

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID**

**ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR**



**PROYECTO FIN DE CARRERA**

# **“ENERGY-EFFICIENCY IN OPTICAL NETWORKS”**

**EDUARDO RUIZ SANZ**

**SEPTIEMBRE 2011**



# **ENERGY-EFFICIENCY IN OPTICAL NETWORKS**

AUTOR: EDUARDO RUIZ SANZ

TUTOR: BAS HUISZON

Dpto. de Ingeniería Informática  
Escuela Politécnica Superior  
Universidad Autónoma de Madrid

SEPTIEMBRE 2011



## **Resumen**

Primeramente, para la comprensión adecuada de este proyecto, se estudiarán las principales arquitecturas y tecnologías aplicables para el desarrollo de una red sobre fibra óptica hasta el hogar (FTTH). Por otra parte, se presentarán algunos modelos de ahorro de energía, propuestos por diferentes grupos de trabajo, que serán aplicables, en un futuro muy cercano, a las unidades ópticas (ONT) situadas en el hogar del cliente.

Posteriormente, se presentarán los dispositivos más importantes utilizados en el despliegue de una red de acceso sobre fibra óptica, así como los principales datos técnicos relevantes para las simulaciones mostradas al final del proyecto.

Por último, se mostrarán resultados sobre la eficiencia energética de las diferentes tecnologías analizadas. La eficiencia de cada una, será estudiada en torno a los parámetros físicos más determinantes en el despliegue de una red de acceso sobre fibra óptica.

## **Palabras Clave**

FTTH, PON, P2P, WDM, *Sleep Mode*, DBA, ONT, Consumo por usuario.

## ***Abstract***

Firstly, for the proper understanding of this project, the main architectures and technologies used to develop a network over fiber are going to be presented. In addition, some energy-saving models proposed by different working groups, applicable in a close future at the optical unit, will be introduced.

Next, the most important devices used in the deployment of a network over fiber optics are shown. Also, the main technical data, relevant for some simulations described in the final part of the project, are presented.

Finally, the results on the energy efficiency of the different technologies discussed will be shown. The efficiency of each one will be studied based on the most important physical parameters in the deployment of an access network over fiber.

## ***Keywords***

FTTH, PON, P2P, WDM, *Sleep Mode*, DBA, ONT, Energy per user.

## *Agradecimientos*

En primer lugar, quisiera agradecer a mi tutor, Bas Huiszoon, la oportunidad de realizar este proyecto, así como su ayuda y tiempo en la elaboración del mismo. A pesar de abandonar el grupo de redes de la Escuela Politécnica Superior, para evolucionar profesionalmente, siempre me ha mostrado un compromiso extraordinario, utilizando su escaso tiempo libre, para ayudarme a terminar mi proyecto fin de carrera.

Me gustaría agradecer a todos los profesores que he tenido en mi vida, tanto en el colegio como en la universidad, por todas sus enseñanzas y consejos.

A todos y cada uno de los amigos que he conocido en la Universidad. Con ellos he pasado la mejor etapa de mi vida, gracias por todas las experiencias, momentos y viajes juntos. También me gustaría dar las gracias a cada compañero de prácticas durante estos años, por aguantarme (que no es fácil) y porqué de todos he aprendido algo.

A Juan, a Mery, a Lucas, a Vero, a Marita, a Ana y a Irene. Ellos han sido un apoyo esencial en mi vida personal y académica, y espero, que lo sigan siendo muchos años. A Guille por cada tarde de debate viendo al Atleti...

A todos los amigos que conocí en Suecia, gracias por hacerme disfrutar del mejor año de mi vida. En especial a la 406 y la 408, sin vosotros, esa experiencia nunca hubiera sido tan legendaria.

A Fanny por su cariño y apoyo mostrado este último año. Gracias por estar a mi lado tanto en los buenos, como en los malos momentos. Espero compensarte y devolverte toda la confianza mostrada, durante muchos años.

Gracias a mis padres, por la educación ofrecida, por los valores que me han enseñado y por demostrarme todos los días que soy la persona más importante para ellos.

Y por supuesto a Age, la persona que más confió en mí y por ser un ejemplo de vida para mí...

Muchas gracias a todos.



## *Glosario*

**AWG:**

*Arrayed Waveguide Grating*

**CPE:**

*Customer Premises Equipment*

**DBA:**

*Dynamic Bandwidth Allocation*

**EEE:**

*Energy Efficiency Ethernet*

**FTTH:**

*Fiber To The Home*

**MAC:**

Media Access Control

**MDF:**

*Main Distribution Frame*

**MPCP:**

*Multi-Point Control Protocol*

**ODN:**

*Optical Distribution Network*

**OLT:**

*Optical line terminal*

**ONT:**

*Optical Network terminal*

**ONU:**

*Optical Network Unit*

**PLOAM:**

*Physical Layer Operations And Maintenance*

**PON:**

*Passive Optical Network*

**POTS:**

*Plain Old Telephone Service*

**P2P:**

*Point to Point*

**SLA:**

*Service Level Agreement*

**SFP:**

*Small form Factor Pluggable*

**TDMA:**

*Time-Division Multiple Access*

**WDM:**

*Wavelength Division Multiplexing*

**INDICE DE CONTENIDOS**

---

1	Introducción.....	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Objetivos.....	2
1.3	Organización de la memoria.....	2
2	Fiber to the home - FTTH.....	5
2.1	Arquitecturas.....	6
2.1.1	PON.....	6
2.1.3	Futura arquitectura FTTH: P2P & PON.....	9
2.1.4	FTTH – Desarrollo y evolución en el mundo.....	10
2.2	Tecnologías.....	12
2.2.1	TDM PON.....	13
2.2.2	WDM-PON.....	15
2.2.3	ETHERNET.....	17
3	Estado del arte – Energy efficiency en TDM-PON.....	19
3.1	Standards.....	20
3.1.1	DBA en GPON.....	20
3.1.2	MPCP para EPON.....	21
3.1.3	EPON.....	23
3.1.4	GPON.....	24
3.1.5	ENERGY EFFICIENCY ETHERNET (EEE).....	27
3.2	Nuevas Propuestas.....	28
4	Diseño de redes FTTH.....	39
4.1	Hardware utilizado.....	40
4.1.1	OLT (Optical Terminal Line).....	40
4.1.2	Tarjetas de Red/OLT.....	41
4.1.3	Transceptores.....	43
4.1.4	CPE (Customer Premises Equipment).....	43
4.2	Market Overview.....	45
4.2.1	GPON - ZHONGE.....	45
4.2.2	P2P – CISCO.....	48
4.2.3	WDM PON - LG ERICSSON.....	51

5 Simulación y análisis de resultados .....	53
5.1 Energía por usuario .....	54
5.1.1 Energía por usuario - Ancho de Banda ofrecido .....	55
5.1.2 Energía por usuario – Número de usuarios .....	62
5.2 PON Tradicional vs PON Escalable.....	67
5.2.1 Take Rate .....	67
5.2.2 Red PON tradicional .....	68
5.2.3 Red PON escalable .....	76
5.3 Distancia .....	80
6 Conclusiones y trabajo futuro .....	87
6.1 Conclusiones.....	87
6.2 Trabajo futuro.....	88
7 Referencias .....	89

## **INDICE DE FIGURAS**

FIGURA 2-1 ARQUITECTURA RED PON [7].....	7
FIGURA 2-2 ARQUITECTURA P2P [8] .....	8
FIGURA 2-3 UNBUNDLING FTTH [9] .....	10
FIGURA 2-4 HOGARES EN EL MUNDO CON FTTH [10] .....	11
FIGURA 2-5 HOGARES EN EUROPA CON FTTH [10].....	12
FIGURA 2-6 ODN CLASS COMPARAISON .....	15
FIGURA 2-7 ARQUITECTURA WDM-PON [13] .....	17
FIGURA 3-1 ALGORITMO IPACT [16] .....	22
FIGURA 3-2 ROUND TRIP TIME CALCULATION [17] .....	23
FIGURA 3-3 FAST SLEEP MODE TRANSITIONS [20].....	25
FIGURA 3-4 MODELO HÍBRIDO PROPUESTO [23].....	29
FIGURA 3-5 DIAGRAMA DE ESTADOS DEL MODELO HÍBRIDO [23].....	30
FIGURA 3-6 ESTADOS RX Y TX DE UNA RED PON [24].....	32
FIGURA 3-7 EJEMPLO TX SLEEP [24] .....	33
FIGURA 3-8 SLEEP MODE EN UNA ARQUITECTURA PON CON FAST WAKE UP [25] 34	

FIGURA 3-9 ONU ARQUITECTURA 1 [26].....	35
FIGURA 3-10 ONU ARQUITECTURA 2 [26].....	36
FIGURA 3-11 ONU ARQUITECTURA 3 [26].....	36
FIGURA 4-1 CHASIS MXK 823 – ZHONE [27].....	41
FIGURA 4-2 MXK-GPONX8-IO [27].....	42
FIGURA 4-3 CISCO WS-X4448-GB-SFP [28].....	42
FIGURA 4-4 Cisco 1000BASE-BX10-D [29] .....	43
FIGURA 4-5 ZNID GPON 2516 [30] .....	44
FIGURA 4-6 RED GPON .....	47
FIGURA 4-7 RED P2P .....	50
FIGURA 4-8 RED WDM-PON .....	52
FIGURA 5-1 Consumo por usuario - ancho de banda ofrecido .....	56
FIGURA 5-2 Consumo por usuario - ancho de banda ofrecido II .....	59
FIGURA 5-3 Consumo GPON OLT/ONT.....	60
FIGURA 5-4 Porcentaje del consumo total GPON OLT/ONT .....	61
FIGURA 5-5 Porcentaje del consumo total P2P OLT/ONT.....	61
FIGURA 5-6 Porcentaje del consumo total WDM-PON OLT/ONT.....	62
FIGURA 5-7 Consumo por usuario – Número de usuarios.....	64
FIGURA 5-8 Consumo por usuario – Número de usuarios II.....	66
FIGURA 5-9 Número de tarjetas de red GPON según Split Ratio versus PTP .....	69
FIGURA 5-10 Número de tarjetas de red GPON 1:32 /P2P/WDM .....	70
FIGURA 5-11 Consumo por usuario – Take Rate GPON 1:32 .....	71
FIGURA 5-12 Consumo por usuario – <i>Take Rate</i> GPON 1:8.....	73
FIGURA 5-13 Número de tarjetas de red GPON 1:32 /P2P/WDM teniendo en cuenta <i>Uplink</i> .....	74
FIGURA 5-14 Consumo por usuario – <i>Take Rate</i> GPON 1:32 teniendo en cuenta <i>Uplink</i> .....	75
FIGURA 5-15 Consumo por usuario – <i>Take Rate</i> GPON 1:8 teniendo en cuenta <i>Uplink</i> .....	76
FIGURA 5-16 Escalabilidad - Número de tarjetas de red GPON 1:32 /P2P/WDM ...	77
FIGURA 5-17 Escalabilidad - Consumo por usuario – <i>Take Rate</i> GPON 1:32 .....	78
FIGURA 5-18 Escalabilidad - Consumo por usuario – <i>Take Rate</i> GPON 1:8.....	79

FIGURA 5-19 Pérdidas en el despliegue de la red óptica .....	80
FIGURA 5-20 ATENUACIÓN FIBRA ÓPTICA [47].....	83
FIGURA 5-21 Comparación alcance máximo GPON/P2P/WDM-PON.....	86

## **INDICE DE TABLAS**

TABLA 2-1 COMPARATIVA EPON VS GPON .....	14
TABLA 3-1 CONSUMO NIC – BAJA Y ALTA CARGA DE TRÁFICO.....	27
TABLA 3-2 CONSUMO NIC – TIEMPO DE LLEGADA ENTRE PAQUETES MUY PEQUEÑO.....	28
TABLA 3-3 CONSUMO DE LAS ARQUITECTURAS .....	37
TABLA 3-4 TIEMPO DE SINCRONIZACIÓN CON LA OLT .....	37
TABLA 4-1 ZHONE – Dispositivos utilizados .....	46
TABLA 4-2 CISCO – Dispositivos utilizados .....	49
TABLA 4-3 LG ERICSSON – Dispositivos utilizados.....	51
TABLA 5-1 CAPACIDAD ANCHO DE BANDA UP/DOWNSTREAM (OLT) .....	58
TABLA 5-2 Energía por usuario .....	65
TABLA 5-3 Arquitectura teniendo en cuenta el <i>Backhaul</i> .....	65
TABLA 5-4 Energía por usuario teniendo en cuenta el <i>Backhaul</i> .....	67
TABLA 5-5 Consumo por usuario – <i>Take Rate</i> 30%.....	79
TABLA 5-6 Alcance máximo GPON .....	82
TABLA 5-7 Alcance máximo P2P 1Gbps.....	84
TABLA 5-8 Alcance máximo WDM 1Gbps .....	85

# 1 Introducción

---

## 1.1 Motivación

En los últimos 15 años, el crecimiento de personas conectadas a la red ha pasado de 16 Millones a 1700 Millones, es decir, actualmente un 25% de la población mundial usa Internet [1]. La aparición de diferentes redes sociales como Facebook o Twitter ha incrementado el número de usuarios, de todas las edades, que desean estar siempre conectados a la red. Las compañías aprovechan este empuje y crean nuevas tecnologías adaptadas a este nuevo escenario [2]. Con el aumento de usuarios y la creación de nuevas aplicaciones, cada vez se demanda más ancho de banda y es necesaria la aparición de nuevas arquitecturas.

Debido a todo esto existe un gran interés por optimizar la energía que se consume en todo el mundo [3]. El concepto Green ICT (Information and Computing Technologies), se puede definir como la preocupación existente por fabricantes y proveedores al aumento del consumo de energía. Estos intentan que los empresarios tomen conciencia ecológica y hacerles ver el valor añadido que ofrecen las soluciones Green ICT. La aplicación de dichas soluciones, representa una mejora de la eficiencia energética y del impacto ambiental de la empresa, así como un significativo ahorro de costes [4].

Por otro lado, las arquitecturas que probablemente den soporte y libertad a todos los usuarios a utilizar todas estas nuevas tecnologías en auge, serán las redes de acceso de nueva generación y tendrá como protagonista principal la fibra óptica. En los próximos años se ampliarán las infraestructuras existentes y la fibra óptica llegará a miles de viviendas ya sea de manera directa al usuario (P2P, una fibra para cada usuario) o mediante point-multipoint, en el que la fibra es compartida por varios clientes (redes PON) [5].

Todos los elementos y dispositivos que componen una red PON o P2P son caros y consumen una gran cantidad de energía. Actualmente muchos grupos de investigación estudian como optimizar el despliegue de la fibra óptica así como el ahorro de energía tanto en el nodo central como en el nodo terminal.

## **1.2 Objetivos**

El objetivo principal de este proyecto, es mejorar la eficiencia energética de las redes ópticas de acceso, a través del estudio y análisis de varios parámetros físicos determinantes en el despliegue de una red. Se determinará que tecnología sobre fibra óptica es más apropiada para diversos escenarios FTTH.

El estudio en este tema debe comenzar por la exposición y valoración de los tipos de redes ópticas de acceso existentes y los elementos necesarios en el despliegue de las mismas. Se realizará una comparación entre las diferentes tecnologías, así como un análisis de algunos factores importantes como el ancho de banda ofrecido a los usuarios y el *take rate* o factor de ocupación de la red. Finalmente, se mostrará el impacto que tiene la distancia en el despliegue de una arquitectura de acceso óptica en una zona residencial.

Complementariamente a estos objetivos, se realizará un análisis del estado del arte de los mecanismos de ahorro de energía, en las unidades ópticas terminales.

## **1.3 Organización de la memoria**

El contenido de esta memoria consta de los siguientes capítulos:

### **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN**

En el primer capítulo, se expondrán los objetivos de este proyecto, así como la motivación para realizarlo.

## CAPÍTULO 2. FIBER TO THE HOME (FTTH)

En el segundo capítulo, se describirán las particularidades técnicas y funcionamiento de las arquitecturas y tecnologías utilizadas en el despliegue de una red FTTH. También se introducirá la posibilidad de la utilización, de una novedosa arquitectura en una red FTTH.

## CAPÍTULO 3. ESTADO DEL ARTE – ENERGY EFFICIENCY EN TDM-PON

Primeramente se explicarán los algoritmos utilizados en tecnologías PON, para la asignación dinámica de ancho de banda. Además, se mostrarán por un lado las propuestas sobre mecanismos de ahorro de energía que aparecen en algunos estándares del IEEE y de la ITU, y por otro lado, se realizará un estudio completo, de los más importantes avances realizados por numerosos grupos de investigación, sobre este tema y que están basados en los algoritmos previamente explicados.

## CAPÍTULO 4. DISEÑO DE REDES FTTH

Aquí se explicará la funcionalidad y los parámetros técnicos más importantes de los dispositivos a utilizar, en el despliegue de una red FTTH. Posteriormente se detallarán varios escenarios FTTH sobre diversas tecnologías, utilizando valores de consumo ofrecidos por algunas empresas de telecomunicaciones dedicadas al desarrollo de este tipo de redes.

## CAPÍTULO 5. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el quinto capítulo, sobre la simulación de los escenarios seleccionados en el capítulo anterior, se mostrarán los resultados obtenidos acerca de los parámetros físicos más determinantes en redes de acceso. Se analizará la mejora de la utilización, de una novedosa arquitectura introducida en el capítulo dos.

## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En el último capítulo se establecerán conclusiones de los resultados obtenidos y se ofrecerán diversas posibilidades para futuros trabajos, a partir de este proyecto.

## 2 Fiber to the home - FTTH

---

*Fiber to the home* (FTTH) es considerada por las empresas de telecomunicación la solución más óptima para conseguir agrupar toda los servicios *Triple Play* (voz, audio y video) de la actualidad y que requieren gran ancho de banda cómo *Video On Demand*, HD-TV, juegos online... Como consecuencia de los avances tecnológicos y de la demanda de los usuarios, el estudio de nuevas arquitecturas y tecnologías de redes sobre fibra óptica ha pasado al primer plano de los intereses de muchas compañías y gobiernos de todo el mundo [6]. El principal objetivo es desplegar la arquitectura más económica y que mejor se adapte a la infraestructura existente.

A continuación, en este segundo capítulo veremos las principales arquitecturas y tecnologías que son utilizadas al implantar una red FTTH.

## **2.1 Arquitecturas**

La implantación de una red de acceso sobre fibra óptica hasta el usuario, está basada actualmente en la implementación de dos tipos de arquitecturas: las redes ópticas pasivas (PON) y las redes punto a punto (P2P). La diferencia principal entre ambas, es que en las redes PON la fibra óptica es compartida por todos los usuarios conectados a un nodo central, mientras que en las redes punto a punto, una sólo fibra está dedicada al usuario final.

Ambas arquitecturas serán comparadas y analizadas en capítulos posteriores sobre varios escenarios, centrándose el estudio en torno al objetivo de este proyecto: *Energy Efficiency*.

### **2.1.1 PON**

Una red óptica pasiva, es una red punto-multipunto en el que la fibra óptica es desplegada desde el nodo central del proveedor del servicio dónde se encuentra la Unidad Óptica Terminal de Línea (OLT), hasta los usuarios finales que comparten la red y dónde se sitúa la Unidad Óptica de Usuario (ONU), o también conocida como Unidad Terminal de Red (ONT). Entre ambas unidades, se sitúa la zona de de la red denominada de distribución óptica (ODN), dónde se sitúan diversos dispositivos pasivos utilizados en el despliegue de la fibra cuyo elemento principal es el *Splitter*, que se encarga de dividir la señal óptica procedente de la OLT, y enviarla en varias señales hasta los usuarios finales. Con la utilización de este tipo de divisores ópticos, que no requieren alimentación eléctrica, se consigue ahorrar energía en el despliegue de la fibra, así como, conseguir que la red sea compartida por múltiples usuarios. El número máximo de usuarios que comparten una red PON, depende de varios factores, la distancia, el ancho de banda ofrecido, las pérdidas permitidas...Con la inserción de numerosos conectores, empalmes y divisores ópticos en la ODN, la red óptica tiene pérdidas, además, existe una atenuación de

la señal óptica debido a la distancia que separa la OLT y la ONU. Al diseñar una red PON se establece un margen de pérdidas en torno a 20-30 dB dependiendo de la clase de pérdidas en la ODN, esto será explicado posteriormente (Figura 2-6). Por tanto, la suma de todas las pérdidas determinará el máximo Splitting ratio de la red PON, así como la máxima distancia entre la OLT y la ONU. Al final del capítulo cinco, se calculará el alcance máximo de una red PON.

En la figura 2-1, se muestra una arquitectura PON con los principales dispositivos descritos anteriormente. En el sitio de la OLT, se observa un multiplexor WDM, utilizado para la superposición de diferentes longitudes de onda en sentido *Upstream*, *Downstream* y señal de video.

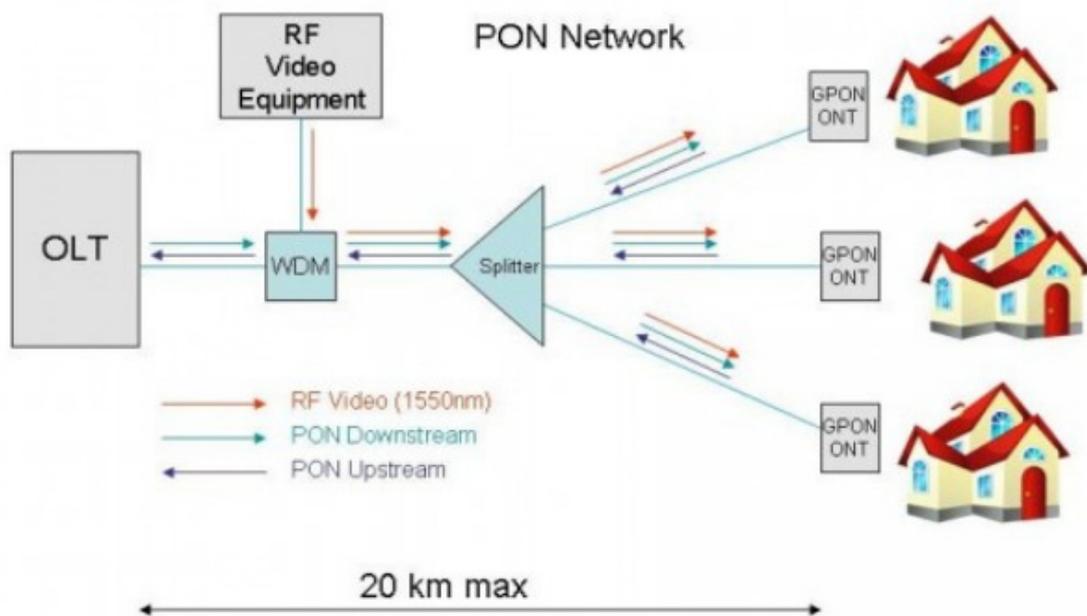


FIGURA 2-1 ARQUITECTURA RED PON [7]

## 2.1.2 P2P – Point to Point

Debido al gran crecimiento de la demanda de ancho de banda, muchas empresas deciden desplegar la fibra hasta el hogar utilizando una arquitectura punto a punto, es decir, una única fibra dedicada al usuario.

La instalación de una arquitectura P2P sobre fibra óptica se compone de un switch central (OLT), dónde cada usuario dispone de un puerto por el que se despliega la fibra óptica y llega hasta el equipo local del cliente (CPE). De esta forma se garantiza un ancho de banda mínimo de 100 Mbps para cada usuario y considerándose actualmente por ello, la opción más efectiva para dar soporte en el futuro a todos los servicios que tendremos a nuestra disposición. Es posible la existencia de varios switches o routers en el despliegue de una red P2P hasta el cliente final. En este proyecto, dónde se realizará un estudio de las redes de acceso sólo se considerará un único switch, desde dónde se desplegará fibra hasta el hogar. En la figura 2-2 se muestra una arquitectura punto a punto.

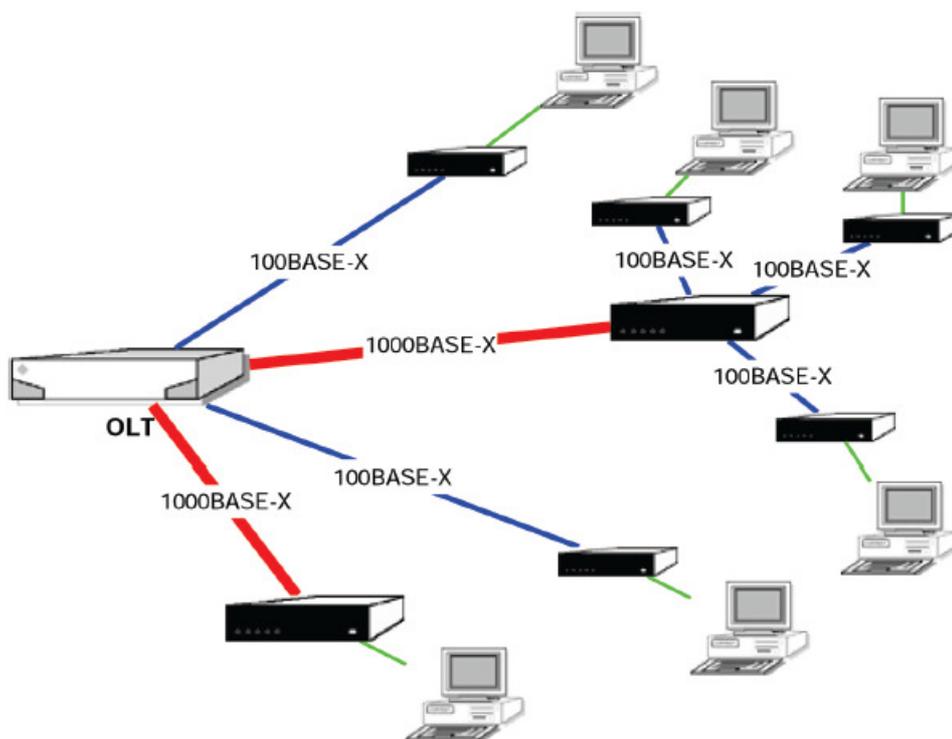


FIGURA 2-2 ARQUITECTURA P2P [8]

La propia naturaleza de esta arquitectura hace que sea posiblemente la manera más sencilla de desplegar una red FTTH, y además de ofrecer una alta flexibilidad. Al disponer cada usuario de una fibra en exclusiva, el ancho de banda ofrecido es fácilmente modificable desde la oficina central. Una de las grandes ventajas, sobre las redes PON, es su alta escalabilidad, cada usuario puede ser añadido de uno en uno y por tanto el equipo situado en la oficina central, es utilizado de una forma más efectiva, a pesar de tener un consumo mayor. En el despliegue de redes ópticas pasivas, las conexiones son agrupadas en grupos de 32 ó 64 clientes aunque en muy pocos escenarios, la distribución de usuarios conectados coincide con esas agrupaciones. Esto se conoce como la tasa de ocupación o *take rate* que será analizado en el capítulo cinco, dónde se mostrarán comparaciones entre arquitecturas PON y P2P, donde se demostrará que las arquitecturas punto a punto son más efectivas en cuanto a la energía consumida por usuario.

### **2.1.3 Futura arquitectura FTTH: P2P & PON**

Para solucionar el problema del *Take rate* y otros derivados de las redes PON, en una de las últimas conferencias sobre FTTH, celebrada en Milán, se propone implementar una arquitectura mixta entre PON y P2P, centralizando los Splitters [9]. En la figura 2-3 se observa la colocación de los divisores ópticos y nodos de acceso dentro de la misma oficina central. El funcionamiento de esta estructura es simple, todas las fibras desde el hogar se conectan a un MDF (*Main Distribution Frame*). Por otro lado, las diferentes tecnologías se conectan a otro MDF y se utilizan cables de conexión para coordinar que tecnología y que ancho de banda es ofrecido a cada usuario.

