Desplegament d'una xarxa MPLS lliure amb GNU/Linux i MPLS-Linux

Pere Tuset i Pere Barberán
Dept. de Telecomunicacions i Arquitectura de Computadors
Escola Universitària Politècnica de Mataró
Universitat Politècnica de Catalunya
{tuspeipe,barberan}@eupmt.upc.edu

Abril de 2008

Resum

El projecte MPLS-Linux permet convertir un ordinador que executa el sistema operatiu GNU/Linux en un commutador d'etiquetes MPLS. Això és especialment interessant en l'àmbit acadèmic i d'investigació, ja que permet desenvolupar una xarxa MPLS sense les restriccions pròpies del maquinari comercial o dels simuladors basats en programari.

En vista a les oportunitats que ofereix, en aquest article es descriu el procés per desplegar una xarxa MPLS lliure utilitzant el sistema operatiu GNU/Linux i el programari MPLS-Linux. Aquest procés inclou el disseny de la xarxa, la instal·lació i configuració dels equips i, finalment, la comprovació del correcte funcionament. Per acabar, s'analitza les diferents alternatives per continuar treballant en el desenvolupament de projecte MPLS-Linux i es presenten les conclusions del treball realitzat.

1 Introducció

L'equipament de xarxa que es comercialitza avui en dia ofereix suport per multitud de protocols d'encaminament, de gestió de xarxa i de reserva de recursos, entre d'altres. Però l'elevat cost d'adquisició d'aquests productes i el fet que el programari que executen estigui distribuït sota una llicència restrictiva, fa que no siguin econòmicament viables ni tecnològicament atractius en l'àmbit acadèmic i d'investigació. Pel que fa les xarxes de commutació d'etiquetes MPLS existeixen dues alternatives a l'equipament de xarxa comercial que són més interessants per aquests àmbits.

La primera alternativa són els simuladors basats en programari, com per exemple ns-2[1] i Open SimMPLS[2]. Aquests programes s'executen sobre un ordinador convencional i permeten dur a terme una simulació dels events discrets que succeeixen en una xarxa, a partir d'una topologia i paràmetres de configuració definits prèviament. Però malgrat reduir el cost econòmic i estar distribuïts sota una llicència que permet l'accés, la modificació i la redistribució del codi font, els simuladors basats en programari presenten un desavantatge fonamental respecte una xarxa construïda amb maquinari; les simulacions estan basades en un model matemàtic determinista que només té en compte alguns dels paràmetres que intervenen en el rendiment real d'una xarxa.

L'altra alternativa al maquinari de xarxa comercial és el programari desenvolupat pel projecte MPLS-Linux, [3, 4], que permet convertir un ordinador que executa el sistema

operatiu GNU/Linux en un commutador d'etiquetes MPLS. Aquest programari, a més de reduir el cost econòmic i estar disponible sota una llicència que permet l'accés, la modificació i la redistribució del codi font, ofereix la possibilitat de desplegar una xarxa MPLS basada en maquinari convencional. Això fa que aquest projecte sigui especialment interessant en l'àmbit acadèmic i d'investigació, ja que permet desenvolupar una xarxa MPLS per dur a terme tasques de docència, principalment laboratoris, o d'investigació, on es tracten temes relacionats amb el balanceig de càrrega, la classe i qualitat de servei, i l'enginyeria del trànsit.

2 Multi-Protocol Label Switching

Multi-Protocol Label Switching és un estàndard proposat per l'IETF[1] a l'any 2001, [5, 6], que defineix els mecanismes necessaris per la designació, l'encaminament, i la commutació de fluxos de dades a través d'una xarxa mitjançant la utilització d'etiquetes. Els principals problemes que van motivar l'aparició d'MPLS són:

- **Velocitat d'encaminament**: Malgrat la millora en la velocitat de processament dels paquets gràcies a la tecnologia ASIC[2], aquesta aproximació no és òptima ja que les decisions d'encaminament encara es prenen a cada *router* de forma independent. MPLS redueix aquests requeriments traslladant les decisions d'encaminament a l'entrada del domini i basant el reenviament dels paquets al nucli de la xarxa en la commutació d'etiquetes.

