

Evaluación de prestaciones de una red EPON

Lluís Gutierrez
EPSEVG - UPC
Avda. Victor Balaguer, s/n
08870 Vilanova i la Geltrú
lluis.gutierrez@entel.upc.edu

Marilet de Andrade
EPSC - UPC
Avda. Canal Olímpic, s/n
08860 Castelldefels
marilet@entel.upc.edu

Sebastià Sallent
EPSC - UPC
Avda. Canal Olímpic, s/n
08860 Castelldefels
sallent@entel.upc.edu

Resumen

La difusión de servicios del futuro se basará en redes de acceso de alta capacidad como por ejemplo la recientemente estandarizada (Junio 2004) red EPON (Ethernet PON, IEEE 802.3ah). En esta red el equipo de usuario denominado ONU (Optical Network Unit) es el encargado de la recepción y la transmisión a la red. El canal de subida (upstream) es compartido entre todos los usuarios y transporta tramas Ethernet nativas en ráfagas durante el tiempo que cada ONU tiene asignado por la cabecera (OLT).

La asignación de la ventana de transmisión a cada ONU es la clave para el éxito de la red y está sujeta a investigación exhaustiva por diversos grupos. El objetivo de este trabajo es doble, por una parte presentamos un nuevo algoritmo para ser implementado en la OLT desarrollado por nuestro grupo y además para la evaluación de sus prestaciones hemos desarrollado un modelo completo basado en OPNET MODELER. Nuestro modelo es configurable para distintos tráfico, múltiples colas por ONU, etc. El diseño que hemos realizado y que pretendemos mostrar, permite la evaluación del rendimiento de los algoritmos más interesantes propuestos para este tipo de red, de una forma simple, manejable y configurable; además se muestran estadísticas de rendimiento individuales y conjuntas para permitir la comparación entre ellos.

1. Introducción

En el presente trabajo abarca varios aspectos relevantes y forma parte de la investigación llevada a cabo por distintos grupos de Universidades españolas financiados por la CICYT de nombre OPTINET6: "Escalabilidad en Redes Ópticas IPv6 con Calidad de Servicio (OPTINET6)". Como su nombre indica el objetivo final es estudiar las redes de nueva generación IPv6 con Calidad de Servicio. Parte de esta investigación se centra en caracterizar las redes de acceso y en concreto las redes de acceso de nueva generación basadas en Fibra Óptica (xPON). [1]

Entre estas redes actualmente destacan dos estándares recientes conocidos como GPON (Gigabit-capable Passive Optical Network) [2] y EPON (Ethernet Passive Optical Network) [3], que se están empezando a utilizar por parte de las compañías operadoras para el despliegue de las nuevas redes de acceso de altas prestaciones todo ello pensando en el futuro (y ya presente) Internet y la distribución de nuevos servicios multimedia.

En nuestro caso empezamos a analizar e investigar la red EPON. En concreto el estándar deja a criterio del fabricante el protocolo MAC de acceso a la red, este protocolo es del tipo punto-multipunto y en el estándar tan solo se especifica que la asignación de ventanas de transmisión se realizará de forma centralizada en la cabecera (OLT) una vez recibidas las peticiones de cada uno de los usuarios (ONU). Es por ello que numerosos grupos de investigación han dedicado sus esfuerzos al desarrollo de algoritmos para maximizar la eficiencia de la red y garantizar calidad de servicio.

En primer lugar presentaremos en el presente escrito el protocolo MAC (Cycle-based ordering and Dynamic Bandwidth Allocation Algorithm) que

como se podrá comprobar tiene buenas prestaciones.

Y además, fruto de la necesidad de evaluar las características de este protocolo desarrollamos un nuevo modelo de simulación muy completo basado en el conocido simulador de red OPNET MODELER por ser el que mejor se adapta al proyecto por sus prestaciones y facilidad de manejo. El diseño que hemos realizado y que pretendemos mostrar es configurable para distintos tráfico, múltiples colas por ONU, etc.; permite la evaluación del rendimiento de diversos algoritmos propuestos para la red EPON en la literatura científica durante los últimos años, y nos permitirá proponer mejoras o incluso diseñar nuevos métodos de acceso que mejoren las prestaciones de los ya existentes. Paralelamente se presenta un único modelo permite la comparación entre los distintos algoritmos que hemos comentado lo que hace todavía más interesante este trabajo.

El presente trabajo lo dividiremos en varias secciones. En la sección 2 introduciremos brevemente los principales conceptos de las redes de acceso EPON y de los protocolos de acceso MAC propuestos, especialmente aquellos que serán objeto de evaluación; en la sección 3 presentaremos un algoritmo MAC; en la sección 4 muestra el diseño completo propuesto para el análisis de la red EPON mediante el programa OPNET; en la sección 5 analizaremos los resultados obtenidos en la simulación; y finalmente concluiremos el trabajo y señalaremos los próximos objetivos a resolver en el periodo que resta para finalizar el proyecto.

2. Redes de acceso

En esta sección veremos una breve introducción a las redes de acceso, y en especial la red EPON, las

referencias [5] [6] pueden ser de ayuda para el lector. La red de acceso abarca el tramo comprendido entre el último equipo de la compañía operadora de las telecomunicaciones hasta la residencia del usuario último receptor de los servicios que ha solicitado obtener. Las redes de acceso deben satisfacer las necesidades de distintos usuarios: residenciales, Pymes y grandes corporaciones y empresas.

2.1. Passive Optical Networks (PON)

Actualmente la investigación se centra en redes pasivas ópticas de acceso en las que hay una continuidad desde la red troncal hasta el usuario. Es en esta última donde se produce la conversión O/E (óptico-electrónica), en el caso de que la fibra penetre hasta la residencia final del usuario se conoce la red como del tipo FTTH (Fiber-to-the-Home). La solución tecnológica más exitosa en este grupo es la conocida como red xPON (**Redes ópticas pasivas**). Esta red es totalmente pasiva (PON), entre sus ventajas podemos destacar: no existen equipos de red activos entre la CO y el usuario; permite cubrir distancias de hasta 20 Km., minimiza la cantidad de fibra a instalar (topología tipo point-to-multipoint), mayor ancho de banda (la fibra llega hasta el usuario) y por último permite la difusión tanto de vídeo digital como también de vídeo analógico.