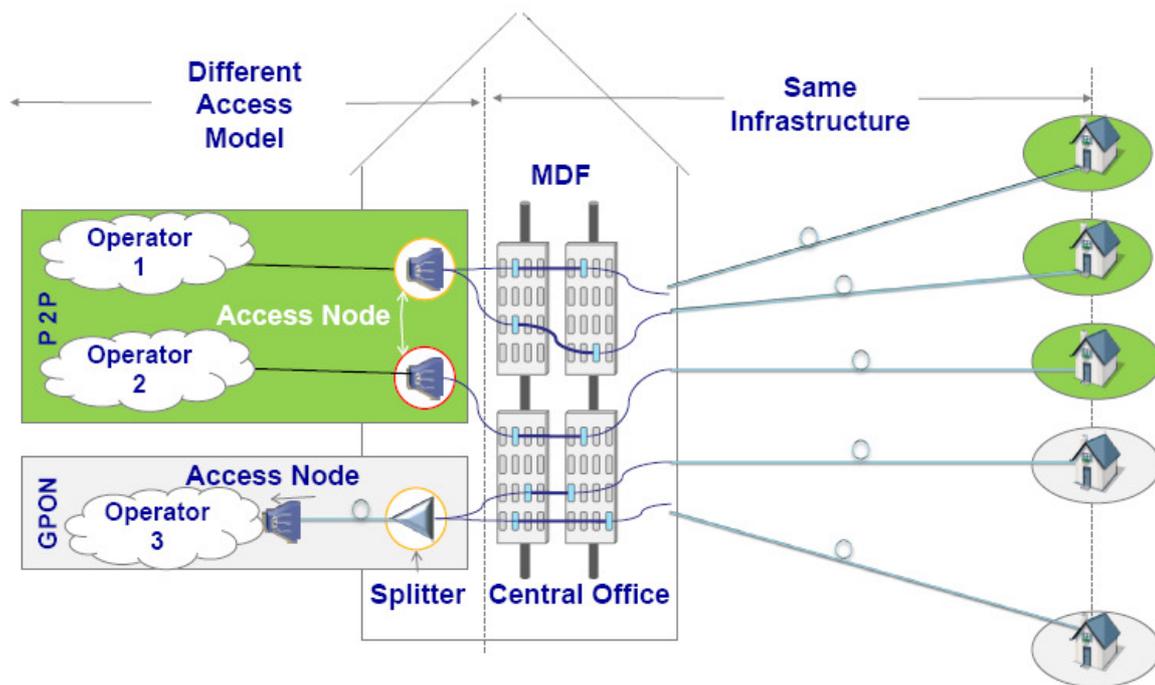


FIGURA 2-3 UNBUNDLING FTTH [9]

Esta implementación, supondría una mejora de la flexibilidad ya que se podría cambiar de un operador a otro, más fácilmente, y además supondría obtener aún una mayor escalabilidad, debido a que el cliente podría cambiar la tecnología y el servicio contratado, sin coste alguno para la compañía. En el capítulo cinco, se mostrará una comparación entre la implementación de una red PON tradicional y una red PON “escalable”, es decir, con la ODN situada en la nodo central.

### 2.1.4 FTTH – Desarrollo y evolución en el mundo

Hoy en día, el panorama de la implantación de arquitecturas FTTH en el mundo está creciendo considerablemente. El consejo Europeo de FTTH, formado por más de 150 empresas, se encarga de favorecer el desarrollo de FTTH e incrementar la competitividad para que Europa se adapte más rápidamente a las nuevas

tecnologías y así contribuir a la mejora de la calidad de vida de los ciudadanos. Según unos estudios, realizados al final del año 2010, Europa todavía se sitúa muy por detrás de Japón y EEUU, en cuanto a despliegue de la fibra óptica hasta el hogar, como se observa en la figura 2-4.



FIGURA 2-4 HOGARES EN EL MUNDO CON FTTH [10]

Todos los países en Europa tienen entre sus planes, el desarrollo de arquitecturas FTTH en los próximos años. En la figura 2-5 se muestra un pronóstico del crecimiento de la implantación de arquitecturas FTTH en Europa, en los próximos cinco años. Además se espera que el 50% de los hogares tengan una conexión de 100Mb en el año 2020 [10]. Todo este crecimiento, supondrá que el consumo energético en las redes de todo el mundo se incrementará de igual manera. Por tanto, se necesitarán implantar medidas que ayuden a la optimización del consumo por usuario a límites aceptables.

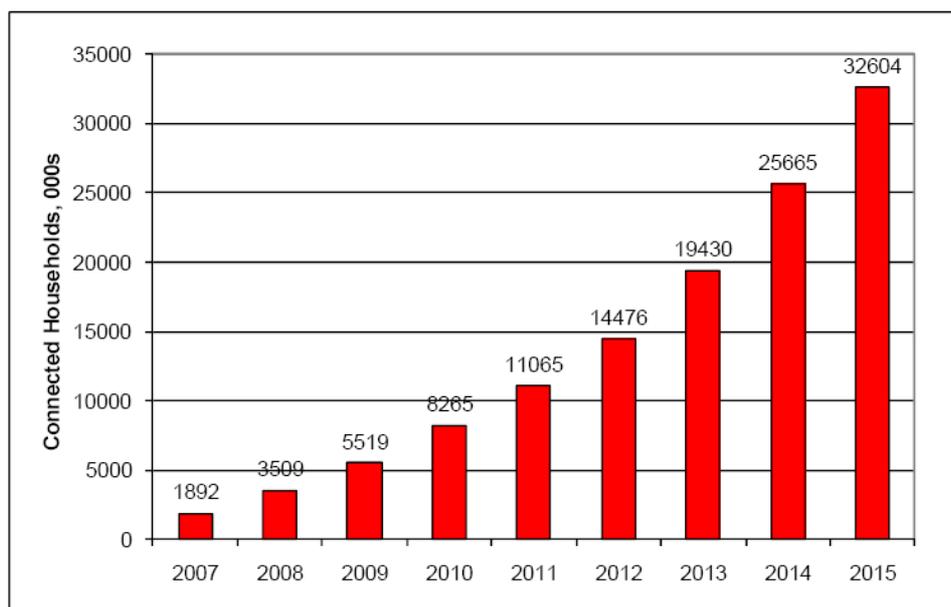


FIGURA 2-5 HOGARES EN EUROPA CON FTTH [10]

## ***2.2 Tecnologías***

Diversas tecnologías pueden ser utilizadas en el despliegue de redes ópticas pasivas. La elección, de una u otra tecnología, se basará en el tipo de servicio que se quiere ofrecer, así como, del coste y alcance de cada una. A continuación se detallarán las principales características de las tecnologías más utilizadas en la actualidad y en un futuro muy cercano.

## 2.2.1 TDM PON

La estandarización de las redes PON, lleva varios años siendo el foco de atención del IEEE e ITU. Con el avance tecnológico, el ancho de banda ofrecido por este tipo de redes ha aumentado considerablemente. Han ido apareciendo nuevas tecnologías como EPON y GPON, estandarizadas bajo el Standard IEEE802.3ah *Ethernet in the first mile* y el Standard G.984 series, respectivamente en 2003 y 2004. Estas dos tecnologías, se han convertido en las más desplegadas en la actualidad, aunque se espera que las redes de acceso de nueva generación sobre fibra óptica, sean implementadas, en un futuro, sobre evoluciones de éstas, con capacidad de 10 Gbps.

EPON y GPON utilizan técnicas de multiplexación en el tiempo (TDM) para enviar la información en distintos instantes de tiempo en sentido *Downstream*. Como hemos visto antes, además de utilizar TDM, el funcionamiento de estas redes se basa en la superposición de diferentes longitudes de onda para el sentido *Downstream* y *Upstream*, utilizando técnicas conocidas como WDM (*Wavelength Division Multiplexing*).

En el sentido *Downstream*, la OLT envía paquetes de datos a todas las ONU conectadas a la red (*broadcast*) y son éstas las que se encargan de filtrar la información y descartar aquellos paquetes que no vayan destinados a ellas. Además, se utiliza WDM para superponer otro tipo de servicios de video sobre una longitud de onda de 1550nm.

En el sentido *Upstream*, el funcionamiento es algo más complejo debido a que todas las ONUs comparten el mismo canal para enviar información, por tanto para evitar colisiones se utiliza técnicas TDMA o de acceso múltiple por división de tiempo. La OLT se encarga de asignar ventanas de transmisión a las ONUs. Mediante un mecanismo, denominado *Ranking*, la OLT sincroniza todas las ONUs de la red. A continuación garantiza a cada ONU, un slot o ranura de tiempo dónde poder transmitir. Este procedimiento, es dinámicamente re-calculado cada pocos

milisegundos. En el capítulo 3, se explicará más en detalle, una de las técnicas utilizadas para redes PON como es el *Dynamic Bandwidth Assignment (DBA)*.

Las características principales sobre el funcionamiento de ambas tecnologías, son las detalladas anteriormente, aunque existen ciertas diferencias que son importantes de mencionar. Ethernet PON (EPON) es una red óptica pasiva en el que el tráfico de datos de la red es encapsulado en tramas Ethernet (definidas en el IEEE802.3) mientras GPON, dos tipos de encapsulamiento son utilizados combinándose celdas ATM, con encapsulamiento GEM.

En la tabla 2-1, se muestran las principales diferencias y características que más interesan en este proyecto.

TABLA 2-1 COMPARATIVA EPON VS GPON

	<i>EPON</i>	<i>GPON</i>
<i>Velocidad Downstream</i>	1.25 Gbps	1.2 Gbps, 2.4 Gbps
<i>Velocidad Upstream</i>	1.25 Gbps	622 Mbps, 1.2 Gbps, 2.4 Gbps.
<i>ODN Class</i>	Clase A y B	Clase A, B y C
<i>Max Splitter</i>	64	128
<i>Max Alcance</i>	20Km	>20Km con Clase C

EPON soporta 1.25 Gbps en ambos sentidos, es decir simétrico, mientras que GPON admite tanto configuraciones simétricas como asimétricas. En la figura 2-3 se muestra una comparación muy útil sobre las clases de ODN para conseguir entender la relación existente entre los otros tres parámetros reflejados en la tabla 2-1.

Cada clase de ODN, equivale a un margen de pérdidas permitido para el diseño de la red PON. En ambas tecnologías, el comportamiento es similar, con la excepción que GPON tiene un tipo de ODN (clase C) adicional, que admite un margen mayor de pérdidas. Para permitir un margen de pérdidas mayor, es necesaria más

potencia suministrada por el transceptor óptico situado en la OLT. Anteriormente, se describió la existencia de pérdidas por inserción, debido a los divisores, conectores y empalmes y las pérdidas por atenuación provocadas por la distancia. En la figura 2-6 se observa la comparación de la máxima distancia respecto al número máximo de ONTs por cada puerto GPON (Split ratio) teniendo en cuenta que al aumentar la distancia entre OLT y ONT menos usuarios utilizarán un mismo enlace y viceversa. En el capítulo cinco se realizará un cálculo real del alcance máximo de una red PON.

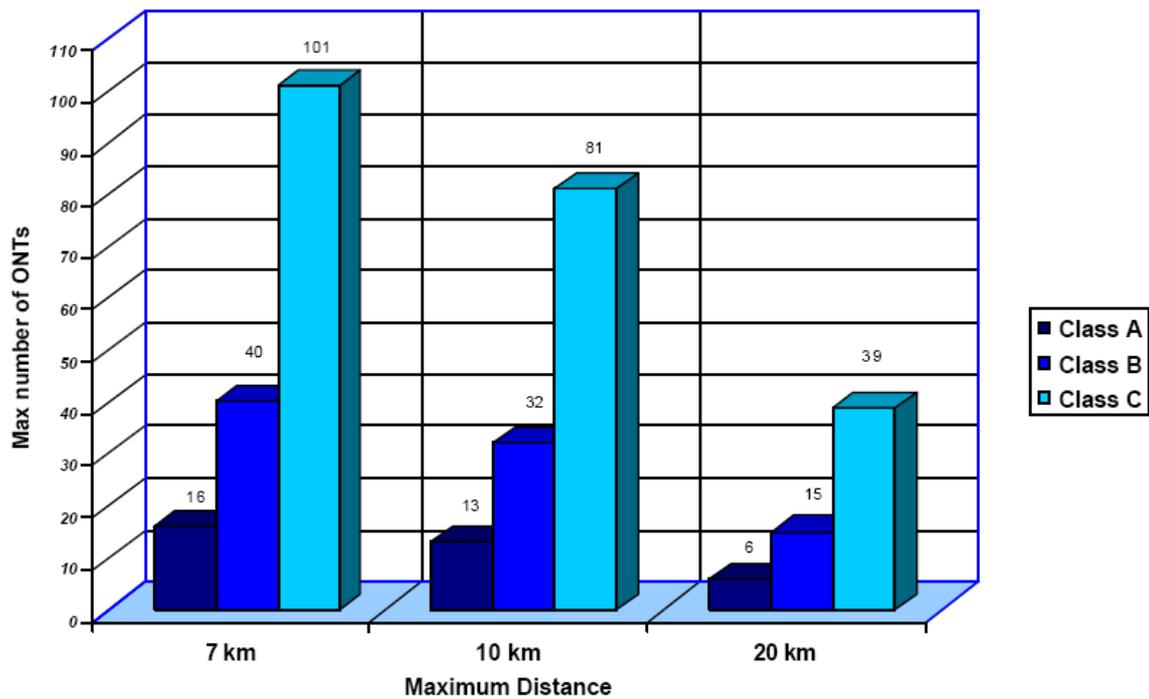


FIGURA 2-6 ODN CLASS COMPARAISON

## 2.2.2 WDM-PON

Una de las tecnologías de futuro que dará soporte a una gran cantidad servicios y usuarios será la aplicación de técnicas WDM sobre redes ópticas pasivas.

Anteriormente, se expuso que mediante la aplicación de técnicas WDM, canal *downstream* y *upstream*, podía compartir el mismo medio de transmisión utilizando diferentes longitudes de onda. La diferencia en el funcionamiento respecto a EPON y GPON es que WDM-PON utiliza multiplexación por longitud de onda en sentido downstream en vez de TDM. La arquitectura sigue la línea de una red óptica pasiva, pero en este caso se sustituyen los Splitters por un AWG (*Arrayed Waveguide Grating*) que es capaz de agrupar diferentes longitudes de onda en una misma fibra óptica y de la misma forma distribuir cada longitud de onda hasta el equipo del usuario final. Se manejan otras soluciones que no requieran la utilización de un AWG. Todavía es una tecnología sin estandarizar, aunque el estudio y desarrollo de WDM-PON es uno de los principales objetivos de numerosas empresas en la actualidad [12]. Al funcionar como una tecnología punto a punto, a cada usuario se le asigna una longitud de onda independiente, y esto simplifica mucho la capa de acceso al medio ya que no es necesario ningún protocolo de acceso múltiple como en EPON o GPON, además se consigue aumentar la seguridad. Actualmente se diseñan redes WDM-PON con una capacidad de 32 longitudes de onda por cada fibra óptica, lo que supondrá un gran aumento del ancho de banda por cliente (1.25Gbps simétricos). Se prevé una escalabilidad ilimitada, es decir quizás en futuras versiones se consigan tener 64 longitudes de onda de 10Gbps cada una, y por otro lado, se permita alcanzar distancias entre OLT y ONT mucho más grandes. El gran problema de esta tecnología es el alto coste que tienen los componentes necesarios para desplegar una red WDM-PON. Los multiplexores AWG son menos económicos que los divisores ópticos, cada cliente tiene un transceptor (SFP) dedicado exclusivamente.

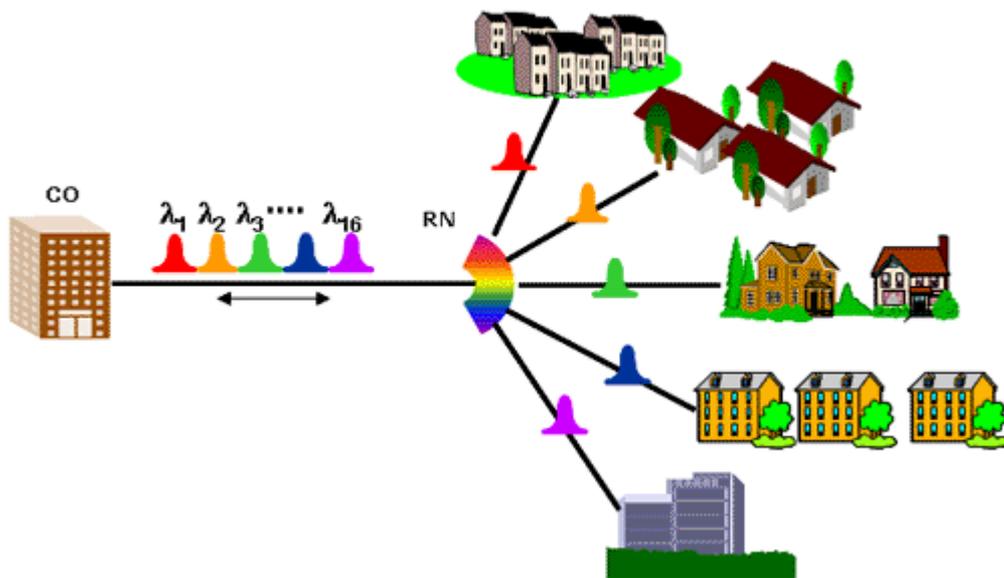


FIGURA 2-7 ARQUITECTURA WDM-PON [13]

### 2.2.3 ETHERNET

Ethernet es el estándar de redes de área local más usado en el mundo, dónde los equipos están conectados por cable coaxial, par trenzado ó fibra óptica, transmitiendo a velocidades entre 10Mbps y 10Gbps y en paquetes de datos de longitud variable (46-1500 bytes). Los dispositivos de una red LAN sobre Ethernet utilizan el modelo CSMA/CD ("*Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*") para controlar el acceso al medio y que fue definido en el estándar IEEE 802.3. Dicha norma fue creada con el objetivo de la estandarización de Ethernet, aunque existen diferencias, entre ellos, cómo el formato de las tramas de datos que hacen que ambos estándares sean incompatibles. Anteriormente ya se vio que la especificación EPON se basaba en el transporte de tráfico Ethernet en redes ópticas pasivas y conservando las características definidas el IEEE 802.3.



### **3 Estado del arte – Energy efficiency en TDM-PON**

---

Para entender correctamente los diferentes modelos de ahorro de energía existentes en la actualidad y algunos nuevos mecanismos, en este capítulo, se explicarán algunas de las tecnologías y protocolos usados en redes PON en la capa de acceso al medio (MAC), para la comunicación entre OLT y ONU.

Posteriormente, se mostrarán los estudios de algunos mecanismos de ahorro de energía en redes ópticas pasivas realizados por grupos de trabajo del ITU y el IEEE. Por último, serán presentados novedosos modelos propuestos por otros grupos de trabajo en los últimos años. Se analizarán sus ventajas e inconvenientes así como su viabilidad para ser usados en los dispositivos de redes PON en el futuro.

### **3.1 Standards**

En el capítulo 2, se vio la necesidad de usar técnicas de control de acceso múltiple al medio en sentido *Upstream*, debido a que todas las ONUs de una red PON comparten el mismo canal de transmisión. Para evitar colisiones y conseguir un reparto del ancho de banda adecuado a las necesidades del usuario, se utilizan algoritmos DBA (*Dynamic Bandwidth Allocation*). DBA es una técnica que permite compartir el canal de comunicaciones, y además, es capaz de adaptarse dinámicamente a la demanda de tráfico de cada usuario en cada momento, y así proporcionar una mejor calidad de servicio (QoS) y llegar a los niveles acordados con el cliente (SLA, *Service Level Agreements*). Por otra parte, la utilización óptima de estos algoritmos, permite a las empresas de telecomunicaciones ofrecer un ancho de banda mayor del disponible en la red, ya que no todos los usuarios se encuentran conectados simultáneamente, esto se conoce como *Oversubscription* (sobredemanda) [14]. La sobredemanda, será analizada en lado WAN de una red de acceso, en la simulación de resultados del capítulo cinco.

Muchos protocolos de red implementan DBA de diferentes métodos, definidos en sus respectivos estándares.

#### **3.1.1 DBA en GPON**

En el estándar de la ITU G983.4 se describen los requisitos necesarios para la implementación de la funcionalidad del DBA en redes ópticas pasivas definidas en la ITU como GPON [15].

Básicamente se detallan dos modos diferentes de operación aplicando DBA. El primer método consiste en que la OLT observa el ancho de banda utilizado por cada una de las ONU y si éste es mayor que un umbral predefinido, se le ofrece un ancho de banda adicional si fuera posible. Debido a que es la OLT la que calcula las necesidades de ancho de banda de cada ONU a partir de la utilización en cada instante, no es necesario ningún tipo de operación por parte de la ONU, y por ello se denomina o se clasifica como *Non- Status Reporting* (NSR-ONU). Tiene el

problema que la OLT no sabe exactamente las necesidades de ancho de banda de cada ONU.

El segundo mecanismo implica el envío de informes sobre el estado de los buffers por parte de las ONUs a la OLT en pequeños slots de transmisión. Cada ONU con DBA debe tener varios contenedores o buffers denominados T-CONTs que son clasificados en diversos tipos según la prioridad. Basándose en los informes de la ONU y en la prioridad de cada T-CONT, la OLT puede dinámicamente reasignar ancho de banda a cada ONU. Se denomina *Status Reporting* (SR-ONU).

No todos los dispositivos de la red PON tienen implementado un mecanismo DBA pero la red PON por sí misma deberá soportar tanto NSR-ONUs como SR-ONUs.

### **3.1.2 MPCP para EPON**

El estándar IEEE802.3ah establece un protocolo denominado *Multi-Point Control Protocol* (MPCP) que facilite la aplicación de algún algoritmo DBA para redes EPON [16]. Veremos su funcionamiento y características, para poder entender posteriormente algunos mecanismos de ahorro de energía propuestos por grupos de trabajos.

Es importante distinguir una serie de etapas dentro del MPCP para EPON. En el primero proceso denominado *Discovery*, la OLT periódicamente establece una ventana de transmisión dónde todas las ONUs que se encontraban apagadas o se han conectado a la red recientemente puedan contactar con la OLT. El procedimiento es sencillo, la OLT manda mensajes (*GATE Discovery message*) a todas las ONU (*broadcast*), indicando la disponibilidad de una ventana o espacio de tiempo en las que éstas pueden mandar un mensaje de registro (*REGISTER\_REQ message*).

Una vez que una ONU esté registrada, tenemos la etapa de *Report*, dónde para el correcto funcionamiento del mecanismo la ONU debe periódicamente informar a la OLT de la necesidad de ancho de banda. Por otra parte se mandan mensajes REPORT para mantener activa la comunicación con la OLT y se establece, que al menos debe ser mandado por la ONU cada 50ms como máximo, aunque no exista necesidad de ancho de banda. Igualmente, la OLT debe garantizar un ancho de banda cada cierto tiempo a todas las ONUs registradas. La OLT manda mensajes GATE dónde se especifican el tiempo de comienzo y duración de la ventana de transmisión. También se establece que la OLT debe mandar un mensaje GATE a la ONU cada 50 ms como máximo. En la figura 3-1 se muestra uno de los algoritmos utilizados para implementar DBA para EPON.

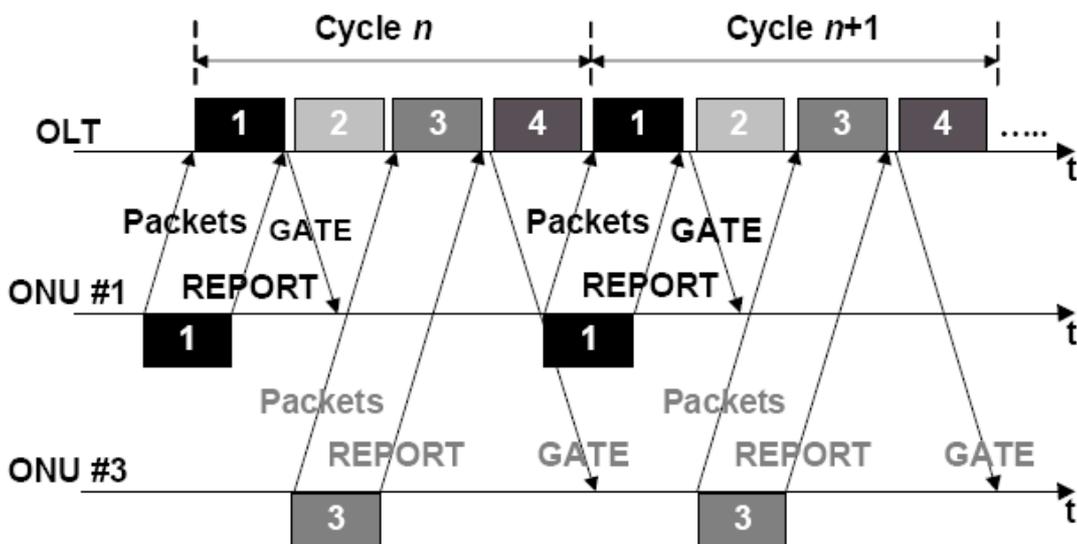
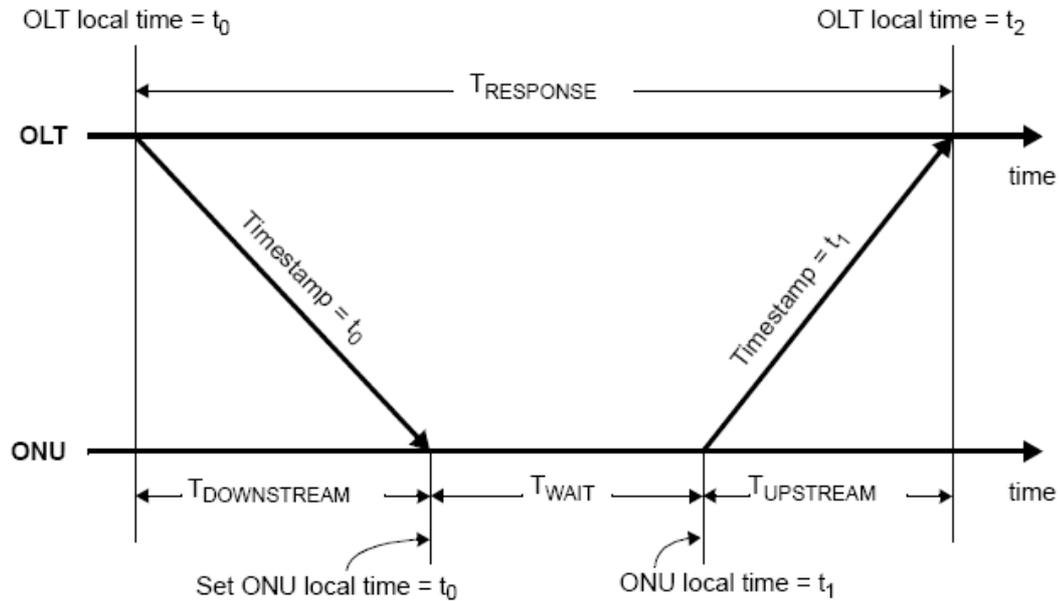


FIGURA 3-1 ALGORITMO IPACT [16]

Para poder aplicar algún algoritmo de DBA, además de la utilización de esos mensajes, es necesario que la OLT sincronice todas las ONUs. En la figura 3-2 se observa como la OLT calcula el retardo de propagación (RTT) existente entre ambos dispositivos utilizando los valores de tiempo que son señalados en la variable *Timestamp* de los mensajes citados anteriormente. Utilizando los distintos

valores de RTT de cada ONU, la OLT mediante un mecanismo denominado *Ranging* es capaz de situar a la misma distancia virtual todas las ONUs.



$T_{DOWNSTREAM}$  = downstream propagation delay

$T_{UPSTREAM}$  = upstream propagation delay

$T_{WAIT}$  = wait time at ONU =  $t_1 - t_0$

$T_{RESPONSE}$  = response time at OLT =  $t_2 - t_0$

$$RTT = T_{DOWNSTREAM} + T_{UPSTREAM} = T_{RESPONSE} - T_{WAIT} = (t_2 - t_0) - (t_1 - t_0) = t_2 - t_1$$

FIGURA 3-2 ROUND TRIP TIME CALCULATION [17]

### 3.1.3 EPON

El IEEE creó un grupo de trabajo específico para el estudio de la eficiencia de energía en tecnologías que usan tráfico Ethernet. El grupo de trabajo IEEE P802.3av fue formado para el estudio y creación de un estándar relativo a las redes ópticas de acceso 10G-EPON. En Septiembre de 2008, en una reunión

celebrada en Seúl, algunas propuestas interesantes de ahorro energía en las redes de acceso fueron presentadas.