- **Manteniment i escalabilitat**: Les tecnologies que s'utilitzen pel desplegament de les xarxes *backbone* són heterogènies i estan dèbilment acoblades, fet que en dificulta el manteniment i la escalabilitat. MPLS ofereix una capa d'adaptació que roman independent del nivell d'enllaç de dades i del nivell de xarxa, permetent millorar-ne la capacitat de convergència i creixement.

- **Garantia de servei**: Les restriccions dels nous serveis multimèdia que s'ofereixen a través d'Internet fan que el trànsit de dades que hi circula no pugui ser tractat com a *best effort*. MPLS suporta mecanismes de classe i qualitat de servei, així com de reserva de recursos, per garantir el correcte tractament dels paquets a través de la xarxa en funció de les necessitats de transport particulars.

- **Enginyeria del trànsit**: Els protocols d'encaminament que s'utilitzen a Internet estan dissenyats per oferir el camí més curt entre dos punts d'una xarxa, però no tenen en compte altres paràmetres importants, com la congestió dels encaminadors o el retard dels enllaços. MPLS ofereix la possibilitat de designar el camí a través d'una xarxa tenint en compte aquests factors.

Per adreçar aquests problemes MPLS es basa en la separació dels components de control i reenviament, que permet combinar la intel·ligència dels protocols d'encaminament utilitzats a Internet amb els avantatges propis d'una xarxa de commutació de paquets orientada a connexió; velocitat de commutació, suport per mecanismes de classe i qualitat de servei, i enginyeria del trànsit. La separació dels components de control i reenviament també permet millorar la escalabilitat de la xarxa, doncs separa la topologia física, encarregada de la commutació dels paquets, de la topologia lògica, encarregada de la gestió de la xarxa.

Es pot trobar una descripció més detallada sobre el protocol MPLS i el seu funcionament a les referències [7, 8, 9] que apareixen a la bibliografia.

[1] Internet Engineering Task Force
[2] Aplication-Specific Integrated Circuit

3 Desplegament de la xarxa MPLS

En aquesta secció es descriu el procés de desplegament de la xarxa MPLS lliure amb GNU/Linux i MPLS-Linux. El procés de desplegament de la xarxa inclou el disseny de la topologia, la instal·lació del programari, la configuració dels equips i, finalment, la comprovació del correcte funcionament.

3.1 Disseny de la xarxa

La xarxa MPLS-Linux està formada per un domini MPLS que interconnecta dues xarxes IP situades als extrems de la topologia, tal com es pot observar a la Figura 1. El nucli del domini MPLS està format per dos LER[3] —que s'encarreguen d'etiquetar i commutar o retirar l'etiqueta i encaminar els paquets, en funció de la direcció del flux de dades— i un LSR[4] —que s'encarrega de commutar els paquets en funció de l'etiqueta MPLS del paquet i les entrades a la taula de commutació—.

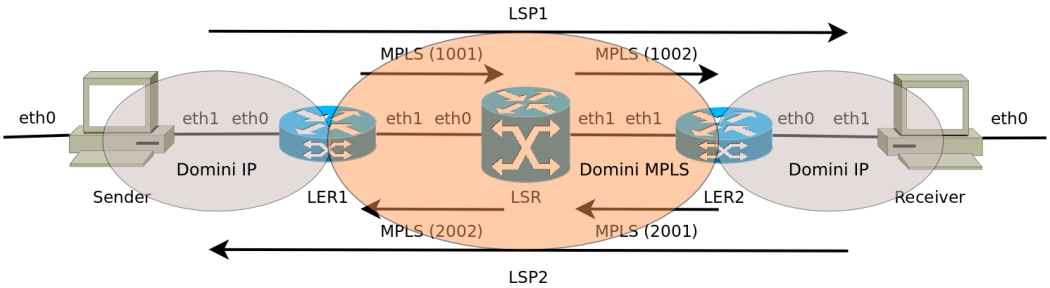

Figura 1: Topologia de la xarxa MPLS-Linux

Pel desplegament de la xarxa MPLS-Linux s'ha utilitzat cinc ordinadors clònics amb arquitectura x86 degut al seu baix cost i l'alt nivell de compatibilitat amb el sistema operatiu GNU/Linux. Les característiques tècniques dels equips utilitzats per desplegar la xarxa es detallen a la Taula 1.

