

Guillermo A. Ibáñez Fernández¹,
Juan A. Carral Pelayo¹, Alberto
García-Martínez², José M. Arco
Rodríguez¹, Arturo Azcorra
Saloña²

¹Universidad de Alcalá de Henares; ²Univer-
sidad Carlos III de Madrid

<{guillermo.ibanez, jac, josem.arco}@uah.es>,
<{alberto, azcorra}@it.uc3m.es>

1. Introducción

Ethernet ha perdurado y se ha afianzado como tecnología de interconexión a lo largo de más de 30 años, pero su entorno de aplicación ha cambiado y se ha extendido radicalmente. Ethernet fue inventada para interconectar ordenadores localmente a través de un segmento compartido (LAN) donde se realizaba la conmutación. La situación actual es justamente la opuesta: predominan las redes con conexiones punto a punto interconectadas mediante puentes transparentes (conmutadores). La conmutación de tramas se realiza actualmente en cada conmutador Ethernet en vez de en cada segmento compartido de la LAN, lo que evita las colisiones. Los conmutadores presentan una muy alta capacidad de conmutación entre múltiples puertos de alta velocidad a bajo coste. Las redes Ethernet actuales tienen por ello un rendimiento potencialmente muy alto, pero este rendimiento es severamente restringido por las limitaciones del protocolo de árbol de expansión (STP). Este protocolo bloquea todos los puertos de los conmutadores conectados a enlaces que puedan crear bucles, dejando solamente activos N-1 enlaces en una red de N nodos, concentrando así el tráfico en una pequeña parte de la infraestructura instalada y en particular cerca del puente raíz del árbol de expansión. La necesidad de redes eficientes formadas exclusivamente por conmutadores de Ethernet que superen estas limitaciones está aumentando a medida que las prestaciones de los mismos aumentan y los precios bajan. Pero esta búsqueda del dispositivo ideal de interconexión como una combinación de enrutador y de puente (*puente enrutador, routing bridge*) ha sido constante desde la aparición de los primeros puentes transparentes.

Los puentes exhiben características importantes tales como: no precisar administración de direcciones IP, ser autoconfigurables y ser agnósticos respecto a los protocolos de capa de red, soportando diversos protocolos de capa de red como el IP, Appletalk, IPX, etc. Las características de los conmutadores actuales de Ethernet tales como alto rendimiento, bajo coste y autoconfiguración los hacen muy convenientes para redes grandes, pero los protocolos estándar de la capa 2 no escalan a las redes de gran tamaño debido a las limitaciones del modelo de puente o con-

Evolución conceptual de los protocolos de puentes transparentes

Resumen: los puentes Ethernet transparentes son un elemento cada vez más importante en las redes de telecomunicaciones. Este artículo ofrece una visión panorámica de la evolución conceptual de los paradigmas de puentes durante las últimas décadas, desde los puentes transparentes con árbol de expansión hasta las propuestas actualmente en estandarización: por una parte Shortest Path Bridges, Provider Bridges y Provider Backbone Bridges en el IEEE 802.1; por otra parte Routing Bridges en el IETF. Estas propuestas buscan aumentar la escalabilidad y obtener una alta utilización de la infraestructura de red, así como la provisión de servicios basados en Ethernet a gran número de usuarios. Mediante un mapa genealógico y una tabla se resumen e ilustran los aspectos funcionales, la evolución de los puentes propuestos en cuanto a los mecanismos básicos empleados para el encaminamiento, reenvío y la prevención de bucles tales como protocolos de vector distancia y de estado de enlaces, árboles múltiples de expansión, jerarquización mediante encapsulado de tramas y prohibición de algunos giros en los nodos. La evolución reciente de las propuestas muestra claramente varias tendencias: el predominio de los protocolos de estado de enlaces como IS-IS para el encaminamiento y/o construcción de árboles múltiples, de los mecanismos de encapsulado, y la multiplicación de tipos de identificadores para etiquetar y procesar separada y homogéneamente miles de servicios y clientes.

Palabras clave: conmutación de paquetes, enrutamiento, protocolos, puentes.

mutador transparente basado en la difusión sobre un árbol de expansión y a la simplicidad de la cabecera Ethernet, que carece de un campo *Time To Live* (TTL) para mitigar bucles transitorios, que en caso de fallo o configuración errónea pueden producir tormentas de tramas y la caída de la red en todo el dominio conmutado correspondiente. Por ello es necesario utilizar enrutadores para dividir el dominio conmutado en segmentos de tamaño moderado. Otra limitación significativa es que, a diferencia de las direcciones IP, las direcciones de capa 2 (MAC) son planas, carecen de una jerarquía que permita la agregación de rutas en caso de utilizarlas para enrutar, lo que aumenta enormemente el tamaño de las tablas de encaminamiento.

Por su parte, los enrutadores exhiben ventajas como una buena utilización de la infraestructura y adecuada segmentación. Los caminos son de mínimo coste, pueden repartir el tráfico y resisten de forma robusta en caso de bucles transitorios, pero requieren la configuración y gestión de las direcciones IP, incluso si se emplea DHCP, dada la necesidad de controlar los rangos de direcciones IP asignados. Además la dirección IP de un *host* varía al moverse el *host* en la red, mientras que un conmutador reincorpora a la red a un *host* que se mueve de forma automática. Finalmente, los enrutadores tienen una relación precio/prestaciones bastante menos atractiva que los conmutadores por su mayor complejidad funcional y menor volumen de fabricación.

