

# Modelo de bucle de acceso para el análisis económico y el diseño óptimo de las arquitecturas PON FTTx

Basado en la solución 10G XGS-PON de Ciena

## 1. Introducción

Este documento presenta un modelo de bucle de acceso (abonado) para el análisis tecno-económico y el diseño óptimo (costos mínimos) de la red óptica pasiva (PON) FTTx (fibra hasta el hogar, edificio, acera) y de las arquitecturas de red de acceso inalámbrico fijo (Fixed Wireless Access, FWA) basadas en la solución 10G XGS-PON de Ciena. Con el tiempo, la PON se ha establecido como la tecnología de acceso preferida entre los operadores de redes de telecomunicaciones para la entrega masiva de servicios de banda ancha a sus clientes.

El principal atractivo de la arquitectura PON es que tiene una planta externa (OSP) y una red de distribución óptica (ODN) totalmente pasivas. Esto simplifica en gran medida la operación y mantenimiento de la red al eliminar los dispositivos electrónicos activos, que son los puntos que normalmente generan fallas desde la OSP. En las redes PON, los componentes electrónicos se limitan al terminal de línea óptica (OLT) ubicado en la oficina central/local y en las instalaciones del cliente.

Sin embargo, a pesar de la gran promesa de la arquitectura PON de ser el vehículo para la introducción masiva de fibra en el tramo del bucle de acceso para que las redes sean completamente ópticas y soporten servicios de banda ancha, los costos siguen siendo la principal barrera para lograr esta meta. El bucle de acceso es la parte más cara de la red de telecomunicaciones, ya que constituye aproximadamente el 40 por ciento del costo de la red de extremo a extremo. Además, al desglosar los costos del bucle de acceso, se puede ver que la OSP representa aproximadamente el 70 por ciento de los costos, que derivan del elevado costo de mano de obra y construcción, mientras que los costos de los componentes electrónicos son de alrededor de un 30 por ciento. Por lo tanto, el costo de la OSP—no los costos de los componentes electrónicos—es la principal barrera que impide a los proveedores de red desplegar fibra a gran escala en el bucle de acceso.

Esto es especialmente cierto en demografías sumamente suburbanas de Norteamérica, donde las distancias del bucle

de acceso—desde la oficina central (CO) hasta el sitio del abonado—generalmente son muy largas, llegando fácilmente a un promedio de 11 kilómetros. En contextos demográficos urbanos y densamente urbanos de Europa y Asia las distancias del bucle de acceso son normalmente inferiores a 5 kilómetros. Esto explica por qué los operadores de red en Europa y Asia tuvieron más éxito con sus despliegues de fibra en el bucle de acceso que sus colegas en Norteamérica.

Ciena propone una solución de red de acceso que ayuda a los operadores de red a abordar el principal desafío de costos de la OSP que enfrentan al tratar de desplegar fibra en el bucle de acceso. Minimizar estos costos es fundamental para que los operadores de red realicen un despliegue masivo y rentable de arquitecturas de acceso PON FTTx para brindar soporte a los servicios de banda ancha, especialmente en áreas suburbanas de Estados Unidos donde el costo de desplegar redes de acceso de fibra óptica es el más elevado.

El modelo de red de acceso que se describe en este trabajo logra el objetivo crítico de ayudar a los operadores de red a minimizar sus costos de OSP. Por lo tanto, los objetivos de este documento son tres:

- Emplear un **modelo de bucle de acceso (en el abonado) para el análisis tecno-económico y el diseño óptimo de las arquitecturas de redes de radio/fibra** para ayudar a los operadores de red a minimizar sus costos de OSP determinando la implementación física óptima de OPS que minimice los costos de red en la arquitectura de acceso PON FTTx
- Que los equipos de Ventas y Marketing de Ciena puedan posicionar la solución 10G XGS PON de Ciena frente a los principales competidores como una solución que aborda el mayor desafío—los costos de OSP/ODN—para los operadores de red, en lugar de solo focalizarse en los costos de los componentes electrónicos del OLT y del punto de terminación de red óptica (ONT)
- Que la solución 10G XGS PON de Ciena ofrezca el costo por bit más bajo comparado con el de los principales competidores

## 2. Estrategia para el diseño óptimo de las arquitecturas de acceso PON FTTx

En una arquitectura de acceso PON, la división óptica de una señal multiplexada sobre una fibra alimentadora en OLT puede implementarse de distintas maneras, entre ellas mediante la división óptica centralizada (o convergencia local) o en cascada, y en distintos nodos de red, que incluyen gabinetes y/o puntos de distribución (Distribution Points, DP) o nodos en columnas. En consecuencia, cómo (centralizada o en cascada) y dónde (nodos en gabinetes o DP) se realiza la división óptica de la red PON puede resultar en arquitecturas PON lógicamente equivalentes, pero con implementaciones físicas muy distintas.

La implementación física de la arquitectura PON impacta en las distancias y capacidades de los cables de bucle de distribución y acometida, lo cual genera una amplia variación en los costos de la OSP. Esto se debe a que el costo de la OSP depende de una combinación de factores, entre ellos los costos de mano de obra, materiales y densidad de edificios y las tasas de penetración del servicio. Como estos parámetros de red y los costos de materiales e instalación varían según la red, es difícil diseñar consistentemente arquitecturas de acceso PON de manera óptima basadas en prácticas establecidas para el diseño de la planta externa, como suelen hacerlo los operadores de red. Para minimizar el costo de la red de extremo a extremo, las arquitecturas de acceso PON deben diseñarse considerando cada caso en particular, teniendo en cuenta cómo estos factores y variables están cambiando en una red específica. El modelo que presentamos aquí minimiza los costos de red al incluir estas variables como datos para determinar el diseño físico de la arquitectura de red de acceso PON FTTx.

## 3. Aplicación del modelo: Casos de uso

Los siguientes dos casos de uso demuestran la solidez de este modelo para ayudar a los operadores de red a minimizar los costos de sus arquitecturas de acceso PON FTTx:

- **Caso de uso 1:** el primer caso de uso analiza varias arquitecturas PON lógicamente equivalentes con una división óptica de 1:32 y su implementación física basada en la solución 10G XGS PON de Ciena. En este caso de uso la red se diseña usando nodos DP de \*t líneas para una red que contiene 1024 edificios con densidades de edificios que van desde 500/km cuadrado (demografía suburbana) hasta 10 000/km cuadrado (demografía urbana ultradensa). Se presume una tasa de penetración de los servicios del 100 por ciento.
- **Caso de uso 2:** el segundo caso de uso considera un entorno competitivo con múltiples operadores o un entorno donde el operador de red toma la decisión estratégica de abocarse solamente a edificios de PYMES y espera razonablemente lograr una tasa de penetración de tan solo entre un 20 y un 25 por ciento.

Esta sección examina el interrogante de cómo debe cambiar el diseño de red (si fuera necesario) del caso de uso 1 para lograr un diseño de red con costos mínimos con el caso de uso 2. Finalmente, esta sección utiliza el modelo presentado para demostrar cómo solucionar este problema.

## 4. La red de bucle de acceso (abonado)

La Figura 1 muestra la red de bucle de acceso (o abonado). La red consiste en una concatenación de nodos y enlaces como se describe a continuación:

- i. El nodo OLT en la oficina central/oficina local (CO/LEX)
- ii. El bucle alimentador
- iii. El gabinete (a veces llamado nodo de unidad de distribución remota [RDU])
- iv. El bucle de distribución
- v. Los puntos de distribución (DP) o nodos en columnas
- vi. El bucle de acometida
- vii. El nodo ONT en las instalaciones del cliente

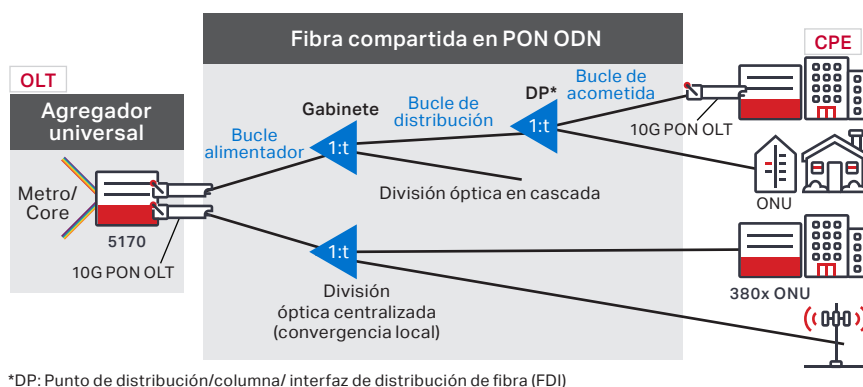


Figura 1. La red de bucle de acceso (abonado) basada en la solución 10G XGS PON de Ciena \*t = 4, 8, 16 y 32

El costo de la OSP en la arquitectura de acceso PON constituye aproximadamente un 70 por ciento del costo de la red, mientras que los componentes electrónicos representan alrededor del 30 por ciento. La disparidad se produce debido a varios factores, que incluyen:

- Características demográficas de la red: densidad de edificios (o kilómetros de ruta cubiertos por la red)
- Tasas de penetración del servicio
- Costos de los materiales de OSP/mano de obra por la instalación de cables con tendido aéreo, directamente enterrados o en conductos bajo tierra, etc.
- Cómo y dónde se implementa la división óptica permite crear arquitecturas PON lógicamente equivalentes con diferentes implementaciones físicas que pueden generar grandes variaciones en los costos

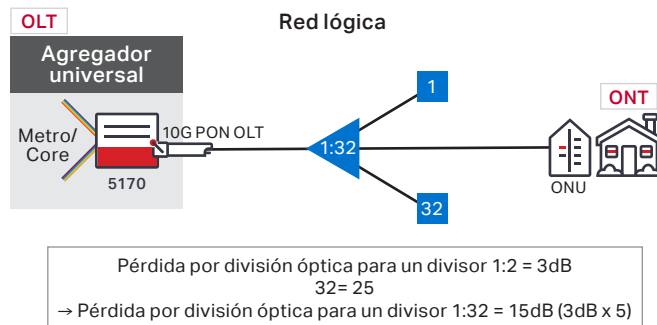
## 5. Análisis de las arquitecturas PON FTTx: Redes lógicamente equivalentes y sus implementaciones físicas

Esta sección analiza distintas arquitecturas de acceso FTTH basadas en PON lógicamente equivalentes y sus implementaciones físicas en las cuales la fibra alimentadora experimenta una división de la señal óptica total de 1:32.