Mandin comienza a introducir las claves para establecer un mecanismo flexible para implementar una función de ahorro de energía en la ONU de una red PON [18]. El sistema propuesto se basa en una comunicación entre OLT y ONU, mediante los mensajes correspondientes, en los que la OLT determina a la ONU su desactivación durante un periodo de tiempo establecido por la OLT. Por el momento dos variables muy importantes en el diseño de un mecanismo de ahorro de energía como son el tiempo de sincronización y las consecuencias en la calidad del servicio no son estudiadas.

En otra de las presentaciones, Marek Hajduczenia propone algo parecido utilizando los campos de los mensajes *GATE* y *REPORT* del MPCP visto anteriormente [19]. Anteriormente hemos visto que tanto OLT como ONU deben mandar mensajes *GATE* y *REPORT* respectivamente, incluso cuando no exista tráfico. Estos mensajes son intercambiados con un máximo de 50 ms (*REPORT\_Timeout*, *GATE\_Timeout*). Se propone un mecanismo de ahorro de energía durante momentos de inactividad variando esos parámetros dependiendo de la carga de tráfico.

### **3.1.4 GPON**

Igualmente la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) lleva tiempo investigando la forma de salvar energía en redes ópticas pasivas. Así en el Suplemento 45 de las recomendaciones de ITU-T G [20] se establecen y clasifican los principales mecanismos a implementar en el equipamiento de las redes de acceso ópticas para optimizar la energía consumida.

Se especifican soluciones para la mejora de los equipos así como la disminución de emisiones de CO2. Además se muestran las diferentes formas de señalización o comunicación de las transiciones entre la ONU y la OLT para el establecimiento de un determinado mecanismo de energía.

**Fast Sleep** es el primero de los mecanismos que se describen. La ONU alterna periodos de tiempo en la que se encuentra desactiva con periodos que permanece activa. Las transiciones del ciclo de Fast Sleep son controladas por la OLT por medio de mensajes PLOAM (physical layer operations and maintenance). Sólo algunas funciones capaces de detectar actividad y de control de tiempo permanecerán activas durante el periodo que la ONU permanece inutilizada. Un nuevo tipo de mensaje PLOAM sería necesario con un campo que determinase el tiempo a transcurrir entre la entrada en Sleep mode y el momento del próximo periodo de actividad.

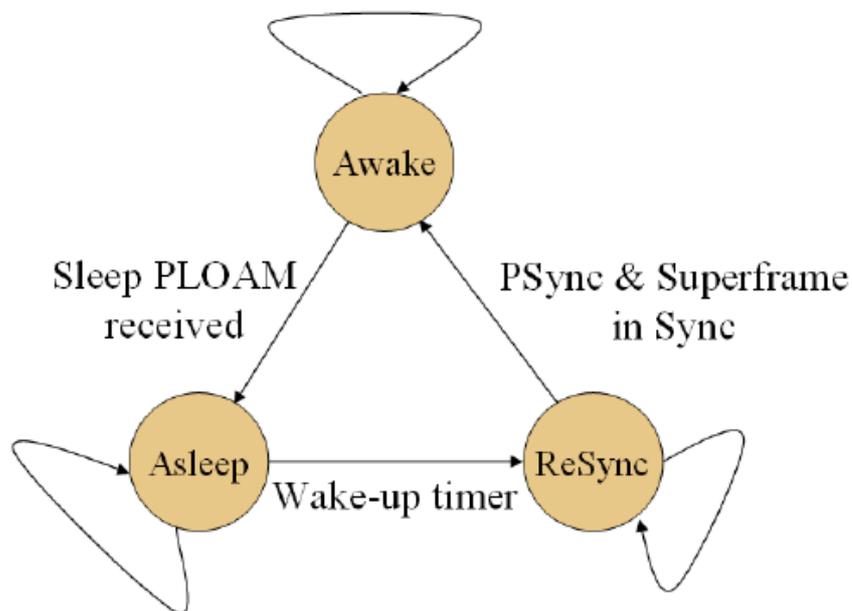


FIGURA 3-3 FAST SLEEP MODE TRANSITIONS [20]

Por otra parte, la OLT debe guardar en un buffer los posibles paquetes que llegan durante el tiempo que la ONU permanece inactiva, y debe asegurar la sincronización de todas las ONUs que tengan implementado este mecanismo, asignándolas un ancho de banda regular para mensajes PLOAM, debido a que el tiempo de Wake-up puede expirar.

Posteriormente se describe otro método más enfocado a una actividad escasa o nula de la ONU, **Deep Sleep** y así obtener un ahorro máximo de energía. En este mecanismo todas las funciones permanecen inactivas y sólo alguna pequeña función de detección de actividad permanece disponible para evitar la pérdida de señalización. Es una forma utilizada en escenarios donde el usuario final apaga la ONU o simplemente la pérdida de información y servicios es aceptable. Al igual que el anterior mecanismo, la OLT debe reservar pequeñas ventanas de transmisión para las ONUs que se encuentren desactivadas.

Alternativamente al **Fast Sleep**, surge el **Dozing mode** en el que la ONU tiene desactivada la transmisión de tráfico de subida y en cambio mantiene activada toda la parte de recepción de tráfico de bajada de la OLT, así una ONU en Dozing mode evita perder la sincronización y puede activarse con cualquier *Request* desde la OLT o bien con la recepción de tráfico de subida desde la UNI (interfaz de red del usuario).

**Power shedding** es otro de los mecanismos desarrollados en este documento en el que la ONU desactiva ciertos servicios y funciones cuando funciona por medio de una batería.

Se utiliza en situaciones donde se ha producido un fallo de alimentación en la ONU y así poder conseguir un ahorro de energía durante ese tiempo.

Además de estas dos organizaciones, muchos grupos de trabajo en todo el mundo se dedican esencialmente a la creación y estudio de nuevas técnicas que permitan resolver el problema del consumo de energía en las redes de acceso.

### 3.1.5 ENERGY EFFICIENCY ETHERNET (EEE)

El objetivo principal de la ITU y el IEEE es aplicar los modelos de ahorro de energía descritos para redes Ethernet sobre par de cobre, a las redes Ethernet sobre fibra óptica.

En el Estándar IEEE802.3az Energy Efficient Ethernet (EEE) oficialmente aprobado a finales del mes de Septiembre de 2010, se definen mecanismos *Sleep mode* para reducir el consumo de energía en situaciones bajas de carga para varios tipos de enlace sobre par de cobre, como 100BASE-TX, 1000BASE-T y 10GBASE-T [21]. A partir de la aprobación del estándar, numerosos grupos de trabajo comenzaron a realizar simulaciones, en diferentes situaciones para conseguir saber cuánto dinero y energía se podía ahorrar, aplicando los mecanismos descritos.

Uno de los experimentos muestra el consumo de energía de una tarjeta de red (NIC) de 100BASE-TX (100 Mb/s) y 1000BASE-T (1 Gb/s) en dos escenarios críticos en estos mecanismos [22]. El estudio analiza, el caso del consumo de energía de la NIC en una situación sin tráfico en el enlace y en otra funcionando a la máxima capacidad del enlace. Además se realiza una comparación con el consumo de energía en las transiciones de estado en la tarjeta de red.

En la Tabla 3-1 se observa que se ahorra mucha más energía en situaciones donde el tráfico existente es nulo, que en situaciones donde el enlace de red se encuentra trabajando a la máxima capacidad.

TABLA 3-1 CONSUMO NIC – BAJA Y ALTA CARGA DE TRÁFICO

	<i>SIN TRÁFICO</i>	<i>MAX CAP</i>
<i>PROTOCOLO</i>	<i>ANTES / EEE</i>	<i>ANTES / EEE</i>
<i>100BASE-TX</i>	<i>208 / 139</i>	<i>215 / 208</i>
<i>1000BASE-T</i>	<i>525 / 152</i>	<i>541 / 535</i>

En la Tabla 3-2 se muestra el consumo de la NIC cuando el número de transiciones entre *Sleep mode* y el modo activo es muy alto. Se simula el envío de 5000 paquetes de 250 Bytes para conseguir tiempos de llegada entre paquetes muy grandes. Se demuestra que no se consigue salvar un gran consumo de energía, cuando se suceden muchas transiciones de estado, debido a que el tiempo entre *Sleep mode* y el modo activo y viceversa es mayor que el tiempo entre llegada de paquetes.

TABLA 3-2 CONSUMO NIC – TIEMPO DE LLEGADA ENTRE PAQUETES MUY PEQUEÑO

<i>PROTOCOLO</i>	<i>ANTES / EEE</i>
<i>100BASE-TX</i>	<i>215 / 201</i>
<i>1000BASE-T</i>	<i>531 / 512</i>

Existe un gran interés en trasladar los mecanismos utilizados sobre los dispositivos de redes sobre par de cobre, a la fibra óptica. Debido al alto consumo de energía de los dispositivos utilizados en tecnologías sobre fibra óptica, la aplicación de dichos mecanismos resultaría mucho más efectiva.

### **3.2 Nuevas Propuestas**

En los últimos años, con el objetivo de minimizar el impacto energético de las nuevas redes de acceso basadas en fibra óptica, números grupos de investigación han presentado algunos modelos de gran interés. Basándose en los mecanismos anteriormente citados, se han propuesto novedosos modelos de ahorro de energía centrándose en la parte física de una red PON y en la mejora e innovación de protocolos de enlace de red.

El grupo de Kubo propone desarrollar dos tipos de mecanismos en la unidad óptica de red (ONU) para ahorrar energía en redes ópticas pasivas, concretamente presentan un estudio y resultados en un escenario de 10Gb/s EPON [23].

Se propone un mecanismo híbrido que compagine el Sleep Mode con un Adaptive Link Rate (ALR). Existe una función de control de Sleep Mode que activa o desactiva parte de la ONU en presencia o ausencia de tráfico, y existe una función de control para el ALR que alterna la tasa de bajada entre la Unidad Óptica Terminal (OLT) y la ONU entre 1Gb/s y 10Gb/s dependiendo igualmente de la cantidad de tráfico.

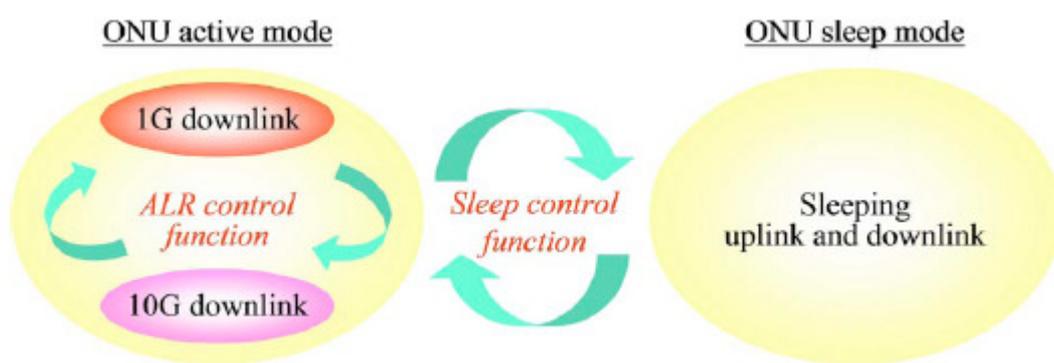


FIGURA 3-4 MODELO HÍBRIDO PROPUESTO [23]

La función de control para Sleep mode, utiliza un mecanismo de Wake up periódico. La ONU se activa periódicamente para comprobar si han llegado paquetes de datos durante el tiempo que permaneció desactivada.

La OLT determina la existencia o ausencia de tráfico observando el intervalo de llegada entre paquetes, si éste es mayor que determinado umbral ( $t_{th}$ ), la OLT manda un mensaje *Request* con el valor de tiempo ( $T_{sleep}$ ) que deberá permanecer en *Sleep Mode*, y la ONU contesta con un mensaje ACK. En caso de existir tráfico de subida desde el interfaz de usuario, la ONU rechaza entrar en Sleep Mode.

El  $T_{sleep}$ , el tiempo de transición entre ambos modos (Sleep-Active, Active-Sleep) y el umbral escogido, son parámetros fundamentales para un óptimo resultado de este mecanismo.

El funcionamiento del mecanismo de Adaptive Link Rate es muy parecido. ONU y OLT se comunican de la misma manera y es ésta última que, dependiendo de la cantidad de tráfico existente, establece una tasa de bajada de 10Gb/s o 1Gb/s. Al igual que el anterior mecanismo de ahorro de energía, se establece un umbral de ancho de banda ( $B_{th}$ ) a partir del cual la tasa de bajada cambia.

En la figura 3-4 se puede observar los tres estados posibles de la ONU y sus diferentes transiciones dependiendo de la carga de tráfico de la red. El valor escogido para los parámetros  $T_{sleep}$ ,  $i_{th}$  y  $B_{th}$ , en el diseño del modelo híbrido, es fundamental para un adecuado funcionamiento, es decir, conseguir un ahorro de energía considerable y que ello no disminuya la calidad del servicio al usuario.

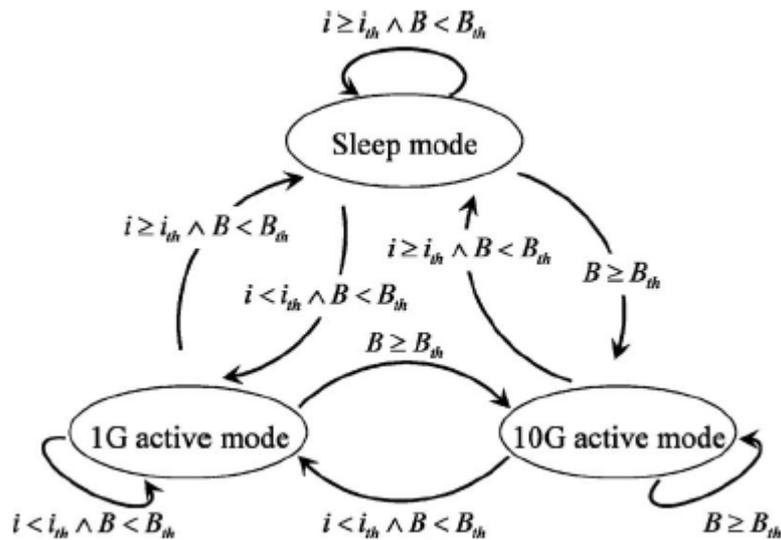


FIGURA 3-5 DIAGRAMA DE ESTADOS DEL MODELO HÍBRIDO [23]

Los problemas de este diseño aplicado a una ONU/ONT en una red PON son diversos. Otros grupos de trabajo han presentado algunas soluciones tratando algunos de esos problemas que se deben tener en cuenta a la hora de desarrollar un mecanismo de ahorro de energía en los dispositivos que forman una red óptica de acceso.

Uno de los grandes problemas que presenta aplicar un mecanismo de ahorro de energía en redes ópticas pasivas viene dado por el propio funcionamiento de dichas redes. Como se vio en el capítulo dos, en EPON, el tráfico de bajada se transmite por multiplexación por división en el tiempo (TDM). Todos los paquetes son transmitidos en una longitud de onda desde la OLT a todas las ONUs, y son estas las que comprueban si la información va destinada a ellas. Por tanto, es complicado que una ONU pueda permanecer un tiempo desactiva, ya que no sabrá cuando le llegan paquetes desde la OLT.

En cuanto al tráfico de subida, ya se ha visto anteriormente en algún mecanismo que una ONU, en *sleep mode*, puede activarse en cuanto detecte la llegada de tráfico desde el UNI.

Al principio de este capítulo se mostraron las características principales de los algoritmos DBA, definidos en diferentes estándares.

Jingjin Zhang y Nirwan Ansari proponen dos mecanismos para ahorrar energía en una red EPON, tomando como base la aplicación de técnicas DBA [24].

El primero, se basa en poner en Sleep Mode la ONU durante más de un ciclo de DBA, donde tanto transmisor como receptor son desactivados si no existe tráfico durante un tiempo.

Tanto OLT y ONU conocen el estado de las colas y los intervalos de tiempo que son asignados a la ONU. Si no existe tráfico de subida, la ONU mandará un mensaje *REPORT* con un valor de cero de ancho de banda necesario. Por otro lado si la ONU no recibe tráfico de bajada durante dos ciclos de DBA, podrá asumir que no existen paquetes destinados a ella.

Basándose en esta premisas, establecen un algoritmo que determina la transición existente entre cuatros estados existentes de los dispositivos de transmisión y recepción de una ONT/ONU en una red EPON. En la figura 3-5 se observan los cuatros estados, así como los diferentes niveles de consumo de energía según el estado de los elementos de la ONT.

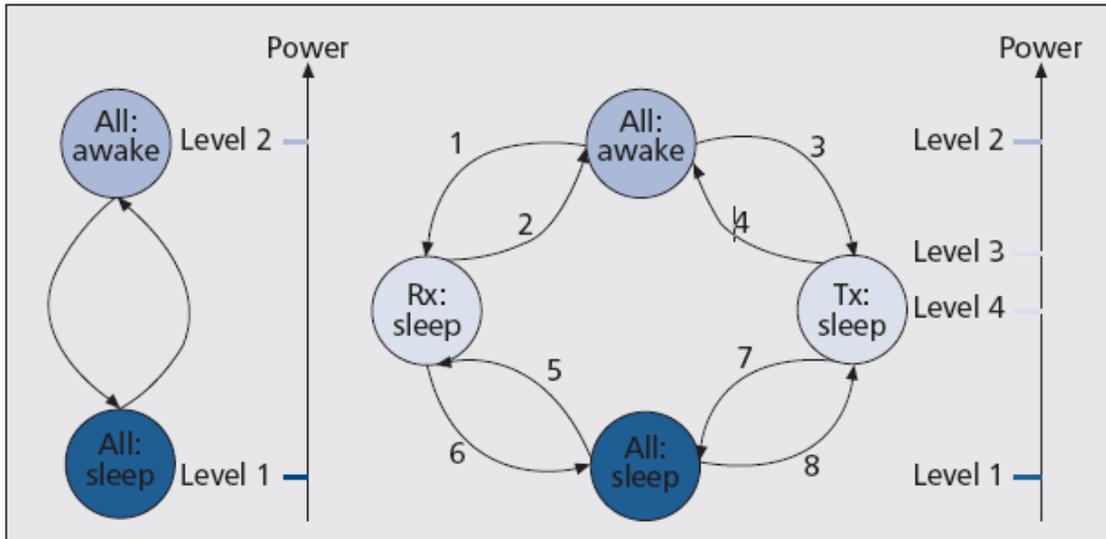


FIGURA 3-6 ESTADOS RX Y TX DE UNA RED PON [24]

Teniendo en cuenta que seguirán llegando paquetes de control MPCP para asegurar la transmisión de tráfico *Downstream*, el estado **Rx:sleep** no es considerado. Por tanto, sólo es necesario establecer la transición entre **All:awake** - **Tx:sleep** y **Tx:sleep** - **All:sleep**.

Si no se envían paquetes durante un *idle threshold*, el transmisor entra en modo **Tx:sleep** durante un tiempo, *Sleep time* que es calculado en el algoritmo. Después del primer periodo, en modo *Sleep*, se chequea el estado de la cola y se informa a la OLT, que toma un tiempo aproximadamente de 2.5 ms (*short active*). Si no hay tráfico en cola esperando, el transmisor vuelve a entrar en modo **Tx:sleep** durante un tiempo diferente del primer ciclo. Así sucesivamente hasta que exista tráfico en la cola, o el *Sleep time* calculado sea superior a los 50 ms definidos en el MPCP para el envío del mensaje REPORT.

Es importante seleccionar un adecuado valor a los parámetros claves en este algoritmo. El *idle threshold* debe ser mayor que el doble del tiempo que toma la ONU entre el estado *Sleep* y *Awake* para conseguir ahorrar energía en el primer periodo. La duración del *short active* debe ser la suficiente para que la ONU le dé

tiempo a comprobar el estado de la cola y e informar a la OLT. Además debe ser superior a un ciclo de DBA para dar libertad en la asignación de slots de tiempo a la OLT y evitar colisiones con otras ONUs conectadas.

En la figura 3-6 se muestran los diferentes ciclos de *Sleep* del transmisor cuando no existe tráfico de subida. Se han seleccionado valores de 10 ms y 2.5 ms para los parámetros *idle threshold* y *short active*.

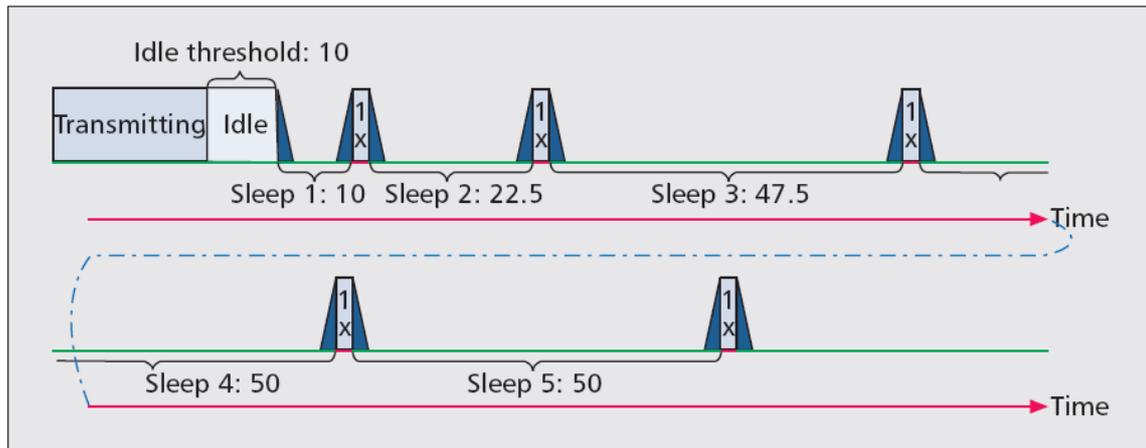


FIGURA 3-7 EJEMPLO TX SLEEP [24]

Una segunda opción consiste, en que tanto transmisor y receptor de la ONU entrarían a *Sleep mode* dentro de un ciclo de DBA. Si la red PON es compartida por 16 usuarios, el TX y RX solo deberían permanecer activos 1/16 de un ciclo DBA. Para el caso del TX es sencillo debido a que la ONU se activaría cada vez que le correspondiese transmitir en el tiempo asignado por la OLT. En el caso del RX es algo más complicado ya que la ONU no sabe cada cuanto tiempo le llegan paquetes destinados a ella. Se propone calcular aproximadamente los instantes de tiempo que le corresponderán a cada ONU teniendo en cuenta el ciclo DBA anterior y posterior, ya que la OLT no cambia mucho su planificación de un ciclo a otro.

Este segundo escenario conduce a otro gran problema, para conseguir un ahorro de energía en un período DBA, es necesaria una transición muy rápida entre la

activación y desactivación de la ONU. Igualmente, para las propuestas anteriores, el tiempo de transición de los dispositivos implicados es fundamental en estos mecanismos.

Shing-Wa Wong y su grupo de trabajo, muestran un estudio sobre aplicación de un *Sleep Mode* en una ONU y la posterior activación de todas las funciones de la ONU en menos de 64ns [25].

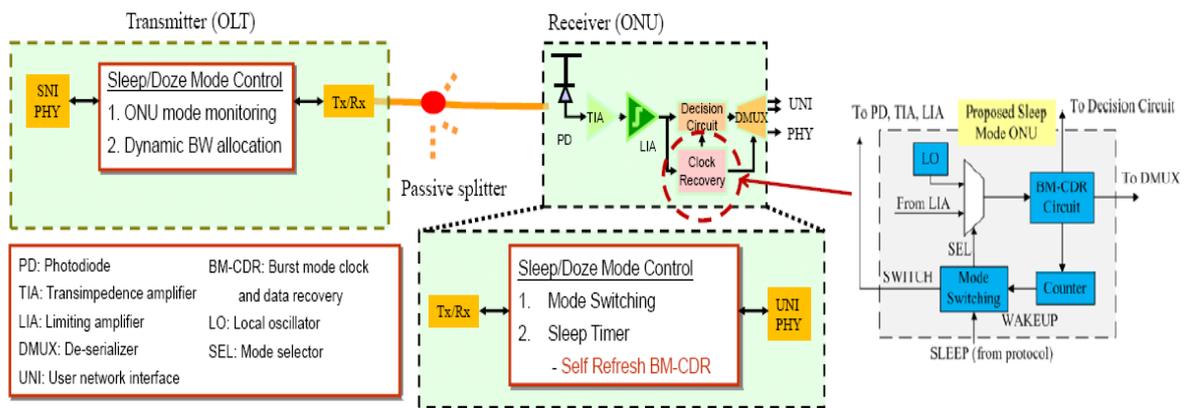


FIGURA 3-8 SLEEP MODE EN UNA ARQUITECTURA PON CON FAST WAKE UP [25]

Lo que se consigue con esta arquitectura es una reducción considerable del problema del retraso de sincronización producido durante las transiciones de estado de la ONU. La arquitectura de la Figura 3-7 se basa en la utilización de un circuito CDR (*Fast clock and data recovery*) que permite a la ONU activarse a tiempo para la llegada del mensaje GATE de la OLT. Con esto se consigue evitar que una tardía activación de la ONU provocase pérdida de información y un largo periodo de sincronización. Por otro lado se consigue que el tiempo que permanezca la ONU en *Sleep mode* sea mucho más eficaz y se ahorre más energía.

Con la utilización de este circuito, el segundo escenario que proponen Jingjin Zhang y Nirwan Ansari sería realizable, la ONU tardaría en activarse menos de medio ciclo de DBA y podría permanecer desactivada un tiempo suficiente para ahorrar energía [24].

En un estudio anterior al presentado previamente, Shing-Wa Wong y su grupo de trabajo propusieron tres arquitecturas posibles de una ONU, en las que variaban los elementos que desactivaban y optimizaban el tiempo de sincronización. Se intenta buscar el mejor balance posible entre el ahorro de energía, el coste económico de cada arquitectura y el tiempo de sincronización con la OLT [26].

En la Figura 3-9 se observa la primera de las arquitecturas, donde toda la parte del circuito analógico (Foto-detector, Amplificadores, Continuous Mode-CDR) de la ONU permanece desactivada en *Sleep Mode* y sólo algunos elementos de la parte digital permanecen activos (memorias, reloj). El problema de esta arquitectura es el amplio tiempo necesario para recuperar la sincronización con el reloj de la OLT.

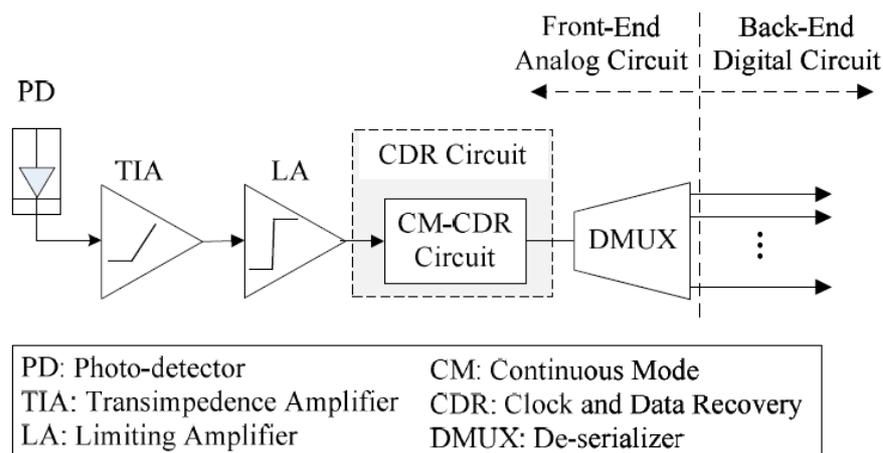


FIGURA 3-9 ONU ARQUITECTURA 1 [26]

En la segunda de las arquitecturas (Figura 3-10) presentada se intenta solventar el problema anterior. Se sustituye el circuito CM-CDR por otro *self-refresh Burst Mode-CDR*, que consigue mantener relativamente la sincronización con la OLT con la ayuda de un oscilador local. Cuando la ONU entra en *Sleep Mode*, la entrada seleccionada para el BM-CDR es la del oscilador local en vez de los datos que vienen de los amplificadores. Mejora mucho la sincronización y provoca un pequeño aumento del gasto de energía respecto de la primera solución.

