
WAN

Xarxes de gran abast

PID_00268534

Enric López i Rocafiguera
Pere Barberán Agut

Temps mínim de dedicació recomenat: 9 hores



**Enric López i Rocafiguera**

Enginyer de Telecomunicacions, en l'especialitat de Comunicacions, per l'Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Telecomunicació de Barcelona de la Universitat Politècnica de Catalunya. Professor de Xarxes de comunicacions i Xarxes de computadors, a les carreres d'Enginyeria Tècnica de Telecomunicacions, Enginyeria Tècnica Industrial i Enginyeria Tècnica Informàtica a l'Escola Politècnica Superior (EPS) de la Universitat de Vic (UVic). Membre del grup de recerca de la UVic. Professor del màster de Tecnologies de la informació i la comunicació a l'empresa. Ha estat cap del Departament de Teoria del Senyal i Comunicacions, i membre del Consell de Direcció de l'EPS de la UVic.

**Pere Barberán Agut**

Enginyer de Telecomunicacions per la Universitat Politècnica de Catalunya. Professor de l'Escola Universitària Politècnica de Mataró, on forma part de l'àrea de Xarxes i Serveis. De 2005 a 2010 ha estat director del Departament de Telecomunicacions i Arquitectura de Computadors. Actualment responsable tècnic del laboratori de *networking* TCM NetLab a la Fundació Tecnocampus Mataró-Maresme.

La revisió d'aquest recurs d'aprenentatge UOC ha estat coordinada pel professor: Ferran Adelantado Freixer (2019)

Segona edició: setembre 2019

© Enric López i Rocafiguera, Pere Barberán Agut

Tots els drets reservats

© d'aquesta edició, FUOC, 2019

Av. Tibidabo, 39-43, 08035 Barcelona

Realització editorial: FUOC

Cap part d'aquesta publicació, incloent-hi el disseny general i la coberta, no pot ser copiada, reproduïda, emmagatzemada o transmesa de cap manera ni per cap mitjà, tant si és elèctric com químic, mecànic, òptic, de gravació, de fotocòpia o per altres mètodes, sense l'autorització prèvia per escrit dels titulars del copyright.

Índex

Introducció	7
Objectius	8
1. Xarxes de commutació	9
1.1. Commutació de circuits	11
1.2. Commutació de paquets	13
1.2.1. Introducció a la transmissió de dades	13
1.2.2. Commutació de missatges	13
1.2.3. Commutació de paquets	15
1.2.4. Commutació de cel·les	24
1.3. Encaminament	24
1.3.1. Encaminament no adaptatiu	25
1.3.2. Encaminament adaptatiu	27
1.4. Control de trànsit	28
1.4.1. Control de flux	29
1.4.2. Control de congestió	29
1.4.3. Prevenció de la congestió	30
2. Xarxa telefònica commutada (XTC)	33
2.1. Estructura i serveis de la xarxa telefònica	33
2.2. Planificació de la xarxa telefònica	34
2.2.1. Trànsit	34
2.2.2. Models	36
2.3. Sistema de transmissió	36
2.3.1. Multiplexatge analògic (FDM)	37
2.3.2. Multiplexatge digital (TDM)	38
2.3.3. Jerarquia digital plesidòcra (PDH)	38
2.4. Evolució de la xarxa telefònica	39
2.5. xDSL	40
2.5.1. Tecnologia DSL	40
2.5.2. ADSL	41
2.5.3. Famílies xDSL	45
2.5.4. Factors que afecten el rendiment del DSL	46
3. Frame Relay	47
3.1. Evolució de la X.25	47
3.1.1. Principals característiques de la X.25	47
3.1.2. Comparació entre X.25 i Frame Relay	48
3.2. Protocols del Frame Relay	49
3.2.1. Protocol LAPF	50
3.2.2. Nucli del LAPF	50

3.2.3. Identificador de connexió de l'enllaç de dades (DLCI)	51
3.2.4. Protocol LAPF al pla de control	52
3.2.5. Control de flux.....	52
3.2.6. Congestió	52
3.2.7. Gestió del trànsit	53
3.2.8. Control de congestió	56
4. Mode de transferència asíncrona (ATM)	57
4.1. Configuració i model de referència de l'ATM	58
4.2. Nivell físic. Estructura SDH	59
4.2.1. Estructura de protocols	60
4.2.2. Estructures de transmissió. Jerarquia digital síncrona	60
4.2.3. Estructura de la trama SDH	62
4.3. Nivell ATM. Cel·les	64
4.3.1. Format de la cel·la	65
4.3.2. Multiplexatge ATM	66
4.4. Nivell d'adaptació ATM (AAL)	67
4.4.1. Estructura del nivell AAL	68
4.4.2. Serveis del nivell AAL	73
4.5. Gestió del trànsit	74
4.5.1. Definició de paràmetres de contracte de trànsit	74
4.5.2. Control de congestió	75
4.5.3. Control de congestió preventiu	76
4.5.4. Control de congestió reactiu	78
5. Multiprotocol label switching	79
5.1. Problemes experimentats pels proveïdors de servei	79
5.2. Què és MPLS?	80
5.3. Beneficis d'MPLS	80
5.4. Característiques d'MPLS	80
5.5. Pila d'etiquetes MPLS (MPLS label stack)	81
5.5.1. Capçalera inserida (shim header)	82
5.5.2. Forwarding equivalence class (FEC)	82
5.6. Arquitectura MPLS	82
5.7. Components de xarxa MPLS	83
5.7.1. Establiment de l'LSP	84
5.8. Protocol de distribució d'etiquetes (LDP)	85
5.9. Exemple de topologia MPLS	87
Annex	93
Resum	103
Activitats	105
Exercicis d'autoavaluació	105

Solucionari	109
Glossari	111
Bibliografia	115

Introducció

Un fet important en aquestes darreres dècades ha estat la interconnexió entre les persones i els ordinadors per a poder comunicar-se a distància. Mentre que les xarxes d'àrea local (LAN) proporcionen la capacitat per a transmetre dades a un petit grup d'usuaris tancat en una àrea limitada, com pot ser una oficina, un edifici, un campus, les **xarxes de gran abast** (WAN) tenen la capacitat de cobrir geogràficament tot el planeta, més enllà de l'abast que poden controlar els seus usuaris, i de tenir un nombre molt gran d'usuaris. El principal exemple és Internet.

Els següents són els principals requeriments que han de tenir les xarxes WAN per tal de transmetre la informació:

- Les dades han d'arribar a la seva destinació lliures d'errors.
- Les dades han d'arribar el més aviat possible després de la seva transmissió. El lliurament ha de ser quasi instantani.
- La destinació ha de poder extreure la informació dels paquets que rebí.

Aquests requeriments ens porten a fer-nos un seguit de preguntes que respondrem en aquest mòdul didàctic, i que estan relacionades amb un conjunt de conceptes, com els següents:

- Perquè la informació arribi a la destinació, el servei que utilitzarem podrà ser orientat a connexió, o no. Caldrà que els paquets d'informació portin associat un camp d'adreça per indicar la destinació de la informació en la capçalera. Aquesta adreça ha de servir perquè els nodes encaminin correctament les dades a través dels seus commutadors.
- Perquè la transmissió sigui ràpida caldran sistemes amb retards petits. Aquests retards depenen de diversos factors, com són el temps de propagació, la quantitat de missatges que cal per fer la comunicació, el temps de processament en els nodes i finalment la qualitat del medi de transmissió.
- Perquè la destinació pugui extreure la informació dels paquets que li arriben cal que els protocols ho permetin.

En aquest mòdul didàctic veurem els principis de funcionament i les característiques més importants d'aquests tipus de xarxes i analitzarem alguns dels aspectes que acabem de mencionar i que són clau del seu disseny. Presentarem també alguns exemples de xarxes de gran abast que podem trobar en el món avui dia, com són la xarxa telefònica commutada, Frame Relay o ATM i la seva evolució amb la xarxa MPLS.

Objectius

Aquests materials didàctics han de permetre que assolis els objectius següents:

- 1.** Entendre el funcionament de les diferents xarxes de commutació, en particular les de commutació de circuits i de paquets.
- 2.** Poder comprendre la commutació en mode datagrama i en mode circuit virtual i poder-les comparar.
- 3.** Estudiar la xarxa telefònica commutada (XTC), la seva arquitectura i estructura de les dades. Entendre la seva evolució fins a les tecnologies d'alta velocitat actuals.
- 4.** Estudiar la tecnologia Frame Relay i comparar-la amb la seva predecessora X.25.
- 5.** Comprendre la necessitat de la gestió del trànsit i del control de congestió a la xarxa Frame Relay.
- 6.** Entendre el mode de transferència asíncron (ATM) i conèixer les diferències que presenta respecte de Frame Relay.
- 7.** Conèixer els protocols associats a cada nivell de la tecnologia ATM i les jerarquies de multiplexatge síncron (SDH).
- 8.** Conèixer les característiques bàsiques del protocol MPLS, la seva justificació, característiques i funcionament bàsic.

1. Xarxes de commutació

Podem dividir una xarxa de commutació en els mitjans de transmissió i de commutació que són els que permeten establir camins físics o virtuals entre l'origen i la destinació. El mitjà de transmissió pot ser el cable bifilar o coaxial, guia d'ona, fibra òptica i satèl·lits. Els mitjans de commutació són els que permeten a un abonat, o terminal, poder elegir l'abonat amb el qual es vol comunicar.

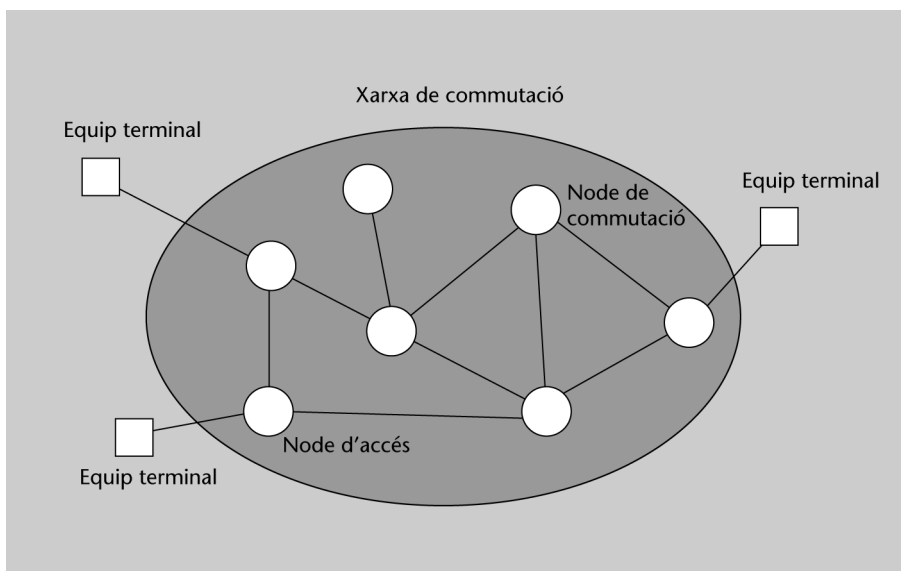
Les xarxes de gran abast (WAN) són xarxes commutades.

Una xarxa està formada per tres elements: !

Enllaços. Són els mitjans de comunicació que permeten establir un o més canals de comunicació entre dos punts d'una xarxa. Habitualment estan multiplexats per permetre més d'una comunicació simultània a través de cadascun d'ells i augmentar així el nombre de connexions possibles a través de la xarxa.

- **Nodes.** Són els punts de la xarxa on arriben dos o més enllaços i es realitzen les funcions de commutació. La missió principal dels nodes és encaminar les dades de manera que puguin arribar des de l'equip origen fins al de destinació. Hi ha dos tipus de nodes: els que només estan connectats a altres nodes, anomenats **nodes de commutació**, i els que, a més, es connecten als terminals, anomenats **nodes d'accés**, que permeten l'accés a la xarxa.
- **Equips terminals.** Són els elements electrònics que ens permeten posar o extreure senyals a la xarxa a través d'un enllaç.

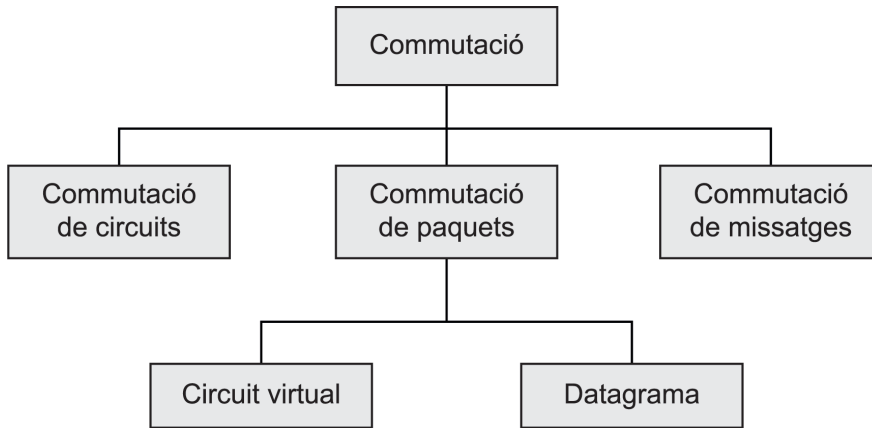
Figura 1. Esquema d'una xarxa de commutació



Des del punt de vista dels equips que s'interconnecten, el recurs que comparteixen no és un sol cable o un anell, sinó que és tota la xarxa.

Hi ha diferents tècniques de commutació: ⚠

Figura 2. Esquema de xarxes de commutació



- **Commutació de circuits.** Consisteix a establir un circuit físic prèviament a l'enviament d'informació que es manté obert mentre dura la transmissió. Pot ser espacial i assignar un circuit físic separat dels altres, o temporal, que es comparteix amb altres usuaris.
- **Commutació de missatges.** Està basat en el tractament de blocs d'informació amb un mateix origen i destinació, i que són tractats en els centres de commutació. Els retards són elevats. En són exemples la xarxa Tèlex i la SITA de reserva de vols.
- **Commutació de paquets.** Similar a la de missatges, però utilitza **paquets** curts i de longitud fixa. Cadascun d'ells té la informació necessària per arribar a la destinació. És molt ràpida i n'hi ha de dos tipus:
 - **Datagrama:** quan la senyalització no influeix sobre el canal de comunicacions prèviament a la transmissió, no cal establir el camí previ i s'elegeix segons l'estat de la xarxa. Poden arribar els paquets en desordre.
 - **Circuit virtual:** s'estableix un camí lògic prèviament a l'enviament dels paquets amb l'intercanvi de senyals entre l'origen i la destinació. Així assegurarem que arriben a la destinació i ordenats. L'utilitza la xarxa de commutació de paquets X.25.


També hi ha les línies dedicades, que són xarxes en què no hi ha la part de commutació, és a dir, que no poden elegir l'equip terminal al qual es volen connectar i sempre s'han de comunicar amb els mateixos abonats.

1.1. Commutació de circuits

La commutació de circuits és el mode d'operació d'una xarxa en què la comunicació entre dos terminals es produeix a través de camins establerts a l'inici de la comunicació, que no varien durant la comunicació en si i es dediquen en exclusiva a aquesta comunicació.

En la commutació de circuits els camins es creen a l'inici de la comunicació, per commutació en els nodes intermedis, unint una sèrie de circuits físics (per exemple, una línia de parell trenat dins d'un cable de parells, un canal en un sistema FDM o TDM, en un canal de radiofreqüència o en una fibra òptica). Les característiques més rellevants de les comunicacions que utilitzen la commutació de circuits són les següents:

- L'amplada de banda, o velocitat de transmissió, és fix.
- El retard és petit i constant.

Aquest camí està format per diferents enllaços entre els nodes, i cal crear-lo prèviament a l'inici de la transmissió de les dades i alliberar-lo en acabar la transmissió. Així doncs, en totes les connexions mitjançant la tècnica de commutació de circuits, podem distingir tres fases: 

1) **Establiment del circuit.** El primer que s'ha de fer és trobar un camí a través de la xarxa entre els dos equips que es volen comunicar. L'equip origen ho demana al node al qual està connectat. Aquest node és l'encarregat de traslladar la petició a un dels nodes intermedis als quals està connectat; aquest, a un altre, i així successivament fins a arribar a l'equip destinació. A mesura que la petició va passant pels nodes, es va creant el circuit. La forma en què es va creant el camí segueix uns criteris d'encaminament, de cost, etc. Si l'equip de destinació accepta la connexió, envia un senyal a l'equip d'origen per indicar-li-ho.

2) **Transferència de dades.** Entre els equips s'estableix un circuit, igual que si estiguessin connectats directament, i la informació es transmet sobre aquest circuit. Els recursos que formen el circuit estan ocupats, encara que no hi hagi transferència de dades, fins que no se sol·liciti explícitament el final de la connexió. Això pot provocar un ús ineficient de la xarxa si el percentatge del temps total de connexió durant el qual realment es transfereix informació és baix.

3) **Desconnexió.** Acabada la transferència, cal alliberar els recursos que s'han utilitzat perquè puguin ser utilitzats posteriorment. L'origen, o la destinació, indiquen al seu node més proper que s'ha acabat la connexió i alliberen els re-

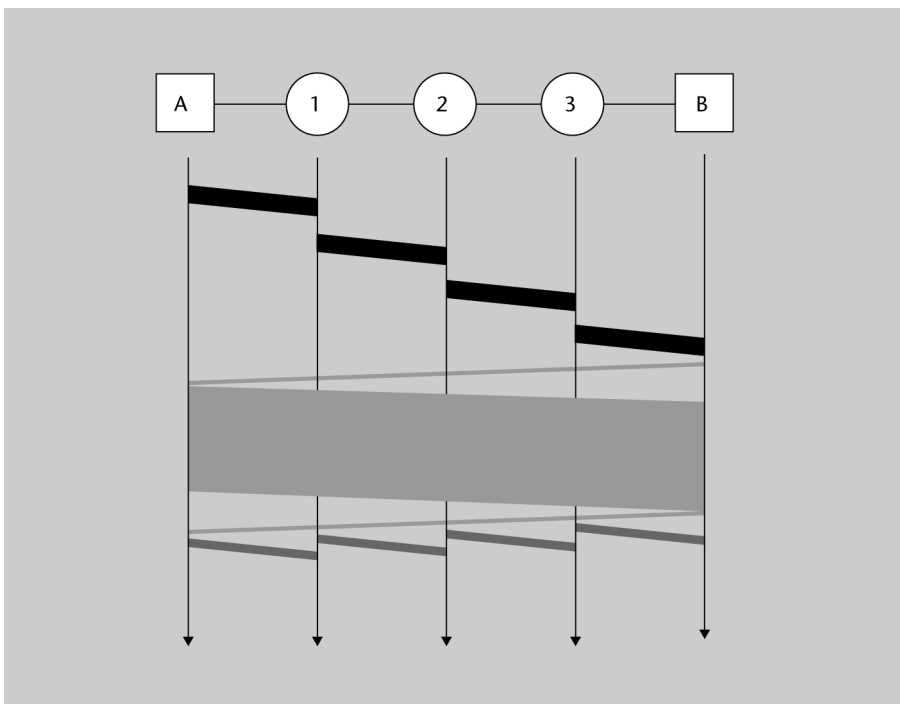
curios. Això ho fan els diferents nodes per on passa la connexió fins a alliberar tot el camí.

Diagrama temporal d'una connexió amb commutació de circuits

El diagrama temporal ens mostra una connexió de dos equips a través de tres nodes, mitjançant commutació de circuits. A l'eix horitzontal hi hem representat la connexió, amb els nodes corresponents indicats amb línies verticals, mentre que al vertical hi ha el temps. Les línies inclinades simbolitzen el camí de les dades des d'un punt fins a un altre. La inclinació indica la velocitat de la transmissió: com més inclinada és la línia, menor és la velocitat de transmissió.

- Inicialment l'equip d'origen (A) envia un senyal de petició d'establiment de circuit que va travessant els nodes fins a arribar a l'equip de destinació (B).
- L'equip de destinació (B) accepta la connexió i envia un senyal d'acceptació a l'equip d'origen pel camí ja creat (en aquest cas no hi ha retard de processament als nodes).
- Després d'haver rebut el senyal d'acceptació, s'inicia l'intercanvi de dades.
- Finalment, l'equip de destinació envia un senyal de fi de connexió travessant els diferents nodes, que serveix als nodes per a alliberar els enllaços ocupats i respondre al senyal de fi de connexió.

Figura 3. Diagrama temporal d'una connexió amb commutació de circuits



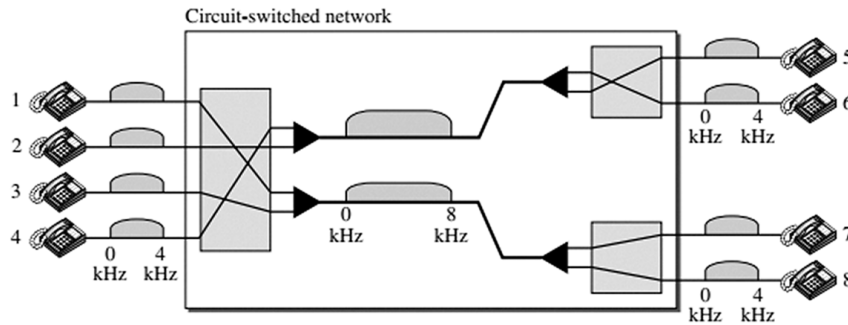
En aquest tipus de commutació els nodes no fan cap funció d'emmagatzematge, sinó que fan funcions estrictament de commutació. Com que la reserva de recursos de la xarxa es fa en exclusiva, la commutació de circuits resultarà efectiva quan aquestes característiques s'aprofitin al màxim, per tant, per a fluxos continus de dades. L'exemple més clar i important d'aquesta manera de treballar és la transmissió de veu per la xarxa telefònica amb els estàndards de l'ITU_T (amb els seus circuits digitals *full-duplex* a 64 kbit/s dedicats a cada trucada).

Recordeu que en commutació de circuits cal reservar els recursos durant la fase d'establiment; aquests recursos són dedicats durant tota la fase de transferència de dades fins la fase de desconexió.

Exemple

Disposem d'una xarxa de commutació de circuits per a connectar vuit telèfons. La comunicació es fa per mitjà de canals de veu a 4 kHz. Els enllaços són FDM i permeten un màxim de dos canals de veu. Així, l'ample de banda és de 8 kHz. A la figura es mostra la xarxa de l'exemple. El telèfon 1 es connecta amb el telèfon 7; el 2 amb el 5; el 3 amb el 8, i el 4 amb el 6. Així, els commutadors fan el multiplexatge i desmultiplexatge dels canals. En aquesta topologia, si un nou telèfon es volgués connectar no podria fins que alguna de les connexions existents alliberés els recursos.


Figura 4. Xarxa de commutació de circuits de l'exemple



1.2. Commutació de paquets

1.2.1. Introducció a la transmissió de dades

A causa de la necessitat de la transmissió de dades entre equips informàtics, inicialment es va utilitzar la xarxa telefònica. Aquest sistema és molt ineficient, ja que la XTC manté les línies ocupades encara que no hi hagi informació circulant per elles i els equips informàtics generen un flux de dades a ràfegues, amb la qual cosa el tant per cent de temps en què s'utilitza la línia sol ser bastant baix. A més, la commutació de circuits necessita que els dos sistemes connectats treballin a la mateixa velocitat, cosa que no sol passar en sistemes de transmissió de dades.

Les tècniques de commutació de paquets van aparèixer com una alternativa a la commutació de circuits per a la transmissió de dades amb l'objectiu de solucionar les seves mancances: 

- Permetre la interconnexió entre equips de diferents velocitats de transmissió.
- Millorar l'eficiència en la utilització dels recursos de la xarxa.
- Permetre posar prioritats en els paquets.
- Poder establir diferents connexions simultànies de manera flexible.

1.2.2. Commutació de missatges

Quan un terminal vol enviar un missatge a un altre, aquest terminal hi afegeix l'adreça de destinació i transmet el missatge cap a la xarxa perquè viatgi node a node fins a arribar a la destinació. En cada node intermediari el missatge és emmagatzemat temporalment i després, a partir de la informació d'encamina-

ment i la disponibilitat del node, es determina el node següent de la connexió i es deixa a la cua corresponent a l'enllaç de sortida. Posteriorment, quan sigui el seu torn, el missatge serà enviat. Aquest procés continua fins que el missatge arriba a la seva destinació.

