [m]

Tabla 5. Longitud ponderada  $L_{pond}(\lambda_j; T_k)$  de los 15 puntos medidos. Las incertidumbres expandidas ( $k=2$ ) están entre 0,012 m y 0,018 m.

### 5. EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS

La Figura 6 muestra los datos  $L_{pond}$  de la tabla 5 graficados en función de  $\lambda$  (6.a) y  $T$  (6.b) con los respectivos ajustes. A partir de las pendientes se obtienen los coeficientes de sensibilidad de longitud de onda  $C_\lambda$  y de temperatura  $C_T$ . En particular, los ajustes lineales proporcionan tres valores  $C_{\lambda,k} = C_\lambda(T_k)$  y cinco valores  $C_{T,j} = C_T(\lambda_j)$  con sus respectivas incertidumbres  $u(C_{\lambda,k})$  y  $u(C_{T,j})$ , determinadas de acuerdo a [5], Anexo H.3. Debido a que no se espera un cambio significativo de los coeficientes de sensibilidad en los pequeños intervalos de  $T$  y  $\lambda$  en los que fueron determinados, se toman los promedios respectivos como mejores estimados para  $C_T$  y  $C_\lambda$ :

$$C_T = \frac{1}{5} \cdot \sum_{j=1}^5 C_{T,j} \quad (10a)$$

$$C_\lambda = \frac{1}{3} \cdot \sum_{k=1}^3 C_{\lambda,k} \quad (10b)$$

Aplicando la ley de propagación de incertidumbre resulta para las incertidumbres:

$$u(C_T) = \frac{1}{5} \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^5 u^2(C_{T,j})} \quad (11a)$$

$$u(C_\lambda) = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{\sum_{k=1}^3 u^2(C_{\lambda,k})} \quad (11b)$$

Es preferible no usar las medias ponderadas en este caso, debido a que los  $C_{\lambda,k}$  y  $C_{T,j}$  fueron

obtenidos con pocos puntos (cinco y tres). En consecuencia, la dispersión de sus incertidumbres es grande y la media ponderada representaría un estimador inestable. Para la fibra analizada resulta:

$$C_\lambda = (0,0356 \pm 0,0011) m/nm \quad (12a)$$

$$C_T = (0,0790 \pm 0,0027) m/^\circ C \quad (12b)$$

Las incertidumbres tienen un nivel de confianza de 95% y fueron evaluados con los factores  $t_{95}(v)$  para  $v_{ef} = 2$  respectivamente  $v_{ef} = 4$  grados de libertad.

