

This is a postprint version of the following published document:

Tapeado, A.; Sánchez Montero, D.; Montalvo, J.; Pinzón, P. J.; Vázquez, C. (2015). “Sistema permanente de supervisión de detección y localización de fallos de fibra óptica en PONs”. Centro de Láseres Pulsados (CLPU). *Libro de Comunicación: IX Reunión Española de Optoelectrónica (Optoel'15)*, Salamanca, 13-15 de julio de 2015, pp. 581-587. ISBN 978-84-606-9716-9.

© Centro de Láseres Pulsados (CLPU) 2015



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License.

Sistema permanente de supervisión de detección y localización de fallos de fibra óptica en PONs

Permanent Fiber Monitoring System (PFMS) for Fiber-Fault Detection and Localization in PONs

Alberto TAPETADO ⁽¹⁾, David SÁNCHEZ MONTERO ⁽¹⁾, Julio MONTALVO ⁽²⁾, P. Jesús PINZÓN ⁽¹⁾, Carmen VÁZQUEZ ⁽¹⁾

1. Dpto. Tecnología Electrónica, Escuela Politécnica Superior, Universidad Carlos III de Madrid, Avda. de la Universidad 30, 28911, Leganés (Madrid).
2. Telefónica Investigación y Desarrollo S.A.U., Ronda de la Comunicación s/n, 28050 Madrid (Spain)

Persona de contacto: David Sánchez Montero (dsmontero@ing.uc3m.es).

RESUMEN:

En este trabajo se presenta una nueva técnica para la detección de fallos en despliegues de fibra óptica para la supervisión de redes ópticas pasivas (PON) de fibra al hogar hasta el equipo de usuario final. Ésta consiste en la monitorización permanente de la potencia óptica recibida en longitudes de onda de supervisión entre la Unidad Óptica Terminal de Línea (OLT) y cada Terminal de Red Óptica (ONT). La técnica propuesta ha sido validada de manera experimental en un sistema GPON con un divisor óptico (*splitter*) 1:64.

Palabras clave: FTTH, PON, OTDR, fibra óptica, fallo, monitorización

ABSTRACT:

We study a new fiber fault detection technique for the supervision of Fiber-To-The-Home (FTTH) Passive Optical Networks (PON) up to the customer premises location. The technique consists of permanent power monitoring of dedicated supervision wavelengths transmitted between the Optical Line Terminal (OLT) and each Optical Network Terminal (ONT). The technique has been experimentally validated in a GPON system with 1:64 splitting ratio.

Key words: FTTH, PON, OTDR, fiber fault, monitoring

1.- Introducción

La penetración de servicios multimedia en redes ópticas de acceso se ha visto favorecida por el uso masivo de Internet, no sólo relacionada con el sector de los negocios y la productividad laboral sino que también lo ha sido gracias al incremento de su uso en el ámbito doméstico. Las redes ópticas de acceso son, en la actualidad, masivamente instaladas donde el despliegue de fibra óptica se acerca cada vez más al usuario (abonado) final, donde tasas de transmisión de 1 Gb/s por usuario son una realidad. En 2014 se

estima que se superaron los 100 millones de usuarios FTTH en el mundo [1]. En España, el despliegue de fibra FTTH de Telefónica ha crecido a un ritmo del 192% en los últimos años, siendo España uno de los tres países de Europa con más de 10 millones de hogares con cobertura FTTH y más de un millón de usuarios FTTH [2].

La eficiencia en el coste de estas redes de acceso es un factor de extrema importancia, siendo la reducción del coste operacional (OPEX) debido al mantenimiento de la infraestructura de fibra óptica un aspecto relevan-

te a tener en cuenta.

La técnica de reflectometría óptica en el tiempo (OTDR) es una tecnología hoy en día madura para la supervisión de la capa física de red. Los OTDR transmiten pulsos de luz de manera periódica en la fibra óptica bajo supervisión, siendo posible caracterizar y monitorizar el estado de dicha fibra mediante el análisis de la cantidad de luz reflejada (*backscattered light*).