Aquesta tècnica presenta certs avantatges sobre la tècnica de commutació de circuits. Primer, l'eficiència dels canals de commutació és més gran, ja que els canals entre els nodes no es dediquen exclusivament a la comunicació entre dos terminals, sinó que són compartits per molts missatges. A més, no requereix que el transmissor i el receptor estiguin disponibles simultàniament. D'altra banda, quan el trànsit augmenta a les xarxes amb commutació de circuits, algunes sol·licituds queden bloquejades, però en xarxes amb commutació de missatges només provoquen un augment del temps que triga a arribar el missatge a la seva destinació.

Altres característiques de la commutació de missatges són les següents: un missatge pot ser enviat a moltes destinacions, es pot establir prioritat als missatges, el control i la recuperació d'errors poden ser efectuats en la xarxa de comunicació, fins i tot, es poden fer canvis de velocitat de transmissió i de codis.

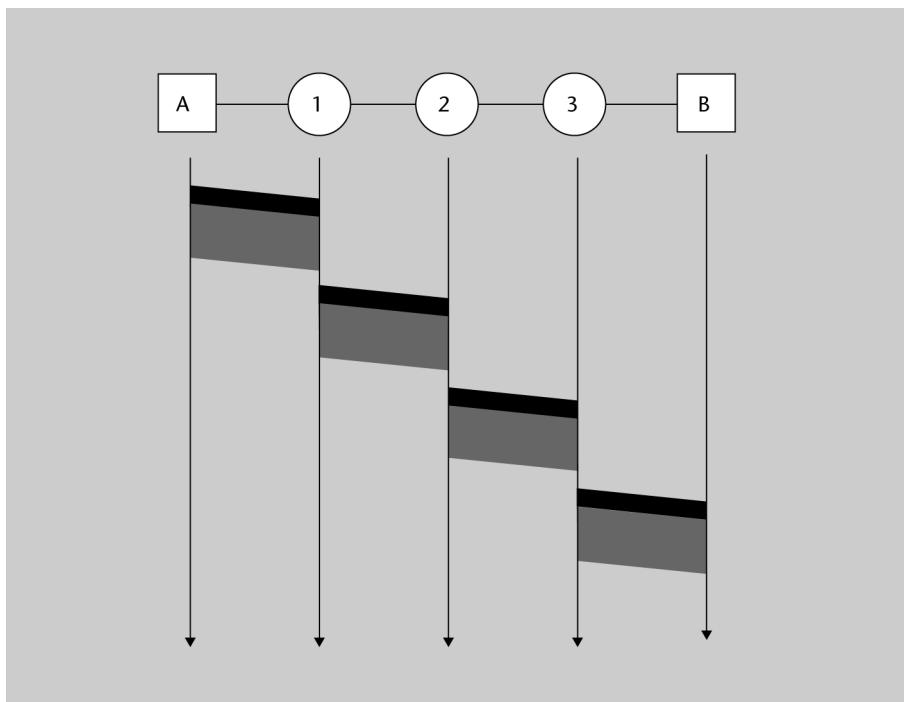
El principal inconvenient de la commutació de missatges és que cada node que intervé en una connexió ha d'esperar fins a haver rebut tot el missatge per poder decidir cap a on l'ha de transmetre, i per tant, no és útil per a processos en temps real, ja que el temps perquè arribi el missatge a la seva destinació pot ser gran. És precisament per aquest motiu que aquesta tècnica no s'utilitza gaire. Com a exemple podem mencionar la xarxa telegràfica.

Diagrama temporal d'una connexió amb commutació de missatges

En una connexió amb commutació de missatges el procediment per a la transmissió de la informació és el següent:

- Suposem que A, sense esperar que s'hagi establert el camí, envia un missatge sencer al node 1. Aquest l'emmagatzema i a continuació el transmet al node 2.
- Un cop A ha enviat el missatge al node 1, ja es pot alliberar l'enllaç per tornar-lo a utilitzar quan A tingui un altre missatge a punt per a transmetre. El mateix es pot dir per als altres enllaços entre els diferents nodes, fins que el darrer node envia el missatge a la seva destinació.

Figura 5. Diagrama temporal d'una connexió amb commutació de missatges



Cal remarcar que els enllaços només estan ocupats el temps que realment es fan servir i, per tant, l'eficiència és superior. A més, no cal que estiguin disponibles tots els nodes, mentre l'estació A transmet el missatge al node 1, la resta d'enllaços poden estar ocupats per altres connexions.

1.2.3. Commutació de paquets

Per tal d'evitar els inconvenients de la commutació de missatges, quan un equip necessita enviar un missatge de longitud més gran a la grandària fixada per a un paquet, es divideix el missatge en trossos de longitud petita (per exemple, 1 kbyte) anomenats **paquets**, i a cada paquet s'hi afegeix una informació de control que inclou les dades que li calen a la xarxa per a poder-lo encaminar adequadament i per a detectar els possibles errors. D'aquesta manera, es redueix la memòria necessària per a l'emmagatzematge i el temps de processament dins dels nodes, amb la reducció conseqüent de retard acumulat dins de la xarxa.

Els paquets són unitats d'informació formades per grups de bits.

A les xarxes de commutació de paquets, no hi ha una reserva de recursos; els recursos es distribueixen sota demanda.

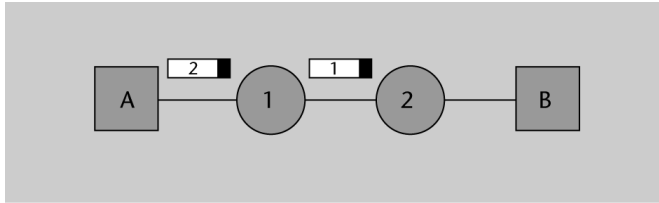
Exemple de commutació de paquets

Alguns exemples d'aquest tipus de commutació són en les xarxes de dades públiques o privades que operen amb estàndards, com X.25, Frame Relay, TCP/IP, etc.

Si tenim connectats dos terminals a través de dos nodes intermedis mitjançant commutació de paquets, el procediment que se segueix per a la transmissió de la informació del node A al node B és semblant a la commutació de missatges:

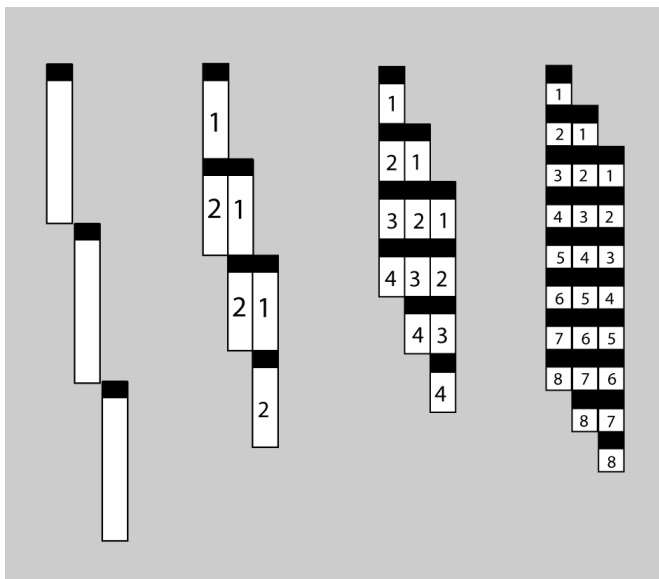
- Suposem que A envia un paquet al node 1. Aquest l'emmagatzema i a continuació el transmet al node 2.
- Un cop A ha enviat el primer paquet al node 1, ja es pot alliberar l'enllaç o utilitzar-lo per a transmetre el paquet següent. El procés es pot fer fins a acabar de transmetre tots els paquets. El mateix passa en els altres enllaços entre els diferents nodes, fins que el darrer node envia l'últim paquet a la destinació.

Figura 6. Connexió de dos terminals a través de dos nodes intermedis



Suposem, per exemple, que volem transmetre un missatge de 24 bytes des d'un terminal a un altre passant pels dos nodes, 1 i 2. Suposem també que cada paquet té una capçalera de 3 bytes. Podem enviar un únic paquet de 27 bytes, o bé dividir el missatge en dues parts, en quatre o en vuit. En la figura 7 tenim representat el temps de transmissió per als quatre casos indicats anteriorment. A mesura que disminuïm la longitud del paquet disminuïm el temps de transmissió, fins al punt que si trossegem tant el missatge, hi ha tantes capçaleres que fan augmentar el temps de transmissió altra vegada.

Figura 7. Temps de transmissió en funció de la longitud del paquet



Els principals avantatges de la commutació de paquets respecte de la commutació de circuits són els següents:

- L'amplada de banda no està prefixada, és a dir, la xarxa proporciona capacitat segons la demanda i en funció de la disponibilitat dels recursos.
- L'eficiència de la línia és més gran, ja que cada enllaç es comparteix entre diversos paquets que estaran a la cua per a ser enviats quan es pugui.
- Es permeten connexions entre equips de velocitats diferents: això és possible ja que els paquets es van guardant en cada node conforme arriben i es van enviant a la seva destinació.

- No es bloquegen trucades, ja que totes les connexions s'accepten, encara que si hi ha moltes trucades es produeixen retards en la transmissió.
- Es poden posar prioritats: un node pot seleccionar de la seva cua de paquets que han de ser transmesos, els que tenen la prioritat més elevada segons certs criteris de prioritat.

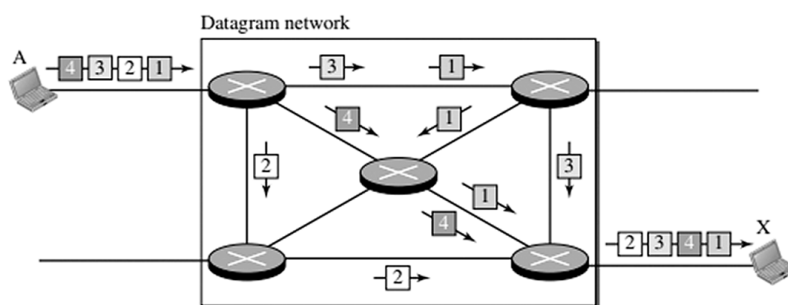
Hi ha dues tècniques d'encaminar els paquets a través de la xarxa de commutació: la tècnica de datagrama i la tècnica de circuits virtuals. 🚫

Tècnica de datagrama

En la tècnica de datagrama cada paquet es tracta de manera independent, sense cap referència als paquets anteriors, és a dir, l'emissor enumera cada paquet, hi afegeix informació de control en una capçalera i l'envia cap a la seva destinació. Els paquets segueixen camins diferents. És probable que es rebin en ordre diferent, i per tant, que la destinació hagi de reordenar-los. També és possible que un paquet es perdi, atès que algun node està inactiu, aleshores la destinació haurà de detectar-ho i d'intentar recuperar-lo. Per a això cal que tinguin les eines necessàries.

A la figura següent es mostra com la tècnica de datagrama transmet quatre paquets des de l'estació A fins a l'estació X. A l'exemple els quatre paquets (datagrames) pertanyen al mateix missatge, però poden viatjar per diferents camins per arribar al mateix destí. Així, cada node enviarà els paquets de manera independent en funció de l'amplada de banda de les interfícies de sortida dels nodes en cada moment. Com a conseqüència, a la figura es mostra el cas en què els paquets han arribat al destí desordenats.

Figura 8. Xarxa de datagrames amb cinc commutadors



Les xarxes que treballen amb datagrames se solen anomenar també xarxes sense connexió (*connectionless networks*). El terme sense connexió significa que el node de commutació no manté informació sobre l'estat de la connexió i cada paquet, com s'ha dit, es tracta de manera independent sense tenir-ne en compte l'origen o el destí.

És important entendre que el commutador haurà de tenir unes taules de commutació, les quals estaran basades en l'adreça del destinatari per a poder encaminar els paquets de manera correcta.

Els commutadors en les xarxes de datagrames utilitzen taules d'encaminament basades en l'adreça de destí.

Figura 9. Taula de commutació en datagrames

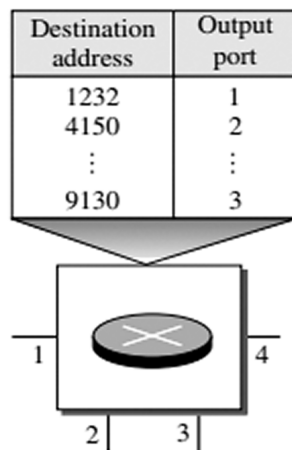
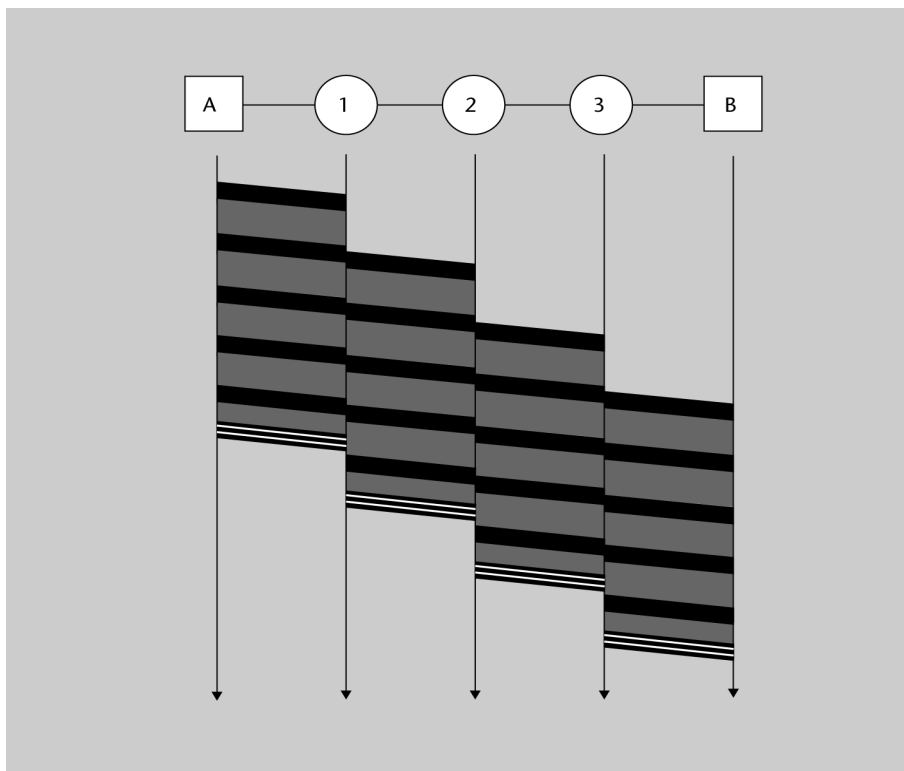


Diagrama temporal d'una connexió en mode datagrama

En una connexió en mode datagrama el procediment que se segueix per a la transmissió de la informació és el que hem comentat anteriorment:

- A envia un paquet al node 1. Aquest l'emmagatzema i a continuació el transmet al node 2.
- Un cop A ha enviat el primer paquet al node 1, envia el següent paquet i així successivament fins a transmetre'ls tots.
- El mateix procediment es fa en els altres enllaços entre nodes, fins que el darrer node envia l'últim paquet a la destinació.

Figura 10. Diagrama temporal d'una connexió en mode datagrama



Tècnica de circuits virtuals

El camí que segueixen tots els paquets pertanyents a una comunicació es determina a l'inici i es manté invariable al llarg de la comunicació, com en la commutació de circuits. En aquest cas només es determina el camí, no es fa una reserva de recursos en exclusiva com succeïa en la commutació de circuits. D'aquí el nom de **circuit virtual**.

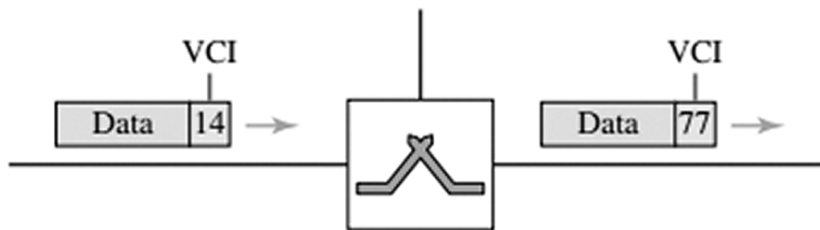
L'equip origen envia un paquet de **petició de trucada** (*call request*) al primer node, aquest paquet s'encarrega d'establir un camí lògic de node en node fins a arribar a la destinació, i fixa el camí per on aniran, un a un, tots els paquets de dades. Si la destinació accepta la petició, retorna un altre paquet de **trucada acceptada** (*call accept*) pels mateixos nodes en sentit contrari. A partir d'aquí s'ha establert un circuit virtual, similar a un circuit en una xarxa de commutació de circuits, que permet la comunicació entre dos equips sense que els nodes hagin de prendre decisions d'encaminament. Els mateixos paquets tenen un identificador de circuit virtual. La connexió finalitza quan un dels terminals envia a l'altre un paquet de **petició d'alliberament** (*clear request*). Cada equip pot tenir diversos circuits virtuals amb la mateixa destinació, o amb d'altres, simultàniament. Tal com es pot veure, la principal característica d'aquesta tècnica és que el circuit s'estableix prèviament a la comunicació. A més, el circuit només s'estableix per la durada de la connexió i no és dedicada com en commutació de circuits.

Adreçament en circuits virtuals

A les xarxes que treballen amb circuit virtual hi ha dos tipus d'adreçament:

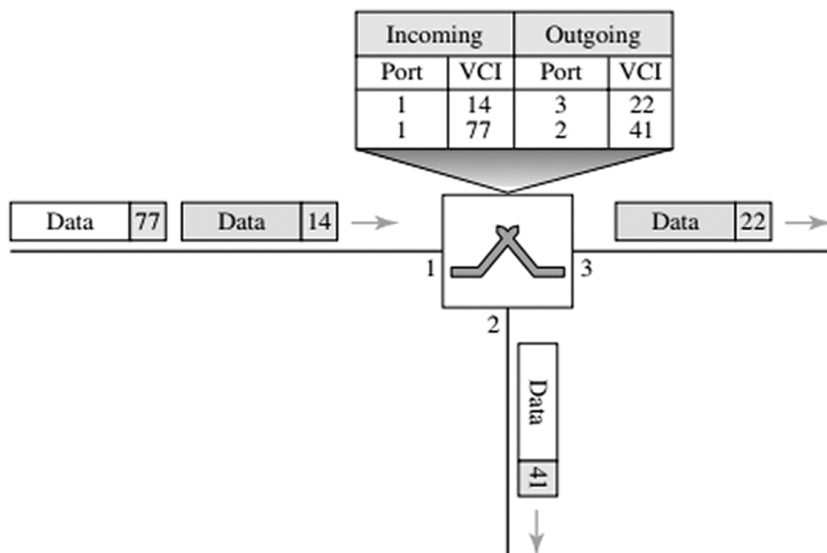
- **Adreçament global:** origen i destí necessiten una adreça global que ha de ser única dintre de l'abast on es treballa. Aquesta adreça només és necessària per a crear un identificador de circuit virtual que estarà associat a la connexió establerta.
- **Adreçament local:** es fa mitjançant l'identificador de circuit virtual (VCI). Aquest identificador, a diferència de l'adreça global, és un número petit que només té com a abast el mateix commutador. Així, el VCI és usat per les trames entre dos commutadors. Quan una trama arriba al commutador té un VCI, però quan deixa el commutador pot tenir un VCI diferent. A la figura es mostra un exemple:

Figura 11. Identificador de circuit virtual



Per a poder commutar les trames des de l'origen fins al destí, tots els commutadors necessiten unes taules de commutació que continguin entrades per a cadascun dels circuits virtuals. Aquestes taules tenen quatre columnes, de manera que per a cada circuit virtual cal mantenir la informació següent: identificador de la trama (VCI entrant), port d'origen per on arriba, port de sortida i nou identificador de sortida (VCI sortint).

Figura 12. Taules de commutació cas de circuit virtual



A la figura es veu una primera trama que arriba pel port 1 amb VCI = 14. El commutador examina la seva taula, n'extreu el VCI, hi incorpora el nou VCI = 22 i ho commuta pel port 3. Tenim una segona trama que arriba pel mateix

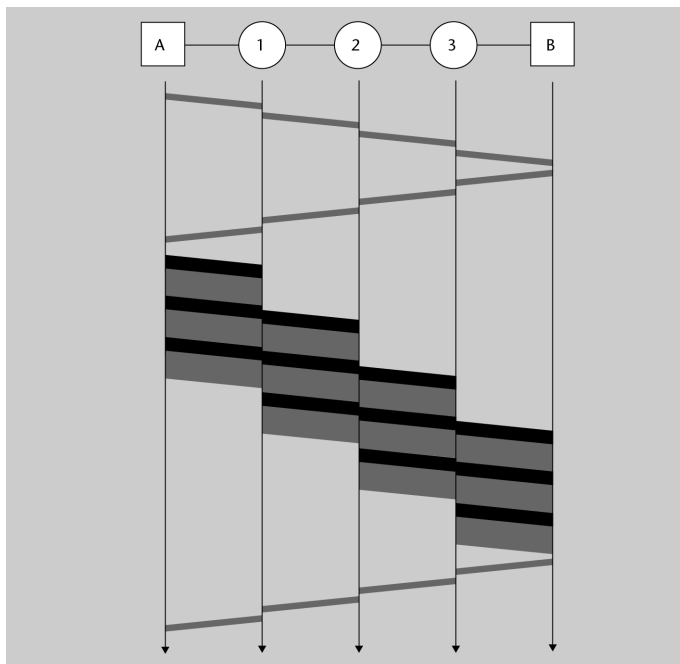
port amb VCI = 77; el commutador examina la seva taula, n'extreu el VCI, hi incorpora el nou VCI (en aquest cas VCI = 41) i commuta el paquet pel port 2.

Diagrama temporal d'una connexió en mode circuit virtual

En una connexió en mode circuit virtual el procediment que se segueix per a la transmissió de la informació és el següent:

- Inicialment l'equip d'origen (A) envia un paquet de petició de trucada que va travessant els nodes fins a arribar a l'equip de destinació (B).
- L'equip de destinació (B) accepta la connexió enviant un paquet de trucada acceptada a l'equip d'origen pel mateix camí.
- Després d'haver rebut el senyal d'acceptació, s'inicia la transmissió dels paquets.
- Finalment, l'equip de destinació envia un paquet de petició d'alliberament, que serveix per a anar alliberant els recursos utilitzats.

Figura 13. Diagrama temporal d'una connexió en mode circuit virtual



Els avantatges del circuit virtual respecte del datagrama són sobretot per a connexions de períodes llargs:

- Més rapidesa en la transmissió. Com que no és necessària cap decisió d'enrereament en els nodes, els paquets viatgen més ràpidament.
- Ordre seqüencial. Tots els paquets arriben en el mateix ordre de partida.
- Control d'errors. En cada node es fa la detecció d'errors, per tant, si un paquet arriba erroni a un node, aquest node sol·licita la retransmissió al node anterior abans de continuar transmetent als nodes següents.

Els principals desavantatges del circuit virtual respecte del datagrama es produeixen per a connexions per a un període curt:

- El datagrama no té establiment ni alliberament de trucada i per això es fa més ràpidament.

- El datagrama és més flexible, ja que si es produeix congestió en algun node permet enviar els paquets per una ruta sense congestió.
- L'enviament per mitjà de datagrama és més segur, ja que si un node falla, només un paquet o uns pocs paquets es perdran; en canvi, en el cas dels circuits virtuals si un node falla tots els circuits virtuals que travessen el node es perdran.

Les xarxes que treballen amb la tècnica de datagrames ofereixen un servei no orientat a connexió, mentre que les que treballen amb circuits virtuals ofereixen un servei orientat a connexió. Encara que sembli més convenient que la xarxa s'encarregui de tot i ofereixi un servei orientat a connexió, moltes vegades es prefereix la flexibilitat i la senzillesa d'un servei no orientat a connexió, i deixar per a nivells superiors al de xarxa les tasques del control d'errors i de la reordenació. D'aquesta manera, es traspasa feina dels nodes als equips terminals, i la xarxa pot operar de manera més eficient.

