



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Alternativas y posibles soluciones  
en el proceso de migración de  
enlaces de TDM a Ethernet en  
México**

**INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES**

Que para obtener el título de

**Ingeniera en Telecomunicaciones**

**P R E S E N T A**

Cruz Castillo Laura Esperanza

**ASESOR DE INFORME**

M.I. Juventino Cuéllar González



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2020

# Índice

<b>Objetivo</b> .....	<b>3</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>4</b>
<b>Capítulo 1. Enlaces dedicados</b> .....	<b>5</b>
1.1 Medios que se emplean.....	6
1.1.1 Medios guiados.....	6
1.1.2 Medios no guiados.....	8
1.2 Principales usuarios y servicios.....	10
1.3 Técnicas de Transmisión e interfaces.....	13
1.3.1 TDM (Multiplexado por División de Tiempo).....	13
1.3.2 Ethernet.....	14
<b>Capítulo 2. Enlaces TDM vs nuevas tecnologías</b> .....	<b>16</b>
2.1 Emulación de circuitos.....	16
2.1.1 CESoE (Servicios de Circuitos Emulados sobre Ethernet).....	16
2.1.2 VLL (Virtual Leased Line).....	19
2.2 WDM/fibra óptica.....	21
2.2.1 EPON.....	22
2.2.2 WDM-PON.....	23
2.3 Enlaces Inalámbricos a altas frecuencias.....	25
2.3.1 Microondas.....	25
2.3.2 Ondas milimétricas (mm-Waves).....	27
2.3.3 Óptico inalámbrico.....	28
<b>Capítulo 3. Situación de México</b> .....	<b>29</b>
3.1 Telmex (TDM/Ethernet).....	31
3.2 Proyecciones.....	36
<b>Capítulo 4. Prácticas Internacionales</b> .....	<b>41</b>
4.1 OFCOM/Reino Unido.....	41
4.2 Verizon.....	45
<b>Conclusiones</b> .....	<b>48</b>
<b>Bibliografía y Referencias</b> .....	<b>50</b>

## Objetivo

Dar a conocer el estado actual de los enlaces dedicados de TDM existentes en el país, para poder realizar un análisis y saber si es conveniente para México migrar de los enlaces TDM a Ethernet, de acuerdo a los casos de estudio presentados y los países que han adoptado esta migración. Con este estudio también se busca:

- Conocer y analizar las nuevas tecnologías que podrían sustituir los enlaces TDM.
- Dar a conocer las ventajas y desventajas de las tecnologías que podrían reemplazar los enlaces TDM.
- Presentar la mejor propuesta que podría llevarse a cabo de acuerdo al análisis y a la revisión de las mejores prácticas internacionales.

## Introducción

La multiplexación por división de tiempo (TDM) se desarrolló por primera vez para aplicaciones en telegrafía para enrutar transmisiones múltiples simultáneamente sobre una sola línea de transmisión. En la década de 1870, Émile Baudot desarrolló un sistema de multiplexación en el tiempo de múltiples máquinas telegráficas Hughes.

En 1962, los ingenieros de Bell Labs desarrollaron los primeros bancos de canales D1, que combinaron 24 llamadas de voz digitalizadas a través de una troncal de cobre de cuatro hilos entre los interruptores analógicos de la oficina central de Bell. Un banco de canales dividió una señal digital de 1.544 Mbps en 8,000 cuadros separados, cada uno compuesto de 24 bytes contiguos. Cada byte representaba una sola llamada telefónica codificada en una señal de velocidad de bits constante de 64 kbps. Los bancos de canales utilizaron la posición fija (alineación temporal) de un byte en la trama para identificar la llamada a la que pertenecía.

Desde 1962 hasta hace unos 10 años la tecnología TDM era la única opción de enlaces de comunicación, siendo muy confiable y capaz de soportar la velocidad de datos de transmisión y recepción que se requerían en ese momento, sin embargo, la tecnología ha ido avanzando a pasos agigantados exigiendo nuevos cambios en la industria de telecomunicaciones, dejando atrás los enlaces de TDM por la gran dificultad que existe al querer conseguir reparaciones o mantenimientos de los equipos que se necesitan y es complicado incrementar las velocidades a las que se pueden transferir los datos que pueden soportar, además de no ser compatibles con las nuevas actualizaciones que han surgido en el mercado.

Es por lo que considero que se necesita una migración hacia nuevas tecnologías que permitan aumentar las velocidades con las que se transmiten y reciben los datos, pues de acuerdo a lo que está por llegar en los siguientes años es necesario tener grandes capacidades que puedan cumplir las exigencias requeridas.

Actualmente, la oferta de referencia del servicio mayorista de enlaces dedicados del agente económico preponderante en telecomunicaciones (AEP) ofrece enlaces con tecnología TDM con distintas capacidades; sin embargo, la provisión de estos enlaces se ha visto limitada debido a la escasez de los equipos. No obstante, aún existe demanda por este tipo de enlaces (Aguilar, 2019). Es por ello que este documento presenta varias opciones que se podrían tomar en cuenta para convencer a las compañías que crean aun requerir enlaces TDM que existen mejores alternativas y que es preciso analizarlas para tener un mejor desarrollo tecnológico en el país.

## Capítulo 1. Enlaces dedicados

Una línea dedicada o enlace dedicado, es una ruta directa a Internet o alguna otra red de computadoras a través de un canal de telecomunicaciones independiente, que se comparte con múltiples usuarios como en el acceso telefónico, pero disponible las 24 horas del día para un usuario específico o grupo de usuarios para un propósito específico. Cuando se accede a través de un operador común, al canal se le llama enlace dedicado (Suraj, 2005).

Entonces, un enlace dedicado es un canal de comunicación directo y privado de “alta calidad” que interconecta dos o más puntos, por donde se puede mandar voz, datos y video. Este es un contrato de servicio entre un cliente y un proveedor donde los datos pueden fluir continuamente a través de una tarifa o alquiler mensual fijo. Una representación de un enlace dedicado se encuentra en la Figura 1.

Estos enlaces son componentes importantes de los servicios empresariales de tecnología de la información y las comunicaciones (TIC), en particular los utilizados por grandes empresas de múltiples ubicaciones y organizaciones gubernamentales. También desempeñan un papel importante en la prestación de servicios de banda ancha fijos y móviles a los consumidores, ya que los proveedores de comunicaciones (CP) los utilizan ampliamente en sus redes. Los definimos como servicios que proporcionan capacidad de transmisión dedicada entre ubicaciones fijas (OFCOM, 2015).



Figura 1. Enlaces dedicados

Los enlaces dedicados necesitan de un medio de transmisión por donde viajarán los datos de información, y los más comunes suelen ser mediante fibra óptica, cobre, enlaces de microondas o vía satélite, es importante definir cada uno de estos medios para ser capaces de identificar en qué momento es oportuna la utilización de cada uno de ellos, dadas sus características.

## 1.1 Medios que se emplean

El medio de comunicación es el transporte que se utilizará para que la señal llegue a su destino de un punto a otro, el cual se clasifica en medios guiados y medios no guiados. Los medios guiados son aquellos en los que se necesita una línea de transmisión para transferir señales de un punto A hacia un punto B; y los medios no guiados son los que se transmiten “por el aire”, es decir, por medio de ondas electromagnéticas (EM), sin necesidad de utilizar ninguna línea de transmisión, en donde la recepción y transmisión es realizada por antenas que son las encargadas de propagar y percibir las ondas EM.

### 1.1.1 Medios guiados

Dentro de los medios guiados, los más comunes son el cable de cobre y la fibra óptica.

El cable es el medio más utilizado para los circuitos de comunicaciones; los cables instalados más antiguos eran de cobre y sigue siendo el material más utilizado para conectar dispositivos. El costo de un cable es una función del costo de los materiales y del proceso de fabricación. Tiene la ventaja de conectar dos puntos con distancias muy grandes porque tiene una fidelidad adecuada para los intercambios de información, sin embargo, tiene debilidades en cuanto al sistema de la persistencia de los datos transmitidos de un punto a otro (Gokhale, 2005).

Existen tres tipos de cable de cobre, el cable coaxial, UTP (Unshielded Twister Pair) y STP (Shielded Twisted Pair), sin embargo, de estos tres tipos de cable los más comunes y más usados son el cable coaxial y el cable UTP o par trenzado.

El cable coaxial es cable de cobre envuelto en un aislante dieléctrico que sirve para separar una malla delgada de cobre que funciona como referencia de tierra y a su vez está envuelto de un plástico negro para que sea más fácil el transportar y utilizar el cable coaxial, sin que sufra daños. Su nombre significa “Common Access” o “acceso común al medio”. Se utiliza para comunicar dos puntos que se encuentran retirados uno del otro, es decir, cuando se encuentran a distancias muy largas de un punto a otro, esto gracias a que presenta una atenuación muy baja y un bajo ruido, es por ello, que es el medio de transmisión que más se ha usado a lo largo de la historia de las telecomunicaciones, principalmente para uso telefónico y eventualmente para el Internet con su llegada.

Después de unos años apareció el cable de par trenzado o UTP que consiste en un par de cables de cobre trenzados entre sí, envuelto cada cable en un plástico de diferente color y a su vez los pares de cable envueltos por un plástico que protege a los pares de par trenzado. Se comenzó a usar más el cable UTP que el coaxial porque puede soportar más datos por unidad de tiempo, es decir, es capaz de llevar más información de un punto a otro debido a que esta trenzado, reduce el ruido y las interferencias, así como el BER (Bit Error Rate), en la transmisión de datos; otra de sus ventajas es que este tipo de cable es bastante flexible y no tan costoso.

El cable UTP tiene varias categorías y cada una de ellas presenta un ancho de banda diferente, sin embargo, a medida que se va aumentando el ancho de banda el cable se vuelve más propenso al ruido y a las interferencias, por lo que su gran desventaja es que trabaja con un ancho de banda muy reducido (aproximadamente de 16 a 100 MHz), lo que genera que cuando se quiere transmitir a distancias demasiado largas, se tienen una gran cantidad de errores y por lo tanto tendremos algún tipo de distorsión en nuestra señal.

El medio que se ha utilizado para mejorar el desempeño del cable de cobre es la fibra óptica ya que por medio de la fibra óptica se puede mandar una gran cantidad de datos porque puede trabajar con un gran ancho de banda. Esto es porque la fibra óptica realiza transmisiones por medio de la luz y se propaga con el principio de reflexión, refracción y la Ley de Snell, por lo que se puede decir que las pérdidas que presenta son mínimas y la velocidad con la que puede mandar la información es de  $3 \times 10^8 \left[ \frac{m}{s} \right]$ , a la velocidad de la luz.

Tiene inmunidad electromagnética y por lo tanto no se tienen interferencias ni corto circuito, así que también los equipos se encuentran protegidos contra descargas indeseadas. La fibra está hecha de un núcleo de vidrio que tiene aproximadamente 250  $\mu\text{m}$ , recubierto de una capa muy delgada de dióxido de silicio y a su vez está envuelto de un plástico delgado, llamado jacket. Posee grandes beneficios utilizar la fibra óptica como medio de transmisión guiado ya que es liviana y muy flexible, debido a su tamaño tan pequeño, a diferencia del cable de cobre.

La fibra óptica puede transportar miles de veces más información que un cable de cobre del mismo tamaño. Los cables de fibra óptica son más ligeros y ocupan menos espacio que los cables de cobre para la misma capacidad de información. Las fibras también tienen cables más largos entre repetidores porque una señal pierde muy poca potencia a medida que viaja por una fibra, en comparación con el cobre. Las pérdidas de fibra óptica son independientes de la frecuencia de transmisión en una red; no hay interferencia que pueda degradar o limitar el rendimiento de la fibra a medida que aumenta la velocidad de la red.

Como resultado de las ventajas cruciales que la fibra ofrece sobre el cobre, a menudo el cobre se usa en cableado de red troncal, para entornos ruidosos como pisos de fábricas e instalaciones preocupadas por la seguridad como el ejército y bancarios, esto es debido al precio ya que se considera que la fibra óptica es relativamente más cara y su instalación tiene un precio mayor por el equipo de prueba que se usa. Sin embargo, la fibra óptica es solo 30% más caro que el cobre, pero las compañías se están dando cuenta de la gran ventaja que presenta la fibra óptica al brindar un amplio ancho de banda, es por ello que actualmente vemos más instalaciones de fibra óptica.

### 1.1.2 Medios no guiados

Los medios no guiados más comunes son por enlaces de microondas o vía satélite.

Los enlaces de microondas son aquellos que se realizan mediante ondas electromagnéticas que se propagan por medio del aire y que llegan de una antena de microondas a otra, se utiliza normalmente para frecuencias entre 3 y 300 GHz, con una correspondiente longitud de onda entre  $\lambda = \frac{c}{f} = 10 \text{ cm}$  y  $\lambda = 1 \text{ mm}$ , respectivamente. Se utiliza ese rango de frecuencias porque:

- A frecuencias más altas, se puede obtener más ganancia de antena para un tamaño físico de antena dado, y esto tiene consecuencias importantes cuando se implementan sistemas de microondas.
- Se puede tener más ancho de banda (directamente relacionado con la velocidad de datos) a frecuencias más altas. Un ancho de banda del 1% a 600 MHz es 6 MHz, que (con modulación de codificación de cambio de fase binaria) puede proporcionar una velocidad de datos de aproximadamente 6 Mbps (megabits por segundo), mientras que, a 60 GHz, un ancho de banda del 1% es de 600 MHz, lo que permite una velocidad de datos de 600 Mbps.
- Las señales de microondas viajan según la línea de visión y no están dobladas por la ionosfera, como lo son las señales de baja frecuencia. Por lo tanto, es posible establecer enlaces de comunicación satelital y terrestre con capacidades muy altas y con reutilización de frecuencia en ubicaciones mínimamente distantes.
- Varias resonancias moleculares, atómicas y nucleares ocurren en las frecuencias de microondas, creando una variedad de aplicaciones únicas en las áreas de ciencia básica, detección remota, diagnóstico y tratamiento médico, y métodos de calentamiento.

Es importante que en un enlace de este tipo exista línea de vista de un punto a otro y al mismo tiempo se libere por lo menos la primera zona de Fresnel.

Las zonas de Fresnel se producen por la difracción de las señales electromagnéticas en las partículas del aire. Se consideran como una familia de elipsoides que se forman en el medio de propagación por donde las señales de RF viajan de emisor a receptor [5]. Una zona de Fresnel está definida por los límites donde las ondas interiores llegan al receptor con la misma fase de la señal transmitida.

La fase de las señales en las zonas de Fresnel están, de esta manera, alternadas: en fase (primera zona) otra en contrafase (segunda zona), otra en fase (tercera zona), etc. El radio de la zona de Fresnel depende de la longitud de onda y de la distancia entre las antenas (Lejía, G. et al, 2014).



Los enlaces de microondas transmiten señales con longitudes de onda relativamente pequeñas y pueden usar varios métodos de modulación.

Se utilizan preferencialmente en zonas rurales, o muy poco pobladas, ya que en zonas urbanas las señales de microondas rebotarían por todos los edificios y eso podría perjudicar nuestra señal, sin embargo, hoy en día se utilizan mucho en las zonas urbanas tomando en cuenta que estos enlaces deben tener una línea de vista directa y en casos en los que no se tiene la línea de vista se utilizan repetidores para que la señal siga conservando la línea de vista. La mayoría de las aplicaciones actuales de la tecnología de RF y microondas son para redes inalámbricas y sistemas de comunicaciones, sistemas de seguridad inalámbricos, sistemas de radar, sensores remotos ambientales y sistemas médicos.

Los enlaces por satélite se usan cuando se quiere mandar una gran cantidad de datos, tráfico telefónico o señales de televisión, permiten grandes ganancias y el uso de antenas muy directivas. Un satélite desde su gran altura puede ver una larga porción de la Tierra, se comunica a las radio-bases que se encuentran en un punto fijo en la Tierra y no presentan el problema que tienen las microondas, ya que la antena esta direccionada al espacio y no habrá nada que pueda interferir en el camino de la señal.

La eficiencia de los sistemas de comunicación satelital está siendo incrementada, mediante el uso de altas bandas de frecuencia, incrementando la eficiencia del espectro, desarrollando antenas de alta ganancia y también desarrollando técnicas de rehusó de frecuencias.

A parte de esto, las comunicaciones satelitales tienen las siguientes ventajas por sobre los enlaces terrestres:

1. Son capaces de transmitir señales por distancias largas con una alta capacidad.
2. Los satélites son punto a multipunto, dando cobertura a grandes distancias.
3. Los circuitos satelitales pueden ser instalados rápidamente.

Como cualquier otro sistema, la comunicación satelital tiene las siguientes desventajas:

1. Hay un atraso de un cuarto de segundo entre la transmisión y recepción (Tx y Rx) de la señal.
2. Reparar cualquier parte del satélite después de ser lanzado puede tornarse muy complicado.
3. Par lanzar satélites geo-estacionarios al espacio, se requieren de vehículos muy poderosos y por ello el costo puede ser muy alto y puede afectar a su vez el costo de la comunicación.
4. Puede llegar a ser muy costoso.
5. Sólo ciertas bandas de radiofrecuencia, asignadas por acuerdos internacionales, están disponibles para una comunicación satelital comercial.

Todos los medios de transmisión mencionados anteriormente pueden usarse para un enlace dedicado, como se muestra en la Figura 2.

