

# PÉRDIDAS EN CURVATURAS DEL ESTÁNDAR DE FIBRA ÓPTICA G-657 PARA SU IMPLANTACIÓN EN LA ÚLTIMA MILLA

Guillermo Lamadrid Perojo<sup>(1,2)</sup>, Miguel Alejandro Rodríguez Colmenares<sup>(1)</sup>, Félix Fanjul Vélez<sup>(2)</sup>, Noe Ortega Quijano<sup>(2)</sup>, Irene Salas García<sup>(2)</sup>, Susana Cámara<sup>(1)</sup>, José Luis Arce Diego<sup>(2)</sup>

[glamadrid@hotmail.com](mailto:glamadrid@hotmail.com), [susana.camara@b3cables.com](mailto:susana.camara@b3cables.com), [arcedj@unican.es](mailto:arcedj@unican.es)

<sup>(1)</sup> B3Cable Solutions S.L. c/ Concha Espina s/n - 39600 Maliaño - Cantabria - Spain.

<sup>(2)</sup> Grupo de Técnicas Ópticas Aplicadas. Dpto. TEISA. Universidad de Cantabria. Av. de los Castros s/n, 39005 Santander, España.

**Abstract-** The solutions based on FTTx are in continuous expansion, parallel to their associate problematic. Due to the lack of a mathematical trustworthy model who predicts the bend losses of an optical fiber in conjunction with climatic fluctuations, in this work the characterization of special fibers for their implantation in the last mile of an hypothetical broad band system is presented; characterization that returns in essentially to guarantee his suitability in a certain environment and subject to variations.

The fiber tested supports perfectly the most aggressive tests with real applicability against his structure, without exceeding the limits of the manufacturer and this way one concludes his suitability for this intention.

## I. INTRODUCCIÓN

En una fibra, son varios los factores que pueden afectar a la correcta transmisión de la potencia óptica en una red PON. Los cables y productos relacionados con fiber-to-the-x (FTTx) atraen sucesivamente más atención, y su completa caracterización se torna en esencial para garantizar su idoneidad en un entorno determinado y sujeto a variaciones.

Dos premisas fundamentales condicionan este interés. En primer lugar, los elementos de conexión de un enlace todo-óptico, tales como las cajas de segregación que implementan los puntos de distribución, han de ser miniaturizados sin que esto induzca pérdidas adicionales al sistema. Fibras con bajas pérdidas frente a curvaturas son de gran ayuda para este propósito. La segunda premisa hace referencia a la impermeabilidad de la instalación. Existe la necesidad simultánea de reducir los costes junto con un entorno más exigente, susceptible a fluctuaciones climáticas o a generar curvados fortuitos en la estructura de la guía.

Ante la falta de un modelo teórico fidedigno en este artículo se presentan los efectos observados al someter una fibra óptica a los radios de curvatura y valores de temperatura límites que justifiquen su implantación en un enlace todo-óptico.

## II. PÉRDIDAS EN CURVATURAS EN FIBRAS ÓPTICAS SOMETIDAS A FLUCTUACIONES CLIMÁTICAS

Varios son los factores que son responsables de las pérdidas que sufre la potencia óptica al atravesar una curvatura en una fibra óptica, haciendo de dicha potencia una función exponencial decreciente respecto a la distancia. El origen de estas pérdidas está relacionado con la absorción intrínseca del material, la absorción extrínseca de determinadas impurezas, las imperfecciones del núcleo (excentricidad, deformaciones...) que generan difusión al igual que los defectos de la interfase núcleo-cubierta, así como posibles defectos del guiado lumínico. El efecto de curvar la fibra provoca, además, acoplo entre los distintos modos y variación de la distribución del campo transversal.

Las pérdidas producidas pueden explicarse mediante dos mecanismos principalmente. El primero de ellos corresponde a la energía disociada del frente de onda en un punto en el que la velocidad angular de fase de la luz en la región curvada debería exceder la velocidad de la luz permitida en el medio. El segundo está relacionado con la descompensación de los perfiles de los modos entre segmentos curvados y rectos de la guía de onda (pérdidas puras y de transición, respectivamente). Si además se considera que la cubierta es finita, se obtiene una variación oscilatoria de la potencia en el núcleo debida al acoplo entre éste y dicha cubierta (véase la Fig. 1), lo que reduce las pérdidas significativamente (para el caso multimodo) [1]. La fracción de energía perdida en el núcleo se acopla a la cubierta y se propaga allí con altas pérdidas, sin embargo, estas pérdidas pueden no ser visibles hasta varias decenas de centímetros después de la curvatura [2].