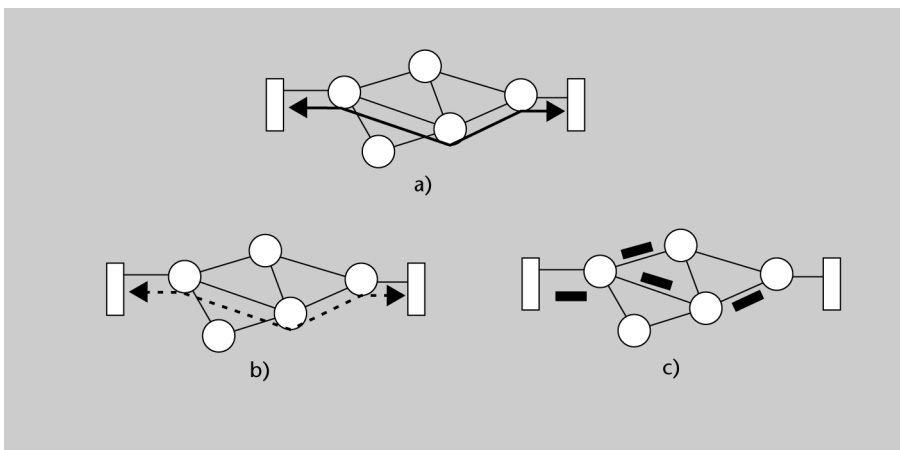
Representació d'una connexió en diferents modes de commutació

L'esquema a) de la figura 14 ens representa una connexió a través d'una xarxa de commutació de circuits en què es reserva un camí en exclusiva per a la transmissió d'informació entre l'origen i la destinació.

L'esquema b) de la figura 14 ens representa el funcionament d'una xarxa de commutació amb circuits virtuals. En aquest cas la reserva dels recursos no es fa en exclusiva, però també es crea un camí lògic prèviament a la transmissió de la informació. La transmissió de la informació es fa mitjançant paquets que pateixen un retard a cada node intermediari.

L'esquema c) de la figura 14 ens representa la connexió mitjançant commutació de datagrames. No es necessita l'establiment ni l'alliberament de la connexió, ja que cada paquet segueix un camí diferent.

Figura 14. Representació d'una connexió en diferents modes de commutació



A continuació tenim en forma de taula la comparativa de les principals tècniques de commutació:

	Commutació de circuits	Commutació de paquets: data-grama	Commutació de paquets: circuit virtual
Camí	Per a tota la conversa	Per a cada paquet	Per a tota la connexió
Recursos	Dedicats	No dedicats	No dedicats
Transmissió	Contínua	En paquets	En paquets
Establiment del camí	Previ a la transmissió	Un camí per a cada paquet	Previ a la transmissió
Retard en la transmissió	Negligible	Sí, variable	Sí, variable
Fiabilitat	Alta (possibles desconexions)	Baixa (possibles pèrdues i desordre de paquets)	Alta (possibles desconexions)
Amplada de banda	Fix	Dinàmic	Dinàmic
Informació suplementària (capçaleres)	No	Sí	Sí

Exercici

Es defineixen els paràmetres següents:

- N : nombre de salts
- L : longitud del missatge (bits)
- H : capçalera (bits)
- P : longitud del paquet (bits)
- B : velocitat de transmissió dels enllaços (bps)
- S : temps d'establiment del circuit (s)
- D : retard de propagació per cada salt (s)

Suposeu que els enllaços són de la mateixa longitud, que no calen confirmacions i que el retard en els nodes és negligible. Obteniu l'expressió del retard de la transmissió en commutació de circuits i en commutació de paquets mitjançant circuit virtual i datagrama.

Calculeu els resultats per als valors següents: $N = 4$; $L = 3.200$ bits; $H = 16$ bits; $P = 1.024$ bits; $B = 9.600$ bps; $S = 0,2$ s; $D = 0,001$ s

Retard de transmissió en commutació de circuits:

$$T_{\text{Total}} = T_{\text{establiment}} + T_{\text{propagació}} + T_{\text{transmissió}} = S + N \cdot D + \frac{L}{B} = 0,2 + 4 \cdot 0,001 + \frac{3.200}{9.600} = 0,5373\text{s}$$

Retard de transmissió en commutació de paquets en circuit virtual:

El nombre de paquets, que anomenarem K , serà la longitud del missatge dividit per la longitud de cada paquet,

$$K = \frac{L}{P} = \frac{3.200}{1.024} = 3,125$$

Com que el nombre de paquets ha de ser un número enter, agafarem el valor enter per sobre de 3,125. Per tant, agafarem $K = 4$ i calculem el retard:

$$T_{\text{Total}} = T_{\text{establiment}} + T_{\text{nodes}} + T_{\text{propagació}} + T_{\text{transmissió}} = S + 0 + N \cdot D + K \frac{P+H}{B} + (N-1) \frac{P+H}{B} =$$

$$0,2 + 4 \cdot 0,001 + 4 \frac{1.024 + 16}{9.600} + 3 \frac{1.024 + 16}{9.600} = 0,9623\text{s}$$

Retard de transmissió en commutació de paquets en datagrama:

$$T_{\text{Total}} = T_{\text{nodes}} + T_{\text{propagació}} + T_{\text{transmissió}} = 0 + N \cdot D + K \frac{P+H}{B} + (N-1) \frac{P+H}{B} =$$

$$4 \cdot 0,001 + 4 \frac{1.024 + 16}{9.600} + 3 \frac{1.024 + 16}{9.600} = 0,7623\text{s}$$

1.2.4. Commutació de cel·les

La commutació de cel·les és una variant evolucionada de la commutació de paquets en què aquests paquets són de longitud petita i fixa, anomenats **cel·les**. La seva mida permet una millor precisió a l'hora d'assignar recursos a les comunicacions i, per tant, un bon aprofitament de l'amplada de banda. La grandària fixa de les cel·les facilita l'ús de tècniques de commutació molt ràpides. L'exemple més rellevant d'aquesta tècnica són les xarxes de banda ampla basades en la tecnologia ATM (*asynchronous transfer mode*).

1.3. Encaminament

El camí que seguiran els paquets a través de la xarxa depèn de les decisions que prenguin els nodes de la xarxa, que en funció del lloc, del moment i del criteri que utilitzin faran que hi hagi diferents formes d'encaminament de la informació:

- Dependent del moment podem determinar:
 - En la tècnica de datagrames es decideix per a cada paquet.
 - En la tècnica de circuits virtuals es decideix en l'establiment del circuit.
- Dependent del lloc podem determinar:
 - A tots els nodes (encaminament distribuït).
 - A l'origen del paquet (encaminament de font).
 - En un node especialitzat de la xarxa (encaminament centralitzat).
- Dependent del criteri que s'aplica per a escollir el camí, podem determinar:
 - El camí més curt. En aquest cas, el camí que s'escull és el que inclou el nombre més petit de salts entre nodes. És un criteri bastant fàcil de mesurar i pretén minimitzar el nombre de recursos utilitzats.
 - El cost més baix. El criteri del cost més baix assigna a cada enllaç un cost, proporcional a alguna característica concreta, com ara la velocitat de trans-

missió o el retard mitjà a la cua d'entrada, i busca el camí amb el cost total més baix.

Un aspecte important és que l'encaminament s'adapti a possibles canvis a nivell de topologia, o de càrrega, a la xarxa. Això permet classificar la forma d'encaminament en **adaptatiu** i **no adaptatiu**.

A continuació veurem algunes de les estratègies que actualment es fan servir en les diferents xarxes de dades. Concretament, de les estratègies no adaptatives veurem l'encaminament estàtic i el *flooding* (inundació), i de les estratègies adaptatives veurem l'encaminament adaptatiu distribuït.

1.3.1. Encaminament no adaptatiu

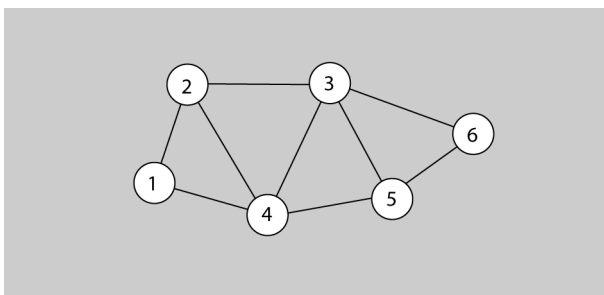
1) Encaminament estàtic

L'encaminament estàtic consisteix a decidir els camins que es faran servir per a totes les connexions possibles; és a dir, per a cada parell de terminals, en el moment en què es crea la xarxa.

Per decidir els camins que s'han de seguir es pot aplicar tant el criteri del cost mínim com el del camí més curt.

La informació del camí sencer no cal guardar-la, només cal saber, per a cada node, quin és el salt següent que han de fer els paquets, i cada node només cal que tingui informació referent a ell mateix i prou. Aquesta informació s'emmagatzema en una **taula d'encaminament**. Per a cada paquet que rep, el node consulta la taula d'encaminament per saber què n'ha de fer. En rebre el node un paquet destinat a un determinat terminal, la taula li indica el port pel qual l'ha d'enviar, que correspon a l'enllaç que l'uneix directament.

Figura 15.



Quan el node 2 de la figura 15 rep un paquet que ha d'anar al de destinació 5, consulta la seva taula d'encaminament, que li indica que l'ha d'enviar al node 4. Si el node 3 rep un paquet amb destinació a qualsevol node, sempre l'enviarà cap al node 5

Taules d'encaminament corresponents a tres nodes de la xarxa de la figura 9

Taula del node 1		Taula del node 2		Taula del node 3	
Destinació	Node següent	Destinació	Node següent	Destinació	Node següent
2	2	1	1	1	5
3	4	3	3	2	5
4	4	4	4	4	5
5	4	5	4	5	5
6	4	6	4	6	5

2) *Flooding* o inundacions

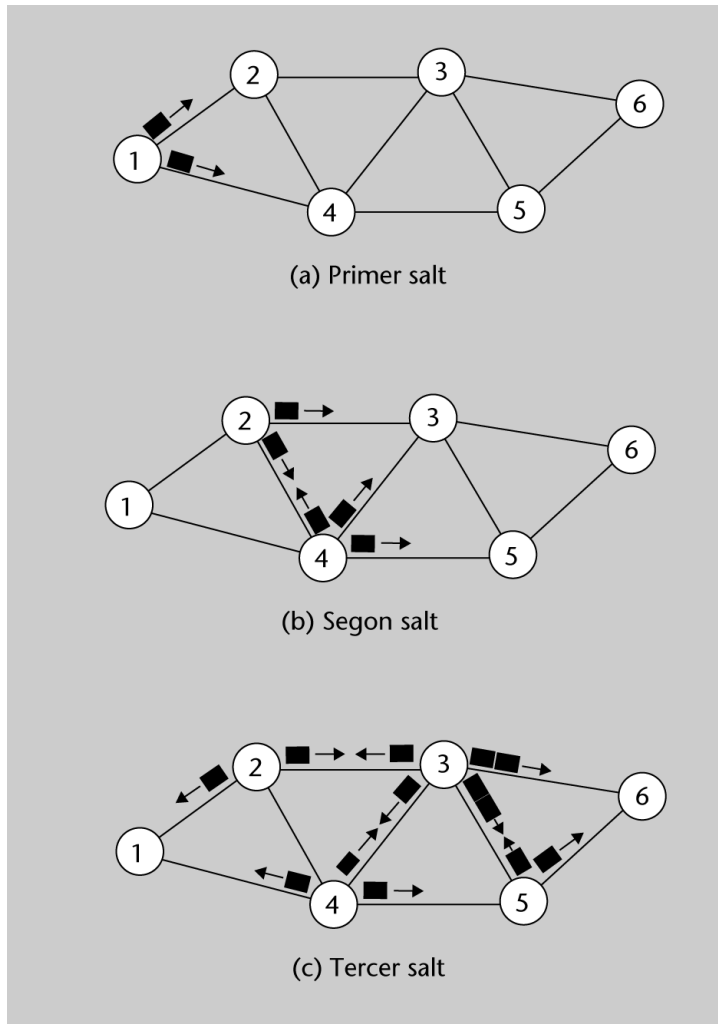
L'encaminament per *flooding* consisteix en el fet que cada paquet que arriba a un node s'envia a tots els seus nodes veïns.

Quan es vol enviar un paquet d'un punt a un altre de la xarxa, la xarxa s'inunda amb rèpliques del paquet. Aquest algorisme és molt senzill. No requereix l'ús de taules i, a més, suporta de manera òptima la caiguda de nodes o els canvis de la topologia. L'inconvenient principal és que la xarxa està més carregada perquè hi circulen múltiples còpies de tots els paquets simultàniament.

Si la xarxa té bucles tancats i no es prenen mesures, es col·lapsa de seguida, perquè es generen còpies de paquets contínuament. Una manera senzilla d'evitar-ho és posar un comptador de salts a cada paquet. Es pot inicialitzar a un valor màxim de la xarxa, i cada cop que un node commuta un paquet fa que el comptador disminueixi d'una unitat. Quan el comptador arriba a zero, el node el descarta.

Els receptors poden rebre moltes còpies del mateix paquet. Per tant, s'han d'identificar i en el moment de la recepció d'un paquet cal descartar tots els que siguin iguals. Aquest identificador ha de ser únic a tota la xarxa.

El *flooding* és un mètode molt robust, perquè es proven totes les rutes possibles entre l'origen i la destinació. Encara que un segment de la xarxa desaparegui, la resta de nodes es poden continuar comunicant mentre hi hagi un camí possible. Per això es pot utilitzar en situacions en què la robustesa és important, com ara aplicacions militars o xarxes amb topologia molt canviant. Com que es proven tots els camins possibles per a cada connexió, entre aquests camins hi haurà el de mínim retard. Això fa que es pugui utilitzar, per exemple, per a establir un circuit virtual entre dos nodes a través del camí més curt.

Figura 16. Encaminament per *flooding*. Inundació de la xarxa amb rèpliques

1.3.2. Encaminament adaptatiu

Perquè els algorismes es puguin adaptar a les condicions de treball, cal que els nodes s'intercanviïn informació sobre l'estat de la xarxa. Això es converteix en un compromís, perquè com més informació s'intercanviïn i més sovint, millors seran les decisions que es prenguin, però també serà més gran el trànsit extra que s'introdueix a la xarxa i, per tant, el rendiment serà pitjor.

En la majoria d'estratègies d'encaminament adaptatiu el nodes obtenen la informació sobre l'estat de la xarxa dels nodes veïns.

De fet, encara que la informació que rebí un node en un instant procedeixi només dels seus veïns immediats, d'alguna manera també està rebent informació de la resta de nodes, perquè el veí rep alhora informació dels seus veïns. La diferència està en el temps que necessita un node per a tenir informació de tota la xarxa. Si aquest temps és gran, pot passar que l'adaptació als canvis sigui

molt lenta. Un exemple és l'encaminament adaptatiu distribuït; un altre és l'adreçament jeràrquic:

- **Encaminament adaptatiu distribuït.** Es basa en el fet que els nodes elaboren les taules d'encaminament a partir de la informació que periòdicament reben dels seus veïns immediats. La informació es basa en un paràmetre de qualitat de la xarxa. Les taules d'encaminament s'actualitzen a cada intercanvi d'informació, perquè continguin sempre els millors camins possibles segons el paràmetre de qualitat escollit.
- **Adreçament jeràrquic.** Totes les estratègies que hem vist fins ara tenen el problema que si la xarxa creix, les taules de cada node creixen i la feina per a mantenir-les actualitzades és cada cop més complexa. Una possible solució és l'adreçament jeràrquic. Amb aquesta estratègia, les taules dels nodes han de contenir només una entrada per a tots els terminals que es troben en una regió diferent de la del mateix node. Incloure a l'adreça del terminal una referència a la regió a la qual pertany fa més ràpida la consulta de les taules i, per tant, l'encaminament dels paquets.

Exemple d'encaminament adaptatiu distribuït

Un exemple d'encaminament adaptatiu distribuït és el de la xarxa ARPANET, la xarxa de commutació de paquets d'on ha sorgit l'actual Internet; el paràmetre de qualitat que utilitzava era l'estimació de retards.

Exemple d'adreçament jeràrquic

Un exemple d'adreçament jeràrquic és el de la xarxa telefònica, que fa servir un esquema semblant en la numeració dels abonats. Els números de telèfon estan compostos de grups de xifres que corresponen a diferents regions: el que correspon a la província, a la central local i a l'abonat.

1.4. Control de trànsit

Podem efectuar dos tipus de control sobre el trànsit que hi ha en una xarxa de paquets. D'una banda, podem fer un control de flux, semblant al que es fa al nivell d'enllaç i, de l'altra, un control de congestió, necessari perquè la xarxa no se sature per excés d'entrada de paquets i deixi de funcionar correctament.

1.4.1. Control de flux

L'objectiu del control de flux és evitar que un emissor ràpid col·lapsi un receptor lent. Es tracta que el receptor pugui regular el cabal de dades que l'emissor li fa arribar. El lloc natural on s'estableix un control de flux és la connexió punt a punt entre dos dispositius i, per tant, a nivell d'enllaç. No obstant això, en les xarxes de commutació de paquets en mode circuit virtual, com que un cop establerta la connexió entre els extrems, la xarxa es comporta com un enllaç directe entre ells, és habitual establir un control de flux en tot el circuit virtual. Això permet que l'aplicació particular receptora de la informació pugui limitar el nombre de paquets que hi arriben de manera dinàmica.

1.4.2. Control de congestió

Hem comentat que les xarxes de commutació de circuits presenten bloqueig quan el trànsit augmenta. Això vol dir que arriba un moment en què no s'admeten noves connexions perquè la xarxa no les pot absorbir, però sense que això afecti les connexions ja establertes. En les xarxes de commutació de paquets, quan el trànsit augmenta no es rebutgen noves connexions, cosa que provoca que les connexions obertes experimentin retards més grans.

En commutació de circuits o en mode circuit virtual és habitual que coexisteixin diferents controls de flux, un per a cada enllaç i un per a cada circuit virtual establert. En canvi, en xarxes de commutació en mode datagrama no té gaire sentit establir un control de flux extrem a extrem, perquè no tots els paquets segueixen el mateix camí.

Si ens fixem en el rendiment d'una xarxa, podem observar que aquest coincideix amb la càrrega oferta mentre no s'arriba al màxim de capacitat de la xarxa. Si se sobrepassa aquest punt, per més paquets que entrin, la xarxa no en pot servir més. Això no es pot mantenir així, perquè entren a la xarxa més paquets dels que en surten, i les cues dels nodes són limitades. Un cop plena una cua, els paquets que no hi caben, o bé són descartats o bé són retinguts al node anterior si s'estableixen controls de flux a nivell d'enllaç. En el cas de descartar-los, això provoca la retransmissió dels paquets, i fa que el nombre de paquets que entren a la xarxa augmenti encara més. Si optem pel control de flux a nivell d'enllaç, el que provoquem és que el problema es propagui a altres punts de la xarxa, fins que arribi als equips emissors, després d'haver saturat tots els nodes intermedis. Per tant, fem el que fem, la xarxa deixa d'oferir la seva capacitat màxima. El rendiment cau i es parla de **congestió de la xarxa**.

El fet d'afegir mecanismes de control a la xarxa per tal d'evitar que s'arribi al col·lapse provoca inevitablement que no se'n pugui assolir el màxim rendiment en condicions normals de treball. Hi ha diferents possibilitats per a controlar la congestió d'una xarxa de commutació, entre les quals podem destacar les següents:

- **Realitzar un control de flux extrem a extrem.** L'efecte immediat d'aquest control seria la limitació del nombre de paquets corresponents a una connexió que circulen per la xarxa.
- **Aprofitar els algorismes d'encaminament.** Aquests poden fer servir la informació sobre les qualitats de la xarxa que s'intercanvien els nodes. Per exemple, si circula informació sobre el retard que hi ha a l'entrada d'un enllaç, l'algorisme pot aprofitar-la per a disminuir la velocitat de transmissió de paquets cap a aquell enllaç.
- **Fer servir paquets de regulació.** Es tracta d'enviar un paquet especial des d'un node congestionat cap als nodes que provoquen la congestió. En re-

El control de congestió

El control de congestió és un mecanisme que pretén evitar que el rendiment de la xarxa caigui quan hi augmenta el trànsit.

bre un paquet de regulació, el node ha de disminuir la seva velocitat de transmissió, a fi de reduir el nombre de paquets que transmet al node congestionat.

- **Afegir informació de congestió als paquets de dades.** Aquesta tècnica és semblant a l'anterior, però no afegeix càrrega extra a la xarxa, i no és tan versàtil. A més, només té sentit en circuits virtuals, perquè la informació de congestió es posa als paquets que van en sentit contrari.

1.4.3. Prevenició de la congestió

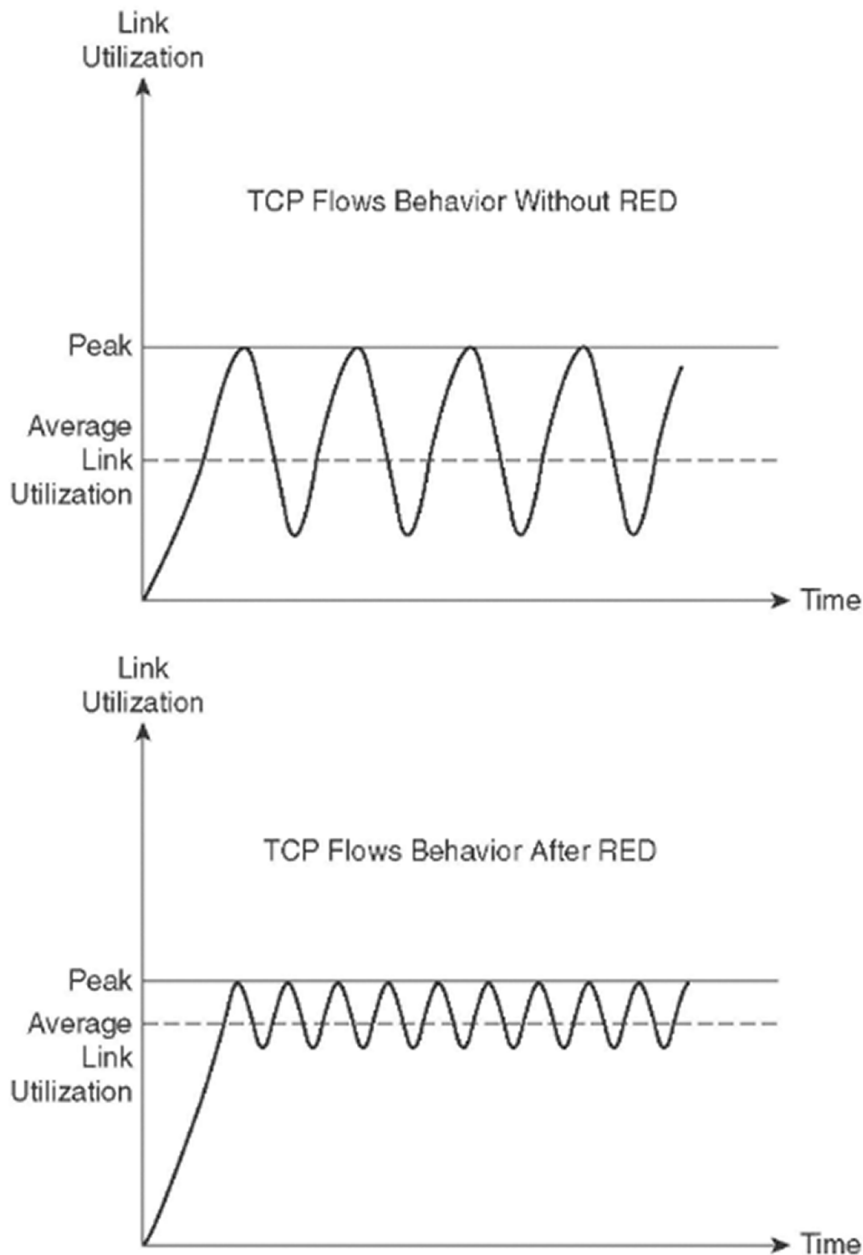
Tractar la congestió abans que comenci és més efectiu que actuar quan ja hi ha congestió. Aquesta idea ha portat a un nou plantejament destinat a descartar paquets abans que la cua del commutador estigui plena.

A partir d'aquest plantejament, l'indicador més fiable de la congestió que tenen els dispositius dins de la xarxa és el nombre de paquets perduts o el percentatge de paquets perduts. Protocols com TCP reaccionen a la congestió alentint l'enviament de paquets de la font. TCP és un protocol orientat a connexió, molt fiable, dissenyat de manera que, si es perden paquets, considera que és perquè els nodes intermedis tenen les seves cues plenes i descarten paquets, i no tant perquè hi ha hagut errors de transmissió. La disminució del nombre de paquets transmesos per la font permet reduir la congestió. Si els commutadors comencen a descartar alguns paquets abans que la congestió s'hagi produït, podem aconseguir que les fonts que generen el trànsit actuïn (redueixin la velocitat de transmissió de paquets) abans que sigui massa tard. Un algorisme que aprofita aquesta situació s'anomena RED (*random early detection*). El commutador, per a saber quan ha de començar a descartar, monitoritza el valor de la longitud mitjana de les seves cues en funció de l'ús. Quan la longitud mitjana de les cues comença a augmentar i supera un determinat llindar, es considera que l'enllaç es comença a congestionar i el commutador descarta de manera aleatòria una petita fracció dels paquets que li arriben. El fet de descartar paquets de manera aleatòria comporta que sigui més probable descartar paquets de les fonts que generen més trànsit que no pas de les fonts que generen menys trànsit. A més, en el moment en què el node origen detecta la pèrdua de paquets (no en rep reconeixement), el protocol TCP farà que redueixi la velocitat amb què envia paquets.