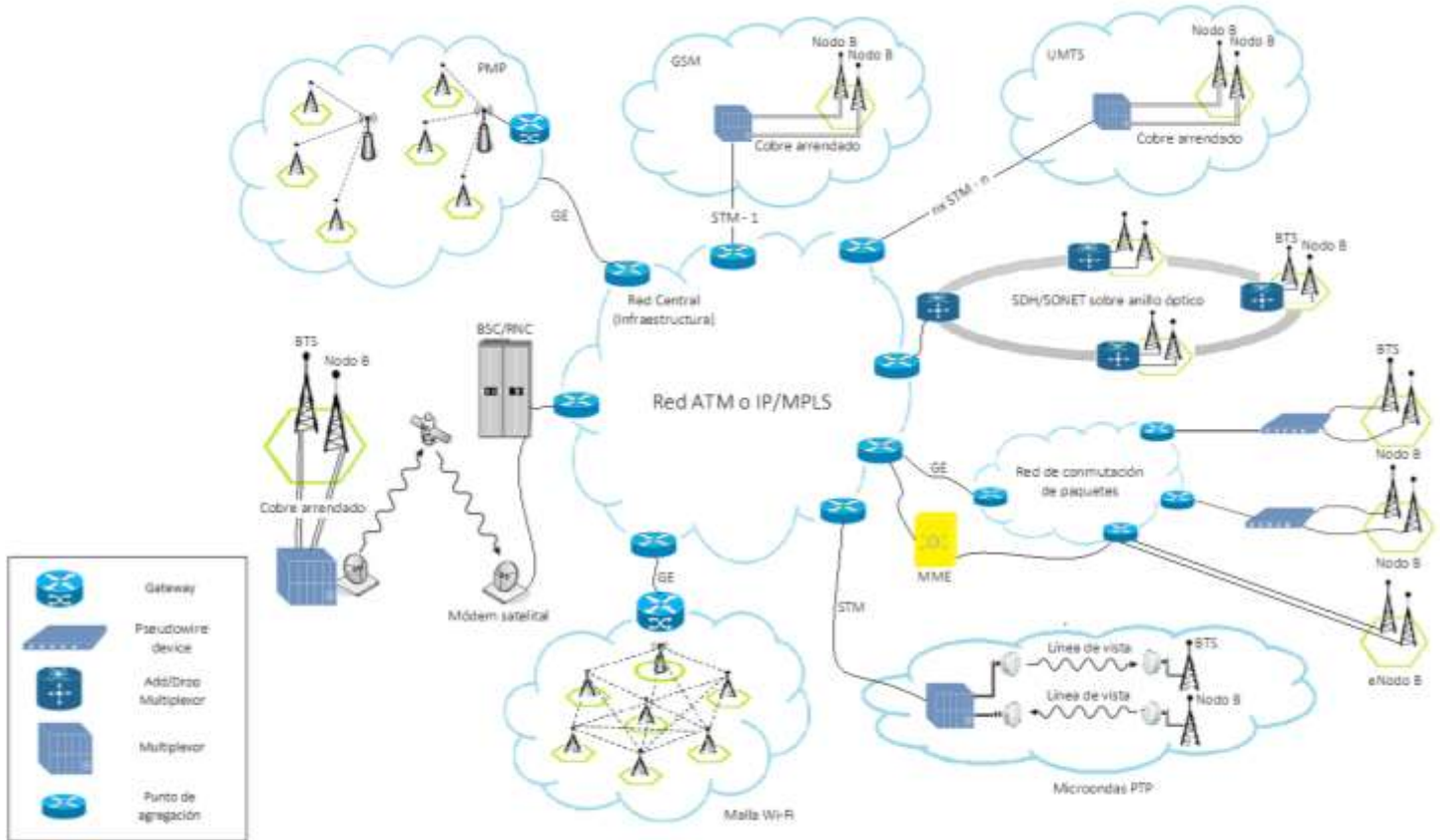


Figura 2. Esquemas de enlaces dedicados. [26]

Al conocer de manera muy general los medios de transmisión que se pueden ocupar para los enlaces dedicados, es necesario ahora definir cuáles son los principales usuarios y servicios que se llegan a utilizar para estos enlaces, para entender el comportamiento que tiene el mercado y empezar a precisar qué tipo de técnica de transmisión es la que más se está usando.

## 1.2 Principales usuarios y servicios

Existen tres segmentos principales de usuarios finales que utilizan enlaces dedicados:

- Clientes empresariales y/o corporativos (privados y públicos)
- Operadores de redes móviles (MNO)
- Operadores de redes fijas (ORF)

Muchas organizaciones, tanto en el sector público como en el privado, utilizan enlaces dedicados para tener una gran variedad de aplicaciones de Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC), como:

- Conectividad de datos: Esto es intercambio de información/datos entre sitios empresariales y respaldo de datos externos a centros de datos (redes de área de almacenamiento).
- Aplicaciones de videoconferencia y voz: Los circuitos de enlaces dedicados se utilizan para soportar los servicios RDSI (Red Digital de Servicios Integrado) y VoIP.
- Capacidad de recuperación: Donde los enlaces dedicados se utilizan como líneas de respaldo o como enlaces entre los sitios de servidores de computadoras de una empresa para la recuperación de datos en caso de desastres.
- Aplicaciones a medida de alto valor: Esto quiere decir que se colocaran los enlaces dedicados de acuerdo a las características que el usuario requiera.
- Aplicaciones heredadas/de nicho: Los operadores de infraestructura nacional, como las grandes empresas de energía y agua, requieren enlaces dedicados para respaldar la medición, la telemetría y el monitoreo de sus redes.

Es más probable que los clientes de empresas más grandes requieran enlaces dedicados ya que a menudo necesitan conectarse entre sí en varios sitios diferentes. Estos usuarios necesitan conectividad de alta calidad para respaldar las aplicaciones críticas para el negocio.

La capacidad y el precio de las líneas arrendadas afectan la velocidad y el costo de los servicios de banda ancha móviles y asimétricos descendentes.

Los operadores de redes móviles utilizan grandes volúmenes de enlaces dedicados para transportar servicios móviles de voz y datos entre sus estaciones base de radio y sus redes centrales. De manera similar, la mayoría de los proveedores de servicios de banda ancha dependen de los enlaces dedicados para re-direccionar el tráfico de banda ancha de sus centrales (donde tienen equipos de ubicación conjunta para agregar operadores de redes fijas) a sus redes centrales.

Las empresas u organismos privados o públicos necesitan una calidad mayor, algo fiable y de gran capacidad en lo que respecta a los enlaces dedicados, esto lo hacen debido a la enorme importancia que conlleva mantener un soporte o conectividad constante a las aplicaciones críticas de la empresa, de manera que nada llegue a fallar en ningún momento determinado. En una mayor parte, las empresas prefieren tener en su poder enlaces dedicados de un sólo proveedor, la otra parte, prefiere la contratación del servicio con diversas empresas.

Los MNO y los ORF, suelen utilizar estos servicios de enlace dedicado en las operaciones que realizan los dispositivos móviles, MNO utiliza en gran cantidad este servicio para la comunicación entre radio bases, ya sea para servicios de voz o de datos. La apuesta por el mercado móvil tiene sus propias áreas de oportunidad, pues en su misma definición de móvil, nos indica que la recepción del servicio será variante, la posición geográfica cambiará eventualmente.

Las empresas deben buscar maneras en que la conectividad sea proveída a todo el demográfico, y si son dispositivos móviles, lo mejor es abarcar más áreas de servicio.

Algunos de los proveedores de comunicaciones que suministran enlaces dedicados, incluyen: Telmex, AT&T, Axtel, Grupo Televisa, Mega Cable, Pegaso, entre otros. Algunas empresas u organizaciones, utilizan las conocidas como VPN (Virtual Private Networks), son redes virtuales privadas, que en realidad son servicios de enlaces dedicados, contratados por una empresa, que busca una privacidad de envíos de información, únicamente para uso de su propia organización, el objetivo de una VPN es el de simular una red privada minimizada, utilizando configuraciones de red específicas para ciertas direcciones de IP, y estas redes privadas, son enlaces dedicados enmascarados.

En otras empresas, se usan servicios de anchos de banda asimétricos para permitir a una persona como usuario, el acceso a internet, así como también puede conectar diferentes VPN entre sí, creando así una red privada de redes privadas.

La manera en que las tecnologías mencionadas funcionan es mediante DOCSIS (Data Over Cable Service Interface Specification), Especificación de Interfaz para Servicios de Datos por Cable, está sobreentendido que el usuario final no recibe los servicios de red mediante medios de cable de cobre, si no que mediante la especificación que es DOCSIS, el usuario final conecta a la red mediante un medio de cable coaxial, o fibra óptica. El uso de esta especificación, significa que el cable no está sujeto a las mismas limitaciones de ancho de banda que las evidentes mostradas en las tecnologías DSL (Digital Subscriber Line).

Existen tres servicios de enlaces dedicados por arrendamiento (mayoristas):

Los servicios punto a punto, son conexiones locales que unen a dos usuarios, destacan por ser utilizados en un espacio geográfico cercano, un dispositivo debe estar cercano al otro.

Otro tipo de servicios son denominados como segmentos de acceso, y segmentos de Backhauling, son segmentos de terminación, crean una relación entre un sitio de un usuario final, y un nodo de red de un proveedor de comunicaciones específico, los segmentos de acceso son una red generada desde que el usuario final la provee, hasta que se da un acceso local del nodo.

Mientras que los segmentos de backhaul, son circuitos corriendo desde un nodo de acceso que es local, busca el compartimiento de infraestructura física, y lógica por igual.

Un último servicio se denomina trunk o segmento núcleo, son enlaces dedicados que buscan hacer uniones de redes segmentadas dentro de una red de nodos mayores, existe un tráfico mayor y el servicio aguantará dicho estrés y en nodos grandes, nodos importantes, por decir un ejemplo, una comunicación efectiva entre centros urbanos grandes.

## 1.3 Técnicas de Transmisión e interfaces

### 1.3.1 TDM (Multiplexado por División de Tiempo)

Es importante conocer la tecnología que se tiene actualmente en gran parte del país y saber cuáles son las características que para los prestadores de servicios son de gran utilidad al utilizar el Multiplexado por División de Tiempo.

La multiplexación nos sirve para transmitir diferentes canales en un mismo medio físico de transmisión, logrando aprovechar al máximo los recursos al realizar una comunicación. El multiplexaje en el tiempo se realiza de manera digital, siendo menos propensa al ruido y la información viaja por enlaces digitales E1 (Estándar Europeo) o T1 (Estándar Americano), en México se utilizan los enlaces E1. Los enlaces E1 son conexiones digitales bidireccionales que viajan a una velocidad de 2.048 Mbps, la velocidad se logra combinando 32 time slots de 64 Kbps cada uno. Un time slot está compuesto de 8 bits cada uno y cada 32 time slots se tiene una trama, por lo que los enlaces E1 transmiten la información por tramas, es decir, se transmiten 256 bits en cada trama.

El principio básico de TDM es permitir el transporte de múltiples señales sobre la misma ruta de señal multiplexando las señales, luego demultiplexándolos en intervalos de tiempo específicos. Una de las grandes ventajas de TDM es que no es necesario ir identificando cada trama, ya que tiene un orden y si se llega a tener un error es fácil de identificar, además que es una forma segura de transmisión de datos.

De acuerdo a la “Oferta de referencia para la prestación del servicio mayorista de arrendamiento de enlaces dedicados locales, entre localidades, y de larga distancia internacional para concesionarios de redes públicas de telecomunicaciones y autorizados de telecomunicaciones” del 2019, publicada por el IFT (Instituto Federal de Telecomunicaciones), las interfaces que se usan para la transmisión de TDM son V35, G.703, G.957

- V.35: Es un circuito digital punto a punto que entrega al usuario un reloj de referencia, es decir, sincronización con la red y se le denomina equipo de comunicación de datos. Soporta el método de codificación NRZ (No retorno a cero). Su velocidad de transmisión varía entre 56 Kbps y 256 Kbps, funcionan mejor para aplicaciones cortas (menos de 20 metros), de baja velocidad y de bajo costo. Tiene una excelente confiabilidad y capacidades de propagación, admite comunicaciones asíncronas y síncronas, así como conexiones full y half duplex. Transfiere datos

desde el enrutador a un dispositivo externo cuando está utilizando una interfaz en serie. Es muy popular entre las secciones más antiguas de la industria y, en general, es reconocida como la mejor solución técnica. Es muy similar a la conexión utilizada por el módem en su PC, pero tiene un mejor rendimiento y admite aplicaciones síncronas y asíncronas.

- G.703: Es un estándar para la transmisión de voz sobre portadoras digitales como T1y E1. Proporciona las especificaciones para la modulación de código de pulso (PCM) a velocidades de datos de 64 Kbps a 2.048 Mbps. Se usa normalmente para interconectar equipos de comunicaciones de datos como puentes, enrutadores y multiplexores. Si el G.703 está equilibrado o desequilibrado depende de su ubicación geográfica y del proveedor que presta el servicio.
- G.957: Es un estándar del UIT-T que define las características de las interfaces ópticas para equipos de jerarquía digital síncrona (SDH). Las interfaces G.957 se utilizan para la interconexión de multiplexores (ADM).

### 1.3.2 Ethernet

El término Ethernet se refiere a la familia de productos de red de área local (LAN) cubiertos por el protocolo IEEE 802.3 estándar que define lo que se conoce comúnmente como el protocolo CSMA/CD. Actualmente se definen tres velocidades de datos para la operación a través de fibra óptica y cables de par trenzado:

- 10 Mbps: Ethernet 10Base-T
- 100 Mbps: Fast Ethernet
- 1000 Mbps: Gigabit Ethernet

La norma IEEE 802.3 define un modelo de red de área local utilizando el protocolo de acceso al medio CSMA/CD con persistencia de 1, es decir, las estaciones están permanentemente a la escucha del canal y cuando lo encuentran libre de señal efectúan sus transmisiones inmediatamente. Esto puede llevar a una colisión que hará que las estaciones suspendan sus transmisiones, esperen un tiempo aleatorio y vuelvan a intentarlo (Llamas, 2012).

En el nivel físico, las redes IEEE 802.3 utilizan codificación Manchester diferencial, que representa cada bit, no como un estado alto o bajo, sino como la transición bajo/alto o alto/bajo, dependiendo del valor del bit. Esto tiene la ventaja de que sea cual sea la secuencia binaria a transmitir, las corrientes eléctricas son iguales en un sentido o en el otro, es decir, el valor medio de la señal en cada bit es cero (físicamente, se dice que la componente de continua se anula), lo que tiene ventajas eléctricas.

Cualquier estación conectada a una red IEEE 802.3 debe poseer un adaptador de red. La longitud máxima permitida para el bus en que se basa una red IEEE 802.3 es de 500 metros. Sin embargo, es posible conectar varios segmentos a través de unos dispositivos

especiales llamados repetidores. El repetidor opera en la capa física y se encarga de amplificar la señal eléctrica para que su amplitud sea la adecuada y llegue correctamente a posibles receptores.

Ethernet tiene las siguientes características:

- Es fácil de entender, implementar, administrar y mantener.
- Permite implementaciones de red de bajo costo.
- Proporciona una amplia flexibilidad topológica para la instalación de la red
- Garantiza la interconexión exitosa y la operación de productos que cumplen con los estándares, independientemente de fabricante



## Capítulo 2. Enlaces TDM vs nuevas tecnologías

Debemos comparar la tecnología que se tiene actualmente en la mayoría del país con las tecnologías que se podrían adoptar para una migración de TDM a Ethernet exitosa. Algunas de ellas podrían ser servicios en circuitos emulados (circuit emulated services), WDM/fibra óptica o enlaces inalámbricos a altas frecuencias.

### 2.1 Emulación de circuitos

La tecnología de servicios en circuitos emulados (CES) permite que el tráfico TDM se transporte de forma transparente a través de las redes de conmutación de paquetes (PSN) modernas, incluidas Ethernet, IP (Protocolo de Internet), MPLS (Conmutación de Etiquetas Multiprotocolo) y PBT (Proveedor de Transporte de Red Troncal). Los servicios de emulación de circuitos a través de una red conmutada por paquetes ofrecen un enfoque diferente para transportar el tráfico TDM a través de redes IP, Ethernet o MPLS. Un beneficio principal de la tecnología es su capacidad para transportar varios troncales TDM de una ubicación a otra a través de una red de paquetes.

La emulación del circuito proviene originalmente del modo de transferencia asíncrono (ATM). La idea ha sido retomada en el mundo de conmutación de paquetes por varios organismos, entre ellos el Grupo de trabajo de ingeniería de Internet (IETF), el Foro de Metro Ethernet (MEF) y el Foro de Cambio de etiquetas de protocolo múltiple (MPLS). El grupo de trabajo Pseudo-Wire Emulation Edge to Edge (PWE3) en el IETF está estableciendo los principales estándares de CES.

Al existir diferentes redes de conmutación de paquetes con las que pueden trabajar los circuitos emulados, es importante mencionar las principales características de cada uno de ellos.

#### 2.1.1 CESoE (Servicios de Circuitos Emulados sobre Ethernet)

Los servicios de circuitos emulados sobre Ethernet (CESoE) son capaces de soportar servicios síncronos como enlaces de E1 sobre una infraestructura asíncrona como lo es Ethernet y pueden introducirse en paralelo y proporcionar una ruta de migración sin problemas para futuras ofertas de servicios.

Las infraestructuras de Ethernet están habilitando una serie de nuevos servicios de datos de banda ancha. Al agregar circuitos emulados a los servicios de Ethernet, las aplicaciones, incluidas las aplicaciones de voz TDM tradicionales y las aplicaciones de línea privada heredadas, pueden aprovechar las ventajas inherentes a la tecnología Ethernet (The Metro Ethernet Forum, 2004).

Estas ventajas incluyen flexibilidad, simplicidad y rentabilidad. Los estudios han demostrado que los servicios de infraestructura habilitados para Ethernet reducen los costos operativos para el proveedor y permiten una entrega de servicios más rápida, resultados que en última



instancia benefician a las empresas y estimulan la demanda de los usuarios. Los proveedores de servicios pueden aprovechar los modelos de negocios basados en todas las ventajas de Ethernet como una red de paquetes convergentes, sin sacrificar los ingresos de estos servicios heredados y crecientes de TDM.