También se puede explicar este comportamiento por una variación en la distribución modal, puesto que el campo transversal se verá desplazado hacia el exterior de la curvatura.

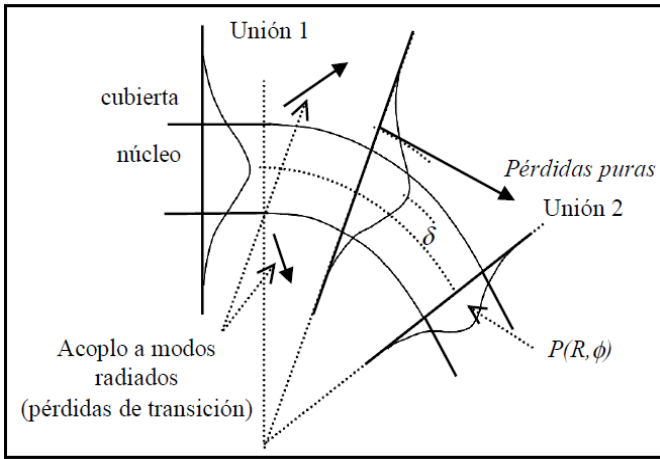


Fig. 1. Ilustración esquemática de las pérdidas puras y de transición.

Existen varios procedimientos para abordar de forma analítica las pérdidas por curvatura en la fibra. La óptica electromagnética, a partir de las ecuaciones de Maxwell y de la ecuación de propagación de una onda, se basa en la teoría de acoplo de modos implicando un sistema de ecuaciones normalmente resueltas por métodos perturbativos. Partiendo de la aproximación de guiado débil, los modos de una fibra óptica dieléctrica son la solución de la ecuación de onda (1):

$$\left( \nabla^2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \psi + [k_0^2 n^2(x, y) - \beta^2] \psi = 0 \quad (1)$$

Donde  $\psi$  representa una componente cartesiana del vector campo,  $k_0$  es el número de onda en el vacío y  $\beta$  es la constante de propagación.

Marcuse [3] deduce la fórmula (2) de las pérdidas para fibras monomodo, suponiendo un revestimiento infinito, con un radio de curvatura constante  $R$  expresando el campo en la cubierta de la sección de fibra curvada en términos de la superposición de ondas leaky mientras que para estimar el campo cercano al núcleo se efectúa una suposición que consiste en considerarlo igual al de la fibra recta.

$$2\alpha = \frac{\sqrt{\pi}(u/a)^2}{2(\gamma/a)^{3/2} V^2 \sqrt{R} K_1^2(\gamma)} \exp\left(-\frac{2}{3} \frac{\gamma^2}{\beta^2 a^3} R\right) \quad (2)$$

Para la correcta predicción de los efectos de la curvatura en una fibra monomodo, se hace necesario ajustar el modelo tomando en consideración el estrés mecánico inducido en la estructura por el propio doblado [4][5].

Sin embargo, el modelo de Marcuse no valora los efectos que puede provocar la temperatura en la fibra. La expansión o contracción del sílice o del polímero del revestimiento como respuesta a las fluctuaciones climáticas ha de ser caracterizado mediante el TEC (*thermal expansion coefficient*) [6].

La potencia óptica transmitida a través de la guía, depende de la cantidad de luz absorbida por el material, que a su vez depende de las propiedades de dicho material y del volumen de interacción de la luz. Si la fibra está sujeta a variaciones de temperatura en determinados segmentos, la interacción lumínica estará directamente relacionada con estos tramos y con la profundidad de penetración del campo, la cual, se ve afectada por el índice de refracción del material.

El índice de refracción de un material depende principalmente de la temperatura y de la longitud de onda, por

lo que cuando la temperatura ambiente varía, el índice de refracción se ha de caracterizar mediante el TOC (*thermo-optic coefficient*) del material.

