

This is a postprint version of the following published document: Durán Barroso, Ramón José; Anzola Rojas, Camilo; Merayo Álvarez, Noemí; Miguel Jiménez, Ignacio de; Aguado Manzano, Juan Carlos; Pérez Pons, María Eugenia; Parra Domínguez, Javier; Plaza Hernández, María. Propuesta de política público-privada para el despliegue de la banda ancha en entornos rurales de Castilla y León. In: IV Workshop on Disruptive Information and Communication Technologies for Innovation and Digital Transformation. Ediciones Universidad de Salamanca, 2021

Propuesta de Política Público-Privada para el Despliegue de la Banda Ancha en Entornos Rurales de Castilla y León

Ramón J. Durán Barroso¹[0000-0003-1423-1646], Camilo Anzola-Rojas¹[0000-0002-8489-2426],
Noemí Merayo¹[0000-0002-6920-0778], Ignacio de Miguel¹[0000-0002-1084-1159],
Juan Carlos Aguado¹[0000-0002-2495-0313], M^a Eugenia Pérez-Pons²[0000-0002-2194-572X],
Javier Parra-Domínguez²[0000-0002-1088-9152], Marta Plaza-Hernández²[0000-0002-2249-5425]

¹ Universidad de Valladolid, E.T.S.I. de Telecomunicación,
Campus Miguel Delibes, 47011 Valladolid, España

² BISITE, Universidad de Salamanca, Calle Espejo s/n, 37007, Salamanca, España
rduran@tel.uva.es, camilo.anzola@uva.es

Resumen. Los nuevos servicios y aplicaciones disruptivas requieren la utilización de redes de comunicaciones de banda ancha. En el segmento de acceso, las redes de acceso ópticas pasivas (PON) se están consolidando como la mejor alternativa para este despliegue dado que las tecnologías de acceso tradicionales (cable coaxial, cobre) ya han dejado de ser capaces de soportar el creciente volumen de tráfico. Sin embargo, el despliegue actual de estas redes PON es muy desigual estando únicamente presentes en las áreas de mayor densidad de población donde el coste por conexión para los operadores se mantiene bajo. En este artículo presentamos una propuesta de política público-privada que permitirá incentivar a los operadores para el despliegue de redes PON en entornos de baja densidad de población (entornos rurales). Para demostrar su eficacia, se presenta un caso de uso en la provincia de Valladolid (Castilla y León, España). Los resultados de este estudio muestran que, gracias a la utilización de la política propuesta, los operadores pueden encontrar atractivo dar un servicio a todos los usuarios y poblaciones que lo deseen.

Palabras Clave: Red de acceso, PON, *passive optical networks*, *long-reach* PON, despliegue, tecnologías disruptivas, entorno rural.

1 Introducción

Internet se encuentra en plena evolución hacia el denominado Internet de las Cosas (IoT por sus siglas en inglés, *Internet of Things*). IoT es un paradigma que permitirá interconectar una ingente cantidad de dispositivos con características heterogéneas. Gracias al desarrollo de esta tecnología, aplicaciones disruptivas de Industria 4.0, Realidad Virtual (VR), *Smart cities*, *Smart homes* o *Intelligent Transportation systems* (ITS) se podrán llevar a la práctica. Cada uno de esos nuevos servicios requieren capacidades de red, computación y almacenamiento particulares, y las actuales infraestructuras de comunicaciones no pueden ofrecerlas.