De entre las diferentes topologías de redes de acceso que pueden ser desplegadas, las redes FTTH son aquellas donde la fibra óptica se encuentra desplegada desde la parte del operador hasta el usuario. De entre ellas, las redes ópticas pasivas (PONs) comunican el equipo de red del operador (OLT) con el equipo de usuario (ONT) usando topologías punto a multipunto mediante el empleo de divisores ópticos (*splitters*) dentro de la red óptica de distribución (ODN). Este hecho implica un desafío en la detección de fallos mediante técnicas basadas en OTDR, puesto que la señal recibida en el mismo resulta de la suma de la contribución de las diferentes ramas tras el divisor óptico (haciendo difícil o imposible la detección de eventos en ramas específicas) y en donde la atenuación sufrida por esta señal resulta bastante elevada.

De manera genérica, los OTDRs pueden ser utilizados para operación y mantenimiento (O+M) en ODNs de dos formas:

- Descentralizada, que implica el envío de un operario a la planta externa con un OTDR portátil cuando en el centro de operación de red se detecta una alarma causada por un fallo en la fibra óptica.
- Centralizada, que implica el uso de OTDR desde la oficina central donde se encuentran instaladas las OLT combinado con el empleo de elementos remotos activos para realizar dicha supervisión. El diagnóstico de la ODN en caso de alarma estará relacionado con una o más ONTs. Una alternativa a esta técnica consiste en usar marcadores ópticos basados en reflectores ópticos del lado de la ONT, permitiendo la discriminación entre un fallo de comunicación debido a un problema en el equipo de usuario final o un fallo de la fibra óptica desplegada en la ODN previa al mis-

mo.

Se han propuesto otras técnicas alternativas con el objetivo de intentar evitar el solapamiento de las trazas OTDR debidas a las diferentes ramas de salida del divisor óptico y, de esta manera, incrementar la eficacia del sistema de supervisión. Así, se ha propuesto el empleo de OTDRs sintonizables (en longitud de onda) en combinación con el empleo en la ODN de divisores ópticos especiales [3]. La comparativa de costes del uso de la técnica de supervisión centralizada basada en OTDR sintonizable en una red ODN PON con respecto a un formato de supervisión descentralizado se muestra en [4].

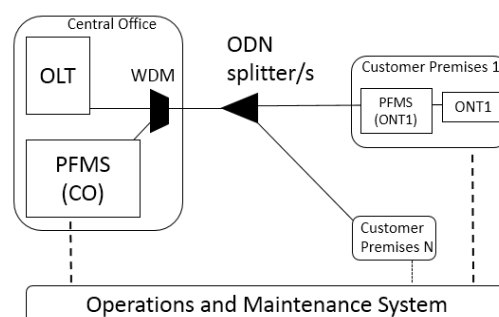


Fig. 1: Arquitectura del Sistema Permanente de Supervisión (PFMS) propuesto.

En este trabajo se analiza un nuevo sistema centralizado de supervisión capaz de localizar fallos de fibra óptica localizados más allá del divisor óptico (hasta el usuario final) en redes FTTH-PON sin necesidad de modificar o cambiar la topología de red o los nodos remotos (*splitters*) de la misma, véase la Fig. 1.

El sistema de supervisión propuesto incorpora unidades de monitorización en la oficina central (CO) y en las instalaciones del cliente (CPE, *Customer Premise*), siendo dichas unidades de monitorización capaces de proporcionar información de supervisión al operador perteneciente al sistema de operaciones y mantenimiento (O+M) cuando sea requerido, de manera simultánea con los datos transmitidos por la propia red.

Este trabajo se organiza de la siguiente manera. En la sección II se describen la arquitectura y el principio de funcionamiento del sistema de supervisión propuesto. En la sección III se muestran los resultados experi-

mentales para la validación de la propuesta sobre un sistema GPON. Por último, en la sección IV se muestran las conclusiones.

2.- Sistema de supervisión permanente en línea (PFMS) en PONs

2.1.- Arquitectura

La topología propuesta consiste en un sistema de supervisión permanente en línea (*Permanent Fiber Monitoring System*, PFMS) en cada puerto del OLT con unidades de monitorización de la potencia óptica en el OLT y en cada ONT, véase la Fig. 2

En el lado de la oficina central, se requiere un sistema PFMS para cada puerto OLT que se desea monitorizar. Un equipo WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) combina las señales ópticas PON de subida (US, *Upstream*) y bajada (DS, *Downstream*) de cada puerto OLT con las señales ópticas del sistema de supervisión. Una señal de supervisión a una determinada longitud de onda λ_0 se transmite desde el OLT hacia todas las ONTs mediante un diodo láser (LD). Esta longitud de onda se recibe en todas las ONTs. En el caso de que el sistema PFMS se instale en el domicilio del cliente "i" (CPE "i") la potencia óptica de la señal de supervisión λ_0 será recibida por el fotodiodo PD "i". La señal eléctrica detectada se monitoriza continuamente en la unidad de proceso de la ONT.