### 5.1 Arquitectura PON #1: 1:32 división centralizada (convergencia local) en el gabinete

#### Análisis de la red lógica

La Figura 2a muestra la arquitectura de red lógica donde un solo cable alimentador de fibra desde el OLT se divide en 32 fibras de distribución mediante un divisor óptico/acoplador



Pérdida por división óptica para un divisor 1:2 = 3dB  
 $32 = 2^5$   
 → Pérdida por división óptica para un divisor 1:32 = 15dB (3dB x 5)

\*DP: Punto de distribución/columna/ interfaz de distribución de fibra (FDI)

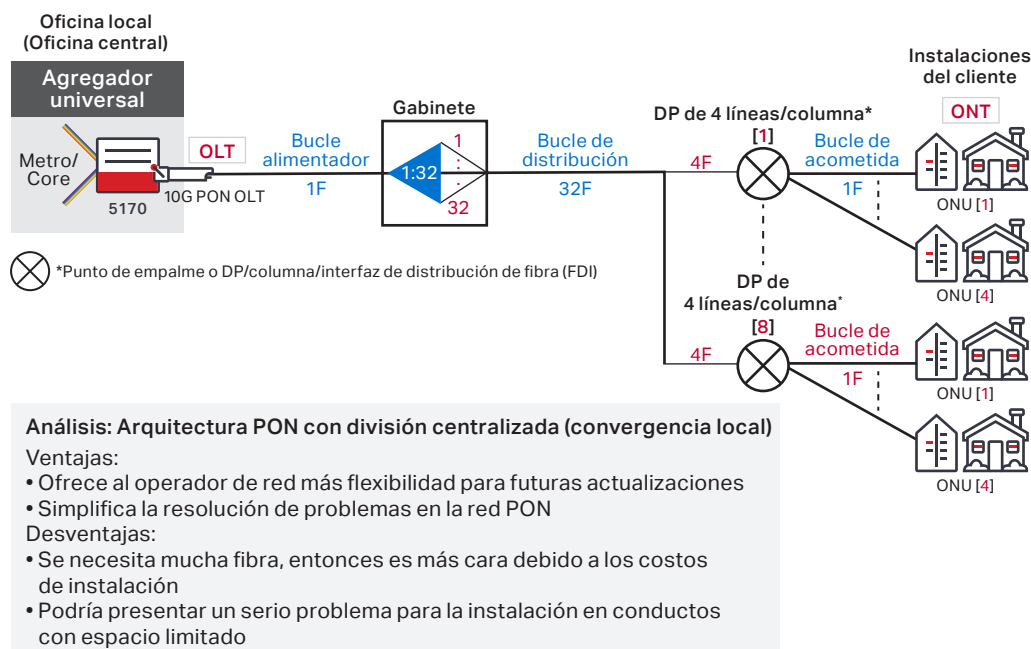
Figura 2b. Arquitectura PON #1: Relación de división lógica 1:32 centralizada (convergencia local) en el nodo en el gabinete

de 1:32. La pérdida de potencia por división óptica se calcula de la siguiente manera:

- Pérdida por división óptica para un divisor 1:2 = 3dB
- Como  $32 = 2^5$
- Entonces, la pérdida por división óptica de una fibra alimentadora con una relación de división óptica de 1:32 = 15dB (3dB x 5)

#### Análisis de la implementación de la red física

La Figura 2b muestra la implementación de la red física de la arquitectura en la cual un solo cable alimentador desde el OLT ubicado en CO/LEX se divide en un cable de distribución de fibra de 32 salidas mediante un divisor óptico 1:32 situado en el nodo en el gabinete. El cable de distribución de fibra de 32 ramificaciones conecta en cadena 8 DP de 4 líneas, es decir una acometida de cuatro hilos de fibra en cada uno de los ocho nodos DP. Cada nodo DP conecta 4 clientes a la red sobre fibras de acometida, como puede verse en la figura.



\*Punto de empalme o DP/columna/interfaz de distribución de fibra (FDI)

#### Análisis: Arquitectura PON con división centralizada (convergencia local)

##### Ventajas:

- Ofrece al operador de red más flexibilidad para futuras actualizaciones
- Simplifica la resolución de problemas en la red PON

##### Desventajas:

- Se necesita mucha fibra, entonces es más cara debido a los costos de instalación
- Podría presentar un serio problema para la instalación en conductos con espacio limitado

Figura 2b. Arquitectura PON #1: Relación de división 1:32 centralizada (convergencia local): división en gabinete: 1:32; DP: sin división (con nodos DP con capacidad de 4 líneas)

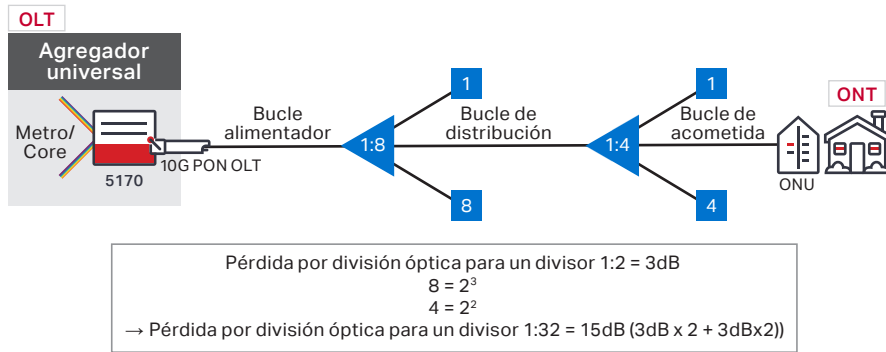


Figura 3a. Arquitectura PON #2: Relación de división óptica lógica 1:32 en cascada: con divisiones 1:8 y 1:4 en cascada

## 5.2 Arquitectura PON #2: División en cascada 1:32: gabinete: 1:8; DP: 1:4

### Análisis de la red lógica

La Figura 3a muestra la arquitectura de red lógica donde una señal transmitida por un solo cable alimentador de fibra desde el OLT se divide en 8 fibras de distribución mediante un divisor óptico en el nodo en el gabinete. Cada una de las ocho fibras de distribución a su vez se divide en cuatro fibras de acometida mediante acopladores 1:4 en los nodos DP, resultando en una división óptica total de 1:32 de una fibra alimentadora. Por lo tanto, la pérdida de potencia total por división óptica se calcula de la siguiente manera:

- Pérdida por división óptica para un divisor 1:2 = 3dB
- Observar que  $8 = 2^3$  y  $4 = 2^2$
- Entonces, la pérdida por división óptica de una fibra alimentadora con una relación de división óptica total de 1:32 = 15dB ( $3dB \times 3 + 3dB \times 2$ )

### Análisis de la implementación de la red física

La Figura 3b muestra la implementación de la red física de la arquitectura en la cual un solo cable alimentador desde el OLT ubicado en CO/LEX se divide en un cable de distribución de fibra de 8 salidas mediante un divisor óptico 1:32 situado en el nodo en el gabinete. El cable de distribución de fibra de 8 ramificaciones conecta 8 DP de 4 líneas en cadena y cada uno de los ocho hilos de fibra a su vez se divide mediante acopladores 1:4 en los nodos DP en cuatro fibras de acometida en cada uno de los ocho nodos DP. Cada nodo DP conecta 4 clientes a la red sobre fibras de acometida, como puede verse en la figura.

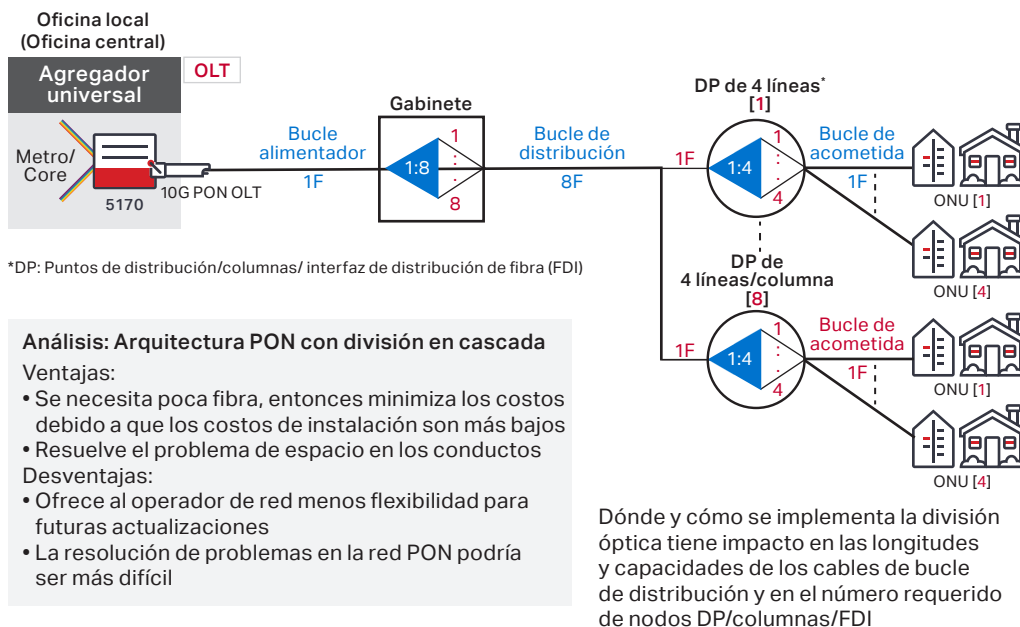


Figura 3b. Arquitectura PON #2: Implementación física equivalente de la división 1:32 en cascada: división en gabinete: 1:8; división en el nodo DP: 1:4 con DP de 4 líneas en cadena

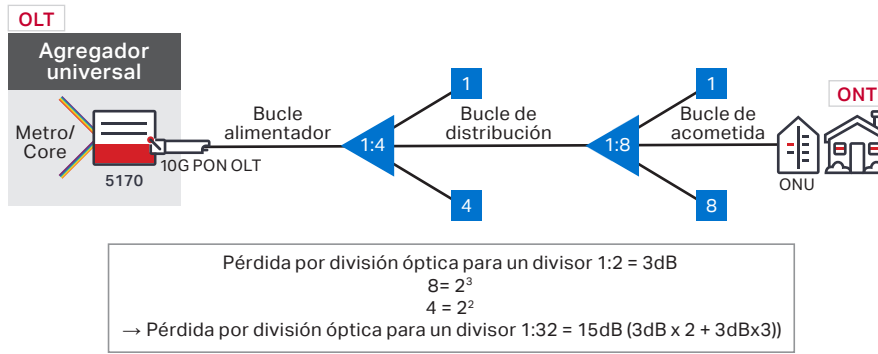


Figura 4a. Arquitectura PON #3: Relación de división óptica lógica 1:32 en cascada: con divisiones 1:4 y 1:8 en cascada

### 5.3 Arquitectura PON #3: División en cascada 1:32: gabinete: 1:4; nodos DP: 1:8

#### Análisis de la red lógica

La Figura 4a muestra la arquitectura de red lógica donde una señal multiplexada en un solo cable alimentador de fibra desde el OLT primero se divide en 4 fibras de distribución mediante un divisor óptico 1:4 en el nodo en el gabinete. Cada una de las cuatro fibras de distribución a su vez se divide en ocho fibras de acometida mediante acopladores 1:8 en los nodos DP, resultando en una división óptica total de 1:32 de una fibra alimentadora. Por lo tanto, la pérdida de potencia total por división óptica se calcula de la siguiente manera:

- Pérdida por división óptica para un divisor 1:2 = 3dB
- Como  $4 = 2^2$  y  $8 = 2^3$
- Entonces, la pérdida por división óptica de una fibra alimentadora con una relación de división óptica total de  $1:32 = 15\text{dB}$  ( $2\text{dB} \times 2 + 3\text{dB} \times 3$ )

#### Análisis de la implementación de la red física

La Figura 4b muestra la implementación de la red física de la arquitectura en la cual una señal transmitida por solo cable alimentador de fibra desde el OLT primero se divide en un cable de distribución de fibra de cuatro ramificaciones mediante un acoplador óptico 1:4 en el nodo en el gabinete. El cable de distribución de fibra de 4 ramificaciones conecta 8 DP de 4 líneas en cadena y cada uno de los cuatro hilos de fibra a su vez se divide mediante acopladores 1:8 en los nodos DP en ocho fibras de acometida en cada uno de los cuatro DP. Cada nodo DP conecta 8 clientes a la red sobre fibras de acometida, como puede verse en la figura.