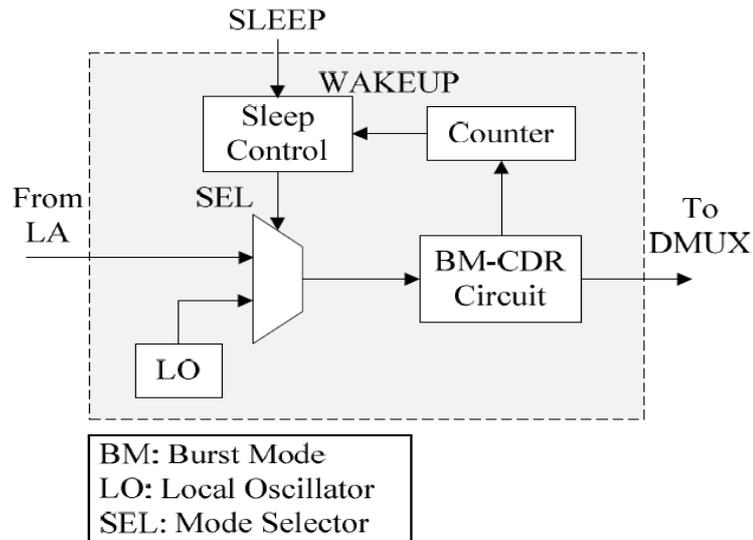


FIGURA 3-10 ONU ARQUITECTURA 2 [26]

Con el objetivo de diseñar el mecanismo, lo menos costoso posible, se propone una tercera arquitectura (figura 3-11) sin la utilización del oscilador local. Simplemente, se añade a la primera arquitectura una función de control de *Sleep Mode* antes del DMUX. Toda la parte del circuito analógico permanece activa salvo el DMUX para mantener la sincronización con la OLT.

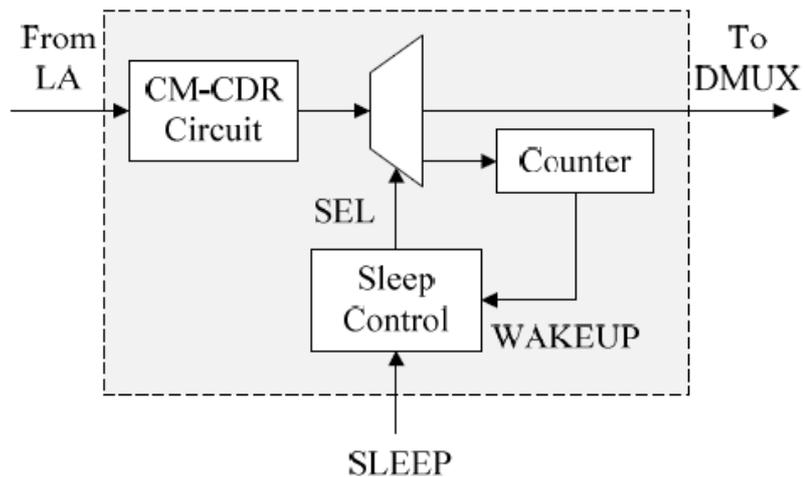


FIGURA 3-11 ONU ARQUITECTURA 3 [26]

En las tablas siguientes se muestra el balance entre el compromiso de ahorro de energía y su correspondiente consecuencia en el tiempo de sincronización con la OLT para las tres arquitecturas.

TABLA 3-3 CONSUMO DE LAS ARQUITECTURAS

Table 1							
Power Consumption Comparison for Different ONU Architecture Options							
	Front-End Analog Circuit					Back-End Digital Circuit	Total Power Consumption
	APD	TIA	LA	BM/CM-CDR	DMUX		
Active	negligible*	100mW	100mW	330mW †	470mW*	2.85W	3.85W ( $P_{active}$ )
Option 1	off	off	off	off	off	750mW	750mW ( $P_{sleep,1}$ )
Option 2	off	off	off	on	off	750mW	1.08W ( $P_{sleep,2}$ )
Option 3	on	on	on	on	off	750mW	1.28W ( $P_{sleep,3}$ )

En la tabla 3-3 se observa lo explicado anteriormente, sólo se desactivan los componentes de la parte analógica de la ONU. Se puede concluir observando la tabla 3-4 que las opciones 2 y 3 son mucho más óptimas, ya que aunque el consumo en *Sleep Mode* sea algo superior que en la primera arquitectura, el tiempo que tarda la ONU en volver a estar disponible es mucho más pequeño. Si la ONU tarda más de 5 ms en activarse, prácticamente sólo sería posible ahorrar energía en redes con una carga de tráfico muy baja.

TABLA 3-4 TIEMPO DE SINCRONIZACIÓN CON LA OLT

Table 2			
Wake-Up Overhead Comparison for Different ONU Architecture Options			
Architecture	Clock Recovery Time* ( $T_{recovery}$ )	Max Synchronization Time † ( $T_{sync.}$ )	Total Overhead ( $T_{overhead}$ )
Option 1	2-5ms	125µs	5.125ms
Option 2	1-10ns	125µs	125µs
Option 3	none	125µs	125µs



## 4 Diseño de redes FTTH

---

En capítulos anteriores se han visto las principales arquitecturas y tecnologías que usan las compañías de telecomunicaciones para desarrollar redes FTTH que den la posibilidad de ofrecer multitud de servicios de diversos tipos. Además se describieron las principales limitaciones, problemas y ventajas que tenían cada una de las tecnologías.

En este capítulo se mostrará un estudio analítico sobre la eficiencia de energía de las tecnologías vistas (GPON, P2P y WDM-PON). A partir de una búsqueda de los valores de consumo de los dispositivos que son utilizados en el despliegue de este tipo de redes, se ha escogido un modelo para cada tecnología.

En la primera parte de este capítulo se mostrarán y explicarán las características principales de los elementos Hardware, que son usados en el desarrollo de redes sobre fibra óptica. Posteriormente, para cada una de las tecnologías, se escogerán modelos reales de estos dispositivos, que son ofrecidos por algunas empresas de telecomunicaciones.

## **4.1 Hardware utilizado**

En el capítulo 2, a la hora de explicar las diferentes arquitecturas y tecnologías, ya se vieron los elementos necesarios para el despliegue de una red PON o P2P. Para entender, porque se han escogido unos dispositivos u otros, se tratará de explicar cuál es la funcionalidad de cada elemento y que características son más relevantes en una red de acceso. La mayoría de los elementos son comunes a una red FTTH sobre PON y sobre P2P, aunque se diferencian en algunos aspectos. Además se mostrarán figuras del Hardware utilizado en las simulaciones realizadas en el capítulo siguiente.

### **4.1.1 OLT (Optical Terminal Line)**

Es el dispositivo principal del equipo de red situado en la oficina central, y es utilizado como elemento final de proveedor de servicios en una red óptica pasiva. Se encarga, principalmente, de coordinar la transmisión y recepción de mensajes con la unidad de red final (ONT/ONU), utilizando los protocolos anteriormente explicados, y de realizar la conversión de señales eléctricas que provienen de servidores superiores. Para una red P2P, se utilizan switches, que son utilizados como OLT para el despliegue de la red óptica. Se pueden diferenciar varios elementos.

El chasis es el módulo dónde se encuentran integrados todos los elementos de la unidad óptica terminal. En su interior, se encuentran las fuentes de alimentación, que suministran energía al resto de dispositivos, los ventiladores para evitar el sobrecalentamiento del módulo y las tarjetas de red tanto para la conexión *Upstream* como *Downstream*.

En la figura 4-1 se puede observar una chasis de la empresa ZHONE con tarjetas de red insertadas en los slots o ranuras disponibles.



FIGURA 4-1 CHASIS MXK 823 – ZHONE [27]

Para cada tipo de chasis, cada empresa ofrece varios modelos de tarjetas de red, que según el número de puertos y funcionalidad ofrecida tendrán un consumo determinado. A partir del consumo de dichas tarjetas de red, de los sistemas de enfriamiento y el chasis, se seleccionará una fuente de alimentación que determinará el consumo máximo de la OLT.

#### **4.1.2 Tarjetas de Red/OLT**

Dentro de las tarjetas de red se deben diferenciar, aquellas que son usadas para el despliegue de la red óptica hasta el cliente final, y las que son usadas para la conexión con el *Backhaul*.



FIGURA 4-2 MXK-GPONX8-IO [27]

El consumo asociado a las mismas dependerá del número de puertos de cada tarjeta y de la tecnología asociada. En la figura 4-2, se muestran dos tarjetas ofrecidas por la empresa ZHONE, con cuatro y ocho puertos para la tecnología GPON. La figura 4-3, muestra una de las opciones ofrecidas por Cisco, como tarjeta de red de 48 puertos 1000BASE-X para el despliegue de una red P2P.



FIGURA 4-3 CISCO WS-X4448-GB-SFP [28]

### 4.1.3 Transceptores

Dentro del mundo de las telecomunicaciones hay multitud de transceptores, en el caso de una red sobre fibra óptica, es el dispositivo encargado de transmitir y recibir las señales ópticas, es decir, es el interfaz de red entre la OLT y ONT con los cables de fibra. Para este proyecto, se han utilizado transceptores SFP (*Small form-factor pluggable*), para transmitir la señal desde los puertos de cada tarjeta de red. Son los dispositivos que suministran la potencia óptica necesaria para que la señal viaje desde la OLT hasta la ONT y viceversa, por lo que, se diferencian varios tipos, según el alcance y el tipo de fibra usada (fibra mono-modo o multi-modo). Para enlaces *Uplink*, con una velocidad de hasta 10Gbps se utilizan transceptores XFP o SFP+. En la figura 4-4 se muestra, un transceptor SFP, utilizado en la arquitectura P2P simulada. El consumo típico de estos dispositivos se sitúa entre 0.5 y 1 W.



FIGURA 4-4 Cisco 1000BASE-BX10-D [29]

### 4.1.4 CPE (Customer Premises Equipment)

CPE, se refiere al conjunto de dispositivos (Router, Módem, STB (*Set-top Box*)) del cliente situados en el nodo final de la red óptica. En este proyecto, se han estudiado, las unidades ópticas utilizadas en una red FTTH.

El concepto ONT (*Optical Network Terminal*) fue creado por la ITU-T para describir aquellas unidades ópticas que eran utilizadas por un único usuario, y se conocen

como ONU (*Optical Network Unit*), cuando la unidad es compartida por varios usuarios.

La unidad óptica final en una red PON, se denomina ONT mientras que en una red P2P, las unidades del cliente reciben, en ocasiones, el nombre de Ethernet Gateway. En WDM-PON puede aparecer cómo *Colorless Residential Unit*, debido a que cada transceptor es adaptable a una longitud de onda determinada. Todas ellas tienen la misma misión, presentar los servicios contratados al usuario final. Normalmente, disponen de un puerto WAN para su conexión con la OLT, y presentan varios interfaces para servicios *Triple Play* en lado LAN. Suelen trabajar únicamente en la capa 2 del nivel de red y presentan varios puertos FE/GE para servicios IP (video and data), y un par de puertos POTS FXS para voz. Además, algunas de ellas tienen capacidad de enrutamiento (Nivel 3), así como, la posibilidad de interfaz WiFi.

En la figura 4-5, se muestra una ONT de la empresa ZHONE, que tiene interfaz WiFi, y dispone de 4 puertos GE y dos puertos POTS (*Plain old telephone service*).



FIGURA 4-5 ZNID GPON 2516 [30]

## 4.2 Market Overview

En esta segunda parte, se mostrarán los dispositivos seleccionados para la simulación de resultados posterior. Las comparaciones se han realizado, únicamente, utilizando los elementos principales que forman la red de acceso, es decir, OLT y ONT y además, los elementos anteriormente explicados que se debe tener en cuenta en la elección y el diseño de la red, como son las tarjetas OLT y los transceptores.

Para poder realizar un estudio real de estas tres arquitecturas, primero se han escogido tres empresas dedicadas a la fabricación del hardware necesario para la implantación de una red GPON (ZHONE), una red P2P (Cisco) y una red sobre WDM-PON (LG-Ericsson). Cada uno de los chasis y tarjetas OLT seleccionados tiene ciertas propiedades y características técnicas que serán explicadas. En cuanto a la parte final del cliente, se han seleccionado ONTs lo más similares posibles, es decir, con el mismo número de puertos y misma funcionalidad.

### 4.2.1 GPON - ZHONE

En la Tabla 4-1, para el caso de una red GPON, se muestran los principales dispositivos de la casa ZHONE con sus respectivos datos de consumo de energía [31-34].

El chasis escogido tiene capacidad para 18 tarjetas de red para el despliegue de la red, con ocho puertos PON cada una. El consumo incluye los sistemas de refrigeración, las tarjetas con el *backhaul* y elementos del chasis. Por otra parte, se ofrecen tarjetas de ocho y cuatro puertos PON para ser utilizadas en el chasis **MXK823**. Por tanto, con un Split ratio 1:64, la red GPON podría dar servicio a 9216 usuarios.

TABLA 4-1 ZHONE – Dispositivos utilizados

<i>GPON</i>	<i>Casa</i>	<i>Modelo</i>	<i>Consumo de Energía</i>	<i>WAN/ Backhaul</i>	<i>Puertos</i>
<i>OLT</i>	<i>ZHONE</i>	<i>MXK823</i>	<i>1400 W</i>	<i>18/2</i>	
<i>OLT</i>	<i>ZHONE</i>	<i>MXK319</i>	<i>630 W</i>	<i>7/2</i>	
<i>ONT</i>	<i>ZHONE</i>	<i>ZNID-GPON-2504</i>	<i>8 W</i>		<i>4 GbE LAN</i>
<i>Tarjeta OLT</i>	<i>ZHONE</i>	<i>MXK-GPONX8-IO</i>	<i>63 W</i>		<i>8 SFP</i>
<i>Tarjeta OLT</i>	<i>ZHONE</i>	<i>MXK-GPONX4-IO</i>	<i>50 W</i>		<i>4 SFP</i>
<i>Tarjeta OLT</i>	<i>ZHONE</i>	<i>MXK-UPLINK 2x10G-8x1GE</i>	<i>-</i>		<i>2 10Gbps 1 8Gbps</i>

Para algunas simulaciones, se necesitaba limitar el ancho de banda *Downlink*, por lo que se ha usado el chasis **MXK319**, con sólo 7 slots para tarjetas de red. Esto será explicado posteriormente en la simulación de resultados.

En la documentación de los dos tipos de tarjetas seleccionadas (**MXK-GPONX8-IO**, **MXK-GPONX4-IO**), se describe la clase de transceptores permitidos, Clase B+, C. El SFP escogido para la simulación es el modelo **OLTSFP-2D14GA13-GPC Series**, de la empresa SENNSEEK [35], y tiene un consumo aproximado de 1.15 W, y Clase B+. Para la conexión con la red *Backhaul*, se ofrecen dos configuraciones diferentes, para los dos slots disponibles. La opción escogida tiene una capacidad de 28 Gbps por cada tarjeta *Uplink*.

Para la elección del equipo localizado en el hogar del cliente, se ha escogido un modelo con cuatro puertos *Giga Ethernet* y sin puertos para Voz.

Dentro de la gama de productos ofrecidos por ZHONE, hay posibilidad de escoger otros modelos de chasis con diferentes prestaciones. De la misma forma, se ofrecen numerosos tipos de ONT, con mayor cantidad de puertos y funcionalidad de enrutamiento, así como posibilidad de puerto WiFi [30].

En la figura 4-6 se puede observar gráficamente cómo quedaría distribuida la red FTTH sobre GPON diseñada. Cada cliente tendrá un ancho de banda *downstream* de 2.5Gbps entre el número de usuarios que comparten el puerto PON, que dependerá del Split ratio seleccionado y del número de puertos PON disponibles en el chasis de la oficina central. El alcance máximo entre OLT y ONT, con los transceptores SFP utilizados (Clase B+, C), será aproximadamente de 20Km e igualmente dependerá del número de usuarios por puerto PON (Ver Figura 2-6).

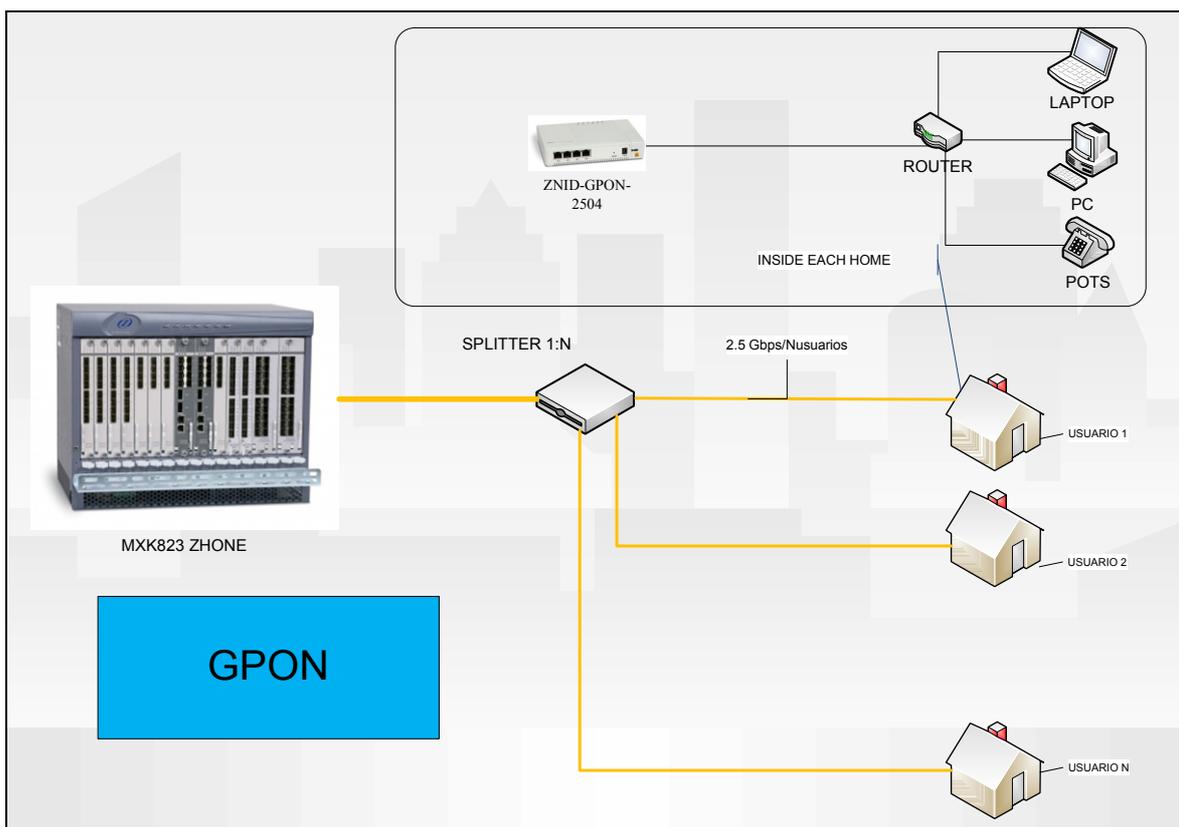


FIGURA 4-6 RED GPON

#### 4.2.2 P2P – CISCO

Para implementar una tecnología punto a punto, se ha escogido una de las soluciones ofrecidas por CISCO.

El chasis **CATALYST 4510R+E**, ofrece la posibilidad de multitud de combinaciones dependiendo de las tarjetas de red seleccionadas. Existe la posibilidad de utilizar ocho tarjetas de 48 puertos cada una, insertadas en las ranuras del chasis de Cisco, con capacidad de ofrecer hasta un total de 384 puertos de 100 Mbps y 1000 Mbps sobre fibra óptica. La opción más apropiada, para una comparación lo más equilibrada posible y no tener una alta sobredemanda, es el modelo **WS-X4624-SFP-E**, con capacidad de 24 puertos GE. Además hay que tener en cuenta, que el chasis tiene dos slots para las tarjetas de red *Upstream* (**Supervisor Engine 7-E**). La capacidad del chasis con la red *Backhaul*, es de 80 Gbps. Con ocho tarjetas de 24 puertos, se dispone de un total de 192, y no será posible ofrecer 1Gbps a cada usuario simultáneamente, si el chasis se encuentra con todos los puertos P2P ocupados. Para escenarios, dónde es necesario limitar el ancho de banda ofrecido, se sustituirán algunas tarjetas por el modelo **WS-X4612-SFP-E**, con la mitad de puertos P2P.

Para el cálculo de energía consumida en el chasis, CISCO ofrece valores de salida de potencia, por tanto, no es posible utilizar un determinado valor como en otras tecnologías. En uno de los informes sobre la capacidad de la potencia utilizada, se detalla, que para aplicaciones dónde sólo se utiliza transmisión de datos, las fuentes de alimentación utilizadas tienen un factor de eficiencia de 0,75 [36]. El 25% de la energía suministrada se disipa en calor. Se ha calculado el valor máximo de energía consumida en el chasis, sumando todos los valores ofrecidos de los distintos dispositivos y aplicando el factor de eficiencia descrito.

$$P_{\max} = \text{Sum}(\text{Chasis+ventiladores, Tarjetas de red Up/Downstream})/0.75$$

(1)

En la tabla 4-2, se muestra el consumo de cada componente, y el consumo máximo del chasis 4510R+E calculado con la fórmula 1 [37-39].

TABLA 4-2 CISCO – Dispositivos utilizados

<i>P2P</i>	<i>Casa</i>	<i>Modelo</i>	<i>Consumo de Energía</i>	<i>Slots</i>	<i>Puertos</i>
<i>OLT</i>	<i>CISCO</i>	<i>CATALYST 4510R+E</i>	<i>1578 W/1493W</i>	<i>8/2</i>	
<i>OLT</i>	<i>CISCO</i>	<i>Chasis + Sist Refrigeración</i>	<i>200W</i>		
<i>ONT</i>	<i>GENEXIS</i>	<i>OCG-120m</i>	<i>4.3 W</i>		<i>4 FE 100Mbps</i>
<i>ONT</i>	<i>GENEXIS</i>	<i>OCG-1020m</i>	<i>5.3W</i>		<i>4 GE 1000Mbps</i>
<i>Tarjeta OLT</i>	<i>CISCO</i>	<i>WS-X4624-SFP-E</i>	<i>45 W</i>		<i>24 1000Mbps</i>
<i>Tarjeta OLT</i>	<i>CISCO</i>	<i>WS-X4612-SFP-E</i>	<i>30 W</i>		<i>12 1000Mbps</i>
<i>Tarjeta OLT</i>	<i>CISCO</i>	<i>SUPERVISOR ENGINE 7-E</i>	<i>280 W</i>		<i>4 10Gbps</i>

En la tabla se muestran dos valores para el chasis, ya que, el consumo máximo, vendrá dado cuando sean utilizadas, las tarjetas de red hasta 100 Mbps (la capacidad de del chasis con tarjetas de 100Mbps es el doble que para 1Gbps).

En cuanto a la ONT seleccionada en la simulación de resultados, se han buscado varias soluciones en empresas distintas de CISCO, ya que el único dispositivo que

ofrecen está orientado para el uso en pequeños negocios y oficinas [40]. Por tanto resulta demasiado complejo y conlleva un gran consumo de energía, para ser usado como ONT, en una arquitectura FTTH. Otras empresas como GENEXIS o ISKRATEL ofrecen mejores soluciones en cuanto al consumo, y además, son compatibles con los transceptores SFP usados en las tarjetas de Cisco [41]. Para las simulaciones realizadas, se han tomado los modelos **OCG-120** y **OCG-1020** de la empresa GENEXIS para su uso en escenarios de 100Mbps y 1000Mbps respectivamente. Ambos modelos disponen de cuatro puertos FE o GE para su interfaz LAN. Estos modelos, utilizan transceptores **100BASE-BX10-D/U** y **1000BASE-BX10-D/U**. Por tanto, es necesario seleccionar esta clase de transceptores en la tarjeta de red de CISCO. Ambos transceptores tienen un consumo normal de 0.66W [42-43].

En la figura 4-7 se muestra el escenario típico de las simulaciones realizadas.

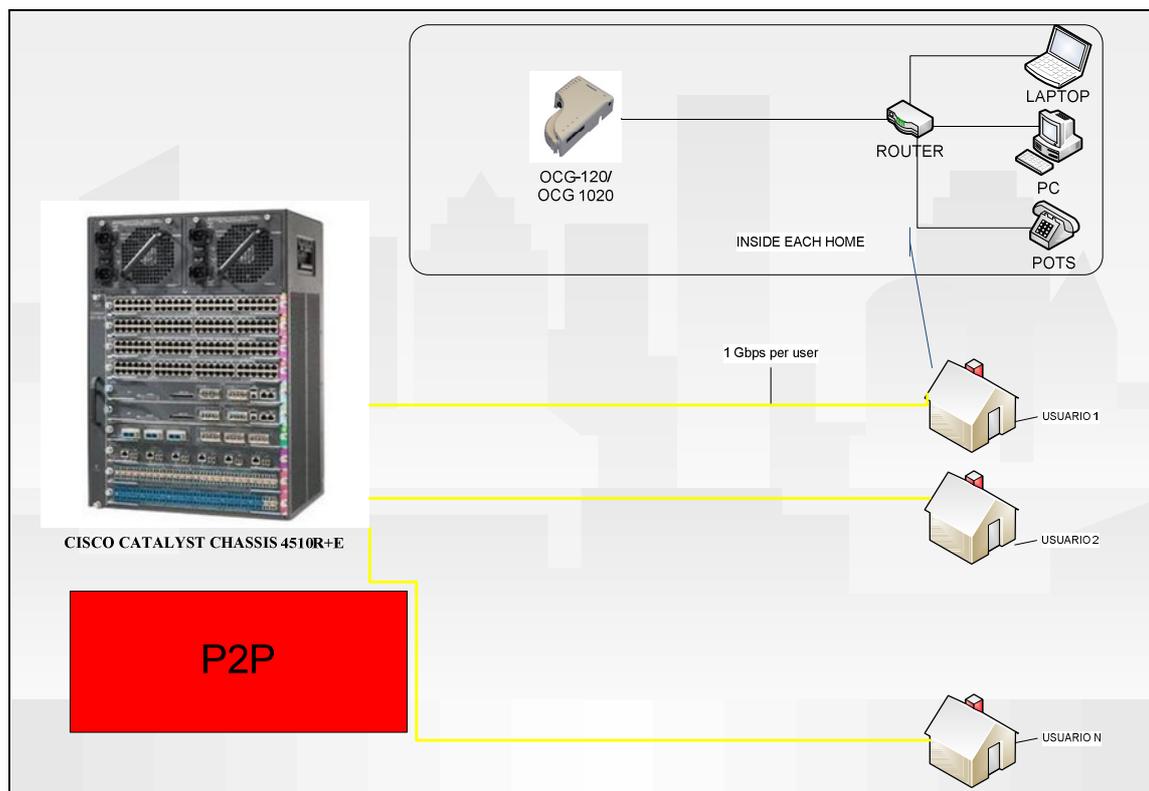


FIGURA 4-7 RED P2P

### 4.2.3 WDM PON - LG ERICSSON

Por último, en la tabla 4-3, se muestran los elementos seleccionados de la casa LG-Ericsson para la implementación de una red sobre WDM-PON [44]. Al ser todavía una tecnología en fase de investigación y optimización, resulta complicado conseguir datos técnicos de los dispositivos. Muchos de los datos de consumo han sido consultados por email.

TABLA 4-3 LG ERICSSON – Dispositivos utilizados

<i>WDM</i>	<i>Casa</i>	<i>Modelo</i>	<i>Consumo de Energía</i>	<i>WAN/ Backhaul</i>	<i>Puertos</i>
<i>OLT</i>	<i>LG ERICSSON</i>	<i>EAST1100</i>	████████	<i>8/8</i>	
<i>ONT</i>	<i>LG ERICSSON</i>	<i>EARU1112</i>	██████		<i>4 FE LAN 100</i>
<i>ONT</i>	<i>LG ERICSSON</i>	<i>EARU1211</i>	██████		<i>4 GE LAN 1000</i>
<i>Tarjeta OLT</i>	<i>LG ERICSSON</i>	<i>100Mbps</i>	██████		<i>1</i>
<i>Tarjeta OLT</i>	<i>LG ERICSSON</i>	<i>1000Mbps</i>	██████		<i>1</i>
<i>Tarjeta OLT</i>	<i>LG ERICSSON</i>	<i>Uplink SFP</i>	-		<i>8 GE/ 10GE</i>

LG-Ericsson ofrece dos soluciones según las tarjetas 100M y 1000M usadas en los ocho slots disponibles del chasis EAST1100. Ambas tarjetas, además disponen de tan solo un puerto para el interfaz PON, pero cada puerto tiene una capacidad de 32 longitudes de onda de 100Mbps o 1000Mbps. Debido a que a cada usuario le llega una longitud de onda, la capacidad máxima por chasis, sería de 256 clientes. El chasis dispone de ocho interfaces de hasta 10 Gbps cada uno, hacia la red Metro.