2.2. The EPON standard (IEEE 802.3ah)

Por otra parte el uso del protocolo Ethernet en el enlace de datos, ya sea la red de distribución y/o la red de acceso, permite una mayor integración de toda la red evitando innecesarias conversiones de protocolo en cada estadio de la red.

La topología básica de la red EPON se muestra en la figura 1.

En una red EPON existen distintos componentes:

- **OLT** (Optical Line Terminal) es el equipo situado en la cabecera de la red (CO o headend) encargado de la transmisión/recepción a través de la línea óptica y gobierno de la red en general.
- **ONU** (Optical Network Unit) es el equipo de red situado en la residencia del usuario asimismo encargado de la transmisión/recepción a través de la línea óptica. Cada ONU a su vez puede ser un terminal o un equipo que atiende a múltiples usuarios, en el caso por ejemplo de un *router* o un servidor de red local en un edificio.

Es por ello que la gestión del ancho de banda y la QoS son claves para medir la eficiencia de una red PON en cualquier escenario de trabajo.

2.2.1. Canales de bajada y subida de la red EPON

Tanto el canal de bajada como el de subida transportan tramas Ethernet en ráfagas de 1 o varias tramas en concordancia con el estándar IEEE 802.3, es decir, con un tiempo entre tramas (IFG, interframe Gap) y 1 preámbulo inicial de la trama.

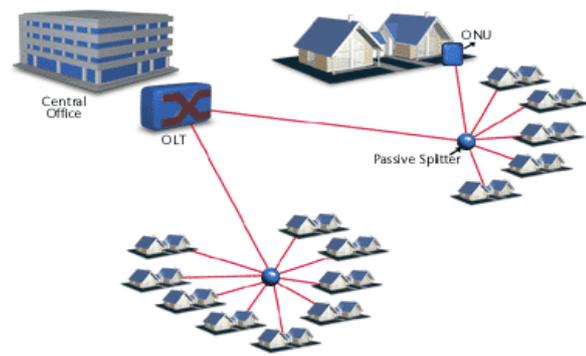


Figura 1. Red EPON básica

El canal de bajada es en modo broadcast o difusión, y se puede ver en la figura 2 un ejemplo de su funcionamiento.

El canal de subida (figura 3) es compartido entre los usuarios. Cada usuario dispone de un tiempo asignado por la OLT en el que puede transmitir una o varias tramas. Hay un tiempo de guarda (Guard Time) entre la transmisión de una ONU y la siguiente que debe tenerse en cuenta.

La clave principal del rendimiento de esta red es el protocolo para el acceso al canal compartido, este protocolo en líneas generales debe garantizar el acceso imparcial de todos los terminales al medio (*fairness*) y proveer QoS a cada clase de tráfico. El protocolo MAC debe determinar que ranuras de tiempo (*slots*) se asignan a cada uno de los terminales tal que éstos transmitan sin riesgo de colisionar con el resto de transmisiones de los terminales.

Destacamos que una trama no puede segmentarse, o sea, sino cabe en el tiempo que resta hasta el final de la transmisión de un ONU, diferiremos su transmisión al siguiente ciclo.

Los valores típicos son:

- **Guard Time:** Es el tiempo de guarda entre transmisiones de distintas ONU's y depende de los dispositivos ópticos utilizados en la red.
- **IFG** (interframe gap): 96 bits (conforme estándar Ethernet IEEE 802.3).
- **Preamble:** 64 bits (adicional a la trama básica IEEE802.3).

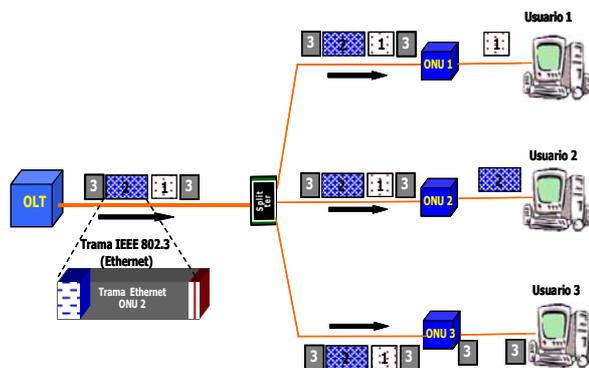


Figura 2. El canal de bajada (downstream)

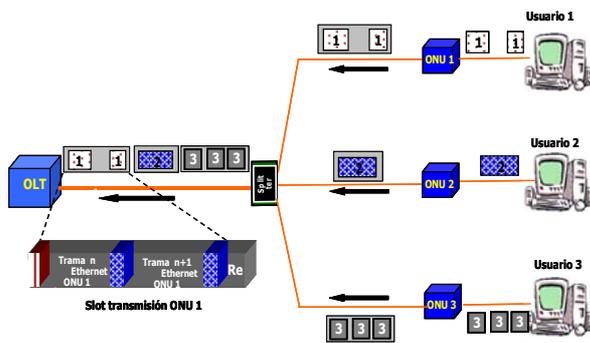


Figura 3. El canal de subida (upstream)

2.2.2. The MPCP protocol

El protocolo MPCP (Multi-Point Control Protocol) es un protocolo P2MP (Point-to-Multi-Point) pensado para garantizar en una red del tipo árbol un funcionamiento adecuado. La transmisión de las ONU's de la red son controladas por un mecanismo de Request-Permit de modo que es la OLT quien asigna el ancho de banda necesario a cada ONU según las peticiones de éstas.

En el caso de IEEE 802.3ah se han definido dos nuevos mensajes de Ethernet: GATE que envía la OLT a cada ONU, indicándole la ranura de tiempo en la que se puede transmitir y el REPORT que envía cada ONU a la OLT indicándole su estado y solicitando ranuras libres para transmitir los datos pendientes. Tanto el mensaje de Gate, como el de Report están contenidos en tramas Ethernet de 64 bytes de tamaño.

Los mensajes de Report los envía la ONU conjuntamente con los datos. El mensaje de REPORT contiene el ancho de banda que la ONU solicita a la OLT en el próximo ciclo basándose en la cola del buffer.