Se ha producido un cambio gradual, pero de profundo impacto, que aumenta la importancia de los conmutadores Ethernet. El protocolo IP se ha consolidado en la capa de red como el protocolo universal para interconectar redes de tecnología diversa con los requisitos mínimos para la compatibilidad. Los enrutadores IP fueron el medio universal para interconectar tecnologías disímiles de subred tales como Token Ring, FDDI, etc. Esta diversidad de la red se ha desvanecido, y Ethernet domina actualmente incluso el reemplazo de tecnologías de transporte, como los equipos de Jerarquía Digital Síncrona (*Synchronous Digital Hierarchy*, SDH). El predominio actual de Ethernet se debe a su gama de velocidades de 10 Mbps a 10 Gbps y más (40 y 100 Gbps previstos), velocidades agregables de forma automática en la red, a su plena compatibilidad con las tecnologías Ethernet anteriores y a su excelente relación precio/rendimiento. Por todo ello Ethernet aparece actualmente como el paradigma universal de interconexión, función anteriormente desempeñada exclusivamente por IP. Esto lleva a la aparición de los servicios Ethernet en las redes metropolitanas, impulsando a los proveedores de servicios a buscar formas económicas de proporcionar conectividad Ethernet de calidad *Carrier Class*, con parámetros controlados de fiabilidad, calidad de servicio y capacidades de administración y mantenimiento. La evolución y extensión funcional de los conmutadores Ethernet es hoy crucial en la evolución de las redes de telecomunicaciones, lo que explica la multi-

plicación de grupos de estandarización en el IEEE, dentro del comité para redes locales y metropolitanas, en concreto el IEEE 802.1.

Este artículo describe la evolución conceptual de las propuestas de puentes a lo largo de veinticuatro años. Un mapa genealógico y una tabla proporcionan información de interés en cuanto a la influencia y la combinación de los paradigmas básicos de encaminamiento tales como vector distancias y de estado de enlaces, árboles múltiples de expansión con etiqueta VLAN, y encapsulados y túneles. El resto del artículo se organiza como sigue: La **sección 2** contiene la genealogía y el mapa de las propuestas de puentes. La **sección 3** establece las conclusiones.

2. Evolución conceptual de las propuestas de puentes

Describimos ahora sucintamente la evolución de los paradigmas de puentes. El mapa de la **figura 1** es un esquema conceptual y genealógico de la evolución de las propuestas de puentes agrupadas según los paradigmas básicos empleados. Está ordenado temporalmente de izquierda a derecha. Las siglas se explican en la **tabla 1**. Restringimos el alcance de nuestro estudio a las propuestas aplicables a topologías irregulares con los puentes del tipo de almacenamiento y reenvío (*store and forward*), y nos disculpamos por adelantado por cualquier omisión. Los principios algorítmicos principales de cada propuesta se muestran mediante el color de fondo y en los lados izquierdo y derecho y la evolución genealógica en diferentes propuestas se muestra con las flechas que conectan las elipses. Cada elipse muestra también gráficamente si el protocolo está estandarizado, en proceso de estandarización o es un protocolo propietario y si utiliza encapsulado. Algunos protocolos y dependencias no se demuestran para mayor claridad. La **tabla 1** resume aspectos destacables de cada propuesta. Debido a las limitaciones de espacio, este artículo no hace un resumen de cada propuesta.

2.1. Puentes de encaminamiento en origen

Los puentes de encaminamiento en origen (*Source Routing Bridges* (SRB) [3] fueron diseñados por IBM en los años 80 y se estandarizaron dentro del grupo IEEE 802.5 para el encaminamiento en redes Token Ring de varios anillos. Los puentes SRB pueden encaminar tramas a través de varios segmentos LANs y de los puentes que las unen. Para ello insertan la ruta a seguir de forma explícita dentro de la propia trama. Esta ruta es una secuencia de las identidades (IDs) de LANs y de los puentes que la trama debe atravesar. Cada puente que recibe la trama analiza su posición en la ruta y determina el siguiente salto leyendo la ruta explícita incluida en la trama. Antes de enviar la trama, la ruta se obtiene difundiendo una petición de ruta por toda la red y eligiendo la ruta más corta de todas las recibidas como contestación de todos los nodos. Invertiendo el orden de lectura de la secuencia de IDs y LANs se obtiene la ruta en sentido opuesto. No se utiliza protocolo de árbol de expansión dado que en una ruta explícita se detectan los bucles con facilidad por ID de LAN o nodo duplicados. Los puentes SRT (*Source Routing Transparent*) combinan la funcionalidad de los de SR y de los puentes transparentes.

2.2. Puentes transparentes (TB) y conmutadores (switches)

M. Kempf [1] introdujo en 1984 el concepto de puente transparente para interconectar dos segmentos LAN (ver **figura 2**), filtrando el flujo de tráfico entre dos segmentos con el aprendizaje de las direcciones del MAC. El puente almacena y reenvía la trama recibida de una LAN a la otra LAN, respetando el protocolo CSMA/CD, por lo que actúa como un único *host* en la LAN destino a efectos de colisiones de tramas, reduciéndolas significativamente. Esto permitió la interconexión de LANs de forma sencilla, a lo que se añadió el que el puente filtrara (no reenviara) las tramas locales (con origen y destino en la misma LAN) mediante el aprendizaje en

cada lado del puente (puerto) de las direcciones MAC origen de las tramas recibidas para identificar qué *hosts* están en cada LAN. Este filtrado de tráfico evitaba el cuello de botella de tráfico en la LAN producido por la conexión de un número creciente de *hosts* en un único segmento LAN compartido. Estos puentes eran dispositivos software (lo que limitaba sus prestaciones) que posibilitaban la segmentación e interconexión de LANs, y utilizaban el árbol de expansión o topologías en árbol para evitar bucles.

Los *switches* o *conmutadores* (denominados como *Ether Switch*) fueron desarrollados por primera vez por la compañía Kalpana en 1989 del puente de dos puertos basado en software. Eran puentes transparentes multipuerto implementados en hardware. Su diseño, con un núcleo de alta capacidad de conmutación, permitió la interconexión no bloqueante de segmentos LAN. La evolución natural de las redes de conmutadores hacia la generalización de enlaces punto a punto, ha trasladado la función de conmutación desde el segmento Ethernet compartido al conmutador. La **figura 3** muestra una red de este tipo. La aparición de los conmutadores fue cercana en el tiempo a la de los enrutadores. En 1986 Cisco lanzó su primer enrutador comercial (AGS).