A la figura següent, es mostra el comportament d'un enllaç sense RED i el d'un enllaç amb RED. Si ens fixem en el primer cas, tenim que la velocitat va augmentant fins arribar al pic màxim d'utilització. Un cop arribem a aquest punt es produeix congestió i el node comença a descartar paquets. Aquest fet provoca, al mateix temps, que totes les fonts que generen paquets TCP i que passen per aquest node alenteixin el seu enviament de paquets (detecten la pèrdua dels paquets descartats perquè no en reben la confirmació). Automàti-

cament, això provoca una baixada brusca de la utilització de l'enllaç. Com que hi ha aquesta disminució del trànsit, el sistema es descongestiona i torna a funcionar. Les fonts tornen a rebre reconeixements dels seus enviaments, consideren que l'enllaç funciona correctament i de nou incrementen la velocitat d'enviament fins que es produeix un altre cop congestió. A la figura es veu aquest comportament amb la forma de dents de serra que té la utilització de l'enllaç en funció del temps. En canvi, quan s'utilitza RED, s'anticipa la congestió, es descarten alguns paquets prèviament i aconseguim que la dent de serra en el temps no sigui tan abrupta. En conseqüència, la utilització mitjana de l'enllaç millora.

Figura 17. Utilització de l'enllaç sense RED i amb RED



2. Xarxa telefònica commutada (XTC)

2.1. Estructura i serveis de la xarxa telefònica

La xarxa telefònica es va desenvolupar per a proporcionar el servei de telefonia bàsica, que consisteix a facilitar la comunicació oral entre els usuaris en temps real. Està basada en uns estàndards de qualitat i unes especificacions recollides en un conjunt de normes de la ITU. Aquest servei més bàsic consisteix a transmetre un senyal analògic amb una amplada de banda d'uns 4 kHz a través dels dispositius de transmissió i commutació que formen la xarxa.

A cada país, el servei telefònic l'ofereix un operador o més d'un que amb diferents xarxes formen la xarxa telefònica commutada (XTC). La xarxa telefònica opera basant-se amb la tècnica de commutació de circuits, tal com hem comentat anteriorment.

El gran nombre d'usuaris i l'elevat trànsit a la XTC fa que s'hagi d'estructurar agrupant el trànsit per zones geogràfiques i fer-les dependre de diferents centrals de commutació que estiguin connectades entre elles o a través d'altres. Una central admet un nombre d'usuaris determinat i quan se supera aquest valor calen més centrals, aquestes centrals s'han d'interconnectar per poder donar el servei i fan que calguin centrals de nivell superior per a comunicar-les. Això comporta que apareguin diversos nivells en què cada central d'un nivell determinat depèn d'una central del nivell superior. Per raons d'eficiència i seguretat, la tendència és d'establir una xarxa complementària que interconnecti centrals del mateix nivell amb molt de trànsit entre elles, com són les xarxes urbanes mitjançant les **centrals tàndem** o per interconnectar centrals separades per dos o més nivells jeràrquics.

L'accés de l'usuari a la xarxa es fa connectant el terminal telefònic (o mòdem) a la **central local** mitjançant un cable de parell trenat que s'anomena **llaç d'abonat**. La longitud del llaç és curta, pot ser de quilòmetres a desenes de quilòmetres, i la transmissió es fa a baixa freqüència. La central local assigna els circuits entre els usuaris que té connectats i alhora estableix les trucades dels seus abonats a la resta de la xarxa.

Les centrals locals es connecten a la **central primària** per mitjà de circuits de baixa freqüència i aquesta assigna els circuits entre els usuaris de la mateixa zona i alhora estableix les trucades a la resta de la xarxa. De la mateixa manera les centrals primàries es connecten a les **centrals secundàries** i aquestes ho fan a les **centrals terciàries** i a les **centrals internacionals**. Com es pot observar, l'estructura de la xarxa telefònica és **jeràrquica**. A mesura que les distàncies són més grans i es necessita establir més connexions, els enllaços són de més

L'estructura de la xarxa telefònica és jeràrquica.

capacitat, menys atenuació i més fiables, i s'utilitza el cable coaxial, la fibra òptica o els radioenllaços. Els canals telefònics es transmeten multiplexats en la freqüència (FDM) en el cas analògic, o en el temps (TDM) en el cas digital.

El troncal de la xarxa, format pel conjunt de centrals de trànsit (de commutació) i d'enllaços entre elles, tendeix a estar interconnectat de manera completa.

La xarxa telefònica està dissenyada específicament per a la transmissió de veu, tot i que també ofereix la possibilitat d'utilitzar altres serveis, com són el fac-símil, el datàfon, la transmissió de dades a través de mòdem, la telemetria, etc.

2.2. Planificació de la xarxa telefònica

Els objectius de la planificació de la xarxa consisteixen en, donat un determinat trànsit i tenint en compte les expectatives de creixement, determinar els recursos necessaris (enllaços, commutadors...) minimitzant el cost de la xarxa i mantenint un mínim acceptable de qualitat de servei (QoS).

QoS són les inicials de *quality of service*.

La qualitat del servei a la xarxa telefònica té dos components:

- **Qualitat de commutació.** Els centres de commutació, tal com hem comentat anteriorment, intenten assignar un circuit a un usuari que ho sol·liciti. A vegades, però, no és possible fer l'assignació en el moment en què es fa la sol·licitud, atès que la xarxa està ocupada o bloquejada. La probabilitat de bloqueig és un dels paràmetres que ens determinen la qualitat de servei, i depèn del nombre d'usuaris, dels circuits als quals poden tenir accés i del funcionament dels centres de commutació.
- **Qualitat de transmissió.** El conjunt de circuits i sistemes de transmissió pretén reproduir de la manera més fidel possible al terminal remot el senyal generat pel terminal local. La qualitat de transmissió dependrà tant del nivell de senyal utilitzat com del conjunt de pertorbacions que l'afectaran.

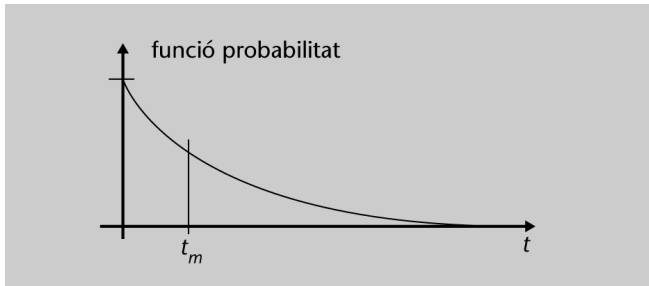
Les especificacions de qualitat en el servei telefònic es recullen en el pla de transmissió.

2.2.1. Trànsit

A la xarxa telefònica s'originen un conjunt de successos que produeixen l'ocupació dels sistemes de transmissió i de commutació. L'ocupació dels sistemes està directament lligada al trànsit telefònic. Parlarem de **congestió** d'un sistema quan aquest està ocupat i no permet l'establiment de cap connexió. Per tal de poder quantificar el trànsit, cal poder conèixer el procés d'aparició de les trucades, la seva durada i el tractament que reben les trucades que no es fan de forma immediata a causa de la congestió. Això no es pot predir de forma individual però sí que es pot fer de forma col·lectiva, estadísticament, ja que el trànsit és aleatori.

Per a quantificar el trànsit hem de tenir en compte dos trets importants, la durada de les trucades i la **taxa mitjana d'arribada de les trucades**, λ . Suposarem que la durada de les trucades telefòniques és aleatòria, amb una funció de probabilitat exponencial i una durada mitjana, t_m .

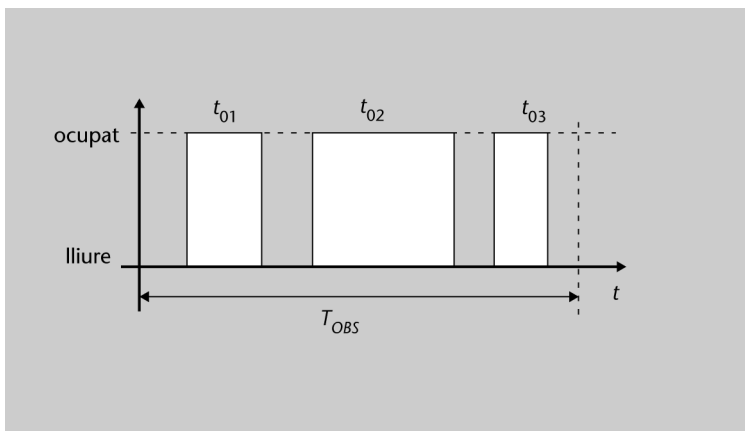
Figura 18. Funció de probabilitat exponencial de durada mitjana t_m



Suposem que observem un sistema durant un temps, T_{OBS} . Podem definir el **volum de trànsit (V)** com el temps en què un sistema està ocupat en un temps d'observació, per tant, com la suma de les durades de les trucades en el temps d'observació.

$$V = \sum_i t_{0i}$$

Figura 19. Representació temporal de l'ocupació d'un sistema en un temps T_{OBS}



El trànsit no es distribueix uniformement al llarg del dia. El dimensionament de les xarxes s'ha de fer perquè hi hagi el mínim bloqueig possible, per tant l'hem de dimensionar per les condicions més desfavorables. Escollirem com a interval d'observació l'hora carregada.

La **intensitat de trànsit (A)** per a un circuit en un interval de temps (T_{OBS}) determinat és el quocient entre el temps d'ocupació i el temps d'observació.

$$A = \frac{V}{T_{OBS}} = \frac{\sum_i t_{0i}}{T_{OBS}} = \lambda \cdot t_m$$

Hora carregada (HC)

L'hora carregada és el període d'una hora del dia en què el trànsit és més elevat, que sol estar entorn de les 12 h del migdia.

Tot i ser una magnitud sense unitats, habitualment s'expressa en Erlangs.

Unitats de mesura de la intensitat de trànsit

De la definició d'Erlang podem deduir que la intensitat de trànsit en un circuit com a màxim pot arribar a valer la unitat (1 E = 60 minuts de trànsit en un circuit en l'HC). Una altra unitat de mesura de la intensitat de trànsit és CCS (*centi call seconds*), que correspon a un interval d'ocupació de 100 segons (1 E = 36 CCS).

Si analitzem més d'un circuit, aleshores el volum de trànsit cursat serà la suma dels volums de trànsit dels circuits per separat. La intensitat de trànsit serà també la suma de les intensitats de cadascun d'ells.

Un erlang (E) es defineix com el volum de trànsit entrant en un circuit en l'hora carregada.

2.2.2. Models

Tal com hem comentat anteriorment, hi ha models matemàtics que ens interpreten els fenòmens que es poden produir dins la xarxa telefònica i ens permeten obtenir expressions que ens relacionen la probabilitat de pèrdua o d'espera en funció de la intensitat de trànsit i del nombre de canals. Aquestes expressions s'anomenen funcions de distribució i són simplement un model probabilístic.

El model d'Erlang-B és el model normalitzat per la ITU-T utilitzat a Europa i a gran part dels països del món.

2.3. Sistema de transmissió

L'objectiu principal d'un sistema de transmissió és transportar el senyal de l'origen a la destinació. Per tant, cal adaptar el senyal per poder ser transmès pel medi i multiplexar-lo amb altres senyals per tal d'optimitzar el canal de transmissió.

Podem diferenciar dos tipus d'enllaços que utilitzen diferents medis de transmissió:

- **Llaç d'abonat:** parell trenat de coure de l'abonat fins a la central local.
- **Xarxa troncal:** cable coaxial, microones, satèl·lits i sobretot fibra òptica formen els enllaços entre els diferents nodes de la xarxa. Per aquests enllaços els senyals es transmeten multiplexats.

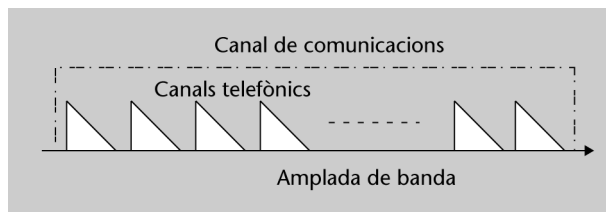
A la xarxa telefònica s'utilitza la transmissió síncrona i el multiplexatge síncron. Hi ha diferents formes de multiplexar els senyals, depenent del tipus:

- Multiplexatge analògic (FDM)
- Multiplexatge digital (TDM)
 - PDH (jerarquia digital plesiòcrona)
 - SDH/SONET (jerarquia digital síncrona)

2.3.1. Multiplexatge analògic (FDM)

La forma de transmetre de manera analògica els canals telefònics es basa en la tècnica de **multiplexatge per divisió en la freqüència (FDM)**.

Figura 20. Representació del multiplexatge per FDM dels canals telefònics




Per a cada sentit de la transmissió, cada canal vocal es modula en banda lateral única (SSB) utilitzant una subportadora separada 4 kHz de les adjacents, per tal que hi hagi un marge de freqüències lliure entre canal i canal, és el que s'anomena banda de guarda. Així, es forma el que s'anomena senyal múltiplex FDM, que és el que s'envia a la xarxa juntament amb la resta de senyals de senyalització.

El senyal múltiplex no es genera de manera arbitrària, sinó que es fa a través d'un procés de multiplexatge de grups de canals de forma jeràrquica, normalitzada per la ITU-T. A la primera fase es multiplexa un nombre de dotze canals vocals per construir el senyal múltiplex de primera jerarquia, o anomenat també, **grup primari o bàsic**. La segona jerarquia s'obté d'agrupar multiplexant amb FDM cinc grups primaris de dotze canals i es construeix un senyal de segona jerarquia de seixanta canals, i així successivament fins a arribar a 2.700 canals.

Canal de veu	Amplada de banda (kHz)				
1	0-4	1 (12 canals)	1 (60 canals)	1 (300 canals)	1 (900 canals)
2	4-8	2 (12 canals)	2 (60 canals)	2 (300 canals)	2 (900 canals)
3	8-12	3 (12 canals)	3 (60 canals)	3 (300 canals)	3 (900 canals)
4	12-16	4 (12 canals)	4 (60 canals)		
5	16-20	5 (12 canals)	5 (60 canals)		
6	20-24				
7	24-28	Total	Total	Total	Total
8	28-32	60	300	900	2.700
9	32-36	canals	canals	canals	canals
10	36-40				
11	40-44				
12	44-48				
Grup primari		Grup secundari	Grup terciari	Grup quaternari	Grup quinari
Amplada de banda		Amplada de banda	Amplada de banda	Amplada de banda	Amplada de banda
48 kHz 60-108 kHz		240 kHz 312-552 kHz	1.200 kHz 312-1.512 kHz	3.716 kHz 312-4.028 kHz	12.026 kHz 312-12.338 kHz

Actualment queden pocs sistemes de transmissió analògics i simplement encara existeixen per qüestions d'amortització.

2.3.2. Multiplexatge digital (TDM)

La utilització dels senyals digitals ha permès introduir una nova forma de multiplexar els senyals, que és el **multiplexatge per divisió en el temps (TDM)**. La trama que es crea, tal com s'ha comentat anteriorment, s'anomena **trama E1** (també es coneix amb els noms de CEPT-1 i PCM 30 + 2). 

CEPT és la sigla del Comitè Europeu de Correus i Telègrafs.

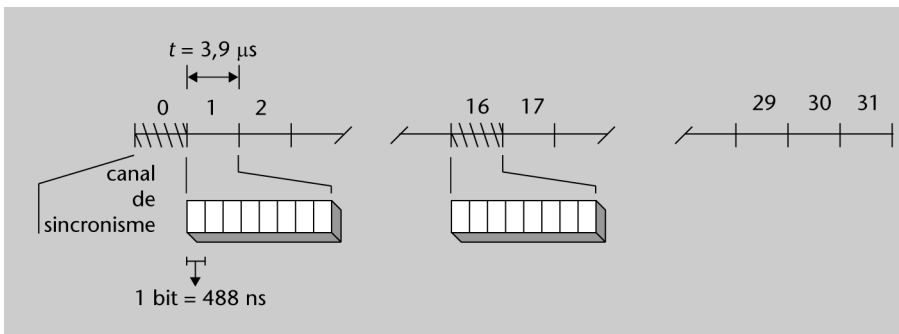
La norma G.732 de la ITU-T, o norma europea, indica com s'ha d'obtenir aquesta trama E1, que correspon al primer nivell jeràrquic, que multiplexa 30 canals de veu, un canal de senyalització i un de sincronisme, tots a 64 kbits/s.

Les principals característiques de la trama E1 són les següents:

- 32 canals per trama: 30 canals de veu, 1 de senyalització i 1 de sincronisme.
- Utilitza 8 bits per mostra, per tant, 256 bits per trama.
- Freqüència de mostratge de 8 kHz.
- Durada de la trama 125 μ s.
- Llei de compressió tipus A.
- Velocitat de transmissió total: $32 \times 64 \text{ kbits/s} = 2,048 \text{ Mbits/s}$.

La distribució dels canals la trobem en la figura 21.

Figura 21. Representació de la trama E1



2.3.3. Jerarquia digital plesiócrona (PDH)

Atesa la dificultat de mantenir el sincronisme dins la xarxa telefònica apareix el mode d'operació plesiócron i la jerarquia digital plesiócrona. Els multiplexors combinen enllaços amb petites variacions de velocitat afegint bits buits extra en els enllaços més lents.

La *plesyochronous digital hierarchy* (PDH) és com s'anomena la jerarquia de multiplexatge d'ordres superiors. Les trames E1, tal com fèiem amb FDM, es poden agrupar per tal de poder transmetre més canals, o bé, canals de més amplada de banda, com pot ser el vídeo. Per a generar un ordre jeràrquic superior es multiplexen quatre trames de l'ordre anterior de manera que formin una nova trama. La seva amplada de banda no és múltiple de l'amplada de banda dels canals multiplexats. Això es deu al fet que per a passar d'un nivell a l'altre cal afegir informació d'ús exclusiu del nivell superior. Això fa que els rellotges dels diferents nivells siguin independents entre ells. Cada nivell és síncron, però no ho és el sistema global.

La paraula *pleziòcrona* indica quasi síncrona.

La norma europea parteix del grup bàsic de 2,048 Mbits/s. Genera el grup secundari (E2) amb quatre grups primaris (E1), el grup terciari (E3) amb quatre grups secundaris (E2), i així successivament.

Ordre	Velocitat de transmissió	Nre. de bits per trama	Durada de trama en ms	Nre. de canals
1	2,048 Mbits/s	256	125,00	30
2	8,448 Mbits/s	848	100,38	120
3	34,368 Mbits/s	1.536	44,69	480
4	139,264 Mbits/s	2.904	20,85	1.920
5	564,992 Mbits/s	2.688	4,70	7.680

La PDH té el problema que és difícil extreure un canal d'un grup de canals multiplexats, ja que s'ha de fer nivell a nivell, atès que les trames són diferents per a cada nivell de multiplexatge. Aquest és un dels principals problemes que té la XDSI de banda estreta. És per aquest motiu que la XDSI de banda ampla utilitza la jerarquia digital síncrona (SDH), perquè té sincronisme en tots els nivells de la xarxa i, tal com veurem posteriorment, evita aquests problemes.

2.4. Evolució de la xarxa telefònica

A la majoria dels països la xarxa pública està formada per un conjunt de xarxes separades, cadascuna d'elles especialitzada en algun tipus de trànsit que tenen esquemes de numeració propis i necessiten accessos diferents. Això provoca un increment de costos de gestió i de les instal·lacions de l'usuari, a més, la societat cada vegada vol tenir més serveis i millors.

Es pretén evolucionar cap a una xarxa de telecomunicacions única i universal que integri tots els serveis. S'està treballant per desenvolupar una xarxa capaç de suportar tots els serveis de telecomunicacions.

L'evolució de la XTC a una xarxa digital es fa en diferents etapes segons les necessitats dels usuaris, l'evolució tecnològica i la reglamentació internacional. Les etapes principals són tres:

- La xarxa digital integrada (XDI)
- La xarxa digital de serveis integrats de banda estreta (XDSI-BE o XDSI)
- La xarxa digital de serveis integrats de banda ampla (XDSI-BA)

La XDI és una xarxa basada en la xarxa telefònica commutada que s'ha anat digitalitzant progressivament des dels mitjans de transmissió, passant per les centrals de commutació, fins als sistemes de senyalització. Per tant, la XDI és una xarxa amb medis de transmissió i de commutació digitals.

La XDI es pot considerar un conjunt de xarxes digitals específiques, cadascuna dedicada a proporcionar un servei a l'abonat. De totes maneres, el bucle d'abonat continua essent analògic. La commutació digital és tant a les centrals locals com a les de trànsit. Aquesta és la situació més comuna en l'actualitat.

De totes maneres la evolució és cap a la connexió digital extrem a extrem que ens la proporcionarà la XDSI.

2.5. xDSL

Una xarxa d'accés és una xarxa de commutació de paquets que proporciona connectivitat a les llars a alta velocitat. La xarxa d'accés té diferents característiques i requisits diferents de les xarxes LAN, MAN o WAN.

S'ha desenvolupat una família de mòdems coneguda com xDSL (*x-type digital subscriber line*) per a proporcionar accés a Internet a alta velocitat sobre la línia telefònica. Dintre d'aquesta família de mòdems, l'ADSL és la més popular.

2.5.1. Tecnologia DSL

En el desenvolupament d'una xarxa digital pública d'àrea estesa a alta velocitat, l'enllaç entre l'abonat i la xarxa representa un gran repte en la implementació: **xarxa d'accés de l'usuari**. Això és degut, com podeu imaginar, al gran nombre d'abonats potencials. Només el fet de pensar a fer una instal·lació de nous cables per a cada usuari tira enrere qualsevol operadora. La solució és intentar aprofitar el cable de parell trenat existent i que enllaça quasi tots els usuaris o empreses amb la xarxa telefònica. Aquests enllaços van ser instal·lats per a transportar se-

nyal de veu en una amplada de banda de 0 a 4 kHz. Això no vol dir que aquests cables no puguin transmetre senyals amb espectres més amplis.

La xDSL és un grup de tecnologies mòdem dissenyades per a permetre la transmissió de dades digitals a alta velocitat a través del cable telefònic convencional.

L'ADSL (*asymmetric digital subscriber line*) és la tecnologia més coneguda dintre d'aquesta família denominada xDSL (*x-type digital subscriber line*), en què *x* agafa un valor de l'alfabet i indica la tècnica de transmissió.

L'avantatge principal d'aquesta tecnologia respecte a altres solucions d'accés és que s'implementa sobre una infraestructura que ja hi és (el bucle local).

Bàsicament el que fa és usar l'amplada de banda addicional per sobre dels 4 kHz fins a 1 MHz per a transmetre serveis de dades a alta velocitat sobre el parell de coure.

Com sabeu, la transmissió es pot diferenciar entre si és de pujada (*upstream*) o de baixada (*downstream*).

A la vegada es pot dividir en dues categories:

- Simètrica: pujada i baixada a la mateixa velocitat.
- Asimètrica: pujada i baixada a diferent velocitat. Normalment la baixada sol ser a més velocitat.

2.5.2. ADSL

Com el seu nom indica, el terme *asimètric* està associat al fet que l'ADSL proporciona més capacitat de transmissió a l'enllaç descendent que a l'ascendent. La taxa de dades depèn de la longitud de l'enllaç del parell trenat, de la qualitat del cable, de les interferències, etc.

La taxa de l'ADSL ha estat millorada amb dos nous estàndards: ADSL2 i ADSL2+.

L'ADSL va ser originàriament dissenyat per a proporcionar serveis de vídeo sota demanda transportat sobre línies commutades E1 o DS1. Aquest tipus de trànsit en l'estàndard ADSL s'anomena *trànsit STM*.