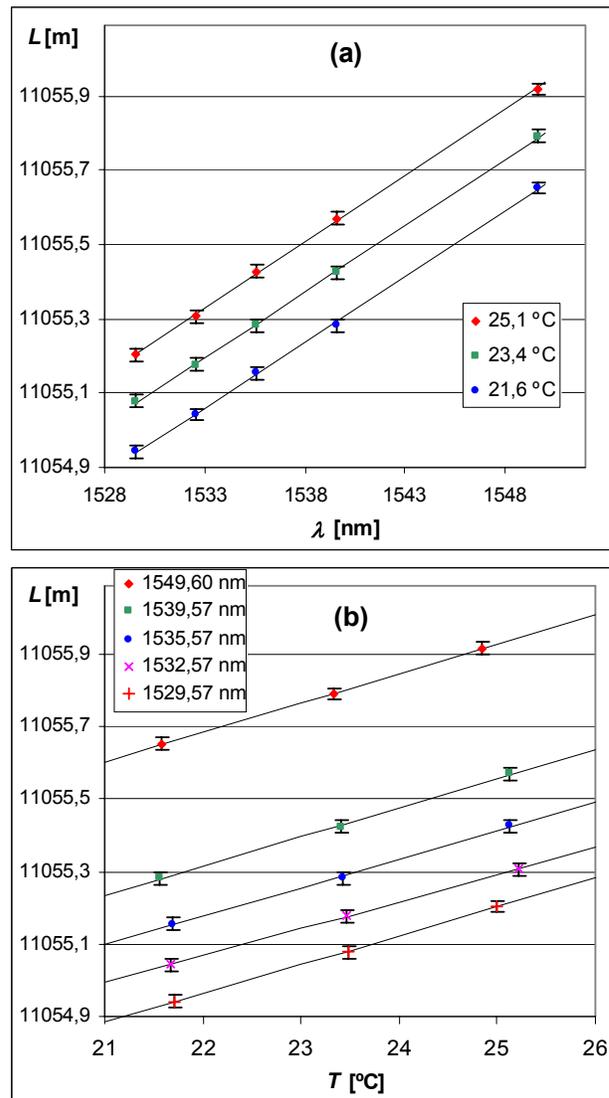


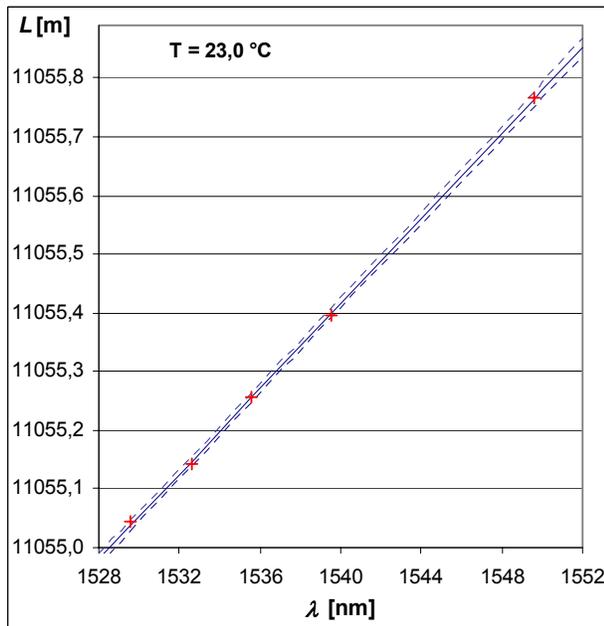
Fig. 6. Longitud óptica de la fibra a) en función de la longitud de onda y b) en función de la temperatura: Puntos medidos con su incertidumbre de acuerdo a la ec. (9); las líneas muestran los ajustes lineales.

Los coeficientes relativos de longitud de onda  $C_{\lambda,rel}$  y temperatura  $C_{T,rel}$  se obtienen dividiendo  $C_\lambda$  y  $C_T$  entre la longitud de la fibra:

$$C_{\lambda,rel} = (3,22 \pm 0,10) \cdot 10^{-3} \frac{m}{nm \cdot km} \quad (13a)$$

$$C_{T,rel} = (7,15 \pm 0,25) \cdot 10^{-3} \frac{m}{^\circ C \cdot km} \quad (13b)$$

Las interpolaciones lineales en la Figura 6b proporcionan adicionalmente cinco valores para la longitud de la fibra  $L(\lambda_j, 23^\circ C)$  a la temperatura de referencia. Estos valores permiten una nueva interpolación en función de la longitud de onda (ver Figura 7) para obtener la longitud de la fibra a las condiciones de referencia  $L_{ref} = L(23^\circ C, 1550 nm)$ .



**Fig. 7.** Longitud óptica estimada de la bobina a 23°C en el intervalo de 1530 nm a 1550 nm.

La incertidumbre del ajuste  $u_A(L)$  refleja los errores aleatorios que se presentaron en el proceso de medición (variaciones de temperatura y de la longitud de onda, repetibilidad del analizador de redes, etc.), sin embargo, no comprende posibles errores sistemáticos no corregidos. Los parámetros más críticos en este aspecto son una posible desviación entre la temperatura medida y la temperatura verdadera en la fibra debido a gradientes de temperatura y la incertidumbre del sensor de temperatura y un error sistemático en la longitud de onda. La estimación de la incertidumbre combinada de  $L_{ref}$  se muestra en la tabla 6:

Magnitud de influencia	$u_i$	$c_i$	$c_i \cdot u_i$
Ajuste lineal: $u_A$	0,0047 m	1	0,0047 m
Temperatura: $u_{B,T} \pm 0,20^\circ C$	$0,12^\circ C$	$0,079 m/^\circ C$	0,0091 m
Longitud de onda: $u_{B,\lambda} \pm 0,05 nm$	$0,029 nm$	$0,036 m/nm$	0,0010 m
<b>Incertidumbre combinada</b>			<b>0,0103 m</b>

**Tabla 6.** Balance de incertidumbre de la longitud de la fibra  $L_{ref}$  a condiciones de referencia.

Finalmente resulta para la longitud de la fibra y su incertidumbre expandida con un nivel de confianza de 95 % y considerando un número efectivo de 3 grados de libertad:

$$L(1550 nm, 23^\circ C) = (11055,779 \pm 0,034) m \quad (14)$$

## 6. CONCLUSIONES

Se caracterizó la longitud óptica de una bobina de fibra óptica monomodo de aproximadamente 11 km para ser utilizada como patrón de referencia en la calibración de OTDRs en la escala de longitud en la ventana de 1550 nm. Mediante una doble interpolación lineal se obtuvieron su valor en un punto de referencia de 23 °C y 1550 nm con una incertidumbre de 34 mm y sus coeficientes de sensibilidad de longitud de onda y temperatura con incertidumbres relativas de 1,7 % y 5,5 %. Estos resultados son apropiados para poder fabricar la fibra patrón y determinar su valor de referencia con una incertidumbre apropiada, limitada prácticamente por las condiciones de uso  $T$  y  $\lambda$  del laboratorio.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Victoria Molina e Israel García por su apoyo mediante el préstamo del analizador de redes y la asesoría en su operación.

## REFERENCIAS

- [1] Christian Hentschel, Fiber Optics Handbook, Hewlett Packard 3<sup>TH</sup> edition. Boeblingen Instruments Division, Federal Republic of Germany, March 1989
- [2] IEC 61746 (2001-09), Calibration of optical time-domain reflectometers (OTDRs)
- [3] IEC 60793-1-22: (2001-08), Optical fibers – Part 1-22: Measurement methods and test procedures – Length measurement
- [4] Corning SMF-28 Optical Fiber Product Information: <http://www.corning.com/opticalfiber>
- [5] Guide to Expression of Uncertainty in measurements, (GUM), ISO, 1995.