### III. MONTAJE EXPERIMENTAL

Se procede a describir los sistemas de medida implementados en cada una de las pruebas. Los ensayos climáticos se han llevado a cabo según el método 601 especificado en la normativa vigente UNE-EN 187000. Todas las pruebas han sido desarrolladas sobre la fibra *AllWave® FLEX ZWP Single-Mode Fiber*.

Las fluctuaciones climáticas se han simulado mediante la cámara climática *DYCOMETAL CCK 4.30* con circulación de aire de tiro forzado sobre la fibra entubada y la de acometida, fabricada por B3CABLE. Los valores de temperatura se han controlado mediante el empleo de termopares adicionales, tal y como se ilustra en la Fig. 2 y la medida se ha realizado por el método de retroesparcimiento mediante el OTDR MTS-8000 de ACTERNA.

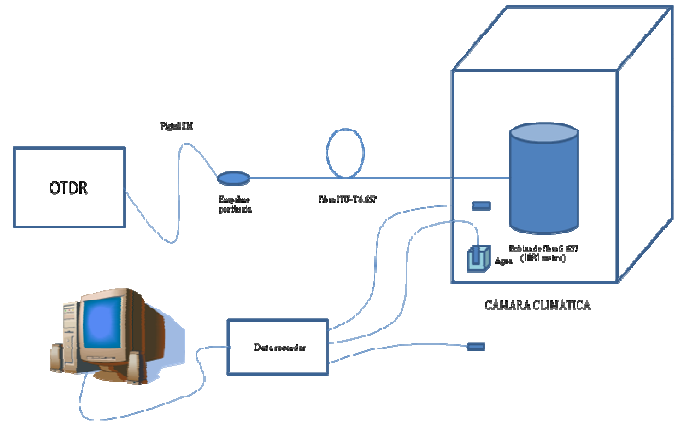


Fig. 2. Montaje de medida para los ensayos climáticos

El sistema de medida para la evaluación de las pérdidas por curvatura, a temperatura ambiente (20°C) y estabilizada, consta de un tramo corto (5 m) de fibra G.657 de acometida, situándose en un extremo del mismo una fuente láser FP clase 1 según IEC 825 (anchura espectral < 5 nm) y en el otro un medidor de potencia con fotodiodo de Germanio, cada uno de ellos con sus respectivos pigtail 9/125, a los que el láser entrega una potencia de -7 dBm, y los consiguientes empalmes por fusión. El montaje mostrado en la Fig. 3 corresponde a la evaluación de la sensibilidad de las curvaturas frente a fluctuaciones climáticas, que difiere de lo anteriormente descrito tan solo en que la zona curvada (la zona bajo test) se sitúa en el interior de la cámara climática.

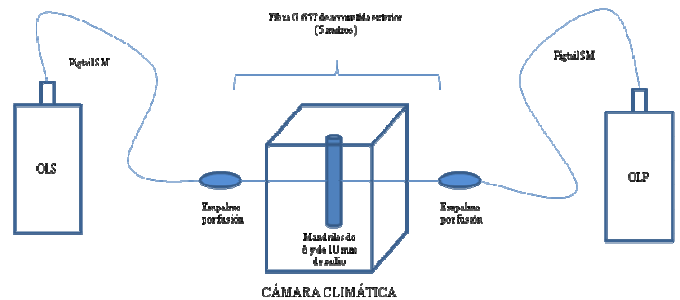


Fig. 3. Esquema de medida para la evaluación de las pérdidas de potencia óptica por macrocurvaturas (fuente-detector)

Bajo estas condiciones, puede considerarse que el tramo de fibra es lo suficientemente corto como para no introducir atenuación alguna por las características ópticas de la fibra en sí. Si se asume esta hipótesis, se ha de concluir que las pérdidas ofrecidas por el enlace son producto de:

- 1) Las pérdidas de inserción del OLP:  $I_{OLP}$
- 2) Las pérdidas de inserción del OLS:  $I_{OLS}$
- 3) El empalme A:  $P_A$
- 4) El empalme B:  $P_B$

Es decir, la atenuación total  $A_T$  generada a lo largo del sistema es:

$$A_T = I_{OLP} + I_{OLS} + P_A + P_B + A_F \quad (3)$$

Puesto que los empalmes no se rehacen a lo largo del ensayo y las medidas se efectúan siempre en el mismo sentido para no variar las pérdidas de inserción de los conectores de los equipos, si se considera, como se ha comentado,  $A_F = 0$ , las pérdidas del enlace se deberían mantener constantes si no se somete a la fibra a ningún esfuerzo o variación brusca de sus condiciones iniciales.