Arbol de expansión más enlaces cruzados adicionales seleccionados. Tras la implementación del protocolo de árbol de expansión (*Spanning Tree Protocol*, STP) [2][6], aparecieron diversas propuestas para mejorar la baja utilización de la infraestructura que presenta STP y permitir incluso el reparto de carga. Estas propuestas se basan en habilitar el uso de algunos enlaces transversales entre puentes, enlaces que no pertenecen al árbol de expansión (*cross links*) y que normalmente son bloqueados por el protocolo STP. Hart [12] propuso DLS con este enfoque. GDLS (*Generalized DLS*) [13] es una extensión y simplificación de la propuesta de Hart para evitar algunos inconvenientes de DLS. Más concretamente, Perlman y otros

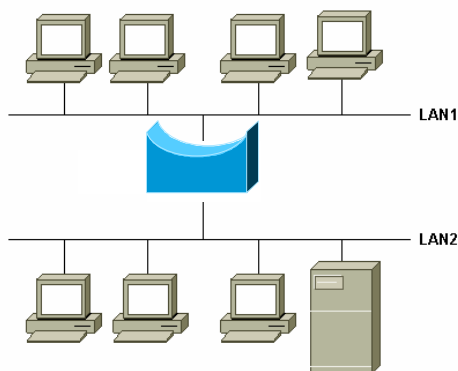


Figura 2. Puente transparente uniendo dos segmentos LAN (medio compartido). Conmutación en el segmento LAN.

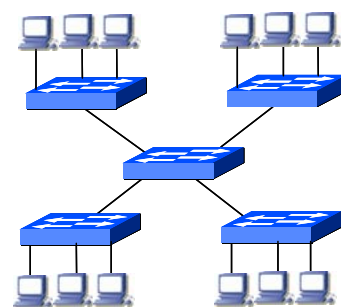


Figura 3. Red con conmutadores Ethernet (enlaces dedicados).

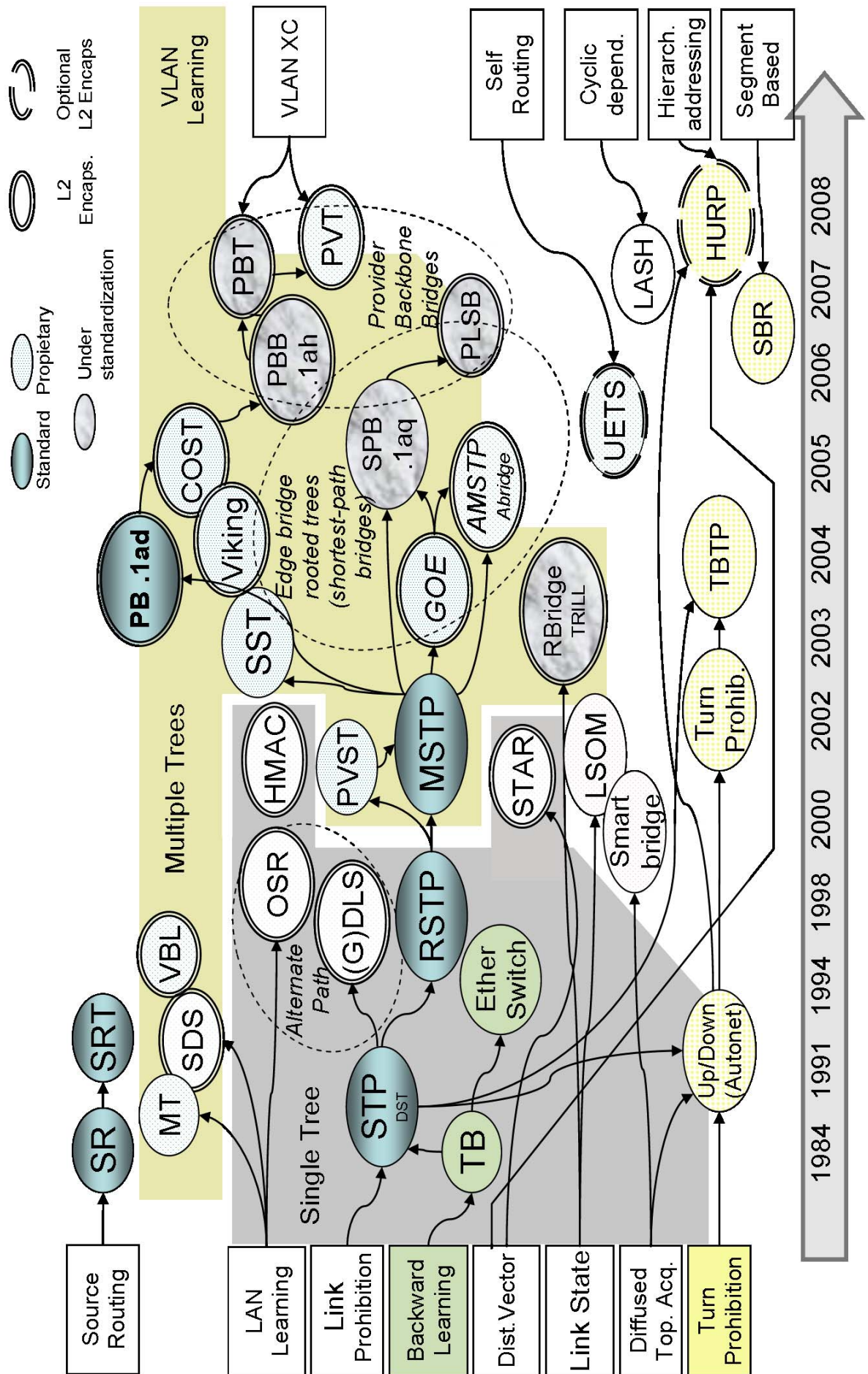


Figura 1. Evolución de los puentes.