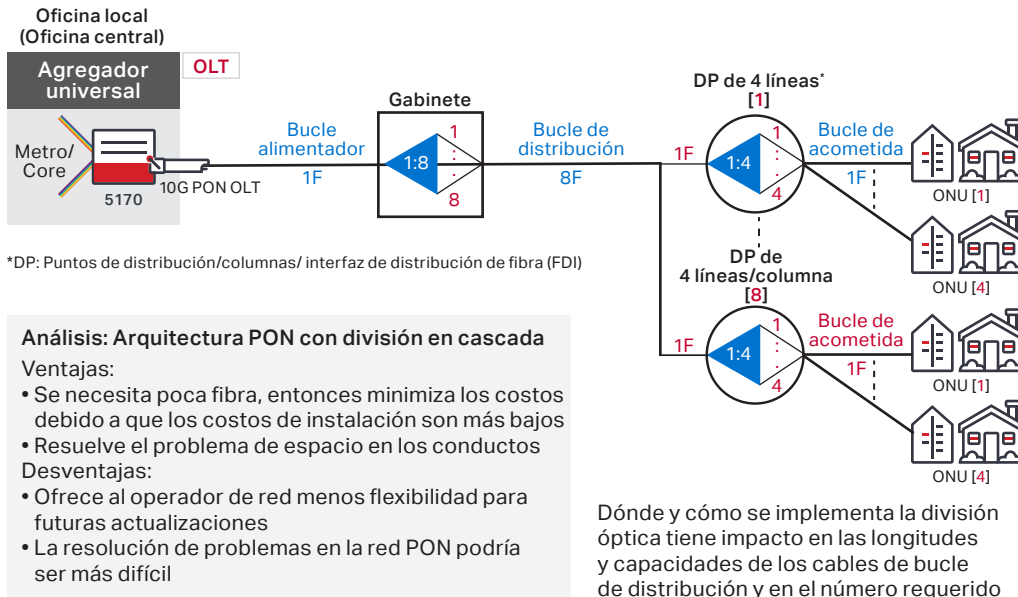


Figura 4b. Arquitectura PON #3: Implementación física equivalente de la división 1:32; división en cascada: división en gabinete: 1:4; división 1:8 en nodos DP; (con DP de 8 líneas en cadena)

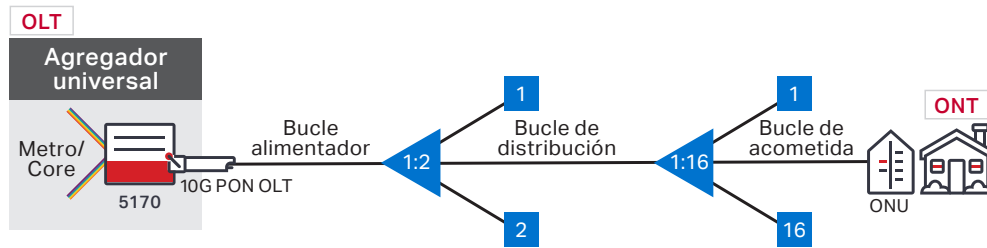


Figura 5a. Arquitectura PON #4: división óptica lógica 1:32 en cascada: con divisiones 1:2 y 1:16 en cascada

#### 5.4 Arquitectura PON #4: Relación de división óptica 1:32 en cascada: gabinete: 1:2; nodos DP: 1:16

##### Análisis de la red lógica

La Figura 5a muestra la arquitectura de red lógica donde una señal transmitida por un solo cable alimentador de fibra desde el OLT primero se divide en dos fibras de distribución mediante un acoplador óptico 1:2 en el nodo en el gabinete. Cada una de las dos fibras de distribución a su vez se divide en 16 fibras de acometida mediante acopladores 1:16 en los nodos DP, resultando en una división óptica total de 1:32 de una fibra alimentadora. Por lo tanto, la pérdida de potencia total por división óptica se calcula de la siguiente manera:

- Pérdida por división óptica para un divisor 1:2 = 3dB
- Observar que  $2 = 2^1$  y  $16 = 2^4$
- Entonces, la pérdida por división óptica de una fibra alimentadora con una relación de división óptica total de 1:32 = 15dB ( $3\text{dB} \times 1 + 4\text{dB} \times 3$ )

##### Análisis de la implementación de la red física

La Figura 5b muestra la implementación de la red física de la arquitectura en la cual un solo cable alimentador de fibra desde el OLT primero se divide en un cable de distribución

de fibra de dos ramificaciones mediante un acoplador óptico 1:2 en el nodo en el gabinete. El cable de distribución de fibra de dos ramificaciones conecta 2 nodos DP de 16 líneas en cadena y cada uno de los dos hilos de fibra a su vez se divide mediante acopladores 1:16 en los nodos DP en 16 fibras de acometida en cada uno de los dos nodos DP. Cada nodo DP conecta 16 clientes a la red sobre fibras de acometida, como puede verse en la figura.

#### 5.5 Arquitectura PON #5: Relación de división óptica 1:32 centralizada (convergencia local): gabinete: sin división; nodos DP: 1:32

##### Análisis de la red lógica

La Figura 6a muestra la arquitectura de red lógica donde un solo cable alimentador de fibra desde el OLT se divide en 32 fibras de acometida mediante un acoplador óptico 1:32 en el nodo DP. La pérdida de potencia por división óptica se calcula de la siguiente manera:

- Pérdida por división óptica para un divisor 1:2 = 3dB
- $32 = 2^5$
- Entonces, la pérdida por división óptica de una fibra alimentadora con una relación de división óptica de 1:32 = 15dB ( $3\text{dB} \times 5$ )

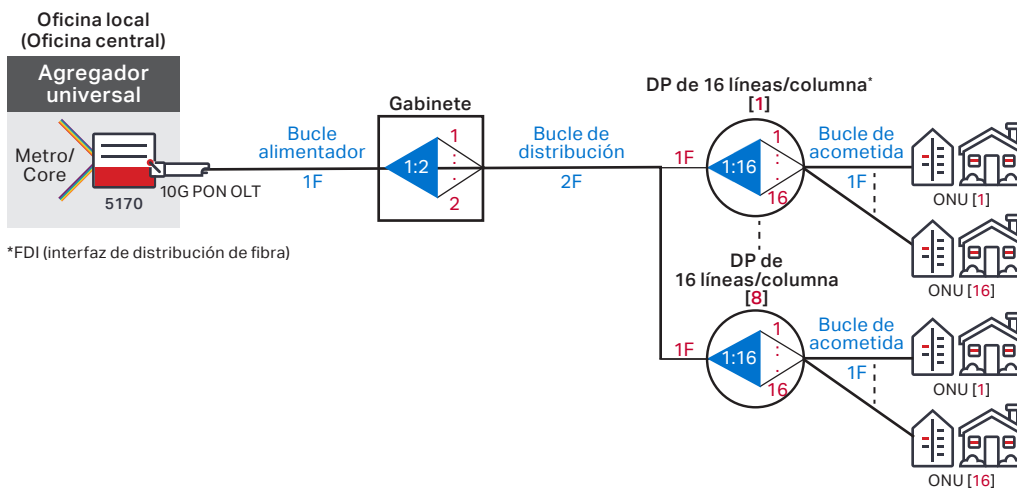


Figura 5b. Arquitectura PON #4: Implementación física equivalente de la división 1:32: división en cascada: división en gabinete: 1:2; división de nodos DP: 1:16 (con DP de 16 líneas/columnas en cadena)

## Análisis de la implementación de la red física

La Figura 6a muestra la implementación de la red física de la arquitectura donde un solo cable alimentador de fibra desde el OLT se divide en 32 fibras de acometida mediante un acoplador óptico 1:32 en el nodo DP. Observar que en esta arquitectura, el nodo en el gabinete es solo un punto de empalme.

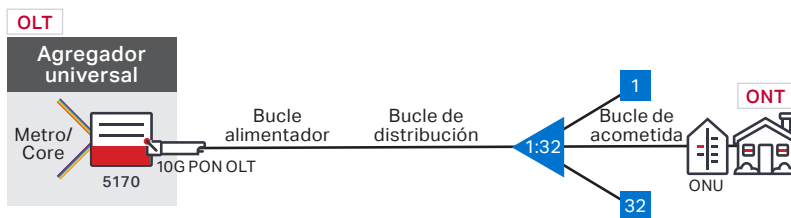


Figura 6a. Arquitectura PON #5: Relación de división óptica lógica 1:32 centralizada (convergencia local)

## 6. Modelo de bucle de acceso para el análisis técnico-económico y el diseño óptimo de las arquitecturas PON FTTx/TWA

El modelo propone que la unidad de distribución remota (RDU)/gabinete se alimente desde la oficina local (LEX) o central sobre un cable alimentador de fibra como muestra la figura 7.