Del otro lado de la red, el domicilio del cliente (CPE "i") está equipado con el sistema PFMS transmitiendo la longitud de onda dedicada λ_i hacia la OLT, donde es recibida por el sistema PFMS del mismo en la oficina central, demultiplexada y detectada en el PD cuya señal eléctrica se monitoriza en tiempo real por la unidad de proceso correspondiente en las instalaciones del operador de red.

Para un correcto funcionamiento del sistema de supervisión, ambas unidades de proceso, ubicadas en la OLT y ONTs requieren del sincronismo de sus relojes. Igualmente es necesario conocer previamente la distancia óptica entre la OLT y cada ONT. Esta sincronización puede obtenerse mediante el uso de protocolos de comunicación, como el IEEE 1588, mientras que la distancia entre la

OLT y cada ONT puede obtenerse mediante una traza OTDR durante el despliegue de la red o incluso obtenerse a través de la propia medida del retardo de transmisión durante el proceso de "ranging" en el protocolo GPON.

2.2.- Principio de funcionamiento

La arquitectura propuesta parte de la base del mismo principio de funcionamiento previamente descrito en [5, 6] para enlaces punto a punto basados en fibra óptica monomodo, multimodo y de plástico.

Cuando ocurre un fallo en la fibra óptica (como un doblez o un corte de la misma) en un punto determinado del enlace que une la OLT con el ONT "i" en la red PON ODN, este fallo causa la caída de la potencia óptica recibida en ambas longitudes de onda de supervisión λ_0 y λ_i .

El tiempo (ToF) que transcurre desde que se produce un evento de fallo de fibra en un determinado punto, a la longitud de onda λ_i , con respecto de la OLT depende de: a) la distancia entre la OLT y el punto donde se produce dicho fallo, y b) el índice de refracción de grupo de la fibra evaluado en λ_i . De igual manera, el tiempo que transcurre desde que se produce un evento de fallo de fibra en un determinado punto, a la longitud de onda λ_0 , con respecto de la ONT depende de: a) la distancia entre la ONT y el punto donde se produce dicho fallo, y b) el índice de refracción de grupo de la fibra evaluado en λ_0 .

Cuando la caída de potencia óptica producida por el fallo se detecta en las unidades de proceso de los sistemas PFMS de la OLT y la ONT "i", respectivamente, se generan un par de alarmas. Estas señales de alarma proporcionarán información relativa al tiempo en el que se detecta dicha atenuación en cada sistema PFMS tanto de la OLT como de la ONT "i" respecto de un tiempo de referencia sincronizado de manera precisa para ambas.

Puesto que la distancia entre la OLT y cada ONT es conocida, se puede emplear el retardo (en tiempo) entre las señales de caída recibidas en los correspondientes sistemas PFMS para calcular la localización del fallo producido en el tramo de fibra óptica. El detalle de las expresiones matemáticas puede obtenerse en [5,6].

Ambas alarmas son transmitidas al sistema de operaciones y mantenimiento (O+M) del operador de red PON mediante el empleo de un canal de datos local en la OLT y un canal de datos remoto en el domicilio del cliente. Para este último, una solución de bajo coste podría ser establecer una comunicación inalámbrica entre la ONT y el sistema O+M del operador.

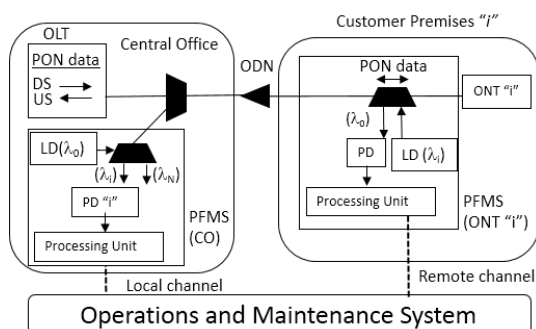


Fig. 2: Detalle de los bloques del sistema permanente de supervisión (PFMS) en la oficina central (CO) y en el domicilio del cliente para la ONT "i".

3.- Resultados experimentales

3.1.- Montaje experimental

Para la validación de la técnica de supervisión PFMS propuesta en un escenario PON real, se implementó un montaje experimental formado por un OLT GPON comercial, una ODN de 1:64 realizada con divisores ópticos 1:4 y 1:16 en cascada y una ONT (ONT1) con servicio de conectividad bidireccional de 30Mb/s, véase la Fig. 3.