Acrómino	TB	STP/DEC	STP/IEEE	SRB	ES	Autonet	Smartbridge	DLS/GDLS	VBL	STAR	TP, TBTP, dtBTP	LSOM
Nombre	Transparent Bridge	Spanning Tree	Spanning Tree	Source Routing Bridges	Ether Switch	Autonet	Smartbridge	Distributed Load Sharing	Virtual Bridges	S.Tree Alternate Routing Protocol	Turn Prohibition	Link State Over MAC
Resumen	Puente de dos puertos aprend	Protocolo de Arbol de Expansion con temporizadores	Protocolo de Arbol de Expansion con temporizadores	Ruta explícita (LAN, Bridge,...)	Multiport hardware bridge	Encaminamiento Up/Down basado en numeración de puentes mediante STP	Caminos mínimos sobre arboles basados en origen	Arbol de expansion más enlaces transversales seleccionados	Bridge Virtual que une a islas con árbol de expansion	STP más enlaces transversales autodescubiertos	Evitación de bucles [más] árbol de expansion	Encaminamiento de estado de enlaces entre puentes backbone
Estándar/Propietario	Propietario	Propietario	Estándar	Estándar	Estándar	Propiet.	Propiet.	Propiet.	Propiet.	Propiet.	Propietario	Propiet.
Referenc.	[1]	[2]	[6]	[3]	.	[10]	[11]	[12] [13]	[17]	[9]	[14]-[16]	[22]
Fecha publicación	1984	1987	1987	1980's	1989	1991	2000	1989/1992	1994	2002	2002,2004	2003
Cómputo	Aprendizaje de MAC por puerto	Construcción de árbol según distancia a bridge raíz	Construcción de árbol según distancia a bridge raíz	Ruta bajo demanda por inundacion	Aprendizaje de MAC por puerto	Rutas legales sin giros abajo-arriba	Diffusing computations. Adquisición de topología por los puentes Tablas localización de hosts por segmento	Retardo relativo enlaces transversales/ árbol	Arbol de expansion simple de nivel superior en el núcleo de la red	Rutas adicionales directas descubiertas entre puentes STAR	Cómputo de un conjunto de giros prohibidos del grafo de red que evita bucles	Cómputo de camino mínimo a puente frontera
Compatibilidad con hosts	\$	\$	\$	N	N	\$	SW	\$	N	N	N	N
Compatibilidad bridges 802.1D	\$	N	\$	\$	\$	N	N	\$	\$	\$	\$*	N
Encapsulado	N	N	N	N	N	\$	N	N	\$	\$	N	N
Etiquetas usadas	N	N	N	Ruta explícita	N	Direcciones cortas	N	Ethertype	N	Ethertype	E	N

Tabla 1 (I). Resumen de propuestas de puentes y puentes enrutadores.

	RSTP 802.1D	Rbridges	SPB 802.1aq	UETS	GOE	MSTP	802.1Q	AMSTP Abridges	Viking	SSSTP	PB 802.1ad	PBT PBB-TE	PBB 802.1ah
Acrónimo													
Nombre	Rapid Spanning Tree Protocol	Routing Bridges	Shortest Path Bridging	Universal Ethernet Telecom Service	Global Open Ethernet	Multiple Spanning Tree Protocol	Alternative Multiple Spanning Tree Protocol	Virtual LAN Cluster Networking	Scalable Spanning Tree	Provider Bridges	Provider Backbone Transport	Provider Backbone Bridges	
Resumen	Mecanismos de convergencia rápida, enlaces punto a punto	Estado de enlaces entre RB encapsulado MAC con TTL	MSTP con árboles cam. simétricos enraizados en puente frontera c/ SVL	Aplicaciones sobre LLC (sin IP) y direcciones MAC jerárquicas locales	Commutación de etiquetas L2VPN anidadas	Instancias múltiples de árboles de expansión	MSTP simplificado autoconfigurable con árboles auto enraizados en cada puente, sin aprendizaje MACs	VLAN y MSTP controlados por aplicación optimización carga / protección	Extensión de MSTP para múltiples regiones autodimensionadas	VLANs anidadas	Reenvío basado en VLAN+MAC	Conexión Interproved or (MAC in MAC)	
Estándar/ Propietario	Estándar IEEE	Estándar IETF	Estánd.	Propietario	Propietario	Estándar	Propietario	Propietario	Propietario	Estándar	Estándar	Estándar	
Referenc.	[7]	[18]-[19]	[29]	[28]	[24]	[8]	[21]	[25]	[26]	[30]	[32]	[31]	
Fecha publicación	2004	2004	En curso	20005	2002/2004	2002	2004	2004	2004	2005	En curso	En curso	
Cómputo	Construcción del árbol	Cálculo de árboles mediante estado de enlaces, listas de hosts entre bridges	Instancias de árbol autoenraizadas calculadas con IS-IS	Encaminamiento por decodificación de dirección y tablas adic.	Arboles múltiples a nodos frontera	Construcción de árboles múltiples según distancias a bridge raíz de c/ instancia	Una instancia de árbol por puente (núcleo). Reenvío al puente frontera	Caminos agrupados sobre instancias de árbol y VLANs comput. Y configurados vía gestión con caminos protección	Optimización automática del tamaño de las regiones MSTP	Arboles múltiples expansión	Conexiones configuradas estáticamente	B-DA and B-SA para direcciones origen y destino de troncal	
Compatibilidad con hosts	N	N	N	Doble pila IP/UETS	N	N	N	S	S	N	N	N	
Compatibilidad bridges 802.1D	S	S	S	S*	S	S	S*	S	S*	S	S*	S	
Encapsulado	N	S	N	Encap. Traves UETS	S	N	S	S	N	S	S	S	
Etiquetas usadas	N	Ethertype IP / Shim header	STD.1Q	N	Jerárquica Recursiva	VLAN	Ethertype	VLAN	VLAN	Q-in-Q	MAC-in-MAC	MAC-in-MAC	

Tabla 1 (II). Resumen de propuestas de puentes y puentes enrutadores.