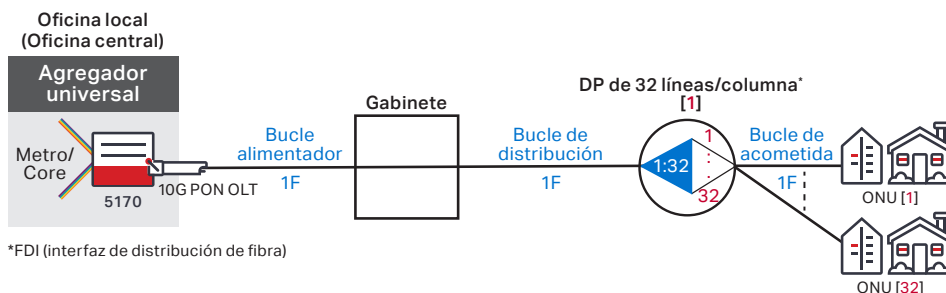


Figura 6b. Arquitectura PON #5: Relación de división óptica lógica 1:32 centralizada (convergencia local): con gabinete: sin división; división en el nodo DP: 1:32 (con nodos DP de 32 líneas)

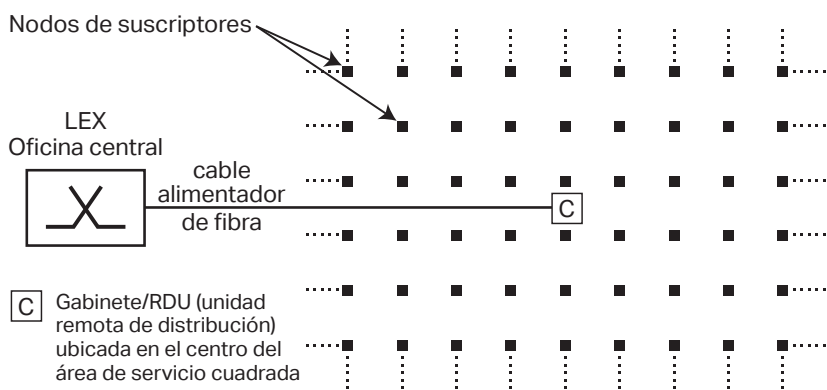
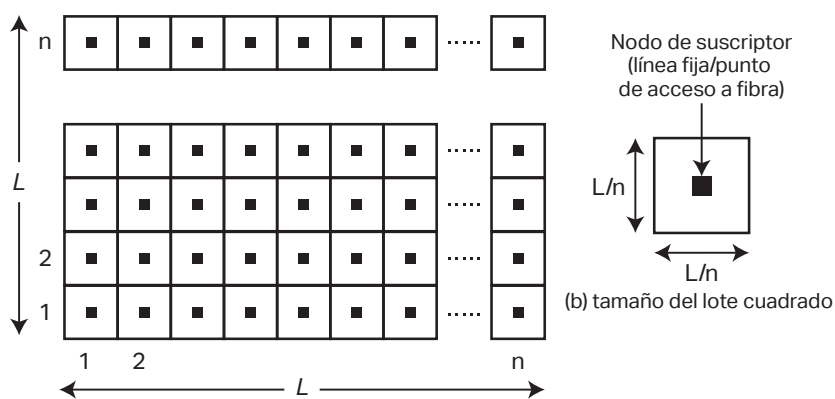


Figura 7. El modelo propone un área de servicio cuadrada de lado  $L$  que contiene  $n^2$  lotes de viviendas distribuidos uniformemente y cuya alimentación proviene de un cable alimentador de fibra desde la oficina local

- Generalmente, en una red real, el área de servicio tiene una distribución geográfica irregular en la cual los lotes de viviendas no están distribuidos de manera uniforme.
- Sin embargo, a efectos de desarrollar un modelo de red, suponemos que el área de servicio del gabinete es un cuadrado de lado  $L$  donde los lotes de viviendas  $n^2$  están distribuidos uniformemente, como se muestra en la Figura 8.
- Este supuesto simplifica razonablemente el modelado de la red aunque brinda resultados confiables.

### 6.1 Formulación del modelo para el cálculo de las longitudes de los cables de distribución y de bucle de acometida

A partir de la Figura 8, es fácil mostrar que los lotes de viviendas son cuadrados de tamaño  $L/n \times L/n$ . Por lo tanto, el área ocupada por el lote de viviendas es  $(L/n)^2$ , siendo la densidad de los lotes de vivienda =  $(n/L)^2$ . Luego, la figura muestra los algoritmos del modelo para generar las distancias de los cables de distribución y bucle de acometida como funciones paramétricas del tamaño del lote de viviendas,  $L/n$ .



(a) Área de servicio cuadrada con gabinete/RDU (se asume que el nodo RDU está situado en el centro del área de servicio)

Figura 8. Modelo de áreas de servicio cuadradas con gabinetes/RDU con una distribución uniforme de suscriptores

## 6.2 Algoritmos del modelo

Seguidamente, el algoritmo del modelo genera las distancias de los cables de distribución y bucle de acometida de manera iterativa, lo que permite su fácil implementación en un programa informático. Las longitudes totales de los cables de bucle de acometida **b** se calculan por medio del siguiente algoritmo:

$$b(j, k) = 2 \frac{L}{n} \sum_{k=0}^{q-1} \sum_{j=0}^{p-1} (1+2j) + (1+2k) \quad \text{Ecuación 1}$$

Siendo L la longitud del lado del área de servicio en la cual se ubica el gabinete/RDU y  $n^2$  el número de lotes de viviendas en el área de servicio del gabinete **j, k**, son números enteros.

Siendo  $p_t, q_t$  números enteros cuyos valores dependen de la capacidad de terminación del DP, como se indica a continuación:

- (i)  $P_4 = 1$  y  $q_4 = 1$  Para áreas de servicios de DP con capacidad de 4 líneas
- (ii)  $P_8 = 2$  y  $q_8 = 1$  Para áreas de servicios de DP con capacidad de 8 líneas
- (iii)  $P_{16} = 4$  y  $q_{16} = 1$  Para áreas de servicios de DP con capacidad de 16 líneas
- (iv)  $P_{32} = 8$  y  $q_{32} = 1$  Para áreas de servicios de DP con capacidad de 32 líneas

Del mismo modo, las longitudes totales de los cables de bucle de distribución **d** se calculan por medio del siguiente algoritmo:

$$d(j, k) = 4 \frac{L}{n} \sum_{k=0}^{q(t)-1} \sum_{j=0}^{j(t)-1} ([2g(1+j)-1]p_t + (1+2k)q_t) \quad \text{Ecuación 2}$$

Siendo  $g, j_d(t); k_d(t)$  números enteros

$$j_d(t) = n/4gP_t \text{ and } k_d(t) = n/4q_t$$

- $1 \leq g \leq n/4P_t$ ; **g** es un parámetro crítico del modelo usado para configurar la red del bucle de distribución según se requiera:
  - $g=1$  => que los nodos DP se desplieguen en una topología punto a punto desde el nodo en el gabinete
  - $g>1$  => que los nodos DP estén en cadena desde el nodo del gabinete siendo g el número de nodos DP que comparten un cable de distribución común
- El modelo también puede implementar configuraciones de anillo para la protección de rutas

Las distancias de los bucles se obtienen en función de los parámetros de tamaño del lote de viviendas cuadrado **L/n**. Por lo tanto, para estimar las distancias de los bucles, el modelo solo requiere ingresar los parámetros geográficos/demográficos y de la red que permitan estimar **L/n**.

Este modelo requiere ingresar cualquiera de los siguientes parámetros demográficos y de red fácilmente disponibles:

- Densidad de edificios
- Millas o kilómetros de ruta cubiertos por la red

### Datos a ingresar en el modelo

- Densidad de edificios
- Millas o kilómetros de ruta cubiertos por la red
- Costos del sistema PON, del material de OSP y de la instalación



### Algoritmos del modelo

Las distancias de los bucles de distribución y acometida se obtienen como funciones paramétricas del tamaño del lote de viviendas cuadrado  $L/n$ .

$$b(j, k) = 2 \frac{L}{n} \sum_{k=0}^{q-1} \sum_{j=0}^{p-1} (1+2j) + (1+2k)$$

$$d(j, k) = 4 \frac{L}{n} \sum_{k=0}^{q(t)-1} \sum_{j=0}^{j(t)-1} ([2g(1+j)-1]p_t + (1+2k)q_t)$$



### Datos obtenidos con el modelo

- Las relaciones de división óptica óptimas de los nodos en DP y gabinete para minimizar los costos de la red PON de extremo a extremo
- Costos detallados de nodos y enlaces
- Lista de materiales (BOM)
  - Longitudes de los cables de bucle de acceso (alimentación, distribución y acometida) y sus capacidades
  - Número necesario de empalmes, pigtailes, conectores, terminales y otros materiales
  - Costos estimados de instalación y construcción de la OSP, para cables con tendido aéreo, directamente enterrados o conductos bajo tierra



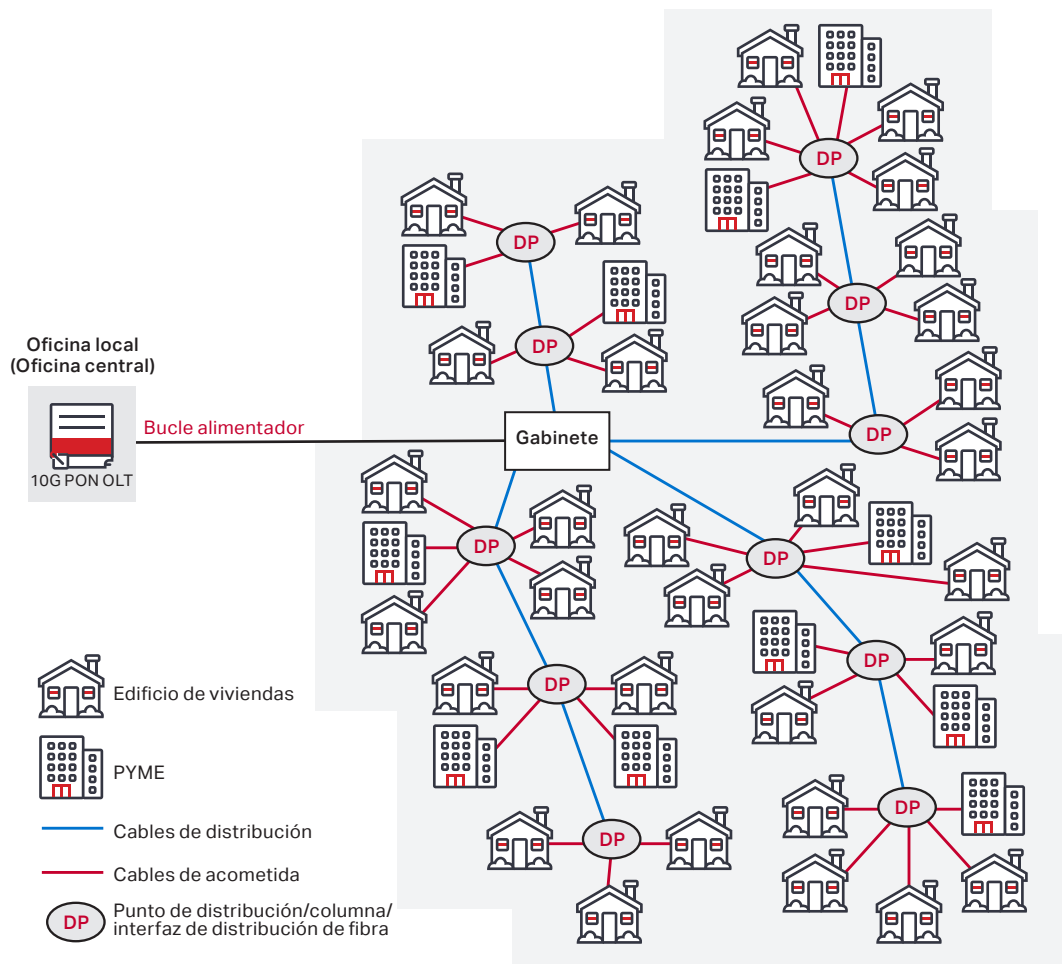


Figura 9a. Aplicación del modelo, caso de uso 1: Minimizar el costo de la solución 10G XGS-PON de Ciena para PYMES y hogares con una tasa de penetración del 100 por ciento