Todas las medidas experimentales se han realizado en el Laboratorio de I+D de B3CABLE SOLUTIONS.

#### IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 4 se muestran los resultados obtenidos a 1310 nm y a 1550 nm tras someter la fibra entubada a diversos ciclos de temperatura.

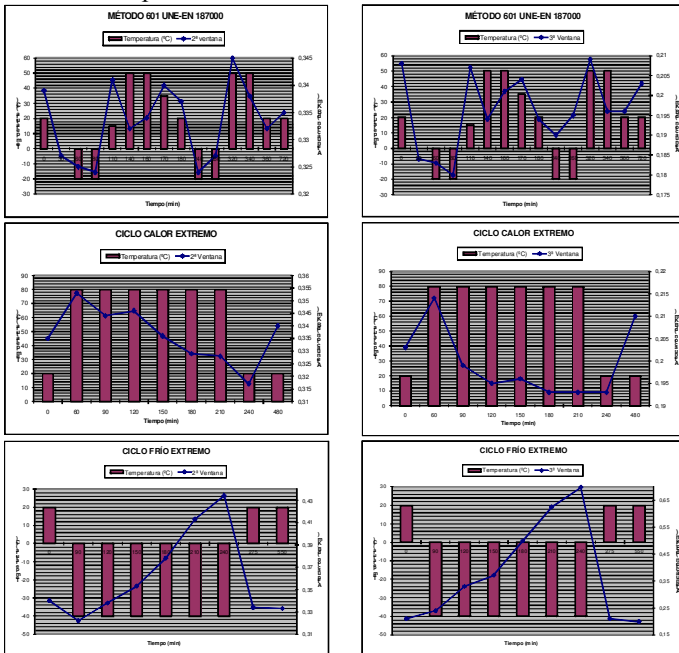
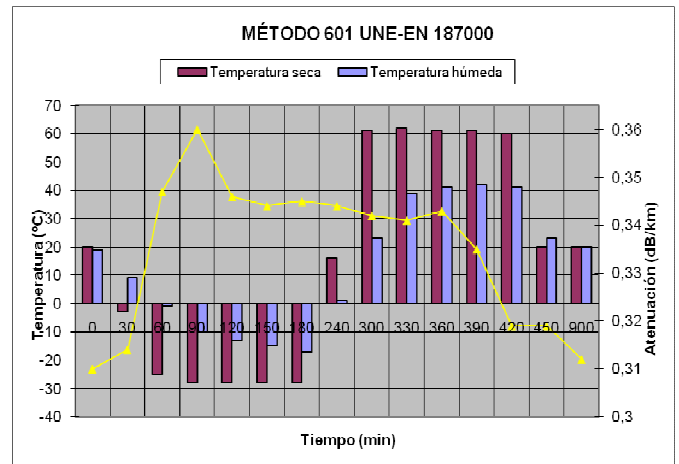
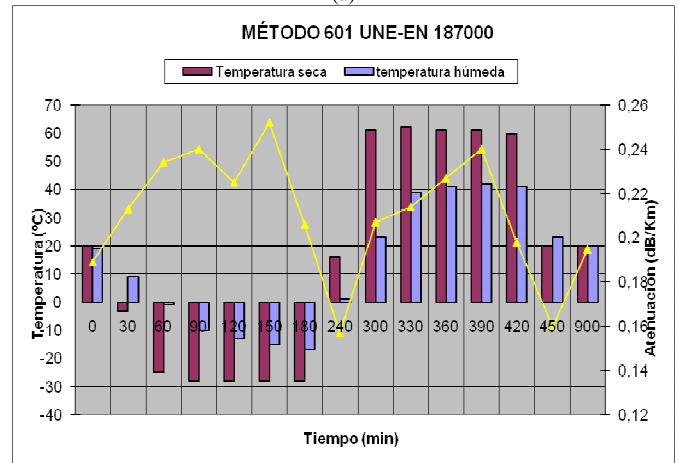