Uno de los requisitos que caracterizan a todos estos servicios es la necesidad de disponer de una red de comunicaciones de gran ancho de banda, baja latencia, alta disponibilidad y alta seguridad [1]. En el segmento de acceso (la red que conecta al usuario final con la primera central de comunicaciones) la mejor alternativa como red fija son las redes ópticas pasivas (PON, *passive optical networks*). Las redes PON, ofrecen un gran ancho de banda y brindan dinamismo, escalabilidad y confiabilidad a un precio reducido [1]. Las redes PON se caracterizan por llevar una red de fibra óptica hasta el usuario final dando lugar al FTTH (*fiber to the home*). Una de las características principales es que no tienen elementos activos (aquellos que consumen energía) entre la central y el usuario final. La tecnología en la que se basan estas redes es suficientemente madura para que actualmente haya un despliegue importante de las mismas. En este sentido, el FTTH Council en uno de sus últimos informes, de diciembre de 2020, afirma que 202 millones de hogares pasarán a tener FTTH en 2026 en Europa, frente a 88,1 millones en 2019 [2]. Además, se espera que la penetración de FTTH sea del 73,3% en 2026 (43,3% en 2019). Las tecnologías PON se perfilan como predominantes en los próximos años, pasando del 48,4% en septiembre de 2018 al 73% en 2025 [3]. Este despliegue es sin embargo muy desigual dependiendo de los países y de la densidad de la población del área a cubrir. De esta forma, las redes PON están desplegadas en las grandes ciudades (entornos con gran densidad de la población) mientras que en entornos de baja densidad como en entornos rurales el grado de implantación es mínimo o nulo. Esto se debe a que los costes por conexión son mucho más reducidos en entornos de alta densidad debido a tener distancias reducidas (con lo que se reduce el coste del despliegue) y un gran número de conexiones.

Sin embargo, el despliegue de redes de acceso de gran ancho de banda es necesario para la implantación de servicios de IoT, Industria 4.0, VR o ITS en el entorno rural. En [4] se mostraron las diferentes aplicaciones de tecnología MEC (*multi-access edge computing*) en el entorno rural, y para ofrecer dichas aplicaciones son necesarias también redes de acceso de gran ancho de banda como las redes PON. En este artículo se presenta una propuesta de política público-privada para conseguir el despliegue de redes PON en entornos de baja densidad de población como es el medio rural. Mediante un caso de uso en la provincia de Valladolid (Castilla y León, España) se verán las ventajas de esta política para todos los implicados: usuarios, sector público y operadores.

2 Redes Ópticas Pasivas

Las redes ópticas pasivas (PON) se están convirtiendo en la principal tecnología para las redes de acceso de banda ancha en todos los países, y tienen el potencial de alcanzar una alta penetración en el mercado a corto y medio plazo.

Las redes PON típicamente presentan una topología en árbol (Fig. 1) entre un terminal de línea óptica (OLT, *optical line terminal*), situado en la oficina central y varios terminales de red óptica (ONT, *optical network terminal*) situados en las dependencias de los usuarios finales. La conexión entre el OLT y las ONTs se realiza mediante fibra y divisores ópticos, por lo que los elementos activos solamente se encuentran en los extremos de la red, mientras que el resto de la infraestructura es totalmente

pasiva. Estas redes de acceso trabajan en dos canales diferentes con una longitud de onda distinta dedicada a cada canal. En el canal de bajada (desde la OLT hacia las ONTs), la conectividad es punto-multipunto y se utiliza una longitud de onda de 1490 nm para la transmisión. En cambio, en el canal de subida (desde las ONTs hasta la OLT) las arquitecturas PON presentan una conectividad multipunto, por lo que todas las ONTs comparten la misma longitud de onda, que es de 1310 nm. Por lo tanto, se requiere un protocolo MAC (*medium access control*) dentro de este canal para evitar colisiones entre los datos de diferentes usuarios (ONTs).

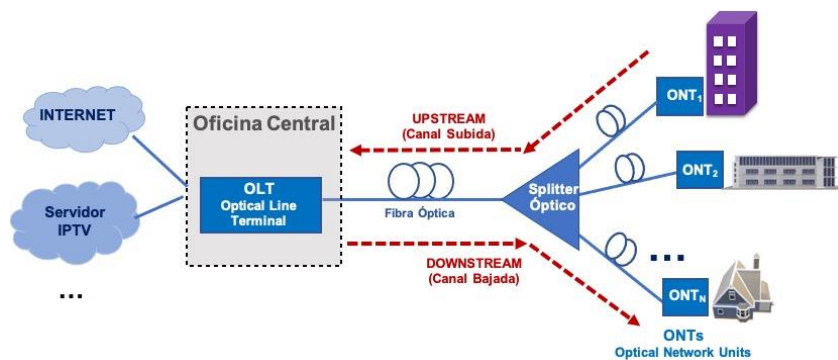


Fig. 1. Esquema de una red PON.