L'ADSL fa ús de la multiplexació per divisió en freqüència (FDM) per a aprofitar la capacitat del cable de parell trenat fins a 1 MHz. Hi ha tres elements:

El Fòrum ADSL

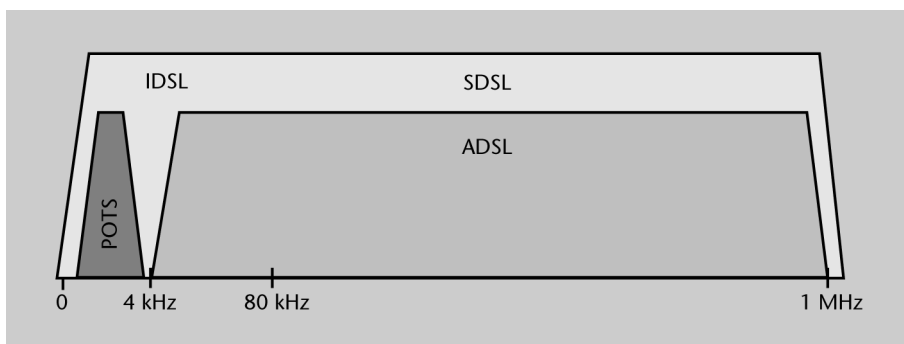
Aquest fòrum es va establir el 1994. El 1999 va passar a anomenar-se Fòrum DSL. L'objectiu del fòrum és proporcionar un ventall de tecnologies DSL dissenyades per a transmetre serveis de banda ampla per a diverses situacions i aplicacions.

STM és la sigla de *synchronous transfer mode*.

- Reserva dels 25 kHz inferiors per a veu. Encara que la veu transmet només en la banda 0-4 kHz, es deixa marge per a evitar diafonia entre els canals de veu i dades.
- Ús de cancel·lació d'eco per a donar cabuda a dues bandes, una d'ascendent petita i una altra de descendent gran.
- Ús d'FDM en les dues bandes (ascendent i descendent).

A la figura següent es mostra l'assignació de l'amplada de banda per a una línia ADSL.

Figura 22. Assignació d'amplades de banda per a ADSL



Quan s'usa la cancel·lació d'eco, la banda de freqüències que correspon al canal ascendent se superposa amb la porció inferior del canal descendent. Això presenta un parell d'avantatges comparat amb els casos de bandes de freqüències diferents per a enllaços descendents i ascendents:

- Com que hi ha un augment de l'atenuació amb la freqüència, amb la utilització de la cancel·lació d'eco tenim una part més gran de l'enllaç descendent que es troba en la banda baixa de l'espectre.
- El disseny del procediment de cancel·lació d'eco és més flexible per a modificar la capacitat de transmissió ascendent.

Evidentment, no tot són avantatges i el que és clar és que l'ús de la cancel·lació d'eco obliga a l'existència de lògica de cancel·lació d'eco a les dues bandes de la línia.

La connexió ADSL està formada per un parell de mòdems a cada extrem de la línia. En l'extrem de l'usuari s'anomena ATU-R (ADSL *transceiver unit, remote terminal*). En l'extrem de l'operadora s'anomena ATU-C (ADSL *transceiver unit, central office*). Els ATU-R s'agreguen per mitjà d'un multiplexor d'accés DSL que es coneix com a DSLAM. Així, el DSLAM està situat a la central de l'operadora i concentra les connexions de múltiples subscriptors DSL. El DSLAM és un commutador ATM. Aquest commutador té una línia OC3/STM-1 o superi-

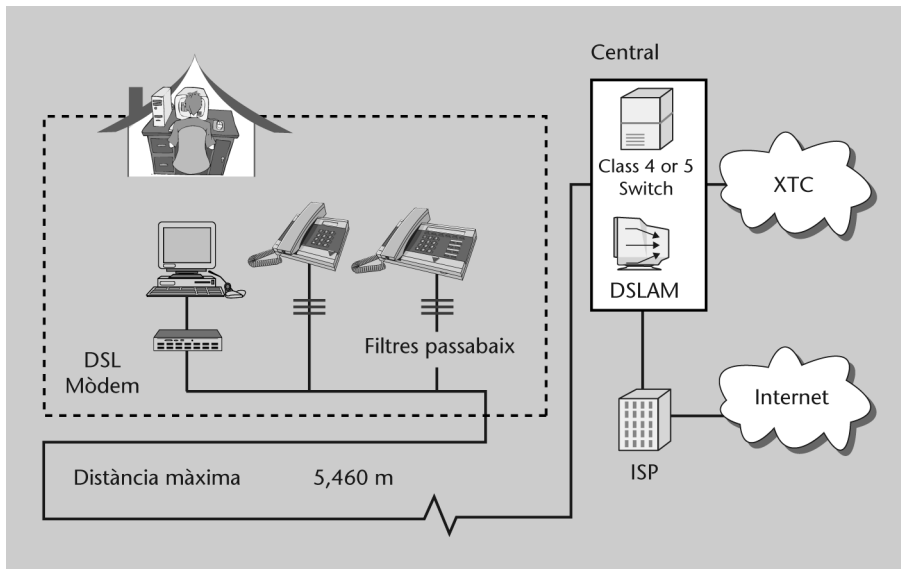
DSLAM és la sigla de DSL access multiplexer.

or connectada a la xarxa troncal, i per l'altra banda línies ADSL que li permeten donar servei a un nombre determinat d'usuaris.

El DSLAM combina les connexions individuals dels usuaris cap a una línia d'alta velocitat a Internet.

A la figura següent es mostren els elements bàsics d'una connexió ADSL.

Figura 23. Elements d'una connexió ADSL



L'avantatge del DSL sobre la connexió de cable és que el medi no és compartit. Afegir usuaris no baixa el rendiment sempre que la connexió cap a Internet estigui ben dimensionada.

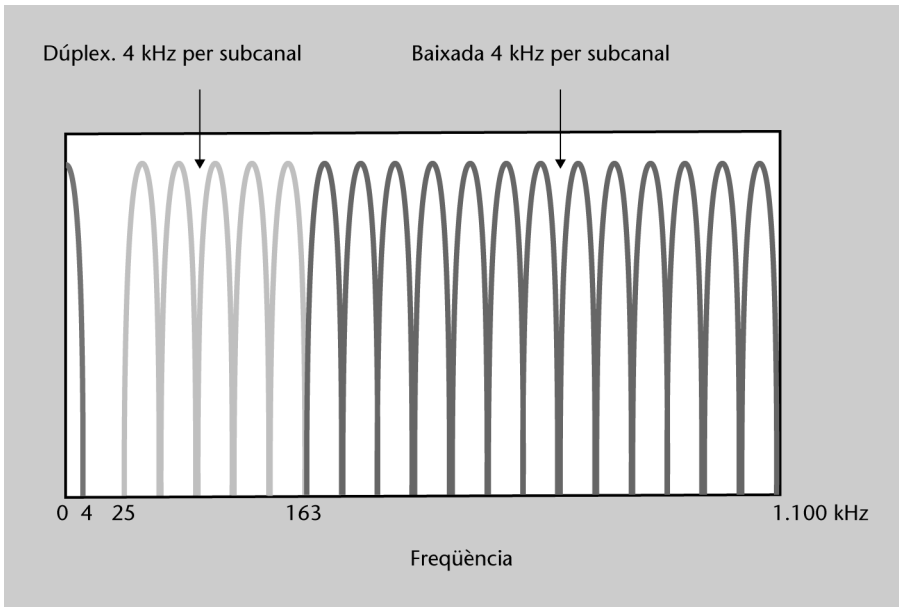
Multitò discret

La tècnica de multitò discret (DMT) és la tècnica de codificació de línia utilitzada en l'ADSL.

DMT és la sigla de discrete multitone.

Consisteix a fer ús dels diversos senyals portadors a diferent freqüència, de manera que s'envien alguns dels bits en cada canal. L'amplada de banda disponible es divideix en subcanals de 4 kHz anomenats tons. En el procés d'inicialització, el mòdem DMT envia senyals de test sobre els subcanals amb l'objectiu de determinar la relació senyal-soroll en cadascun. Un cop fet el test, el mòdem assigna més bits de dades als canals amb més qualitat de transmissió de senyal i un nombre de bits menor per a aquells canals de qualitat inferior.

Figura 24. Assignació de subcanals per a tot el rang de freqüències



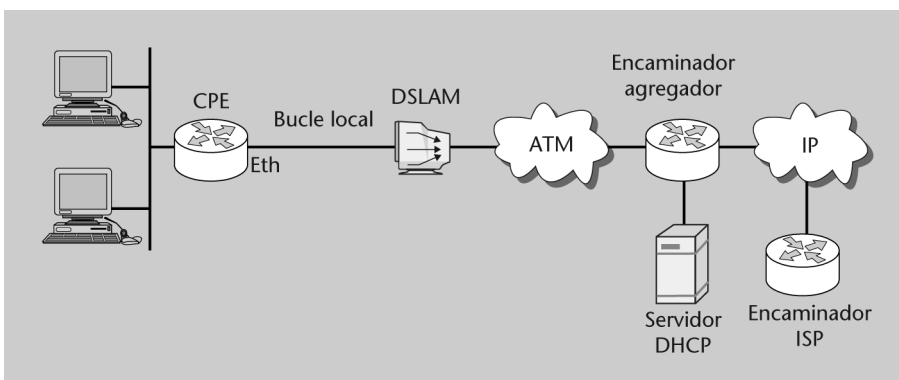
Cada subcanal pot portar dades a una velocitat que va de 0 a 60 kbps. El normal és un augment de l'atenuació amb la freqüència i, per tant, un decrement en la relació senyal-soroll a altes freqüències. La conseqüència és una disminució de la velocitat de dades a altes freqüències.

El disseny ADSL/DMT actual usa 256 subcanals descendents.

Dades sobre ADSL. Encapsulament

La majoria de les xarxes ADSL utilitzen ATM com a protocol de capa d'enllaç. En termes bàsics, un DSLAM, com ja s'ha comentat anteriorment, és un commutador ATM amb targetes ADSL. El DSLAM rep les connexions ADSL i llavors commuta el trànsit sobre una xarxa ATM cap a un encaminador anomenat d'*agregació*.

Figura 25. Components de la xarxa ADSL



Les dues possibilitats més comunes per a encapsular paquets IP sobre ATM i connexió ADSL són:

1) PPP sobre Ethernet (PPPoE). PPPoE és un protocol de xarxa que encapsula trames PPP en trames Ethernet. PPPoE proporciona autenticació, xifratge i

compressió. És una solució usada en serveis ADSL que requereix instal·lar un programari en el client.

2) PPP sobre ATM (PPPoA). PPPoA és un protocol de xarxa que encapsula trames PPP en ATM AAL5. PPPoA proporciona autenticació, xifratge i compressió. PPPoA és una solució encaminada. Amb PPPoA l'encaminador de l'usuari encamina els paquets des del PC d'usuari sobre ATM cap a l'encaminador d'agregació. PPPoA no requereix cap programari en el client com en el cas de PPPoE. S'usa tant en serveis de cable com DSL i ADSL.

Hi ha nous estàndards ADSL que ofereixen millores respecte a l'ADSL convencional:

- ADSL2. Proporciona una taxa de baixada de fins 12 a Mbps a una distància màxima de 2,5 km.
- ADSL2+. Proporciona fins a 24 Mbps a una distància màxima de 1,5 km.

2.5.3. Famílies xDSL

Aquesta línia de tecnologies formen una família denominada xDSL (*x-type, digital subscriber line*). És important destacar que les velocitats xDSL varien en funció de les característiques físiques dels bucles locals. xDSL és un conjunt de solucions basades en el coure.

La taula següent mostra aquestes tecnologies en ordre cronològic:

Nom	Significat	Velocitat	Mode	Comentari
HDSL/HDSL2	DSL d'alta velocitat	1,544 Mbps	Simètric	Utilitza 2 parells de fils
		2,048 Mbps	Simètric	HDSL2 utilitza un parell de fils
SDSL	DSL de parell únic	768 kbps	Simètric	Utilitza un parell de fils
ADSL	DSL asimètric	D'1,5 Mbps a 8 Mbps	Sentit <i>downstream</i> (descendent)	Utilitza un parell de fils
		De 16 kbps a 640 kbps	Sentit <i>upstream</i> (ascendent)	Mínima longitud de bucle: 5,5 km
RADSL	DSL de velocitat adaptable	D'1,5 Mbps a 8 Mbps	Sentit <i>downstream</i> (descendent)	Utilitza un parell de fils, però pot adaptar la velocitat de dades a les condicions de la línia
		De 16 kbps a 640 kbps	Sentit <i>upstream</i> (ascendent)	
CDSL	DSL de consumidor	Fins a 1 Mbps	<i>downstream</i>	Utilitza un parell de fils, però necessita equips remots a casa
		De 16 a 128 kbps	<i>upstream</i>	
Nom	Significat	Velocitat	Mode	Comentari
IDSL	DSL de XDSL	Igual que la interfície bàsica (BRI) d'XDSL	Simètric	Utilitza un parell de fils

VDSL	DSL de molt alta velocitat	De 13 a 52 Mbps	<i>downstream</i>	De 300 a 1300 m de longitud màxima de bucle. Per a funcionar necessita una xarxa de fibra i ATM
		D'1,5 a 6 Mbps	<i>upstream</i>	

2.5.4. Factors que afecten el rendiment del DSL

Tots els tipus de DSL estan limitats per la distància i la velocitat. La velocitat és inversament proporcional a la distància.

Hi ha diversos elements en el bucle local que atenuen o distorsionen el senyal i, per tant, també afecten la velocitat màxima de les connexions DSL:

- **Atenuació:** el senyal s'atenua amb la distància i, per tant, com més distància menys velocitat.
- **Múltiples parells (*bridge tap*):** extensions afegides al bucle local. Pot causar soroll i reflexions que baixen la qualitat del senyal.
- **Gruix del cable (*wire gauge*):** és important la qualitat del cable pel que fa al gruix usat en el bucle local.
- **Pèrdues de retorn:** pèrdues degudes a la desadaptació d'impedàncies entre els dos extrems.
- **Diafonia (*crosstalk*):** interferència entre parells. El senyal que emet un parell indueix senyals a l'altre parell.

3. Frame Relay

3.1. Evolució de la X.25

X-25 és el protocol estàndard més conegut i més utilitzat, aprovat el 1976 i modificat diverses vegades. Aquest estàndard especifica la interacció entre un DTE (equip terminal de dades de l'usuari) i un DCE (equip de comunicació de dades) en una xarxa de commutació de paquets. És a dir, que especifica la interfície entre el terminal i la xarxa de commutació de paquets, però no defineix les característiques pròpies de la xarxa de paquets.

L'estàndard X.25 està organitzat com una arquitectura a tres nivells que corresponen als nivells més baixos del model OSI, els nivells físic, d'enllaç i de xarxa. Destaca el protocol de nivell d'enllaç, que és el LAPB. Tant els protocols de nivell d'enllaç com de xarxa faciliten mecanismes de control d'errors, control de flux i fiabilitat. El fet d'introduir tots aquests mecanismes de control en el nivell d'enllaç i de xarxa proporciona un sistema de molta fiabilitat però, alhora, introdueix una sobrecàrrega considerable que provoca una disminució del rendiment.

LAPB

LAPB són les sigles de *link access procedure balanced*, que és el protocol a nivell d'enllaç d'X.25.

3.1.1. Principals característiques de la X.25

X.25 utilitza la tècnica de commutació de paquets orientada a connexió. El primer paquet que s'envia, que és el paquet d'establiment de trucada, fixa el circuit virtual que connectarà als usuaris. La resta de paquets passaran per aquest mateix circuit, de forma que no caldrà prendre cap més decisió d'encaïment i arribaran a la seva destinació en el mateix ordre seqüencial que s'havien enviat.

X.25 permet l'ús de dos tipus diferents de circuits virtuals: !

- **Circuits virtuals permanents (PVC).** Són enllaços lògics entre un origen i una destinació on s'ha prefixat un tipus de servei per part de l'administrador de xarxa. No hi ha fases d'establiment de trucada i desconnexió, només la fase de transmissió de dades: un PVC sempre està present, fins i tot quan no es transmeten dades.
- **Circuits virtuals commutatats (SVC).** Són connexions que s'estableixen a la xarxa temporalment a través d'un canal lògic lliure. En aquest cas es defineixen les tres fases: establiment de trucada, transmissió de la informació i desconnexió. Un SVC s'estableix sota demanda de l'usuari.

Hi ha dos tipus de circuits virtuals: permanents (PVC) i commutatats (SVC).

3.1.2. Comparació entre X.25 i Frame Relay

El Frame Relay (FRL) es pot considerar la primera adequació de les xarxes de dades a les noves tecnologies. Tenint en compte que les infraestructures són cada vegada més fiables i de més qualitat, i atès que els usuaris disposen de terminals avançats, ha fet que es considerin els terminals dels usuaris com a part de la xarxa que transfereix la informació, i per tant, se cedeix el control de flux i d'errors als terminals. La xarxa només ha de transmetre i commutar les dades, no cal el retorn del paquet de confirmació, per tant, té una sobrecàrrega menor.

En Frame Relay la senyalització de control de trucada s'envia per una connexió lògica separada de la connexió de dades. En canvi, en X.25 els paquets de control i de dades s'envien pel mateix circuit.

En X.25 el multiplexatge de circuits virtuals es duu a terme en el nivell de xarxa, mentre que en FRL s'elimina pràcticament el nivell de xarxa i es fa el multiplexatge i la commutació de connexions lògiques en el nivell d'enllaç. Això provoca un estalvi de tota una capa de processament i agilita el multiplexatge.

Una de les aplicacions en què FRL ofereix prestacions molt per sobre d'X.25 és en xarxes LAN. Aquestes xarxes generen fluxos de dades esporàdics (a ràfegues) i l'amplada de banda s'ha d'adaptar a cada necessitat, això es permet pel fet que utilitza el multiplexatge estadístic. L'FRL ajusta l'amplada de banda al de les diferents aplicacions. L'usuari té garantida una velocitat mitjana de transmissió. Un altre avantatge és la seva velocitat de transmissió, ja que es va dissenyar per oferir velocitats entre 64 kbits/s i 2 Mbits/s, tot i que es poden aconseguir velocitats més elevades.

Multiplexatge estadístic

El multiplexatge estadístic permet obtenir l'amplada de banda que es necessita, quan el necessita, sense haver de reservar-lo prèviament.

Els principals avantatges de l'FRL sobre X.25 són els següents:

- FRL ofereix velocitats més grans.
- FRL treballa només a nivell físic i d'enllaç, això permet que pugui utilitzar-se com a xarxa troncal per a protocols a nivell de xarxa. Exemple TCP/IP.
- FRL permet dades a ràfegues.
- FRL permet una grandària de trama de 9 Kbytes, per tant permet trames de totes les LAN.
- FRL és més econòmic que les altres xarxes WAN.

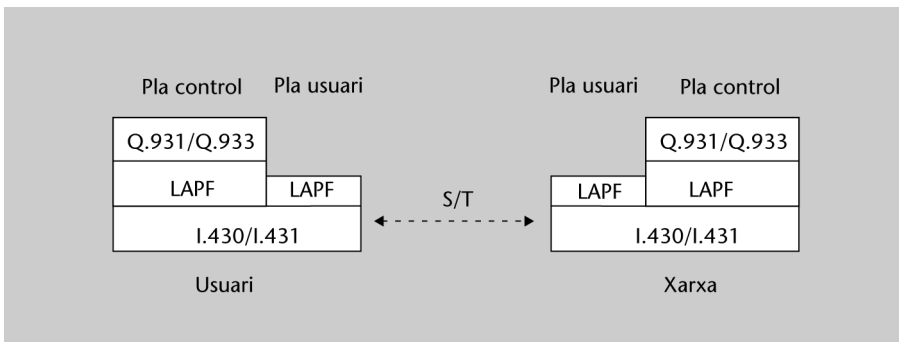
Els desavantatges de l’FRL són els següents:

- La velocitat no és suficient per a protocols com el de la XDSI-BA.
- Les unitats de dades són les trames, o *frames*, de longitud variable, això permet interconnectar diferents tipus de xarxes (LAN o WAN) que utilitzin trames de diferents dimensions. Aquestes diferències de longitud provoquen retards variables en la transmissió que dificulten la transmissió en temps real.

3.2. Protocols del Frame Relay

De la mateixa manera que X.25, Frame Relay defineix el procés d’interconnexió entre els terminals d’usuari i la xarxa de commutació de paquets, però no defineix com circula la informació dins la xarxa de commutació de paquets un cop ha arribat a la xarxa del proveïdor de serveis. D’aquesta manera defineix una arquitectura de protocols a la interfície UNI per poder proporcionar els serveis i les facilitats als usuaris connectats.

Figura 26. Protocols utilitzats a la interfície UNI



El servei ofert està dividit en dos plans que utilitzen el mateix medi físic: el pla d’usuari i el pla de control. Defineix els tres primers nivells, eliminant pràcticament el nivell de xarxa i part del nivell d’enllaç, i algunes funcions les baixa del nivell 3 al nivell 2. És per això que és tan ràpid, ja que es redueixen molt les funcions que ha de realitzar.

1) **Pla de control.** És l’encarregat de realitzar les funcions d’establiment i alliberament dels circuits i trucades en tota la xarxa per on es transferiran les dades, i de la gestió de les connexions. El protocol de senyalització és el Q.933, una extensió del Q.931 utilitzat a la XDSI. A nivell d’enllaç utilitza el protocol LAPF, que proporciona el control d’error i de flux de l’enllaç de dades que permet el control complet dels missatges de senyalització.

2) **Pla d’usuari.** És l’encarregat de les operacions, definicions de serveis i protocols per a l’intercanvi de dades d’usuari. Utilitza el protocol LAPF per a la

LAPF són les sigles de link access protocol for frame mode services.

transferència real d'informació entre els usuaris finals. El protocol a nivell d'enllaç només utilitza les funcions essencials del protocol LAPF, el nucli:

- Delimitació de trames, alineació i transparència de *flags*.
- Multiplexar i desmultiplexar els circuits virtuals utilitzant el camp DLCI.
- Inspecció de la trama per a assegurar que està formada per un nombre enter de bytes.
- Comprovació de la llargada de la trama.
- Detecció d'errors amb el camp CRC i problemes de format.
- Control de congestió (particular del LAPF).

Corresponen als serveis mínims per a transmetre trames entre usuaris que no proporcionen ni control d'errors ni de flux. A més, l'usuari pot seleccionar funcions extrem a extrem a nivell d'enllaç o de xarxa (ordre de les trames, no duplicació de les trames, probabilitat de pèrdua, etc.).

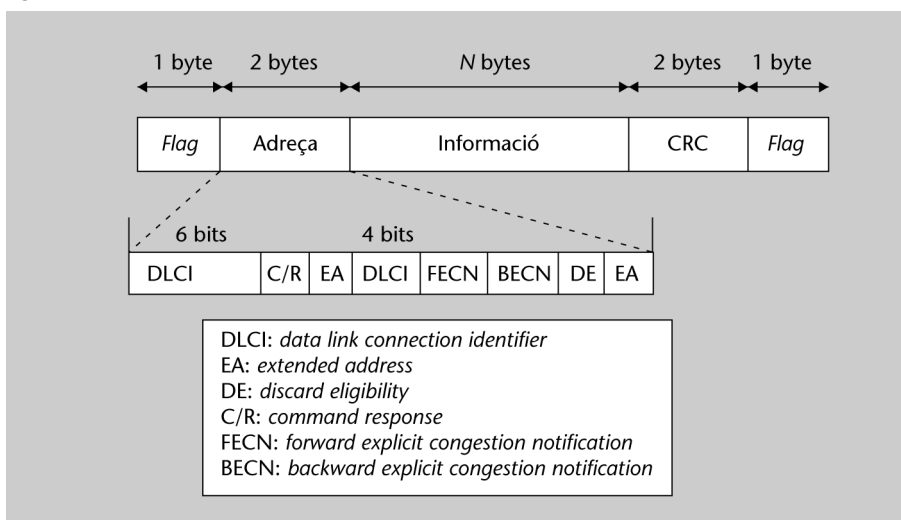
3.2.1. Protocol LAPF

L'FRL es va desenvolupar tenint en compte que el medi de transmissió és fiable i més o menys lliure d'errors. Els errors es poden detectar i recuperar des de l'equip d'usuari. És per això que l'estructura de trama no conté camps per al control de flux i l'establiment de connexions. !

3.2.2. Nucli del LAPF

Per a entendre com funciona la transmissió de les dades en FRL observem el format de les trames del nucli de LAPF (*core protocol*) en la figura 27.

Figura 27. Format de la trama LAPF



Dins del camp *Adreça* de cada trama podem destacar el següent:

- **DLCI:** l'identificador de connexió d'enllaç de dades que determina l'encaminament (*routing*) dins la xarxa, tant si està prefixat en el cas dels PVC, com si és assignat de forma dinàmica en els SVC.
- **FECN:** bit que permet el control de congestió. Indica si hi ha congestió a la xarxa en el sentit que va la trama.
- **BECN:** bit que indica si hi ha congestió a la xarxa en el sentit oposat al que viatja la trama.
- **DE:** permet marcar les trames indicant si la trama es pot descartar en cas de congestió.