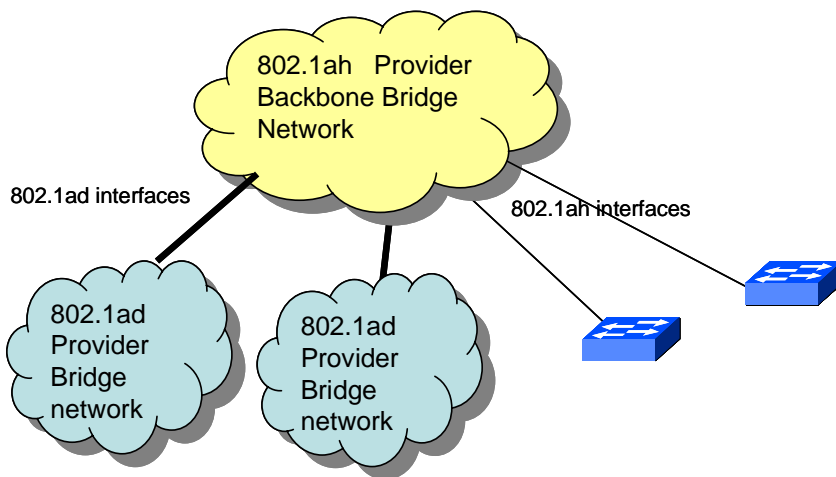


Figura 4. Provider Bridges y Provider Backbone Bridges.

propusieron identificar los enlaces no pertenecientes al árbol de forma que puedan usarse como caminos alternativos, más cortos que los del árbol. GDLS compara la velocidad del enlace transversal con la del camino por el árbol.

Optimal-Suboptimal Routing (OSR) [4], propuesta de Sincoskie para redes de telecomunicaciones, es un protocolo de puentes con aprendizaje de forma que se pueden identificar rutas óptimas o subóptimas entre puentes.

Los puentes situados en el extremo, *puentes hoja* (*leaf bridges*) aprenden las direcciones MAC de los hosts conectados y las distribuyen jerárquicamente hacia arriba en el árbol de forma iterativa.

SmartBridge [11]. Rodeheffer introdujo una arquitectura propietaria de puentes que presenta características de enrutador. El encaminamiento se realiza por caminos mínimos y el protocolo entre puentes tiene un conocimiento completo de la topología de la red. Los tiempos de reconfiguración son muy pequeños (10-20 ms.) y permite la utilización de toda la infraestructura. No es compatible con los puentes 802.1D aunque las tarjetas de interfaz de red son estándar.

RBridges [18] y *Link State over MAC* (LSOM) [23] utilizan protocolos de estado de enlaces para el encaminamiento por caminos mínimos. Cada puente anuncia por difusión a todos los nodos de la red su conectividad puentes vecinos (anuncio de estado de enlaces) y cada puente, agregando la información recibida de todos los nodos, obtiene una visión completa de la topología de red sobre la que se calcula los caminos de coste mínimo de la forma habitual. LSOM está orientado a dorsales Metro Ethernet. RBridges está orientado a redes campus y se encuentra en estado avanzado de estandarización en el grupo de trabajo TRILL del

IETF, utiliza IS-IS como protocolo de estado de enlaces, adaptado para capa 2.

2.3. Protocolos de árboles múltiples de expansión

Después de la invención del protocolo de árbol de expansión único, el concepto adicional de red local LAN virtual (VLAN) abrió la posibilidad de separar completamente diversos tráficos compartiendo la misma infraestructura física, creando redes virtuales completamente estancas. El protocolo de árbol de expansión evolucionó multiplicando los posibles y simultáneos árboles de expansión en la red, asociando cada (instancia de) árbol a una VLAN (caso de *Per VLAN Spanning Tree*, PVST) o grupo de VLANs (*Multiple Spanning Tree*, MSTP), VLANs a las que pertenecen los puertos y tramas. Numerosas propuestas utilizan árboles múltiples de expansión como se indica en la figura 1 en la parte sombreada identificada con *Multiple Trees*. *Per VLAN Spanning Tree* asocia un árbol a cada VLAN.

Pero la carga computacional en los dispositivos de este protocolo PVST podía ser excesiva al crear un gran número de árboles, razón por la que posteriormente fue propuesto el protocolo MSTP por Cisco, de menor complejidad computacional y más dimensionable que PVST al poder asignar varias VLANs a cada instancia de árbol. Pero, como se verá más adelante, el concepto de un árbol de expansión por VLAN reaparecerá en los *Shortest Path Bridges*.

Protocolo de Arbol de Expansión múltiple. Multiple Spanning Tree Protocol (MSTP) [8] es el protocolo estándar actual para múltiples árboles de expansión. Ha sido estandarizado como IEEE 802.1Q. MSTP utiliza un árbol común (*Common Spanning Tree*, CST) que conecta todas las regiones de la topología. En cada región MST se configuran varias instancias de árbol de expansión. Las instancias de árbol se construyen mediante unas *Bridge Protocol Data Unit* (BPDU) combinadas que intercambian los puentes. Cada BPDU combinada contiene datos para construir el árbol de expansión básico y todos los árboles de expansión adicionales simultáneos en la región MST. Un árbol básico RSTP (IST) controla cada región, tiene un *bridge* raíz regional y la IST forma parte del árbol de expansión CST común que engloba a todas las regiones.

IEEE 802.1aq Shortest Path Bridging (SPB) [29] El proyecto SPB deriva de MSTP y se basa en optimizar los caminos y utilización de infraestructura reemplazando el plano de control MSTP con uno SPB. La idea básica de SPB consiste en utilizar instancias múltiples de árbol de expansión enraizadas cada una de ellas respectivamente en cada uno de los puentes frontera. Al estar siempre en uno de los extremos el nodo raíz del árbol correspondiente, estos caminos son mínimos (*Shortest Path*). Los caminos que unen dos