De acuerdo con The Metro Ethernet Forum se han definido cuatro tipos de servicios generales para la funcionalidad de circuitos emulados sobre Ethernet, los cuales se definen a continuación.

1. Servicio de línea TDM (T-Line) en el que el proveedor de Metro Ethernet Network proporciona y administra las líneas privadas de TDM a través de CESoE entre puntos de vista empresariales. El servicio T-Line es compatible con todos los servicios de línea privada tradicionales basados en TDM a través de una infraestructura de metro Ethernet.

El servicio de línea TDM ofrece interfaces TDM a los clientes, pero transfiere los datos a través de Metro Ethernet Network en lugar de una red tradicional de conmutación de circuitos TDM. Desde la perspectiva del cliente, este servicio TDM es el mismo que cualquier otro servicio TDM, y la definición del servicio viene dada por los estándares relevantes de ITU-T y ANSI que pertenecen a ese servicio. Desde la perspectiva de los proveedores, se proporcionan dos funciones de trabajo CES para interconectar el servicio TDM con la red Ethernet. Las funciones de interfuncionamiento de CES se conectan a través de la Red Ethernet de Metro (MEN) mediante Conexiones Virtuales de punto a punto de Ethernet (EVC).

El Modo operacional de un servicio básico de T-Line es de punto a punto, de velocidad de bits constante, similar al tipo tradicional de enlace dedicado del servicio TDM. Sin embargo, la multiplexación del servicio puede ocurrir antes de las funciones de trabajo CES, creando una configuración multipunto a punto o incluso multipunto a multipunto. La configuración que se tendría físicamente sería la que se muestra en la Figura 3.

Las empresas pueden implementar líneas T sobre redes Ethernet de metro para:

- Redes privadas / Tramas híbridas, ATM, IP, voz y video.
- Servicios de voz centralizados.
- Línea privada.
- Respaldo TDM / Recuperación de un desastre para un alto tiempo de actividad y cumplimiento normativo.

Los clientes obtienen una gama de opciones de ancho de banda entre oficinas, que incluyen:

- Las tasas de señal de 64 Kbps a 51.48 Mbps.
- Capacidad de punto a punto y punto a multipunto.
- Capacidad de canal claro.

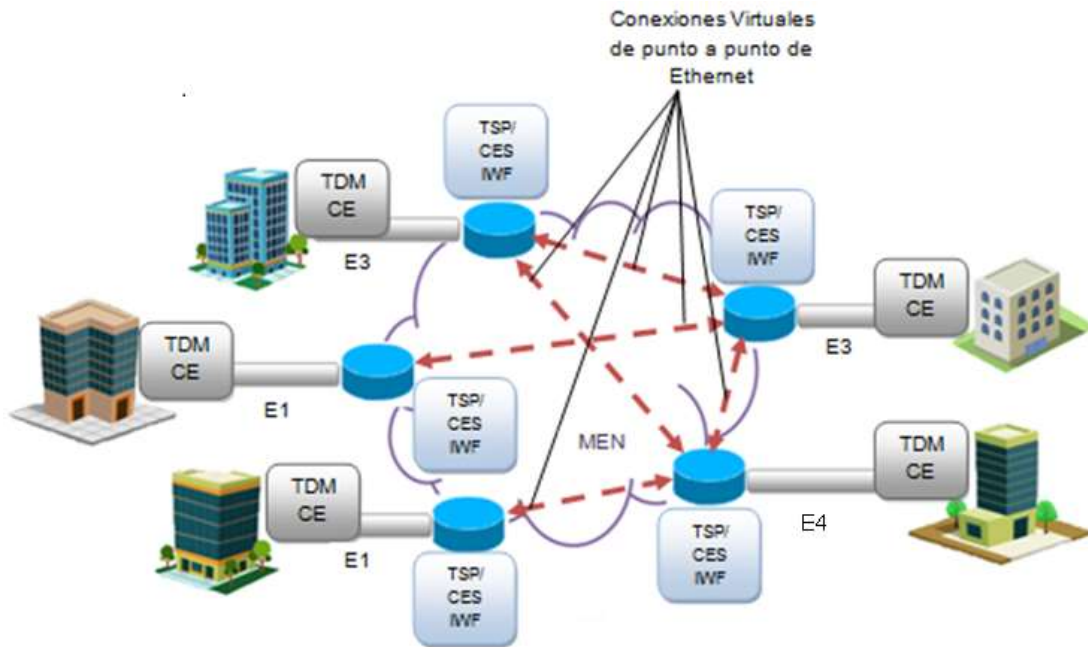


Figura 3. Configuración física del servicio T-Line [27]

2. El servicio de línea de acceso de TDM (TALS), en el que el proveedor de Metro Ethernet Network proporciona y administra las líneas arrendadas de TDM a través de CESoE, y al menos un punto final termina en la PSTN (Red Telefónica Conmutada Pública). TALS permite a los operadores de Metro Ethernet ofrecer servicios basados en T1, E1, T3, STM-1 para voz y ATM a través de sus redes Ethernet. TALS admite aplicaciones de voz y datos heredadas de forma transparente. La calidad del circuito coincide con la de las redes PSTN basadas en circuitos tradicionales.

El servicio TALS es muy similar al servicio T-Line, ambos servicios usan el Metro Ethernet Network de la misma manera. La única diferencia es que el servicio multiplexado final se entrega a otra red en lugar de a un cliente final. Como tal, puede tener algunos requisitos de rendimiento derivados de los requisitos de la segunda red que no están presentes en el servicio T-Line. El MEN debe mantener la integridad de los bits, la sincronización y otras características específicas de la carga del cliente del tráfico transportado sin causar ninguna degradación que exceda los requisitos para el servicio dado. Todas las funciones de administración, monitoreo y otras relacionadas con ese flujo específico deben realizarse sin cambiar o alterar la capacidad o la información de la carga útil del servicio.

La configuración que se tendría físicamente sería la que se muestra en la Figura 4.

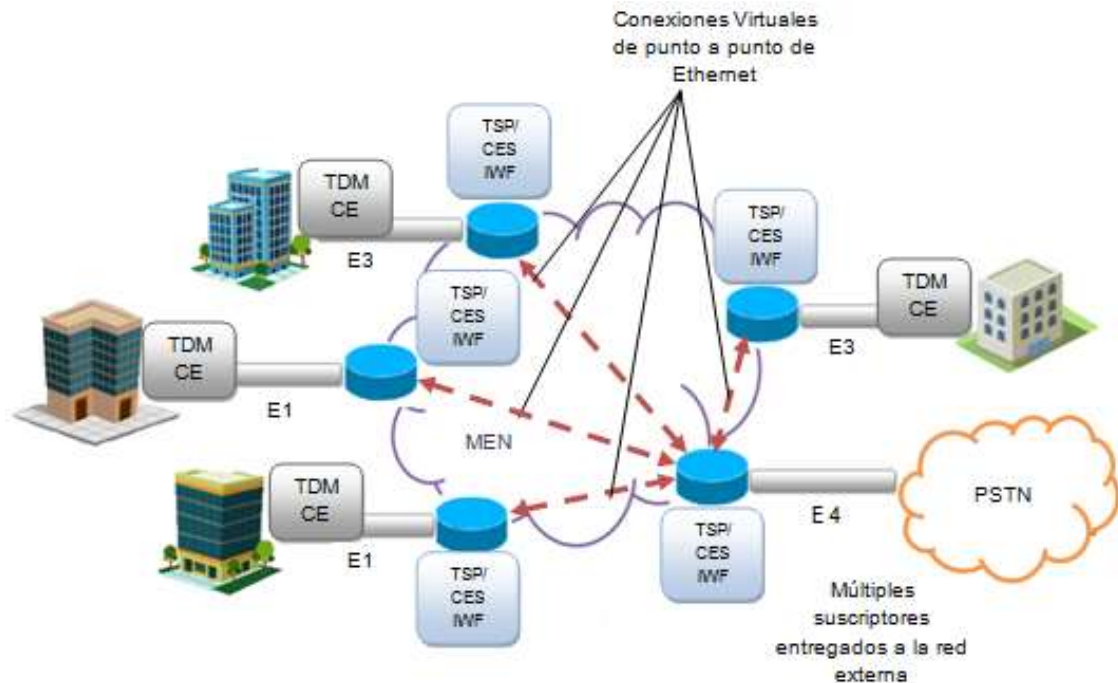


Figura 4. Configuración física de servicio TALS. [27]

3. Servicio de Circuito Emulado sobre Ethernet operado por el cliente en el que las empresas y otras clases de clientes administran enlaces dedicados de TDM vía CESoE a través de un servicio E-Line (Ethernet punto a punto) del proveedor de Metro Ethernet Network.
4. CESoE de modo mixto en el que se implementan combinaciones híbridas de los otros tres tipos de servicio.

#### 2.1.2 VLL (Virtual Leased Line)

El enlace dedicado virtual (VLL) es un enlace punto a punto basado en Ethernet. Se tiene comunicación en el modo de red (IP/MPLS) del protocolo de Internet (IP) y de conmutación de etiquetas multiprotocolo (MPLS). Esta técnica a veces se denomina servicios de línea privada virtual (VPS) o MPLS basado en Ethernet (EoMPLS). La VLL normalmente se empaqueta en una línea ficticia en el servicio Ethernet troncal IP/MPLS transmitido a través de un túnel MPLS (Virtual Access, 2018).

La capa de trabajo MPLS en el modelo OSI, a menudo se considera entre la capa 2 o capa de enlace de datos y la capa 3 o capa de red, por lo tanto, MPLS también puede denominarse que se encuentra en la "capa 2.5" del modelo OSI.

MPLS está diseñado para proporcionar un modelo de servicio de datagramas de conmutación de paquetes, tanto para el cliente como para proporcionar un servicio de datos unificados para transportar clientes basados en circuitos y se puede usar para transportar muchos tipos diferentes de servicios, incluidos paquetes como IP, ATM, SONET y Ethernet.

Se proporciona en el protocolo de transmisión de red IP independiente de la emulación de circuito IP (CEoIP). Cuando un punto final es Ethernet y el otro, un punto final no basado en Ethernet IP/UDP, el circuito emulado está en la red MPLS.

Los enlaces dedicados digitales se presentan normalmente como T1 o E1. Estos servicios ahora son difíciles de proporcionar a medida que las redes centrales de las empresas de telecomunicaciones se trasladan a Ethernet. Los productos de acceso virtual ofrecen la capacidad de emular estos servicios de enlace dedicado digital a través de redes IP/Ethernet utilizando los estándares TDM sobre IP. Los circuitos emulados aparecen como antes, lo que permite que los equipos que dependen de estos servicios sigan funcionando.

En el entorno TDM, los relojes se distribuyen a través de la red. Sin embargo, en los entornos Ethernet generalmente no hay un reloj común (excepto Ethernet síncrona). Para evitar el deslizamiento, los relojes en cada extremo de una línea arrendada simulada deben estar sincronizados. Los productos de Virtual Access TDM sobre IP tienen mecanismos de recuperación de reloj que les permiten aprender una velocidad de reloj desde un nodo remoto en la red.

Una solución VLL es responsable de transportar el tráfico de la línea troncal de PBX (Private Branch Exchange; central telefónica conectada directamente a la red pública de telefonía por medio de líneas troncales para gestionar además de las llamadas internas, las entrantes y salientes con autonomía sobre cualquier otra central telefonía) virtualmente a través de una red troncal MPLS, y proporciona acuerdos de nivel de servicio muy estrictos a los clientes que necesitan bajos requisitos de latencia/fluctuación/pérdida (Virtual Access, 2018).

En el caso de VLL, el operador configura manualmente la ruta del túnel TE (Traffic Engineering) de baja latencia para atravesar el enlace con la menor cantidad de latencia en el núcleo de MPLS. La ruta conmutada TE Label de mejor esfuerzo es una ruta de menor calidad que admite el tráfico de mejor esfuerzo. Además de la configuración manual de la ruta, este túnel TE de baja latencia también se protegerá a través del túnel TE (ruta de conmutación de etiquetas de copia de seguridad de Fast Reroute) que brinda protección de enlace/nodo FRR (Fast Reroute). En el caso de un enlace o falla del nodo a lo largo de la ruta conmutada de etiqueta TE de baja latencia, el FRR proporcionará un re-encaminamiento de menos de 100 ms. El esquema físico se ilustra en la Figura 5.

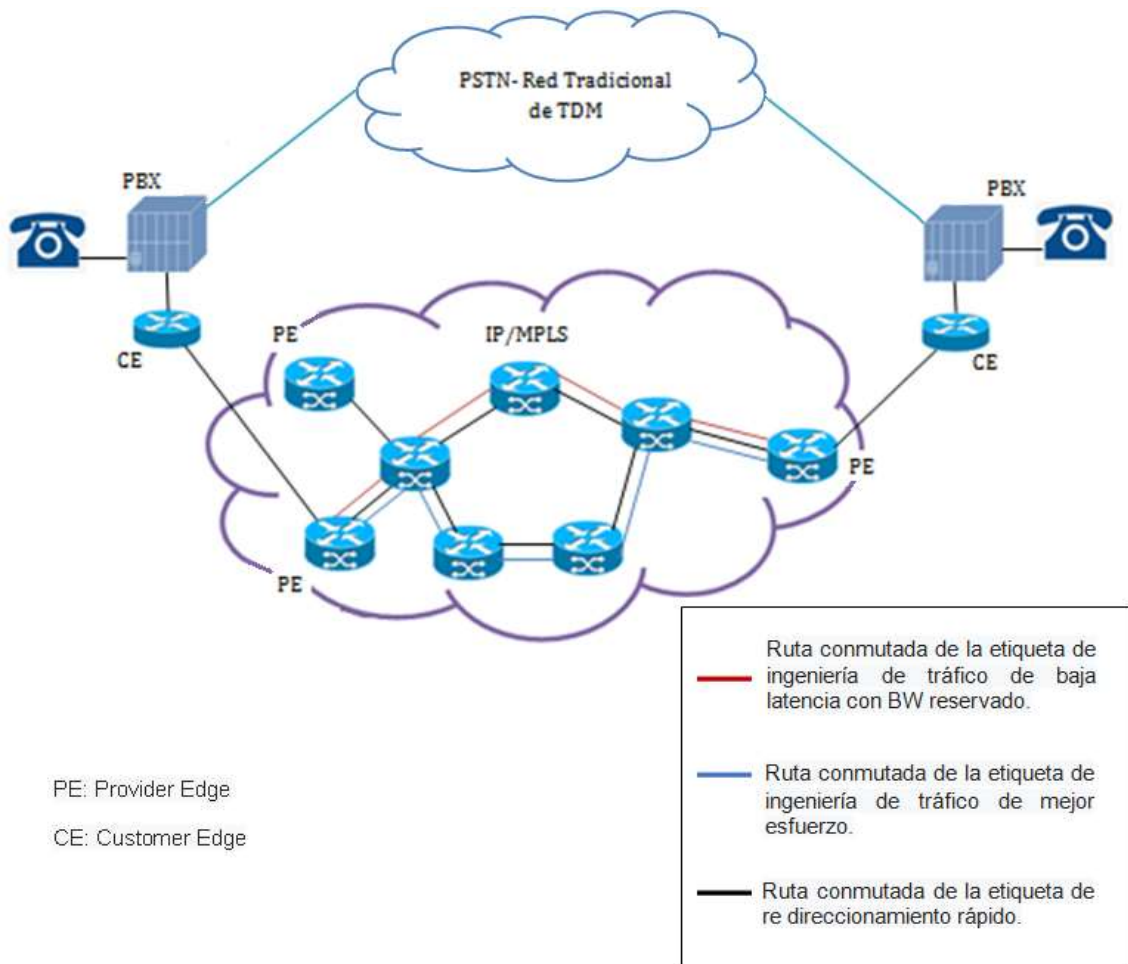


Figura 5. Esquema físico de VLL. [14]

Esta combinación de tecnologías es lo que hace que esta solución de ancho de banda asegurada sea tan poderosa. Cualquier cliente que requiera un transporte de baja latencia de aplicaciones específicas con requisitos de tiempo de inactividad cercano a cero podría beneficiarse enormemente de este tipo de servicio.

## 2.2 WDM/fibra óptica

De acuerdo al capítulo 1 en dónde describí los medios de transmisión que existen y menciono las características de la fibra óptica, en este apartado vamos a retomar los beneficios que nos puede brindar y como puede ser una solución para la migración de TDM a Ethernet.

Las propiedades de la fibra óptica monomodo, como la baja pérdida y el ancho de banda bastante amplio, lo convierten en el candidato ideal para enfrentar los desafíos de capacidad para la migración deseada. Este tipo de fibra se usa a menudo en redes centrales y metropolitanas, y en la actualidad su penetración en el dominio de acceso también está aumentando (Koonen, 2006).

La red óptica pasiva (PON) es la solución más interesante, básicamente porque no hay ningún equipo activo instalado en el campo, una característica muy satisfactoria para los operadores tradicionales, y también porque el equipo y las fibras de alimentación se comparten entre los usuarios. Una PON es un sistema que lleva el cableado de fibra óptica y señala todo o la mayor parte del camino al usuario final. Una PON consiste en una terminación de línea óptica (OLT, Optical Line Terminal) en la oficina de la compañía de comunicaciones y en varias unidades de red óptica (ONU, Optical Network Unity) cerca de los usuarios finales. Se pueden conectar hasta 32 unidades de red óptica a una terminación de línea óptica.

Algunos sistemas de PON de próxima generación, como la red óptica pasiva de Ethernet (EPON) es una red basada en PON que transporta el tráfico de datos encerrado en tramas de Ethernet (como se define en el estándar IEEE 802.3av); y la División de Longitud de Onda Multiplexada (WDM)-PON, aumentan la disponibilidad del sistema PON, debido a la capacidad restaurable de la arquitectura.