Placa Base	QDI P6V693A/A9
Processador	Pentium III 600MHz
Memòria RAM	2x 64MB PC100
Disc Dur	Maxtor 8GB ATA33
Targeta de Xarxa	2x 3Com 3C905B-TXNM

Taula 1: Característiques tècniques dels equips utilitzats

3.2 Instal·lació del programari

Com a sistema operatiu dels equips que formen la xarxa MPLS-Linux s'ha escollit la distribució Debian GNU/Linux[10] per la flexibilitat, la llibertat i el suport que ofereix. Concretament, s'ha dut a terme una instal·lació mínima del sistema operatiu, sense entorn gràfic ni aplicacions addicionals, per reduir el consum de recursos del sistema. També s'ha deshabilitat la partició d'intercanvi per evitar la paginació de la memòria RAM al disc dur.

A part d'apedaçar i instal·lar el nucli del sistema operatiu i l'eina IProute2[11] amb suport per MPLS-Linux, tal com es descriu a les següents subseccions, també s'ha instal·lat les

[3] Label Edge Router
[4] Label Switching Router

aplicacions OpenSSH[12] i TCPdump[13], que s'utilitzen per gestionar la xarxa i comprovar-ne el correcte funcionament, respectivament.

3.2.1 Instal·lació del nucli amb suport MPLS-Linux

El primer pas per instal·lar el nucli amb suport MPLS-Linux als equips que formen part de la xarxa és accedir al directori de treball `/usr/src`. A continuació s'ha de descarregar els arxius `linux-2.6.15.1.tar.gz`[5] i `mpls-linux-1.950.tar.bz2`[6] d'Internet, i descomprimir-los.

```
# cd /usr/src
# wget linux-2.6.15.1.tar.gz
# wget mpls-linux-1.950.tar.bz2
# tar xvfz linux-2.6.15.1.tar.gz
# tar xjvf mpls-linux-1.950.tar.bz2
```

Descarregar i descomprimir els arxius

El següent pas és entrar al directori `linux-2.6.15.1` i apedaçar[7] el nucli per afegir el suport per MPLS-Linux. Un cop apedaçat, s'ha de configurar el suport per MPLS-Linux, compilar el nucli i instal·lar els mòduls.

```
# cd linux-2.6.15.1
# patch -p1 < ../mpls-linux-1.950/patches/linux-kernel.diff
# make menuconfig
# make -j2 && make modules_install
```

Configurar, compil·lar i instal·lar el nucli

Tot seguit s'ha de copiar el nucli compilat al directori `/boot` i editar el fitxer `menu.lst` per afegir el nou nucli a la configuració del GRUB.

```
# cp arch/i386/boot/bzImage /boot/mpls-linux-2.6.15.1
# nano /boot/grub/menu.lst
```

Configurar el GRUB

Finalment s'ha de reiniciar la màquina i comprovar el correcte funcionament del nucli amb suport per MPLS-Linux amb la comanda `cat /sys/mpls/version`.

3.2.2 Instal·lació d'IProute2 amb suport MPLS-Linux

El primer pas per instal·lar l'aplicació IProute2 amb suport MPLS-Linux als equips que formen part de la xarxa és accedir al directori de treball `/usr/src`. Tot seguit s'ha de descarregar l'arxiu `iproute2-2.6.11-050314.tar.gz`[8] d'Internet i descomprimir-lo.

```
# cd /usr/src
# wget iproute2-2.6.11-050314.tar.gz
# tar xzvf iproute2-2.6.11-050314.tar.gz
```

Descarregar i descomprimir els arxius

A continuació s'ha d'accedir al directori `iproute2-2.6.11-050314` i apedaçar IProute2 per afegir el suport per MPLS-Linux. Un cop apedaçat, s'ha de compilar i instal·lar l'IProute2.

[5] http://www.kernel.org/pub/linux/kernel/v2.6/linux-2.6.15.1.tar.bz2

[6] http://puzzle.dl.sourceforge.net/sourceforge/mpls-linux/mpls-linux-1.955.tar.gz

[7] Durant el procés es produeix un error degut a una dependència amb la distribució Fedora Core, però es pot ometre el pedaç i continuar endavant, ja que no és crític.