La ONT ofrecida por LG-Ericsson para longitudes de onda de 100Mbps, tienen un consumo muy bajo mientras que el modelo ofrecido para 1000Mbps, tiene un consumo de XX.XX W.

En la figura 4-8 se observa la arquitectura WDM-PON simulada. Cada fibra óptica se marca de un color por las distintas longitudes de onda que llegan a cada usuario. En la casa del usuario, se sitúa la ONT que se adapta a la longitud de onda con la que trabaja.

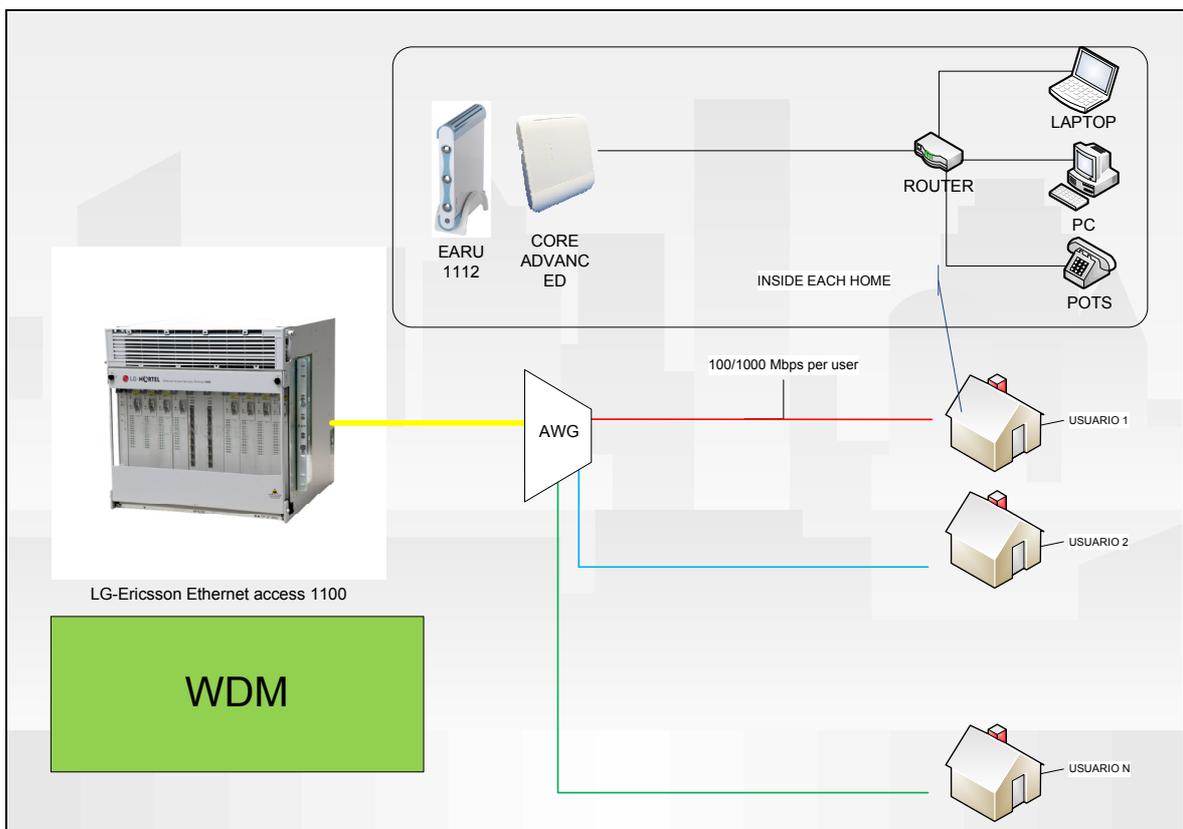


FIGURA 4-8 RED WDM-PON

## 5 Simulación y análisis de resultados

---

En este quinto capítulo se simularán los resultados de las arquitecturas propuestas en el capítulo anterior. Sobre diferentes escenarios y utilizando valores reales, se mostrarán las ventajas e inconvenientes de la implementación de unas tecnologías u otras.

En la primera parte, se mostrarán resultados de comparaciones de las distintas tecnologías en cuanto al consumo por usuario, dependiendo de dos parámetros fundamentales en el desarrollo de redes FTTH: el ancho de banda y el número de usuarios conectados.

En la segunda parte del capítulo se mostrará una comparación entre una red PON tradicional y una red PON escalable. Además se explicará más en detalle el concepto del *Take Rate* o tasa de ocupación de la red y cómo influye en las redes PON.

Se concluirá el estudio, con el cálculo del alcance máximo para cada tecnología, analizando los tipos de pérdidas introducidas.

## 5.1 Energía por usuario

Las simulaciones han sido realizadas utilizando el programa MATLAB, y basándose en los parámetros y valores presentados en las tablas (4-1, 4-2 y 4-3) del capítulo cuatro. El objetivo principal de cada una de las simulaciones es obtener el consumo de energía por usuario de las tecnologías estudiadas anteriormente (GPON, P2P y WDM-PON), respecto al ancho de banda ofrecido a cada usuario y el número de usuarios conectados a la red.

El método seguido en el cálculo del consumo de energía por usuario, es muy importante debido a que los resultados obtenidos pueden variar considerablemente con la modificación de ciertos factores. En varios artículos de investigación [45-46] se utiliza la siguiente fórmula:

$$P_{\text{user}} = \alpha * P_{\text{OLT}} / M_{\text{usuarios}} + P_{\text{rn}} / M_{\text{usuarios}} + P_{\text{cpe}}$$

(2)

La fórmula (2) es usada en diferentes tecnologías para calcular el consumo de energía por usuario conectado a una red. El primer factor (**P\_OLT**), representa la cantidad de energía consumida en la OLT que es compartida por **M** usuarios. El segundo factor (**Prn**) se refiere al valor de consumo en el nodo remoto o final de una red que es también es compartido por **M** usuarios. En muchas arquitecturas P2P, se coloca un *switch* entre la OLT y ONT, que es compartido por M usuarios. En la sección 2.1.3, se mostró una posible arquitectura de futuro dónde, desde la oficina central, la fibra se desplegaba directamente hasta el hogar del cliente, tanto para tecnologías PON como P2P. Por tanto, se ha considerado que no existe *switch* en un posible nodo final y el segundo elemento de la fórmula (2), para este proyecto, es nulo. El último elemento (**Pcpe**) se refiere al consumo de los dispositivos locales del cliente (ONT, router, módem). El factor  $\alpha$  se introduce para tener en cuenta el consumo debido a sistemas de refrigeración y generadores externos. En la mayoría de las simulaciones, se le asigna un valor 2.

Para las simulaciones realizadas en este proyecto, se ha tomado la fórmula (2) sin el factor  $\alpha$  y sin la parte de energía consumida en el nodo remoto. El motivo de suprimir el factor  $\alpha$ , se debe a los datos de consumo que ofrecen las empresas dedicadas al desarrollo de redes sobre fibra óptica. Los valores presentados en el capítulo anterior, son valores máximos de consumo de OLT, es decir, una OLT funcionando a su máxima capacidad, con todos los puertos siendo utilizados. Por tanto, para realizar algunas comparaciones, se ha seguido un camino algo diferente que será explicado en cada uno de los siguientes apartados.

### **5.1.1 Energía por usuario - Ancho de Banda ofrecido**

La primera de las simulaciones se trata de evaluar la energía consumida (W) por usuario, dependiendo del ancho de banda asignado a cada cliente y de la tecnología sobre la que se implementa una red FTTH.

El ancho de banda ofrecido a cada usuario conectado a la red varía entre 1 Mbps y 1000 Mbps. La diferencia principal entre las distintas tecnologías es el número máximo de usuarios a los que se les ofrece un determinado ancho de banda. Para el cálculo de esta comparación, se ha tomado un único chasis de cada tecnología, con todos los puertos siendo utilizados.

$$P_{\text{usuario}} = P_{\text{OLT\_max}} / M_{\text{usuarios}} + P_{\text{ONT}}$$

(3)

En la fórmula (3), se utiliza el valor máximo de cada chasis ofrecido por las empresas seleccionadas para cada tecnología, y se le añade el valor de consumo de la ONT para cada ancho de banda. En un análisis posterior, se mostrará el impacto que tiene el valor de energía consumido por las ONTs para distintos anchos de banda.

Para GPON, se vio que cada puerto tiene una capacidad de 2.5Gbps *downstream*, por lo que dependiendo de qué ancho de banda se ofrece a cada usuario, se utiliza un Split ratio u otro, lo que a su vez determinará el número de clientes.

En P2P, el número de usuarios se fija en el número máximo de puertos (384 y 192) del chasis CISCO seleccionado. Se usa una ONT hasta 100Mbps y posteriormente se cambia el modelo para soportar una capacidad mayor.

Para WDM-PON, el cambio a partir de 100Mbps es incluso algo notable ya la OLT escogida admite configuraciones tanto de 100Mbps como de 1000Mbps, pero el consumo aumenta bastante entre ambas opciones.

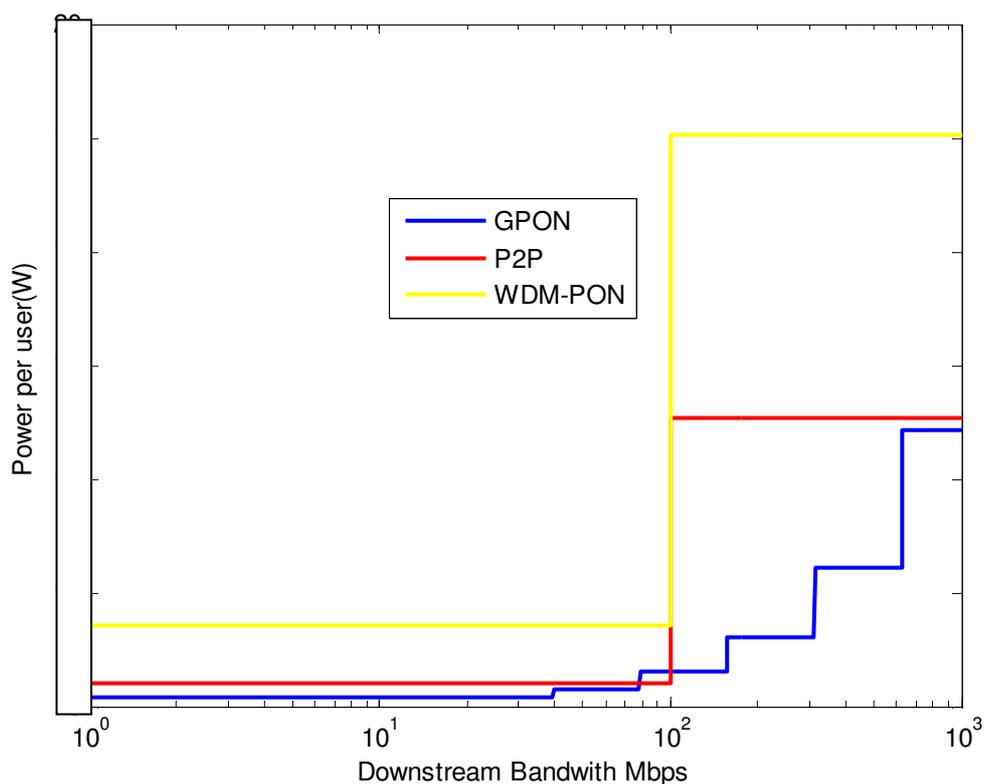


FIGURA 5-1 Consumo por usuario - ancho de banda ofrecido

La figura 5-1, muestra el consumo de energía por usuario, para las tres tecnologías presentadas. Se debe tener en cuenta, que en el escenario simulado, todos los

chasis se encuentran trabajando a máxima potencia, es decir, todos sus puertos están siendo utilizados. Además, en este análisis no se tiene en cuenta una posible sobredemanda de la red. Como se ha comentado anteriormente, la gran diferencia radica, en la cantidad de usuarios que se encuentran conectados por tecnología.

Para GPON, se observan cinco escalones, que corresponden a los diferentes Split ratios utilizados. Hasta 40 Mbps, es posible, suministrar servicio a un total de 9216 usuarios. Si cada usuario demanda 1 Gbps, sólo es posible, tener 288 usuarios por cada chasis MXK823.

Para P2P, existe un único escalón debido al cambio de equipamiento a partir de 100 Mbps. En ese momento, las tarjetas de red son sustituidas por otras con la mitad de puertos y por el cambio ya mencionado del modelo de ONT. El consumo inicial, es prácticamente equivalente a GPON, pero el número de clientes soportados es tan sólo de 384. Dónde esta tecnología se muestra más competitiva es a partir de una ancho de banda ofrecido muy grande. El consumo con 1 Gbps por cliente, se aproxima mucho al consumo para una red PON, aunque igualmente el número de usuarios sigue siendo inferior (192).

WDM-PON tiene un comportamiento óptimo hasta 100 Mbps, dónde se equipara con las otras dos tecnologías. A partir de ese momento, el consumo casi se duplica. El motivo principal es el alto consumo de la unidad óptica terminal.

En la simulación anterior hay una pequeña imprecisión que debe ser considerada. En el capítulo tres, ya se introdujo el concepto de *Oversubscription* (sobredemanda) en redes de acceso. Las empresas de telecomunicaciones, con utilización de los algoritmos DBA en redes GPON, ofrecen a los usuarios de la red en el sentido *Downstream*, anchos de banda superiores a la capacidad máxima ofrecida en los puertos PON. En el lado WAN de una red de acceso, la capacidad del *backhaul* es inferior al ancho de banda total ofrecido al otro lado de la OLT. En el capítulo anterior, en las presentaciones de cada tecnología, se especificó cuál era la máxima capacidad con el *backhaul* para cada chasis.

TABLA 5-1 CAPACIDAD ANCHO DE BANDA UP/DOWNSTREAM (OLT)

<i>TECNOLOGÍA</i>	<i>UPLINK/Gbps</i>	<i>Puertos/Down</i>	<i>Mbps/puerto</i>
<i>GPON</i>	<i>56</i>	<i>144</i>	<i>388.89</i>
<i>P2P</i>	<i>80</i>	<i>192</i>	<i>416.67</i>
<i>WDM-100</i>	<i>80</i>	<i>8</i>	<i>10000</i>
<i>WDM-1000</i>	<i>80</i>	<i>8</i>	<i>10000</i>

En la tabla 5-1, se detalla la capacidad de cada chasis con la conexión *Uplink*, y el ancho de banda real disponible en cada puerto de cada tecnología, si todos los puertos estuvieran siendo utilizados.

En GPON, la capacidad de las tarjetas de red *Uplink* es de 56 Gbps. Con esa velocidad de datos, en una situación dónde se encuentran todos los puertos conectados simultáneamente, el límite por puerto PON, es aproximadamente de 388 Mbps en vez de los 2.5 Gbps propios de la tecnología. En la tecnología P2P sucede algo parecido, la capacidad máxima de los dispositivos **Supervisor Engine 7** de CISCO es de 80 Gbps, por lo que no es posible tener 192 usuarios conectados simultáneamente con un ancho de banda por usuario, superior a 416 Mbps.

Lo que se ha realizado en esta simulación, es limitar el ancho de banda a la tecnología más restrictiva que este caso será una arquitectura sobre WDM-PON, dónde habrá 80 Gbps disponibles para 256 usuarios (Algo más de 300Mbps por usuario).

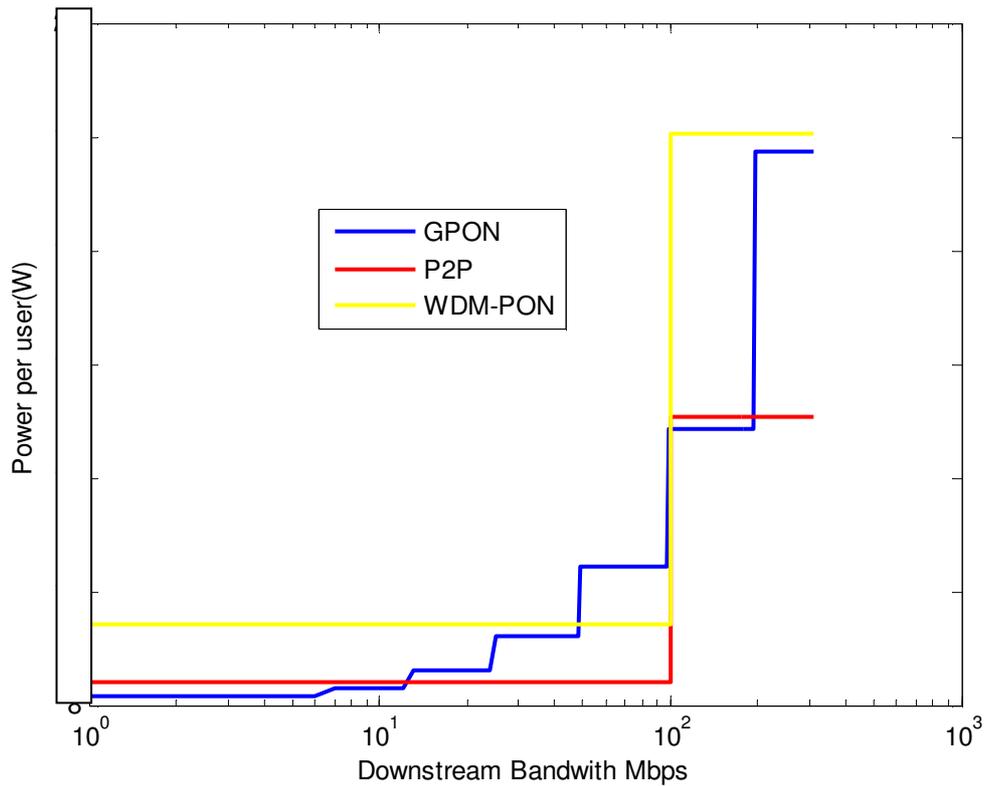


FIGURA 5-2 Consumo por usuario - ancho de banda ofrecido II

En la figura 5-2 se trata del mismo escenario que la figura 5-1 pero con la limitación mencionada. La única variación, sobre la anterior comparación, es que los cambios en los divisores ópticos de la red GPON, son necesarios antes para proporcionar el ancho de banda requerido. La capacidad del chasis de **MXK823** limita mucho la tecnología GPON, ya que a partir de 200 Mbps, sólo es capaz de dar servicio a un usuario por puerto, es decir, un total de 144 usuarios conectados simultáneamente. Por otro lado, la red P2P da servicio a 192 usuarios y el consumo por usuario es casi 5 W menor.

En el capítulo anterior, se detalló que el modelo ONT ofrecido por CISCO tenía un consumo excesivo y fue sustituido por soluciones más eficientes de la empresa GENEXIS. A partir de los valores de consumo de energía por usuario, calculados para el escenario dónde no se tenía en cuenta la capacidad del *backhaul* (ver figura

5-1), se mostrará a continuación, el porcentaje de consumo de cada elemento (OLT, ONT), sobre el consumo total en cada una de las arquitecturas presentadas. El objetivo de las siguientes figuras, es mostrar que el consumo de la ONT es el factor más determinante en una red de acceso sobre fibra óptica. Se pretende demostrar que la aplicación de los mecanismos de ahorro de energía descritos en el capítulo tres es fundamental en redes PON.

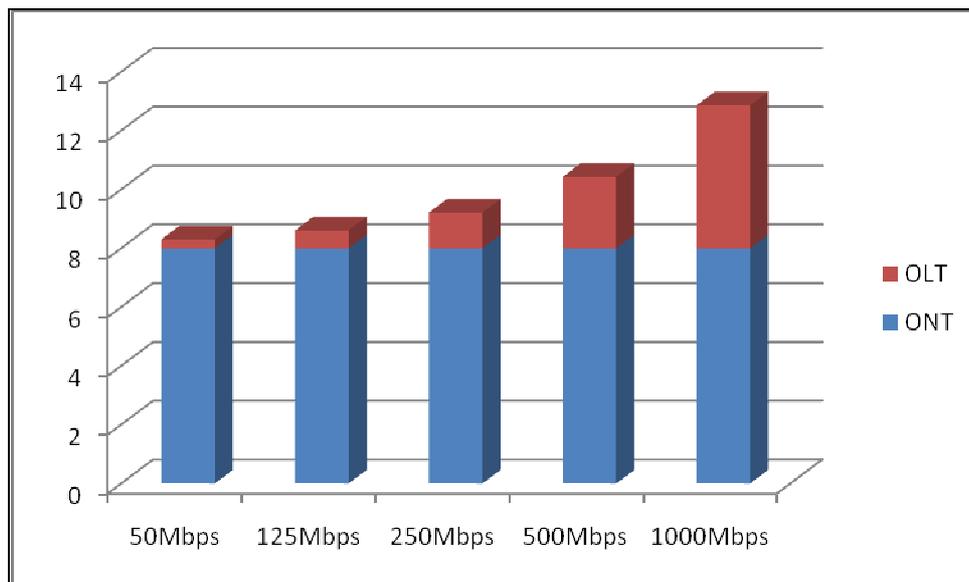


FIGURA 5-3 Consumo GPON OLT/ONT

En la figura 5-3, se muestra el consumo de cada unidad óptica para GPON obtenido de la simulación sin tener en cuenta el *backhaul*. En la figura 5-4, se detalla el porcentaje de cada elemento sobre el total de energía consumida. El factor ONT es más determinante cuanto mayor es el número de usuarios que comparten la OLT, es decir, al principio.

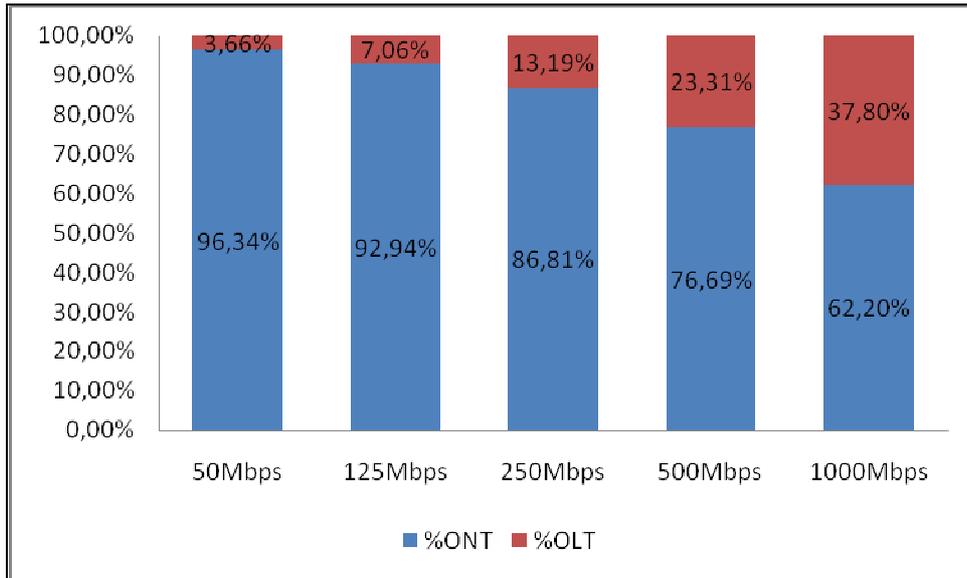


FIGURA 5-4 Porcentaje del consumo total GPON OLT/ONT

En una arquitectura P2P, todo el equipo situado en la oficina central es compartido por muchos menos usuarios que en GPON, y por otro lado, los valores de consumo de las ONT (4,3W hasta 100Mbps y 5,3W a partir de 100Mbps), son hasta casi 4 W inferior respecto a GPON. Esto hace, que el factor de energía de la ONT sobre el consumo total, sea menos determinate que para la tecnología anterior (figura 5-5).

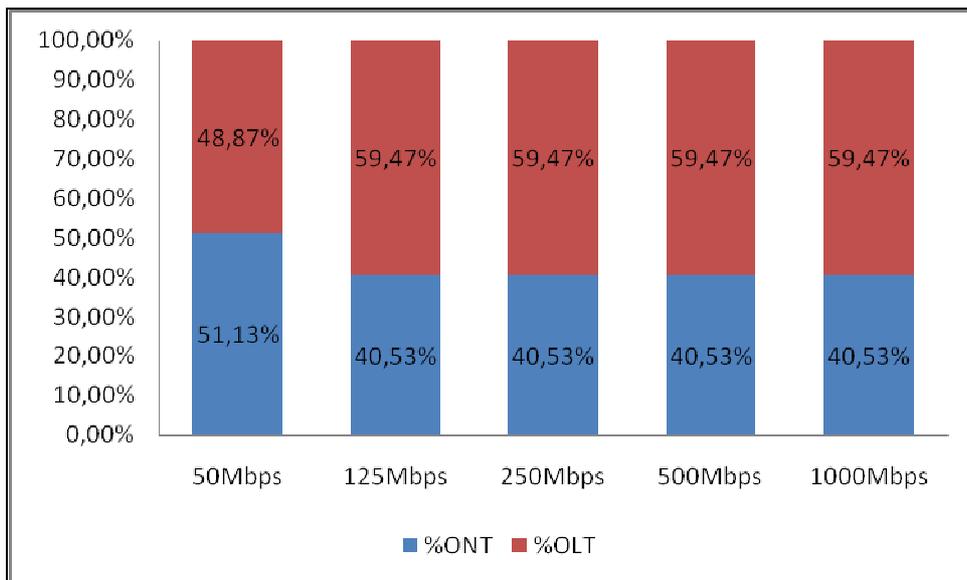


FIGURA 5-5 Porcentaje del consumo total P2P OLT/ONT

Para WDM-PON, el resultado mostrado en la figura 5-6 resulta intermedio entre las anteriores tecnologías. Esto es debido a que, al igual que para P2P, el chasis se comparte con pocos usuarios, pero por otro lado, el consumo de la ONT a partir de 100 Mbps es de XX.XX W. Esto supone que, por ejemplo, para 1 Gbps por usuario, el porcentaje del consumo de la ONT sobre el total es del 66%, y sea el más alto entre todas las tecnologías.

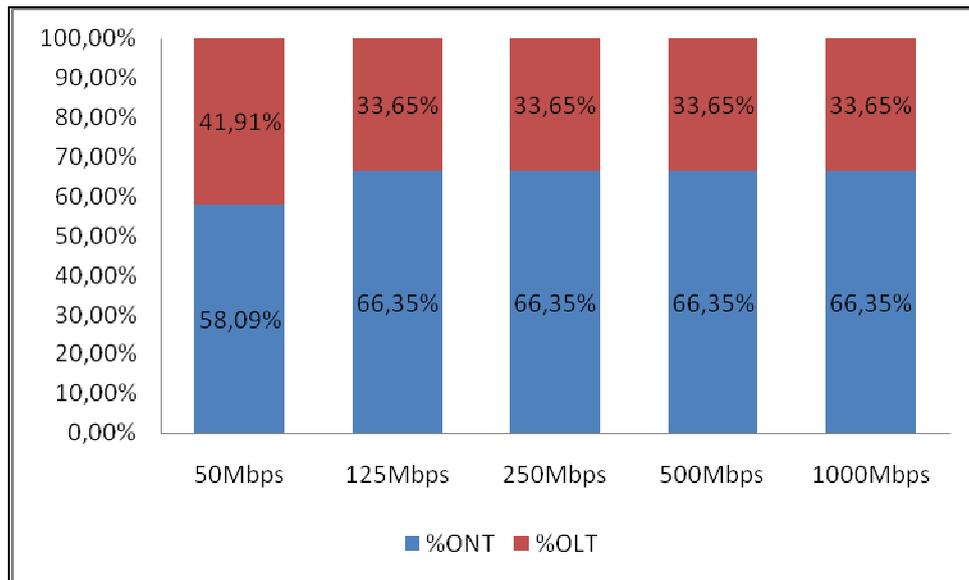


FIGURA 5-6 Porcentaje del consumo total WDM-PON OLT/ONT

### 5.1.2 Energía por usuario – Número de usuarios

En esta segunda comparación, se calcula el consumo por usuario fijando el ancho de banda ofrecido a cada usuario en la máxima cantidad de información que se transmite por un puerto P2P del chasis de CISCO, es decir, 1 Gbps. Este ancho de banda elegido, pretende conseguir una comparación lo más equilibrada posible entre todas las tecnologías. Hoy en día, probablemente, nadie necesita en el hogar un ancho de banda tan grande para soportar todos los servicios contratados. Pero, como se ha visto anteriormente, en un futuro no muy lejano nos acercaremos a ese ancho de banda por usuario.