### 2.2.1 EPON

Para el sistema EPON, Ethernet indica una opción lógica para una red de acceso a datos IP optimizada. Las técnicas de calidad de servicio (QoS) recientemente desarrolladas han dado a las redes Ethernet la capacidad de soportar datos, video y voz. Ethernet emplea tecnología de bajo costo, que es compatible con muchos equipos heredados.

El estándar IEEE 802.3av es el estándar de red óptica pasiva Ethernet de 10 Gbit/s, mejor conocido como 10G-EPON, permite conexiones de red informática a través de la infraestructura del proveedor de telecomunicaciones. El estándar admite dos configuraciones: simétrica, que opera a una velocidad de datos de 10 Gbit/s en ambas direcciones, y asimétrica, que opera a 10 Gbit/s en la dirección descendente (proveedor a cliente) y 1 Gbit/s en la dirección ascendente.

EPON es un tipo de red óptica pasiva, que de punto a multipunto utiliza divisores de fibra óptica pasiva en lugar de dispositivos alimentados para desplegar desde el hub (concentrador que permite centralizar el cableado de una red de computadoras para ampliarlo) a los clientes.

El estándar IEEE 802.3 definió dos configuraciones básicas para la red Ethernet. Se puede implementar una configuración sobre un medio compartido utilizando el acceso múltiple de detección de portadora con el protocolo de detección de colisión (CSMA/CD). En la segunda configuración, las estaciones podrían usarse para conectarse a través de un conmutador utilizando enlaces punto a punto dúplex completo.

Las configuraciones de EPON están diseñadas de tal manera que no se puede utilizar un medio compartido o una red punto a punto, sino que combina ambas. Los elementos básicos en los sistemas EPON son OLT, ONU y el divisor. La red que conecta la Oficina Central y la suscripción se conoce como Red de distribución óptica (ODN). La arquitectura del sistema EPON se muestra en la figura 6.



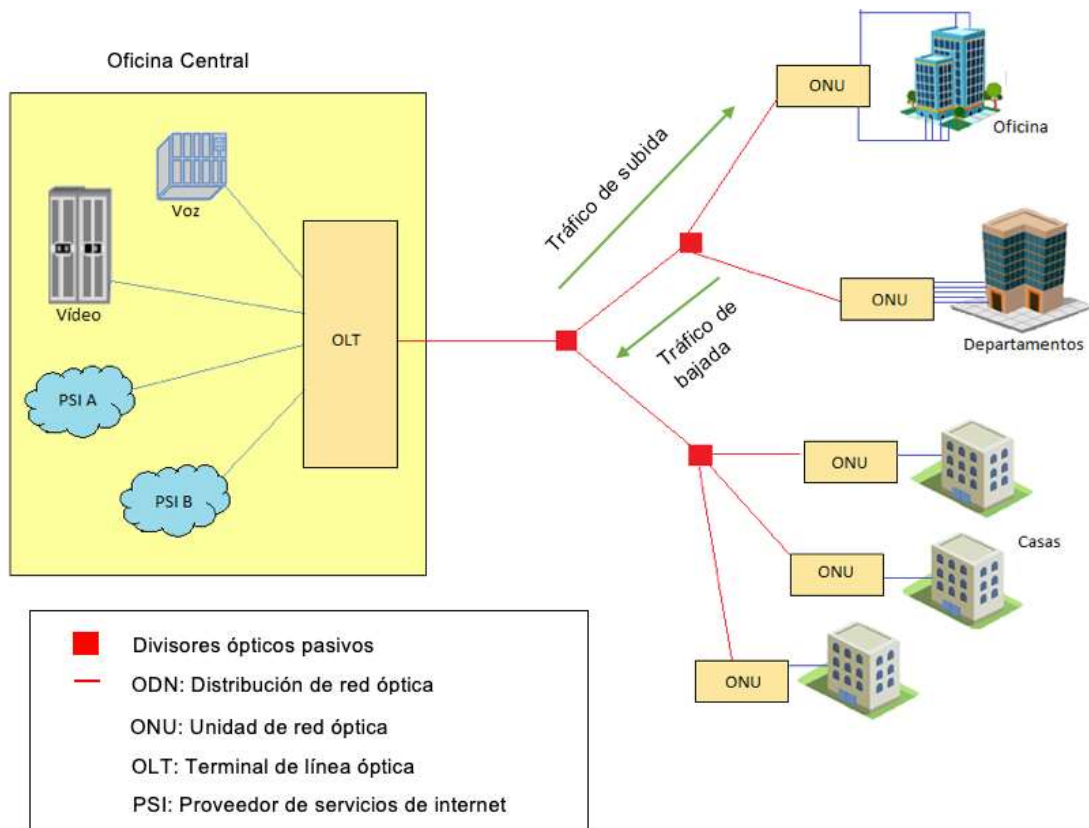


Figura 6. Arquitectura física de sistema EPON [30]

También es posible conectar en cascada los divisores, pero provocaría pérdidas de energía adicionales. En tales casos, es importante tener en cuenta que el presupuesto de energía óptica (pérdida de energía en la ruta de la red) no debe ser superado.

Es altamente más efectivo dar a la ONU individual un ancho de banda que sea bastante proporcional a su carga de tráfico. El proceso de implementar esto se conoce como asignación dinámica de ancho de banda (DBA), que es una característica de todos los PON modernos.

### 2.2.2 WDM-PON

WDM-PON es la aplicación de multiplexación por división de longitud de onda, que utiliza la longitud de onda individual para cada red PON. Las ONU tienen fuentes de luz en diferentes longitudes de onda sintonizadas que coexisten en la misma fibra, lo que aumenta el ancho de banda total de la red y el número de usuarios atendidos en la red de acceso óptico. En relación con el modo de comunicaciones, el WDM-PON puede usar comunicaciones punto a punto, punto a multipunto (como árboles EPON/GPON por cada longitud de onda) o soluciones híbridas. En el punto a punto, no se necesitan mecanismos dinámicos de asignación de ancho de banda (Obite, 2018).

El costo se mantiene bajo por cada ONU que opera con una tasa de bits individual en lugar de la tasa de bits agregada (WDM). Sin embargo, los aspectos de integridad de red, privacidad/seguridad y acceso simple a la capa activa se tienen en cuenta intrínsecamente, ya que las ONU están separadas por longitudes de onda físicas. Por lo que la principal limitación de WDM-PON es su mayor costo debido a que cada ONU recibe una longitud de onda dedicada y también un ancho de banda. Como resultado, un WDM-PON proporciona conexiones de nivel de longitud de onda punto a punto.

Una mejor opción es emplear ONU incoloras con láseres sintonizables o amplificadores ópticos de semiconductores reflectantes (RSOA, Reflective Semiconductor Optical Amplifiers). Aunque actualmente, el RSOA es muy costoso que toda la ONU basada en EPON, también los láseres sintonizables resultan ser más caros que los RSOA.

WDM-PON consiste en reemplazar el divisor de potencia óptica con una rejilla de guía de onda (AWG, Arrayed Waveguide Grating). En el segmento de subida, el AWG representa un multiplexor de longitudes de onda separadas que atraviesan una sola fibra, mientras que, en el segmento de bajada, el AWG representa un multiplexor al guiar una longitud de onda separada por cada caída de fibra. Por lo tanto, AWG permite una asignación fija de dos longitudes de onda (canales de bajada y de subida) a ONU individuales. La arquitectura principal de WDM-PON se muestra en la Figura 7.

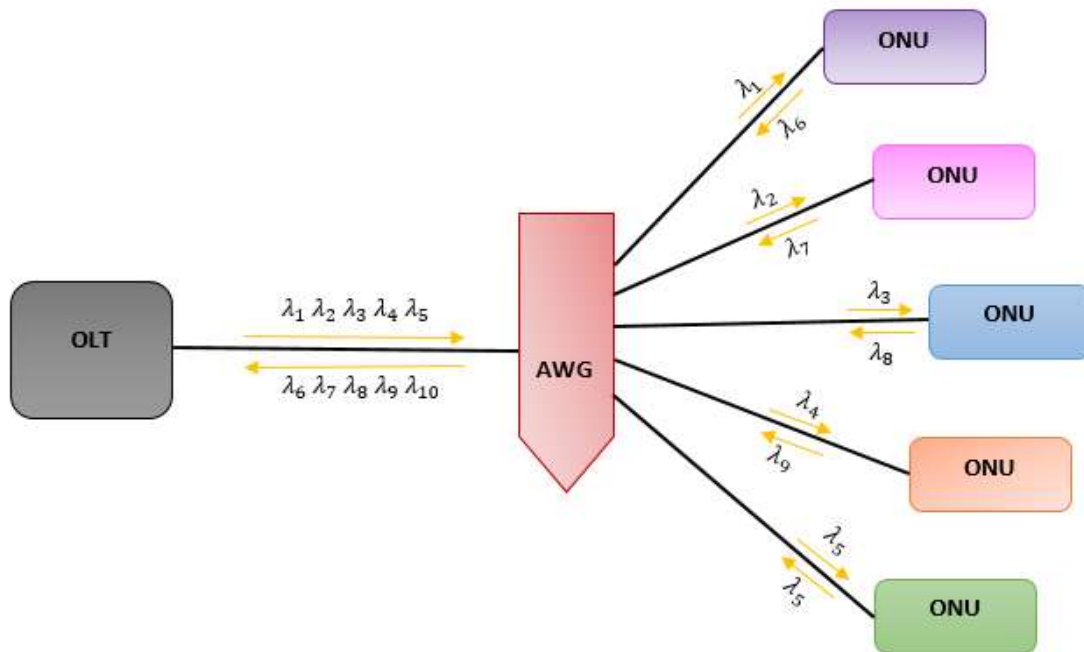


Figura 7. Arquitectura principal de sistema WDM-PON [30]

En el lado OLT, varios transceptores ópticos de colores modulan sus flujos de datos en diferentes longitudes de onda, y luego estas diferentes longitudes de onda son multiplexadas en un solo alimentador de fibra. El AWG es un divisor de longitud de onda,



que enruta una longitud de onda dedicada a cada usuario final. En cada terminal de red óptica (ONT, Optical Network Terminal) o en la ONU hay un transceptor óptico que puede recibir/transmitir la longitud de onda dedicada.

Actualmente hay algunas implementaciones de WDM-PON que proporcionan una tasa de bits de hasta 100 Mbit/s para cada suscriptor. La tasa de bits depende de la capacidad del equipo de red (por ejemplo, transceptores en las OLT y ONU). La nueva generación WDM-PON puede proporcionar 1 Gbit/s por ONU. El número de usuarios que se pueden multiplexar en una misma fibra de alimentación en WDM-PON depende en gran medida del espaciado de canales del sistema WDM, que se puede dividir en WDM grueso (CWDM, Coarse Wavelength Division Multiplexing), WDM denso (DWDM, Dense Wavelength Division Multiplexing) y WDM ultra denso (UDWDM, Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing).

Como se describió anteriormente, las tecnologías ópticas están evolucionando continuamente en la dirección de velocidades más altas, mayor capacidad de longitud de onda y mejor servicio. Se requiere una asignación inteligente y una estrategia de coexistencia de usuarios nuevos y existentes, con una combinación lógica de diferentes tipos de usuarios, tales como suscriptores comerciales y residenciales.

Con amplificación óptica, presentan mayor ancho de banda por ONU, alcance máximo y relaciones de división, en comparación con las arquitecturas EPON y GPON. Pueden soportar varias topologías de fibra y ofrecen funcionalidades adicionales, como protección. Los WDM-PON si se implementan, darán acceso a una nueva estructura de banda ancha y a aplicaciones residenciales de gran escala. Los proveedores de servicios de comunicación deben preparar sus redes para satisfacer las crecientes demandas de ancho de banda creadas por video IP, banda ancha móvil e Internet de las cosas (IoT).

## 2.3 Enlaces Inalámbricos a altas frecuencias

Los enlaces inalámbricos (microondas, mmWave u óptico inalámbrico) se usan cuando las opciones cableadas no son factibles, o en casos donde se necesita flexibilidad de implementación o capacidad adicional.

La mayoría de las redes inalámbricas de backhaul/fronthaul existentes están diseñadas para macrocélulas y, por lo general, utilizan enlaces de línea de vista punto a punto (LoS, Line of Sight) que funcionan a frecuencias tradicionales por debajo de 50 GHz, donde el espectro es limitado y la interferencia es un desafío. Al trabajar a altas frecuencias, ocuparemos 5G para poder mejorar el funcionamiento de los enlaces inalámbricos y que la migración que se plantea sea realmente viable.

### 2.3.1 Microondas

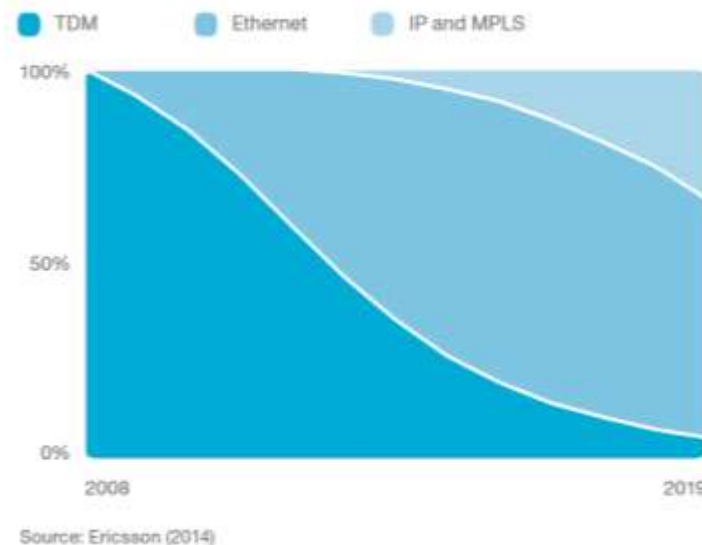
Con la transmisión de microondas en el centro de la futura evolución de la banda ancha móvil, la disponibilidad de suficiente espectro de microondas es un factor crucial. Más ancho

de banda y nuevo espectro son tan importantes para la transmisión de microondas como lo son para el acceso por radio para allanar el camino para la banda ancha móvil.

Cualquier actualización sustancial de la red incluye también el reemplazo de enlaces de radio microondas, que se pueden usar como red troncal de red o al menos como segmentos de red parciales. En ambos casos, la actualización debe realizarse, manteniendo la interrupción de los servicios existentes al mínimo. En la mayoría de los casos, se realiza gradualmente en varias etapas.

Primero, es necesario reemplazar los enlaces de radio existentes con sistemas de radio microondas universales, que son capaces de soportar el tráfico TDM e IP simultáneamente. Los nuevos enlaces microondas deben garantizar la transmisión de todo el tráfico TDM existente. En segundo lugar, la nueva infraestructura de red IP paralela debe construirse sobre toda la red existente. Esto puede requerir nuevos conmutadores Ethernet/MPLS, enrutadores, líneas de transmisión óptica, etc. Tercero, se debe realizar la migración del tráfico TDM a IP/MPLS. La transmisión TDM a través de enlaces MW se puede desactivar gradualmente durante esta etapa, liberando partes de la capacidad total y entregándolas al tráfico IP/MPLS.

De acuerdo a la Gráfica 1 que se muestra a continuación, tomada del artículo “Microwave towards 2020” escrito por Ericsson, se puede ver la tendencia que se tiene a dejar de usar TDM para migrar hacia Ethernet o IP/MPLS debido a que se pretende usar frecuencias altas, e incluso apoyarse de 5G, siendo ésta la gran oportunidad que se le puede dar a las microondas para lograr una migración exitosa.



Gráfica 1. Uso de enlaces de TDM, Ethernet e IP/MPLS del 2008 al 2019. <sup>[31]</sup>

Es importante mencionar que si se usan las microondas para lograr migrar de TDM a Ethernet sería necesario utilizar en conjunto la opción de VLL que es basada en Ethernet usando la red IP/MPLS.

En los últimos años, la tecnología de microondas se ha movido rápidamente pues ha dado varios saltos en las capacidades y pueden ofrecer capacidad de gigabits en todas partes, de forma rápida y rentable. Gracias a la innovación técnica en curso, las microondas seguirán siendo el medio de transmisión elegido para las redes móviles y admitirá la expansión de la banda ancha móvil a medida que avanza a través de 3G, 4G, 5G y más.

Además de superar los límites de capacidad a través de tecnologías como la modulación de orden superior, canales más anchos, operación de doble polaridad, enlace de enlace de radio, las microondas también están evolucionando para funcionar de manera más eficiente con la agregación de paquetes incorporada para minimizar el costo inicial de implementación o la actualización de la red costos.

### 2.3.2 Ondas milimétricas (mm-Waves)

Las ondas milimétricas, también conocidas como frecuencia extremadamente alta (EHF), son una banda de frecuencias de radio que se adapta bien a las redes 5G. En comparación con las frecuencias inferiores a 5 GHz utilizadas anteriormente por dispositivos móviles, la tecnología de onda milimétrica permite la transmisión en frecuencias entre 30 GHz y 300 GHz. Estas frecuencias se denominan ondas milimétricas porque tienen longitudes de onda entre 1 mm y 10 mm, mientras que las longitudes de onda de las ondas de radio utilizadas actualmente por los teléfonos inteligentes son en su mayoría de varias docenas de centímetros.

Las ondas milimétricas se presentan como una tecnología clave para abordar las mayores velocidades de datos requeridas para atender áreas urbanas densas. Además, la combinación de una velocidad de datos alta y un rango de alta resolución representa una de las características clave que esta tecnología puede desbloquear en el futuro cercano. Esta característica puede ser útil para nuevos servicios como aplicaciones críticas de seguridad, realidad aumentada, vida asistida, etc.

