

La arquitectura de conmutación EFR

La arquitectura de Ethernet Fabric Routing o EFR se alza como el nuevo paradigma para la interconexión de redes Ethernet de cualquier tamaño. A diferencia de otras tecnologías actuales, esta arquitectura utiliza direcciones MAC estándar administradas localmente para realizar la conmutación y el encaminamiento físico de las tramas.

La actual convergencia de las redes alrededor del protocolo IP para todo tipo de servicios (*triple play, quadruple play*) hace que los requisitos para las redes sean cada día más exigentes. Sin embargo, el protocolo IP fue concebido para dar un servicio de tipo *best-effort*. La pila de protocolos TCP/IP se acerca a su límite de prestaciones y, por otra parte, el paradigma de los conmutadores Ethernet transparentes escala mal porque carece de una estructura verdaderamente jerárquica de direccionamiento. El nuevo servicio global de telecomunicaciones basado en Ethernet (UETS), permite utilizar las direcciones MAC locales de forma jerárquica y también topológica, lo que favorece tanto el encaminamiento jerárquico como la conmutación directa por hardware. Esta técnica, a la que denominamos Ethernet Fabric Routing (EFR), proporciona escalabilidad, altas prestaciones y seguridad, solucionando así los problemas de las redes Ethernet actuales, permitiendo a la vez superar las limitaciones del TCP/IP. Los dominios de UETS pueden existir como islas utilizando las direcciones de UETS coordinadas opcionalmente sobre una base global.

De las tecnologías disponibles, sólo Ethernet proporciona altas prestaciones a bajo coste. Los conmutadores Ethernet



tienen claras ventajas competitivas en la relación coste/prestaciones respecto a los routers, debido a su mayor simplicidad. Mientras que los *bridges* operan en el nivel 2, sobre una sola red, los routers operan en el nivel 3 sobre múltiples redes interconectadas. Como ventaja adicional, los equipos de nivel 2 no plantean problemas de integración con los equipos existentes al operar sobre interfaces Ethernet. Los routers más económicos son los llamados conmutadores multicapa (*layer 3 switches*), que son routers a nivel campus, no enrutadores con capacidad WAN y reducen la diferencia de precio; pero aun así los conmutadores Ethernet básicos son más baratos y no precisan administrar direcciones IP. El problema que plantea su utilización generalizada es la escalabilidad, porque al carecer de una estructura de direcciones no es posible el encaminamiento jerárquico en redes de gran tamaño. Los conmutadores actuales carecen de mecanismos de encaminamiento como los de los routers, que superen las limitaciones del árbol de expansión (*spanning tree*). Una de ellas es la baja utilización de la red, porque el protocolo de árbol básico que conecta a todos los nodos y se utiliza para la difusión de las tramas cuando su destino no es conocido por el conmutador que recibe la trama.

Tecnología UETS/EFR

Los equipos basados en la tecnología UETS/EFR tienen aún más ventajas en la relación en precio/rendimiento, porque pueden ser extremadamente simples, a la vez que resuelven el problema de la escalabilidad al utilizar una estructura de direcciones jerárquica. Los conmutadores UETS no utilizan el protocolo de árbol de expansión

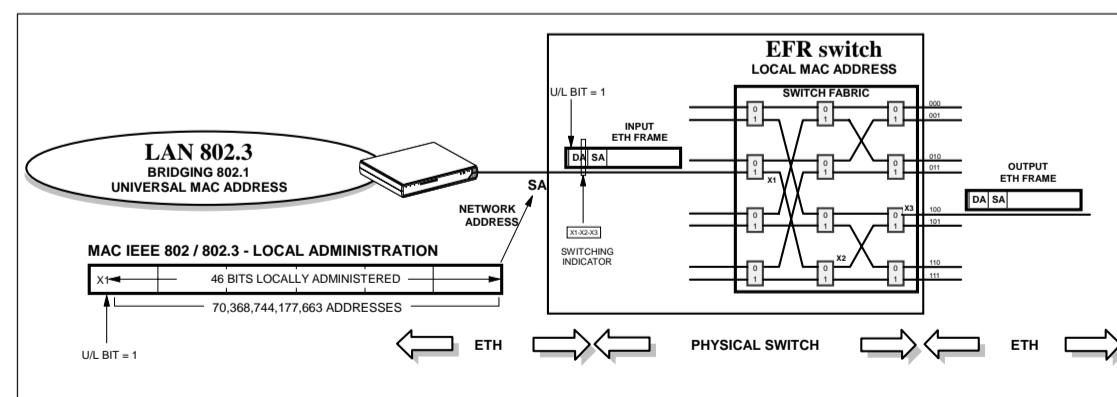


Figura 1: Conmutador UETS/EFR.