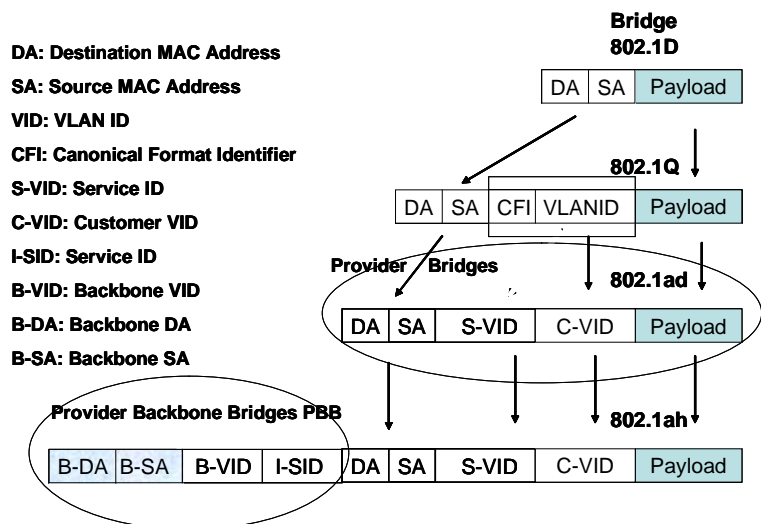


Figura 5. Encapsulados IEEE 802.1Q, 802.1ad, 802.1ah.

nodos en ambas direcciones deben coincidir exactamente para que el aprendizaje de direcciones MAC funcione. La propuesta es compatible con MSTP y VLANs (802.1Q).

GOE (Global Open Ethernet) [24]. El objetivo básico de GOE, desarrollado por NEC, consiste en construir Redes Privadas Virtuales de capa 2 (L2VPN) de forma simple y económica. GOE es una extensión jerarquizada de la propuesta de etiquetas VLAN anidadas (Q-in-Q), utiliza principios similares a SPB y es compatible con MSTP mediante configuración manual. Se reconfigura muy rápidamente (en decenas de milisegundos) y la red puede ser ampliada dinámicamente sin interrupción del servicio por utilizar un mecanismo exclusivo para añadir instancias de árboles.

Viking [25] es una arquitectura de árboles múltiples de expansión basada en VLANs que precalcula varias instancias de árbol de expansión asociadas a VLANs y asigna VLANs a los hosts. Viking Manager gestiona la configuración de los conmutadores de acuerdo con ello mediante SNMP. De esta forma optimiza el rendimiento total de la red usando caminos mínimos y enlaces múltiples y redundantes que implementan protección y reconfiguración automáticas de los caminos en caso de fallo de un enlace. Un algoritmo de agregación de caminos agrupa el tráfico en rutas compartidas por los diferentes *hosts*.

Provider Bridges (PB). *Provider Bridges* (IEEE 802.1ad) [30], también conocido como *Q-in-Q*, es una enmienda al estándar IEEE 802.1Q (MSTP) que permite a un proveedor de servicios prestar el equivalente a un servicio de LANs separadas, redes de puentes locales o redes LAN virtuales puenteadas, que ofrece separación total entre los clientes del proveedor. Para ello se distinguen y manejan separadamente e independientemente las VLANs del Cliente (asignadas por el cliente) y las VLAN de Servicio, VLANs (asignadas por el proveedor) para separar el tráfico en las redes respectivas de cliente y del proveedor.

Provider Backbone Bridges (PBBs) tiene como objetivo interconectar los *Provider Bridges (PB)* mencionados mediante intercambio de tramas que encapsulan las direcciones, etiquetas VLAN y datos del cliente en un número de instancias de servicio independientes, tal y como se muestra en la **figura 4**. Las etiquetas y su significado se muestran en la **figura 5**.

Provider Link State Bridging (PLSB) es un estándar en elaboración en el grupo 802.1ah del IEEE. Utiliza encapsulado MAC-in-MAC. Ofrece reenvío por caminos mínimos (inspirado en *Shortest Path Bridges*) por árboles múltiples construidos mediante pro-

toloco de estado de enlaces para redes *Ethernet Carrier Grade*, con convergencia rápida y fiable. Su objetivo es reducir el esfuerzo de provisionamiento respecto a PBB, evitar bucles de encaminamiento sin bloquear puertos y soportar tráfico *unicast* y *multicast* en capa 2. Todo ello dentro del campo de aplicación de *Provider Backbone Bridges (PBB)*.

2.4. Puentes para Ethernet orientado a conexión

El término Ethernet Orientado a Conexión (*Connection Oriented Ethernet*) es poco conocido, pero identifica adecuadamente a las propuestas como PBT y PVT que aplican modelos de conectividad provenientes de las redes de datos orientadas a conexión como SDH. En ellos predomina la configuración y gestión de conexiones mediante SNMP o similares en vez de mediante el plano de control de árbol de expansión, protocolos de encaminamiento o VLANs.

Provider Backbone Transport (PBT), denominado oficialmente *Provider Backbone Bridges Traffic Engineering (PBB-TE)* es un método para ofrecer, provisionando mediante sistemas de gestión, ingeniería de tráfico de caminos punto a punto Ethernet en las redes PBB. Incluye mecanismos de protección de camino, operación y mantenimiento y calidad de servicio (QoS). PBT avanza en la dirección de separar el plano de control de Ethernet de los puentes PB y PBB, actualmente el protocolo MSTP 802.1Q, del plano de datos, introduciendo el control del plano de datos mediante gestión de las conexiones sobre PB y PBB, configurando caminos como en un dispositivo *cross-connector*.

Provider VLAN Transport (PVT) es una propuesta de Huawei-Siemens que se basa en el concepto de cross conexión VLAN (VLAN-XC), en el que, además de la funcionalidad estándar de las etiquetas VLAN para realizar difusión separada de tramas, una tupla de VLAN más un identificador destino identifican una conexión, configurable mediante el sistema de gestión de red.

2.5. Up/Down y prohibición de giros

El mecanismo de *prohibición de algunos giros* aparece como un enfoque menos drástico que el del protocolo árbol de expansión para evitar bucles, basado en *prohibición de enlaces* bloqueando puertos. Hasta el momento todas las propuestas que utilizan prohibición de giros son propietarias y no compatibles con 802.1D excepto la recientemente propuesta HURP [35].