El format és similar a altres protocols de nivell 2 (SDLC, LAPD, LAPB, etc.), llevat del fet que no té camp de control. Això implica el següent:

- Només hi ha trames d'informació que transmeten dades. No hi ha trames de control.
- No hi ha trames de senyalització, ja que no es poden codificar missatges especials per a establir o alliberar trucades.
- No es pot fer un control d'errors ni de flux, ja que les trames no estan ni numerades.

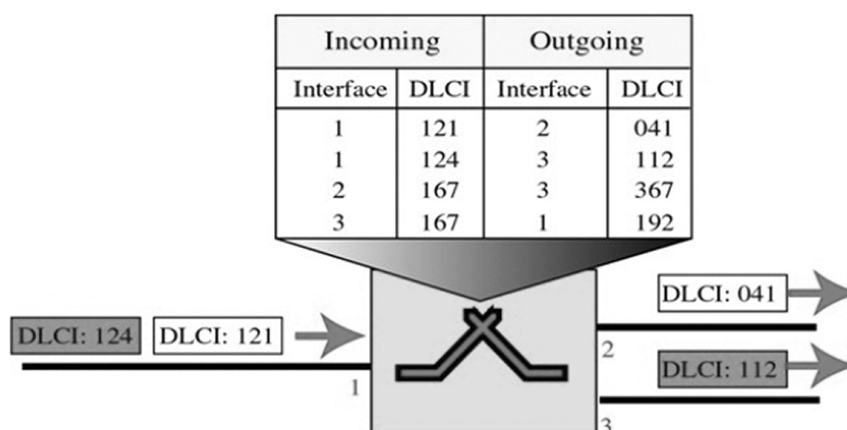
Aquestes funcions les implementaran els equips terminals (encaminadors, ponts (*bridges*), controladors de comunicacions), que han de disposar de mecanismes de seqüenciació, control de flux, enviament de confirmacions i detecció i recuperació de les trames duplicades o errònies per tal d'obtenir íntegrament les dades enviades.

3.2.3. Identificador de connexió de l'enllaç de dades (DLCI)

Aquest identificador no és una adreça d'usuaris finals, sinó que és una referència que determina el camí en cada node, que es va modificant durant tot el circuit virtual segons unes taules d'encaminament. D'aquesta manera no li cal portar l'adreça sencera amb tot el que comportaria. Amb aquests valors DLCI, quan una trama arribi a una entrada, el commutador traduirà l'identificador de connexió i enviarà la trama a través de la sortida corresponent. L'identificador de connexió té 10 bits, igual que el número de circuit virtual a la capa de xarxa, per tant pot indicar fins a 1.024 valors, alguns d'ells reservats.

A la figura següent es mostra un exemple de com seria la taula d'encaminament d'un commutador Frame Relay. En aquest cas es veu una trama que arriba amb DLCI = 121 pel port 1 i, d'acord amb la taula d'encaminament, és commutada pel port 2 amb DLCI = 041. De manera similar, una segona trama arriba pel port 1 amb DLCI = 124 i, també segons la taula, és enca-minada pel port 3 amb DLCI = 112.

Figura 28. Taula de commutació a Frame Relay



3.2.4. Protocol LAPF al pla de control

Correspon al protocol LAPF complet. En aquest cas la trama inclou el camp de control, a l'igual que teníem al protocol LAPD. Això ens permetrà funcions de control de flux i d'errors extrem a extrem des del pla de control. Amb aquest camp podrem distingir entre trames d'informació, de supervisió i trames no numerades.

3.2.5. Control de flux

Com que la xarxa FRL no porta cap mecanisme de control de flux, cal que el facin els equips terminals a partir de la informació que en pugui extreure de la xarxa. El punt clau en la gestió del trànsit és en el control de la congestió.

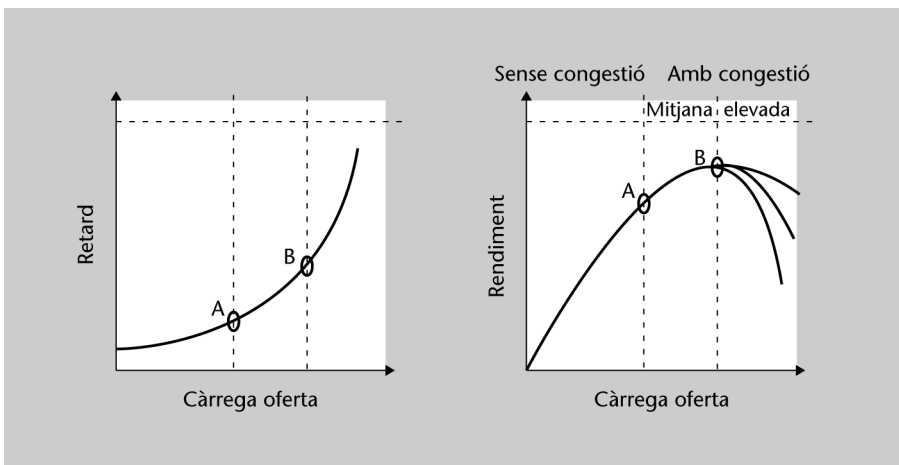
3.2.6. Congestió

Una regió es congestiona a mesura que la càrrega de la xarxa augmenta, de forma que els retards de cua en els nodes augmenten i provoquen una disminució abrupta del rendiment de la xarxa i el creixement de les cues als servidors de trucades. Aquesta situació s'ha d'intentar evitar.

El **control de congestió** és molt important en una xarxa FRL, atesa la limitació d'eines disponibles en els gestors de trames, ja que normalment es gestiona des del nivell de xarxa. El control és de total responsabilitat de la xarxa i dels usuaris finals. La xarxa permet detectar on hi ha congestió, i els usuaris han de

poder controlar-la limitant el flux de trànsit. Quan hi ha una congestió severa la xarxa ha de rebutjar trames.

Figura 29. Efectes de la congestió sobre el retard i el rendiment



L’FRL utilitza dos mecanismes per a controlar la congestió, d’una banda la **gestió del trànsit** a partir d’un conjunt de paràmetres que permeten marcar les trames, o bé eliminar-les. El segon mecanisme és el **control de congestió** basat en la notificació als usuaris que es produeix congestió per tal que redueixin el flux de dades que envien.

3.2.7. Gestió del trànsit

La forma de rebutjar trames és utilitzant el bit d’elegibilitat DE inclòs en el camp d’adreça de la trama. L’usuari posa el bit DE = 1 per a indicar a la xarxa que en cas de problemes, aquesta trama és candidata per ser descartada.

Per a aprofitar millor els recursos, l’FRL inclou el concepte de **taxa d’informació compromesa (CIR)** que ve a ser la velocitat mitjana de transmissió, en bits/s, que la xarxa es compromet a servir a un usuari per a una determinada connexió.

Qualsevol dada que es transmeti a una velocitat superior a la CIR en un determinat interval de temps és susceptible de ser rebutjada si es produeix congestió, la xarxa la pot marcar posant el bit DE = 1. L’interval de temps en què es mesura el CIR s’anomena T_c (**committed rate measurement interval**), que és un paràmetre que estableix el proveïdor de la xarxa. De totes maneres, si la dada es transmet per sota de la CIR tampoc té garantia de no ser rebutjada en cas de congestió extrema.

La CIR es contracta per a cada PVC en el moment de la connexió o es negocia dinàmicament en cas de circuits virtuals commutatats, i és el paràmetre que permet fixar una tarifa al servei.

Es defineixen altres paràmetres addicionals:

CIR

CIR són les sigles de *committed information rate* o velocitat mitjana de transmissió contractada.

- **Grandària de ràfega confirmada (B_C , *committed burst size*)**. És la quantitat màxima de dades que es permet enviar a la xarxa per part de l'usuari en condicions normals, durant l'interval de temps T_C . Aquestes dades poden pertànyer a una trama o més d'una. El valor de B_C es fixa durant l'establiment de la trucada, o ja es té en els PVC. La relació amb el CIR i l'interval de mesura és:

$$\text{CIR} = \frac{B_C}{T_C}$$

- **Grandària de ràfega en excés (B_e , *excess burst size*)**. És la quantitat de dades addicional que pot ser transmesa per sobre de B_C , en condicions normals, durant l'interval de temps T_C . Podríem dir que té una menor probabilitat de recepció que B_C .
- Un darrer paràmetre que intervé en la gestió del trànsit és l'**EIR (*excess information rate*)**, o velocitat màxima en excés. Ens defineix quina és la velocitat màxima disponible per a l'usuari. Habitualment aquesta velocitat correspon a la velocitat d'accés per part de l'usuari, que està determinada per la qualitat de la línia. Per tant, qualsevol dada que tingui una velocitat superior al valor EIR es descartarà automàticament.

$$\text{EIR} = \frac{B_C + B_e}{T_C}$$

Els paràmetres que utilitza FRL per a fer la gestió del trànsit són els següents:

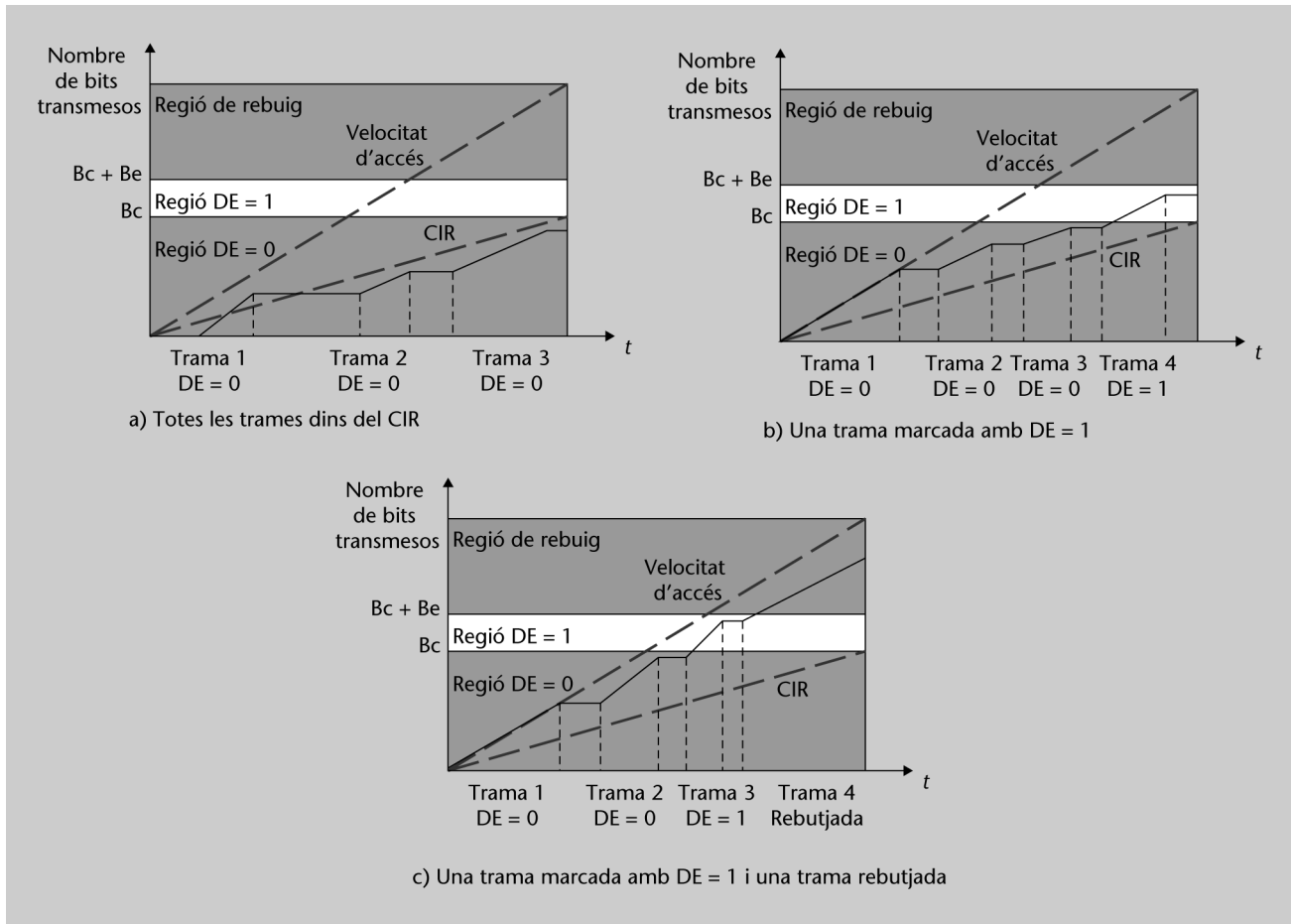
- CIR: *committed information rate*
- T_C : *committed rate measurement interval*
- B_C : *committed burst size*
- B_e : *excess burst size*
- EIR: *excess information rate*

Exemples de gestió del trànsit

Suposem que un usuari transmet trames a la velocitat màxima de transmissió. El volum d'informació transmesa es va acumulant. Mentre el volum es mantingui per sota de B_C , les trames enviades seran acceptades per la xarxa.

Si continua transmetent, arribarà un moment que el volum d'informació transmesa superarà B_C . En aquest moment el bit DE de la trama serà activat pel gestor de trames i passarà a ser considerat de baixa prioritat, i per tant, potencialment descartable. Si continua transmetent, es pot arribar a superar el nivell $B_C + B_e$, a partir d'aquest punt les trames no seran acceptades per la xarxa i seran rebutjades. Una vegada passat l'interval de temps T_C , s'inicialitzaran els paràmetres del trànsit acumulat i es tornarà a executar l'algorisme.

Figura 30. Exemples de gestió del trànsit



Suposem que disposem d'una línia d'accés Frame Relay de 2 Mbps, amb un CIR = 1 Mbps, un EIR = 384 kbps i un valor de TC = 1 segon.

a) Calculeu els valors de B_c i de B_e .

$$B_c = \text{CIR} \cdot T = 1.024 \text{ kbits}$$

$$B_e = 384 \text{ kbits}$$

b) Imaginem ara tres casos diferents, que transmeten tots ells trames de 6.400 bytes.

- Cas 1: arriba un flux constant de 40 trames/s.
- Cas 2: arriba un flux constant de 27,5 trames/s.
- Cas 3: arriba un flux constant de 20 trames/s.

Expliqueu en els tres casos com es tractaran les diferents trames.

Cas 1: arriba un flux constant de 40 trames/s.

Les 40 trames/s que envia el *host* es reparteixen de la manera següent:

- 20 trames/s (1.024 kbps) són enviades a la xarxa ja que no superen el valor B_c durant el temps T. El valor DE = 0.
- 7,5 trames/s (384 kbps) s'enviaran per l'EIR, de manera que tindran el bit DE = 1.
- 12,5 trames/s són descartades.

Cas 2: arriba un flux constant de 27,5 trames/s.

S'aconsegueix transmetre tot el cabal:

- 20 trames/s amb DE = 0
- 7,5 trames/s amb DE = 1

Cas 3: arriba un flux constant de 20 trames/s. Totes seran enviades sense marcar. És a dir, 20 trames/s enviades amb DE=0.

3.2.8. Control de congestió

Hi ha dues formes de notificar als usuaris i commutadors que hi ha congestió i que han d'intentar corregir-la. Quan en un commutador es comencen a experimentar problemes (cues plenes, problemes de gestió de memòria, etc.), aquest informa als dos nodes anterior i posterior utilitzant els bits BECN i FECN del camp d'adreça per a poder controlar el flux de trànsit. Quan un usuari rep una notificació d'aquest tipus ha de reduir la velocitat de transmissió de dades.

4. Mode de transferència asíncrona (ATM)

El mode de transferència asíncrona (ATM) (*asynchronous transfer mode*) és una tecnologia de commutació i multiplexatge d'alta velocitat orientada a connexió. S'utilitza per a aplicacions d'alta velocitat en telecomunicacions, com són la transmissió de grans volums de dades, la videoconferència, la televisió, el multimèdia, etc.

La tecnologia ATM combina la simplicitat de la commutació de circuits amb la flexibilitat de la commutació per paquets. Podríem considerar que funciona amb commutació de paquets i alhora utilitza el mode circuit, ja que d'aquesta manera a l'hora de transmetre àudio i vídeo ho pot fer en temps real, sense retards, i alhora permet oferir serveis amb una velocitat variable.


L'any 1988 la ITU-T va definir la tecnologia ATM, també anomenada *cell relay*. Va néixer per la necessitat creixent d'una tecnologia que permetés diversos tipus de trànsit en diferents distàncies i a una gran varietat de velocitats amb una qualitat de servei gran. S'anomena mode asíncron perquè l'accés dels usuaris a la xarxa es fa en instants determinats de temps, en canals específics, però sense cap reserva.

Per tal d'augmentar la velocitat dels canals síncrons de la XDSI, van comprovar que el mode de transmissió síncrona (STM, *synchronous transfer mode*), que es defineix a la XDSI, no era l'adequat ja que assigna un canal fix durant tot el temps que dura la comunicació independentment de la quantitat d'informació enviada pel canal. Amb un model síncron es desaprofita molta amplada de banda, en canvi, un model asíncron s'adapta millor a un trànsit cada vegada més aleatori en velocitat i durada.

Alhora es va adoptar com a estàndard de transmissió SDH (*synchronous digital hierarchy*), que permet maximitzar l'amplada de banda disponible adaptant les velocitats entre els enllaços òptics de la xarxa. ❗

La ITU-T va definir la unitat de transmissió d'informació ATM, **cel·la**, amb una longitud constant de 48 bytes i 5 bytes de capçalera. Alhora va definir que ATM juntament amb SDH serien les dues principals tecnologies que utilitzaria la XDSI de banda ampla.

La cel·la de 53 bytes és la unitat de transmissió d'ATM.

Les principals característiques d'ATM són les següents: 

- Amplada de banda flexible i escalable, i altes velocitats de transferència. Utilitza multiplexatge estadístic i commutació de paquets (cel·les), de longitud fixa de 53 bytes.
- Tecnologia commutada i orientada a connexió. El mode d'operació és a través de circuits virtuals.
- Minimitza el processament de les cel·les dins de la xarxa.
- Més disponibilitat de la xarxa. Els commutadors ATM són molt ràpids perquè la commutació es fa amb dispositius físics (maquinari) i no mitjançant programes (programari). El processament i retard en cada commutador és mínim, per la qual cosa augmenta la velocitat de transferència.

La XDSI de banda ampla utilitza ATM + SDH.

4.1. Configuració i model de referència de l'ATM

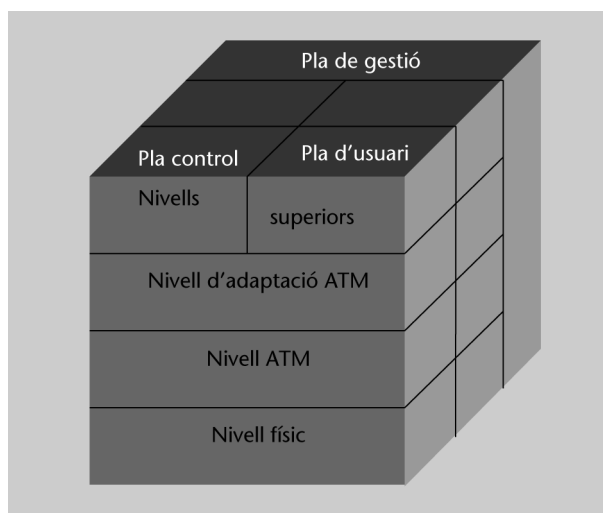
Per definir la configuració de referència de la interfície UNI de la XDSI-BA, que permet la connexió de l'usuari a la xarxa ATM, la ITU-T va utilitzar els mateixos grups funcionals de la XDSI amb algunes petites diferències. Pel que fa als punts de referència són els mateixos, destaquem, però, que el punt de referència R_B pot no tenir facilitats de banda ampla.

Per a cada connexió, en els punts de referència S_B i T_B es pot accedir a un conjunt de serveis amb diferents velocitats d'accés: variable (VBR), constant (CBR) o disponible (ABR), i a diferents qualitats de servei (QoS) en termes de velocitat i retard.

Hi ha tres noves velocitats de transmissió:

- 51,84 Mbits/s (SONET STS-1)
- 155,52 Mbits/s (SONET STS-3 i SDH STM-1)
- 622,08 Mbits/s (SONET STS-12 i SDH STM-4)

Figura 31. Model de referència ATM



El **model de referència** ens mostra l'arquitectura de protocols ATM. Tal com es pot comprovar consta de tres nivells i de tres plans. El component essencial és el **nivell ATM**, que és comú a tots els serveis i medis físics utilitzats. La seva funció és establir mecanismes de control bàsics per a la transferència de cel·les, com són la commutació i el multiplexatge de les cel·les. Es complementa amb el **nivell d'adaptació ATM**, **AAL** (*ATM adaptation layer*) que té l'objectiu de proporcionar la funcionalitat necessària pels diferents serveis suportats, adapta la informació dels nivells superiors al format de cel·les ATM. El **nivell físic PL** (*physical layer*) adequa la informació als medis físics i estructures de transport.

Es defineixen tres plans:

- **Pla d'usuari.** Permet transmetre la informació d'usuari i el control associat (de flux, d'errors).
- **Pla de control.** S'encarrega de la senyalització de control de les trucades i de la connexió. Per tant, de l'establiment, control i alliberament de les connexions.
- **Pla de gestió.** S'ocupa de la gestió i manteniment del sistema tant dels nivells (funcions relatives a recursos i paràmetres de cada nivell), com dels plans (funcions relatives al sistema i al conjunt dels plans). No presenta estructura de nivells.

	Funcions de nivells superiors	Nivells superiors	
Gestió de nivells	Convergència	CS	AAL
	Segmentació i reassemblatge	SAR	
	Control genèric de flux Generació/extracció de la capçalera de la cel·la Traducció VPI/VCI de la cel·la Multiplexatge/desmultiplexatge de cel·les	ATM	
	Desacoblament de la velocitat de les cel·les Generació/verificació del camp de control de la capçalera Alineació de cel·les Adaptació de trames de transmissió Generació/recuperació de trames de transmissió	TC	Nivell Físic
	Temporització de bit Medi físic	PM	

4.2. Nivell físic. Estructura SDH

El nivell físic genera un flux continuat de cel·les ATM que es transmet de forma síncrona a través del medi. Però també realitza altres funcions:

- Delimitació de les cel·les.
- Transmissió d'informació de sincronisme.

- Control dels errors en la transmissió.
- Adaptació al medi físic.

4.2.1. Estructura de protocols

L'estructura del nivell físic de l'ATM es divideix en dos subnivells:

- **Medi físic (PM)**. Únicament realitza funcions dependents del medi. Encarregat de la transmissió/recepció de bits pel medi físic amb informació de temporització per al sincronisme.
- **Convergència de la transmissió (TC)**. Encarregat de generar i recuperar les trames de transmissió. Adaptar la velocitat de les cel·les ATM, inserint o suprimint cel·les, a la capacitat de transmissió i crear el flux de dades per a ser transmès al medi físic. A la destinació ha d'extreure les cel·les del flux de dades rebut, comprovar que són correctes i entregar-les al nivell superior ATM. Les cel·les buides o errònies es rebutgen.

4.2.2. Estructures de transmissió. Jerarquia digital síncrona

Habitualment, per tal de transportar la informació a altes velocitats, s'utilitza la tècnica basada en trames síncrones en què les cel·les s'agrupen en una trama síncrona anomenada STM definida a la jerarquia digital síncrona (SDH o SONET).

El 1986, la ITU-T va establir un conjunt de recomanacions que defineixen la jerarquia digital síncrona. Consisteix en un conjunt d'estructures de dades jeràrquiques que multiplexen la informació dels usuaris per tota la xarxa a través d'enllaços òptics. La SDH va estar motivada per l'aparició del SONET, que és un estàndard desenvolupat als EUA per tal d'obtenir el màxim profit a la transmissió digital per medis òptics i que va adoptar ANSI. Del SONET podem destacar la capacitat de transportar múltiples dades multiplexades, proporcionant uns camps de capçaleres (*overhead*) molt eficients en la gestió de xarxes d'alta velocitat.

SONET

SONET són les sigles de *synchronous optical network*, l'estàndard de transmissió síncrona utilitzat als EUA.

El motius del desenvolupament de l'estàndard SDH són els següents: !

- Calen mètodes de multiplexatge dels sistemes de transmissió òptics. Els models europeu i americà divergeixen, i existeixen criteris propietaris per part dels fabricants. S'han de compatibilitzar els diferents equips.
- Es compensen les diferents velocitats de rellotge de diversos canals afegint bits de reompliment, això no permet identificar i extreure canals en punts intermedis de la transmissió. Per tant tenen poca flexibilitat.