Actualmente existen fundamentalmente dos estándares PON: EPON (ethernet PON) [5] y GPON (gigabit PON) [6]. El estándar EPON soporta una tasa simétrica de 1.25 Gbps mientras que GPON presenta tasas de transmisión más flexibles, hasta 1.25 Gbps en el canal de subida y 2.5 Gbps en el canal de bajada. En ambos estándares, la distancia máxima entre la OLT y las ONTs es de 20 km. En España, los operadores han optado por el despliegue utilizando tecnología GPON.

Para conseguir aumentar la cobertura de las redes PON y hacerlas más rentables, se propusieron las redes ópticas pasivas de largo alcance (LR-PON, *long-reach* PON) [7]. Estas LR-PON amplían la cobertura de las redes PONs tradicionales desde 20 km hasta 100 km y combinan el segmento de acceso y la red metropolitana en un sistema integrado. De este modo, las arquitecturas LR-PON pueden simplificar la red, reduciendo el número de interfaces de equipos y elementos de red, lo que conlleva una reducción significativa de los gastos de capital (CapEx) y operativos (OpEx) de la red. La tecnología LR-PON ha sido pensada para su utilización en entornos de baja densidad con el objetivo de eliminar centrales y conseguir una gestión centralizada.

3 Despliegue de Redes PON en Entornos Rurales

Para el diseño de redes PON es necesario utilizar algoritmos de planificación que permitan determinar la posición óptima de las centrales con las OLT y los cables de fibra a establecer para conseguir una estructura en árbol que conecte las ONTs con las

OLTs acorde con las características y restricciones de dichas redes. Estos algoritmos toman como entrada la distribución de la población en las localidades en las que se desplegará la tecnología y utilizan un modelo de costes para dicho despliegue. El coste por conexión depende claramente de la densidad de población del área de cobertura. Así en las áreas de gran densidad de población, los costes por conexión resultante son mucho menores que en las áreas con menor densidad de población. Esto hace que muchos operadores se planteen la conveniencia o no de llevar esta tecnología a zonas de baja densidad de población. Para evitar que haya poblaciones que no disfruten de un acceso a Internet de banda ancha, el sector público (gobiernos nacionales, regionales y/o locales) deben implantar políticas para conseguir que los operadores realicen dicho despliegue y las redes PON lleguen al mayor número de habitantes (preferiblemente a todos).

El modelado de costes de una red PON está compuesto por costes de instalación e infraestructura (*CapEx, capital expenditures*) y costes de operación y mantenimiento (*OpEx, operational expenditures*). En este estudio nos vamos a centrar en los primeros y en concreto en el despliegue de fibra necesario para llegar hasta las poblaciones con conexiones PON o LR-PON dependiendo de la distancia entre ONTs y OLT. Como se ha explicado en el apartado anterior, la topología más utilizada en redes PON es una topología en árbol desde la OLT a las ONTs. Por otro lado, las OLTs estarán conectadas al punto de acceso a la red de área extensa (WAN, *wide area network*) o red troncal. En este artículo supondremos un enlace punto a punto desde las centrales donde se ubican las OLTs a dicho punto de acceso. Cuando se trata de instalación de infraestructura de red PON, el coste principal es debido a la obra civil necesaria para la instalación de la fibra óptica. Esta instalación puede ser realizada de forma área, canalizada o directamente enterrada. Al ser grandes las distancias en el entorno rural, este coste va a ser muy elevado comparado con el resto de componentes de la red. Para conseguir abaratar costes, pueden plantearse varias políticas para el despliegue de redes PON:

- **Modelo privado:** toda la infraestructura es desplegada de forma privativa por cada operador de red. De esta forma, cada operador debe hacer frente todos los gastos de instalación. La consecuencia inmediata es que los operadores seleccionan las poblaciones a las que proporcionan acceso evitando aquellas en las que la rentabilidad no sea suficiente por su tamaño de la población. Intentan mantener el coste por conexión suficientemente bajo para mantener sus márgenes de beneficio.
- **Modelo privado subvencionado:** Al igual que en el caso anterior, toda la infraestructura pertenece al operador así como los costes de instalación. En este caso, el sector público subvenciona parte de la infraestructura para asegurar que la conexión llegue al mayor número de ciudadanos posibles o incluso a todos. En este modelo, si se desea que varios operadores desplieguen redes PON hasta todas las poblaciones para evitar monopolios y falta de oferta, el coste para el sector público de la subvención se multiplicaría, en principio, por el número de operadores.