NOTA - Las publicaciones sobre UETS/EFR están disponibles en: <http://www.LMdata.es/uets.htm>

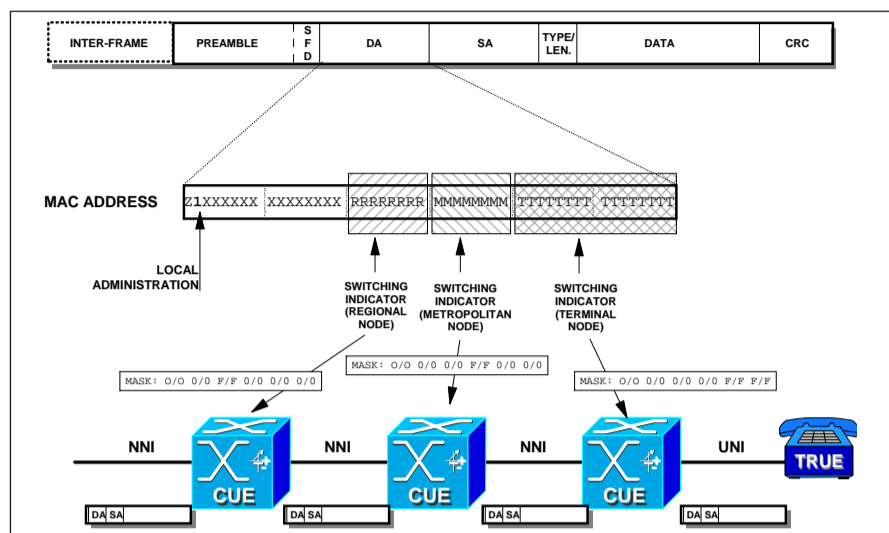


Figura 2: Principio de direccionamiento y conmutación. Ejemplo de jerarquía.

(*spanning tree*), el mecanismo usado en las redes Ethernet con IP para la difusión de paquetes ARP, DHCP y otros servicios que utilizan *broadcast*. Dentro del mismo dominio UETS no se usa ARP, los terminales obtienen la dirección UETS vía UETS-DNS de modo análogo a lo que ocurre con el DNS IP. El terminal interroga con el nombre de dominio y obtiene la dirección jerárquica UETS en lugar de/además de la dirección IP.

Por otra parte, la pila de protocolos IP, clave del éxito de Internet, está demostrando sus limitaciones: IP y TCP fueron diseñados para posibilitar la interoperabilidad entre redes dispares, no para dar las máximas prestaciones. El funcionamiento de los servidores del TCP/IP encuentra su límite en el rango del Gigabit por segundo. Los requerimientos de Internet para aplicaciones sensibles al retardo, tal como voz y vídeo, son muy diferentes de los servicios típicos de los datos del TCP/IP. Se precisa, pues, un nuevo protocolo estándar que asegure la alta calidad de servicio requerida para transmitir esta clase de tráfico y para garantizar el servicio a los usuarios finales. En este sentido, se ha propuesto Multiprotocol Label Switching (MPLS), actualmente utilizado en el núcleo de la red, pero no escala lo suficiente para ser aplicado en los bordes de la misma. MPLS establece caminos virtuales basados en etiquetas apilables entre los routers de borde del dominio. Los equipos son complejos y costosos. MPLS se implementa entre los niveles de red y de enlace. El encaminamiento IP se ejecuta en el nivel de red, limitando su rendimiento máximo. UETS encamina en capas, con direcciones de nivel de enlace y puede operar sin tablas de enca-

Los equipos basados en la tecnología UETS/EFR pueden ser extremadamente simples, a la vez que resuelven el problema de la escalabilidad al utilizar una estructura de direcciones jerárquica

minamiento. UETS combina conmutación pura por dirección destino y routing opcional (*micro routing*). IPv4 tiene el problema de la escasez de direcciones. IPv6 no, pero al precio de complejidad excesiva y todavía

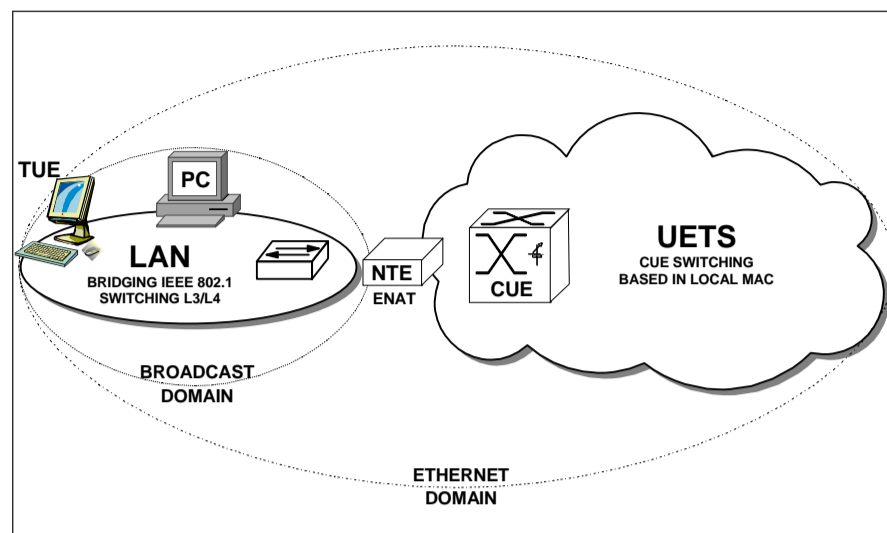


Figura 4: Dominio UETS y dominio clásico Ethernet.

no se ha adoptado de forma generalizada, tras muchos años de estudio e implementación.