Asimismo se conoce como ciclo (T_{ciclo} , tiempo de ciclo) el periodo que comprende la transmisión desde la primera ONU hasta la última de la red. En una red PON el tiempo de ciclo puede ser fijo o variable en función del protocolo MAC.

2.2.3. Calidad de servicio (QoS)

La calidad de servicio (QoS, Quality of Service) la definimos como la capacidad que tiene un sistema de asegurar, con un grado de fiabilidad preestablecido, que se cumplan los requisitos de tráfico, en términos de perfil y ancho de banda, para un flujo de información dado.

Los parámetros que la calidad de servicio de una red son: caudal o ancho de banda, pérdida de paquetes, retardo total y variabilidad del retardo (*jitter*). El operador de telecomunicaciones debe cumplir lo que acuerde el contrato con el usuario (SLA, Service Level Agreement) respecto a la calidad de servicio en los servicios ofrecidos, y para ello debe asegurarse que la red de comunicaciones y en especial la red de acceso garantizan el nivel contratado.

Es interesante destacar que el número de colas de la ONU es configurable y puede ser de hasta 8 [0..7] tal como especifica el estándar 802.1Q. Por eso, además de la calidad de servicio, cabría considerar otros aspectos tales como: justicia y planificación inter- e intra-ONU.

2.3. **MAC de una red EPON.**

La solución que se ha adoptado en las redes xPON es la de utilizar un protocolo tipo Polling (Request-Permit) en el que la cabecera de la red asigna la ventana de transmisión a los terminales previa petición de éstos. La OLT de forma centralizada una vez ha recibido todas las peticiones de los terminales calcula el ancho de banda que puede asignar a cada uno. La asignación de ancho de banda (*scheduling*) a las ONU's por parte de la OLT siguiendo el mecanismo de Grant y Report se efectúa según el algoritmo que tenga implementado y que NO forma parte del estándar sino que cada fabricante puede proponer uno distinto para obtener la máxima eficiencia de la red. Es éste cálculo el que realmente afecta a las prestaciones de la red y se han propuesto multitud de alternativas que se verán a continuación.

Algunos de ellos están diseñados para ofrecer QoS aunque lamentablemente casi siempre se utilizan distintos modelos para la evaluación de prestaciones: velocidad, número de terminales, tipo de tráfico, etc. Una tarea pendiente es la de uniformizar el análisis del rendimiento o en general la evaluación de prestaciones de un protocolo para poder compararlos realmente entre sí.

2.3.1. Gestión del ancho de banda: fijo y dinámico

Existen dos formas básicas de asignar el ancho de banda a cada usuario:

- **Fijo.** Cada usuario dispone de un tiempo fijo del canal ranurado (*slots*).
- **Dinámico.** La asignación del ancho de banda es dinámica cuando a cada terminal se le asigna éste de forma variable en cada ciclo. Los algoritmos propuestos que permiten este tipo de gestión en general se conocen como DBA (Dynamic Bandwidth Allocation) y son los más interesantes ya que como es obvio cuando la asignación del ancho de banda es dinámica mejorará eficiencia de la red respecto a la asignación fija, ya que cada terminal obtendrá el ancho de banda que necesite y no habrá pérdidas de tiempo de los terminales que no estén activos.

Además esta asignación debe tener en cuenta otros factores como: SLA del usuario, QoS del tráfico requerido por cada terminal, imparcialidad (*fairness*), etc.

2.3.2. Eficiencia de un protocolo.

Las prestaciones de un protocolo MAC se basan en la medición de distintos parámetros como: rendimiento, retardo, tamaño medio de la cola del (de los) buffer(s) en una ONU, pérdida de paquetes,

jitter, estabilidad, justicia, etc. Destacamos como más importantes:

- **Eficiencia**, es el porcentaje de utilización máxima del canal.
- Retardo de acceso al medio.

Kleinrock [7] analiza el problema del caudal versus retardo en un protocolo. Se demuestra que no se puede lograr simultáneamente el objetivo ideal de maximizar la eficiencia o caudal máximo Φ_{max} y minimizar el retardo de acceso (d). Definimos la potencia de un protocolo (P) como la ratio:

$$P = \frac{\phi_{max}}{d} \quad (1)$$

El objetivo a alcanzar en el diseño o la evaluación de un protocolo es maximizar este valor.

2.4. MAC propuestos para la red EPON

Esta sección la dedicamos a describir los protocolos más importantes y que han sido objeto de evaluación por nuestra parte.

2.4.1. Algoritmos base

La tabla 1 describe los protocolos básicos de la referencia [8] que son la primera contribución a este tema. Estos algoritmos asignan el ancho de banda tan solo en función de la petición del terminal, por ello son los más sencillos de aplicar pero como veremos poco eficientes ya que NO tiene en cuenta el resto de usuarios en una misma rama de la red.

Tabla 1. Algoritmos base

Servicio	Definición	Descripción
Fixed	$W^{[i]} = W_{MAX}$	Tamaño de ventana asignado fijo. T_{ciclo} constante
Limited	$W^{[i]} = \min \left\{ \begin{array}{l} V^{[i]} \\ W_{MAX} \end{array} \right.$ $V^{[i]} =$ tamaño ventana solicitado	Tamaño de ventana según solicitado por el terminal. Valor máximo W_{MAX}
Gated	$W^{[i]} = V^{[i]}$	Se asigna a cada terminal lo que solicita (W sin límite) T_{ciclo} variable puede ser infinito
Constant Credit	$W^{[i]} = \min \left\{ \begin{array}{l} V^{[i]} + Const \\ W_{MAX} \end{array} \right.$	Similar al Limited. Δ constante de la ventana solicitada
Linear Credit	$W^{[i]} = \min \left\{ \begin{array}{l} V^{[i]} * Const \\ W_{MAX} \end{array} \right.$	Similar al anterior. Δ proporcional de la ventana solicitada

2.4.2. Algoritmos DBA

En esta sección trataremos los algoritmos en el que el ancho de banda se asigna de forma dinámica (DBA, Dynamic Bandwidth Allocation). Analizaremos en detalle los algoritmos DBA-1 [9] y DBA-2 [10]. Lo que creemos más destacable es que reparten el ancho de banda de forma proporcional entre los usuarios que superan el ancho acordado en el SLA, lo que guarda un paralelismo con el desarrollado por nosotros que presentaremos en la próxima sección. El lector puede analizar en detalle el mecanismo de asignación que hace cada uno y compararlo con el que presentamos a continuación.