- Modelo de compartición de infraestructuras: los operadores realizan acuerdos voluntarios entre ellos o con la ayuda de las administraciones públicas, con el fin de cointegrar o utilizar de forma compartida elementos de red.
- Modelo público-privado: Esta es la propuesta que planteamos en este artículo. Para rebajar los costes del despliegue, el sector público hace la instalación y mantenimiento de parte de la infraestructura. En concreto, se encargaría de instalar los cables entre las centrales donde se alojan los OLTs y el punto de acceso WAN. Estas fibras se pondrían a disposición de los operadores de forma gratuita. Además, también pondrían a disposición de los operadores el espacio para alojar la central con los OLTs. A este respecto, conviene señalar que el sector público tiene espacios disponibles en todas las localidades para dicho cometido por lo que no le supone un coste a mayores. A cambio de la cesión de dicha infraestructura (centrales más fibra desde ellas hasta el punto de acceso WAN) los operadores se comprometerían a llevar redes PON a todas las localidades seleccionadas por el sector público. Una de las ventajas es que se puede ceder la infraestructura a varios operadores puesto que el ancho de banda de las tecnologías ópticas es tan elevado que permite multiplexar todo el tráfico en pocas fibras (normalmente una). Al asegurar que varios operadores dan servicio PON en todas las localidades, se evitan riesgos de monopolio. Por otro lado, la infraestructura pública es totalmente pasiva por lo que no tiene ningún coste de operación: lo que se cede son las fibras pero cada operador instalaría los transceptores en cada extremo dependiendo de sus necesidades. Además, los costes de mantenimiento son muy bajos dado que solo deberían ser arregladas las fibras en caso de corte de éstas. Por último, el sector público puede utilizar su propia infraestructura para dar servicio propio al sector público en estas localidades.

4 Evaluación de Modelos de Despliegue de PON

4.1 Definición de Caso de Uso: Provincia de Valladolid

En esta sección comparamos el modelo privado con el modelo público-privado descrito anteriormente. Para la comparación de los modelos se ha seleccionado la provincia de Valladolid (Castilla y León, España) como caso de uso debido a que su demografía es similar a gran parte de la región POCTEP (España-Portugal) con lo que los resultados pueden ser extrapolados. En concreto, tiene un núcleo poblacional con una población elevada (Valladolid, capital de la provincia y casi 300000 habitantes) con pocos pueblos con población media (de 1000 a 20000 habitantes) y muchos pueblos con baja población.

Se ha considerado un único punto de acceso a redes WAN situado en la capital de la provincia y se ha buscado mediante una formulación de programación lineal entera (ILP, *integer linear programming*) la localización óptima de los OLTs para reducir el coste del despliegue de los cables de fibra. Se ha limitado la distancia entre ONTs y OLT a 100 km (de acuerdo a las especificaciones de *long-reach* PON) y solo se ha considerado el despliegue de fibra hasta llegar al punto de acceso en cada población. En cada uno de estos árboles, se ha considerado un *splitting* de 64 usuarios por PON,

ratio normalmente utilizada por los operadores en España. En cuanto a la fibra, se ha considerado un valor de 15000 €/km para la instalación de cables de fibra [8] y se utilizan cables de 12 fibras monomodo con un coste de 1000 €/km [9].

4.2 Análisis de los Resultados

En la Fig. 2 se puede observar la estructura en árbol diseñada por el algoritmo de planificación. Cada uno de los puntos rojos es una central donde se alojan OLTs. Esta central será el punto de acceso al municipio en estos pueblos desde donde se tenderán redes PON hasta los usuarios finales. El punto rojo central (donde van a parar todas las líneas rojas) es la capital de provincia y donde se encuentra el punto de acceso a la red WAN. Las líneas rojas entre las centrales y el punto de acceso WAN constan de un cable de 12 fibras. Los puntos azules son las poblaciones donde se da servicio, pero a diferencia de aquellas que tienen centrales con OLTs, en éstas no hay centrales para dicho propósito y sus redes PON son servidas por OLTs en otras poblaciones a las que están unidas por los cables representados en azul. Como se puede ver, en la Fig. 2, el diseño óptimo de la red genera pequeñas estrellas conectadas a la red WAN.