[8] http://developer.osdl.org/dev/iproute2/download/iproute2-2.6.11-050314.tar.gz

```
# cd iproute2-2.6.11-050314
# patch -p1 < ../mpls-linux-1.950/patches/iproute2.diff
# make -j2 && make install
```

Configurar, compil·lar i instal·lar l'IProute2

Finalment s'ha de comprovar el correcte funcionament de l'IProute2 amb suport per MPLS-Linux amb la comanda `mpls`.

3.3 Configuració dels equips

Un cop instal·lats els equips que formen part de la xarxa MPLS-Linux, s'ha de configurar els paràmetres per tal que hi hagi connectivitat extrem a extrem entre les xarxes IP a través del domini MPLS. En aquest punt és important distingir entre els equips client situats als extrems de la topologia, els equips que funcionen com a LER a la frontera entre la xarxa IP i el nucli MPLS, i l'equip que funciona com a LSR al centre de la topologia, tal com es pot observar a la Figura 1. A la Taula 2 es mostra l'adreçament IP per cadascuna de les interfícies dels equips. És important destacar que totes les mascares de xarxa utilitzades en la configuració dels equips són de classe C (255.255.255.0).

	Interfície de xarxa	
Equip	**eth0**	**eth1**
Sender	192.168.3.152	192.168.1.1
LER1	192.168.1.254	10.0.1.1
LSR	10.0.1.254	10.0.2.254
LER2	192.168.2.254	10.0.2.1
Receiver	192.168.3.71	192.168.2.1

Taula 2: Adreçament IP dels equips que formen la xarxa MPLS-Linux

3.3.1 Clients

Als equips client [`Sender`, `Receiver`] s'ha de configurar el direccionament IP de les interfícies utilitzades per la gestió (`eth0`) i la xarxa MPLS (`eth1`), i una ruta estàtica cap a la xarxa IP remota a través del domini MPLS. També s'ha de disminuir la mida de la MTU[9] a 1496 Bytes per evitar que els paquets es fragmentin quan se'ls afegeixi la capçalera MPLS al següent salt. Per configurar el direccionament IP de l'equip s'ha d'executar les comandes que es mostren a la Llista 1 i 2.

```
# ifconfig eth0 192.168.3.152 netmask 255.255.255.0
# ifconfig eth1 192.168.1.1 netmask 255.255.255.0 mtu 1496
# ip route add 192.168.2.0/24 via 192.168.1.254
```

Llista 1: Configuració IP del node `Sender`

```
# ifconfig eth0 192.168.3.71 netmask 255.255.255.0
# ifconfig eth1 192.168.2.1 netmask 255.255.255.0 mtu 1496
# ip route add 192.168.1.0/24 via 192.168.2.254
```

Llista 2: Configuració IP del node `Receiver`

[9] Maximum Transmission Unit

3.3.2 Label Edge Router

Als equips LER [LER1, LER2] s'ha de configurar el direccionament IP de les interfícies de xarxa del domini IP (eth0) i MPLS (eth1). També s'ha de disminuir la mida de la MTU a 1496 Bytes de la interfície que pertany al domini IP (eth0) per evitar que els paquets es fragmentin quan se'ls afegeixi la capçalera MPLS. Per configurar el direccionament IP de l'equip s'ha d'executar les comandes que es mostren a la Llista 3 i 4.

```
# ifconfig eth0 192.168.1.254 netmask 255.255.255.0 mtu 1496
# ifconfig eth1 10.0.1.1 netmask 255.255.255.0
```

Llista 3: Configuració IP del node LER1

```
# ifconfig eth0 192.168.2.254 netmask 255.255.255.0 mtu 1496
# ifconfig eth1 10.0.2.1 netmask 255.255.255.0
```

Llista 4: Configuració IP del node LER2

A més a més de l'adreçament IP, als LER de la topologia també s'ha de configurar el funcionament del nucli i MPLS-Linux. Per fer-ho cal:

1. Activar el reenviament IPv4 del nucli amb la comanda `echo '1' > /proc/sys/net/ipv4/ip_forward` per tal els paquets destinats a una xarxa remota siguin reenviats en funció de les entrades a la taula d'encaminament.

2. Desactivar el mode debug d'MPLS-Linux amb la comanda `echo '0' > /sys/mpls/debug`, ja que degrada el rendiment de la xarxa.