Además de los reseñados vemos otros que presentan otras soluciones, en general la mayoría de ellos cumplen con lo establecido en el estándar aunque algunos de ellos proponen algunos cambios respecto a éste como: la topología de la red, el tipo de trama, etc. En la siguiente a continuación enumeramos las referencias de los que hemos encontrado en la literatura hasta hoy: [11] [12] [13] [14] [15] [16] y más recientemente [17] y [18].

2.5. Protocolo MAC: Cycle-based ordering and Dynamic Bandwidth Allocation Algorithm (CO-base)

El algoritmo que se propone en esta sección combina un planificador proporcional a la demanda de tráfico y a las características de tráfico contratadas, con un método de ordenamiento de las transmisiones. En la mayoría de los algoritmos propuestos la transmisión de las ONUs se hace seguida y en orden constante, es decir siguiendo un esquema round-robin. Por primera vez hemos propuesto esta idea en [19] pero utilizando una distribución del ancho de banda poco escalable. Posteriormente Zheng et al. [20] también proponen este esquema pero utilizando el mecanismo IPACT (servicio limited) el cual no es un algoritmo justo.

En este trabajo intentamos combinar estas dos opciones propuestas previamente en [4] utilizando el simulador OPNET y comparando con otros algoritmos como el IPACT.

El algoritmo parte de la definición de un tamaño medio de cola \bar{q}_i [bits], el cual es un valor constante. Este valor es acorde con la tasa de tráfico de una fuente o usuario de un ONU durante el intervalo de un ciclo, cuyo valor en segundos se pretende mantener constante cuando se tiene elevado tráfico. Cualquier cambio en el tamaño de la cola respecto a este valor conlleva a una redistribución del ancho de banda tal que se mantenga el tamaño de ciclo máximo. La relación entre el tamaño de ciclo máximo y \bar{q}_i es la siguiente:

$$T_{MAX} = \sum_{i=1}^N \frac{\bar{q}_i}{r} \quad (2)$$

Donde N es el total de ONUs activos en la red y r es la tasa de transmisión (1Gbps).

Una vez se han recibido los mensajes Report de parte de todos los ONUs activos, el OLT ejecuta el algoritmo de planificación donde asignará la duración y el orden de transmisión de los ONUs. El algoritmo funciona de la siguiente forma:

Primero definimos la variación del tamaño de cola medio del ONU i :

$$\Delta q_i(n) = \bar{q}_i - q_i(n) \quad (3)$$

Donde $q_i(n)$ es el tamaño de la cola i (información que se incluye en el mensaje Report) cuando el ONU i envía su mensaje Report en el ciclo n . Se calcula entonces la variación por exceso y la variación por defecto:

$$\Delta q^{exc}(n) = \sum_{\forall i | \Delta q_i(n) > 0} \Delta q_i(n) \quad (4)$$

$$\Delta q^{min}(n) = - \left(\sum_{\forall i | \Delta q_i(n) < 0} \Delta q_i(n) \right) \quad (5)$$

Para aquellos ONUs que solicitan menos tiempo de transmisión que la media del tamaño de cola (incluidos en $\Delta q^{min}(n)$), la duración que se les asigna es la equivalente en tiempo de lo que han solicitado: $q_i(n)$. Para los ONUs que solicitan más que su correspondiente \bar{q}_i , se les aplica el siguiente criterio:

Si $\Delta q^{exc}(n) < \Delta q^{min}(n)$ entonces

$$Q_i(n+1) = q_i(n)$$

Sino

$$Q_i(n+1) = \bar{q}_i + \frac{\Delta q_i(n) \cdot \Delta q^{min}(n)}{\Delta q^{exc}(n)}$$

Donde $Q_i(n+1)$ es la ventana de transmisión asignada al ONU i en el ciclo $n+1$.

Una vez distribuido el tiempo de transmisión en un ciclo para cada uno de los ONUs activos, se procede a establecer el orden de transmisión en cada caso, y luego el OLT enviaría el correspondiente mensaje de Gate a los ONUs. El método de establecimiento de orden dentro de un ciclo se basa en que transmita primero aquel que se supone más retrasado. Para ello se requiere que el mensaje report incluya un campo que indique el tiempo de llegada del primer paquete que espera en la cola, que es el que más tiempo lleva esperando. Se completa una tabla con los tiempos de llegada de cada ONU y se establece el orden de forma ascendente. Entonces, una vez definida la duración y el orden de transmisión de los ONUs, el OLT envía los mensajes de Gate a cada ONU a fin de que transmitan los datos esperando en cola en el momento calculado.

En este mecanismo se considera una cola por ONU, aunque se puede extender o generalizar el mecanismo cuando se tienen más de una cola por ONU.

3. Modelo de simulación basado en OPNET.

La simulación es una herramienta muy potente para conocer el comportamiento de un sistema variando los parámetros iniciales a voluntad. El objetivo que se busca utilizando esta técnica es recrear un modelo lo más fiable posible a la realidad, al menos en cuanto a las características a estudiar, para poder extrapolar los resultados obtenidos mediante la simulación.

El análisis de las prestaciones en una red de telecomunicaciones es uno de los campos en los que se aplica este tipo de técnica ya que se deben tener en cuenta multitud de factores que afectan al funcionamiento de la red y que es muy complejo el cálculo mediante modelos matemáticos; un simulador de red que debe ofrecer herramientas potentes con el objetivo de diseñar modelos, simular datos y analizar la red. OPNET MODELER es capaz de simular una gran variedad de redes; proporcionando a las universidades e ingenieros la forma más efectiva de evaluar las prestaciones de una red.