## 7. Aplicación del modelo de bucle: Casos de uso

### 7.1 Caso de uso 1

La Figura 9 muestra un área de servicio de un gabinete de red con 1024 edificios abastecidos por una fibra alimentadora desde el OLT en una oficina central. El propósito es diseñar una arquitectura de red PON FTTH de bajo costo para la entrega de una tasa promedio de bits por suscriptor de servicio de tasa de bits simétrica de 311 Mb/s basada en la solución 10G XGS PON de Ciena con una relación de división óptica total de 1:32 de una señal multiplexada en una fibra alimentadora. Para ello es necesario:

- Estimar los costos de red de extremo a extremo (OSP/ODN + componentes electrónicos) para los ~1024 edificios y el costo por suscriptor para las densidades de edificios: 500/km cuadrado; 1000/km cuadrado; 3000/km cuadrado; 5000/km cuadrado; y 10 000/km cuadrado
- Determinar las arquitecturas de acceso PON—relaciones óptimas de los divisores acopladores en el gabinete y en los nodos DP—que minimizan los costos de la red de extremo a extremo
- Prever una tasa de penetración del servicio del 100 por ciento

### 7.2 Caso de uso 2

En el caso de uso 1, ¿qué sucede si las operaciones de red en el área no son monopolios, sino que operan en un entorno competitivo con dos o tres operadores?

- En este escenario, podría esperarse razonablemente que los operadores de red alcancen una tasa de penetración que no supere entre el 20 y el 25 por ciento aproximadamente.
- O bien, si el operador de red toma la decisión estratégica de focalizarse solamente en los edificios de empresas PYMES en la red, que comprenden solamente entre el 20 y el 25 por ciento de los edificios en la red, ver la Figura 9b.
- ¿De qué manera debe cambiar, si fuera necesario hacerlo, el diseño de la red en el caso de uso 1, con una tasa de penetración del 100 por ciento, para que el operador logre un diseño de red de bajo costo con este nuevo escenario de menor tasa de penetración del servicio?

En la siguiente sección mostramos cómo desplegar este modelo para minimizar los costos de una red PON FTTH basada en la solución 10G XGS-PON de Ciena mediante el análisis de distintas arquitecturas de red de acceso PON lógicamente equivalentes, pero cuyos diseños o implementación física de OSP/ODN resultan en grandes diferencias en términos de costos de red a medida que varían las densidades de viviendas y/o las tasas de penetración del servicio.

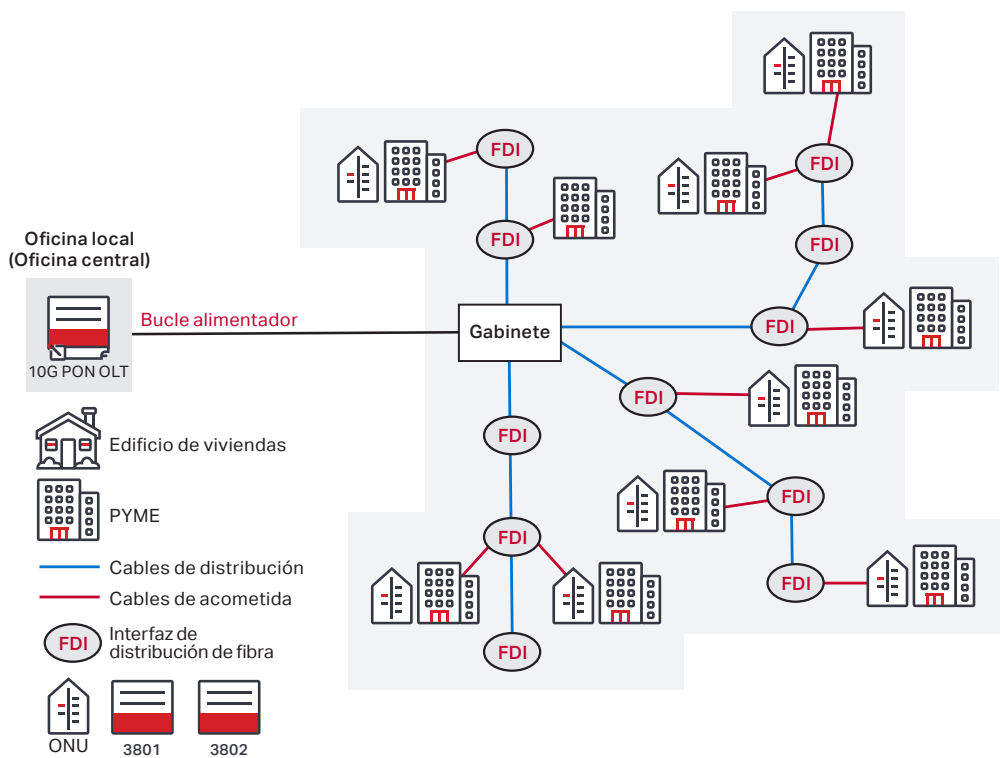
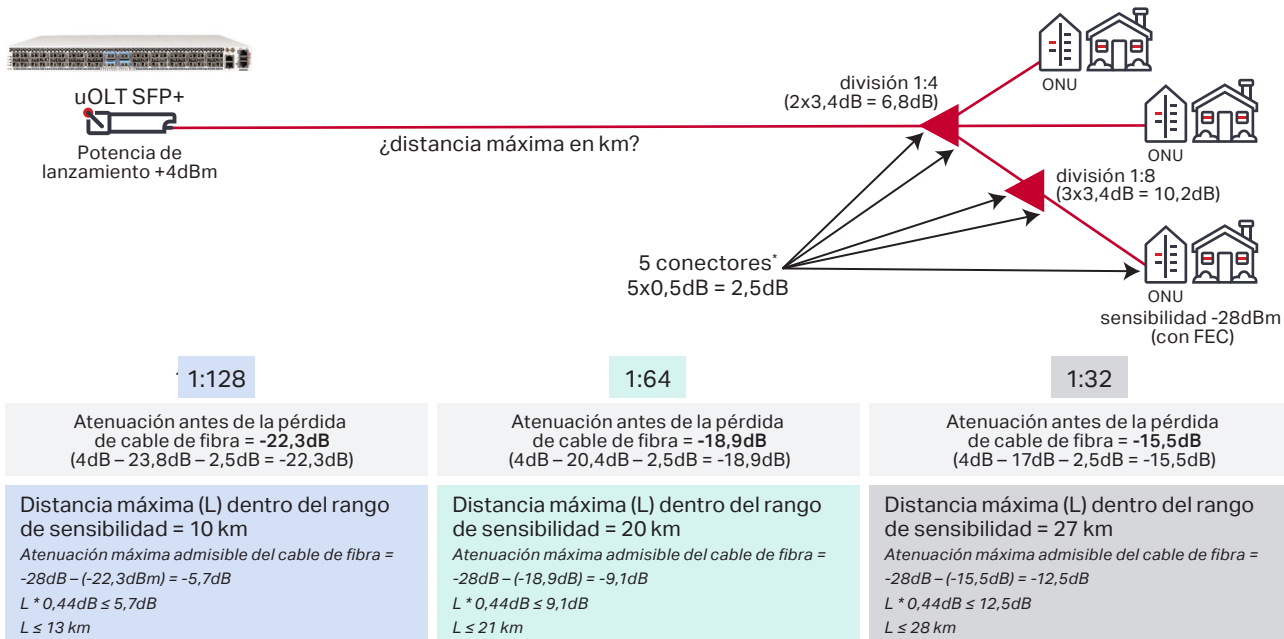


Figura 9a. Aplicación del modelo, caso de uso 2: Minimizar el costo de la solución 10G XGS-PON de Ciena para PYMES solamente (~25 por ciento de edificios)

### 7.3 Configuraciones de la solución 10G XGS-PON de Ciena utilizadas



Números basados en las especificaciones de la ITU. Varían según el proveedor de equipos ópticos: algunos exceden las especificaciones y proporcionan mejor alcance. Los márgenes EOL (final de vida) pueden variar.

Las distancias incluyen cierto margen. CoEx WDM no se tuvo en cuenta.