Una característica clave de las soluciones mmWave es la combinación de aceleradores de hardware optimizados con procesamiento paralelo programable. Es decir, al estar definidos los programas de Control de Acceso al Medio (MAC, Media Access Control) y la capa física, permite explorar y adaptar continuamente el rendimiento de los nuevos algoritmos inalámbricos mmWave en el contexto de las plataformas de investigación avanzada.

Otro trabajo específico en mmWaves es la combinación de técnicas de múltiples antenas (MIMO, Multiple Input - Multiple Output) en estas frecuencias. Concretamente, la arquitectura MIMO (que se refiere a un sistema con varios transmisores "input" y varios receptores "output") en mmWave es especialmente interesante para aplicaciones de backhaul inalámbricas, donde se deben soportar velocidades de datos muy altas.

El número de flujos de datos paralelos admitidos por estos sistemas está determinado por dos factores, la disposición de la matriz de antenas y el producto del rango de transmisión de longitud de onda. Esto significa que la separación entre los elementos de antena está

correlacionada con el rango de enlace alcanzable (es decir, la separación entre transmisor y receptor). En otras palabras, cuando se necesitan flujos adicionales, se debe aumentar el tamaño de la matriz o se debe disminuir la longitud de onda o el rango.

Las soluciones mmWave proporcionan enlaces con alta directividad, incluidas antenas orientables eléctricamente permitiendo soluciones de punto a multipunto, que presentan ventajas de implementación tanto en términos de costo como de espacio.

### 2.3.3 Óptico inalámbrico

El uso de portadores ópticos en el espacio libre es una tecnología que combina la movilidad de las comunicaciones inalámbricas de radiofrecuencia (RF) con el ancho de banda de alto potencial de las comunicaciones ópticas. Además, el espectro óptico no está sujeto a tarifas de licencia con una fácil reutilización del espectro ya que los rayos de luz no pueden penetrar las paredes.

El principal desafío de diseño para la tecnología óptico inalámbrico es lograr una relación señal/ruido (SNR) suficientemente alta a velocidades de datos útiles dado que la potencia del transmisor (TX) está limitada por consideraciones de seguridad ocular.

Los sistemas óptico inalámbricos pueden clasificarse ampliamente en dos categorías, interiores y exteriores. Dentro de ambos, se ha demostrado una gran cantidad de modos operativos posibles que se pueden agrupar usando las subcategorías que se muestran en la Figura 8.



Figura 8. Subdivisiones de los sistemas ópticos inalámbricos. [21]

Los dos diseños fundamentales para sistemas ópticos inalámbricos en interiores son la línea de vista directa (LOS) y los enlaces difusos. En el primero, un haz estrecho envía luz a un receptor de campo de visión estrecho sobre los LOS. Tal enlace experimenta, por lo tanto, impactos mínimos de la dispersión de trayectos múltiples, el ruido y la pérdida de trayectoria.

Aunque la velocidad de datos está limitada por el presupuesto de energía permitido, dichos enlaces LOS son muy adecuados para puntos de acceso de alta velocidad.

Un enlace difuso se basa en un Tx de haz ancho y un Rx con campo de visión ancho, refleja el funcionamiento de los sistemas WiFi actuales al dispersar un haz óptico desde las superficies dentro de una habitación. Aunque esto ofrece la ventaja de más de una ruta, las diferentes longitudes de ruta producen un efecto de dispersión por trayectos múltiples que limita las velocidades de bits alcanzables.

A pesar de las innovaciones tales como los sistemas cuasi-difusos y los métodos de modulación alternativos, la mayor pérdida de trayectoria produce la necesidad de niveles de potencia más altos, lo que significa que los sistemas difusos no son competitivos con las soluciones de RF y es poco probable que se empleen en sistemas de frecuencias muy altas tales como 5G.

El sistema óptico inalámbrico exterior generalmente se conoce como comunicación óptica de espacio libre y hace uso de los enlaces LOS como la única opción factible dada la pérdida de ruta. Podemos considerar los sistemas ópticos de espacio libre por medio de su distancia desde el centro de la tierra.

Primero, hay redes de satélite que pueden cubrir grandes porciones del globo. Segundo, los enlaces ópticos de espacio libre terrestres generalmente se establecen entre edificios. Finalmente, existe el área de rápido desarrollo submarina donde la tecnología acústica actual es extremadamente limitada en su velocidad de bits, y el sistema óptico inalámbrico ofrece un rendimiento mejorado.

De estos, nos concentramos en los sistemas terrestres, ya que están más cerca de la interfaz con 5G. Reconocemos que los satélites pueden ser necesarios en el paisaje general de 5G, pero muchos de los problemas serán similares (particularmente en el área de comunicaciones terrestres a satelitales), mientras que el submarino es un área importante pero distinta con diferentes condiciones de propagación.

Las comunicaciones ópticas inalámbricas proporcionan un rendimiento de transmisión superior sobre puntos de acceso con diámetros de unos pocos metros, que es un tamaño realista. Podría considerarse como una opción para migrar, tomando en cuenta que pretendería trabajar en 5G, lo cual puede ser aún algo complicado en México.

### Capítulo 3. Situación de México

En este capítulo se pretende presentar la situación actual de los enlaces TDM que existen en el país para empezar a analizar cuál sería la mejor opción para lograr migrar de enlaces TDM a Ethernet, de acuerdo a las opciones presentadas en el capítulo anterior y al esquema que se expondrá a continuación.

Conforme al documento que establece las condiciones técnicas mínimas para la interconexión entre concesionarios que operen redes públicas de telecomunicaciones y determina las tarifas de interconexión resultado de la metodología para el cálculo de costos de interconexión que estarán vigentes del 1 de enero al 31 de diciembre de 2019 escrito por el Pleno del Instituto Federal de Telecomunicaciones y publicado en Diario Oficial de la Federación, la oferta de referencia se diferencia entre enlaces digitales (TDM) y enlaces Ethernet, por tal razón se calculan dos gradientes distintos de precios lo que permite fijar los precios por separado para ambas tecnologías, reflejando sus especificidades.

En virtud de lo anterior, la estructura de precios actual para enlaces entre localidades e internacionales TDM difiere de la de enlaces Ethernet, tal que:

- Enlaces TDM: parte fija + precio por kilómetro
- Enlaces Ethernet: precio por kilómetro

La demanda se estima en términos de capacidad y en número de enlaces. A partir del cálculo de la capacidad total de enlaces dedicados entre localidades e internacionales, se actualizan los datos del operador fijo incumbente en el modelo de mercado del modelo de interconexión 2019.

Por último, se distribuyen los costos CITLP (Costo Incremental Total promedio de Largo Plazo, modelo que calcula las tarifas mayoristas de enlaces dedicados locales, entre localidades e internacionales) resultantes del modelo de interconexión 2019 asociados al servicio de enlaces dedicados, asegurando así que se recuperan todos los costos.

Se desarrolló un modelo de mercado que refleja la evolución de los enlaces TDM y Ethernet entre localidades e internacionales a largo plazo. El modelo de mercado se basa en información provista por el AEP (Agente Económico Preponderante) en donde es considerado lo siguiente:

- Estimación del crecimiento de capacidad total transportada por enlaces dedicados.
- El tráfico es separado por tecnología: TDM y Ethernet.
- Cada tecnología se estima la distribución de enlaces según velocidad y distancia hasta 2019.
- Se calcula el número total de enlaces en el mercado con base en la capacidad total y la velocidad media por enlace

Es muy importante conocer los costos de enlaces TDM y Ethernet para así saber si vale la pena migrar, y como se muestra en el documento mencionado anteriormente, con los enlaces TDM se cobra la parte fija (parte física de la estructura de TDM, donde se realizan todas las operaciones de multiplexación necesarias del proceso general), siendo un gasto extra que se realiza en comparación con enlaces Ethernet.

Otro aspecto importante es conocer la separación de mercados en que se divide el sector de Telecomunicaciones que es en mayoristas y minoristas. De acuerdo a una investigación realizada por el periódico “El Universal” escrito por Carla Martínez, la división que se da en el mercado de telecomunicaciones entre servicios mayoristas y minoristas amplía el acceso a estos y fomenta la aparición de comercializadores diferentes a los existente, dijo Gregorio Tomassi, analista financiero.

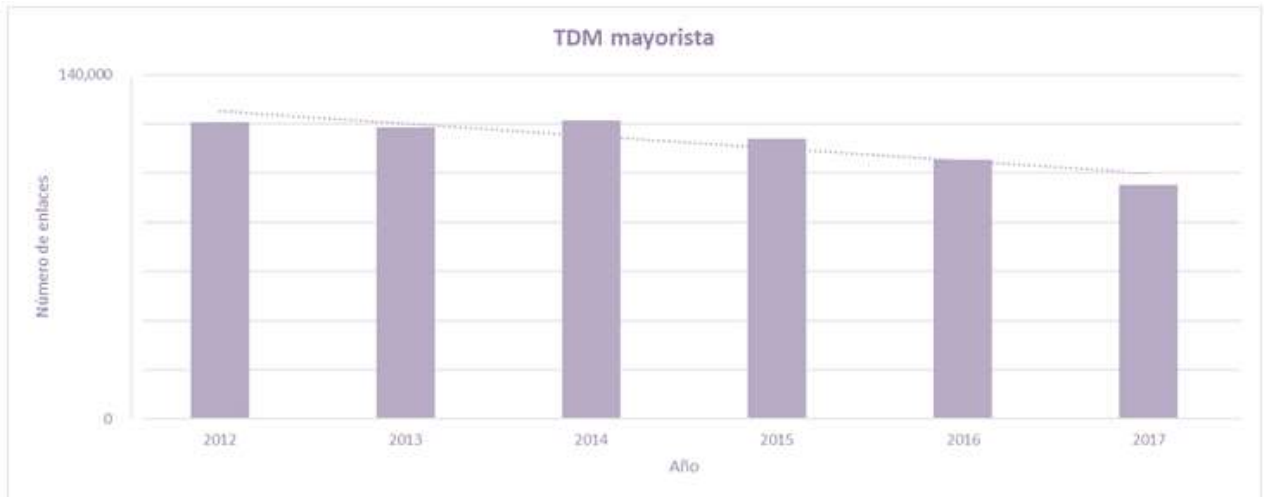
La definición de servicios mayoristas y minoristas brindada por el Instituto Federal de Telecomunicaciones, dice lo siguiente:

- *Servicios minoristas*: Ofrecidos por los concesionarios y/o autorizados a usuarios finales.
- *Servicios mayoristas*: Ofrecidos entre concesionarios y/o autorizados para el desarrollo de sus actividades operativas en el sector. Servicio de telecomunicaciones que consiste en el suministro de acceso a elementos individuales, a capacidades de una red o servicios, incluyendo los de interconexión, que son utilizados por concesionarios o comercializadores para proveer servicios de telecomunicaciones a los usuarios finales.

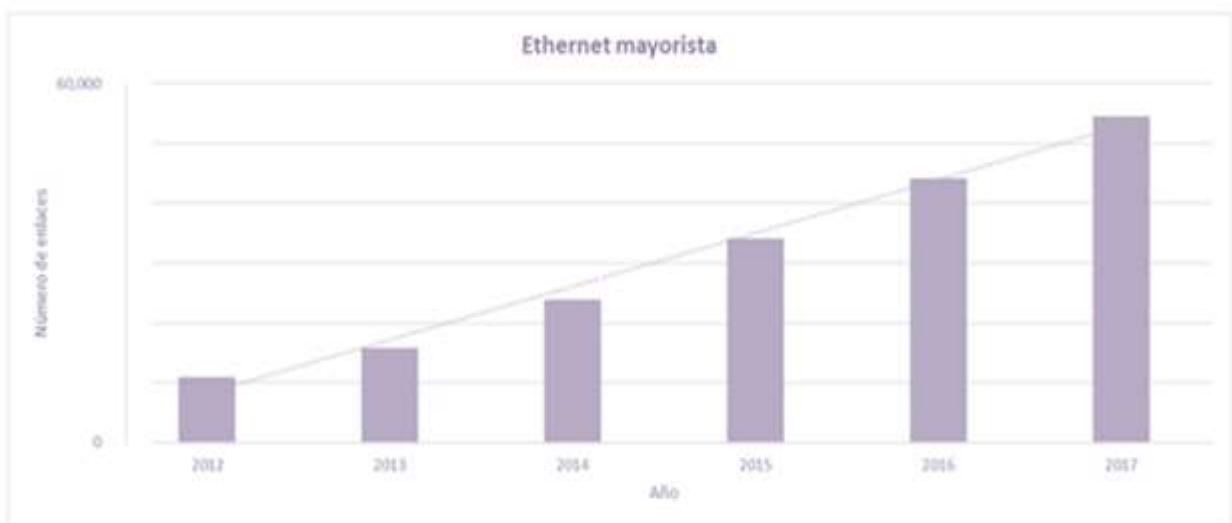
En la Ley Federal de Telecomunicaciones y Radiodifusión (LFTyR), el agente económico preponderante o con poder sustancial, es aquel que, en algún mercado relevante de los sectores de radiodifusión o telecomunicaciones, conforme a lo establecido en la Ley Federal de Competencia Económica, cuente directa o indirectamente con más del 50% de los usuarios suscriptores, audiencia, tráfico o capacidad. El IFT el 6 de marzo del 2014 determina que Telmex es el agente económico preponderante en el sector de telecomunicaciones.

### 3.1 Telmex (TDM/Ethernet)

De acuerdo a las definiciones anteriores, se realizó un análisis en el Centro de Estudios del Instituto Federal de Telecomunicaciones, en donde se evaluaron estadísticamente las cantidades de enlaces TDM y Ethernet que existen actualmente en México, que a continuación presentaré para mostrar el panorama actual que se tiene.



Gráfica 2. Número de enlaces de TDM mayorista. [32]



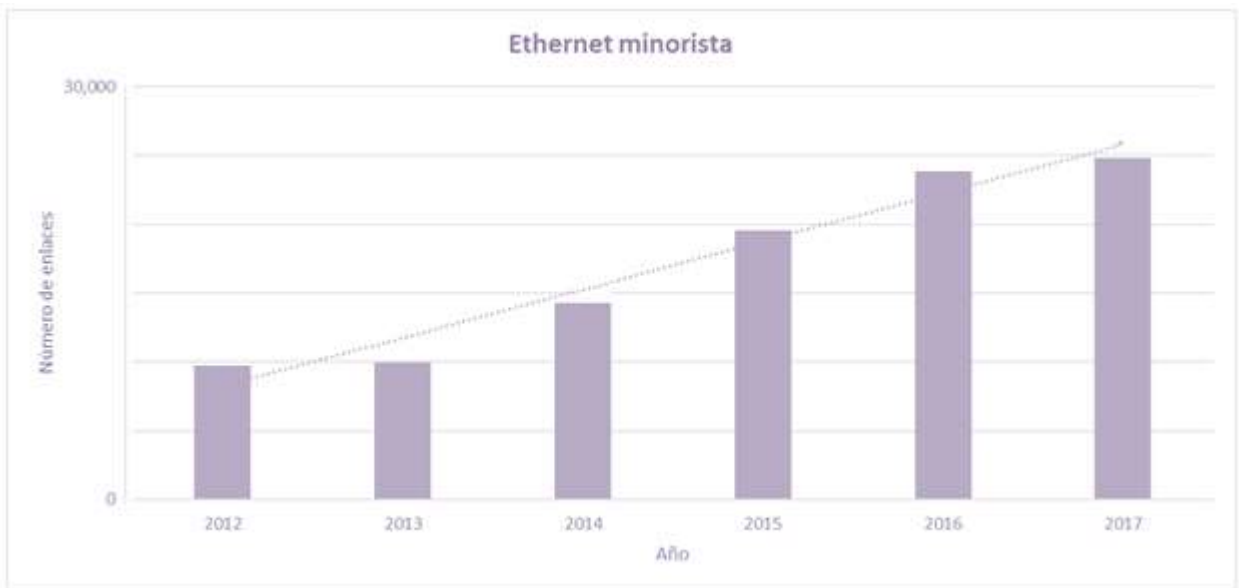
Gráfica 3. Número de enlaces de Ethernet mayorista. [32]

En las Gráficas 2 y 3 se muestran los enlaces de TDM y Ethernet en servicios mayoristas y como es la evolución de ambos enlaces; se puede ver como a partir del año 2015 comienzan a bajar el número de enlaces TDM y a partir de ahí han ido disminuyendo y los enlaces Ethernet han ido incrementando, sin embargo, aún existen muchos más enlaces TDM que de Ethernet.