El concepto de encaminamiento *Up/Down*, que emplea un esquema simple y distribuido de prohibición de giros, apareció por primera vez en Autonet (AN-1) [10]. Es un algoritmo libre de bucles que se basa en asignar

identificadores crecientes a los nodos según su distancia al puente raíz y asignar un sentido a cada enlace de la topología según el orden de sus identificadores (*a-b* es un enlace hacia abajo si $b > a$) y prohibir los giros abajo-arriba, que son aquellos en los que el identificador del nodo alrededor del que se gira es mayor que los de los nodos origen y final del giro (en el giro *a-b-c*, si $b > a$ y $b > c$). *Up/Down* puede producir congestión en algunos puntos de la red cercanos al *bridge* raíz y, no necesariamente obtiene encaminamiento por caminos mínimos, pero puede acercarse bastante si se optimiza con un encaminamiento de caminos mínimos al que se aplica la restricción de giros. Con posterioridad a *Up/Down*, el concepto genérico de prohibición de giros en algunos nodos, se ha utilizado en diversos protocolos como *Turn Prohibition (TP)*, *Tree Based Turn Prohibition* y *Hierarchical Up/Down Routing Protocol (HURP)*, que repasamos brevemente a continuación.

Turn Prohibition [14] es un algoritmo centralizado que se basa en seleccionar el nodo de menor conectividad (grado) y prohibir los giros alrededor del mismo. TP tiene una complejidad computacional de $O(N^d)$, lo que limita su escalabilidad. *Tree Based Turn Prohibition (TBTP)* [15], es una evolución de TP. que se apoya en STP para la convergencia del algoritmo. Existe una versión de TBTP con algoritmo distribuido (dTBT), algo menos eficiente, pero de complejidad igualmente alta que la de versión centralizada [16].

Hierarchical Up/Down Routing Protocol (HURP) [35] utiliza un identificador de nodo de tipo jerárquico con significado topológico asignado por el protocolo de árbol rápido de expansión RSTP extendido y un protocolo de vector distancia para encaminar por los enlaces más cortos (salvo giros prohibidos) dando prestaciones cercanas a caminos mínimos con complejidad moderada. Se evitan los bucles mediante *Up/Down* aplicado a los identificadores mencionados para prohibir giros.

Layered shortest path routing (LASH) [39] es un algoritmo de caminos mínimos para topologías regulares e irregulares. Emplea técnicas basadas en canales virtuales sobre grafos de dependencia cíclica para evitar los bucles. LASH está inicialmente orientado a redes de interconexión, pero es también aplicable en redes irregulares Ethernet.

3. Conclusiones

Los puentes Ethernet en la actualidad abarcan una diversidad de escenarios de aplicación desde las redes campus hasta redes metropolitanas y de proveedor. Los requisitos y necesidades varían de acuerdo con ello. Los puentes transparentes han evolucionado

do desde el simple puente software de dos puertos que une dos segmentos LAN filtrando direcciones MAC, pasando por el switch o conmutador multipuerto Ethernet de alta capacidad de conmutación implementado en hardware, pero todavía limitado por el protocolo de árbol de expansión para evitar bucles, a las propuestas actuales más sofisticadas. La asignación de grupos de VLANs a distintos árboles de expansión superpuestos sobre la misma red permite una mejor utilización de la infraestructura, pero a costa de gran complejidad de configuración. Estas instancias de árboles de expansión se construyen de la forma tradicional (intercambio de información de menor distancia a puente raíz) en los actuales estándares 802.1D y mediante protocolos de estado de enlaces en las propuestas más recientes, con el fin de simplificar la configuración, aumentar la robustez y mejorar la escalabilidad.

Los escenarios de aplicación que requieren agregar tráfico y servicios de diferentes usuarios para ser transportados como es el caso de *Provider Bridges* y *Provider Backbone Bridges*, añaden encapsulados adicionales para separar tanto el espacio de direccionamiento MAC de los equipos terminales del de los puentes del backbone como separar servicios y clientes. El modelo de Ethernet Orientado a Conexión es apoyado significativamente en los grupos de estandarización del IEEE 802.1 por parte de fabricantes y operadores de redes, que intentan reproducir sobre Ethernet el modelo de las redes de transporte gestionadas como SDH. Finalmente los protocolos de prohibición de giros y otros derivados de los utilizados en redes de interconexión abren nuevas vías para la evolución de Ethernet.

Referencias

- [1] **M. F. Kempf** (Stow, MA, US). *Bridge circuit for interconnecting networks* – US Patent 4597078, 1986.
- [2] **R. Perlman**. An algorithm for distributed computation of a spanning tree in an extended LAN, *Proceedings of the ninth symposium on Data communications*, p.44-53, September 1985, Whistler Mountain, British Columbia, Canada.
- [3] **R. C. Dixon, D. A. Pitt**. Addressing, bridging, and source routing [LAN interconnection]. *IEEE Network, Volume 2, Issue 1*. Jan 1988. pp. 25-32.
- [4] **W. D. Sincoskie, C.J. Cotton**. Extended bridge algorithms for large networks. *IEEE Network, Volume 2, Issue 1*, Jan. 1988. pp. 16-24.
- [5] **M. Soha, R. Perlman**. Comparison of two LAN bridge approaches. *Network, IEEE Volume 2, Issue 1*, Jan. 1988 pp. 37-43.
- [6] **IEEE 802.1D. IEEE-1998**. *IEEE standard for local and metropolitan area networks—Common specifications—Media access control (MAC) Bridges*.
- [7] **IEEE 802.1D-2004**. *IEEE standard for local and*

metropolitan area networks—Common specifications—Media access control (MAC) Bridges.