Las secciones de fibra óptica de la ODN del montaje experimental se midieron mediante un OTDR configurado con pulsos a 1550nm e índice de refracción de grupo $n=1.465$. Se obtuvieron las medidas de $L_0=6312m$, $L_1=4325m$ y $L_2=1351m$, respectivamente.

Los sistemas PFMS del lado de la OLT y la ONT se implementaron utilizando dos filtros ópticos de adición/extracción CWDM-ADF en serie, en longitudes de onda nominales de $\lambda_0=1550nm$ y $\lambda_1=1570nm$. Estas longitudes de onda se corresponden con las transmitidas por los diodos láser, con potencias ópticas de emisión $-0.4dBm$ (λ_0) and $-1.1dBm$ (λ_1). En los receptores se emplearon fotodiodos APD con 20dB de factor de ganancia y 2MHz de

ancho de banda.

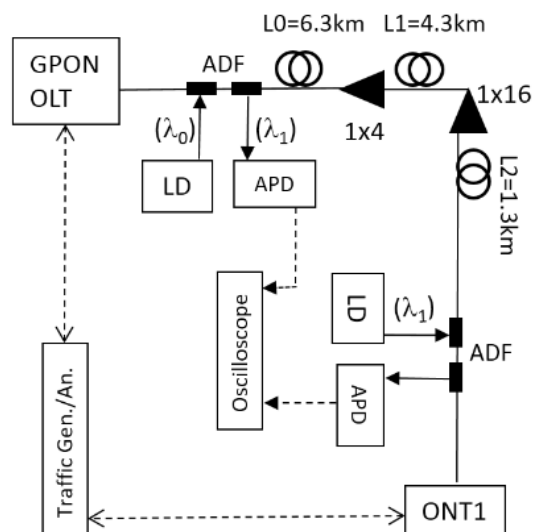


Fig. 3: Montaje experimental. El Analizador/Generador de Tráfico transmite dos flujos de datos de 30Mb/s cada uno a la OLT y ONT1. ADF: filtro óptico de adición/extracción. APD: fotodiodo de avalancha.

Las señales eléctricas recibidas en ambos fotodetectores APDs se monitorizan en un osciloscopio configurado a 4×10^6 muestras/segundo (4MS/s) durante 1 segundo ($0.25 \mu\text{seg/muestra}$), emulando las unidades de proceso sincronizadas en ambos sistemas PFMS en un único dispositivo.

Se provocaron diferentes cortes de fibra y desconexiones manuales en diferentes puntos del enlace ODN emulando fallos en la fibra óptica, y las dos señales eléctricas correspondientes generadas tras este proceso de fallo fueron simultáneamente guardadas en el osciloscopio. Para calcular la localización del fallo producido, se realizó un posterior post-procesado de las señales capturadas.

3.2.- Medidas experimentales

Para la medida del ToF desde el punto de fallo hasta el APD situado en el lado de la OLT así como desde el punto de fallo hasta el APD situado del lado de la ONT, se provocaron diferentes cortes de fibra, realizados con una cortadora de fibra, así como desconexiones manuales entre dos conectores SC/APC del enlace. Se seleccionaron diferentes localizaciones dentro de la ODN para evaluar el comportamiento del sistema PFMS en el montaje GPON experimental descrito.

Los resultados de dos medidas se muestran en las Fig. 4(a) y Fig. 4(b), respectivamente.

El retardo (Δt) entre la caída de potencia óptica, respecto de un umbral de potencia previamente definido, tanto en λ_0 como en λ_1 fue medido con el osciloscopio para obtener una estimación de la localización exacta donde se produce el fallo. Para las desconexiones manuales, los transitorios de bajada son mucho mayores comparados con la realización de un corte en la fibra. En cualquier caso, a partir de la medida del retardo entre transitorios es posible obtener una estimación del punto de localización del fallo inducido.

Los resultados experimentales se muestran en la Tabla 1, donde se obtuvo una desviación máxima de la localización estimada del punto de fallo de 73m en una distancia >6Km mediante el sistema PFMS respecto de la medida de localización realizada mediante un OTDR. La desviación mínima obtenida en las medidas fue de 8 m en una distancia >10Km. En cualquier caso, no se detectó ninguna influencia en el tráfico bidireccional GPON a 30Mb/s entre la OLT y el ONT1 debido a la presencia en la red de ambas longitudes de onda de supervisión, λ_0 y λ_1 , incorporadas por el sistema PFMS propuesto, véase la Fig. 5.