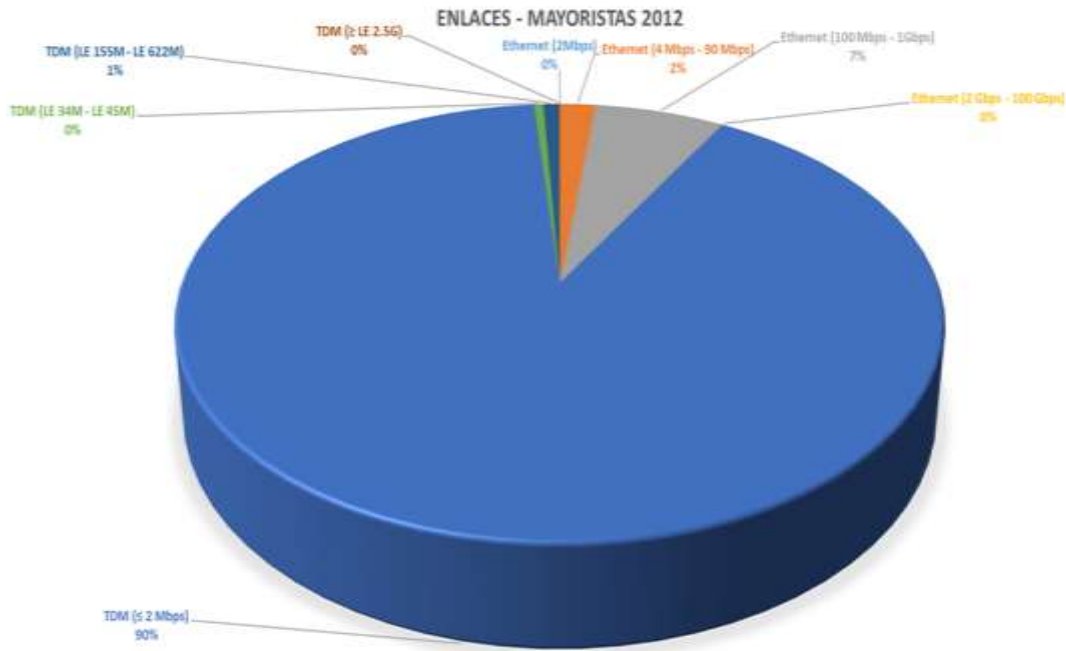


Gráfica 4. Número de enlaces de TDM minorista. [32]

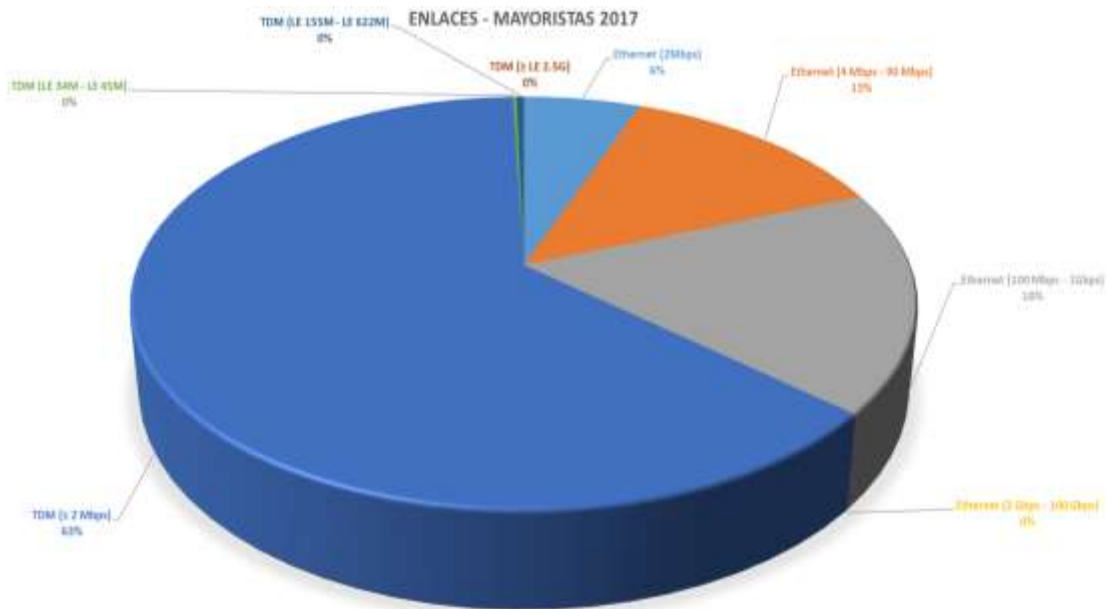


Gráfica 5. Número de enlaces de Ethernet minorista. [32]

En las gráficas 4 y 5 es el mismo caso que en las gráficas 2 y 3, pero en servicios minoristas, nuevamente se puede ver el decremento de enlaces TDM, que es mucho más notorio que en enlaces mayoristas y como ha incrementado el uso de enlaces Ethernet.

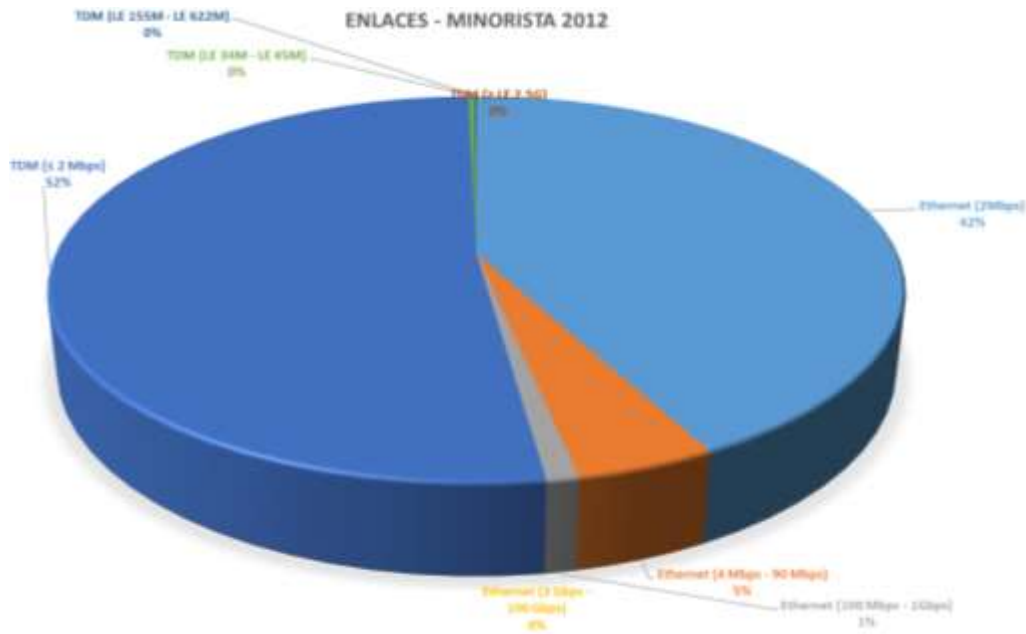


Gráfica 6. Capacidades más usadas de enlaces mayoristas 2012. [32]

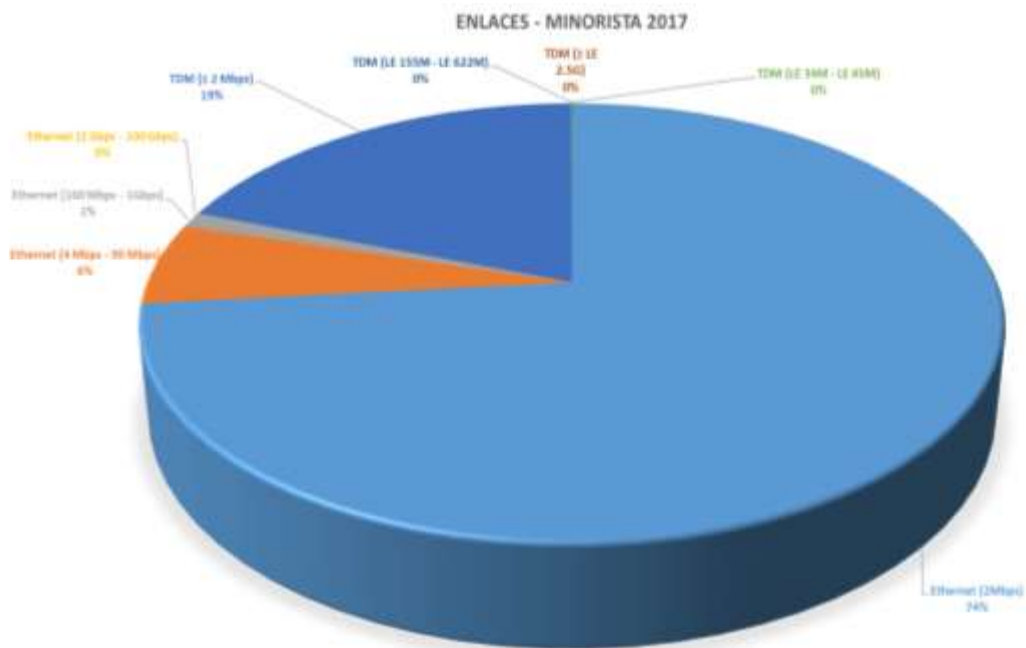


Gráfica 7. Capacidades más usadas de enlaces mayoristas 2017. [32]

En las gráficas de pastel 6 y 7 se puede ver el cambio en la tendencia en los en los enlaces mayoristas en cuanto a las velocidades que TDM maneja, siendo que a lo largo de 5 años se ha necesitado una mejora en la velocidad de Tx y Rx de datos, por lo que disminuye el porcentaje de enlaces de TDM de un 90% a un 63%. Es notorio que se necesita una migración para los enlaces TDM existentes, por la evolución de TI (Tecnologías de la Información) que vivimos actualmente.



Gráfica 8. Capacidades más usadas de enlaces minoristas 2012. [32]



Gráfica 9. Capacidades más usadas de enlaces minoristas 2017. [32]

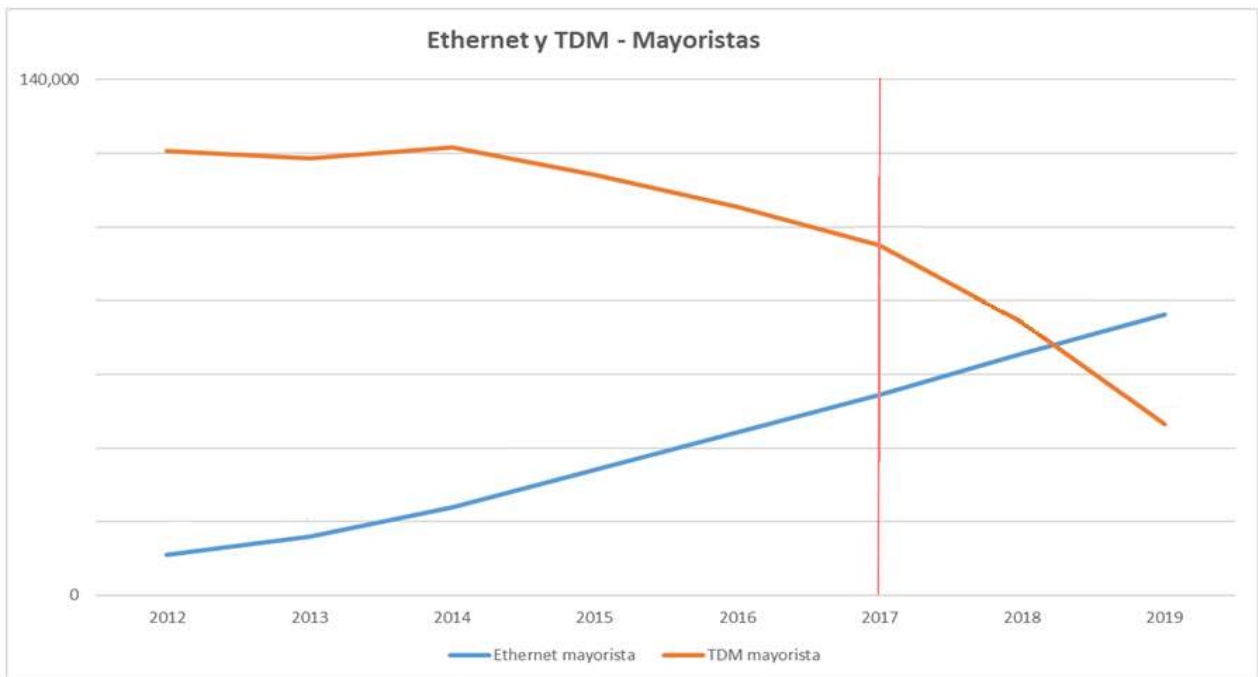
En las gráficas de pastel 8 y 9 es nuevamente la comparación de enlaces TDM y Ethernet de acuerdo a las velocidades que se usan, pero ahora con enlaces minoristas. Nuevamente se pudo ver que, en el mercado minorista, Ethernet ya tiene una gran presencia, teniendo el 74% en el año 2017 y TDM tiene solo el 19%.

### 3.2 Proyecciones

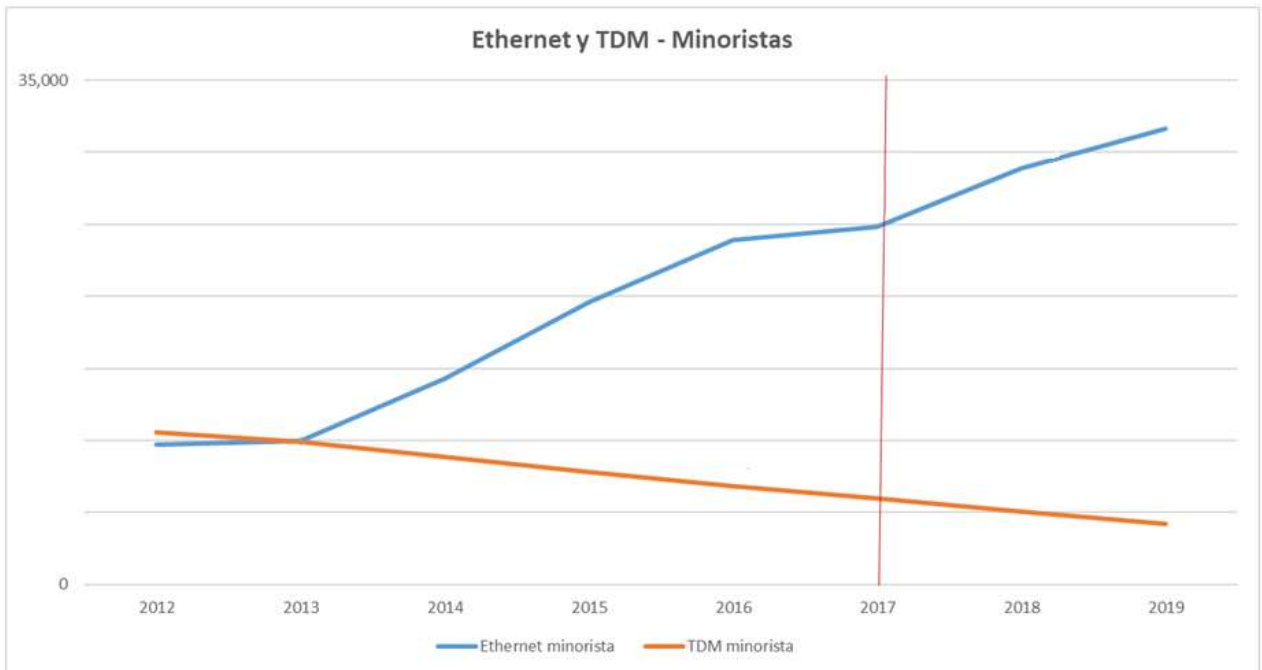
De acuerdo a los datos presentados, se realizaron proyecciones de lo que se espera en los siguientes años respecto al comportamiento de enlaces TDM y Ethernet. Los datos obtenidos son hasta el año 2017 y se presentan las proyecciones de los años 2018 y 2019 para ver la tendencia que se tendrá, tanto en el mercado mayorista como en el minorista.

En la gráfica 10, se muestra la proyección que se espera de los enlaces mayoristas, presentando con una línea roja el año hasta donde se tienen datos registrados. Es notorio el decremento del uso de enlaces TDM y como se esperaría que en el curso de este año los enlaces de Ethernet sean ahora los que predominen en el país.

En la gráfica 11, se muestra la proyección que se espera de los enlaces minoristas, presentando con una línea roja el año hasta donde se tienen datos registrados. Aquí se puede ver como los enlaces TDM realmente no tuvieron un gran impacto en el mercado minorista, siendo desde el año 2013 los enlaces de Ethernet superiores a los enlaces TDM y a partir de ahí crecieron enormemente dejando muy atrás a los enlaces de TDM.



Gráfica 10. Comparación de número de enlaces de TDM contra Ethernet mayoristas del 2012 al 2019. [32]



Gráfica 11. Comparación de número de enlaces de TDM contra Ethernet minoristas del 2012 al 2019. [32]

Asimismo, se pueden comparar las tarifas de los enlaces TDM y Ethernet con base en la Oferta de Referencia 2019 [1] en donde presentan varias tablas con los precios de instalación de enlaces TDM y Ethernet y de renta mensuales por tramos y por velocidades.

La Tabla 1 se divide en dos tablas, del lado izquierdo se encuentran los enlaces de TDM a diferentes velocidades con sus respectivos precios de renta mensual y del lado derecho enlaces de Ethernet con la renta mensual.

Comparando los costos de enlaces TDM y Ethernet a la misma velocidad, por ejemplo, a 2 Mbps (señalado con el recuadro rojo), la renta mensual de los enlaces Ethernet resulta ser más barata que la renta mensual de enlaces TDM por aproximadamente \$81, esto es porque como lo mencioné anteriormente para enlaces de TDM se cobra la parte fija y si incrementamos las velocidades, que es lo que se espera que suceda debido a la evolución de las TI, el costo de enlaces TDM es mucho mayor que el de los enlaces Ethernet.

Igualmente, en la misma Oferta de Referencia se muestra una tabla donde aparecen los gastos de instalación de enlaces TDM y Ethernet a diferentes velocidades, la cual se muestra en la Tabla 2.