Se ha realizado un muestreo sobre 1000 usuarios, de las tres tecnologías estudiadas. Para GPON, se ha calculado el consumo por usuario, para una red PON actual, con un ancho de banda aproximado de 80 Mbps y para una red PON futura con un ancho de banda por usuario algo superior a 1 Gbps. Cada puerto del chasis **MXK823** (GPON), es compartido por 32 usuarios en el primer escenario y para el segundo caso, tan solo por 2. En el resto de tecnologías, cada nuevo usuario utiliza un nuevo puerto. Para WDM-PON se han realizado dos simulaciones diferentes, una hasta 100 Mbps y otra para 1 Gbps.

Al principio de este capítulo, se mostró el camino seguido para calcular el consumo de energía por usuario. Para esta simulación, cada usuario nuevo, utiliza nuevos recursos y el cálculo de la energía consumida no es constante. Se ha utilizado la fórmula (4), donde siempre se toma el valor máximo de consumo de la OLT y se restan los elementos no conectados.

$$P_{\text{usuario}} = (P_{\text{OLTmax}} - P_{\text{OLTcard}} * \# \text{OLTcards}_{\text{no usadas}} - P_{\text{SFP}} * \# \text{SFP}_{\text{no usados}}) / M_{\text{usuarios}} + P_{\text{ONT}}$$

(4)

Se tiene en cuenta además, que en GPON, para este ancho de banda, un transceptor SFP es compartido por más de un usuario. En caso de una red P2P, se aumentan progresivamente el número de transceptores. Según el diseño del sistema de LG-Ericsson, no es posible aislar el consumo de cada transmisor y por tanto el consumo viene dado por el valor de la tarjeta de red.

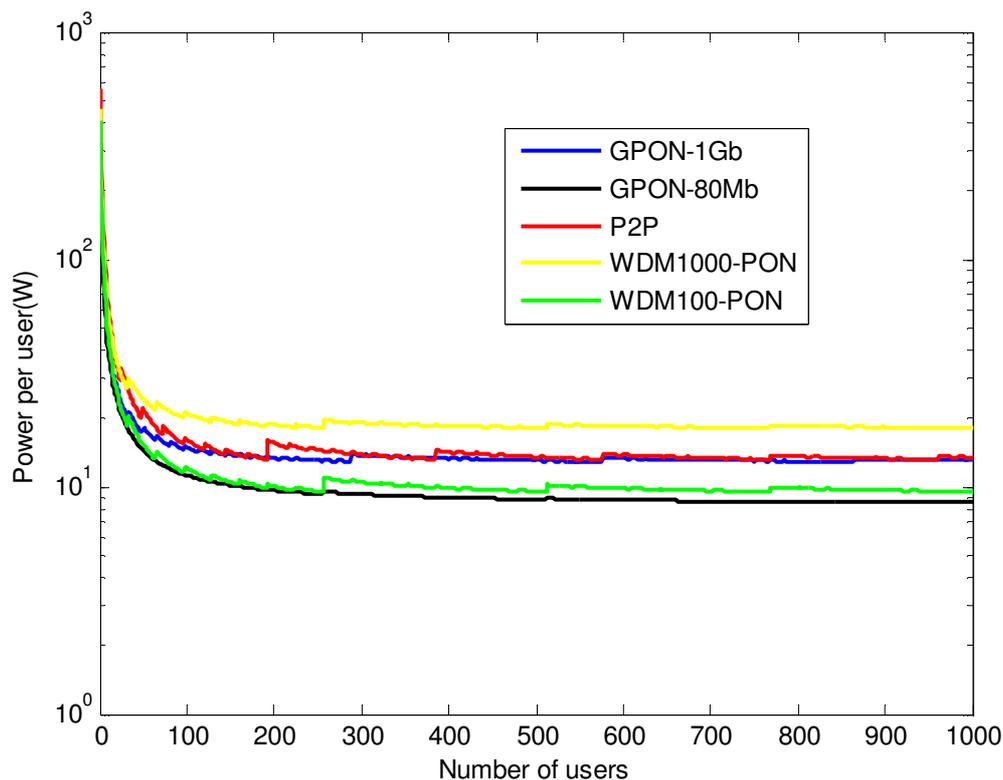


FIGURA 5-7 Consumo por usuario – Número de usuarios

En la figura 5-7 se muestran los resultados obtenidos para las tres tecnologías. Se puede apreciar para cada tecnología pequeños escalones al principio que corresponden a la inserción de nuevas tarjetas de red. Estos escalones son cada vez menos apreciables, cuanto mayor es el número de clientes usando una determinada tecnología. Además, se pueden apreciar escalones algo más pronunciados cada vez que se necesita el uso de un nuevo chasis para cada tecnología. Por ejemplo, se aprecia este escalón a partir de 192 usuarios en P2P y 288 usuarios en GPON para 1 Gbps por usuario.

Es importante, escoger una muestra del número de clientes lo suficientemente grande, para obtener valores de consumo estables. En la tabla 5-2 se ofrece el consumo para cada tecnología para un total de 100 usuarios y 1000 usuarios dónde el consumo por usuario es más constante.

TABLA 5-2 Energía por usuario

<i>Tecnología</i>	<i>Energía hasta 100 usuarios</i>	<i>Energía hasta 1000 usuarios</i>
<i>GPON 80Mbps</i>	<i>11,244 W</i>	<i>8,518 W</i>
<i>WDM 100Mbps</i>		
<i>P2P 1Gbps</i>	<i>16,173 W</i>	<i>13,468 W</i>
<i>GPON 1Gbps</i>	<i>15,001 W</i>	<i>13,024 W</i>
<i>WDM 1Gbps</i>		

En la anterior figura no se tiene en cuenta el ancho de banda disponible con la red *Uplink*. De manera parecida a lo que se hizo en el apartado anterior, se ha intentado equilibrar las tecnologías, dependiendo de la capacidad de las tarjetas de red utilizadas.

Previamente, en el apartado 5.1.1, se mostró la tabla 5-1 que detallaba el máximo ancho de banda disponible en cada puerto. En esta ocasión, para equilibrar las tecnologías, se han igualado los ratios (Ancho de Banda Up/ Ancho de Banda Down) de todas ellas (Ver Tabla 5-3). Para WDM-PON sobre longitudes de onda de 100Mbps, la capacidad con el *backhaul*, es superior al máximo posible en sentido *Downstream* y por tanto no hay problema.

TABLA 5-3 Arquitectura teniendo en cuenta el *Backhaul*

<i>TECNOLOGÍA</i>	<i>UPLINK Gbps</i>	<i>DOWNLINK Gbps</i>	<i>Ratio</i>	<i>Tarjetas Red</i>	<i>Puertos/c hasis</i>
<i>GPON</i>	<i>56</i>	<i>90</i>	<i>0.6222</i>	<i>5 MXK-GPONX4-IO 2 MXK-GPONX8-IO</i>	<i>36</i>
<i>P2P</i>	<i>80</i>	<i>132</i>	<i>0.6061</i>	<i>3 WS-X4624-SFP-E 5 WS-X4612-SFP-E</i>	<i>132</i>
<i>WDM-100</i>	<i>80</i>	<i>25.6</i>	<i>Ok</i>	<i>8</i>	<i>8</i>
<i>WDM-1000</i>	<i>80</i>	<i>128</i>	<i>0.6250</i>	<i>4</i>	<i>4</i>

Para cumplir los ratios mostrados en la tabla 5-3, hay que modificar las arquitecturas del escenario anterior. En GPON, sólo podrá haber 90 Gbps disponibles, y teniendo en cuenta que cada puerto tiene una capacidad de 2.5

Gbps, serán necesarios 36 puertos PON. Se ha sustituido el chasis **MXK823** por el **MXK319**, que también aparece en la tabla 4-1. Este último dispone de 7 slots para las tarjetas de red. Utilizando 5 tarjetas **MXK-GPONX4-IO** y 2 tarjetas **MXK-GPONX8-IO**, se consiguen los 36 puertos necesarios para GPON.

Para P2P, se conserva el mismo chasis pero se han utilizado únicamente 3 tarjetas del modelo **WS-X4624-SFP-E** usado anteriormente y 5 tarjetas de un modelo similar pero con la mitad de puertos, **WS-X4612-SFP-E**. Es necesario reducir a la mitad, el número de usuarios máximos por chasis para la opción de 1000 Mbps sobre WDM-PON. Simplemente, se utiliza el mismo chasis pero limitando, a tan solo 4 tarjetas de red insertadas en vez de 8.

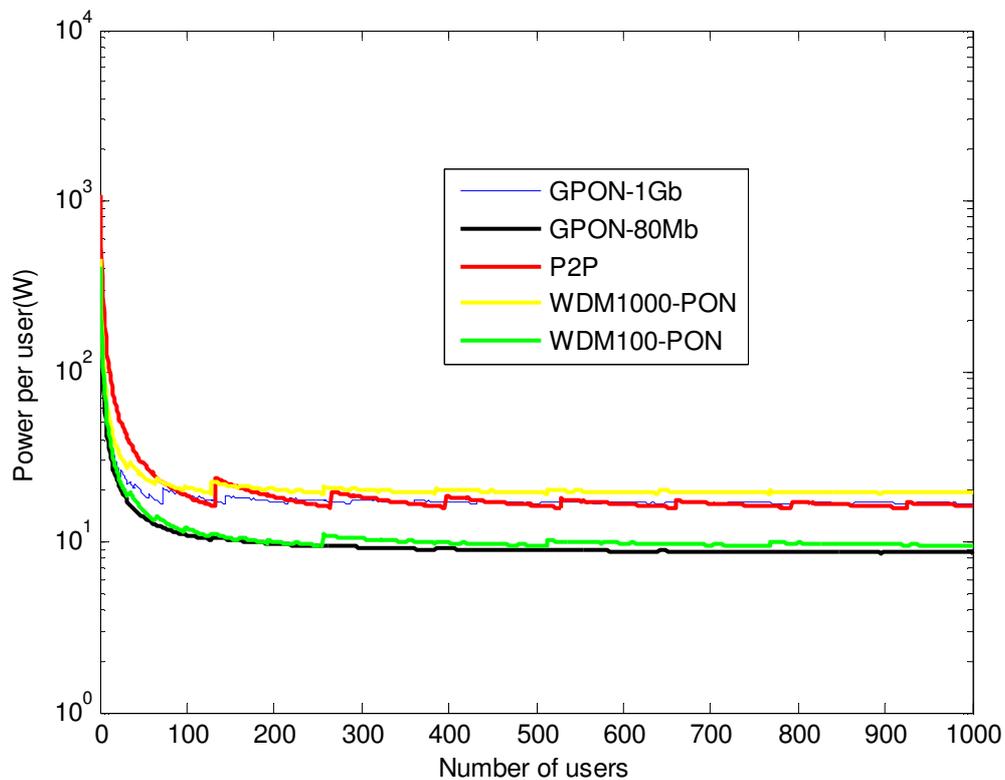


FIGURA 5-8 Consumo por usuario – Número de usuarios II

La figura 5-8, muestra los nuevos resultados sobre el consumo de energía por usuario, en un escenario hasta 1000 clientes y teniendo en cuenta que las

tecnologías han sido modificadas para adaptarse al ancho de banda disponible en el *backhaul*. Observando las tablas 5-3 y 5-4, se observa, que la tecnología WDM-PON, se equipara mucho más con las tecnologías P2P y GPON para velocidades de 1Gbps.

TABLA 5-4 Energía por usuario teniendo en cuenta el *Backhaul*

<i>Tecnología</i>	<i>Energía hasta 100 usuarios</i>	<i>Energía hasta 1000 usuarios</i>
<i>GPON 80Mbps</i>	<i>10,994 W</i>	<i>8,621 W</i>
<i>WDM 100Mbps</i>		
<i>P2P 1Gbps</i>	<i>18,718 W</i>	<i>16,317 W</i>
<i>GPON 1Gbps</i>	<i>18,794 W</i>	<i>16,811 W</i>
<i>WDM 1Gbps</i>		

## **5.2 PON Tradicional vs PON Escalable**

En el capítulo 2 (apartado 2.1.3) se introdujo la posibilidad, en un futuro, de integrar dentro del nodo de red central dispositivos destinados a redes P2P, cómo dispositivos GPON. Se intenta mostrar la opción de colocar los Splitters de una red PON dentro de la oficina central, que facilitaría el cambio de tecnología y servicios contratados, y evitaría las limitaciones surgidas por factores como el *Take Rate*. Mediante la comparación de un escenario dónde la tasa de ocupación de la red juega un papel importante, con un escenario equivalente, al visto en el apartado anterior, dónde se obvia el *Take Rate*, se cuantificará y analizará la posible mejora de la escalabilidad de las redes PON.

### **5.2.1 Take Rate**

El *Take Rate* o tasa de ocupación, se refiere al porcentaje de clientes conectados a la red PON, que han de utilizar los recursos (tarjetas y transceptores) de la OLT. Se

ha visto que las redes PON pueden dar servicio a 64 usuarios por puerto PON, pero no siempre se puede desplegar fibra óptica hasta el hogar para todos ellos. A veces, se utilizan dos etapas de Split, y un factor, como es la distancia entre la OLT y el nodo del cliente juega un papel importante en el despliegue de una red PON. Es importante estimar el número de clientes que contratarán los servicios ofrecidos, para evitar costes innecesarios. Si se trata un escenario de población dónde el *Take Rate* es del 30%, sólo unos 18 clientes aproximadamente serían servidos por puerto PON, lo que conllevaría utilizar recursos de más y un aumento del consumo. Normalmente, en un escenario real, 2 o 3 compañías se reparten la implantación de redes PON de los usuarios de una ciudad. Por tanto, es interesante analizar que comportamiento tiene cada tecnología para una tasa de ocupación entre el 30% y el 50%.

En el siguiente apartado, veremos con un ejemplo comparativo, cómo afecta la tasa de ocupación de la red al consumo de energía de una red PON.

### **5.2.2 Red PON tradicional**

En este apartado se muestran resultados tanto del número de tarjetas OLT necesarias dependiendo del *Take Rate*, como del consumo de energía por usuario teniendo en cuenta la tasa de ocupación de una red PON tradicional (figura 2-1) .

Primeramente se ha seleccionado un escenario sobre 2048 posibles clientes, dónde se calcula el número de tarjetas OLT necesarias para todas las tecnologías para un determinado *Take Rate*. El escenario de número de usuarios, ha sido elegido con el objetivo que fuese múltiplo de los posibles Split ratios en un red GPON, para conseguir un número de entero de tarjetas de red. Se han simulado las tres tecnologías, usando la arquitectura utilizada en los primeros dos apartados, es decir, con los chasis que permiten una configuración máxima en cuanto al número de usuarios.

Para GPON se calcula el valor de *Take Rate*, en el caso más desfavorable, es decir, dónde por cada puerto PON hay un único usuario conectado y ocho clientes por cada tarjeta OLT.

En WDM-PON, se procede de manera idéntica pero debido a que cada tarjeta sólo dispone de un puerto, se necesitarán más tarjetas.

En una arquitectura P2P, cada nuevo usuario utiliza un nuevo puerto del chasis CISCO y no se inserta una tarjeta OLT nueva hasta que la anterior se complete. Por lo que, una red punto a punto no se ve afectada por este factor.

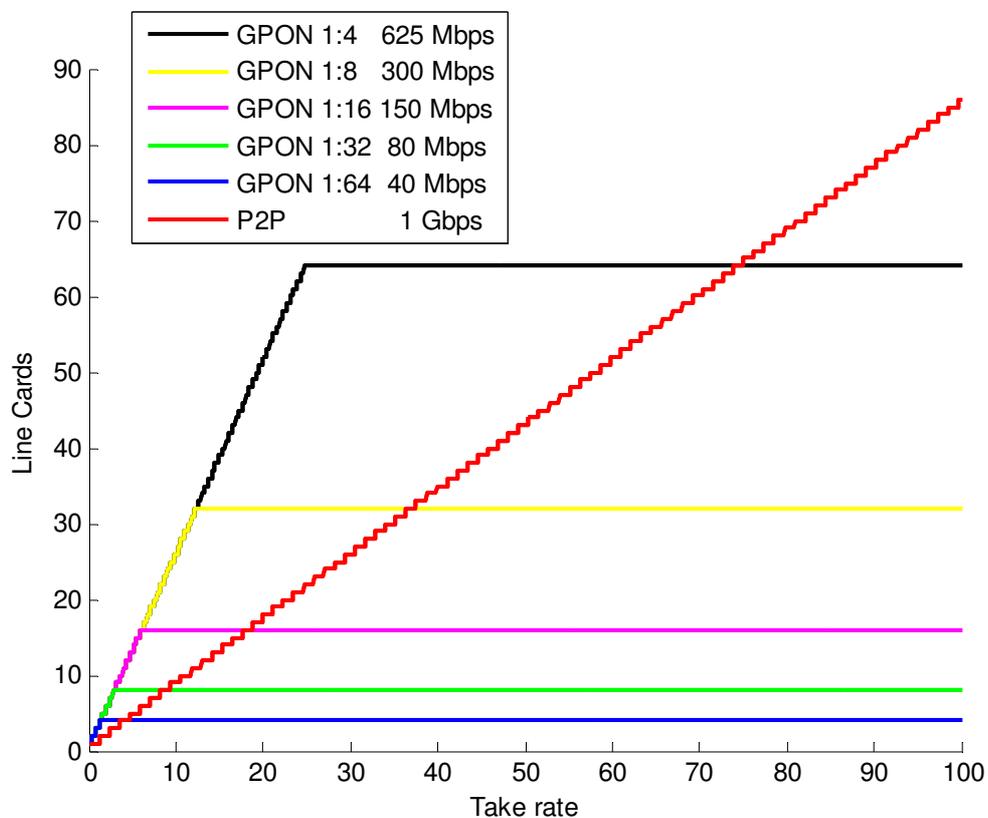


FIGURA 5-9 Número de tarjetas de red GPON según Split Ratio versus PTP

En la figura 5-9, se muestra el número de tarjetas de red necesarias en la OLT para distintos Split Ratios de una red GPON. Para cada caso de GPON, se puede observar el momento dónde todos los puertos se encuentran ocupados, a partir del cual, cada nuevo usuario no implica un aumento del consumo energético.

También se puede ver cómo, en la tecnología P2P, las tarjetas de red aumentan uniformemente según aumentan el número de clientes.

Una tasa de ocupación en torno al 30% es una situación de mercado competitivo, dónde varias empresas se reparten el número de clientes, mientras si el *take rate* se aproxima al 80%, corresponde a una situación de monopolio.

Una vez obtenido el número máximo de tarjetas OLT necesarias, se ha calculado el consumo por usuario para la tasa de ocupación de la red. El método seguido en esta simulación se divide en dos partes para GPON, WDM-PON y en ambas se utiliza la fórmula (4) anteriormente descrita. La primera parte obtiene el consumo por cliente hasta alcanzar el caso más desfavorable, dónde todas las tarjetas OLT se encuentran conectadas al chasis. La segunda parte, calcula el consumo, solamente teniendo en cuenta cada usuario nuevo conectado. Para P2P, el consumo por usuario se obtiene utilizando la fórmula (4) para todo el dominio del *Take Rate*.

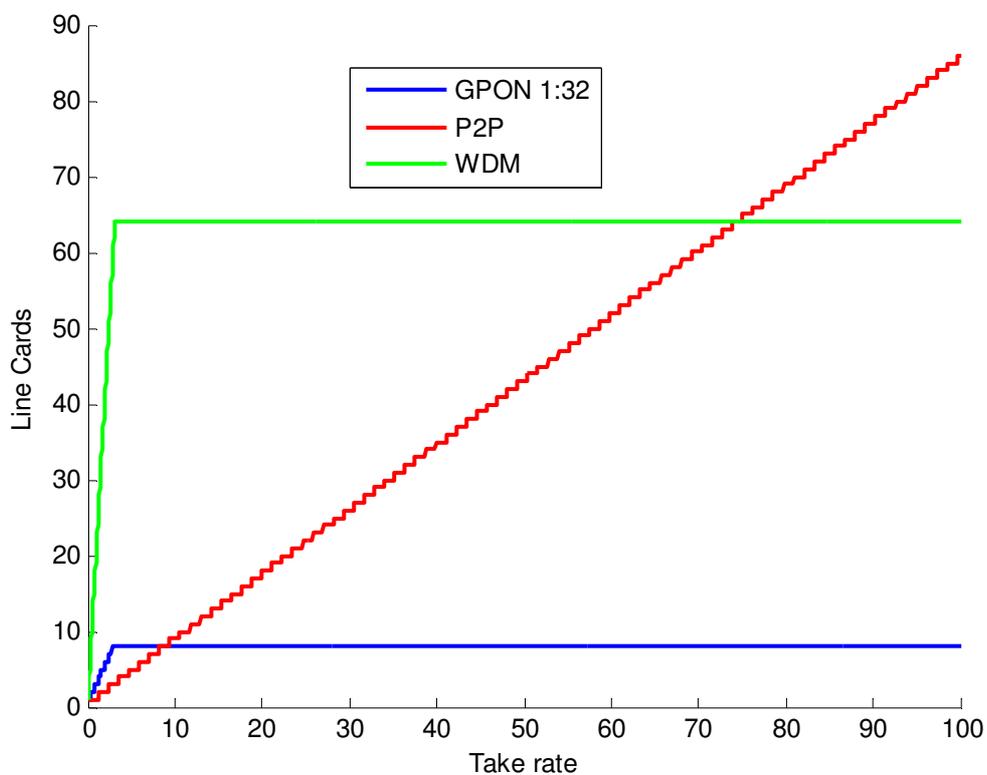


FIGURA 5-10 Número de tarjetas de red GPON 1:32 /P2P/WDM

La figura 5-10 contrasta las limitaciones de cada una de las tres tecnologías estudiadas. Para un Split ratio de 1:32, serán necesarias ocho tarjetas de red, que serán instaladas con los primeros 128 clientes (6.25% de tasa de ocupación). Como se ha comentado antes, cada usuario nuevo implica una nueva tarjeta de red para WDM-PON, y como se observa en la figura, las 64 tarjetas necesarias son alcanzadas para los primeros 64 usuarios (3% aproximadamente).

En la figura 5-11 se muestra el consumo por usuario para las tres tecnologías distinguiendo las dos opciones posibles para WDM. Es interesante comparar por un lado, tecnologías que ofrecen 1 Gps (P2P, WDM-1000) y por otro lado tecnologías ofreciendo un ancho de banda por usuario en torno a 100 Mbps (GPON 1:32, WDM-100).

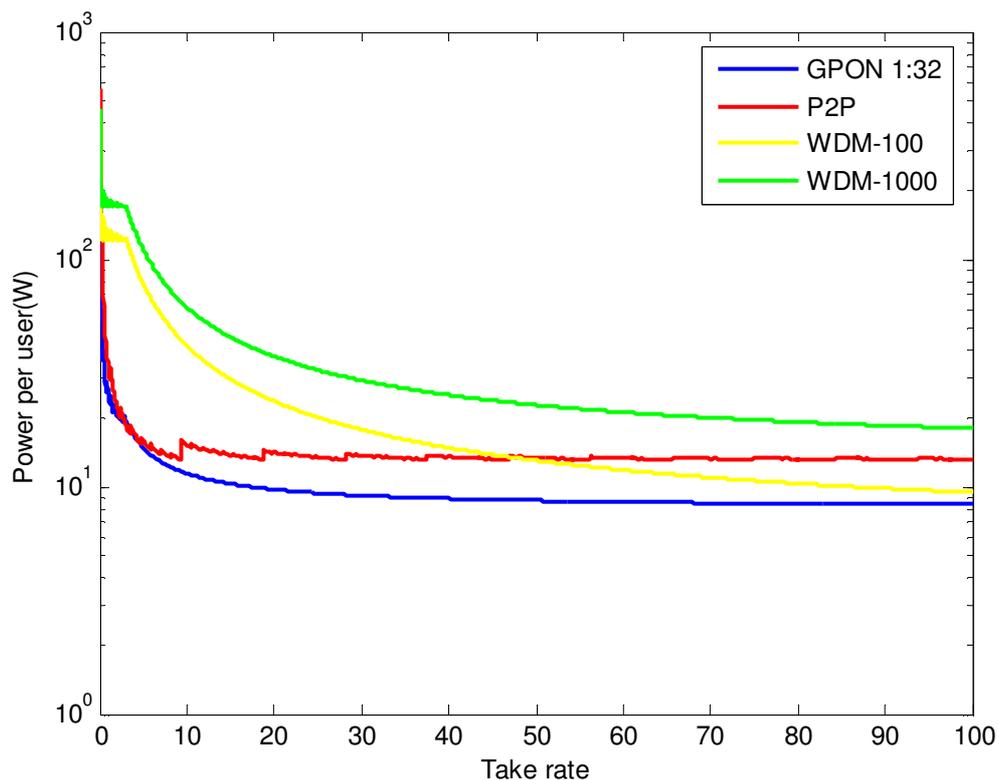


FIGURA 5-11 Consumo por usuario – Take Rate GPON 1:32

En la figura se pueden apreciar dos partes diferenciadas para las tres tecnologías PON. En la primera, se observa una irregularidad, correspondiente a la utilización de nuevas tarjetas de red, hasta alcanzar el máximo número de tarjetas necesarias calculado previamente. A partir de ese momento, el consumo por usuario desciende progresivamente con el *Take Rate*. En P2P, el consumo por usuario es idéntico al apreciado en la figura 5-7 y se mantiene constante durante todo el dominio, pudiéndose observar los momentos dónde se insertan nuevas tarjetas de red y nuevos chasis.

El consumo por usuario en GPON es inferior a la tecnología WDM para 100 Mbps, aunque también el ancho de banda por cliente ofrecido, se sitúa en torno a los 80 Mbps. Para las opciones de 1 Gbps por usuario, el consumo para la tecnología P2P es claramente inferior, debido a que el factor de la tasa de ocupación afecta únicamente a tecnologías PON.

Para una Split ratio en GPON de 1:8, serán necesarias el cuádruple número de tarjetas en el chasis **MXK823** (Ver figura 5-9), con lo que el consumo se incrementará considerablemente. En la figura 5-12, se observa el cambio del consumo por usuario para la tecnología GPON. En el resto de tecnologías no hay cambios debido a que sólo se ha modificado el Split ratio.

Se aprecia que en torno al 30% de tasa de ocupación, los consumos entre P2P y GPON, son más similares que en la simulación anterior, ofreciendo un ancho de banda de 1 Gbps y 300 Mbps respectivamente.

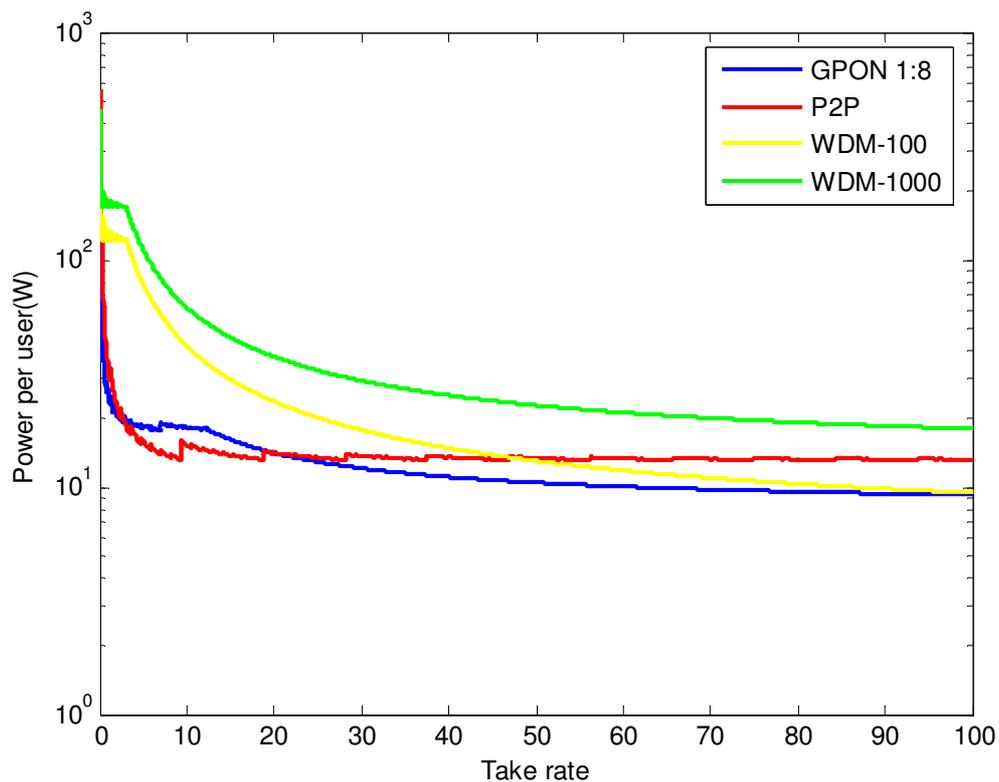


FIGURA 5-12 Consumo por usuario – *Take Rate* GPON 1:8

Al igual que en apartados anteriores, en las dos simulaciones realizadas para el consumo por usuario según el *Take Rate*, no se ha tenido en cuenta el ancho de banda disponible con la red *Uplink*, desde la oficina central. Por tanto, se ha limitado de nuevo el ancho de banda disponible para todos los usuarios utilizando los valores mostrados en la tabla 5-3 (apartado 5.1.2).