3. Afegir una entrada a la taula de commutació d'etiquetes indicant que s'ha d'inserir l'etiqueta corresponent a tots els paquets IPv4 que surtin per la interfície de xarxa del domini MPLS i tinguin com a següent salt l'adreça de la xarxa IP destí. Per configurar-ho cal executar la comanda `mpls nhlfe add key 0 instructions push gen 'etiqueta' nexthop 'interficie' ipv4 'adreça_ip'`. Si tot funciona correctament la comanda retorna l'índex de l'entrada a la taula de commutació d'etiquetes.

4. Afegir una entrada a la taula d'encaminament cap a la xarxa IP destí a través de l'adreça del següent salt, indicant que cal inserir l'etiqueta MPLS corresponent a l'índex de l'entrada a la taula de commutació d'etiquetes retornat per la comanda anterior. Per configurar-ho cal executar la comanda `ip route add 'adreça_xarxa' 'mascara_xarxa' via 'porta_enllaç' mpls 'clau'`. Per comprovar el funcionament es pot observar la taula d'encaminament amb la comanda `ip route`.

5. Afegir la interfície de xarxa del domini IP a l'espai de recepció d'etiquetes MPLS amb la comanda `mpls labelspace set dev 'interficie' labelspace 0`.

6. Afegir l'etiqueta corresponent a l'espai de recepció d'etiquetes MPLS amb la comanda `mpls ilm add label gen 'etiqueta' labelspace 0`.

3.3.3 Label Switching Router

A l'equip LSR [LSR] s'ha de configurar el direccionament IP de les interfícies de xarxa que formen part del domini MPLS (eth0, eth1). Per configurar el direccionament IP de l'equip s'ha d'executar les comandes que es mostren a la Llista 5.

```
# ifconfig eth0 10.0.1.254 netmask 255.255.255.0
# ifconfig eth1 10.0.2.254 netmask 255.255.255.0
```

Llista 5: Configuració IP del node LSR

A més a més de l'adreçament IP, al LSR de la topologia també s'ha de configurar el funcionament del nucli i MPLS-Linux. Per fer-ho cal:

1. Activar el reenviament IPv4 del nucli amb la comanda `echo '1' > /proc/sys/net/ipv4/ip_forward` per tal els paquets destinats a una xarxa remota siguin reenviats en funció de les entrades a la taula d'encaminament.

2. Desactivar el mode debug d'MPLS-Linux amb la comanda `echo '0' > /sys/mpls/debug`, ja que degrada el rendiment de la xarxa.

3. Afegir les interfícies de xarxa (`eth0` i `eth1`) a l'espai de recepció d'etiquetes MPLS amb la comanda `mpls labelspace set dev 'interficie' labelspace 0`.

4. Afegir les etiquetes corresponents a l'espai de recepció d'etiquetes MPLS amb la comanda `mpls ilm add label gen 'etiqueta' labelspace 0`.

5. Afegir una entrada a la taula de commutació d'etiquetes indicant que s'ha d'inserir l'etiqueta corresponent a tots els paquets IPv4 que surtin per la interfície de xarxa corresponent i tinguin com a següent salt l'adreça destí. Per fer-ho cal executar i la comanda `mpls nhlfe add key 0 instructions push gen 'etiqueta' nexthop 'interficie' ipv4 'adreça_ip'`. La comanda retorna l'índex de l'entrada a la taula de commutació d'etiquetes.

6. Afegir una entrada a la taula de commutació d'etiquetes, indicant que s'ha d'intercanviar l'etiqueta dels paquets entrants per l'etiqueta MPLS corresponent a l'índex de l'entrada a la taula de commutació d'etiquetes, retornat per la comanda anterior. Per configurar-ho cal executar la comanda `mpls xc add ilm_label gen 'etiqueta' ilm_labelspace 0 nhlfe_key 'clau'`.