\*solo 4 conectores si se usa el conector uONU

Figura 10. Solución 10G XGS-PON de Ciena: rangos de división 1xn (n = 32, 64 o 128)

Caso de uso 1: Costos de la arquitectura PON FTTH/suscriptor (basada en la solución 10G XGS-PON de Ciena con división óptica total de 1:32 de un cable alimentador de fibra)

Variación de los costos de red con la demografía y la capacidad de terminación de los nodos DP: tasa de penetración del servicio: 100 % (Costos normalizados al costo de los nodos DP con capacidad de 8 líneas)

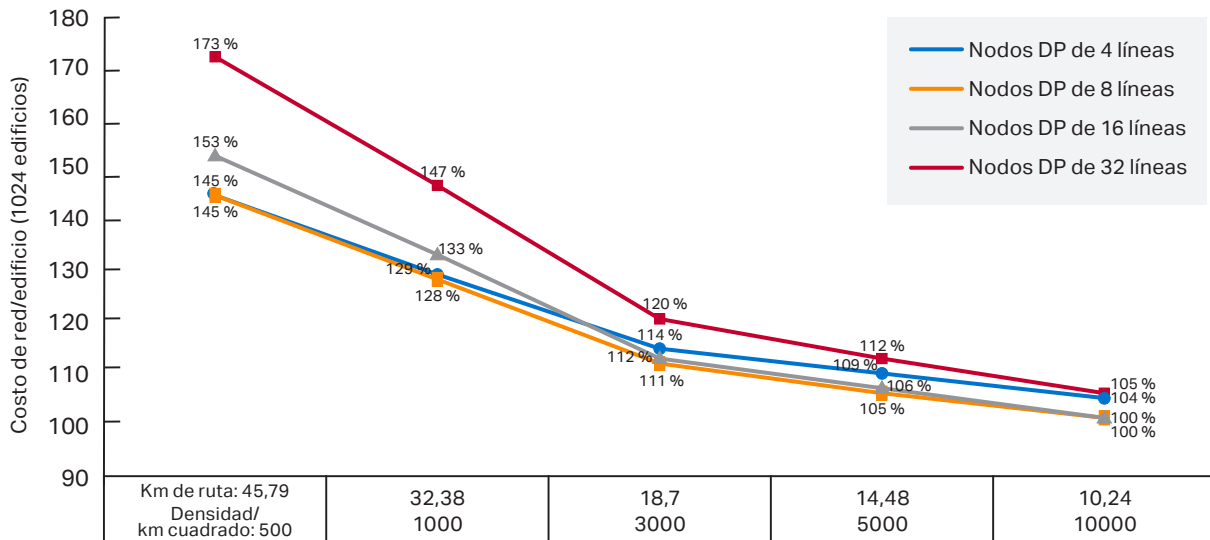


Figura 11a. Caso de uso 1: Costos de la arquitectura de acceso PON FTTH por suscriptor basada en la solución 10G XGS-PON de Ciena con una división óptica total de 1:32 de un cable de fibra (tasa de penetración del servicio: 100 por ciento)

## 8 Aplicaciones del modelo de bucle de acceso: Casos de uso: análisis de los resultados

### 8.1 Caso de uso 1 (con una tasa de penetración del servicio del 100 por ciento)

El caso de uso 1 emplea las siguientes cuatro arquitecturas de acceso PON FTTH lógicamente equivalentes:

1. Arquitectura PON #1: Una relación de división de 1:32 en cascada: Gabinete: 1:8; DP: 1:4 (nodos DP con capacidad de 4 líneas)
2. Arquitectura PON #2: Una relación de división de 1:32 en cascada: Gabinete: 1:4; DP: 1:8 (nodos DP con capacidad de 8 líneas)
3. Arquitectura PON #3: Una relación de división de 1:32 en cascada: Gabinete: 1:2; DP: 1:16 (nodos DP con capacidad de 16 líneas)
4. Arquitectura PON #4: Un gabinete 1:32 con convergencia local/centralizada: sin división; DP: 1:32 (nodos DP con capacidad de 32 líneas)

A partir de la solución 10G XGS-PON Ciena, la Figura 11a muestra la variación de los costos de las cuatro arquitecturas de acceso PON FTTH por suscriptor en función de la densidad de viviendas y la capacidad de

Tabla 1: Caso de uso 1: Costos de la arquitectura PON FTTH (basada en la solución 10G XGS-PON de Ciena: los costos se normalizan al costo de nodos DP de 8 líneas con una densidad de viviendas de 10 000 por km cuadrado; tasa de penetración del servicio: 100%

Densidad/km cuadrado	500	1000	3000	5000	10000
Km de ruta	45,79	32,38	18,7	14,48	10,24
HHP	1024	1024	1024	1024	1024
HHP con 100% de tasa de ocupación	1024	1024	1024	1024	1024
Nodos DP de 4 líneas	145 %	129 %	114 %	109 %	104 %
Nodos DP de 8 líneas	145 %	128 %	111 %	105 %	100 %
Nodos DP de 16 líneas	153 %	133 %	112 %	106 %	100 %
Nodos DP de 32 líneas	173 %	147 %	120 %	112 %	105 %
Si el diseño de la arquitectura PON no está optimizado: costos máximos (usando nodos DP de 32 líneas)	173 %	147 %	120 %	112 %	105 %
Si el diseño de la arquitectura PON está optimizado: costos mínimos (usando nodos DP de 8 líneas)	145 %	128 %	111 %	105 %	100 %
Diferencia/penalización de costos en un red de acceso PON con un diseño subóptimo	28 %	19 %	9 %	6 %	5 %

Figura 11b. Caso de uso 1: Costos de la arquitectura PON FTTH basada en la solución 10G XGS-PON de Ciena: Los costos se normalizan al costo de nodos DP de 8 líneas con una densidad de viviendas de 10 000 por km cuadrado (tasa de penetración del servicio: 100 por ciento)

terminación del nodo DP. Los costos se normalizan al costo de los nodos DP de capacidad de 8 líneas, lo cual produce el costo más bajo con una densidad de viviendas de 10 000 por km cuadrado.

### Análisis de los resultados: Caso de uso 1

Los costos de la arquitectura de acceso PON FTTH muestran una gran variación inversa en función de la densidad de viviendas.

Las Figuras 11a y 11b muestran:

- Los costos de la arquitectura PON FTTH presentan una variación inversa con la densidad en viviendas; es decir, los costos de la arquitectura PON FTTH disminuyen a medida que aumentan las densidades de viviendas.
  - Por ejemplo, para la arquitectura PON FTTH con nodos DP de capacidad de 8 líneas, el costo disminuye en un 45 por ciento (de 145 a 100 por ciento) a medida que la densidad de viviendas aumenta de 500 por km cuadrado a 10 000 por km cuadrado.
  - Por ejemplo, para la arquitectura PON FTTH con nodos DP de capacidad de 32 líneas, el costo disminuye en un 68 por ciento (de 173 a 105 por ciento) a medida que la densidad de viviendas aumenta de 500 por km cuadrado a 10 000 por km cuadrado.

Los costos de la arquitectura de acceso PON FTTH muestran elevada sensibilidad a la capacidad de terminación del nodo DP con bajas densidades de viviendas.

Con una densidad de viviendas baja de 500 por km cuadrado, existe una diferencia muy grande en los costos (28 por ciento), entre el costo mínimo alcanzado con nodos DP con capacidad de 8 líneas/4 líneas y el costo máximo alcanzado con nodos DP de capacidad de 32 líneas (Figura 11b).

Sin embargo, con densidades de viviendas muy altas de 5000 por km cuadrado y 10 000 por km cuadrado, hay una pequeña diferencia en el costo de las arquitecturas en

función de la capacidad de terminación de los nodos DP—una diferencia de tan solo entre cinco y seis por ciento.

Los operadores de red han podido desplegar la red PON FTTH de manera rentable en el bucle de acceso en redes urbanas densas por las siguientes razones:

- Primero, en las redes de alta densidad de viviendas, los costos de red de extremo a extremo son más económicos debido a que las distancias de bucle son más cortas.
- Por lo tanto, la penalización o el impacto de costos es muy bajo para la selección de una arquitectura PON subóptima—solo alrededor de un seis por ciento con densidades de viviendas muy altas de 5000 por km cuadrado.

Sin embargo, con una densidad de viviendas baja de 500 por km cuadrado, la selección de una arquitectura PON subóptima tiene un impacto muy alto en los costos—una penalización de costos de un 28 por ciento.

Por lo tanto, en redes de baja densidad de viviendas, como las zonas suburbanas de Estados Unidos, el diseño de la red de acceso no puede basarse en las prácticas establecidas para el diseño de la planta externa. Con densidades de viviendas bajas, el costo de la red de acceso PON es muy sensible a varios factores, entre ellos:

- Demografía: la densidad de viviendas (o de manera alternativa, los km de ruta) del área de servicio de la red
- Tasas de penetración del servicio
- Costos de materiales e instalación de OSP/ODN
- Capacidad de terminación de los nodos DP

**Caso de uso 1: Desglose de los costos de la arquitectura PON FTTH/suscriptor**  
 (basada en la solución 10G XGS-PON de Ciena con una división óptica total de 1:32 de un cable de fibra)  
 (Variación de los costos de red en función de la capacidad de terminación de los nodos DP:  
 Tasa de penetración del servicio: 100 %; Densidad de edificios: 500 por km cuadrado)

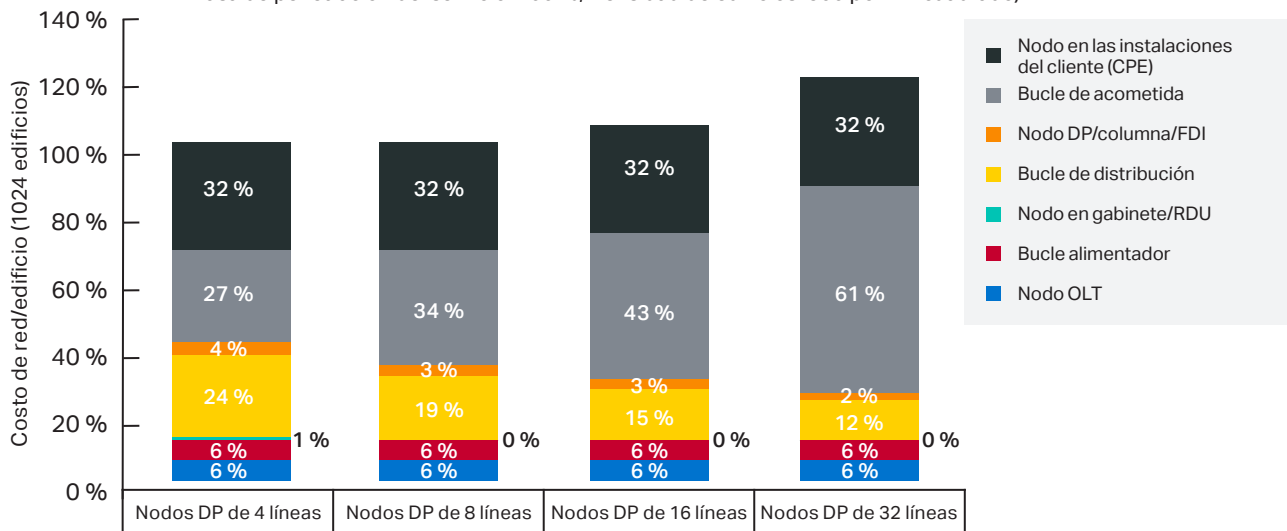


Figura 11c. Caso de uso 1: Desglose de los costos de la arquitectura de acceso PON FTTH por suscriptor (basada en la solución 10G XGS-PON de Ciena con una división óptica total de 1:32 de un cable de fibra (tasa de penetración del servicio: 100 por ciento)

El modelo de bucle de acceso que se describe en este documento puede ayudar a los operadores de red a diseñar redes de acceso PON de manera óptima con la determinación de las arquitecturas PON que minimizan los costos de red en función de estas variables.