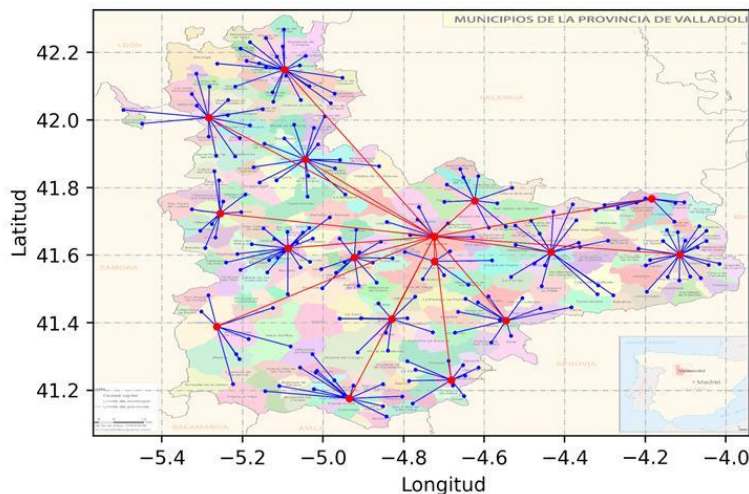


Fig. 2. Mapa con topología diseñada para el despliegue de red PON suponiendo llegar a todos los municipios de la provincia de Valladolid.

En la Fig. 3 se muestra el coste por conexión para el operador dependiendo del porcentaje de conexiones por habitante en cada localidad. Se muestran distintas alternativas: modelo privado llegando a todas las localidades, modelo privado llegando a todas las localidades mayores de 5000, 1000, 500, 200 y 100 habitantes y modelo público-privado llegando a todas las poblaciones.

Como se puede observar en la Fig. 3, el precio por conexión disminuye al aumentar el porcentaje de conexiones por habitante. Esto se debe a que el coste de la instalación de la red tiene una influencia muy pequeña respecto al número de conexiones dado que cada cable tiene 12 fibras y en cada fibra se puede establecer una PON con 64 usuarios por lo que tenemos una granularidad de 768 usuarios por cable. Además, como ya se ha visto, el coste fundamental es la instalación de la obra civil y esta no depende del número de conexiones (siempre que haya al menos una conexión).

Por otro lado, comparando las distintas opciones, se puede observar que los operadores podrían no estar interesados en la instalación de redes de banda ancha basadas en fibra a todas las poblaciones si no hay ningún incentivo público puesto que el coste por conexión crece considerablemente al llegar a municipios con menos población. Por este motivo, sin esos incentivos públicos es probable que solo den servicio a las poblaciones más grandes. Viendo los resultados de la gráfica, gracias a la utilización del modelo público-privado que proponemos, el coste para los operadores llegando a todas las poblaciones es similar al que tendrían si de forma privada solo atienden a poblaciones de más de 200 habitantes.

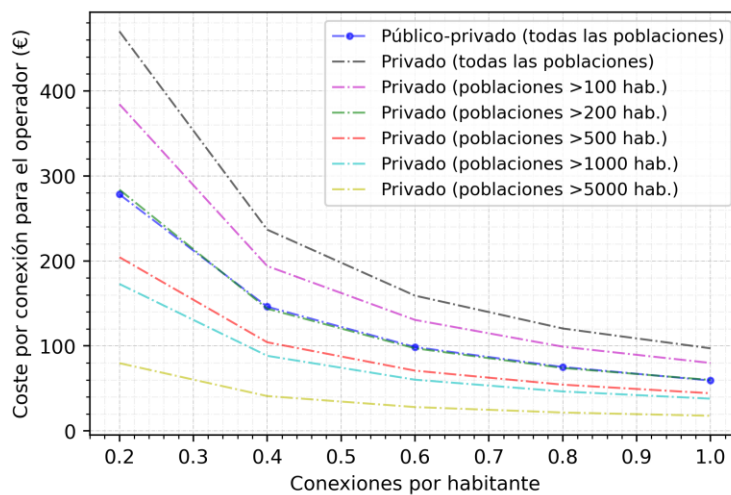


Fig. 3. Coste por conexión para los operadores dependiendo del número de conexiones por habitante y la política seguida.