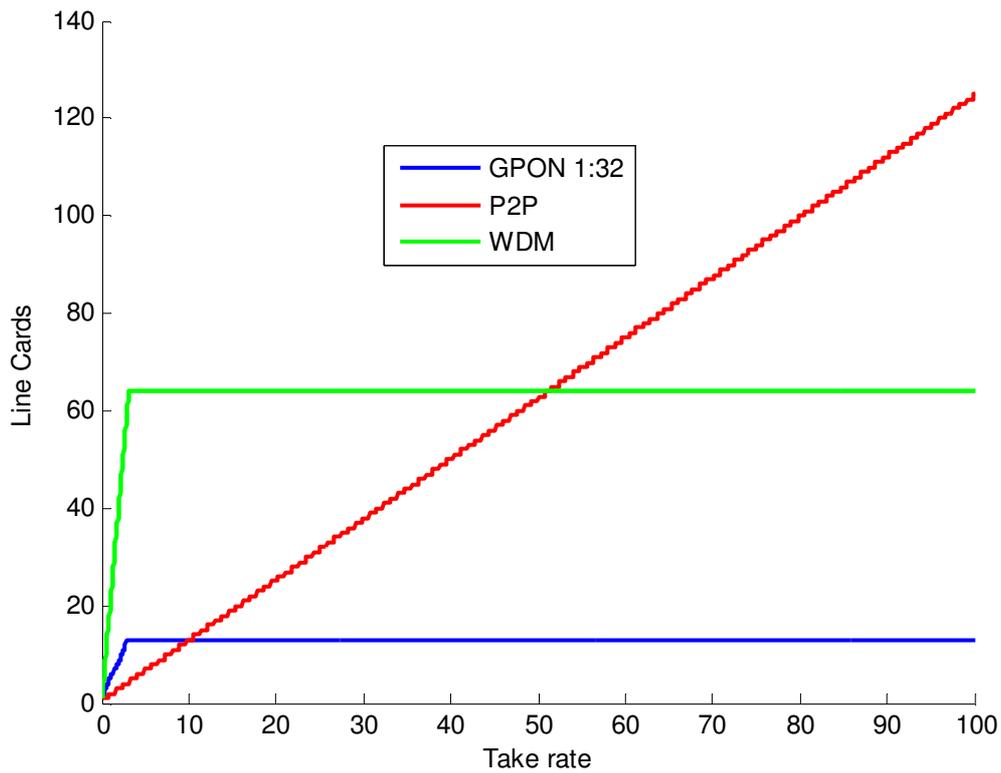


FIGURA 5-13 Número de tarjetas de red GPON 1:32 /P2P/WDM teniendo en cuenta *Uplink*

La figura 5-13 muestra el número de tarjetas de red necesarias con las limitaciones aplicadas para un Split ratio en GPON de 1:32. En comparación con la figura 5-9, se aprecia claramente un aumento del número de tarjetas necesarias en GPON y P2P para dar servicio a los 2048 usuarios. La limitación del ancho de banda para WDM sobre 1000 Gbps, no supone un aumento de tarjetas de red, en cambio, en la figura 5-14, sí que se puede observar un incremento en el consumo por usuario respecto a la anterior simulación (figura 5-10).

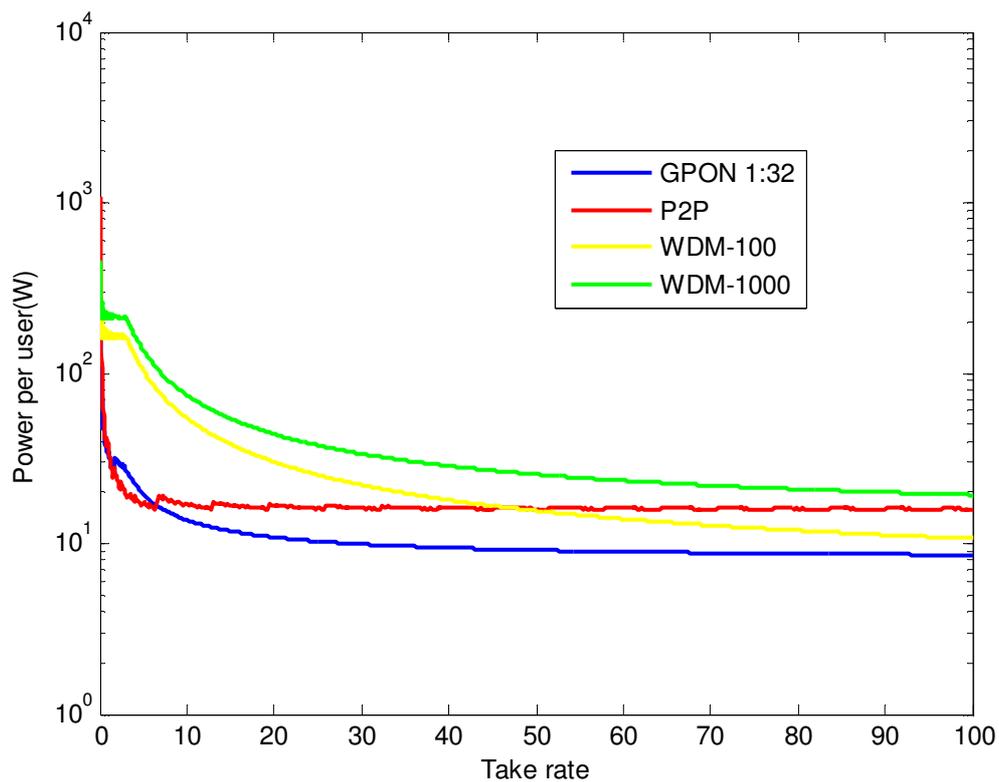


FIGURA 5-14 Consumo por usuario – *Take Rate* GPON 1:32 teniendo en cuenta *Uplink*

Por último, se ha vuelto a simular, el mismo escenario, con las limitaciones de ancho de banda, descritas anteriormente y cambiando el Split ratio a 1:8. En la figura 5-15 es aún más visible, el hecho comentando anteriormente, en torno al 30% de tasa de ocupación, el consumo por usuario en una tecnología P2P y GPON es equivalente.

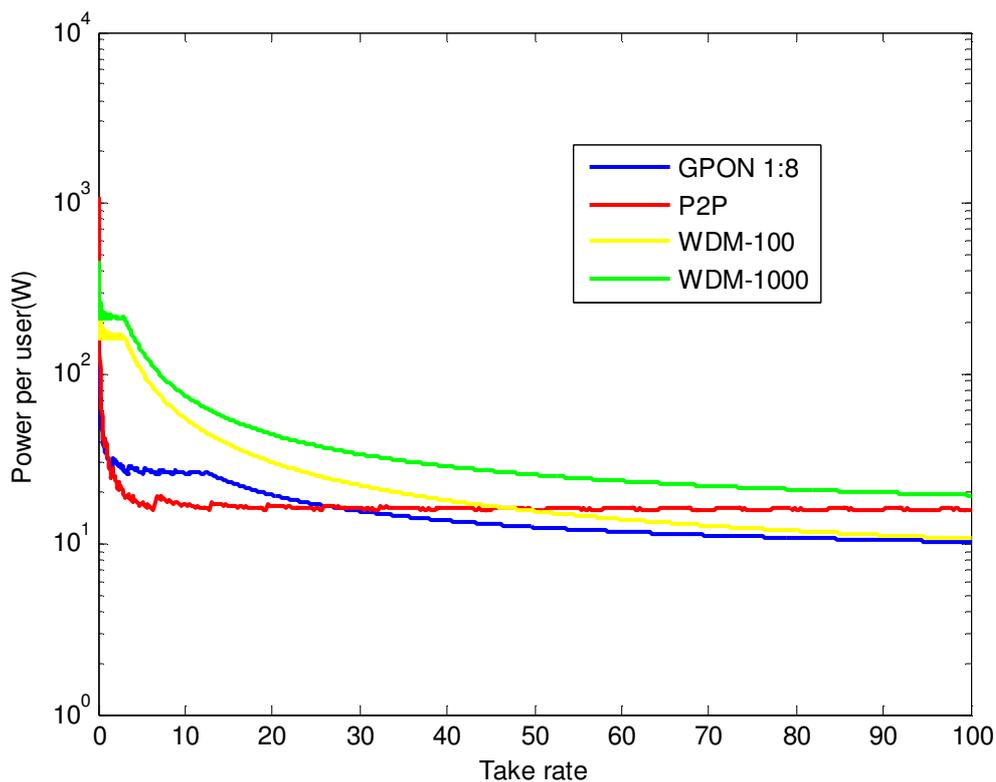


FIGURA 5-15 Consumo por usuario – *Take Rate* GPON 1:8 teniendo en cuenta *Uplink*

### 5.2.3 Red PON escalable

En este último apartado se muestran las ventajas que se conseguirían con la mejora de la escalabilidad de las redes PON, en el mismo escenario simulado anteriormente para una red PON tradicional. Así, tomando como modelo de referencia la figura 2-3, cada nuevo usuario de las diferentes tecnologías utilizaría un interfaz sobre fibra óptica disponible.

Por tanto, se ha calculado el número de tarjetas OLT necesarias para darles servicio, así como, el consumo por usuario para cada tecnología. Al tener, la red de distribución óptica (ODN) de la red PON, dentro de la oficina central, se consigue una alta eficiencia de las redes PON, y por tanto, no se malgastan recursos.

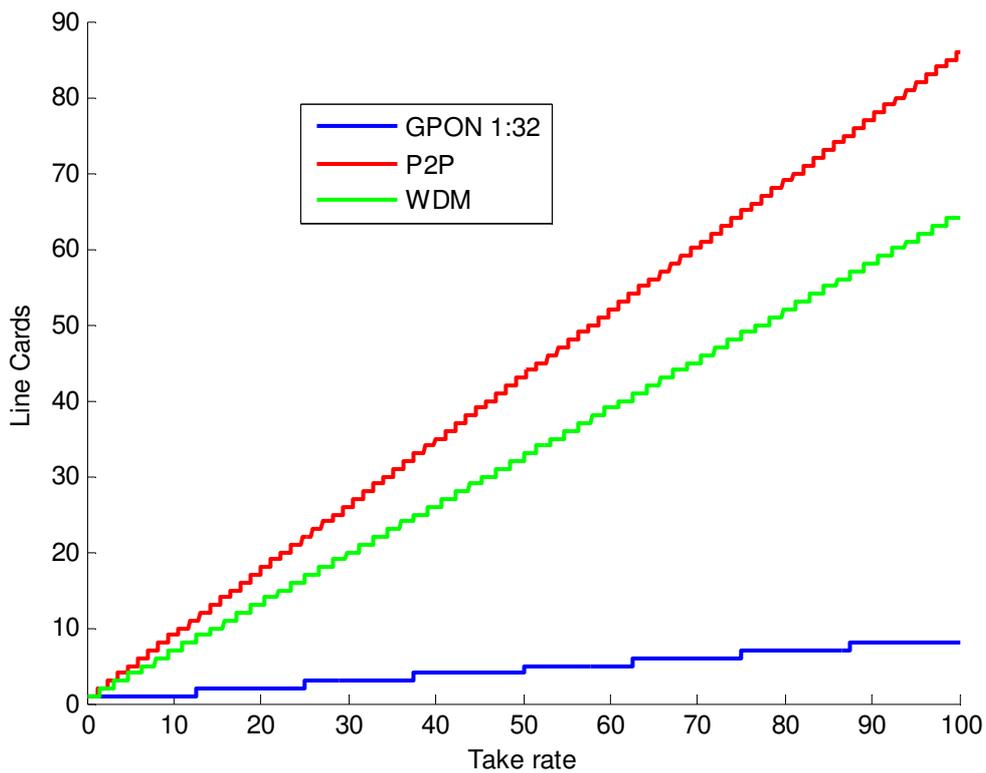


FIGURA 5-16 Escalabilidad - Número de tarjetas de red GPON 1:32 /P2P/WDM

La figura 5-16, muestra la progresión constante del número tarjetas de red necesarias para las tres tecnologías, según el número de usuarios que se van adhiriendo a la red. La cantidad de tarjetas instaladas en cada chasis será el mismo que para el caso de la figura 5-10, pero el diseño de la arquitectura, con la mejora de la escalabilidad, mejorará considerablemente la eficiencia energética de la red.

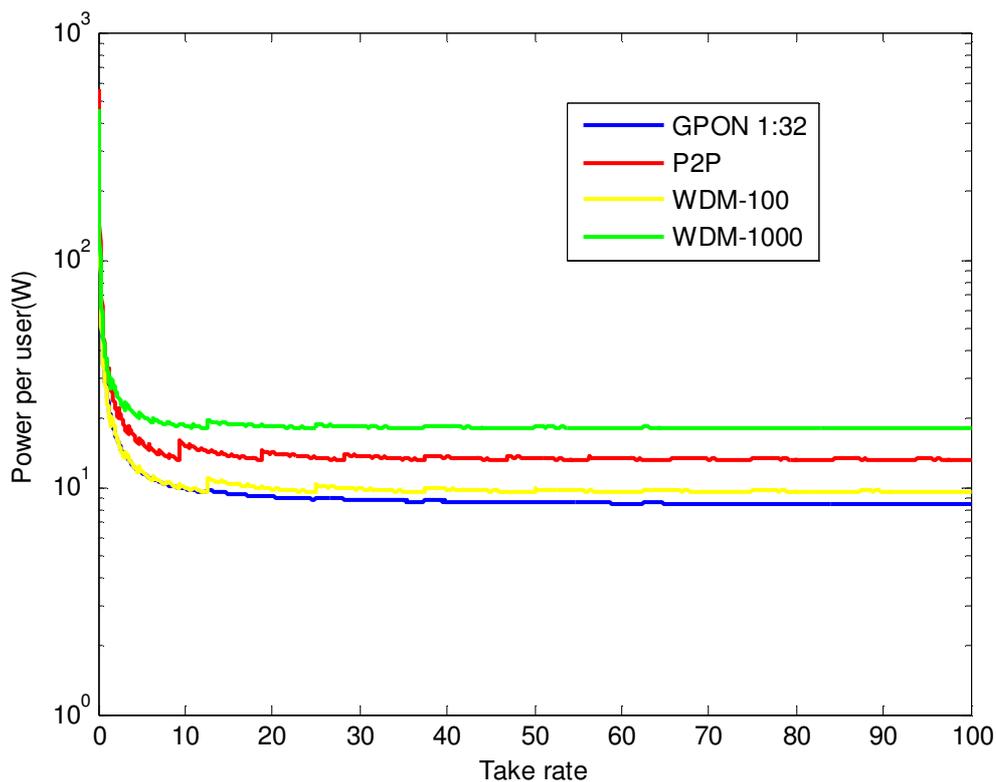
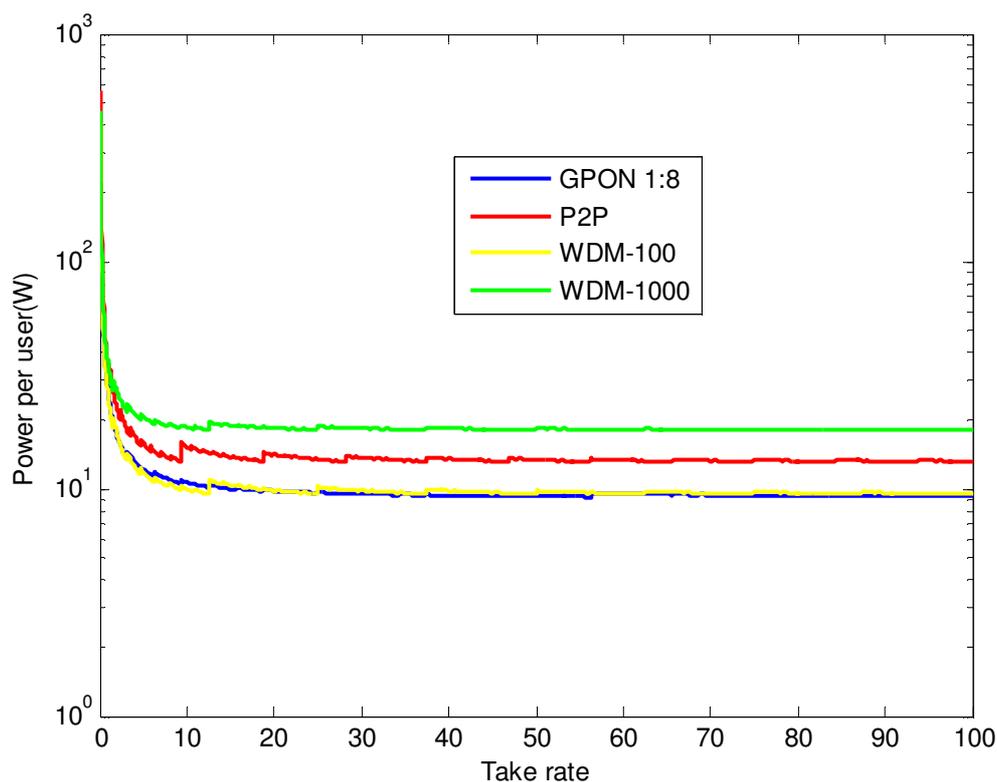


FIGURA 5-17 Escalabilidad - Consumo por usuario – *Take Rate* GPON 1:32

La figura 5-17 muestra la mejora del consumo de energía por usuario si se compara con la simulación previa del *Take Rate* sin la mejora por la escalabilidad (figura 5-11).

Por último, es interesante observar la mejora con la escalabilidad de una red sobre GPON para un Split ratio inferior (1:8). En la figura 5-18, sólo existe un pequeño cambio en el consumo por usuario para GPON, ya que, obviamente, la red es compartida por la cuarta parte de usuarios.



IGURA 5-18 Escalabilidad - Consumo por usuario – *Take Rate* GPON 1:8

Considerando una tasa de ocupación típica en torno al 30%, la tabla 5-3 detalla la mejora cuantitativa que se obtiene para cada tecnología. Es evidente que será mayor para la tecnología WDM, debido a que anteriormente cada usuario nuevo, necesitaba una nueva tarjeta de red. Como era de esperar, se puede observar que la escalabilidad incrementa, aún más, la eficiencia energética de una red sobre GPON, cuanto menor es el Split ratio.

TABLA 5-5 Consumo por usuario – *Take Rate* 30%

<i>Tecnología</i>	<i>Energía/usuario Sin Escalabilidad</i>	<i>Energía/usuario Con Escalabilidad</i>
<i>GPON 1:32</i>	<i>9,1512 W</i>	<i>8,8055 W</i>
<i>GPON 1:8</i>	<i>12,103 W</i>	<i>9,4895 W</i>
<i>P2P</i>	<i>13,724 W</i>	<i>13,724 W</i>
<i>WDM - 100</i>		
<i>WDM - 1000</i>		

### 5.3 Distancia

Un factor como el alcance entre la OLT y la ONT, es uno de los parámetros físicos más determinantes que se deben de considerar a la hora del diseño de una red. En el capítulo dos (ver figura 2-6), se introdujo el concepto de margen de pérdidas que puede tener una red PON. En este tercer apartado, se mostrará el alcance máximo de cada una de las tecnologías presentadas anteriormente. Han sido utilizados los mismos componentes de cada tecnología.

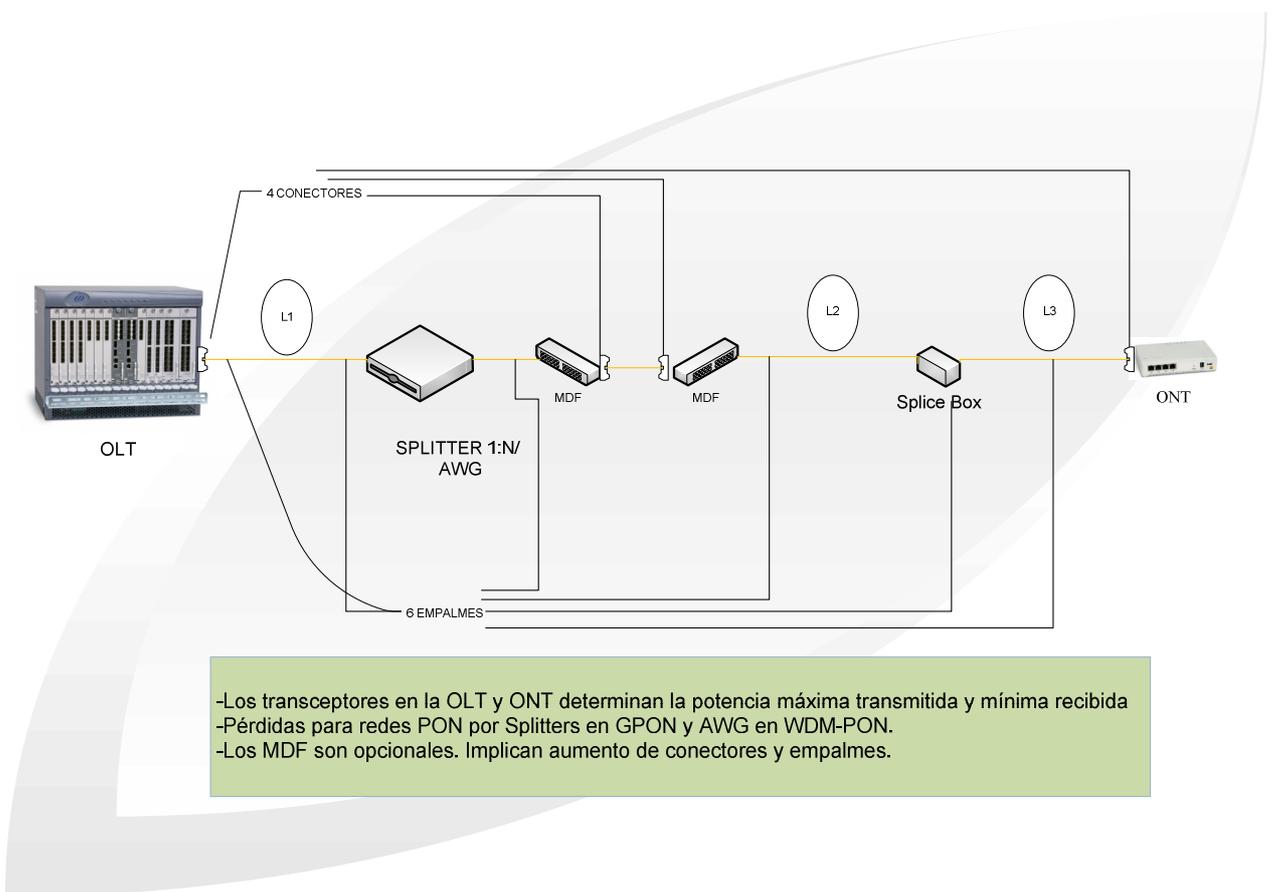


Figura 5-19 Pérdidas en el despliegue de la red óptica

Primeramente, es necesario obtener los valores de las pérdidas introducidas por los distintos elementos que forman la red óptica. Principalmente, tendremos

pérdidas por la atenuación de la fibra óptica (dB/Km), por pérdidas por los empalmes, pérdidas por los conectores y pérdidas por otros componentes como pueden ser divisores ópticos, AWG, MDF... Las pérdidas por empalmes se pueden considerar en torno a 0,1dB por cada empalme, mientras que las pérdidas por conectores serán de 0,5dB. Por otra parte, se ha considerado un margen de pérdidas en torno a los 3dB para todos los sistemas por futuras implementaciones, pérdidas inesperadas, efectos extremos como la variación de temperatura... Una vez obtenidas todas las pérdidas, el cálculo del alcance máximo de la red de acceso vendrá dado por la fórmula (5):

$$L_{Max} = (P_{TXmax} - P_{RXmin} - \text{Total de pérdidas} - \text{Margen}) / \text{CoefAten}$$

(5)

La  $P_{RXmin}$  vendrá dada por la sensibilidad del receptor, es decir, la potencia mínima necesaria para poder reconstruir la señal óptica. El cálculo debe ser realizado en los dos sentidos (*Up/Downstream*), siendo el de menor valor el sentido más restrictivo.

En la tabla 5-6 se muestran las potencias de los transmisores y receptores y las pérdidas de todos los componentes de una red GPON en ambos sentidos.

TABLA 5-6 Alcance máximo GPON

<i>Elemento</i>	<i>Valor</i>
<i>OLT TRX output power (dBm)</i>	<i>5,0</i>
<i>ONT TRX output power (dBm)</i>	<i>5,0</i>
<i>Conector en OLT TRX (dB)</i>	<i>0,5</i>
<i>5 empalmes (dB)</i>	<i>0,5</i>
<i>MDF (+1.1 dB)</i>	<i>1,1</i>
<i>1:N splitter (16/32/64 max, dB)</i>	<i>14,0 / 17,5 / 21,0</i>
<i>Splicebox (un emplame; dB)</i>	<i>0,1</i>
<i>Conector ONT TRX (dB)</i>	<i>0,5</i>
<i>ONT TRX Sensibilidad (dBm)</i>	<i>-27,0</i>
<i>OLT TRX Sensibilidad (dBm)</i>	<i>-28,0</i>
<i>Margen de pérdidas</i>	<i>3,0</i>
<i>Coficiente atenuación fibra (dB/km) / Downstream (1490nm)</i>	<i>0,21</i>
<i>Coficiente atenuación fibra (dB/km) / Upstream (1310nm)</i>	<i>0,33</i>
<i>Longitud de la fibra MAX (km)</i>	
<i>16/32/64 Downstream</i>	<i>58,6 / 41,9 / 25,2</i>
<i>Longitud de la fibra MAX (km)</i>	
<i>16/32/64 Upstream</i>	<i>40,3 / 29,7 / 19,1</i>

Uno de los componentes propios de una red GPON, son los divisores ópticos y que además, introducen más pérdidas. En la tabla, se pueden ver las que las pérdidas por inserción de los splitters son muy altas y vienen dadas por  $(10 \cdot \log N)$  más un margen conservador adicional.

La atenuación de la fibra óptica, dependerá de la banda de transmisión, siendo en torno a 0,21 dB/Km para una longitud de onda de 1490nm y de 0,33 dB/Km para 1310nm (ver figura 5-17).

La potencia de los transceptores en la OLT y ONT ha sido obtenida a partir de las hojas de datos de los componentes utilizados anteriormente para GPON [32,35].

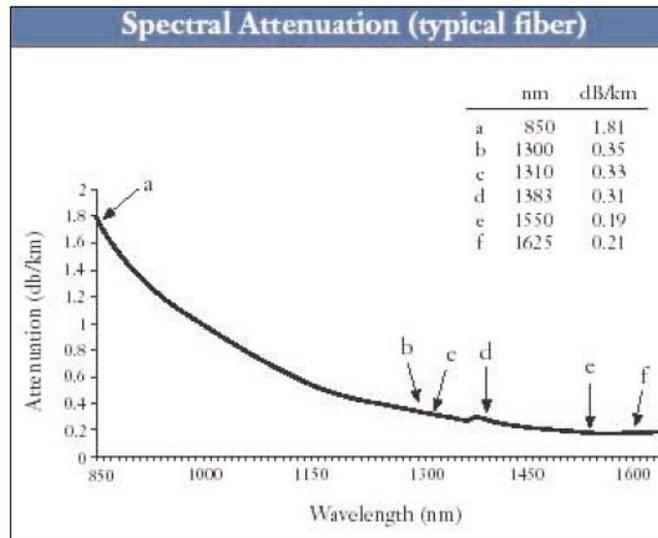


FIGURA 5-20 ATENUACIÓN FIBRA ÓPTICA [47]

En la tabla 5-7, se muestran los valores correspondientes para una red punto a punto con los componentes de CISCO y la GENEXIS. La ausencia de Splitters hace que haya un par menos de empalmes. El resto de valores son similares a GPON, salvo los propios de los dispositivos (ONT y OLT) de una red P2P [39, 42].