3.4 Comprovació de funcionament

La primera comprovació per assegurar que la xarxa MPLS-Linux funciona correctament és executar un `ping` des d'una xarxa IP cap a l'altre, a través del domini MPLS. Tal com es pot observar a la Llista 6, els LSP[10] s'han establert correctament ja que hi ha connectivitat entre les dues xarxes IP.

```
# ping 192.168.2.1 -c 4
PING 192.168.2.1 (192.168.2.1) 56(84) bytes of data.
64 bytes from 192.168.2.1: icmp_seq=1 ttl=61 time=2013 ms
64 bytes from 192.168.2.1: icmp_seq=2 ttl=61 time=1000 ms
64 bytes from 192.168.2.1: icmp_seq=3 ttl=61 time=0.908 ms
64 bytes from 192.168.2.1: icmp_seq=4 ttl=61 time=0.312 ms
```

Llista 6: Comprovació de funcionament amb la utilitat `ping`

La segona comprovació per assegurar que la xarxa MPLS-Linux funciona correctament és determinar els salts que fa el paquet fins arribar al seu destí. Per fer-ho s'ha executat un `traceroute` des d'una xarxa IP cap a l'altre, passant a través del domini MPLS. Tal com es pot observar a la Llista 7, la traça mostra com els paquets passen a través del domini MPLS, ja que el segon salt és transparent a nivell de la capa de xarxa.

```
# traceroute 192.168.2.1
traceroute to 192.168.2.1 (192.168.2.1), 30 hops max, 38 byte packets
 1  192.168.1.254 (192.168.1.254)  0.209 ms  0.112 ms  0.079 ms
 2  * * *
 3  10.0.2.254 (10.0.2.254)  0.449 ms  0.288 ms  0.225 ms
 4  192.168.2.1 (192.168.2.1)  0.348 ms  0.292 ms  0.275 ms
```

Llista 7: Comprovació de funcionament amb la utilitat `traceroute`

[10] Label Switched Path

L'última comprovació per assegurar el correcte funcionament de la xarxa MPLS-Linux és observar si els paquets que circulen a través del LSR estan etiquetats correctament. Tal com es pot observar a la Figura 2, les etiquetes MPLS estan inserides entre la capçalera Ethernet i la capçalera IP. Per capturar els paquets que circulen a través de la xarxa s'ha utilitzat l'aplicació TCPdump i per observar les capçaleres dels paquets gràficament s'ha utilitzat l'aplicació Wireshark [14].

```
▷ Frame 5 (102 bytes on wire, 96 bytes captured)
▽ Ethernet II, Src: 3com_67:08:3e (00:01:02:67:08:3e), Dst: 3com_67:0a:6e (00:01:02:67:0a:6e)
  ▷ Destination: 3com_67:0a:6e (00:01:02:67:0a:6e)
  ▷ Source: 3com_67:08:3e (00:01:02:67:08:3e)
    Type: MPLS label switched packet (0x8847)
▽ MultiProtocol Label Switching Header, Label: 1000, Exp: 0, S: 1, TTL: 63
    MPLS Label: 1000
    MPLS Experimental Bits: 0
    MPLS Bottom Of Label Stack: 1
    MPLS TTL: 63
▷ Internet Protocol, Src: 192.168.1.1 (192.168.1.1), Dst: 192.168.2.1 (192.168.2.1)
▷ Internet Control Message Protocol
```

Figura 2: Comprovació de funcionament amb l'aplicació Wireshark

Així doncs, podem concloure que la xarxa MPLS-Linux funciona correctament ja que existeix connectivitat entre les dues xarxes IP situades als extrems de la topologia i, a més a més, els paquets que circulen a través del domini MPLS incorporen les etiquetes corresponents.

4 Treball futur

A partir del treball desenvolupat han sorgit noves idees relacionades amb el projecte MPLS-Linux que cal tractar de cara al futur, degut a l'interès que presenten en el camp de la recerca i les aplicacions pràctiques que poden tenir en l'àmbit acadèmic.

En primer lloc pot ser interessant dur a terme un anàlisi de rendiment per comparar les prestacions que ofereix MPLS-Linux respecte la implementació de la pila IPv4 i IPv6 a les versions 2.6 de Linux, i també respecte els encaminadors de xarxa comercials, com per exemple els de la sèrie 3600 de la companyia cisco Systems. Això ha de permetre comprovar la viabilitat d'utilitzar commutadors basats en GNU/Linux i MPLS-Linux en entorns de producció.

Un altre aspecte interessant pot ser treballar en la integració d'LDP-portable [3, 4] i Quagga [15] per tal que l'encaminament de paquets, i la senyalització i distribució d'etiquetes MPLS es duguin a terme de forma automàtica. En aquest àmbit cal comprovar la compatibilitat amb els encaminadors de xarxa comercials per poder desplegar xarxes heterogènies.