4.- Conclusiones y discusión

La viabilidad del sistema permanente propuesto de supervisión (PFMS) para la monitorización y localización de fallos de fibra óptica en redes PON ha sido experimentalmente validada en un montaje GPON en funcionamiento sin que se haya percibido un impacto negativo en el tráfico de red.

El sistema PFMS propuesto es capaz de detectar y localizar de manera individual (por cada rama del enlace) el punto de fallo de fibra en una ODN PON basada en divisores ópticos evitando el solapamiento de trazas que tiene lugar en un dispositivo OTDR. El sistema propuesto es, igualmente, capaz de detectar fallos hasta el domicilio del cliente en redes PON 1:64, sin necesidad de modificar o añadir ningún componente o equipo en la ODN.

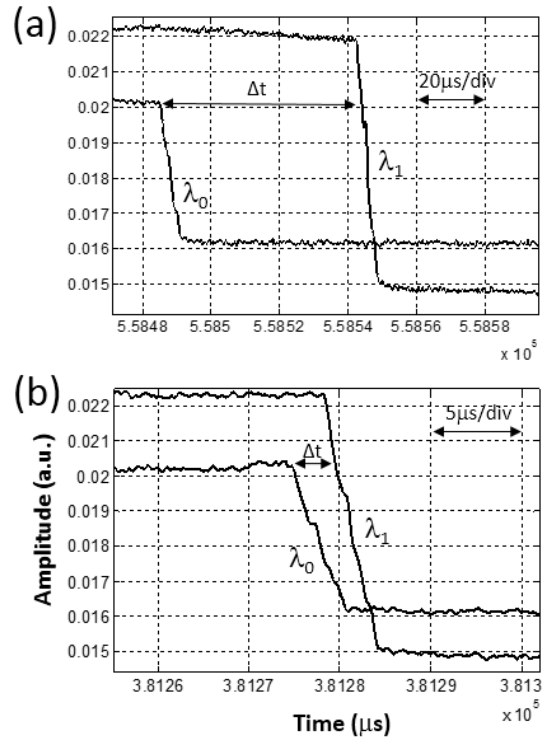


Fig. 4: Medidas experimentales mediante un corte de fibra, con localización de fallo en la ONT (a), y en el divisor óptico 1x4 (b).

Localización del fallo	Distancia hasta la OLT (OTDR)	Δt (μs)	Distancia hasta la OLT (PFMS)	Diferencia OTDR-PFMS
ONT	11,998 m	57.50	11,998 m	0 m (calibration)
ONT (manual)	11,998 m	57.25	11,962 m	26 m
Divisor óptico 1x16	10,637 m	44.50	10,645 m	8 m
Divisor óptico 1x16 (manual)	10,637 m	45.00	10,697 m	60 m
Divisor óptico 1x4	6,312 m	3.25	6,385 m	73 m
Divisor óptico 1x4 (manual)	6,312 m	2.75	6,334 m	22 m

Tabla 1: Medidas obtenidas en la estimación de la localización del fallo.

El rendimiento y algunos criterios de diseño sobre la propuesta descrita se analizan en las siguientes subsecciones.

4.1.- Precisión en la localización del punto de fallo

Para una mejor precisión en la localización del punto de fallo, es posible aumentar tanto la tasa de muestreo de las unidades de proce-

so en ambos sistemas PFMS (OLT y ONT “i”) como el ancho de banda de los APDs empleados.

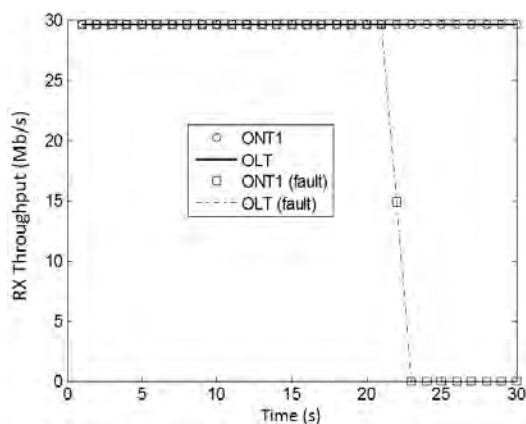


Fig. 5: Evaluación del tráfico recibido (Mb/s) en la ONT1 (marcadores) y en la OLT (líneas) en combinación con el sistema PFMS propuesto, con y sin fallo de fibra.