Arquitectura de red

UETS extiende sin discontinuidades los dominios Ethernet, sin utilizar routers IP, en una parte o toda una red empresarial o de proveedor de servicios, como la de un ISP. Los dominios Ethernet son de nivel 2, mientras que IP es de nivel 3: en el primer caso tenemos una sola red, mientras que en el segundo tenemos varias redes interconectadas. En UETS los equipos terminales (servidores y *hosts*) de la red pueden ser tanto estándar, funcionando solamente con el TCP/IP, o bien implementar doble pila (*dual stack*) de protocolos (L2 y L3). Estos terminales se

denominan TUE y utilizan Ethernet sobre el protocolo LLC para la comunicación dentro del dominio de UETS y TCP/IP estándar para las comunicaciones externas e internas. El principio de funcionamiento de la conmutación se muestra en las figuras 1 y 2 y la pila dual en la figura 3.

A. Elementos de la red

Un dominio de UETS es una red integrada por los conmutadores UETS (*Commutador Universal Ethernet* o CUE), las terminaciones de red (*Terminador de Red Universal* o TRUE/NTE) y los terminales o sistemas finales (*Terminal Universal Ethernet* o TUE) según se describe en la figura 4. Los nodos finales de UETS pueden ser *host* o servidores. Dentro de un dominio de UETS, los

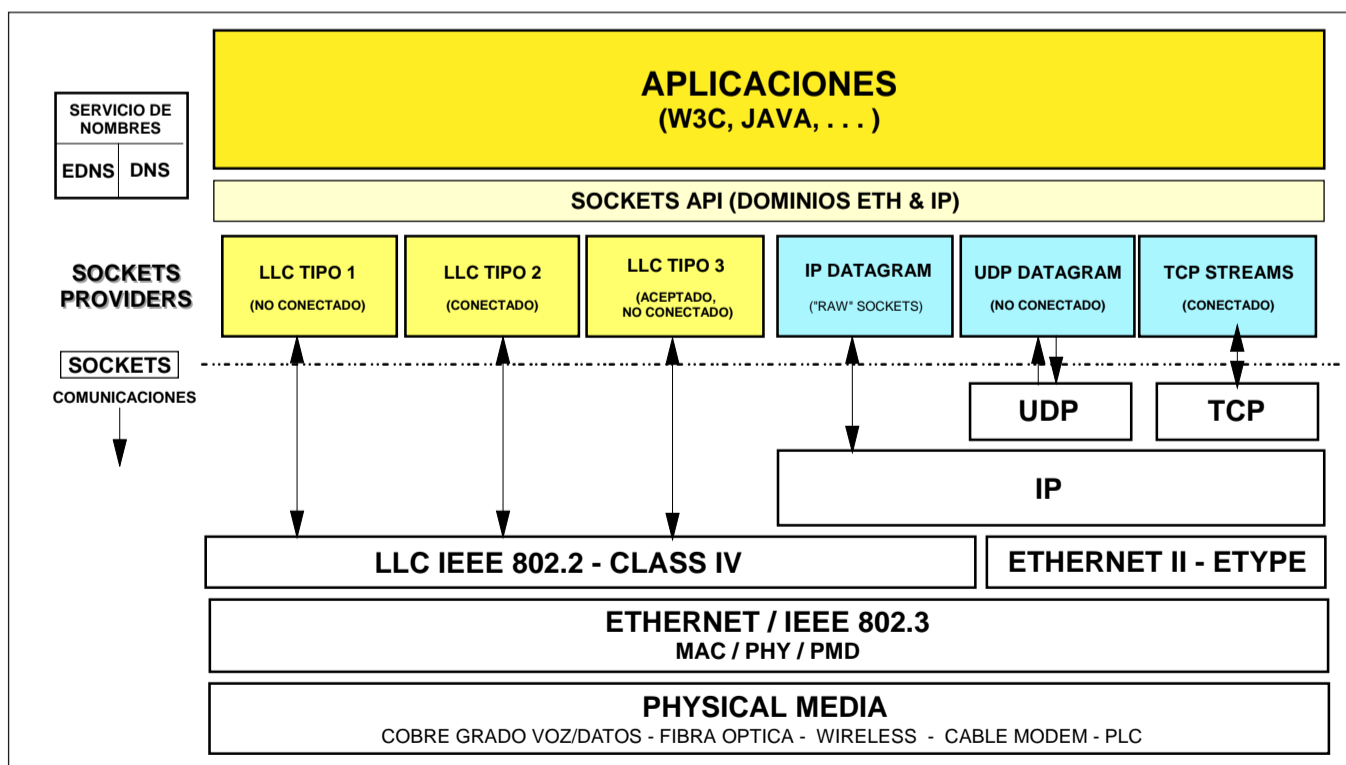


Figura 3: TUE Dual stack LLC/Eth + TCP/IP/Eth.