Tabla 1. Porcentaje de población y número de municipios respecto al total de la provincia dependiendo del número de habitantes.

Poblaciones con tamaño superior a:	Porcentaje de población	Porcentaje de municipios
5000 habitantes	81.29 %	5.78 %

1000 habitantes	92.68 %	17.78 %
500 habitantes	94.62 %	24.44 %
200 habitantes	97.69 %	46.67 %
100 habitantes	99.29 %	72.89 %

A este respecto, en la Tabla 1 se puede observar el porcentaje de poblaciones con más de un determinado número de habitantes y el porcentaje de la población en dichos municipios respecto a los números totales de la provincia [10].

Como se puede observar, si los operadores solo llegan a poblaciones de más de 200 habitantes, el 97.69 % de los habitantes de tendrán la posibilidad de una conexión de banda ancha de fibra pero, en términos de municipios, solo 46.67 % tendrán acceso por PON. Estos números hacen claro la necesidad de implementar políticas públicas para conseguir acceso de banda ancha en todas las poblaciones que permita los nuevos servicios asociados al IoT. La ventaja de la política público-privada propuesta es que hace atractivo llegar a todos los municipios puesto que su coste de instalación por conexión no crece y el sector público asegura acceso de banda ancha a todos sus habitantes independientemente de donde se encuentre su municipio. Además, están las ventajas anteriormente descritas de la posibilidad de utilizar la infraestructura pública por varios operadores para reducir la posibilidad de monopolio y también el uso por parte del sector público de su propia infraestructura para dar acceso de banda ancha a sus servicios en los municipios.

Por último, en la Fig. 4 se muestra el coste por conexión para tanto para el sector público como para el operador dependiendo del porcentaje de conexiones por habitante en cada localidad. Los costes mostrados corresponden al modelo público-privado en el que se da acceso a todas las localidades de la provincia de Valladolid.

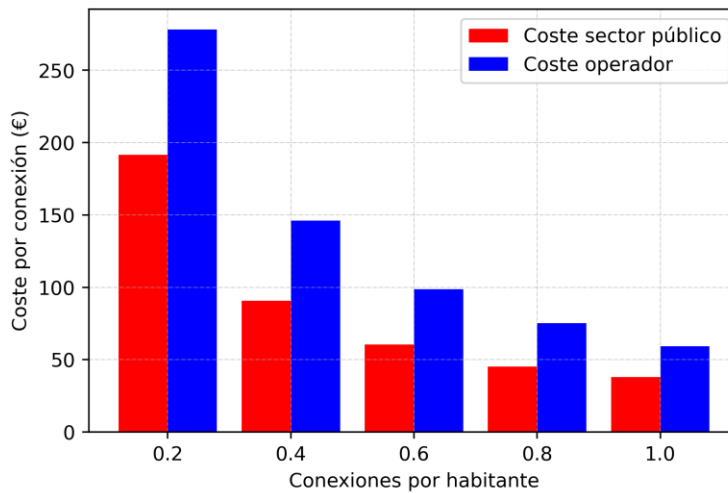


Fig. 4. Coste por conexión para el sector público y el operador dependiendo del número de conexiones por habitante siguiendo el modelo público-privado llegando a todos los municipios.

Como se puede observar en la Fig. 4, los operadores siguen asumiendo el mayor coste del despliegue pero este no es superior al que tendrían que hacer si solo llegasen a poblaciones de más de 200 habitantes. En cuanto al sector público, su coste es similar en el modelo público-privado o en el modelo privado subvencionado si asumimos que la subvención es la diferencia entre el coste por conexión llegando a todos los municipios y llegando solo a los mayores de 200 habitantes. El problema con el modelo subvencionado es que, en este caso, la infraestructura pertenece al operador y para hacer uso de ella el sector público tendría que pagar por su utilización. Además, el coste de la subvención tendría que multiplicarse, en principio, por el número de operadores que se instalan mientras que en el modelo público-privado ese coste no varía. Además, facilita que varios operadores decidan trabajar reduciendo el riesgo de monopolios y fomentando la competencia.