- El multiplexatge és asíncron, per tant calen diferents rellotges.
- Cada ordre jeràrquic té trames diferents.
- Els sistemes de transmissió disposen de pocs elements pel control i gestió de la xarxa. Cal un suport per a futures demandes d'alta velocitat com en la XDSI-BA.

Les tècniques que hi ha de multiplexatge plesiócron (PDH) obliguen a convertir tot el trànsit en bits de la mateixa dimensió, encara que hagin estat generats per diferents rellotges, abans de ser multiplexats pels enllaços d'alta velocitat. Per això cal afegir bits (tributaris) per poder completar trames i així adaptar les diferents fonts de trànsit.

Amb SDH no calen tants processos de multiplexatge/desmultiplexatge perquè tots els senyals estan sincronitzats a la mateixa freqüència. Els sistemes SDH ofereixen una capacitat d'extracció/inserció estàndard que es pot aplicar a tots els nivells de la jerarquia. S'utilitzen uns apuntadors que localitzen el canal dins de l'estructura de forma que podem extreure, posar o simplement localitzar la informació ajustant uns apuntadors. Això permet extreure senyals de les trames de forma dinàmica amb un sol multiplexor.

Els principals avantatges de la SDH respecte als sistemes utilitzats anteriorment són els següents:

- Procediment simplificat per a multiplexar/desmultiplexar.
- Permeten xarxes amb topologia amb anell mitjançant els equips multiplexors anomenats *add-drop*.
- El sincronisme és únic a tota la xarxa.
- Permeten transportar els senyals síncrons, i a més, els asíncrons multiplexats amb la jerarquia (PDH).
- A les trames duen informació per al control, gestió, etc. per a tota la xarxa, i encara els sobra capacitat per a aplicacions futures.
- Permet transportar senyals de banda ampla com ATM, *dual queue dual bus* (DQDB) i *fiber distributed data interface* (FDDI), entre altres.
- Es poden utilitzar en qualsevol tipus de xarxes, urbanes en anell o interurbanes de llarg recorregut.

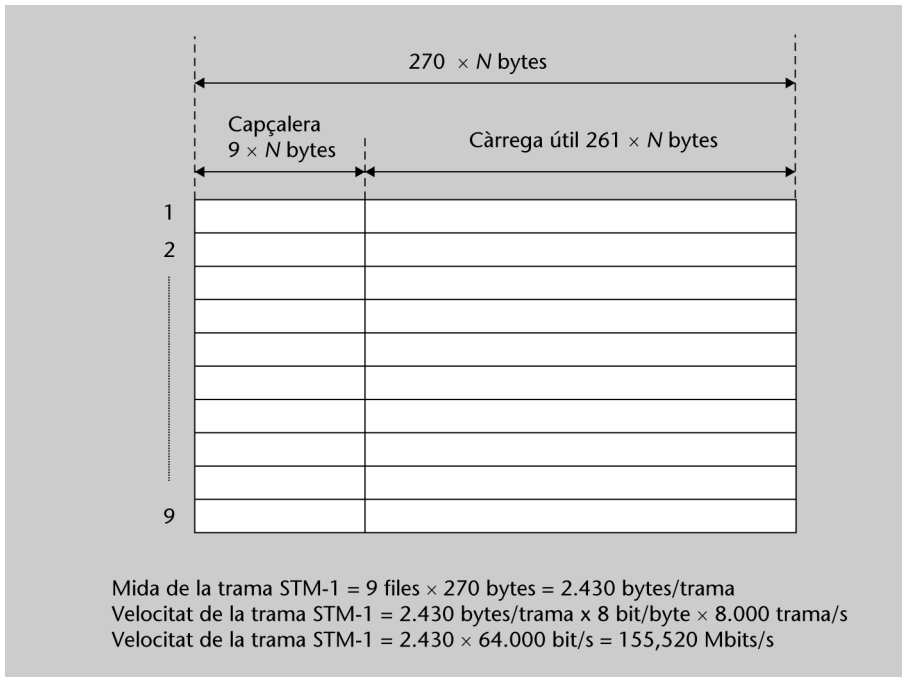
SDH permet sincronisme únic a tota la xarxa, i facilita el multiplexatge i desmultiplexatge dels senyals.

4.2.3. Estructura de la trama SDH

L'estructura SDH es basa en la trama STM-1 (*synchronous transport module nivell 1*).

STM-1 és el mòdul bàsic de transport síncron SDH amb velocitat 155,52 Mb/s.

Figura 32. Estructura de la trama STM-N



Cada trama STM-N està formada per dues seccions diferenciades: secció de capçalera (*section overhead*, SOH) i la càrrega útil (*payload*). La longitud d'una secció lineal és de $270 \times N$ bytes, dels quals $9 \times N$ bytes corresponen a la SOH i $261 \times N$ bytes a la càrrega útil. Aquest esquema lineal es repeteix fins a nou vegades, per la qual cosa la trama la representarem en dues dimensions.

Exemple

Calcularem la velocitat a què haurà de viatjar cada mòdul STM-N. La durada de les trames de la jerarquia digital síncrona és de $125 \mu\text{s}$, que correspon a una velocitat de 8 trames/s, d'aquí sorgeix la velocitat de 64 kb/s. Per tant la velocitat d'una trama STM-N = $9 \times 270 \times N \times 64 \text{ kb/s} = 155.520 \times N \text{ kb/s}$. Per a $N = 1$ correspon una velocitat STM-1 = 155,52 Mb/s, tal com havíem indicat.

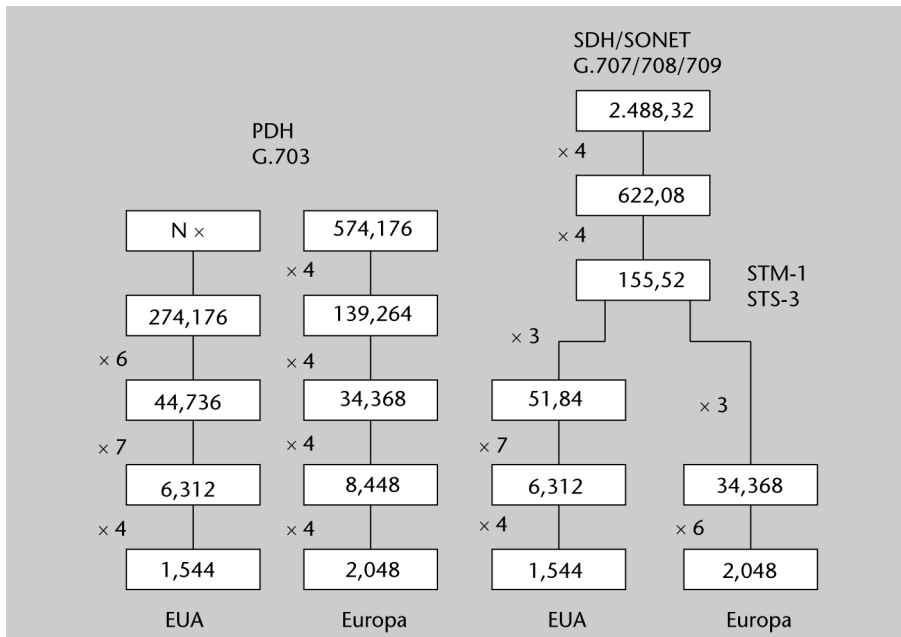
Quatre mòduls STM-1 formen un STM-4 a 622,08 Mb/s i 16 formen l'STM-16 a 2.488,32 Mb/s i així successivament, tal com indica la taula per valors 1, 4, 16 i 64. La velocitat de 51,84 Mb/s deriva de l'estructura STS-1 de la norma SONET.

Denominació SDH	Denominació SONET	Velocitat	Nre. de canals
STM-1	STS-3	155,52 Mbits/s	1.890
STM-4	STS-12	622,06 Mbits/s	7.560
STM-16	STS-48	2.488,32 Mbits/s	30.240
STM-64	STS-192	9.953,28 Mbits/s	120.960

STS-1

STS-1 són les sigles de *synchronous transport signal level 1*, que és el mòdul bàsic de la norma SONET.

Figura 33. Esquema de les jerarquies de multiplexatge (valors expressats en Mbits/s)



Podem veure les velocitats definides a cada jerarquia i les seves equivalències entre SONET i SDH. L'SDH s'inicia a una velocitat de 155,52 Mbits/s a Europa, que és el triple que la de 51,84 Mbits/s dels EUA i el Japó. A partir d'aquesta velocitat corresponent al **primer nivell jeràrquic**, obtindrem velocitats múltiples d'aquesta als nivells superiors. A més, les velocitats de la PDH entre 1,544 Mbits/s i 139,264 Mbits/s poden transportar-se dins l'SDH en la trama STM-1 per a poder canviar de jerarquia sense problemes. És gràcies a aquesta característica que l'SDH té acceptació.

A cada nivell de multiplexatge s'hi pot assignar una capacitat de càrrega definida com la quantitat d'informació que cada nivell de multiplexatge pot transportar en un mòdul de transport. És per això que es defineixen els **contenidors virtuals (VC, virtual container)**, que són simplement la part de la trama que permet portar informació, que correspon a la càrrega útil de la trama (cel·les ATM, canals PDH, etc.).

Els contenidors virtuals poden tenir diferents mides segons el valor de N . Cadascun d'ells correspon a una velocitat binària plesidrona existent. Per exemple, el VC-4 consta de 2.340 bytes amb una capacitat de transport de 149,76

Mbits/s que permet transportar un senyal a 139,264 Mbits/s, el VC-12 per senyals de 2,048 Mbits/s i el VC-11 per 1,544 Mbits/s, etc.

Designació	Velocitat de multiplexatge PDH
VC-11	1,544 Mbits/s
VC-12	2,048 Mbits/s
VC-2	6,048 Mbits/s
VC-3	34,368 i 44,736 Mbits/s
VC-4	139,264 Mbits/s

La SDH permet una utilització més eficaç, flexible i econòmica de l'amplada de banda disponible, de forma que el podem assignar dinàmicament a qualsevol node. Això permet crear xarxes en anell.

SONET i SDH, tal i com hem vist, són totalment compatibles tot i que presenten algunes diferències. SONET, a part que utilitza nomenclatures diferents per les trames, defineix molts més nivells jeràrquics que SDH.

4.3. Nivell ATM. Cel·les

Aquest nivell és la base de la tecnologia del *cell relay*. La seva missió és manipular les cel·les. No realitza control de flux ni d'errors. Les seves funcions són les següents:

- Multiplexatge/desmultiplexatge de cel·les: es multiplexen cel·les de diferents canals virtuals (VC) i trajectes virtuals (VP) en un únic corrent de cel·les. En recepció el procés és invers.
- Construcció/extracció de capçaleres: es genera la capçalera de la cel·la una vegada rebuda la informació de la capa superior (AAL), excepte el control d'errors, que el fa al nivell físic. En recepció es fa el procés d'extracció de la capçalera.
- Encaminament entre els nodes: en els nodes intermedis es realitza una funció d'encaminament utilitzant els camps d'identificador de trajecte virtual (VPI) i identificador de canal virtual (VCI). Les etiquetes VPI i VCI tenen validesa local i cal canviar-les als nodes de commutació segons una funció de translació.

4.3.1. Format de la cel·la

La tecnologia ATM es basa en una cel·la bàsica de 53 bytes dividida en dos blocs: una capçalera (*header*) de 5 bytes que duu informació d'encaminament i el bloc d'informació (*payload*) de 48 bytes on es transmeten les dades de l'usuari i protocols del nivell d'adaptació AAL. La utilització de cel·les petites redueix el retard i pel fet de ser de dimensions fixes es commuten més fàcilment.

La ITU-T especifica dos formats de cel·les amb diferent capçalera segons la interfície que s'utilitzi. Els formats s'anomenen:

- UNI (*user to network interface*).
- NNI (*network to network interface*).

A la figura següent es mostra com els punts finals es connecten a la xarxa ATM mitjançant la interfície UNI, mentre que els commutadors es connecten entre ells mitjançant les interfícies NNI.

Figura 34. Arquitectura de xarxa ATM

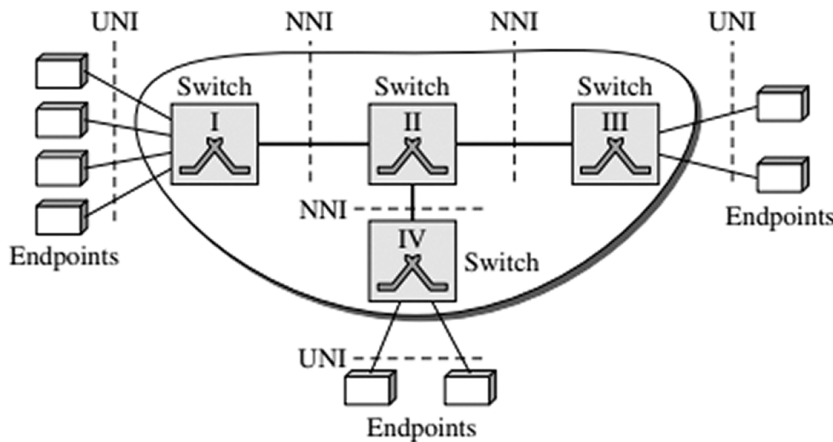
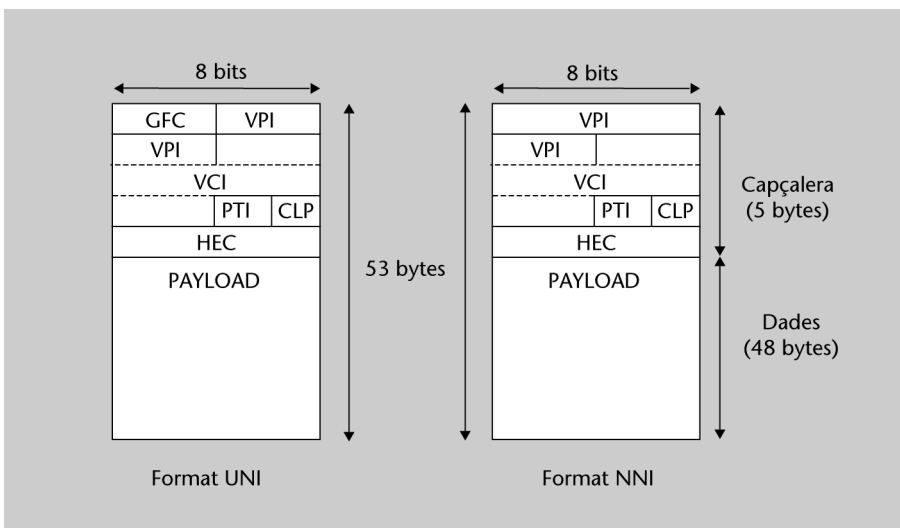


Figura 35. Format dels dos tipus de cel·les ATM



Els camps que formen la capçalera són:

- **GFC** (*generic flow control*): controla el flux i l'accés físic a qualsevol tipus d'estructura UNI (anell, estrella, bus).
- **VPI** (*virtual path identifier*): identificador del camí virtual. És un camp per a l'encaminament de la cel·la per la xarxa.
- **VCI** (*virtual channel identifier*): identificador del canal virtual per a encaminar la cel·la.
- **PTI** (*payload type identifier*): està format per 3 bits i identifica el tipus de càrrega útil.
- **CLP** (*cell loss priority*): indica a la xarxa quan una cel·la té prioritat, 0: alta prioritat i 1: pot ser descartada en cas de congestió.
- **HEC** (*header error control*): és un byte que controla els errors de la capçalera.

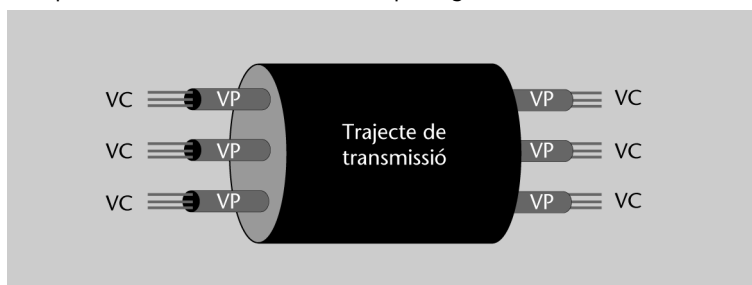
4.3.2. Multiplexatge ATM

Els camps VCI i VPI ens determinen el circuit virtual al qual pertany una determinada cel·la. Aquest camí es fixa a l'inici de la connexió i un cop establert l'utilitzaran totes les cel·les d'una determinada comunicació. Aquests identificadors no són locals i varien cada cop que travessen un commutador. A diferència del que passava en Frame Relay, en ATM distingim dos nivells: ⚠

- El **canal virtual** (VC, *virtual channel*) ens identifica una connexió lògica unidireccional per a la transferència d'informació en ATM.
- El **trajecte virtual** (VP, *virtual path*) és un feix de canals virtuals amb els mateixos extrems. Simplifiquen l'estructura de la xarxa, milloren el funcionament i seguretat de la xarxa, reduint el processament i escurçant els temps d'establiment.

En ATM distingim dos nivells de multiplexatge: canal virtual (VC) i trajecte virtual (VP).

Figura 36. Representació dels dos nivells de multiplexatge ATM

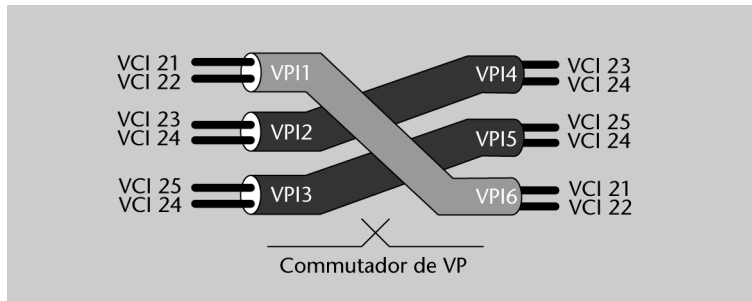


La commutació en ATM també és diferent als dos nivells:

- **Commutador de trajectes virtuals.** Es realitza a partir del valor de l'identificador VPI que transporten les cel·les a la capçalera. El sistema és anàleg al cas del Frame Relay. Aquest commutador només commuta trajectes vir-

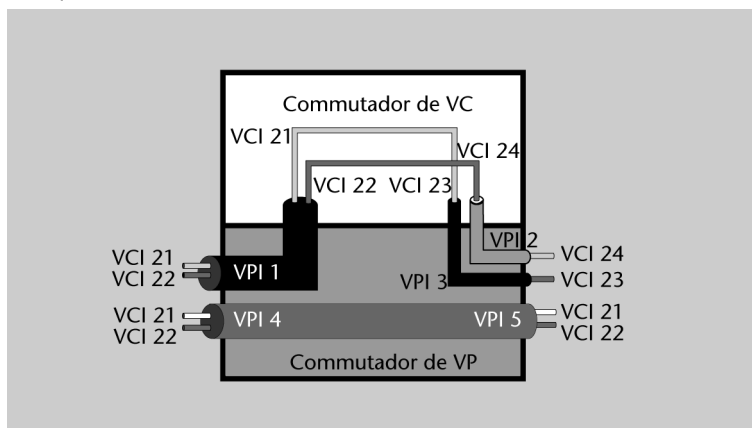
tuals, per tant, canvia el VPI del trajecte virtual entrant, per un altre, en funció de la sortida que ha de prendre, a partir d'unes taules de commutació que té cada node. No modifica els valors dels VCI, tal com es pot observar en la figura 37.

Figura 37. Esquema de commutació de trajectes virtuals



- **Commutador de canals virtuals.** Als commutadors de canals virtuals finalitzen enllaços de VC, per tant, també de VP. En aquest cas, cal que el commutador faci una traducció dels VCI i dels VPI per a cada connexió.

Figura 38. Esquema de commutació dels canals virtuals



Les xarxes ATM distingeixen dos tipus de circuits, en funció de la naturalesa del seu establiment: els circuits virtuals permanents i els commutats.

4.4. Nivell d'adaptació ATM (AAL)

El nivell d'adaptació és el responsable de les relacions amb el món extern, per això només es troba als nodes terminals de la xarxa que són els que proporcionen els punts d'accés als usuaris finals. Les dades a nivell ATM estan estructurades en cel·les que són massa petites per les necessitats que tenen els usuaris, la seva funció és la d'adaptar la informació que li arriba al format ATM. Les principals funcions són les següents:

- Segmenta/reassembla les dades en cel·les per poder transmetre en format ATM.

- Recupera errors.
- Manté el sincronisme entre terminals.

4.4.1. Estructura del nivell AAL

El nivell AAL està organitzat en dos subnivells:

- **Subnivell de convergència (CS).** Du a terme funcions específiques per a cada aplicació, com són la detecció i el desmultiplexatge de dades, el control d'errors i el manteniment del sincronisme. Aquest subnivell a la vegada està organitzat en dos subnivells més:
 - **Subnivell de convergència de serveis específics (SSCS).**
 - **Subnivell de part comuna (CPS).**
- **Subnivell de segmentació i reassemblatge (SAR).** Segmenta la informació del nivell superior (CS) per a construir les cel·les de 48 bytes i enviar-les al nivell ATM perquè els posi capçalera. Reconstrueix, o desempaqueta, la informació original en rebre els continguts d'una seqüència de cel·les.

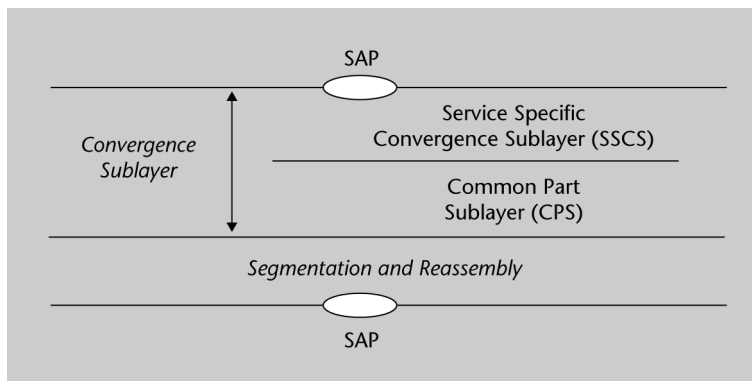
CS és la sigla de *convergence sublayer*.

SSCS és la sigla de *service specific convergence sublayer*.

CPS és la sigla de *common part sublayer*.

SAR és la sigla de *segmentation and reassembly*.

Figura 39. Subnivells d'adaptació ATM



A la figura es pot veure com queda l'estructura completa de nivell i la seva interacció tant amb el nivell superior com amb la capa ATM per mitjà dels punts d'accés al servei (SAP).

1) Nivell d'adaptació AAL1

Com s'ha dit, AAL1 està dissenyat per a àudio d'alta qualitat o fins i tot vídeo a taxa de bits constant.

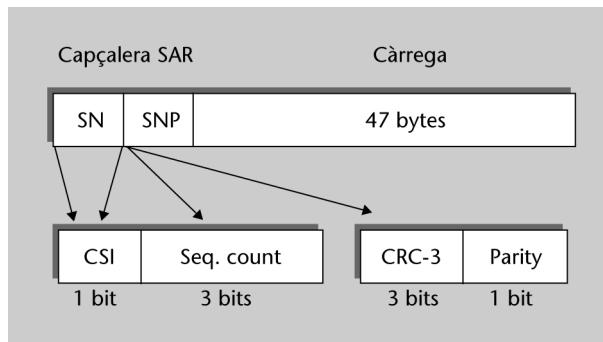
Proporciona transferència de dades a taxa de bits constant i fa l'entrega a la mateixa taxa de bits. Proporciona transferència d'informació de variacions de

retard entre les aplicacions emissor i receptor, i pot gestionar les variacions del retard i detectar pèrdua de cel·les.

AAL1 està organitzat en els subnivells SAR i CS.

a) El **subnivell SAR** és el responsable del transport i la detecció d'errors en bit. Accepta blocs de 47 bytes de CS i afegeix una capçalera d'1 byte per a formar el que s'anomena SAR-PDU. A la vegada el SAR-PDU es passa al nivell ATM, en què s'afegeixen els 5 bytes de la capçalera ATM.

Figura 40. Encapsulat SAR per a AAL1



A la figura es veu l'encapsulat de SAR-PDU. La capçalera està formada per dos camps de quatre bits cadascun:

- **Número de seqüència (SN).**
- **Protecció de número de seqüència (SNP).**

*SN és la sigla de **sequence number**.*

*SNP és la sigla de **sequence number protection**.*

b) El **subnivell CS** fa diverses tasques, entre les quals destaquen la gestió de la variació del retard entre cel·les, el processament del comptador de seqüència, el processament del FEC o el monitoratge del rendiment.