TABLA 5-7 Alcance máximo P2P 1Gbps

<i>Elemento</i>	<i>Valor</i>
<i>OLT TRX output power (dBm)</i>	<i>-3,0</i>
<i>ONT TRX output power (dBm)</i>	<i>-3,0</i>
<i>Conector en OLT TRX (dB)</i>	<i>0,5</i>
<i>3 empalmes (dB)</i>	<i>0,3</i>
<i>MDF (+1,2 dB)</i>	<i>1,2</i>
<i>Splicebox (un empalme; dB)</i>	<i>0,1</i>
<i>Conector ONT TRX (dB)</i>	<i>0,5</i>
<i>ONT TRX Sensibilidad (dBm)</i>	<i>-21,0</i>
<i>OLT TRX Sensibilidad (dBm)</i>	<i>-19,5</i>
<i>Margen de pérdidas</i>	<i>3,0</i>
<i>Coefficiente atenuación fibra (dB/km) / Downstream (1490nm)</i>	<i>0,21</i>
<i>Coefficiente atenuación fibra (dB/km) / Upstream (1310nm)</i>	<i>0,33</i>
<i>Longitud de la fibra MAX (km) Downstream</i>	<i>59,0</i>
<i>Longitud de la fibra MAX (km) Upstream</i>	<i>33,0</i>

En la tabla 5-8, se muestran los valores correspondientes para una red PON sobre WDM. Para esta tecnología vuelve haber un par más de empalmes debido a la introducción del AWG el cuál, introduce unas pérdidas considerablemente menores que los divisores ópticos.

TABLA 5-8 Alcance máximo WDM 1Gbps

<i>Elemento</i>	<i>Valor</i>
<i>OLT TRX output power (dBm)</i>	
<i>ONT TRX output power (dBm)</i>	
<i>Conector en OLT TRX (dB)</i>	<i>0,5</i>
<i>5 empalmes (dB)</i>	<i>0,5</i>
<i>MDF (+1.1 dB)</i>	<i>1,1</i>
<i>AWG(dB)</i>	<i>5,5</i>
<i>Splicebox (un empalme; dB)</i>	<i>0,1</i>
<i>Conector ONT TRX (dB)</i>	<i>0,5</i>
<i>ONT TRX Sensibilidad (dBm)</i>	
<i>OLT TRX Sensibilidad (dBm)</i>	
<i>Margen de pérdidas</i>	<i>3,0</i>
<i>Coefficiente atenuación fibra (dB/km) / Downstream (L- band)</i>	<i>0,26</i>
<i>Coefficiente atenuación fibra (dB/km) / Upstream (C- band)</i>	<i>0,24</i>
<i>Longitud de la fibra MAX (km) Downstream</i>	<i>86,2</i>
<i>Longitud de la fibra MAX (km) Upstream</i>	<i>88,8</i>

Por último, en la figura 5-18, se ofrece una gráfica del alcance máximo de cada tecnología. Se ha escogido el valor más pequeño entre el Up/Dowstream. Los resultados obtenidos muestran que para un diseño de una red FTTH dónde la distancia entre el cliente y la oficina central sea muy alta, la tecnología WDM-PON sale muy favorecida respecto al resto.

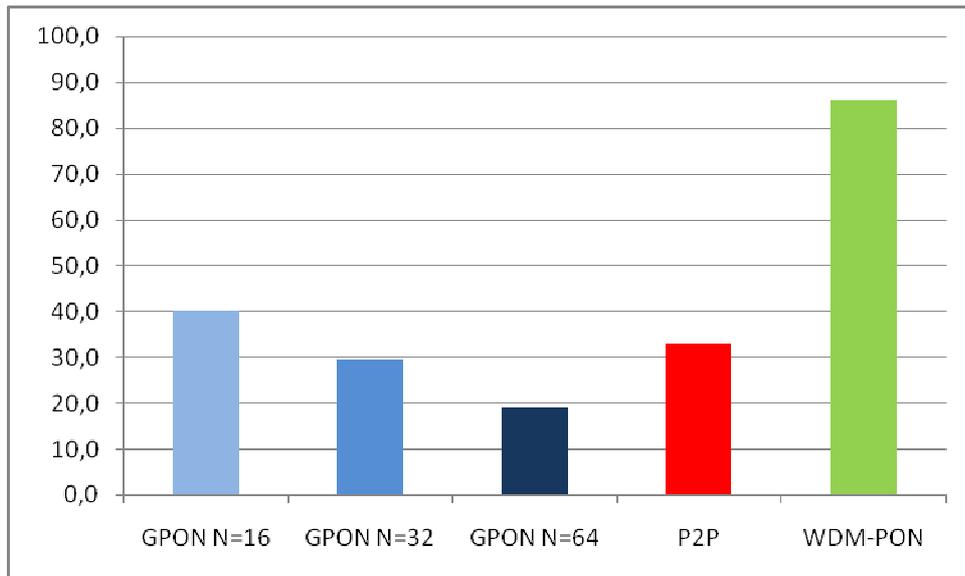


FIGURA 5-21 Comparación alcance máximo GPON/P2P/WDM-PON

## 6 Conclusiones y trabajo futuro

---

### 6.1 Conclusiones

El objetivo de este proyecto, era analizar la eficiencia energética de algunas tecnologías utilizadas para el desarrollo de una red FTTH. Durante el desarrollo del análisis, se han introducido las principales características de tres tecnologías (GPON, P2P y WDM-PON), sobre las que se implementan, ahora, y en un futuro cercano las redes de acceso de nueva generación.

A partir de la utilización de datos técnicos, sacados de varias empresas de telecomunicaciones, se ha estudiado el impacto que tienen algunos parámetros físicos, cómo el ancho de banda ofrecido, el número total de usuarios, la tasa de ocupación de una red o la distancia, en el consumo energético para las tres tecnologías.

Se ha mostrado que, hoy en día, para las necesidades de ancho de banda actuales (50Mbps), las redes ópticas pasivas, siguen siendo la solución más eficiente, en escenarios dónde se permita compartir una red FTTH, por un gran número de usuarios. Por otro lado, se ha demostrado el impacto que tienen, las unidades ópticas terminales (ONT), en el consumo por usuario de una red PON. Por tanto, si las empresas de telecomunicaciones, pretenden seguir utilizando estas redes en un futuro, incrementando el ancho de banda ofrecido, deben adaptarse a unos límites de consumo aceptables, y comenzar a utilizar mecanismos de ahorro de energía.

Además, se ha enseñado varios escenarios (considerando *Take rate* y ancho de banda por usuario superior a 100Mbps) dónde una red P2P, puede llegar a ser una solución más óptima que las redes PON.

Por último, se ha visto que una tecnología como WDM-PON, debería comenzar a ser utilizada por las empresas de telecomunicaciones, en situaciones dónde se requiera un alcance de la red superior a 60 Km. También, se ha mostrado que el consumo por usuario hasta 100Mbps, se aproxima bastante a una red GPON. A pesar de ello, sigue siendo una tecnología muy poco estudiada y basándonos en términos de eficiencia energética, se encuentra alejada del resto de tecnologías.

## ***6.2 Trabajo futuro***

El estudio realizado en este proyecto, permite el desarrollo de numerosas vías y futuros trabajos de gran importancia.

Uno de los más interesantes, sería realizar, un análisis de tráfico de una red actual, y aplicar los mecanismos de ahorro de energía, explicados en el capítulo tres. La implementación de estos modelos, permitiría la optimización del consumo de las ONTs utilizadas en las redes de acceso. Y utilizando los escenarios y datos técnicos ofrecidos en este proyecto, se podrían obtener nuevos resultados sobre las tecnologías implicadas.

En este proyecto sólo se ha incluido un análisis del consumo energético que tienen varias tecnologías. Realmente, el interés de las empresas dedicadas a implementar redes FTTH, es conocer los riesgos económicos. Sería importante añadir, sobre los mismos escenarios presentados, un estudio económico, de todos los componentes necesarios para el despliegue de una red de acceso, sobre fibra óptica hasta el hogar. Con los resultados obtenidos en este proyecto y el análisis económico, se podrían obtener nuevas conclusiones sobre que tecnología sería más óptima para cada caso.

## 7 Referencias

---

- [1] All about market research. Available online (April 2010):  
<http://www.allaboutmarketresearch.com/internet.htm/>
- [2] Silicon News. Available online (April 2010):  
<http://www.siliconnews.es/es/news/2010/04/13/boom-moviles-sociales/>
- [3] Richard Mumford, "Irish Government Backs Bell Labs' Research Expansion," MICROWAVE JOURNAL, vol. 53, no. 3, page 55, March 2010.
- [4] White paper Green ICT. "El camino hacia el negocio verde", May 2009. (online, March 2010): <http://www.itcio.es/green-ti/whitepapers/>
- [5] Fedea. Available online (April 2010):  
[http://www.fedea.es/pub/est\\_economicos/2010/02-2010.pdf](http://www.fedea.es/pub/est_economicos/2010/02-2010.pdf)
- [6] MINISTERIO DE INDUSTRIA, TURISMO Y COMERCIO (March 2011) "*El Gobierno impulsa la conexión de los hogares a redes de fibra óptica que permiten el acceso a la banda ancha ultrarrápida*" (Press Release) Available online (April 2011):  
<http://www.mityc.es/es-es/gabineteprensa/notasprensa/documents/npreglamientoict110311.pdf>
- [7] PON Splitter Technology Available online (May 2011):  
<http://www.fttxtra.com/ftth/pon-splitter-technology/>
- [8] Dawid Nowaka and John Murphy, "FTTH: The Overview of Existing Technologies" in: SPIE Opto-Ireland 2005 vol. 5825, pp. 500–509.

[9] Ermanno Berruto, "FTTH architecture: P2P, an up-to-date reassessment" in Proc FTTH Conference 2011, February 2011 Milán, Italy.

[10] Chris Holden, Hartwig Tauber, Roland Montagne, "FTTH Conference 2011", February 2011 Milán, Italy

[11] F. a. BroadLight., "Comparing Gigabit PON Technologies ITU-T G.984 GPON vs. IEEE 802.3ah EPON," <http://www.broadlight.com/docs/pdfs/wp-gpon-vs-epon.pdf>

[12] NORTEL, "Ethernet over WDM PON technology overview" Available online (May2011) : [http://www.nortel.com/products/01/ethernet\\_access/nn123922.pdf](http://www.nortel.com/products/01/ethernet_access/nn123922.pdf)

[13] SOLID SYSTEMS Available online (March 2011):  
[http://www.solidsystems.co.kr/products\\_bluecross1600.htm](http://www.solidsystems.co.kr/products_bluecross1600.htm)

[14] White paper by PMC-Sierra. "*The Importance of Dynamic Bandwidth Allocation in GPON Networks*", January 2008. (August 2011) <http://www.pmc-sierra.com/whitepaper-processor-mips-sonet-ethernet/gpon-dba/index.html>

[15] ITU-T Rec. G.983.4

[16] Santos, J. Quadros, O. Pires, J. Pedro, J. "Design and performance evaluation of protected Super-EPON Access networks using a dedicated protection ring architecture", October 2007.

[17] IEEE Std 802.3ah, 2004 Part 3: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications.

[18] J.Mandin, "EPON via Sleep Mode" IEEE P802.3av 10GEPON Task Force Meeting, September 2008, Seoul, South Korea. (February 2011)  
[http://www.ieee802.org/3/av/public/2008\\_09/3av\\_0809\\_mandin\\_4.pdf](http://www.ieee802.org/3/av/public/2008_09/3av_0809_mandin_4.pdf)

[19] Marek Hajduczenia, "Adjustable Timer Value for Power Saving" IEEE P802.3av 10GEPON Task Force Meeting, September 2008, Seoul, South Korea.

[20] ITU-T Rec. G. sup. 45.

[21] IEEE P802.3az Energy efficient ethernet standard, September 2010.

[22] P. Reviriego, K. Christensen, J. Rabanillo and J. A. Maestro, "An Initial Evaluation of Energy Efficient Ethernet" in IEEE Communication Letters, May 2011.

[23] R. Kubo, J. Kani, Y. Fujimoto, N. Yoshimoto, and K. Kumozaki, "Proposal and performance analysis of a power-saving mechanism for 10-Gigabit-class passive optical network systems" , in Proc. Networks and Optical Conference and Optical Cabling and Infrastructure (NOC/OC&I) 2009, pp. 87-94, June 2009, Valladolid, Spain.

[24] Jingjin Zhang, Nirwan Ansari, "Toward Energy-Efficient 1G-EPON and 10G-EPON with Sleep-Aware MAC Control and Scheduling", IEEE Communications Magazine, pages S33-S38, February 2011.

[25] S. Wong *et al.*, "Demonstration of Energy Conserving TDM-PON with Sleep Mode ONU Using Fast Clock Recovery Circuit", *Proc. Optical Fiber Commun. Conf.* 2010.

[26] S. Wong *et. all*, "Sleep mode for energy saving PONs: advantages and drawbacks," IEEE Green Comm 2009.

[27] ZHONE. Available online (June 2011)

<http://www.zhone.com/about/photolib>

[28] CISCO. Available online (July 2011)

[http://www.cisco.com/en/US/prod/collateral/modules/ps2710/ps5494/product\\_data\\_sheet0900aec802109ea\\_ps4324\\_Products\\_Data\\_Sheet.html](http://www.cisco.com/en/US/prod/collateral/modules/ps2710/ps5494/product_data_sheet0900aec802109ea_ps4324_Products_Data_Sheet.html)

[29] Stockinthechannel. Available online (June 2011)

<http://www.stockinthechannel.com/p/GLC-BX-D-1000BASE-BX10-D-Cisco-transceivers-media-converters/4083036.aspx>

[30] ZHONE. Available online (July 2011):

<http://www.zhone.com/products/znid/gpon-indoor/>

[31] ZHONE. Available online (June 2011):

<http://www.zhone.com/products/MXK/MXK.pdf>

[32] ZHONE. Available online (July 2011):

<http://www.zhone.com/products/ZNID-GPON-2504/>

[33] ZHONE. Available online (July 2011):

<http://www.zhone.com/products/MXK-GPON/MXK-GPON.pdf>

[34] ZHONE. Available online (August 2011):

<http://www.zhone.com/products/MXK-UPLINK-2X10GE-8X1GE/>

[35] SENNSEEK. Available online (May 2011):

<http://www.sennseek.com/products/datasheet/OLTSFP-2D14GA13-GPC%20rev%200.pdf?silverheader=1>

[36] CISCO. Available online (July 2011)

[http://www.cisco.com/en/US/products/hw/switches/ps4324/products\\_white\\_paper09186a00801f44be.shtml#wp39645](http://www.cisco.com/en/US/products/hw/switches/ps4324/products_white_paper09186a00801f44be.shtml#wp39645)

- [37] CISCO. Available online (July 2011)  
[http://www.cisco.com/en/US/prod/collateral/switches/ps5718/ps4324/data\\_sheet\\_c78-612364.pdf](http://www.cisco.com/en/US/prod/collateral/switches/ps5718/ps4324/data_sheet_c78-612364.pdf)
- [38] CISCO. Available online (April 2011)  
[http://www.cisco.com/en/US/prod/collateral/switches/ps5718/ps4324/product\\_data\\_sheet0900aec801792b1.pdf](http://www.cisco.com/en/US/prod/collateral/switches/ps5718/ps4324/product_data_sheet0900aec801792b1.pdf)
- [39] GENEXIS. Available online (May 2011)  
<http://www.genexis.eu/downloads/datasheet-ocg-1020m.pdf>
- [40] CISCO. Available online (July 2011):  
[http://www.cisco.com/en/US/prod/collateral/routers/ps380/data\\_sheet\\_c78-519930.html](http://www.cisco.com/en/US/prod/collateral/routers/ps380/data_sheet_c78-519930.html)
- [41] GENEXIS. Available online (July 2011):  
<http://www.genexis.eu/products.php?id=ethernet>
- [42] CISCO. Available online (June 2011)  
[http://www.cisco.com/en/US/prod/collateral/modules/ps5455/ps6577/product\\_data\\_sheet0900aec8033f885.pdf](http://www.cisco.com/en/US/prod/collateral/modules/ps5455/ps6577/product_data_sheet0900aec8033f885.pdf)
- [43] CISCO. Available online (June 2011)  
[http://www.cisco.com/en/US/prod/collateral/modules/ps5455/ps6578/product\\_data\\_sheet0900aec801f931c.html](http://www.cisco.com/en/US/prod/collateral/modules/ps5455/ps6578/product_data_sheet0900aec801f931c.html)
- [44] LG-ERICSSON. Available online (June 2011)  
<http://www.lgericsson.com/index.html>
- [45] J. Baliga *et al.*, "Energy Consumption in Access Networks," Proc. Optical Fiber Commun. Conf., 2008.

[46] Machuca et al, "Fiber Access Networks: Reliability and Power Consumption Analysis", Optical Network Design and Modeling (ONDM), 2011 15th International Conference, 8-10 Feb, Munich Univ. of Technol. (TUM), Munich, Germany.

[47] EXFO. Available online (July 2011)

<http://documents.exfo.com/appnotes/anote110-ang.pdf>

## PRESUPUESTO

### Ejecución Material

- Compra de ordenador personal ..... 2.000 €
- Licencia anual del software de Matlab..... 6.000 €
- Material de oficina ..... 100 €
- Total de ejecución material..... 8.100 €

### Gastos generales

- 16 % sobre Ejecucion Material..... 1.296 €

### Beneficio Industrial

- 6 % sobre Ejecucion Material..... 486 €

### Honorarios Proyecto

- 600 horas a 15 € / hora..... 9.000 €

### Material fungible

- Gastos de impresion ..... 50 €
- Encuadernacion ..... 200 €

### Subtotal del presupuesto

- Subtotal Presupuesto..... 19.132 €

### € I.V.A. aplicable

- 18% Subtotal Presupuesto..... 3.443,76 €

### Total presupuesto

- Total Presupuesto..... 22.575,76 €

Madrid, Septiembre de 2011

El Ingeniero Jefe de Proyecto

Fdo.: Eduardo Ruiz Sanz  
Ingeniero Superior de Telecomunicación



## **PLIEGO DE CONDICIONES**

Este documento contiene las condiciones legales que guiarán la realización, en este proyecto, Energy-efficiency in optical networks . En lo que sigue, se supondrá que el proyecto ha sido encargado por una empresa cliente a una empresa consultora con la finalidad de realizar dicho sistema. Dicha empresa ha debido desarrollar una línea de investigación con objeto de elaborar el proyecto. Esta línea de investigación, junto con el posterior desarrollo de los programas está amparada por las condiciones particulares del siguiente pliego.

Supuesto que la utilización industrial de los métodos recogidos en el presente proyecto ha sido decidida por parte de la empresa cliente o de otras, la obra a realizar se regulará por las siguientes:

### **Condiciones generales**

1. La modalidad de contratación será el concurso. La adjudicación se hará, por tanto, a la proposición más favorable sin atender exclusivamente al valor económico, dependiendo de las mayores garantías ofrecidas. La empresa que somete el proyecto a concurso se reserva el derecho a declararlo desierto.

2. El montaje y mecanización completa de los equipos que intervengan será realizado totalmente por la empresa licitadora.

3. En la oferta, se hará constar el precio total por el que se compromete a realizar la obra y el tanto por ciento de baja que supone este precio en relación con un importe límite si este se hubiera fijado.

4. La obra se realizará bajo la dirección técnica de un Ingeniero Superior de Telecomunicación, auxiliado por el número de Ingenieros Técnicos y Programadores que se estime preciso para el desarrollo de la misma.

5. Aparte del Ingeniero Director, el contratista tendrá derecho a contratar al resto del personal, pudiendo ceder esta prerrogativa a favor del Ingeniero Director, quien no estará obligado a aceptarla.

6. El contratista tiene derecho a sacar copias a su costa de los planos, pliego de condiciones y presupuestos. El Ingeniero autor del proyecto autorizará con su firma las copias solicitadas por el contratista después de confrontarlas.

7. Se abonará al contratista la obra que realmente ejecute con sujeción al proyecto que sirvió de base para la contratación, a las modificaciones autorizadas por la superioridad o a las órdenes que con arreglo a sus facultades le hayan comunicado por escrito al Ingeniero Director de obras siempre que dicha obra se haya ajustado a los preceptos de los pliegos de condiciones, con arreglo a los cuales, se harán las modificaciones y la valoración de las diversas unidades sin que el importe total pueda exceder de los presupuestos aprobados. Por consiguiente, el número de unidades que se consignan en el proyecto o en el presupuesto, no podrá servirle de fundamento para entablar reclamaciones de ninguna clase, salvo en los casos de rescisión.

8. Tanto en las certificaciones de obras como en la liquidación final, se abonarán los trabajos realizados por el contratista a los precios de ejecución material que figuran en el presupuesto para cada unidad de la obra.

9. Si excepcionalmente se hubiera ejecutado algún trabajo que no se ajustase a las condiciones de la contrata pero que sin embargo es admisible a juicio del Ingeniero Director de obras, se dará conocimiento a la Dirección, proponiendo a la vez la rebaja de precios que el Ingeniero estime justa y si la Dirección resolviera aceptar la obra, quedará el contratista obligado a conformarse con la rebaja acordada.

10. Cuando se juzgue necesario emplear materiales o ejecutar obras que no figuren en el presupuesto de la contrata, se evaluará su importe a los precios

asignados a otras obras o materiales análogos si los hubiere y cuando no, se discutirán entre el Ingeniero Director y el contratista, sometiéndolos a la aprobación de la Dirección. Los nuevos precios convenidos por uno u otro procedimiento, se sujetarán siempre al establecido en el punto anterior.

11. Cuando el contratista, con autorización del Ingeniero Director de obras, emplee materiales de calidad más elevada o de mayores dimensiones de lo estipulado en el proyecto, o sustituya una clase de fabricación por otra que tenga asignado mayor precio o ejecute con mayores dimensiones cualquier otra parte de las obras, o en general, introduzca en ellas cualquier modificación que sea beneficiosa a juicio del Ingeniero Director de obras, no tendrá derecho sin embargo, sino a lo que le correspondería si hubiera realizado la obra con estricta sujeción a lo proyectado y contratado.

12. Las cantidades calculadas para obras accesorias, aunque figuren por partida alzada en el presupuesto final (general), no serán abonadas sino a los precios de la contrata, según las condiciones de la misma y los proyectos particulares que para ellas se formen, o en su defecto, por lo que resulte de su medición final.

13. El contratista queda obligado a abonar al Ingeniero autor del proyecto y director de obras así como a los Ingenieros Técnicos, el importe de sus respectivos honorarios facultativos por formación del proyecto, dirección técnica y administración en su caso, con arreglo a las tarifas y honorarios vigentes.

14. Concluida la ejecución de la obra, será reconocida por el Ingeniero Director que a tal efecto designe la empresa.

15. La garantía definitiva será del 4% del presupuesto y la provisional del 2%.

16. La forma de pago será por certificaciones mensuales de la obra ejecutada, de acuerdo con los precios del presupuesto, deducida la baja si la hubiera.

17. La fecha de comienzo de las obras será a partir de los 15 días naturales del replanteo oficial de las mismas y la definitiva, al año de haber ejecutado la provisional, procediéndose si no existe reclamación alguna, a la reclamación de la fianza.

18. Si el contratista al efectuar el replanteo, observase algún error en el proyecto, deberá comunicarlo en el plazo de quince días al Ingeniero Director de obras, pues transcurrido ese plazo será responsable de la exactitud del proyecto.

19. El contratista está obligado a designar una persona responsable que se entenderá con el Ingeniero Director de obras, o con el delegado que éste designe, para todo relacionado con ella. Al ser el Ingeniero Director de obras el que interpreta el proyecto, el contratista deberá consultarle cualquier duda que surja en su realización.

20. Durante la realización de la obra, se girarán visitas de inspección por personal facultativo de la empresa cliente, para hacer las comprobaciones que se crean oportunas. Es obligación del contratista, la conservación de la obra ya ejecutada hasta la recepción de la misma, por lo que el deterioro parcial o total de ella, aunque sea por agentes atmosféricos u otras causas, deberá ser reparado o reconstruido por su cuenta.

21. El contratista, deberá realizar la obra en el plazo mencionado a partir de la fecha del contrato, incurriendo en multa, por retraso de la ejecución siempre que éste no sea debido a causas de fuerza mayor. A la terminación de la obra, se hará una recepción provisional previo reconocimiento y examen por la dirección técnica, el depositario de efectos, el interventor y el jefe de servicio o un representante, estampando su conformidad el contratista.

22. Hecha la recepción provisional, se certificará al contratista el resto de la obra, reservándose la administración el importe de los gastos de conservación de la misma hasta su recepción definitiva y la fianza durante el tiempo señalado como plazo de garantía. La recepción definitiva se hará en las mismas condiciones que la provisional, extendiéndose el acta correspondiente. El Director Técnico propondrá a la Junta Económica la devolución de la fianza al contratista de acuerdo con las condiciones económicas legales establecidas.

23. Las tarifas para la determinación de honorarios, reguladas por orden de la Presidencia del Gobierno el 19 de Octubre de 1961, se aplicarán sobre el denominado en la actualidad "Presupuesto de Ejecución de Contrata" y anteriormente llamado "Presupuesto de Ejecución Material" que hoy designa otro concepto.

### **Condiciones particulares**

La empresa consultora, que ha desarrollado el presente proyecto, lo entregará a la empresa cliente bajo las condiciones generales ya formuladas, debiendo añadirse las siguientes condiciones particulares:

1. La propiedad intelectual de los procesos descritos y analizados en el presente trabajo, pertenece por entero a la empresa consultora representada por el Ingeniero Director del Proyecto.

2. La empresa consultora se reserva el derecho a la utilización total o parcial de los resultados de la investigación realizada para desarrollar el siguiente proyecto, bien para su publicación o bien para su uso en trabajos o proyectos posteriores, para la misma empresa cliente o para otra.

3. Cualquier tipo de reproducción aparte de las reseñadas en las condiciones generales, bien sea para uso particular de la empresa cliente, o para cualquier otra aplicación, contará con autorización expresa y por escrito del Ingeniero Director del Proyecto, que actuará en representación de la empresa consultora.

4. En la autorización se ha de hacer constar la aplicación a que se destinan sus reproducciones así como su cantidad.

5. En todas las reproducciones se indicará su procedencia, explicitando el nombre del proyecto, nombre del Ingeniero Director y de la empresa consultora.

6. Si el proyecto pasa la etapa de desarrollo, cualquier modificación que se realice sobre él, deberá ser notificada al Ingeniero Director del Proyecto y a criterio de éste, la empresa consultora decidirá aceptar o no la modificación propuesta.

7. Si la modificación se acepta, la empresa consultora se hará responsable al mismo nivel que el proyecto inicial del que resulta el añadirla.

8. Si la modificación no es aceptada, por el contrario, la empresa consultora declinará toda responsabilidad que se derive de la aplicación o influencia de la misma.

9. Si la empresa cliente decide desarrollar industrialmente uno o varios productos en los que resulte parcial o totalmente aplicable el estudio de este proyecto, deberá comunicarlo a la empresa consultora.

10. La empresa consultora no se responsabiliza de los efectos laterales que se puedan producir en el momento en que se utilice la herramienta objeto del presente proyecto para la realización de otras aplicaciones.

11. La empresa consultora tendrá prioridad respecto a otras en la elaboración de los proyectos auxiliares que fuese necesario desarrollar para dicha aplicación industrial, siempre que no haga explícita renuncia a este hecho. En este caso, deberá autorizar expresamente los proyectos presentados por otros.

12. El Ingeniero Director del presente proyecto, será el responsable de la dirección de la aplicación industrial siempre que la empresa consultora lo estime oportuno. En caso contrario, la persona designada deberá contar con la autorización del mismo, quien delegará en él las responsabilidades que ostente.