Finalment, també pot ser interessant desenvolupar un LiveCD amb suport per MPLS-Linux, LDP-portable i Quagga. Aquesta plataforma es podria utilitzar per fer pràctiques de laboratori relacionades amb la commutació d'etiquetes, utilitzant MPLS-Linux, i també relacionades amb l'encaminament dinàmic de paquets, utilitzant protocols com RIP, OSPF i BGP, entre d'altres.

5 Conclusions

En aquest article s'ha descrit el procés per desplegar una xarxa MPLS lliure utilitzant el sistema operatiu GNU/Linux i el programari desenvolupat pel projecte MPLS-Linux. El procés de desplegament descrit inclou el disseny de la xarxa, la instal·lació i configuració dels equips que en formen part i, finalment, la comprovació del correcte funcionament.

El fet d'utilitzar una alternativa lliure a l'equipament de xarxa comercial, àmpliament utilitzat avui en dia, és especialment interessant ja que, a més a més de reduir el cost econòmic i estar disponible sota una llicència que permet l'accés, la modificació i la redistribució del codi font, ofereix la possibilitat de disposar d'una xarxa basada en maquinari —sense els inconvenients propis dels simuladors de xarxa basats en programari— per dur a terme tasques de docència i d'investigació.

Però malgrat els avantatges que aporta el fet d'utilitzar programari lliure per desplegar una xarxa, encara queden bastants aspectes a treballar per tal que aquesta sigui una alternativa real a l'equipament de xarxa comercial. Tal com s'ha descrit a la secció 4, és important centrar-se en la integració per aconseguir que l'encaminament i la senyalització i distribució d'etiquetes es dugui a terme de forma automàtica i compatible amb els estàndards. També és important posar en marxa el desenvolupament d'un Live-CD que faciliti el desplegament de la xarxa i permeti realitzar pràctiques de laboratori.

6 Llicència

Aquest article es distribueix sota una llicència Creative Commons Reconeixement-Sense obres derivades 2.5 Espanya. Veieu `http://creativecommons.org/licenses/by-nd/2.5/es/deed.ca` per més informació.

Referències

[1] T. Henderson, S. Roy, S. Floyd i G. Riley. The Network Simulator 2, 1995. *En línia:* [`http://www.isi.edu/nsnam/ns/`].

[2] M. Domínguez i J.L. Gonzalez. Open SimMPLS, 2004. *En línia:* [`http://patanegra.unex.es/opensimmpls/`].

[3] J.R. Leu i R. Casellas. MPLS for Linux, 2000. *En línia:* [`http://sourceforge.net/projects/mpls-linux/`].

[4] J.R. Leu i R. Casellas. MPLS-Linux, 2000. *En línia:* [`http://mpls-linux.sourceforge.net/`].

[5] E. Rosen, A. Viswanathan i R. Callor. RFC 3031 - Multi-Protocol Label Switching Architecture, 2001. Internet Engineering Task Force.

[6] E. Rosen, A. Viswanathan i R. Callor. RFC 3032 - MPLS Label Stack Encoding, 2001. Internet Engineering Task Force.

[7] The International Engineering Consortium. Multi-Protocol Label Switching, 2000. *En línia:* [`http://blinky-lights.org/networking/mpls.pdf`].

[8] IXIA, leader in IP performance testing. Multi-Protocol Label Switching, conformance and performance testing, 2003. *En línia:* [`http://www.ixiacom.com/pdfs/library/white_papers/mpls.pdf`].

[9] C. Semeria. Multi-Protocol Label Switching, enhancing routing in the new public network, 2005. *En línia:* [http://www.juniper.net/solutions/literature/white_papers/200001.pdf].

[10] Debian, the universal operating system. *En línia:* [http://www.debian.org/].

[11] IProute2, utilities for controlling TCP/IP networking and traffic control in Linux. *En línia:* [http://www.linux-foundation.org/en/Net:Iproute2].

[12] OpenSSH, keeping your communiqués secret. *En línia:* [http://www.openssh.com/].

[13] TCPdump, dump traffic on a network. *En línia:* [http://www.tcpdump.org/].

[14] Wireshark, a network protocol analyzer. *En línia:* [http://www.wireshark.org/].

[15] Quagga, a software routing suite. *En línia:* [http://www.quagga.net/].