En el montaje experimental descrito, la tasa de muestreo fue de 4 MS/s correspondiente con una señal de entrada de frecuencia máxima 2MHz (criterio de Nyquist) y que coincide con el ancho de banda de los fotodiodos APD empleados, para una ganancia de 20dB. Esta configuración determina una precisión en tiempo de las medidas de $0.25\mu\text{s}$. Asumiendo un índice de refracción de grupo de $n=1.465$ y una velocidad de la luz en el vacío de $c=299792458$ m/s, esto resulta en una precisión de aproximadamente 50m en las medidas obtenidas.

Las medidas experimentales obtenidas en la evaluación de la localización de fallo muestran una diferencia entre 8m-73m con respecto al empleo de la técnica OTDR, que coincide con el rango de precisión descrito con anterioridad debido a las restricciones del equipamiento empleado. Una tasa de muestreo de 20 MS/s y un APD con ancho de banda de 10 MHz o mayor se podrían utilizar para obtener una precisión de 10m, que se pueda considerar como una especificación óptima para la supervisión de una PON.

4.2.- Sincronización

Otro aspecto importante a tener en cuenta en el sistema de supervisión propuesto es la sincronización requerida entre la unidad de proceso de la oficina central y los sistemas PFMS remotos localizados en el domicilio de

los clientes. Se recomienda un error de sincronismo bastante menor que la precisión deseada relativa a la medida de la localización del punto de fallo. Una precisión entre 10-100ns en la sincronización de ambos bloques sería suficiente para garantizar un error en la estimación de la localización de entre 10m-100m, lo cual es factible empleando sincronización IEEE 1588 entre los elementos de monitorización en las ONT y la OLT.

4.3.- Banda óptica para supervisión en PON

En el experimento realizado, se utilizaron longitudes de onda disponibles en las bandas C y L para validar la propuesta. Sin embargo, las longitudes de onda de supervisión para redes PON se encuentran en la banda U (1625nm-1675nm). Para el despliegue del sistema de supervisión propuesto en un escenario real sería necesario emplear láseres WDM, filtros ópticos y APDs operando en dicha banda.

4.4.- Coste

La necesidad de sincronización y de un canal de comunicación alternativo para transmitir los datos de la alarma en el lado de la ONT, pueden encarecer el coste total del sistema, por lo que la aplicabilidad del mismo sería más eficiente en sistemas de *backhaul* móvil donde las ONTs se emplean para transmitir el tráfico de las redes móviles hacia el núcleo de red a través de la red PON. En estos sistemas, se emplean mecanismos de sincronización y el incremento porcentual de coste del sistema de monitorización propuesto resulta menor.

Agradecimientos: este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad bajo los proyectos TEC2012-37983-C03-02 (CFOOT-TIC) y TEC2009-14718-C03-03, por la Comunidad de Madrid bajo el proyecto S2013/MIT-2790 (SINFOTON-CM). Se ha contado con apoyo de la Unión Europea bajo la ayuda no. 318137 (DISCUS).

Referencias

- [1] “FTTH, DSL, and Cable Subscribers report,” Infonetics Research (2015).
- [2] “Creating a connected continent”, FTTH Conference Warsaw, Press Conference,

- 2015.
- [2] ITU-T L.66: Optical fibre cable maintenance criteria for in-service fibre testing in access networks (Appendix II), 2007.
 - [3] P.J. URBAN et al., “Fiber Plant Manager: an OTDR and OTM-based PON Monitoring System”, IEEE Comm. Mag., Vol. 51(2), pp. S9-S15, Feb. 2013.
 - [4] P.J. URBAN et al., “Detection of fiber faults in passive optical networks”, J. Opt. Commun. Netw., vol. 5(11), pp. 1111-1121, Nov. 2013.
 - [5] D.S. MONTERO et al., “Fault location in full-duplex plastic optical fiber links using synchronized decay time detection”, 22nd International Conference on Plastic Optical Fibers (POF 2013), Sept. 2013.
 - [6] J. MONTALVO et al., “Localización de Fallos en Enlaces Full-Duplex de Fibra Óptica Mediante Detección Sincronizada”, VIII Reunión Española de Optoelectrónica, OPTOEL'13, Jul. 2013.