Los costos se normalizan al costo de los nodos DP con capacidad de 16 líneas, lo cual produce el costo más bajo con una densidad de viviendas de 10 000 por km cuadrado.

### Generadores de costos

La Figura 11c muestra que el principal factor de costo con una baja densidad de viviendas de 500 por km cuadrado es el bucle de acometida y tiene el mayor impacto en los nodos DP de capacidad de 16 y 32 líneas, que representan entre el 43 y el 61 por ciento de los costos de red de extremo a extremo, respectivamente.

### 8.2 Caso de uso 2 (con una tasa de penetración del servicio del 25 por ciento)

El caso de uso 2 emplea las mismas cuatro arquitecturas de acceso PON FTTH lógicamente equivalentes del caso de uso 1.

La Figura 12a muestra la variación de los costos de las cuatro arquitecturas de acceso PON FTTH por suscriptor en función de la densidad de viviendas y la capacidad de terminación del nodo DP, basada en la solución del sistema 10G XGS-PON de Ciena.

**Tabla 2: Caso de uso 2: Costos de la arquitectura PON FTTH (basada en la solución 10G XGS-PON de Ciena: los costos se normalizan al costo de nodos DP de 16 líneas con una densidad de viviendas de 10 000 por km cuadrado)**

Densidad/km cuadrado	500	1000	3000	5000	10000
Km de ruta	45,79	32,38	18,7	14,48	10,24
HHP	1024	1024	1024	1024	1024
HHP con 100% de tasa de ocupación	256	256	256	256	256
Nodos DP de 4 líneas	188 %	163 %	136 %	128 %	120 %
Nodos DP de 8 líneas	171 %	147 %	122 %	114 %	106 %
Nodos DP de 16 líneas	165 %	140 %	115 %	108 %	100 %
Nodos DP de 32 líneas	166 %	140 %	114 %	106 %	101 %
Si el diseño de la arquitectura PON no está optimizado: costos máximos (usando nodos DP de 32 líneas)	188 %	163 %	136 %	128 %	120 %
Si el diseño de la arquitectura PON está optimizado: costos mínimos (usando nodos DP de 8 líneas)	165 %	140 %	114 %	106 %	100 %
Diferencia/penalización de costos en un red de acceso PON con un diseño subóptimo	24 %	22 %	22 %	22 %	20 %

Figura 11b. Caso de uso 1: Costos de la arquitectura PON FTTH basada en la solución 10G XGS-PON de Ciena: los costos se normalizan al costo de nodos DP de 8 líneas con una densidad de viviendas de 10 000 por km cuadrado (tasa de penetración del servicio: 100 por ciento)

### Caso de uso 2: Costos de la arquitectura PON FTTH/suscriptor (basada en la solución 10G XGS-PON de Ciena con división óptica total de 1:32 de un cable de fibra)

Variación de los costos de red con la demografía y la capacidad de terminación de los nodos DP: tasa de penetración del servicio: 25 % (Costos normalizados al costo de los nodos DP con capacidad de 16 líneas)

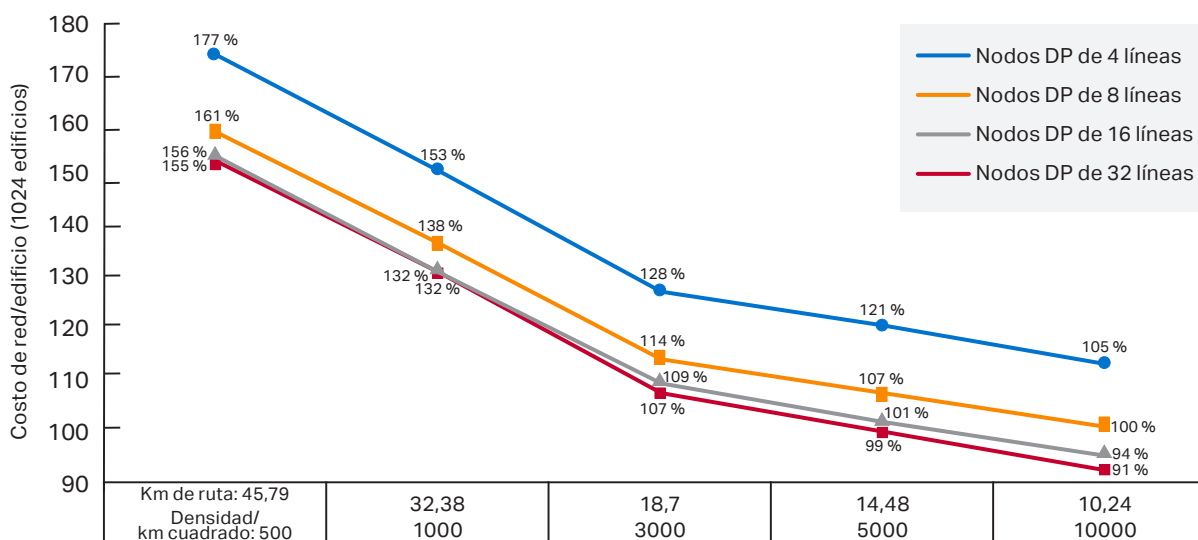


Figura 11a. Caso de uso 1: Costos de la arquitectura de acceso PON FTTH por suscriptor basada en la solución 10G XGS-PON de Ciena con una división óptica total de 1:32 de un cable de fibra (tasa de penetración del servicio: 100 por ciento)

## Análisis de los resultados: Caso de uso 2

Al igual que en el caso de uso 1 con una tasa de penetración del servicio del 100 por ciento, el caso de uso 2, con una tasa de penetración del servicio del 25 por ciento muestra que los costos de la arquitectura de acceso PON FTTH presentan una importante variación inversa en función de la densidad de viviendas.

Las Figuras 12a y 12b muestran que los costos de la arquitectura PON FTTH presentan una variación inversa con la densidad de viviendas; es decir, los costos de la arquitectura PON FTTH disminuyen a medida que aumentan las densidades de viviendas. Por ejemplo, para la arquitectura PON FTTH con nodos DP con capacidad de 16 líneas, el costo disminuye en un 65 por ciento (de 165 a 100 por ciento) a medida que la densidad de viviendas aumenta de 500 por km cuadrado a 10 000 por km cuadrado.

Cuando las tasas de penetración del servicio son bajas, los costos de la arquitectura de acceso PON FTTH muestran elevada sensibilidad a la capacidad de terminación de los nodos DP, tanto con densidades de viviendas altas como bajas.

Con una densidad de vivienda baja de 500 por km cuadrado, existe una diferencia muy grande en los costos (24 por ciento) entre el costo mínimo alcanzado con nodos DP con capacidad de 16 líneas/32 líneas y el costo máximo alcanzado con nodos DP de capacidad de 4 líneas.

Con una densidad de viviendas muy alta de 5000 por km cuadrado, existe también una diferencia similar muy grande en los costos (22 por ciento), entre el costo mínimo alcanzado con nodos DP con capacidad de 16 líneas y el costo máximo alcanzado con nodos DP con capacidad de 4 líneas.

En consecuencia, la combinación de bajas densidades de viviendas y bajas tasas de penetración del servicio plantea el mayor desafío para los operadores de red en el despliegue de arquitecturas de acceso PON debido a la elevada sensibilidad de los costos de OSP/ODN en la red PON con relación a las bajas densidades de viviendas y las bajas tasas de penetración del servicio, así como las capacidades de terminación de los nodos DP, que impactan en los costos de los bucles de distribución y acometida. Por lo tanto, si se seleccionan capacidades de terminación de los nodos DP incorrectas, la arquitectura de red de acceso PON estará diseñada de manera subóptima, con un impacto o penalización de costos muy altos.

Por consiguiente, en las redes con una combinación de baja densidad de viviendas y bajas tasas de penetración del servicio, tratar de diseñar redes de acceso PON basadas en algunas de las prácticas establecidas para el diseño de la planta externa muy probablemente conducirá al diseño subóptimo de redes, con costos superiores al 20 por ciento o más de lo necesario. Con densidades de viviendas bajas, el costo de la red de acceso PON es muy sensible a varios factores, entre ellos:

- Demografía: la densidad de viviendas (o de manera alternativa, los km de ruta) del área de servicio de la red
- Tasas de penetración del servicio
- Costos de materiales e instalación de OSP/ODN
- Capacidad de terminación de los nodos DP

El modelo de bucle de acceso que se describe en este documento puede ayudar a los operadores de red a diseñar redes de acceso PON de manera óptima con la determinación de las arquitecturas PON que minimizan los costos de red en función de estas variables.

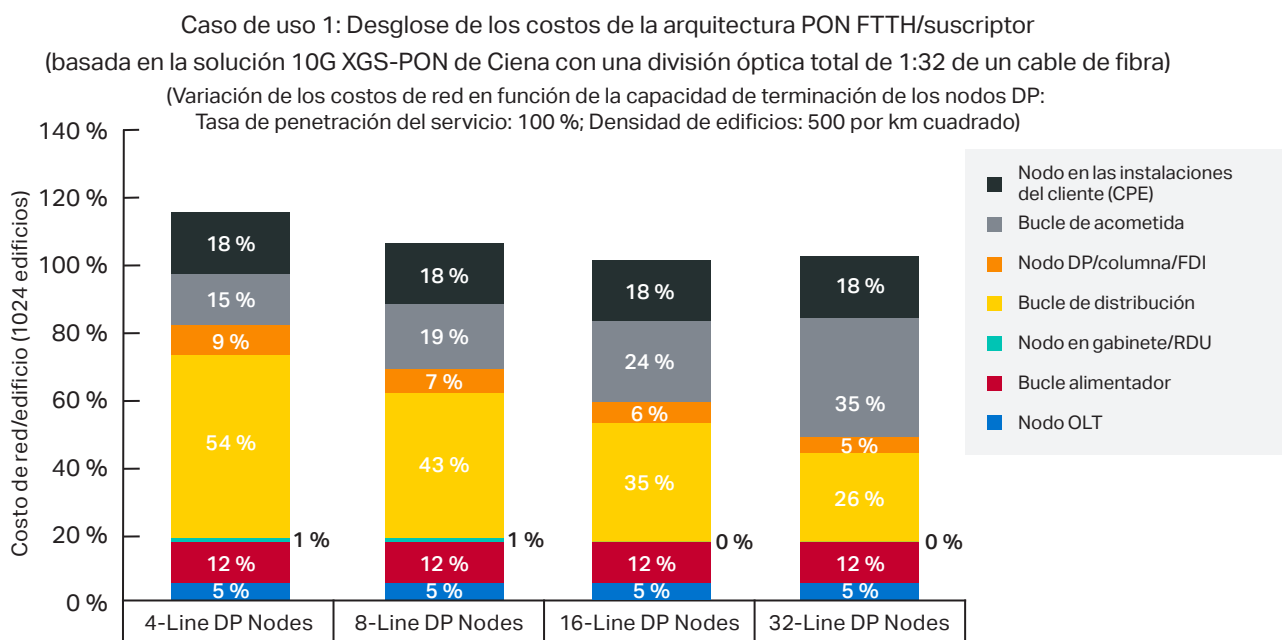


Figura 12c. Caso de uso 2: Desglose de los costos de la arquitectura de acceso PON FTTH por suscriptor (basada en la solución 10G XGS-PON de Ciena con una división óptica total de 1:32 de un cable de fibra (tasa de penetración del servicio: 25 por ciento)

### Generadores de costos

La Figura 12c muestra los principales factores de costos con una baja densidad de viviendas de 500 por km cuadrado y una baja tasa de penetración del 25 por ciento. En este caso, el principal factor de costos es ahora el costo del bucle de distribución, que es muy alto para los nodos DP de 4 líneas y 8 líneas, ya que representan el 54 y 43 por ciento de los costos de red de extremo a extremo, respectivamente. En el caso de uso 1, el bucle de acometida fue el principal factor de costo y tuvo el mayor impacto en los nodos DP con capacidad de 16 líneas y 32 líneas, que representan el 43 y 61 por ciento de los costos de red de extremo a extremo, respectivamente.