Fig. 4 De izquierda a derecha y de arriba a abajo, valores de atenuación (dB/km) para la segunda y tercera ventana, para la fibra entubada si se la somete a un ciclo normalizado según UNE-EN 187000, a un ciclo de calor extremo y a un ciclo de frío extremo

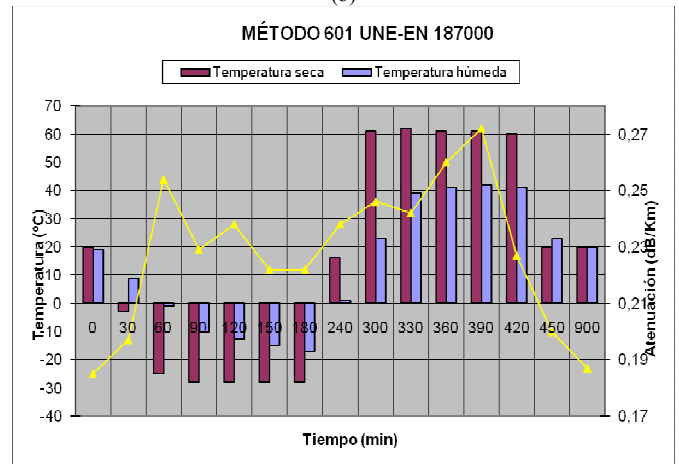
En la Fig. 5, se muestran los resultados tras someter la fibra cableada a variaciones de temperatura para 1310 (a), 1550 (b) y 1625 nm (c).



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 Valores de atenuación (dB/km), para la fibra de acometida exterior a 1310, 1550 y 1625 nm respectivamente.

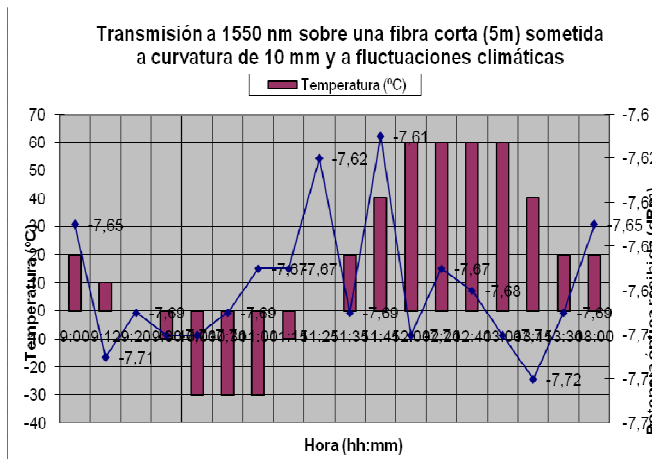
En la Tabla 1 se resumen los valores de pérdida de potencia óptica (en dB) recibida en el OLP respecto de las condiciones iniciales al transmitir sobre una fibra corta de acometida exterior y curvada con los radios y número de vueltas especificados.

La última medida evidencia la reversibilidad de la prueba.

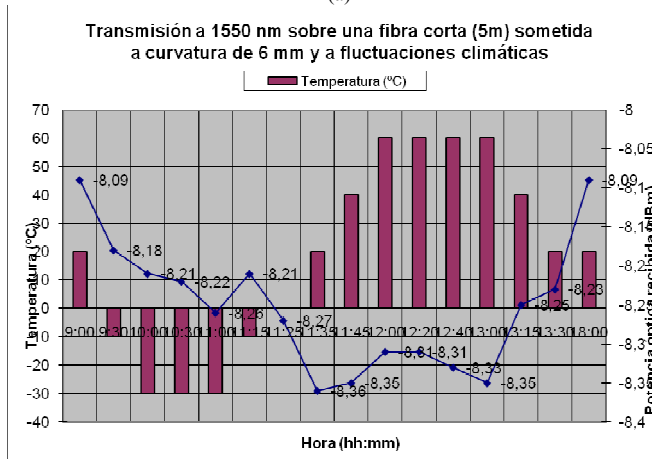
Radio (mm)	Vueltas	2ª Ventana	3ª Ventana
15	10	0	0,01
15	20	0	0,03
10	1	0	0,03
10	10	0	0,18
7,5	1	0	0,07
7,5	10	0	0,35
6	1	0	0,15
6	5	0	0,4
6	10	0	0,66
4,5	1	0	0,31
4,5	3	0,02	0,93
4,5	5	0,04	2,18
4	1	0,01	0,39
4	3	0,04	1,64
4	5	0,12	3,38
3,5	1	0,03	0,73
3,5	2	0,06	1,59
3,5	3	0,08	2,22
3	1	0,28	4
3	2	0,33	6,74
3	3	0,4	8,42
2,5	1	0,82	8,65
2,5	2	1,07	14,55
2	1	2,17	14,78
2	2	3,58	29,05
0	0	0	0,01