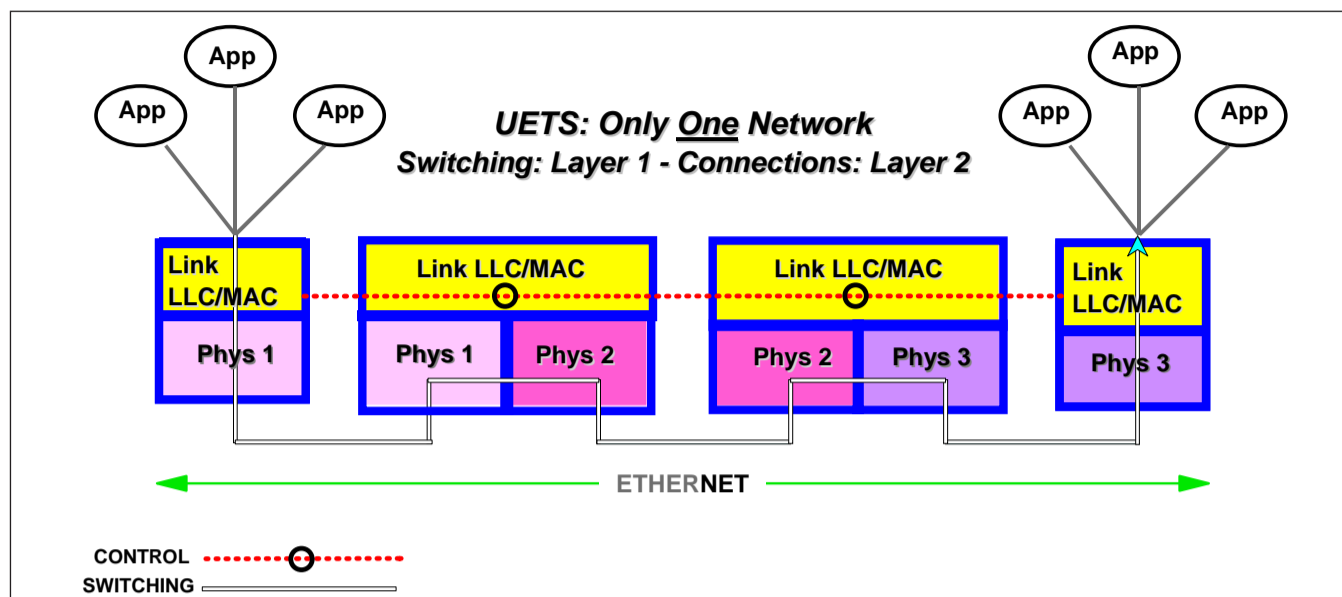


Figura 5: LLC sobre Ethernet: control y conmutación.

terminales pueden utilizar cualquiera de las dos pilas de protocolos TCP/IP o LLC sobre Ethernet. Un dominio UETS puede tener casi cualquier tamaño: un campus local, una red de un ISP, una red metropolitana o una red global. Para realizar la traducción de nombres del dominio o de direcciones IP a direcciones de UETS se utiliza un servicio Ethernet DNS (EDNS) dentro del dominio.

B. Pila de protocolos

La pila de protocolos nativa UETS es simple: Las aplicaciones utilizan *sockets* para interconectarse con el protocolo del LLC de la capa dos en sus variantes sin conexión y orientada a conexión. La capa de red (IP) no se utiliza. Algunas funciones de la capa de transporte como identificación de la conexión (puertos) se ejecutan en la capa dos. Para la interoperabilidad con los equipos y redes TCP/IP, UETS utiliza una arquitectura dual de comunicación con LLC 802.2 sobre 802.3 y TCP/IP sobre Ethernet 802.3. Los sistemas finales en UETS pueden utilizar todos los protocolos TCP/IP de forma estándar.

El sistema de UETS reduce la complejidad de la red a una simplicidad asombrosa: apenas dos protocolos (LLC/ETH) combinados de diversas maneras proporcionan todos los tipos de servicio: Ethernet 802.3 transporta la información y el LLC/802.2 realiza el control según se describe en la figura 5.

C. LLC sobre Ethernet

Las aplicaciones actuales utilizan puertos TCP en la capa del protocolo

de transporte para identificar el punto de acceso a servicio en una máquina y para definir las conexiones usando los identificadores de terminación (*endpoint identifiers*) compuestos por el par (protocolo, puerta). En la pila UETS, con LLC sobre Ethernet, esta función se puede realizar usando los puntos de acceso al servicio de enlace (LSAP), los cuales proporcionan los puertos de interfaz para los usuarios sobre la subcapa LLC.