La simulación de la red EPON mediante OPNET nos permitirá:

- Conocer el comportamiento de la red en distintos escenarios: protocolos, tráfico, nodos, etc.
- Comparar el rendimiento y las prestaciones de los protocolos propuestos en un escenario común.
- Ajustar los parámetros de funcionamiento de la red para su óptimo rendimiento: tamaño de la ventana, tamaño del paquete, ciclos por segundo, etc. son valores típicos que deben ajustarse de forma precisa para conseguir un mejor funcionamiento global del sistema.

3.1. Condiciones iniciales del modelo

Para este proyecto se ha creado un nuevo modelo basado en OPNET totalmente original ya que no existían módulos semejantes en las librerías. En [21] se puede consultar una publicación anterior con un enfoque similar al aquí presentado.

Como todo modelo experimental tiene una serie de limitaciones iniciales pero en su haber debemos decir que se ha diseñado de forma que sea configurable, ampliable, fácil de usar e implementar, etc.

En primer lugar presentamos las restricciones que hemos previsto en el prototipo inicial para simplificarla puesta en marcha:

- Número de ONU's constante durante la simulación.
- Tráfico uniforme por ONU, lo que significa una única cola, tamaño de paquete fijo, y sin prioridades.

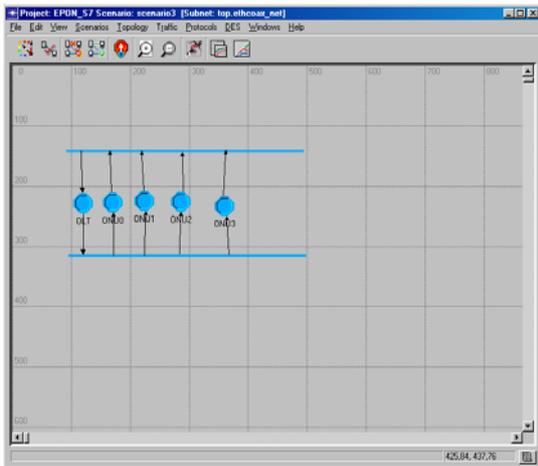


Figura 4. Red EPON del modelo.

- Canal perfecto, es decir sin errores, ni retransmisiones. Toda las ONU's reciben la información sin pérdida y ejecutan el algoritmo automáticamente sin error.
- Tiempo de propagación nulo.
- Emulación del comportamiento del canal ascendente. Con ello queremos decir que No se contempla la transmisión de datos de ningún tipo en el sentido OLT-ONU (tráfico descendente).

Obviamente este escenario ideal será objeto de revisión y ampliación en versiones posteriores.

3.2. Descripción del modelo

El diseño de un modelo en OPNET requiere múltiples elementos, a saber: topología de la red, nodos, links, formato de paquetes, procesos, estadísticas a obtener, etc. Para simplificar nos concentraremos en los más importantes.

3.2.1. Topología de la red

La figura 4 nos muestra la red del prototipo inicial.

En ella distinguimos la OLT y los nodos (ONUs) de usuario. Cada ONU transmite a través del BUS superior (upstream) en el que los mensajes solo pueden propagarse en el sentido usuario- cabecera, mientras que el bus inferior (downstream) transmite en el sentido cabecera (OLT) – usuario. Claramente las ONUs no pueden comunicarse entre ellas sino a través de la OLT, ésta recibirá las peticiones (REPORT) de cada una durante el ciclo y asignará la ventana de transmisión de cada ONU en el ciclo siguiente enviando el mensaje correspondiente (GRANT).

3.2.2. Nodo OLT

El nodo cabecera es único en la red como nos muestra la figura 4.

La figura 5 nos muestra los módulos que lo componen, en ella se distinguen claramente los nodos destinados a la recepción de mensajes (Filter, Distributor, report, data, etc.) y los destinados a la transmisión del mensaje de gate.

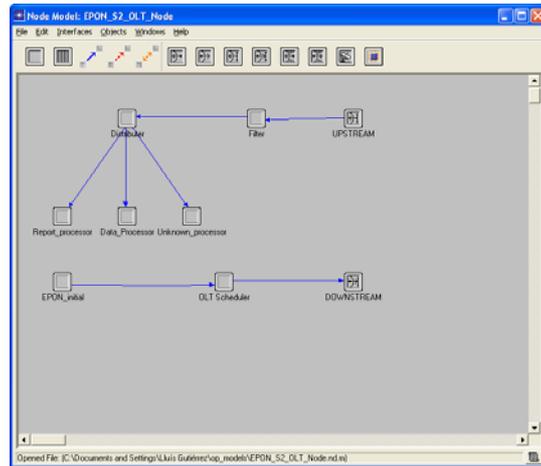


Figura 5. Nodo OLT

De todos ellos el más importante es el módulo de scheduling donde se realiza la planificación de cada ciclo al inicio de éste y se envían los correspondientes mensajes a los nodos de usuario. Es en este nodo donde se debe configurar el protocolo de acceso en el momento de realizar la simulación.

3.2.3. Nodo ONU

Los módulos que componen el módulo de usuario se pueden observar en la figura c. De nuevo podemos distinguir claramente los que están destinados a la recepción y a la transmisión. Podemos ver asimismo que existen varias colas que simulan distintas fuentes en cada ONU. (ver figura 6)

Valores iniciales

Los valores iniciales de la simulación son fácilmente modificables por el usuario al inicio de ésta utilizando para ello una ventana que permite asignar valores a los parámetros iniciales de la OLT y de cada una de las ONU's de forma sencilla para el usuario.

3.2.4. Dinámica de la simulación

La OLT calcula la ventana de transmisión y envía un mensaje de Gate a cada ONU al principio del ciclo.

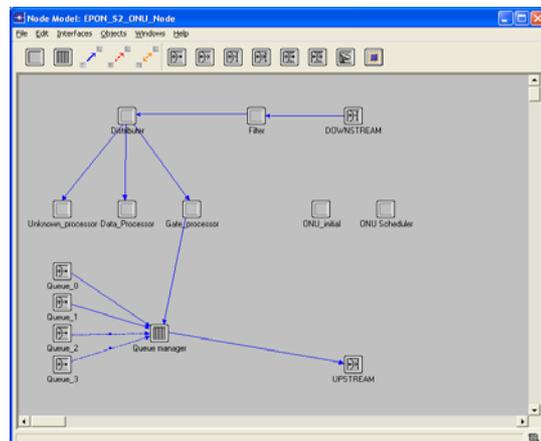


Figura 6. Nodo ONU

3.2.5. *Dinámica de la simulación*

La OLT calcula la ventana de transmisión y envía un mensaje de Gate a cada ONU al principio del ciclo (hay un espacio de guarda inicial previendo el RTT entre la ONU y la OLT). Automáticamente lanza una interrupción para el inicio del siguiente ciclo. Es la OLT quien determina cuando y en que cantidad transmite cada ONU atendiendo a sus peticiones y el algoritmo de planificación que se esté simulando.