## Enlaces TDM

Velocidad	Renta Mensual
64 Kbps	\$292.17
128 Kbps	\$367.18
192 Kbps	\$429.89
256 Kbps	\$485.75
384 Kbps	\$584.87
512 Kbps	\$673.15
768 Kbps	\$829.83
1024 Kbps	\$969.37
E1 (2 Mbps)	\$1,539.20
E2 (8 Mbps)	\$6,156.81
E3 (34 Mbps)	\$13,505.65
E4 (139 Mbps)	\$39,343.10
STM1 (155 Mbps)	\$39,343.10
STM4 (622 Mbps)	\$59,452.37
STM 16 (2.5 Gbps)	\$145,565.78
STM 64 (10 Gbps)	\$356,995.29
STM-256 (40 Gbps)	\$898,613.73
2 Mbps PMP	\$2,251.30
34 Mbps PMP	\$14,929.85
155 Mbps PMP	\$42,191.49
622 Mbps PMP	\$66,573.37

## Enlaces Ethernet

Velocidad	Renta Mensual
Ethernet 1 Mbps	\$939.82
Ethernet 2 Mbps	\$1,457.71
Ethernet 4 Mbps	\$2,000.36
Ethernet 6 Mbps	\$2,002.27
Ethernet 8 Mbps	\$4,811.20
Ethernet 10 Mbps	\$5,103.15
Ethernet 20 Mbps	\$6,502.07
Ethernet 30 Mbps	\$7,444.83
Ethernet 40 Mbps	\$8,570.05
Ethernet 50 Mbps	\$9,553.01
Ethernet 60 Mbps	\$10,187.48
Ethernet 70 Mbps	\$10,771.43
Ethernet 80 Mbps	\$11,315.35
Ethernet 90 Mbps	\$11,826.53
Ethernet 100 Mbps	\$12,310.28
GigaEthernet 100 Mbps	\$12,310.28
GigaEthernet 150 Mbps	\$14,431.68
GigaEthernet 200 Mbps	\$18,107.64
GigaEthernet 250 Mbps	\$20,007.91
GigaEthernet 300 Mbps	\$21,736.36
GigaEthernet 350 Mbps	\$23,333.89
GigaEthernet 400 Mbps	\$24,827.27
GigaEthernet 450 Mbps	\$26,235.19

Tabla 1. Renta Mensual por Tramo Local tomada por la Oferta de Referencia 2019. [29]



## Enlaces TDM

## Enlaces Ethernet

Velocidad	Gasto de Instalación por Tramo Local	Velocidad	Gasto de Instalación por Tramo Local
64 Kbps	\$1,266.55	Ethernet 1 Mbps	\$11,936.66
128 Kbps	\$1,899.83	Ethernet 2 Mbps	\$11,936.66
192 Kbps	\$2,533.10	Ethernet 4 Mbps	\$11,936.66
256 Kbps	\$3,166.38	Ethernet 6 Mbps	\$11,936.66
384 Kbps	\$3,799.65	Ethernet 8 Mbps	\$11,936.66
512 Kbps	\$4,432.93	Ethernet 10 Mbps	\$11,936.66
768 Kbps	\$5,066.20	Ethernet 20 Mbps	\$11,936.66
1024 Kbps	\$5,699.48	Ethernet 30 Mbps	\$11,936.66
E1 (2 Mbps)	\$8,926.20	Ethernet 40 Mbps	\$11,936.66
E2 (8 Mbps)	\$35,704.80	Ethernet 50 Mbps	\$11,936.66
E3 (34 Mbps)	\$45,188.91	Ethernet 60 Mbps	\$11,936.66
E4 (139 Mbps)	\$100,086.35	Ethernet 70 Mbps	\$11,936.66
STM1 (155 Mbps)	\$100,086.35	Ethernet 80 Mbps	\$11,936.66
STM4 (622 Mbps)	\$225,194.23	Ethernet 90 Mbps	\$11,936.66
STM 16 (2.5 Gbps)	\$562,985.57	Ethernet 100 Mbps	\$23,873.32
STM 64 (10 Gbps)	\$900,776.92	GigaEthernet 100 Mbps	\$23,873.32
STM-256 (40 Gbps)	\$3,603,107.68	GigaEthernet 150 Mbps	\$23,873.32
2 Mbps PMP	\$8,926.20	GigaEthernet 200 Mbps	\$23,873.32
34 Mbps PMP	\$45,188.91	GigaEthernet 250 Mbps	\$23,873.32
155 Mbps PMP	\$100,086.35	GigaEthernet 300 Mbps	\$23,873.32
622 Mbps PMP	\$225,194.23	GigaEthernet 350 Mbps	\$23,873.32
		GigaEthernet 400 Mbps	\$23,873.32

Tabla 2. Tarifas de Gastos de Instalación tomada por la Oferta de Referencia 2019. [29]



En la Tabla 2, nuevamente se divide en dos tablas, del lado izquierdo los enlaces TDM con su gasto de instalación dependiendo de la velocidad y del lado derecho los enlaces de Ethernet con su respectivo gasto de instalación. Al comparar el gasto de instalación entre enlaces, por ejemplo, a 2 Mbps (señalado con el recuadro rojo) es notorio que es más caro instalar enlaces de Ethernet por aproximadamente \$3,000 que de TDM, sin embargo, si se quisieran instalar enlaces que puedan soportar más velocidad, por ejemplo, a 8 Mbps (señalado con el recuadro azul) podemos observar que el gasto de instalación de enlaces TDM aumentó 4 veces y el de Ethernet se mantuvo, siendo ahora mucho más caro el gasto de instalación de los enlaces de TDM por más de \$20,000 que de Ethernet.

Por lo anterior, se reitera la necesidad que se tiene de migrar de enlaces TDM a Ethernet, pues no es conveniente seguir gastando dinero en enlaces de velocidades bajas, si lo que se espera para los años siguientes es incrementar la velocidad de Tx y Rx de datos y así lograr tener beneficios de 5G, Internet de las Cosas (IoT), Smart Cities, etc., y que el país continúe avanzando tecnológicamente, de acuerdo a las exigencias de las TI.

## Capítulo 4. Prácticas Internacionales

Una vez que la situación en México está planteada, nos queda una gran incógnita por resolver: ¿Qué alternativas podemos utilizar, sin tener el miedo a fracasar en el intento? Las propuestas brindadas en el capítulo 2 para lograr un traslado de TDM a Ethernet ya nos dieron un panorama de que es lo que se necesita y cuáles son los pasos a seguir, sin embargo, no es sencillo tomar una decisión basándonos sólo en la parte teórica, es necesario conocer algunos casos que ya lo hayan implementado y así tomar una mejor decisión de acuerdo a la situación actual de nuestro país.

En este capítulo hablare de dos casos en particular, el de OFCOM en Reino Unido y de Verizon en Estados Unidos, ambas compañías que decidieron que era mejor brindar un servicio por enlaces Ethernet que por TDM por la demanda de velocidades que se requería por la evolución en las redes.

### 4.1 OFCOM/Reino Unido

El negocio de la conectividad en Reino Unido está en plena transición desde los circuitos con interfaces tradicionales, donde se utilizan como transmisores base, redes SDH y PDH de legado, por otro tipo de interfaces que utilizan la tecnología IP. Bajo la regulación de precios actuales, esta migración está ocurriendo para productos de interfaz tradicional de todos los anchos de banda, ya sea menor a 2 Mbps; a velocidades de 2 a 8 Mbps, o de más de 8 Mbps.

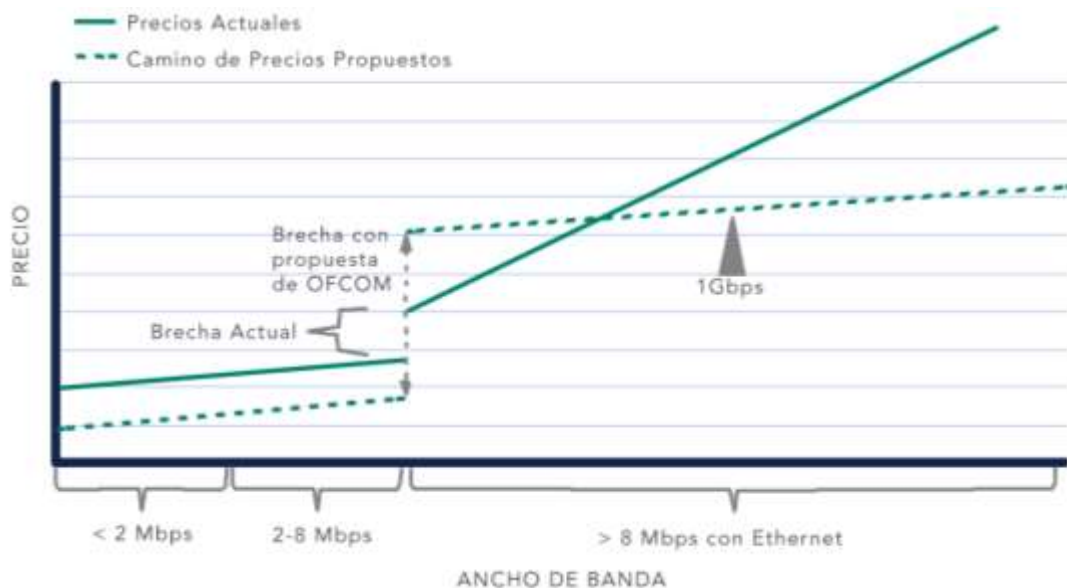
La Oficina de Comunicaciones (OFCOM, The Office of Communications, en inglés) es una autoridad en cuanto a transmisiones se refiere, esta corporación se ubica en Reino Unido, sirve como la figura de poder regulatorio en todo lo respectivo al tema de las telecomunicaciones en Londres.

En una reseña publicada en Junio del 2015, OFCOM propuso el llevar a cabo una migración de servicios de conectividad, para pasar de lo tradicional a lo contemporáneo, y para lograr esto, se quiere hacer un retiro de los servicios menores a 2 Mbps en el año 2020, sustituyéndolos por productos como EFM (Ethernet First Mile), que pertenecen a la siguiente generación para el acceso y la tecnología sin cables y agregar servicios con menor costo alternativo más veloces que 8 Mbps con tecnologías modernas (CI, Contemporary Interface).

Las barreras principales para este tipo de migración serían los costos que los usuarios tendrían que pagar de más a cambio de transitar a un nuevo tipo de tecnología moderna y la inercia es esta. La migración continua tiene buenos índices a lo largo de la historia, esto tomando en cuenta que los precios de los circuitos de interfaces tradicionales no suban demasiado.

El impacto de las propuestas de OFCOM pueden provocar un cambio en cuanto a circuitos de interfaces tradicionales se trata, dado que estos tendrán su retiro en 2020, estos además serán cambiados poco a poco por circuitos con tecnologías diferentes, lo que provocará un cambio de mentalidad en los usuarios que utilizan la tecnología inferior a 2 Mbps, para que estos mismos provoquen un traslado a los servicios de 2 a 8 Mbps.

Se busca de cierta manera, que el usuario que utiliza servicios de baja velocidad de circuitos TI, empiece a cambiar a circuitos de tecnologías modernas de velocidades similares, creando así una Trampa de Precio de Interface Tradicional ó *TI price Trap*. Poco a poco, los usuarios nuevos entrarían en las velocidades mayor a 8 Mbps gracias a la trampa de precio colocada minuciosamente para abrir paso a la utilización de las nuevas tecnologías. La siguiente imagen ilustra el punto tratado sobre la Trampa de Precio.



Gráfica 12. Trampa de Precio de OFCOM. [28]

Algunos operadores en Europa ya están adentrándose en transiciones hacia la totalidad con IP, en algunos de estos casos, se ha cerrado la red SDH, mientras cambian todos los servicios de voz hacia Vo/IP con la finalidad de completarlo antes del año 2020.

Aquí es donde entra BT, esta es una compañía líder en servicios de comunicación que sirve a usuarios mayoritariamente del Reino Unido y a más de 180 países alrededor del mundo; esta compañía tiene entre sus planes, realizar una migración área por área hacia los servicios totales de IP entre 2020 y 2025, lo que, si se quiere realizar con completa productividad e innovación, se requiere una migración completa de los servicios para enfocarse hacia circuitos CI.

Conforme al artículo “Business Connectivity Market Review” publicado el 22 de marzo del 2016 por OFCOM, menciona que es un hecho que hay suficientes alternativas modernas a

TDM y que esta tecnología se está volviendo obsoleta y decidió dejar de regular el mercado minorista de enlaces dedicados de ancho de banda muy bajo (VLB, Very Low Bandwidth), es decir menores a 2 Mbps y servicios mayoristas a 8 Mbps y superiores.

Existe evidencia de que los usuarios ya están migrando rápidamente a servicios y tecnologías alternativas. Los que aún no han migrado tienen planes de hacerlo en los próximos 4 años. Los servicios públicos como los servicios de agua y energía utilizan enlaces dedicados de VLB. Existe un plan para garantizar que estas organizaciones tengan tiempo suficiente para migrar a servicios alternativos.

La confiabilidad de las líneas arrendadas TDM es la característica clave que disminuirá con el tiempo. La tecnología TDM de BT está envejeciendo y se acerca al final de su vida útil. BT espera que tanto el costo de mantenimiento como el riesgo de falla del servicio aumenten con el tiempo en las líneas arrendadas de TDM.

Algunas de las preocupaciones para la migración a tecnologías alternativas que proporcionó BT fueron:

- Bajo rendimiento actual en la entrega de enlaces dedicados de Ethernet, inhibiendo la migración (por ejemplo, tiempo máximo para proporcionar enlaces dedicados de Ethernet).
- No aumentar los precios por año hasta la migración total; BT ofreció a OFCOM no aumentar los precios de los enlaces dedicados VLB minoristas en más de un 8% por encima del índice de Precios Minoristas (RPI, Retail Price Index) por año hasta que estos servicios se retiren por completo (31 de marzo de 2020).
- BT debería ofrecer incentivos comerciales para migrar a enlaces dedicados de Ethernet y debería asumir todos los costos asociados.

OFCOM decidió no exigir a BT que ofrezca incentivos comerciales porque considera que es un asunto comercial que se aborda mejor a través de discusiones entre BT y los compradores y mencionó las razones para ya no regular los enlaces dedicados de VLB:

- El volumen de líneas arrendadas TDM en uso ha seguido disminuyendo rápidamente desde 2013.
- Todos los usuarios de TDM tienen la opción de migrar a tecnologías alternativas adecuadas (es decir, Ethernet, Ethernet First Mile, banda ancha fija (fibra óptica), tecnologías inalámbricas como móvil (satélite) y microondas (PTP y PTM)).
- La gran mayoría de los departamentos gubernamentales son conscientes de la migración y tienen planes de pasar a otras tecnologías alternativas.

La tecnología TDM tiene más de 30 años en el Reino Unido y BT dijo que los repuestos son cada vez más difíciles de obtener, y que las habilidades técnicas necesarias para

mantenerlo son difíciles de retener. Hay usuarios finales que pueden optar por pagar más por un servicio con ancho de banda adicional o la posibilidad de costos más bajos en el futuro.

Algunos consejos de OFCOM para facilitar la migración a Ethernet:

- Asegurarse de que BT proporcione enlaces dedicados de Ethernet en plazos de entrega y con los estándares mínimos en relación con la provisión de servicios de Ethernet.
- Disponibilidad de fibra óptica y acceso a conductos, particularmente en ubicaciones aisladas.
- Asegurarse de que el pedido de servicios de reemplazo se envíe por adelantado para instalar los enlaces dedicados de Ethernet antes de que se retiren los enlaces de TDM.
- Asegurarse de que haya suficiente espectro y que no exista ninguna interferencia para los enlaces dedicados por microondas.
- BT está obligado a notificar a los clientes con un mínimo de 90 días de antelación sobre cualquier cambio técnico.
- Poner en marcha un plan de mitigación de riesgos, particularmente para los departamentos gubernamentales que usan enlaces dedicados de TDM para servicios críticos.
- Los proveedores de electricidad, agua, etc. utilizan enlaces dedicados de VLB para fines de telemetría y monitoreo.

Desde la perspectiva de BCMR (Business Connectivity Market Review: Very low bandwidth leased lines), los Circuitos Privados Parciales (PPC, Partial Private Circuits) de VLB caen en el mercado mayorista de servicios de Interfaz Tradicional de Origen de Banda ancha Simétrica (TISBO, Traditional Interface Symmetric Broadband Origination) de bajo ancho de banda.

Este mercado abarca servicios mayoristas en anchos de banda de hasta 8 Mbps inclusive. En la declaración BCMR de 2016, se estableció su decisión de alterar sus regulaciones para permitir que BT retirará los PPC de VLB previa notificación con un año de antelación. Esto es en reconocimiento del hecho que los PPC de VLB son servicios heredados que se acercan al final de su vida y que no sería apropiado que OFCOM usara una regulación mayorista para extender artificialmente la disponibilidad de estos servicios.

En la práctica, dada la obligación de BT de no discriminar indebidamente, esto permitiría a BT retirar VLB de PPC desde la fecha en que retira los enlaces dedicados minoristas de VLB: actualmente programadas para el 31 de marzo de 2020.

## 4.2 Verizon

La compañía Verizon ubicada en Estados Unidos, N.Y., es una de los líderes globales de entrega de comunicaciones innovadoras, provee un punto de vista moderno con un papel que discute sobre los retos que presentaría realizar emulación de circuitos (CEM) como un medio para la modernización de redes gracias a su tecnología circuit-to-packet (circuito a paquete). Las infraestructuras actuales SONET/SDH no han envejecido de la mejor manera, y han sobrepasado su vida útil dentro de las empresas, muchos operadores no conocen aún la tecnología CEM, su escalabilidad y los beneficios que esta conlleva, esto debido a que la infraestructura actual tiene tales ataduras operacionales de gravedad.

Se hace mención a la disponibilidad actual de los CEM, Verizon provee un caso de estudio de modernización de circuit-to-packet utilizando CEM junto con MPLS, la cual se desarrolla incluso en la actualidad, sin embargo, los usos de los CEM no están limitados a los pocos casos que en el escrito “Network Moderniation: A TDM to IP solution” se mencionan.

Los retos que se presentan en la tecnología de la actualidad, según el artículo mencionado, tienen que ver mucho con la utilidad de vida de la infraestructura actual SONET/SDH, ya sea porque el equipo en sí ha llegado al final de su vida (EOL, End-of-Life), es decir, que de manera literal, los equipos creados y planeados para una duración de 10 a 15 años, ha llegado o va llegando a dicho límite, estos empiezan a necesitar reparaciones y las personas no pueden encontrar partes de repuesto para dichos equipos, pues estos se vuelven obsoletos o difíciles de hallar.