Tabla 1. Pérdidas totales por curvatura (sistema fuente – detector)

En la Figura 6, se ilustran los resultados obtenidos tras someter una fibra G.657 corta y curvada a un radio de curvatura fijo a fluctuaciones climáticas.



(a)



(b)

Fig. 6 Variación de la atenuación introducida por una curvatura con radio de 10 mm (a) y 6 mm (b) frente a fluctuaciones climáticas.

Los valores presentados corresponden a la potencia total detectada mediante el OLP (dBm), curvando la fibra, en dos ensayos diferenciados, a dos radios distintos. El primero, 10 mm (a), es el radio límite especificado por el fabricante. El segundo, 6 mm (b), excede el límite de la especificación.

## V. CONCLUSIONES

Se ha procedido a analizar y a caracterizar en sus vertientes más críticas el cable de acometida de fibra G.657 para una hipotética implantación en un sistema de banda ancha todo-óptico.

Se demuestra la idoneidad de la fibra para este propósito, a pesar de detectar un leve deterioro en las propiedades de la guía tras el cableado de acometida, una vez añadido el revestimiento externo de poliuretano, que si bien se trata de un ensayo más agresivo que para la fibra entubada, hace que se multipliquen en promedio por dos, las desviaciones en torno al valor nominal de atenuación para cada ventana de transmisión.

Este efecto puede deberse a un proceso de manufactura inadecuado, exigente desde el punto de vista mecánico que puede someter a la fibra a tracciones con consecuencias irreversibles (microcurvaturas, deformación parcial del núcleo...), así como a los efectos provocados por la dilatación y/o contracción del propio revestimiento durante los ensayos climáticos.

La variación de la potencia óptica recibida al someter la fibra curvada a ciclos de temperatura presenta una variación similar a la obtenida con fibra monomodo SMF-28 de Corning [7].

La fibra soporta perfectamente las pruebas más agresivas contra su estructura y con aplicabilidad real, sin exceder los límites del fabricante salvo cuando se la curva próxima a la rotura o se la somete a temperaturas por debajo de los -40°C sin revestimiento alguno.

## VI. REFERENCIAS

- [1] A.H Badar, *Bent slab ray theory for power distribution in core and cladding of bent multimode optical fibres*, Journal of IEE Proceedings, Vol. 138, N° 1, pág 7-12, 1991.
- [2] R.C. Gauthier, *Theoretical and experimental considerations for a single-mode fiber-optic bend-type sensor*, Applied Optics, Vol 36, N°. 25, pág 6264-6273.
- [3] D. Marcuse, *Curvature loss formula for optical fibers*, J. Optical Society of America, Vol. 66, N° 3, pág 216-220.
- [4] A. B. Sharma, A. H. Ai-Ani, and S. J. Halme, "Constant-curvature loss in monomode fibers: An experimental investigation," *Appl. Opt.*, vol. 23, pp. 3297-3301, Oct. 1984.
- [5] R. T. Schermer and J. H. Cole, *Improved Bend Loss Formula Verified for Optical Fiber by Simulation and Experiment*. IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, VOL. 43, NO. 10, OCTOBER 2007.
- [6] P. Wang, G. Rajan, Y. Semenova and G. Farrell, *Temperature dependence of a macrobending edge filter base don a high-bend loss fiber*. Optics Letters, Vol. 33, N° 21, November 1, 2008.
- [7] P. Wang, Y. Semenova and G. Farrell, *Temperature dependence of macrobending loss in all-fiber bend loss edge filter*. Optics Communications 281 (2008) págs, 4312-4316