D. Control de flujo y de congestión

En las redes IP el control de flujo y de congestión lo realiza fundamentalmente el protocolo TCP de extremo a extremo. Conviene recordar que los mecanismos de TCP/IP fueron diseñados para obtener transporte fiable y controlado extremo a extremo usando múlti-

ples redes de diversa calidad y escasa fiabilidad: las redes IP de tipo *best effort*. Este enfoque de TCP/IP empieza a mostrar sus limitaciones en las redes actuales de altas prestaciones y baja tasa de errores. Actualmente se discute el uso de control de congestión en capa dos en el grupo IEEE *congestion management* y se prepara un nuevo estándar. Los objetivos del control de congestión en capa dos incluyen hacer capaz a Ethernet de soportar aplicaciones Fibre Channel y asimismo el uso de Ethernet como sistema de interconexión interno en los sistemas. UETS puede satisfacer estos objetivos usando la conmutación de tramas HW basada en dirección destino. El control de congestión de que se trata en ambos casos, (IEEE y el que nos ocupa UETS) es un control realiza-

do salto a salto, en cada nodo, a diferencia del control de flujo TCP, realizado extremo a extremo.

Direccionamiento MAC UETS

UETS utiliza direcciones localmente administradas de Ethernet (LMAC). Sin embargo, si las direcciones locales se coordinan globalmente es posible realizar encaminamiento interdominios UETS. Las direcciones MAC en UETS utilizan el formato estándar de IEEE 802.1 de Ethernet. El bit *universal/local* (U/L), adyacente al bit dirección *individual/grupo* (I/G), se fija al valor *local*. Según la definición de IEEE Std 802-2001, esto significa que la dirección entera de 48 bits se administra localmente, según describe la figura 6. Las direcciones universales (UMAC) no se permiten dentro de un dominio de UETS. Es posible, sin embargo, desviar las tramas que contienen UMACs en los nodos de entrada al dominio UETS hacia una red de *bridges* estándar para su encaminamiento mediante puentes estándar.

A. Asignación de direcciones LMAC

El uso de direcciones MAC controladas localmente (LMAC) permite que sean asignadas de forma jerárquica e incluso coordinada con otros dominios UETS. Esto hace posible el encaminamiento jerárquico mediante conmutación simple hasta en dominios de tamaño global, algo imposible con las direcciones universales (planas) UMAC empleadas en las actuales redes basadas en Ethernet. La configuración de las direcciones MAC se puede realizar mediante gestión de red estándar vía SNMP sobre Ethernet [rfc1089] o mediante protocolos automáticos de asignación de dirección ejecutados de forma distribuida desde el conmutador UETS que actúa como origen (prefijo) de direcciones del dominio UETS a los conmutadores UETS/EFR del dominio.

B. Asignación de direcciones de LMAC ligadas a la topología física (EFR)

La conmutación EFR se basa en la correlación de las direcciones del MAC con la arquitectura de hardware física. Si se desea utilizar la conmutación opcional EFR, las direcciones de LMAC se asignan de acuerdo con la topología de interconexión de la red de conmutadores y con el

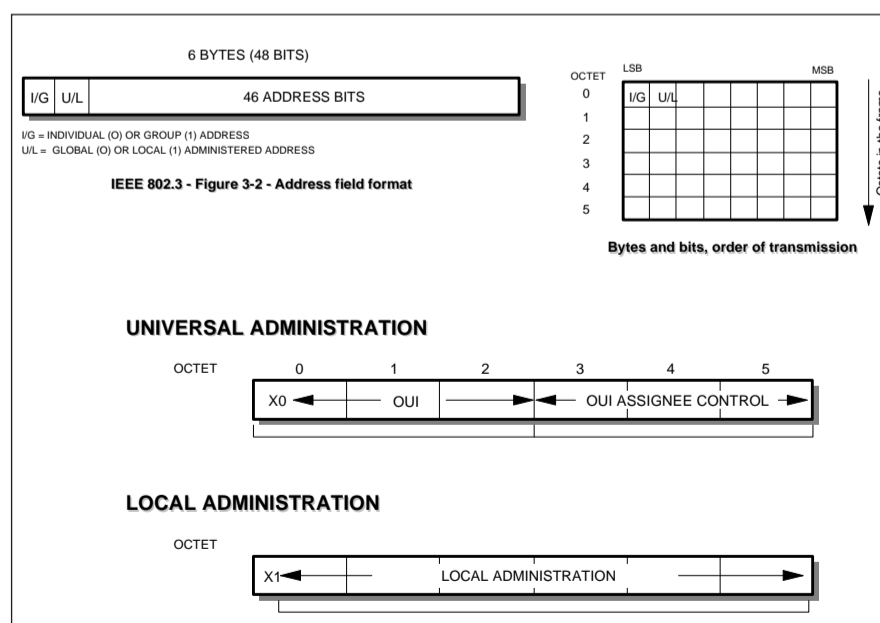
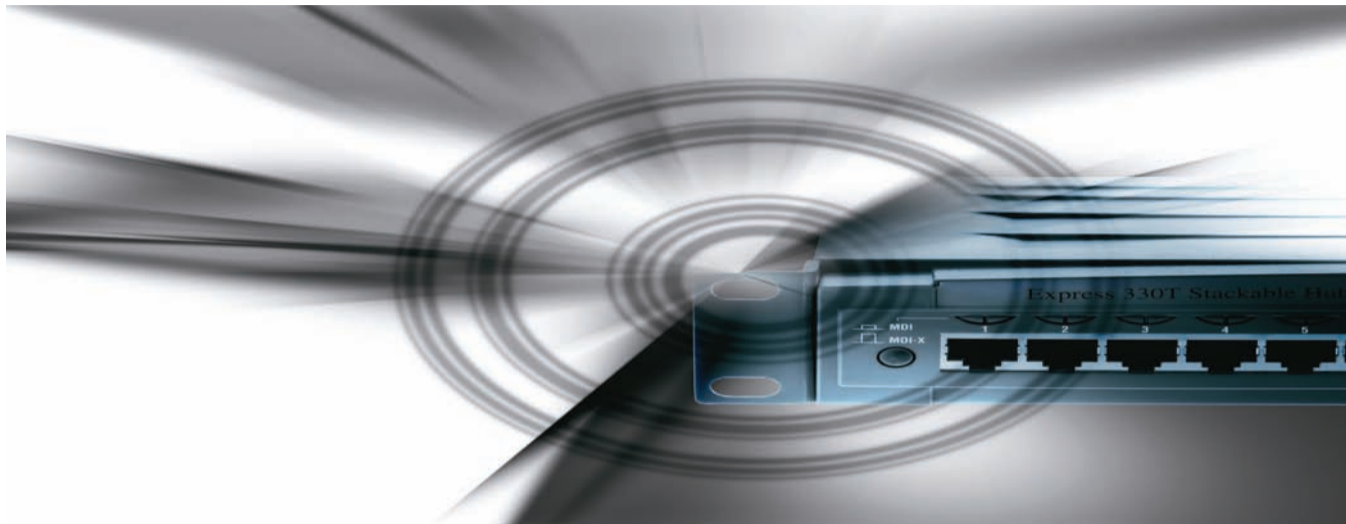