En cuanto a números totales, suponiendo una conexión por habitante, el gasto para el sector público sería de 37.89 € por habitante y en Castilla y León el gasto en comunicaciones del presupuesto para 2021 es de 54.66 € por habitante [11]. Teniendo en cuenta que es una infraestructura financiable y con gran periodo de amortización, puede ser un coste asumible para el sector público.

5 Conclusiones

En este artículo se ha presentado el problema del despliegue de redes ópticas pasivas como tecnologías para el acceso a Internet de banda ancha en entornos rurales de Castilla y León. Además, se ha propuesto una política público-privado que consigue hacer atractivo a ojos de los operadores de comunicaciones, el despliegue de redes PON a todos los municipios (incluso los pequeños en áreas de baja densidad de población). Gracias a la utilización de este modelo, el coste que asumirían los operadores para llegar a todas las poblaciones de la provincia de Valladolid (Castilla y León, España) sería el mismo que si lo hiciesen de forma privada solo a poblaciones de más de 200 habitantes. Sin embargo, gracias a ello, se puede atender a todos los habitantes de la provincia (frente al 97.69 % conseguido con el modelo privado) y llegar a todas las localidades (frente al 46.67 % de las localidades con el modelo privado).

Agradecimientos

La investigación desarrollada en este artículo ha sido financiada por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional FEDER a través del proyecto DISRUPTIVE del Programa Interreg V-A España-Portugal (POCTEP) 2014-2020, el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España (ONOFRE-2: TEC2017-84423-C3-1- P y Go2Edge: RED2018-102585-T), y la Consejería de Educación de Castilla y León y el FEDER (ARTEMIS: VA231P20). Las opiniones son de exclusiva responsabilidad de los autores que las emiten.

Referencias

1. E. Wong et al., "Predictive Resource Allocation for Tactile Internet Capable Passive Optical LANs", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, no. 13, pp. 2629-2641, Julio 2017.
2. State of Fibre: New Market Forecast 2020-2026 revealed. Disponible online: https://www.ftthcouncil.eu/home/latest-news/state-of-fibre-new-market-forecasts-2020-2026-revealed?news_id=3863&back=/resources/key-publications, último acceso diciembre 10, 2020.
3. Europe Broadband status Market forecast by 20202025, FTTH Council, Disponible online: <https://www.ftthcouncil.eu/documents/Reports/2019/FTTH%20Council%20Europe%20Forecast%20for%20EUROPE%202020-2025.pdf>, último acceso: octubre 1, 2020.
4. C. Anzola-Rojas et al., "Multi-access Edge Computing: Características principales y aplicación en entornos rurales de baja densidad de población," III Taller sobre Tecnologías de Información y Comunicación Disruptivas para la Innovación y la Transformación Digital, Diciembre 2020.
5. IEEE 802,3-2005, https://standards.ieee.org/standard/802_3-2005.html, último acceso Junio 3, 2021.
6. ITU-T Recomendaciones G984.1, G984.2, G984.3, G984.4 y G984.5, <https://www.itu.int/rec/T-REC-G/es>, último acceso Junio 3, 2021.
7. H. Song, B. Kim and B. Mukherjee, Long-reach optical access networks: A survey of research challenges, demonstrations, and bandwidth assignment mechanisms, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 12, no. 1, pp. 112-123, 2010.
8. USTelecom, "Dig Once: A Solution for Rural Broadband", Abril 2017, <https://www.ustelecom.org/dig-once-a-solution-for-rural-broadband/>, último acceso Junio 3, 2021.
9. Fibercom, <http://tienda.fibercom.es/cable-1x12-fo-sm-9-125-interior-exterior-a-corrugado-hlfr.html> último acceso Junio 3, 2021.
10. Instituto Nacional de Estadística, "Valladolid: Población por municipios y sexo." <https://www.ine.es/jaxiT3/Datos.htm?t=2904#!tabs-grafico>, último acceso Junio 3, 2021.
11. Presupuestos Junta de Castilla y León <https://hacienda.jcyl.es/web/es/proyecto-presupuestos-2021.html>, último acceso Junio 3, 2021.

Código de campo cambiado