Una ONU recibe los Gates enviados desde la OLT y en primer lugar comprueba el destinatario. Una vez ha certificado que el Gate le corresponde, planifica la transmisión de los datos pendientes del modo indicado en el mensaje. Previamente envía un mensaje del tipo REPORT en el que informa (request) de la ventana de transmisión requerida en el siguiente ciclo.

Este proceso se repite continuamente hasta finalizar la simulación una vez se alcanza el número de ciclos previamente programado.

4. Resultados obtenidos.

En esta sección presentamos los resultados obtenidos en la evaluación de los algoritmos descritos en las secciones anteriores.

Principalmente se podrá ver en detalle:

- Throughput (rendimiento) y retardo (Access delay). Y de ahí deduciremos la potencia de cada uno de los algoritmos.
- Inter-ONU scheduling.

4.1. Escenario de pruebas

En el escenario utilizado partimos de los valores iniciales siguientes:

- Ciclos por segundo: 1000
- Tciclo: 1 mseg.
- Paquete de datos: 1.500 bytes.
- Paquete de control: 64 bytes
- Velocidad del canal: 1 Gbps.
- Las ONU's están divididas según el volumen de tráfico (carga) que generan: heavy, medium and light.

4.2. Throughput y Retardo de los algoritmos básicos.

En primer lugar se muestran los resultados de los algoritmos que hemos denominado básicos descritos en la Tabla 1. Los valores de los parámetros iniciales utilizados en la simulación son:

- W_{MAX} : 100%. Significa que la ONU se le garantiza como máximo el doble de slots que le correspondería si fuera el algoritmo FIXED (TDMA).
- Credit: 33%. Lo que significa que asignamos un crédito inicial de un 33% de los slots que le

corresponden en el algoritmo FIXED sin ningún tipo de crédito adicional.

En la figura 7 se muestra la gráfica del throughput.

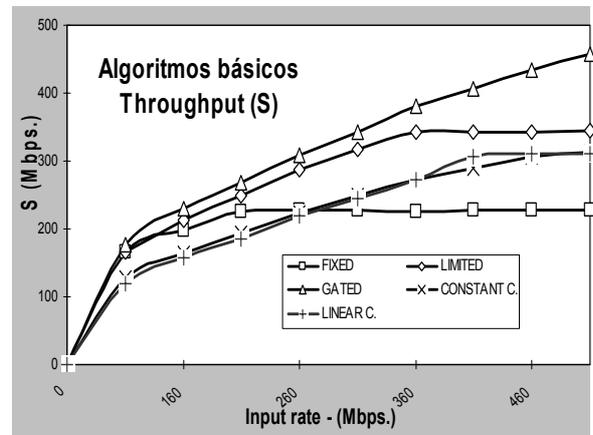


Figura 7. Throughput algoritmos básicos

Y en la figura 8 el retardo.

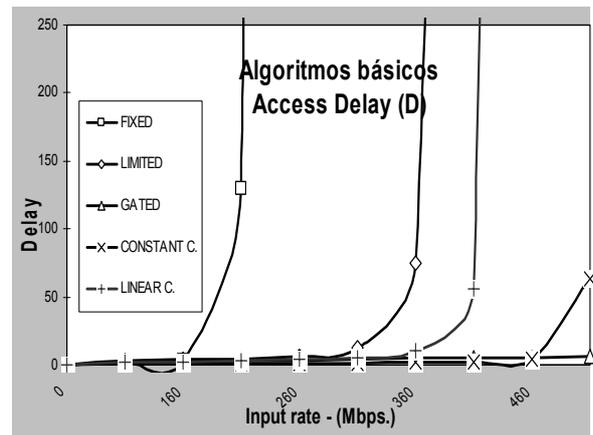


Figura 8. Retardo algoritmos básicos

A partir de los valores obtenidos se puede calcular la potencia del algoritmo tal como la hemos definido en la sección 2.3 y por lo tanto hacer la comparación entre ellos. (ver Tabla 2).

Observando las gráficas obtenidas vemos que los algoritmos GATED y CONSTANT CREDIT son los óptimos partiendo de los valores utilizados en la simulación, concluiríamos que sería mejor escoger el tipo CONSTANT CREDIT ya que en el GATED la ONU recibe todo el ancho de banda que solicita y esto penalizaría el retardo del acceso al canal del resto de usuario. Destacar también que el throughput máximo se consigue con los algoritmos GATED y LIMITED.

No profundizamos más en este análisis ya que los algoritmos DBA a continuación mejoran notablemente las prestaciones de los aquí presentados.

Tabla 2. Potencia algoritmos básicos

Algoritmo	S (Mbps.)	D (mseg.)	Potencia
FIXED	225,80	129,27	1,75
LIMITED	316,05	12,69	24,90
GATED	406,90	5,45	74,60
CONS. C.	305,82	4,09	74,77
LINEAR C.	272,35	10,79	25,23

Tabla 3. Potencia algoritmos DBA

Algoritmo	S (Mbps.)	D (mseg.)	Potencia
CO-base	459,49	3,02	152,05
CO-WFQ	535,24	7,08	75,57
DBA-1	407,72	6,53	62,46
DBA-2	359,69	19,56	18,39
CONST. C	305,82	4,09	74,77

4.3. Throughput y Retardo de los algoritmos DBA

Este apartado muestra las gráficas para los algoritmos que han sido objeto de la simulación, a saber: DBA-1, [9], DBA-2 [10], CO-base [19] y finalmente CO-WFQ. Además añadimos para comparación el resultado del mejor de los anteriores: el CONSTANT CREDIT.