Figura 6: IEEE 802.3 MAC address format.



diseño físico de los conmutadores, haciendo posible la conmutación de tramas basada solamente en la dirección de destino MAC UETS sin tablas ni etiquetas, a la máxima velocidad posible con encaminamiento dentro de banda.

C. Direcciones móviles y fijas

Una asignación posible de las direcciones LMAC para el uso móvil y fijo de las direcciones consiste en usar un bit contiguo al bit U/L, para indicar dirección móvil o fija UETS. La dirección móvil puede inicializarse al mismo valor de la LMAC fija. El funcionamiento sería totalmente análogo al de los actuales teléfonos móviles, empleando las direcciones MAC del mismo modo que los números telefónicos actuales. Incluso sería posible una numeración decimal, convirtiendo los valores binarios correspondientes.

D. Modo Pseudo-IP

El formato de direcciones MAC de 6 octetos tiene capacidad más que suficiente para permitir utilizar las direcciones estándar IPv4 de 4 octetos replicadas como direcciones de capa dos, insertándolas en la dirección de 6 octetos. Esto abre muchas posibilidades para la compatibilidad en dominios IP.

E. Direcciones Multicast

Las direcciones de grupo de multidifusión (*multicast*) se pueden utilizar en los dominios UETS. Los conmutadores UETS pueden implementar la inspección de las suscripciones de *hosts* a grupos multicast de una manera similar a *IGMP snooping* y *GMRP* realizada en los conmutadores. El multicast se establece en UETS como un plano complementario de la conmutación

El sistema de UETS reduce la complejidad de la red a una simplicidad asombrosa, apenas dos protocolos (LLC/ETH) combinados de diversas maneras proporcionan todos los tipos de servicio: Ethernet 802.3 transporta la información y el LLC/802.2 realiza el control

ción mediante suscripciones a los grupos multicast.

Operación

Para establecer la comunicación con una máquina del dominio de UETS, se puede conocer la dirección MAC destino, o si el valor conocido es el nombre de dominio del destino o la dirección IP, estos se resuelven o traducen a su dirección MAC mediante Ethernet DNS. En la pila de protocolos simplificada de LLC sobre Ethernet, las funciones del protocolo de transporte las realiza el protocolo de

nivel de enlace: el protocolo TCP es substituido por el LLC tipo 2 (servicio orientado conexión), permitiendo así el control de flujo extremo a extremo y el de congestión en cada nodo de red. El protocolo UDP es substituido por el LLC tipo 1 (servicio sin conexión, sin confirmación). En las terminaciones de red que interconectan el dominio con redes LAN estándar 802.1, se requiere el encapsulado o la traducción de las direcciones estándares MAC a UETS y viceversa para permitir la interoperabilidad. En el dominio UETS, las