- [8] **IEEE 802.1Q-2003**. *IEEE standard for Local and Metropolitan Area Networks- Virtual Bridged Local Area Networks*.
- [9] **K.-S. Lui, W. C. Lee, K. Nahrstedt**. "STAR: a transparent spanning tree bridge protocol with alternate routing," *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 32, no. 3, pp. 33–46, 2002.
- [10] **M. Shoreder et al.** Autonet: A High-Speed, Self-Configuring Local Area Network Using Point-to-Point Links. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 9, No. 8, pp. 1318–1335, October 1991.
- [11] **T. L. Rodeheffer, C. A. Thekkath, D. C. Anderson**. "Smartbridge: a scalable bridge architecture", *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 30, no. 4, pp. 205–216, 2000.
- [12] **J. Hart**. "Extending the IEEE 802.1 MAC bridge standard to remote Bridges", *IEEE Netw. 2(1)*, pp. 10-15 (1988).
- [13] **R. Perlman, W. Hawe, A. Lauck**. "Utilization of redundant links in bridged networks", U.S. patent 5,150,360 (22 September 1992).
- [14] **D. Starobinski, G. Karpovsky, F. Zakrevsky**. Applications of Network Calculus to General Topologies, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, June 2003, vol 11, No. 3, pp 411-422.
- [15] **F. D. Pellegrini, D. Starobinski, M. G. Karpovsky, L. B. Levitin**. "Scalable cycle-breaking algorithms for gigabit ethernet backbones", in *INFOCOM 2004. Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, vol. 4, March 2004, pp. 2175–2184.
- [16] **V. Pellegrini et al.** Scalable, Distributed cycle-breaking algorithms for gigabit Ethernet backbones. *Journal of Optical Networking*, Vol. 5. No. 2, Feb. 2006, pp. 122-144.
- [17] **V. Catania, A. Puliafito, L. Vita**. VBL: A Modular Network Architecture for Performance Enhancement in Extended Local Area Network a. *IEEE Transactions on Reliability Vol 42, no. 1*, March 1993.
- [18] **R. Perlman**. "RBridges: Transparent routing" en *Proceedings of IEEE Infocom 2004*, March 2004.
- [19] The Rbridge Archives. <<http://www.postel.org/pipermail/rbridge/>>.
- [20] **G. Ibáñez et al.** ABridges: Scalable, self-configuring Ethernet campus networks. *Computer Networks Vol 1 Issue 3*, Feb. 2008, pp. 630-649.
- [21] **G. Ibáñez, A. García, A. Azcorra**. Alternative Multiple Spanning Tree Protocol (AMSTP) for Optical Ethernet Backbones. *IEEE Conference on Local Computer Networks*, Tampa, Nov. 2004.
- [22] **R. García, J. Duato, J. Serrano**. "A new transparent bridge protocol for lan internetworking using topologies with active loops". *ICPP '98: Proceedings of the 1998 International Conference on Parallel Processing*. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 1998, pp. 295–303.
- [23] **R. García, J. Duato, F. Silla**. "LSOM: A Link State Protocol Over MAC Addresses for Metropolitan Backbones Using Optical Ethernet Switches". *Proceedings Second IEEE NCA'03*.
- [24] **GOE A. Iwata et al.** "Global Open Ethernet Architecture for a Cost-Effective Scalable VPN Solution", *IEICE Trans. On Communications, E87-B*, 1, pp.142-151, Jan. 2004.
- [25] **S. Sharma, K. Gopalan, S. Nanda, T. C. Chiueh**. "Viking: a multi-spanning-tree Ethernet architecture for metropolitan area and cluster

networks" in *INFOCOM 2004, Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Society* (IEEE, 2004), pp. 2283–2294.

- [26] **K. Ishizu et al.** APG-Report: SSTP: An 802.1s Extension to Support Scalable Spanning Tree for Mobile Metropolitan Area Network. *Proceedings of Globecom 2004*. December 2004.
- [27] **A. Myers et al.** Rethinking the Service Model: Scaling Ethernet to Million Nodes. *HOTNETS III*. Nov. 2004.
- [28] **J. Morales, G. Ibáñez**. Ethernet Fabric Routing (EFR): A scalable and secure ultrahigh speed switching architecture. *High Speed Networking Workshop TCHSN INFOCOM 2006*. Barcelona, April 2006. <www.ieee.org/ieee.explore>.
- [29] **M. Seaman**. Shortest Path Bridging. <<http://www.ieee802.org/1/files/public/docs2005/new-seaman-shortestpath-par-0405-02.htm>>.
- [30] **IEEE**. *IEEE 802.1ad Provider Bridges*. <<http://www.ieee802.org/1/pages/802.1ad.html>>.
- [31] **IEEE**. *IEEE 802.1ah Provider Backbone Bridges*. <<http://www.ieee802.org/1/pages/802.1ah.html>>.
- [32] **IEEE**. *IEEE 802.1Qay - Provider Backbone Bridge Traffic Engineering*. <<http://www.ieee802.org/1/pages/802.1ay.html>>.
- [33] **I. Hadzic**. HMAC. Hierarchical MAC address space in public Ethernet networks, *Proceedings of IEEE Globecom* (2001), pp. 1563-1569.
- [34] **M. Huynh, P. Mohapatra, M. Goose**. COST. Cross-Over Spanning Trees. Enhancing Metro Ethernet Resilience and Load Balancing. *CSE 2006*.
- [35] **G. Ibáñez et al.** HURP. Hierarchical Up/Down Routing Architecture for Ethernet backbones and campus networks. HSN 2008. *INFOCOM* April 2008.
- [36] **A. Mejia, J. Flich, J. Duato, S.A. Reinemo, T. Skeie**. SBR Segment-based routing: An efficient fault-tolerant routing algorithm for meshes and tori. *Proceedings of the 20th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS 2006)*, IEEE (2006).
- [37] **B. Rajagopalan, M. Faiman**. Load sharing and shortest-path routing in transparently interconnected local area networks. *Proceedings Tenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. INFOCOM 1991*. IEEE 7-11 April 1991. Vol. 3, pp:1135 – 1144.
- [38] **T. Skeie, O. Lysne**. Layered shortest path (LASH) routing in irregular system area networks. *Proceedings of Parallel and Distributed Processing Symposium, IPDPS April 2002*, pp 162-169.
- [39] **Y.-D. Lin, M. Gerla**. Brouter: The Transparent Bridge with Shortest Path in Interconnected LANs. *Proceedings of LCN, 1991*.