El algoritmo CO-WFQ es una variante del que se ha presentado en la sección 2.5. Mientras que en el algoritmo base las ONU's transmiten en orden creciente, en éste se reordena la transmisión emulando el conocido algoritmo de scheduling WFQ (Weighted Fair Queueing).

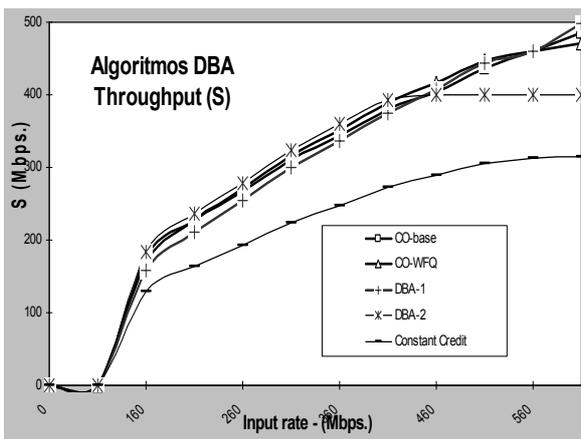


Figura 9. Throughput algoritmos DBA

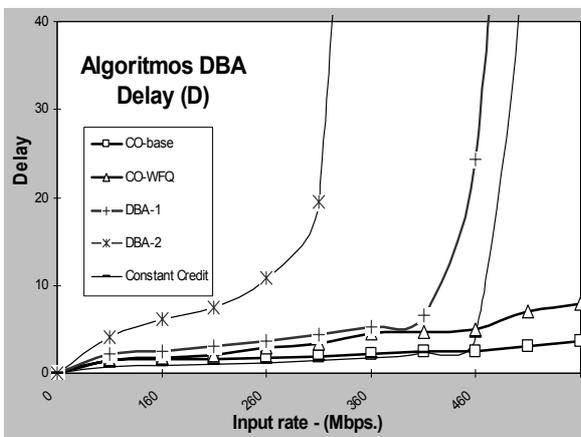


Figura 10. Retardo algoritmos DBA

Tal como hemos hecho en el apartado anterior la figura 9 muestra la gráfica del throughput y la 10 la del retardo. La Tabla 3 muestra la potencia de los algoritmos simulados.

En este punto nos podemos detener con mayor detenimiento y extraer conclusiones interesantes. En primer lugar el algoritmo CO presentado por nosotros es el que tiene mejores resultados de todos los simulados. El throughput se maximiza y a la par se minimiza el retardo por lo que las prestaciones son óptimas. El algoritmo denominado DBA-1 es el que se encuentra en tercer lugar y de hecho nos parece un buen algoritmo del que se pueden encontrar varias publicaciones en la literatura. Finalmente el algoritmo básico CONSTANT CREDIT queda en último lugar como podíamos prever.

Finalmente hemos presentado dos variantes del mismo algoritmo: CO-base y CO-WFQ, la evaluación llevada a cabo muestra que sus resultados son parecidos en las condiciones de simulación planteadas, pero el básico sin reordenar las salidas tiene una mejores prestaciones según queda demostrado en la Tabla 3.

4.4. Scheduling inter-ONU

El último apartado que vamos a considerar es el mostrar el retardo entre los distintos tipos de ONU's: Heavy (ONU0), medium (ONU1) y Light (ONU2). Para ello mostramos los valores esperados del retardo de cada ONU.

En la figura 9 mostramos el retardo inter-ONU (average) de los algoritmos presentados. Vemos que en todos los casos el valor absoluto del retardo es menor en el algoritmos CO-base, por ejemplo la ONU0 obtiene los resultados siguientes: ONU0 (Heavy load): CO-base: 0.0015; DBA-1: 0.004 y DBA-2: 0.016. Lo mismo ocurre con la ONU de carga media (ONU1) y la menos cargada (ONU2).

Además observamos que el retardo de las ONU's de distinta carga en un mismo algoritmo (fairness), es también mejor en este algoritmo: ONU0: 0.0015, ONU1: 0.0010 y ONU2: 0.0020.

Las gráficas presentadas son las más significativas y nos permiten extraer conclusiones muy interesantes del comportamiento de los distintos algoritmos.

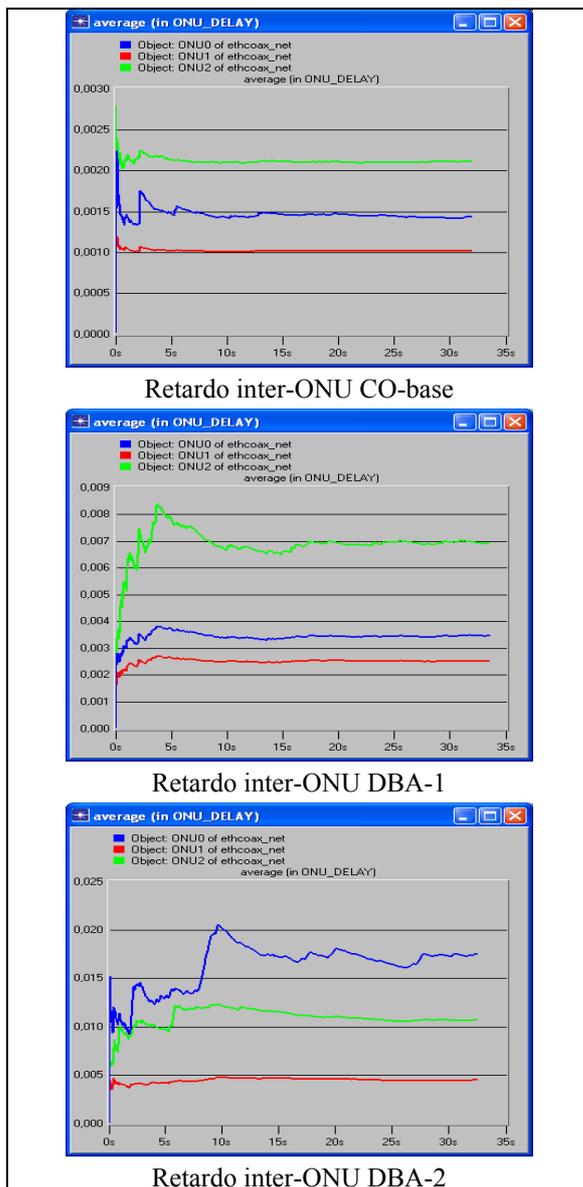


Figura 9. Retardo inter-ONU (average)