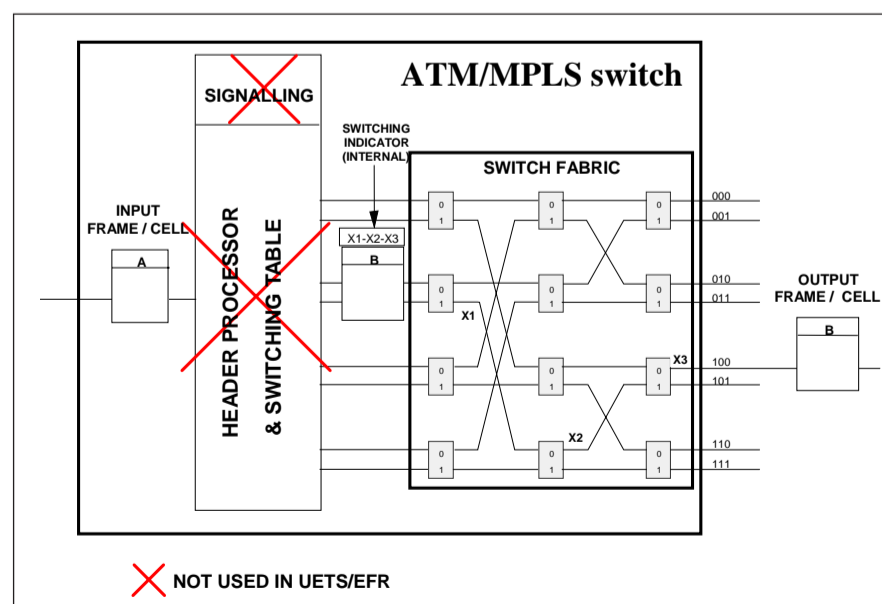


Figura 7: Conmutador EFR basado en un hardware ATM o MPLS.1

direcciones MAC son físicamente dependientes de la red de conmutación y controladas por el ISP o el dueño de la red, permitiendo la conmutación basada en hardware y reforzar la seguridad de la red previniendo la falsificación de direcciones MAC en las tramas Ethernet. También es posible ocultar las direcciones MAC jerárquicas locales (UETS) a los usuarios para reforzar la seguridad.

A. Encaminamiento y conmutación Ethernet EFR

Los términos encaminamiento (*routing*) y conmutación (*switching*) se utilizan a veces indistintamente. En la red de UETS/EFR se distinguen claramente: la conmutación de tramas se realiza de forma jerárquica hacia abajo a través de los conmutadores de un dominio común de direcciones UETS (es decir bajo un mismo administrador de direcciones UETS), decodificando por etapas sucesivas los bits de la dirección destino mediante máscaras aplicadas consecutivamente en los conmutadores correspondientes. En la dirección ascendente, las tramas pueden conmutarse jerárquicamente hacia arriba a través de los conmutadores sucesivos hasta alcanzar un conmutador que tenga un prefijo común a la dirección destino y a continuación se desciende jerárquicamente por las ramas necesarias hasta alcanzar la dirección LMAC destino. La conmutación se realiza mediante mecanismos simples hardware que utilizan los bits de las direcciones del MAC para seleccionar el puerto de salida y no necesitan tabla de reenvío, evitando así el tiempo de acceso de memoria para consultarla. El *encaminamiento* se realiza en los conmutadores UETS para encaminar tramas hacia su área de destino (es decir las tramas cuya dirección destino está fuera del dominio de direcciones UETS del conmutador). Esto se denomina *micro-encaminamiento* (*micro routing*), que utiliza tablas de pequeño tamaño para el encaminamiento de tramas entre dominios UETS. Es interesante destacar que tanto la conmutación como el encaminamiento se realizan sin cambio de etiquetas (*label swapping*) en los nodos a diferencia del MPLS.

B. Diseños de conmutador

La técnica EFR está concebida para realizar la conmutación de las tra-

mas en la capa física. Se adapta perfectamente a los conmutadores de tipo Banyan donde la selección de la trayectoria de conmutación es realizada por el descifrado sucesivo bit a bit del campo de dirección de destino. No obstante pueden utilizarse otros tipos, como los basados en conmutación de etiquetas (*tag switching, label switching*) de ATM o MPLS. La figura 7 muestra un conmutador de tipo EFR (Banyan) que ilustra esta opción. El intercambio de la etiqueta no es necesario, evitando lentos y costosos accesos a memoria y la modificación de las tramas. El conmutador no precisa tablas internas para obtener la correspondencia de etiquetas con puertas de salida. Los conmutadores de tipo Fibre Channel utilizan direcciones de 24 bit y se pueden utilizar directamente, aplicando la máscara correspondiente a la dirección MAC destino.

El conmutador utiliza los bits de dirección MAC destino, especificados por la máscara asignada al conmutador, para decodificar el puerto de salida. No es preciso el procesamiento de la cabecera ni consultar la tabla de reenvío. No existe sobrecarga adicional en la trama ni en el protocolo para el direccionamiento.

C. Topologías de red: Mallas y árboles

La arquitectura UETS, especialmente si se utilizan conmutadores de tipo Banyan, conduce de forma natural a la utilización de topologías de red de tipo jerárquico en árbol que permiten conmutar las tramas mediante la decodificación de dirección hasta alcanzar el destino. Aunque la topología predominante de las redes de Ethernet de edificio y campus es jerárquica con agregaciones sucesivas de tráfico en los troncales (*backbones*) horizontales y verticales, las redes UETS pueden tener una topología arbitraria. La regla general a tener en cuenta es que los enlaces del conmutador que pertenecen al árbol jerárquico de direccionamiento se autoconfiguran para encaminar mediante conmutación UETS y los enlaces transversales, adicionales al árbol jerárquico enrutan las tramas usando micro-encaminamiento.