### 9. Conclusiones

Este libro blanco presenta un modelo de bucle de acceso para el análisis tecno-económico y diseño óptimo (costo mínimo) de las arquitecturas de red PON FTTx y de acceso inalámbrico fijo (FWA). Estudia dos casos de uso basados en la solución 10G XGS-PON de Ciena. Este análisis destaca el principal desafío para los operadores de red: el alto costo de desplegar fibra en las redes de bucle de acceso en áreas demográficas de baja densidad de viviendas como las zonas suburbanas de Estados Unidos, donde los elevados costos de red se deben principalmente al costo de la OSP/ODN.

Este libro blanco demuestra cómo emplear este modelo para minimizar los costos de una red PON FTTH, y lo hace analizando distintas arquitecturas de red de acceso PON lógicamente equivalentes, pero cuyos diseños o implementaciones físicas de OSP/ODN resultan en grandes diferencias en términos de costos de red a medida que varían las densidades de viviendas y/o las tasas de penetración del servicio.

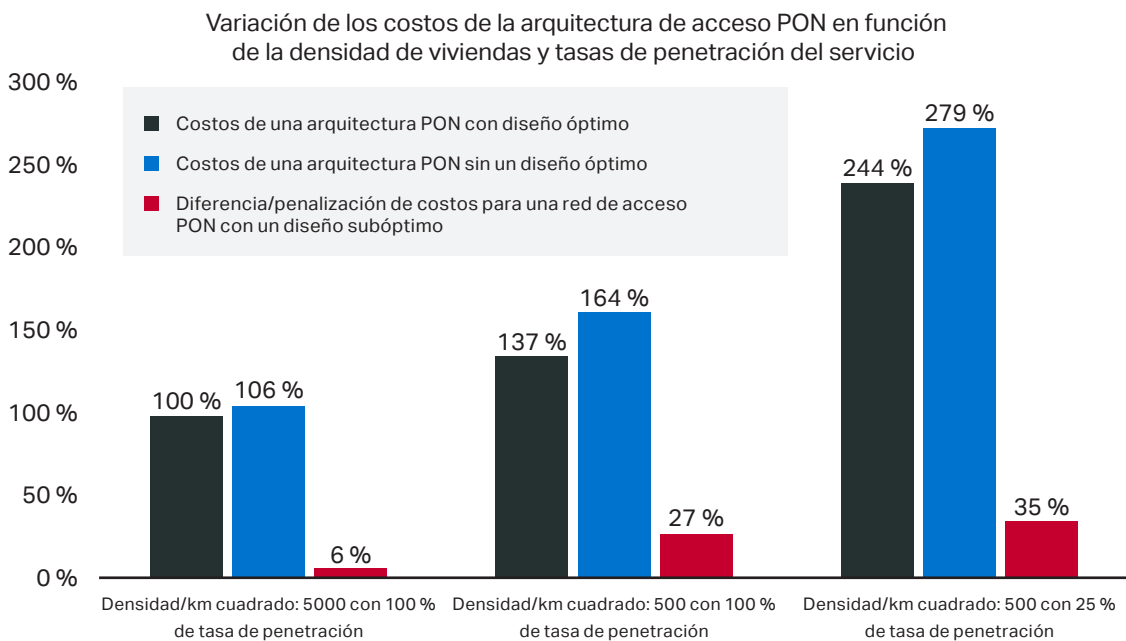
### 9.1 Conclusiones principales

En las redes con altas densidades de viviendas y altas tasas de penetración del servicio, el costo de la red de acceso PON tiene limitada sensibilidad al diseño de OSP/ODN.

La Figura 13 muestra cómo el costo de la arquitecta de red de acceso PON varía en función de las densidades de viviendas y las tasas de penetración del servicio para las arquitecturas PON diseñadas de manera óptima y de manera subóptima. Los costos se normalizan a los costos con una densidad de viviendas de 5000 por km cuadrado y tasa de penetración del 100 por ciento.

Con una densidad de viviendas muy alta de 5000 por km cuadrado, la penalización de costos—es decir la diferencia entre los costos de una arquitectura de acceso PON diseñada óptimamente (con costos mínimos) y otra diseñada de manera subóptima—es de solo aproximadamente un seis por ciento.

Cuando la densidad de viviendas es alta y el diseño de red es para una tasa de penetración del servicio del 100 por ciento, la penalización para un diseño subóptimo de la arquitectura PON es mínima. Por lo tanto, hay muy poca penalización de costos para el operador de red en el caso de redes de acceso PON con un diseño subóptimo en áreas de alta densidad. Los operadores de red no requieren ninguna sofisticación especial ni prácticas establecidas para el diseño de la planta externa y el criterio general es más que suficiente.



Diferencia/penalización de costos para una red de acceso PON con un diseño subóptimo	Diseño subóptimo de una arquitectura PON	Diseño óptimo (costos mínimos) de una arquitectura PON	Diferencia/penalización de costos
Densidad/km cuadrado: 5000 con 100 % de tasa de penetración	106 %	100 %	6 %
Densidad/km cuadrado: 500 con 100 % de tasa de penetración	164 %	137 %	27 %
Densidad/km cuadrado: 500 con 25 % de tasa de penetración	279 %	244 %	35 %

Figura 14. Diferencia/penalización de costos para una red de acceso PON con un diseño subóptimo

Esto explica por qué los operadores de red han podido desplegar redes PON FTTH de manera rentable en el bucle de acceso en redes urbanas densas. Sin embargo, desplegar redes PON FTTH en el bucle de acceso en áreas con baja densidad de viviendas (especialmente en las zonas suburbanas de Estados Unidos) ha sido especialmente difícil para los operadores de red por las siguientes razones.

En las redes con bajas densidades de vivienda y/o bajas tasas de penetración del servicio, el costo de la red de acceso PON es muy sensible al diseño de OSP/ODN y un diseño subóptimo de las arquitecturas de acceso PON en estos escenarios puede aumentar los costos drásticamente, entre un 27 y un 35 por ciento.

Como puede verse en la Figura 13, con una baja densidad de viviendas de 500 por km cuadrado y una tasa de penetración del 100 por ciento, cuando la arquitectura PON está diseñada de manera óptima, el costo es un 37 por ciento mayor que el costo con una densidad de viviendas de 5000 por km cuadrado (ver la Figura 14). Sin embargo, si la arquitectura PON tiene un diseño subóptimo, el costo con baja densidad de viviendas de 500 por km cuadrado es un 64 por ciento mayor que si la densidad de viviendas fuera de 5000 por km cuadrado. La penalización de costos para una arquitectura de acceso PON cuyo diseño dista de ser el óptimo se eleva al 27 por ciento con una baja densidad de viviendas de 500 por km cuadrado, en comparación con solo el seis por ciento cuando se trata de una elevada densidad de viviendas de 5000 por km cuadrado.

La Figura 14 también muestra que con una baja densidad de viviendas de 500 por km cuadrado y una tasa de penetración del 25 por ciento, cuando la arquitectura PON está diseñada de manera óptima, el costo es un 114 por ciento mayor que el costo con una densidad de viviendas de 5000 por km cuadrado y una tasa de penetración del 100 por ciento.

Si la arquitectura PON está diseñada con un nivel subóptimo, el costo con baja densidad de viviendas de 500 por km cuadrado y baja tasa de penetración del servicio del 25 por ciento es un 179 por ciento mayor que el costo con una densidad de viviendas de 5000 por km cuadrado y una tasa de penetración del 100 por ciento. La penalización

de costos para una arquitectura de acceso PON de nivel subóptimo se eleva al 35 por ciento con una baja densidad de viviendas de 500 por km cuadrado y una baja tasa de penetración del servicio del 25 por ciento, en comparación con una penalización de costos de tan solo el seis por ciento con una elevada densidad de viviendas de 5000 por km cuadrado con una tasa de penetración del servicio del 100 por ciento. Esto representa un desafío para los operadores de red que tratan de desplegar redes de acceso PON en áreas con distintas densidades de vivienda y/o bajas tasas de penetración del servicio. La penalización de costos por desplegar arquitecturas de acceso PON con un diseño subóptimo es muy alta. En consecuencia, en las redes de baja densidad de viviendas como las zonas suburbanas de Estados Unidos, el diseño de la red de acceso PON no puede basarse en algunas prácticas establecidas o en normas generales para el diseño de la planta externa porque con bajas densidades de viviendas, el costo de la red de acceso PON es muy sensible a distintos factores, entre ellos:

- Demografía: la densidad de viviendas (o de manera alternativa, los km de ruta) del área de servicio de la red
- Tasas de penetración del servicio
- Costos de materiales e instalación de OSP/ODN
- Capacidad de terminación de los nodos DP

El modelo de bucle de acceso que se describe en este documento puede ayudar a los operadores de red a diseñar redes de acceso PON de manera óptima con la determinación de las arquitecturas PON que minimizan los costos de red en función de estas variables. Este versátil modelo de bucle de acceso también se utiliza para el diseño de redes 5G híbridas de fibra, celdas pequeñas y banda milimétrica (mmWave)/FWA de bajos costos donde las distintas variables en conflicto como frecuencia del espectro, costo del espectro, tamaño de celda pequeño y los requerimientos de densificación del backhaul de fibra deben tenerse en cuenta para minimizar los costos.

¿Fue útil este contenido?