5. Conclusiones y trabajo futuro.

El trabajo que hemos abordado en este artículo se ha dirigido a cumplir dos objetivos:

- Desarrollar un nuevo algoritmo para la red EPON de acuerdo con el estándar IEEE802.3ah.
- Evaluar las prestaciones de éste junto con otros algoritmos modelando mediante el simulador OPNET MODELER

Ambos objetivos se han desarrollado a lo largo de esta publicación, y hemos podido comprobar que las prestaciones de este algoritmo son superiores a otros presentados y continuaremos mejorándolo en el futuro. Por ejemplo un paso necesario será analizar y mejorar el algoritmo presentado incorporando QoS.

El modelo creado para el simulador OPNET también se considera un buen resultado y de la misma manera deberemos aplicarlo y mejorarlo en otros escenarios. La experiencia adquirida también

nos ha de permitir desarrollar modelos similares para otro tipo de redes.

Aunque el punto débil de las redes EPON se considera que es su eficiencia y el control del retardo creemos que es posible obtener un algoritmo que pueda mejorar estos problemas de este tipo de red.

Agradecimientos

Este trabajo se ha elaborado bajo el marco del proyecto nacional CICYT: TIC2003-09042-C03-02 financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología.

Referencias

- [1] Escalabilidad en Redes Ópticas IPv6 con Calidad de Servicio (OPTINET6). Propuesta Doc. Interna. UPC, 2003.
- [2] ITU-T Standard G983. "Broadband optical access systems based on Passive Optical Networks (PON)". Disponible en <http://www.itu-t.org>
- [3] IEEE Draft P802.3ah -2994. „Ethernet in the First Mile”. Disponible en <http://www.ieee.org>
- [4] Marilet de Andrade and Sebastià Sallent. "Cycle-based Ordering And Dynamic Bandwidth Allocation Algorithm for Ethernet Passive Optical Network". Proc. IADAT tcn-2006, Portsmouth (England), 2006.
- [5] Sudhir S. Dixit. "IP over WDM: Building the Next Generation Optical Internet". Wiley Interscience, John Wiley & Sons, 2003.
- [6] Glen Kramer and Gerry Pesavento. " Ethernet Passive Optical Network (EPON): Building a Next-Generation Optical Access Network". IEEE Comm. Magazine, Feb. 2002, pp: 66-73.
- [7] Leonard Kleinrock. "Queueing Systems, Vol I : Theory". John Wiley Sons, 1975.
- [8] Glen Kramer, Biswanath Mukherjee and Gerry Pesavento. "IPACT: A Dynamic Protocol for an Ethernet PON". IEEE Comm. Magazine, Feb. 2002, pp : 74-80
- [9] Chaid M. Assi, Yinghua Ye and Sudhir Dixit. "Dynamic Bandwidth Allocation Protocol for Quality-of-Service over Ethernet PONs". IEEE JSAC, vol. 21, nº 9, Nov. 2003
- [10] Xue Chen, Meihong Yu, Yang Zhang and Yu Deng. "A Novel Upstream Dynamic Bandwidth Assignment Scheme for Ethernet PONs". Proc. ICCT 2003, pp: 748 – 750.
- [11] Hee-Jung Byun, Ji-Myung Nho and Jong-Tae Lim. "Dynamic bandwidth allocation algorithm in Ethernet Passive Optical Networks". Electronics Letters, 26th June 2003, pp: 1001-1002
- [12] Maode Ma, Yongqing Zhu and Tee Hiang Cheng. "A Bandwidth Guaranteed Polling MAC Protocol for Ethernet Passive Optical Networks". IEEE, [http:// www.ieee-infocom.org/2003/papers/ 01-03.pdf](http://www.ieee-infocom.org/2003/papers/01-03.pdf)
- [13] D. Nikolova, B. Van Houdt and C. Blondia. "Dynamic bandwidth allocation algorithms in EPON: a simulation study". Proc. of Opticomm, 2003. También en: <http://www.pats.ua.ac.be/publications>
- [14] Fu-Tai An, Yu-Li Hsueh, Kyeong Soo Kim, Ian M. White and Leonid G. Kazovsky. "A New Dynamic Bandwidth Allocation Protocol with Quality of Service in Ethernet based Passive Optical Networks".

- [15] Hihyoung Cho, Taesik Lim, Ikpyo Hong Sunkyong Kwon, Batchuluun. "Modified of Polling Mechanism with Threshold and Precondition for Market Activation in Ethernet PON". Proc. ICCT 2003, pp: 738 – 741
- [16] C. Foh, L. Andrew, M. Zukerman, E. Wong." Full-RCMA: A High Utilization EPON". OFC 2003, Vol. 1, , pp: 282 – 284
- [17] Xiaofeng Bai, Abdallah Shami, Nasir Ghani and Chadi Assi. "Statistical Bandwith Multiplexing in Ethernet Passive Optical Networks". IEEE Globecom 2005.
- [18] Abdallah Shami, Xiaofeng Bai, Nasir Ghani, Chaid Assi and Hussein T. Mouftah. "QoS Control Schemes for Two-Stages Ethernet Passive Optical Access Networks". IEEE JSAC, vol. 23, nro. 8, August 2005, pp.: 1467 – 1478.
- [19] M. De Andrade, D. Rincón and S. Sallent, "Dynamic Bandwidth Allocation Algorithm with Delay Control for Ethernet Passive Optical Networks", INFOCOM 2005 Student Workshop, March 2005.
- [20] J. Zheng and H. Mouftah, "An Adaptive MAC Polling Protocol for Ethernet Passive Optical Networks", ICC 2005, May 2005.
- [21] Nadav Aharony, Eyal Nave, Nir Naaman and Shay Auster. "QoS Based Bandwidth Allocation Schemes for Passive Optical Networks". Disponible en: <http://www.comnet.technion.ac/~cn17s02>