Otros Aspectos

A. Escalabilidad y tamaño de dominios

La arquitectura de la conmutación de EFR puede escalar desde domi-



nios pequeños hasta dominios de tamaño global. La escalabilidad de UETS y de EFR de dos características: su jerarquía sin fisuras y el tamaño de direcciones MAC de 48 bits, que permiten hasta 2^{46} direcciones *unicast*, más de 70 billones. En la figura 2 se muestra un ejemplo de direccionamiento jerárquico. Si se precisa mayor número de direcciones, el empleo de UETS con encapsulado MAC-en-MAC y VLANs proporcionaría un número de direcciones superior a la capacidad de IPv6.

B. VLANs y encapsulados

La arquitectura es totalmente compatible con IEEE 802.1Q VLANs y otros encapsulados de Ethernet tales como MAC en MAC o SNAP. Se utiliza encapsulado en los conmutadores frontera UETS que interconectan redes 802.1D estándar.

C. QoS y CoS

Garantizar la calidad (QoS) extremo a extremo es importante en algunos servicios. La pila de protocolos propuesto para UETS soporta la diferenciación del servicio en cuatro clases del tráfico básicas:

El tráfico de tiempo real *"premium"* utiliza el protocolo sin conexión no confirmado, LLC 1.

El tráfico de *"misión crítica"* utiliza el protocolo LLC 2, orientado a conexión, confirmado, con control de flujo extremo a extremo.

El tráfico *"stop and go"* opera en modo half-duplex, como el empleado en el protocolo BSC, usa el servicio sin conexión con confirmación LLC 3.

El tráfico TCP/IP, *"best effort"*, se transporta sobre tramas con EtherType 0800 (IP).

D. Seguridad

La arquitectura de UETS/EFR proporciona seguridad de forma intrínseca en la capa dos. Debido a la asociación directa de las direcciones MAC al punto físico de acceso a la red, no pueden ser suplantadas, por ser asignadas por el propietario de la red (autoridad del dominio UETS, el administrador o el ISP), y se requiere acceso físico al punto de acceso para realizar la suplantación. Esta seguridad se puede complementar con 802.1X. Tampoco son posibles los ataques al protocolo de árbol de expansión, dado que no se ejecuta dicho protocolo en la red conmutada UETS. Puesto que los conmutadores no aprenden direcciones, los ataques basados en saturar de tráfico el conmutador para que pase a operar como un concentrador tampoco son posibles.

E. Prestaciones previstas de UETS

El empleo de los conmutadores Banyan y topología de red que refleje la jerarquía de conmutación permite máximas prestaciones al mínimo coste. Empleando otro tipo de con-

mutadores, las prestaciones son también elevadas. En ambos casos se aprovecha también la ventaja de utilizar una pila de protocolos reducida, con *interface* de aplicaciones a nivel de enlace.

La simplicidad de la conmutación física de UETS/EFR, sin las limitaciones impuestas por el acceso de memoria con las tablas del encaminamiento o de las operaciones de búsqueda, permite el funcionar a la velocidad máxima del hardware. Los routers más rápidos alcanzan hoy en día una capacidad de conmutación por chasis de 640 Gbps. Empleando conmutadores comerciales de tipo Banyan, ha sido demostrada recientemente la conmutación de hasta 10 Tbps en un solo chasis, con una escalabilidad estimada de hasta 50 Tbps por chasis.

Conclusiones

Las redes actuales presentan limitaciones de prestaciones debidas a las de escalabilidad en la capa de enlace y al rendimiento máximo del protocolo TCP/IP. Estas dos preocupaciones básicas han generado la nueva y simple arquitectura de conmutación UETS/EFR Ethernet descrita en este artículo. UETS es compatible con las redes estándar del TCP/IP y presenta ventajas excepcionales: opera tan rápidamente como el protocolo de transmisión de datos permita, hasta los 50 Terabit por segundo con el hardware hoy en día disponible; proporciona seguridad inherente en la capa dos; tiene latencia menor que los protocolos TCP/IP; permite conmutación a las velocidades máximas hardware, la utilización de todos los enlaces y escala a redes de cualquier tamaño. La arquitectura se adecua tanto a las redes de ámbito LAN como metropolitano y de área extensa (MAN/WAN). Las aplicaciones especialmente indicadas para esta arquitectura son: Proveedores de Internet (ISP) y *"quadruple play"*, distribución de televisión de alta definición HDTV, redes seguras, redes privadas virtuales de capa dos (L2VPNs), computación de altas prestaciones y redes de almacenamiento (SAN).

José Morales Barroso
Guillermo Ibáñez

La página en red de UETS/EFR

<http://www.LMdata.es/uets.htm>