Otro de los retos de las tecnologías actuales es el alza de los costos operacionales de las redes de TDM, ya que los equipos se encontrarán con más fallas mientras más se acercan estos a su EOL, lo que significa un gasto significativo para su mantenimiento, por otro lado los procesos no son automatizados, la generación de procesos manuales genera costos por el aprovisionamiento manual que debe lograrse para su funcionamiento en las actividades, sin contar con que consumen una gran cantidad de energía comparado con lo que las tecnologías de hoy día consumen, los costos organizacionales y operacionales incrementan ya que ahora se requieren dos mantenimientos diferentes, uno para las redes TDM y otro para la tecnología mediante paquetes.

Agregando, uno de los retos principales para las tecnologías actuales es que estas tienen problemas de seguridad, pues, pensándolo a futuro, la era digital está enfocándose más y más en la seguridad, y esta evoluciona a pasos veloces, los equipos actuales no soportarían los parches de seguridad que deben ir aumentando con el pasar de los días, a veces incluso horas.

Como mención incluida sobre los retos actuales, tenemos un desabasto de personal cualificado para el mantenimiento y manejo de los equipos, sin hablar de que la producción de estos decrece al minuto.

Poco a poco, el equipo SONET/SDH ha ido en picada desde 2008, que fue la cima de la ganancia para este tipo de infraestructura, produciendo/recibiendo más de 6 mil millones de dólares, hasta llegar a 2016, en donde las ganancias para SONET/SDH eran de no más de mil millones de dólares, los operadores invirtieron tanto en 2008, que hasta la fecha muchos de los equipos que en aquél entonces se usaban, en la actualidad siguen usándose.

Uno de los beneficios de la migración sería que los CEM proporcionan una arquitectura "reservada" para la migración TDM, en la cual el equipo SONET/SDH convencional transmite y recibe tráfico TDM en los dos puntos finales, pero se reemplaza toda la red entre esos puntos finales.

CEM recibe una transmisión de línea privada en el punto final, encapsula los datos mediante CEM y transmite los datos como paquetes a través de una red Ethernet, MPLS o IP. Otro conmutador/ enrutador con capacidad CEM en el punto final receptor elimina la encapsulación CEM y entrega los datos de la línea privada como tráfico TDM al multiplexor del extremo receptor.

CEM ofrece varios beneficios clave que lo hacen atractivo para los operadores que necesitan retirar su SONET/SDH heredado y su equipo digital de conexión cruzada. A continuación, ofrecemos una visión general de los principales beneficios del operador:

- Migración medida para operadores y clientes: CEM permite a los operadores intercambiar sus equipos obsoletos sin forzar cambios de servicio en sus clientes (es decir, es un cambio de ventana de mantenimiento). Como se describió anteriormente, los puntos finales del cliente permanecen intactos a través de una red de conmutación de paquetes de extremo a extremo.
- Beneficio operativo inmediato: la migración con CEM no requiere una revisión completa de la red; los operadores pueden obtener beneficios operativos de inmediato, incluso a medida que se producen incrementos progresivos. Los sitios específicos que generarán el máximo beneficio antes de tiempo producirán los mejores resultados. Los costos de energía y mantenimiento disminuyen, mientras que el espacio en el piso de la oficina central se abre para nuevas oportunidades de ingresos, como centros de datos o servicios de colocación.
- Camino a las operaciones de red automatizadas: las soluciones basadas en elementos de red programables CEM son arquitecturas mucho mejores para permitir la automatización. Las actualizaciones de software más fáciles y la identificación proactiva de los problemas antes de que afecten a los servicios son beneficios inmediatos. Además, el equipo SONET/SDH carece de telemetría de transmisión y



programabilidad basada en modelos compatible con los sistemas operativos modernos.

- Escalabilidad y simplicidad operativa con MPLS: los circuitos CEM están representados por pseudowires mapeados sobre túneles diseñados para el tráfico para proporcionar protección y la capacidad de diseñar el camino a través de la red de paquetes conmutados. Estos pseudowires y túneles no están vinculados a una velocidad de circuito como SONET/SDH. Cualquier nodo en la red puede configurar un servicio CEM de cualquier velocidad para cualquier nodo. El plano de control de ingeniería de tráfico encuentra la ruta óptima que satisface las restricciones definidas, y la ruta de extremo a extremo se programa en todos los saltos sin necesidad de atención especial del operador.

Verizon está "sembrando" la red con conmutadores de paquetes MPLS antes de los circuitos en movimiento. Específicamente, Verizon está utilizando el Cisco NCS 4200 hoy en oficinas periféricas, así como en oficinas centrales.

Verizon está comenzando las transferencias con un plan específico que identifica sitios de alto impacto mediante el uso de herramientas de visualización y un conjunto de algoritmos de aprendizaje automático. El operador reconoce que el proceso de reinversión de circuito a CEM tomará varios años.

El viejo problema de la infraestructura ha llegado a un punto tan crítico que los operadores ya no pueden ignorar. Hoy se enfrentan a un gran desafío: cómo migrar lejos de los multiplexores y las conexiones cruzadas digitales sin perder clientes que requieren la funcionalidad de línea privada. CEM ha madurado para proporcionar la solución más eficiente al problema, permitiendo una migración medida para los operadores y sus clientes al tiempo que conserva la confiabilidad (incluida la resiliencia de 50 ms) y la operación, administración y mantenimiento (OA&M, Operations, Administration and Management) similar a SONET. Con CEM, los operadores pueden cosechar los beneficios operativos de una red moderna de conmutación de paquetes mientras retienen los ingresos por servicios de línea privada existentes.

Verizon, uno de los principales innovadores en el transporte de paquetes ópticos, es uno de los primeros en la migración de TDM a IP/MPLS con CEM y ya ha comenzado a sembrar su red de metro con equipos CEM, con un plan de varios años para cerrar la red heredada. Significativamente, el enfoque TDM a IP defendido por Verizon tiene una amplia aplicabilidad para muchos operadores de todo el mundo que luchan con problemas similares. Verizon se compromete a aumentar la visibilidad de CEM y compartir sus aprendizajes con otros operadores en el camino.

## Conclusiones

Conforme lo escrito en los capítulos anteriores, mi conclusión es que México necesita una migración de TDM a Ethernet lo más pronto posible, pues nos estamos quedando rezagados en cuanto a las nuevas tecnologías que están surgiendo. Como podemos ver México aún cuenta con muchos enlaces de TDM mayoristas y es por el AEP que ya no se quiere utilizar este tipo de enlaces, pues es mucho más caro tener enlaces TDM ya sea por su mantenimiento, por no encontrar las piezas si es que se desgastan o por el simple hecho de realizar una instalación.

Las opciones que presenté en el capítulo dos para lograr hacer una migración de TDM a Ethernet, las cuáles son: emulación de circuitos, WDM/fibra óptica y enlaces inalámbricos a altas frecuencias, cada una ellas tienen sus ventajas y desventajas, sin embargo, con base en las prácticas internacionales que se han llevado a cabo de las compañías Verizon y OFFCOM de Estados Unidos y Reino Unido respectivamente, se han implementado las opciones de emulación de circuitos y WDM/fibra óptica.

Verizon decide migrar con enlaces dedicados virtuales que es basada en Ethernet usando la red de IP/MPLS y de acuerdo al estudio analizado, esta opción le ha resultado muy bien, pues ha logrado comenzar a deshabilitar algunos enlaces TDM e incluso utilizar algunos equipos de TDM para no complicar al cliente y comenzar a cambiarlos a cortas distancias. Y como lo presento en el capítulo anterior Verizon se preocupa enormemente por los usuarios y busca no afectarlos en ningún momento.

OFFCOM también está logrando migrar, pero ellos con WDM/fibra óptica, es decir, usando la capa de transporte que han ido implementando poco a poco y cambiando de TDM a EPON, sin embargo, ellos aún presentan problemas porque tienen muchísimos enlaces que trabajan a VLB y no es necesario subir las velocidades de los mismos, pero consideran necesario continuar migrando, aunque sea a un paso lento para no afectar a los usuarios y ellos siempre tengan opciones de decidir entre velocidades sin incrementar demasiado los costos.

En el caso de México, considero que la mejor opción para migrar sería utilizar WDM/fibra óptica, ya que los circuitos emulados en nuestro caso no sería una opción factible pues sería tardado conseguir los equipos necesarios e implementar las arquitecturas debidas, y la opción de enlaces inalámbricos a altas frecuencias, es un tema complicado, pues aunque quisiéramos idealmente pasar a 5G en cuanto sea liberada en el 2020, sabemos que la realidad es que no en todo el país se tiene cobertura ni de 4G, siendo que actualmente deberíamos estar usando 4.5G.

Deberíamos migrar utilizando EPON porque WDM-PON, como lo expliqué en su momento, tiene la desventaja de que trabaja a diferentes longitudes de onda y eso requiere un aparato especializado que pueda utilizarlas. Además, la CFE cuenta con una red de fibra óptica de más de 43 mil km, alcanzando a más de 55 millones de personas en 281 localidades a nivel

nacional, con lo que se podría comenzar a migrar de enlaces TDM a Ethernet y así evitar continuar en un rezago tecnológico; es probable que existan dificultades y retos a la hora de migrar pero es necesario correr el riesgo e intentar seguir los pasos de países como Estados Unidos y Reino Unido pues, si no comenzamos por algo, nunca nos motivaremos a cambiar y renovarnos. México necesita ser un país tecnológico y liderar el progreso para Latinoamérica.

De acuerdo a lo aprendido a lo largo de la carrera, no me fue tan difícil adaptarme al ámbito laboral requerido, pues los conocimientos básicos los adquirí en mi instancia en la Facultad de Ingeniería, contaba con los medios necesarios para realizar las investigaciones solicitadas. Considero que lo más difícil fue conseguir la confianza necesaria para no dudar de lo aprendido y confiar en mis conocimientos, habilidad que también obtuve al estar participando en diversos proyectos. Por último, esta oportunidad laboral me ha ayudado mucho no solo por la investigación realizada sino por la experiencia.

## Bibliografía y Referencias

1. First Communications LLC. (2014). *10 Reasons to replace your TDM service with Ethernet SMB'S getting more bandwidth, flexibility, and cost savings*. Recuperado de <https://www.firstcomm.com/wp-content/uploads/2017/01/Ethernet-vs-T1-White-Paper.pdf>
2. Federal Communications Commission. (2018). *Accelerating Wireline Broadband Deployment by Removing Barriers to Infrastructure Investment*. Washington, D.C. Recuperado de <https://docs.fcc.gov/public/attachments/FCC-18-74A1.pdf>
3. Cavaliere, F., Iovanna, P., Mangues-Bafalluy, J., Baranda, J., Núñez-Martínez, J., Lin, K., Chang, H., Chanclou, P., Farkas, P., Gomes, J., Cominardif, L., Mourad, A., De La Oliva, A., Hernández, J. A., Larrabeiti, D., Di Giglio, A., Paolicelli, A., Ödling, P. (2017). *Towards a unified fronthaul-backhaul data plane for 5G The 5G-Crosshaulproject approach*. Science Direct. Computer Standards & Interfaces. Recuperado de <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0920548916301672?token=381504E9ECFAFD1C713D15AB38ECAEC07952F6951841878D22E876295EBA08A4D5B4AE66561A6E40D1D1758FB2AA2C68>
4. Nguyen, V. H., & Atmaca, T. (2010). *Metropolitan optical packet bus-based networks: Packet bursting and emulation of TDM services*. Computer Communications. Science Direct. Recuperado de [https://ac.els-cdn.com/S014036641000191X/1-s2.0-S014036641000191X-main.pdf?tid=294b06d4-6870-4013-95ec-4e6c33689110&acdnat=1546892975\\_cb963ad0a5d47f3634cd0ab283396259](https://ac.els-cdn.com/S014036641000191X/1-s2.0-S014036641000191X-main.pdf?tid=294b06d4-6870-4013-95ec-4e6c33689110&acdnat=1546892975_cb963ad0a5d47f3634cd0ab283396259)
5. Suraj, V. K. (2005). *Encyclopaedic dictionary of library and information science*. India: IshaBooks
6. Khosrow-Pour, M. (2013). *Dictionary of Information Science and Technology*. United States of America: InformationScience
7. OFCOM. (2015). *Business Connectivity Market Review Review of competition in the provision of leased lines*. Recuperado de <https://www.ofcom.org.uk/consultations-and-statements/category-1/business-connectivity-market-review-2016>
8. Gokhale, A. (2005). *Introduction to Telecommunications*. United States of America: Thomson DelmarLearning
9. Revista de Negocios de Seguridad. (2015). *Cable de par trenzado*. RNDS Recuperado de [http://www.rnds.com.ar/articulos/052/RNDS\\_136W.pdf](http://www.rnds.com.ar/articulos/052/RNDS_136W.pdf)
10. H. Sizun, *Radio Wave Propagation for Telecommunication Applications*, Springer Berlin Heidelberg New York, 2005.

11. Cisco Systems, Inc. (2003). Ethernet Technologies. Internetworking Technologies Handbook (753). USA: Cisco Press, 4th Edition.
12. Kazi, K. (2006). *Optical Networking Standards: A Comprehensive Guide for Professionals*. USA: Springer
13. Virtual Access. (2018). *Digital Leased Line to IP Migration*. Recuperado de <https://virtualaccess.com/legacy-migration-overview/digital-leased-line-to-ip-migration/>
14. Cisco Systems. (February 20, 2007). *Multiprotocol Label Switching for the Federal Government*. Recuperado de [https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/ios-nx-os-software/mpls-security/prod\\_white\\_paper0900aecd805df309.html](https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/ios-nx-os-software/mpls-security/prod_white_paper0900aecd805df309.html)
15. Virtual Access. (2015). *Digital Leased Line to IP Migration*. Recuperado de <https://virtualaccess.com/legacy-migration-overview/digital-leased-line-to-ip-migration/>
16. N. Hart, S. Pilbuhar. (2014). Chinese. Patente N° CN101926132A.
17. Li. Gutierrez, et al. (2010). *Next Generation Optical Access Networks: from TDM to WDM*. Open Science Open Minds Recuperado de <https://www.intechopen.com/books/trends-in-telecommunications-technologies/next-generation-optical-access-networks-from-tdm-to-wdm>
18. Kumar, A. (2019). Dedicated and broadcasting downstream transmission with energy-efficient and latency-aware ONU interconnection in WDM-PON for smart cities. *Optical Fiber Technology*, (52)
19. Viskints, E. (2018). *Migration from TDM to IP Network Made Simple*. SAF Tehnika JSC Recuperado de <https://blog.saftehnika.com/en/whitepapers/migration-from-tdm-to-ip-network-made-simple/>
20. Alibaba Cloud. (2018). Understanding How Millimeter Waves Power the 5G Network. . Recuperado de [https://www.alibabacloud.com/blog/understanding-how-millimeter-waves-power-the-5g-network\\_593839](https://www.alibabacloud.com/blog/understanding-how-millimeter-waves-power-the-5g-network_593839)
21. Stephen, M. (2017). *Optical Wireless and Millimeter Waves for 5G Access Networks*. Open Science Open Minds Recuperado de <https://www.intechopen.com/books/the-fifth-generation-5g-of-wireless-communication/optical-wireless-and-millimeter-waves-for-5g-access-networks>
22. Martínez, C. (2018). *Dividir servicios mayoristas y minoristas amplía oferta de telecomunicaciones: experto* El Universal

23. Instituto Federal de Telecomunicaciones. (2014). Determina IFT a los Agentes Económicos Preponderantes. IFT Recuperado de <http://www.ift.org.mx/conocenos/acerca-del-instituto/historia/determina-ift-los-agentes-economicos-preponderantes>
24. Presidencia de la República EPN. (2015). *¿Qué es un Agente Económico Preponderante?* Gobierno de México Recuperado de <https://www.gob.mx/epn/es/articulos/que-es-un-agente-economico-preponderante>
25. CFE. (2018). *Fibra Óptica*. Recuperado de <https://www.cfe.mx/CFETelecom/Documents/FOO2.pdf>
26. Tipmongkolsilp, O., Zaghloul, S. & Jukan, A. (2011). The Evolution of Cellular Backhaul Technologies: Current Issues and Future Trends. *IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS*, (13), pp. 97-113.
27. The Metro Ethernet Forum. (2004). *Introduction to Circuit Emulation Services over Ethernet*. Recuperado de [http://www.mef.net/PDF\\_Documents/Introduction-to-CESoE.pdf](http://www.mef.net/PDF_Documents/Introduction-to-CESoE.pdf)
28. Williamson, B., Lewin, D., & Wood, S. (2015). *Leased line pricing in the context of "all-IP" transition*. BT. Plum Recuperado de [https://www.ofcom.org.uk/data/assets/pdf\\_file/0022/51790/bt\\_annex\\_k.pdf](https://www.ofcom.org.uk/data/assets/pdf_file/0022/51790/bt_annex_k.pdf)
29. IFT. (2019). *Oferta de Referencia*. Recuperado de <http://www.ift.org.mx/sites/default/files/contenidogeneral/politica-regulatoria/ofertafinalenlacestelmex2019.pdf>
30. Obite, F., Tamunoiyowuna, E., Ijeomah, G., & Jahun, G. (2018). *The evolution of Ethernet Passive Optical Network (EPON) and future trends*. *Optik*. ScienceDirect Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030402618304571>
31. Ericsson. (2014). *MICROWAVE TOWARDS 2020*. Recuperado de <https://www.ericsson.com/assets/local/news/2014/9/microwave-towards-2020.pdf>
32. Aguilar, C. (2019). *Enlaces dedicados y estadísticas del AEP*. Centro de Estudios. IFT