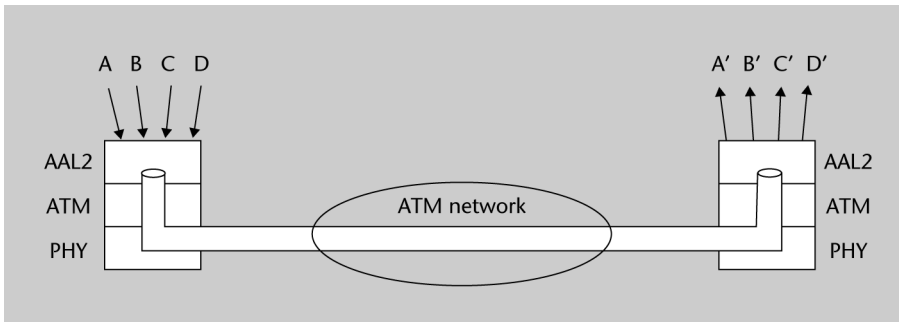
*FEC és la sigla de **forward error correction**.*

Perquè AAL1 pugui suportar aplicacions amb taxa constant, ha d'entregar els fluxos de dades a l'aplicació receptora a la mateixa taxa de bits a la qual van ser transmesos. Pot passar que els commutadors intermedis provoquin certs retards. Per a compensar aquestes variacions en l'arribada de les cel·les, CS escriu les SAR-PDU que arriben en una cua (*buffer*) que compensa les variacions. Des d'aquesta cua són entregades a taxa constant a l'aplicació AAL receptora.

2) Nivell d'adaptació AAL2

Aquest nivell d'adaptació proporciona un transport eficient sobre ATM per a múltiples aplicacions que siguin sensibles i tinguin una taxa de bits amb poca variació (veu, fax...). AAL2 està pensada bàsicament per a transmissió de vídeo i en certs entorns s'usa en la telefonia cel·lular. AAL2 es va dissenyar per a multiplexar diversos fluxos amb taxa de bits variable en una única connexió ATM. En l'extrem receptor es desmultiplexen i se separen en fluxos individuals.

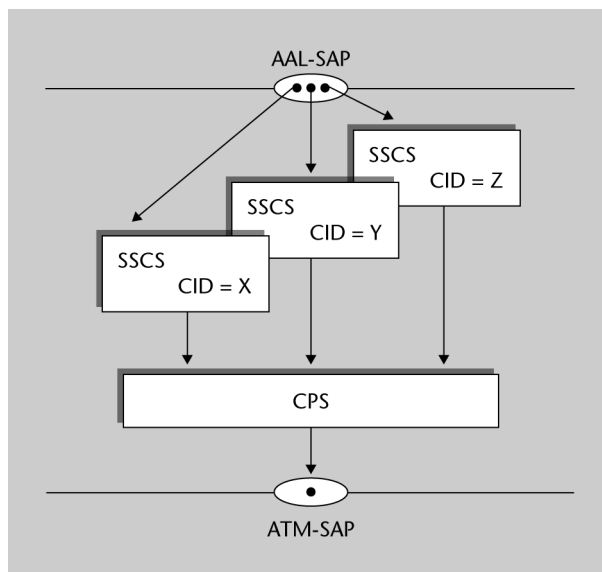
Figura 41. AAL2 pot multiplexar diversos fluxos de dades



CS, el qual proporciona els serveis AAL2, està a la vegada subdividit en l'SSCS i el CPS. No hi ha nivell SAR en AAL2. La multiplexació dels diferents fluxos de dades s'aconsegueix associant cadascun dels usuaris amb un SSCS diferent. Es poden definir diferents protocols SSCS per a suportar diferents tipus de serveis. Cada SSCS rep dades des del seu usuari i les passa al CPS en forma de paquets curts.

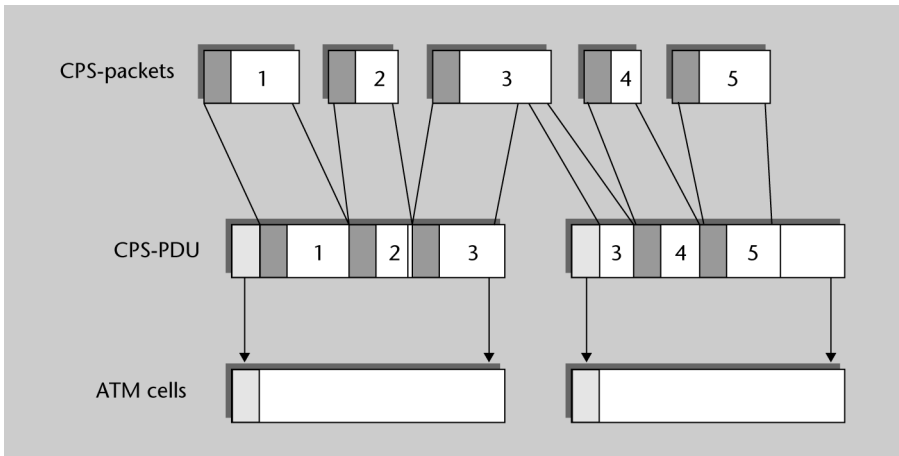
El CPS proporciona una funció de multiplexatge mitjançant la qual els paquets rebuts des dels diferents SSCS es multiplexen en una única connexió ATM. A la banda del receptor de la connexió ATM, els paquets són obtinguts des de les cel·les d'entrada ATM pel CPS i entregats als SSCS receptors corresponents.

Figura 42. Model funcional d'AAL2



Les aplicacions que usen AAL2 normalment treballen amb paquets de longitud petita i a més longitud variable. Cada paquet CPS és encapsulat i llavors s'empaqueta en un CPS-PDU. Com ja hem dit, AAL2 està dissenyat per a multiplexar diversos fluxos SSCS en una única connexió ATM. Això s'aconsegueix empaquetant diversos paquets CPS en una única CPS-PDU, en què cada paquet CPS pertany a un flux SSCS diferent. Fins i tot un paquet CPS pot estar trossejat i formar part de dos CPS-PDU successius.

Figura 43. Empaquetatge dels paquets CPS en CPS-PDU



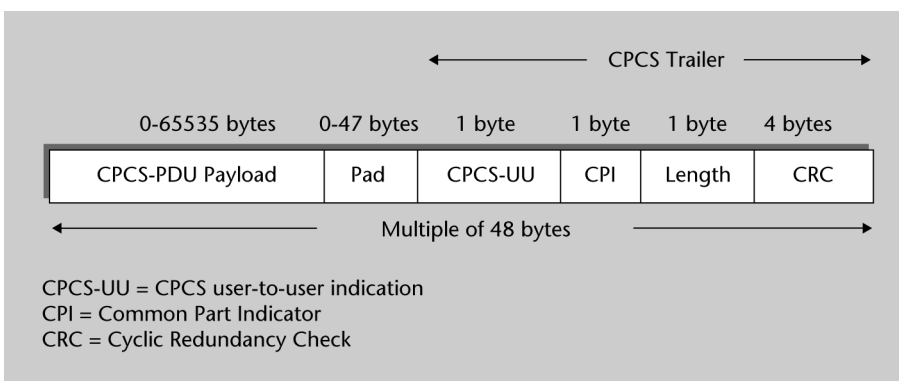
3) Nivell d'adaptació AAL5

El nivell d'adaptació AAL5 s'usa per a transferències de dades. A causa de la seva simplicitat és la capa d'adaptació més popular. Els serveis AAL5 els proporcionen els subnivells CS i SAR. A la vegada CS està subdividit en SSCP i CPS.

El CPS proporciona una transferència de dades d'usuari no assegurada, i la longitud del paquet pot variar d'1 byte a 65.535 bytes. En l'extrem remot el CPS pot detectar els errors i indicar-ho a l'aplicació de nivell superior. En cas de retransmissió ha de ser el protocol d'aquesta aplicació el que ho faci. Per exemple, podria ser TCP.

A la figura següent es mostra com queda encapsulada la PDU d'usuari per CPS:

Figura 44. Encapsulament CPS



Els camps definits són els següents:

- **Farciment** (*pad, padding*): pot variar de 0 a 48 bytes de longitud i s'afegeix per a assegurar que tota la CPS-PDU té un valor enter múltiple de 48 bytes.
- **Indicador CPS usuari a usuari** (CPS-UU): camp d'1 byte per a transferir de manera transparent informació CPS d'usuari a usuari.

CPS-UU és la sigla de CPS user-to-user indication.

- **Indicador de part comuna (CPI):** camp d'1 byte pensat per a futures aplicacions AAL5.
- **Longitud (*length*):** camp de 2 bytes que indica la longitud en bytes de la càrrega (PDU d'usuari).
- **CRC-32.**

*CPI és la sigla de **common part indicator**.*

Exercici

Una empresa disposa d'un accés ATM que fa servir per a transmetre el trànsit telefònic i per a accedir a un servidor remot.

- a) Indiqueu raonadament en funció del tipus de trànsit quin tipus de nivell d'adaptació (AAL) correspon a cadascun dels dos serveis.
- b) Busqueu com ha de ser el format de les unitats de dades de protocol (PDU) al subnivell de segmentació i reassemblatge (SAR) dels nivells d'adaptació indicats a l'apartat anterior.
- c) Per al servei telefònic, suposant que s'atenen de mitjana un nombre de 100 connexions telefòniques a 64 kbps simultàniament, calculeu la velocitat mitjana sostinguda (SCR) en bps i en cel·les/s. Indiqueu per a aquest cas, quina relació hi ha entre la velocitat mitjana (SCR) i la velocitat màxima (PCR).

Solució:

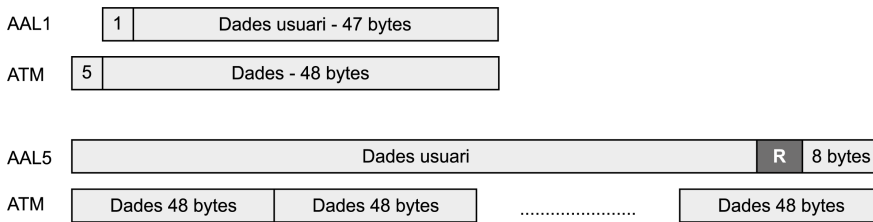
a) El tipus de nivell d'adaptació per a cadascun dels dos serveis serà:

Trànsit telefònic: classe A orientat a connexió, velocitat constant. → AAL1

Accés a servidor remot: classe D no orientat a connexió, no restricció temporal → AAL5

b) El format de les unitats de dades de protocol (PDU) al subnivell de segmentació i reassemblatge (SAR) dels nivells d'adaptació per a AAL1 i AAL5:

PDU per a AAL1 i AAL5



c) Velocitat mitjana sostinguda (SCR) en bps i en cel·les/s:

Velocitat constant: SCR = PCR.

1 canal veu a 64 kbps té 47 bytes, però necessita 53 bytes (47 bytes més 5 bytes de capçalera).

$$SCR = 64000\text{bps} \cdot \frac{1\text{byte}}{8\text{bit}} \cdot \frac{1\text{cel}}{47\text{byte}} = 170,2\text{cel/s}$$

$$SCR = 170,2\text{cel/s} \cdot \frac{53\text{byte}}{1\text{cel}} \cdot \frac{8\text{bit}}{1\text{byte}} = 72170,21\text{bps}$$

Per a 100 connexions:

$$SCR = 100 \cdot 170,2\text{cel/s} = 17020 \text{ cel/s}$$

$$SCR = 100 \cdot 72170,21\text{bps} = 7217021\text{bp} \approx 7,2\text{Mbps}$$

4.4.2. Serveis del nivell AAL

ATM proporciona molts tipus de serveis que es classifiquen segons tres paràmetres: sincronisme entre els extrems de la connexió, tipus de velocitat de transmissió i mode de connexió. A partir d'aquí podem definir quatre classes:

- **Classe A.** Servei orientat a connexió, amb velocitat d'accés constant i relació sincronitzada entre usuaris (emula un circuit PDH). Aquest trànsit el genera la telefonia sense comprimir.
- **Classe B.** Servei orientat a connexió amb velocitat d'accés variable. Adequat per a aplicacions en temps real que necessiten sincronisme però en les quals no cal velocitat constant (videoconferències amb vídeo comprimit).
- **Classe C.** Servei orientat a connexió amb velocitat d'accés variable, no basada en el temps, per tant per dades, en què no importa el retard, com per exemple TCP/IP.
- **Classe D.** Servei no orientat a connexió semblant al datagrama de les xarxes de paquets. Accepta trames que poden arribar a la destinació sense necessitat d'establir una connexió prèviament.

	Classe A	Classe B	Classe C	Classe D
Relació d'usuaris	Sincronitzada		No sincronitzada	
Velocitat d'accés	Constant	Variable		
Mode de connexió	Orientat a connexió			Sense connexió

Per poder oferir aquests serveis ATM defineix cinc tipus de nivells d'adaptació en funció del tipus de trànsit que ha d'enviar-se:

- **AAL 1.** Està dissenyada per al trànsit de veu. La veu és molt tolerant amb els errors i per tant no hi ha correcció d'errors. És molt important que els paquets arribin ordenats i per això hi ha camps de número de seqüència.
- **AAL 2.** Està pensada per transmissió de vídeo. Necessita control d'errors ja que el vídeo no tolera tant els errors com la veu.
- **AAL 3.** Dissenyada per a aplicacions de transmissió de dades orientada a connexió.
- **AAL 4.** Per a transmissions sense connexió. L'estructura és molt similar a AAL 3 i habitualment es combinen.

- **AAL 5.** Semblant a AAL 3/4 però amb menys capçalera, ja que suposa que el medi no té errors i el control el passa a nivells superiors. Aconsegueix alliberar fins a 4 bits més pel *payload*.

Classe	AAL	Característiques	Exemples
A	1	Velocitat constant, origen i destinació intercanvien informació de sincronisme, els errors es detecten però no es recuperen.	Circuits punt a punt Telefonia Imatges
B	2	Transferència d'informació generada a velocitat variable, però sincronitzada, els errors es detecten però no es recuperen.	Vídeo per demanda Difusió de TV
C i D	3/4	Per dades sensibles a les pèrdues de cel·les, però no al retard. Són dues AAL diferents però es combinen.	Frame Relay TCP/IP WWW
C i D	5	És una millora del tipus 3/4 que redueix la capçalera a cada cel·la i millora la detecció d'errors.	LAN emulation Internet

4.5. Gestió del trànsit

Com hem comentat anteriorment, l'usuari accedeix a la xarxa de banda ampla a través de la interfície UNI. L'usuari ha de contractar una connexió, la qual cosa significa que la xarxa ha d'establir un camí, i el més important és que aquest camí ha de complir uns determinats paràmetres de qualitat (QoS), com cabal o retard.

En qualsevol cas, la xarxa disposa d'uns mecanismes de control que han de servir per a efectuar el control dels recursos que l'usuari utilitza. La xarxa ofereix una restricció sobre el cabal que l'usuari genera. Si el volum de dades supera un cert llindar, es desbordarà. No obstant això, admet una certa tolerància o certes ràfegues.

Exemple

Un equip pot sol·licitar a la xarxa una velocitat mitjana de 3 Mbit/s, amb un retard de 10 mseg, o també podria afegir en la petició la possibilitat de transmetre pics de 100 Mbit/s amb una durada màxima d'1 mseg.

4.5.1. Definició de paràmetres de contracte de trànsit

Per a poder comprendre com es contracta una determinada qualitat de servei en una xarxa ATM, hem de definir els paràmetres que utilitza ATM amb aquest objectiu. No tots aquests paràmetres es contracten, depèn del servei que desitgem.

Els paràmetres de trànsit són els següents:

- **PCR** (*peak cell rate*), velocitat màxima de transmissió d'una connexió.
- **SCR** (*sustainable cell rate*), velocitat mitjana sostinguda.
- **MBS** (*maximum burst size*), grandària de la ràfega que pot transmetre una connexió ATM.

- **MCR** (*minimum cell rate*), velocitat mínima que la xarxa ha de garantir.

Es defineixen els **descriptors de trànsit** com el conjunt de paràmetres que permeten descriure un perfil de trànsit en funció d'un conjunt de valors, com l'SCR, el PCR, etc. El conjunt de paràmetres varia en funció del tipus de connexió contractada.

Hi ha, a més, els paràmetres de QoS, que ens indiquen quina és la garantia de poder fer la transmissió correctament. Són els següents:

- **CDV** (*cell delay variation*). Defineix la variació del retard màxim de recepció de dues cel·les ATM consecutives.
- **CTD** (*cell transfer delay*). És el màxim retard fix de transferència de cel·les extrem/extrem.
- **CLR** (*cell loss ratio*). És la relació de cel·les perdudes respecte del total de cel·les transmeses.

Un tercer tipus de paràmetres que s'ha d'especificar és el de la **categoria de servei** que es vol utilitzar. ATM defineix quatre categories de servei, cadascuna correspon a una de les classes de servei (A, B, C i D):

- **CBR** (*constant bit rate*). Són serveis de taxa constant entre emissor i receptor. Correspon a la classe de servei A.
- **VBR** (*variable bit rate*). Són serveis de taxa variable. Cal definir-los un retard màxim entre emissor i receptor. Correspon a la classe de servei B.
- **UBR** (*unspecified bit rate*). Per a trànsits d'aplicacions que no són en temps real i que no necessiten qualitat de servei. Correspon a la classe C.
- **ABR** (*available bit rate*). Són serveis de taxa disponible. Milloren els serveis que ofereix UBR gràcies a informació de xarxa sobre la base del coneixement del cabal instantani disponible. Correspon a la classe C.

4.5.2. Control de congestió

El control de congestió ATM permet als operadors de xarxa portar el màxim de trànsit possible sense afectar la qualitat de servei demandada pels usuaris.

Si una nova connexió és acceptada, la xarxa ATM proporcionarà la qualitat de servei demandada sense afectar la qualitat de servei de les altres connexions existents. Això s'aconsegueix amb el control de congestió i els algorismes organitzadors de planificació, que permeten als commutadors ATM decidir en quin ordre són commutades les cel·les.

El control de congestió pot ser **preventiu o reactiu**:

1) En el cas **preventiu**, com el nom indica, s'intenta preveure la congestió de xarxa abans que es produeixi. Això es fa mitjançant algorismes de control d'admissió de connexió CAC. El CAC decideix si accepta o no una nova connexió. Si l'accepta, llavors la política CAC gestiona la quantitat de dades que són transmises en cada connexió.

CAC és la sigla de *connexion admission control*.

2) En el control **reactiu**, el control de congestió es gestiona regulant quan transmet el dispositiu remot per mitjà dels missatges de resposta.

4.5.3. Control de congestió preventiu

El CAC s'executa pel que fa a la connexió i el que fa és determinar si accepta o no una nova connexió. Un cop ha estat acceptada, l'amplada de banda necessari s'ha d'assegurar que es manté dintre dels paràmetres de trànsit negociats.

Ho veurem amb un cas concret. Suposem que un dispositiu origen vol establir una connexió amb un dispositiu de destinació. Per a fer-ho, s'estableix un circuit virtual SVC entre els dos dispositius mitjançant un missatge d'establiment. Aquest missatge d'establiment conté diferents tipus d'informació, entre els quals es troben valors de trànsit i paràmetres de qualitat de servei. Aquesta informació l'usen els diversos nodes intermedis dintre de la ruta per a decidir si s'ha d'acceptar la connexió o ha de ser refusada. Aquesta decisió es pren en funció de dues preguntes:

- La nova connexió afectarà la qualitat de servei de les connexions existents suportades pel node?
- Pot el node proporcionar la qualitat de servei que demanda la nova connexió?

Cada node en la ruta de la nova connexió decideix de manera independent dels altres nodes si disposa de suficient amplada de banda per a proporcionar la qualitat de servei sol·licitada per la connexió. Aquest procés es fa mitjançant l'algorisme CAC.

Els algorismes CAC es poden classificar en dos tipus:

1) **Assignació de trànsit no estadística** (*nonstatistical bandwidth allocation*) o PCR. Aquest tipus d'assignació s'usa per a connexions que demanden serveis CBR. En aquest cas, l'algorisme CAC és molt senzill, ja que la decisió d'acceptar o refusar una nova connexió es basa només a veure si la velocitat màxima de transmissió (PCR) és més petita que l'amplada de banda disponible de la línia.

PCR és la sigla de *peak cell rate*.

En el cas en què s'usa l'assignació no estadística per a totes les connexions encaminades a través d'una línia, la suma dels PCR de totes les connexions és més petita que la capacitat de la línia. Aquesta solució pot portar a una utilit-

zació baixa de la línia, tret que les connexions transmetin constantment la màxima velocitat de transmissió (PCR).

2) **Assignació d'amplada de banda estadística** (*statistical bandwidth allocation*). En aquest cas l'assignació d'amplada de banda a la sortida de la línia és més petita que la taxa de pic de la font. En el cas en què l'assignació estadística s'utilitzi per a totes les connexions a la línia, la suma de les taxes de pic de totes les connexions pot excedir la capacitat de la línia. L'assignació estadística té sentit des del punt de vista econòmic quan es tracta de fonts a ràfegues, però en canvi és complicat implementar-ho de manera efectiva. Això es deu al fet que no sempre és possible caracteritzar de manera acurada el trànsit generat per la font.

La majoria dels algorismes CAC proposats estan basats en el paràmetre de qualitat de servei de taxa de cel·les perdudes. La decisió d'acceptar o refusar una nova connexió es basa a veure si el commutador pot proporcionar una nova connexió amb la taxa de cel·les perdudes demandada sense afectar la taxa de cel·les perdudes de les connexions ja existents.

Mecanismes de decisió en el descart de paquets

El mecanisme s'anomena *etiquetatge de violació* (*violation tagging*), i el que intenta és portar les cel·les que no compleixen els requisits si hi ha prou capacitat a la xarxa. Les cel·les que violen les normes són etiquetades en l'UNI i llavors es permet que entrin a la xarxa. Si la congestió augmenta dintre de la xarxa, les cel·les etiquetades són eliminades. L'etiquetatge es fa mitjançant CPL dintre de la capçalera ATM. Quan no està etiquetat, $CPL = 0$, i quan està etiquetat, $CPL = 1$.

CPL és la sigla de *cell loss priority*.

Un cop tenim els dos tipus de cel·les cal veure com són tractades. Hi ha dos mecanismes basats en prioritats:

- **Push-out scheme:** en aquest cas els dos tipus de cel·les accedeixen a la cua del commutador sempre que no estigui plena. Si una cel·la etiquetada arriba durant el període en què el commutador està ple, llavors es descarta. En cas que sigui una cel·la no etiquetada la que arriba en un període en què la cua està plena, llavors es descarta l'última cel·la etiquetada que estigui en cua i es posa la cel·la no etiquetada en el seu lloc. La cel·la no etiquetada es descartarà en el cas que la cua estigui plena de cel·les no etiquetades.
- **Threshold scheme:** en aquest esquema el que es fa és permetre tots dos tipus de cel·les mentre no s'arribi al llindar. Un cop estiguem per sobre del llindar, només s'acceptaran cel·les no etiquetades.

El primer esquema és més eficient, encara que es prefereix el segon per la simplicitat d'implementació.

4.5.4. Control de congestió reactiu

Conceptualment el que fa el control de congestió reactiu és permetre que la font transmeti sense cap reserva ni política d'amplada de banda i prendre accions només quan es produeixi la congestió. La xarxa en aquest cas ha d'estar contínuament monitorada. Quan es comença a detectar congestió s'envia un missatge a les fonts perquè redueixin la transmissió, o fins i tot es pot indicar que parin l'enviament. Un cop es vagi descongestionant la xarxa es tornarà a informar a les fonts perquè vagin incrementant les taxes de transmissió. El mètode més senzill de mesurar la congestió és mirant l'ocupació de les cues de sortida dels commutadors més crítics.

L'única categoria de servei estandarditzada que usa el control de congestió reactiu és ABR.

ABR és la sigla de available bit rate.

ABR és un mecanisme basat en la realimentació, pel qual la font emissora pot transmetre més durant els períodes de temps que la xarxa va menys carregada. En l'establiment, l'emissor sol·licita una taxa de cel·les mínima (MCR). També especifica una taxa de cel·les màxima (PCR). La xarxa accepta la nova connexió si pot satisfer la demanda d'MCR. En cas que la xarxa no utilitzi tota l'amplada de banda, la taxa de transmissió de la font pot excedir l'MCR. Quan es comença a produir congestió es demana a la font que redueixi la taxa de transmissió. El que no es farà és baixar la taxa per sota del valor d'MCR. ABR, com sabeu, no està destinat a aplicacions en temps real.

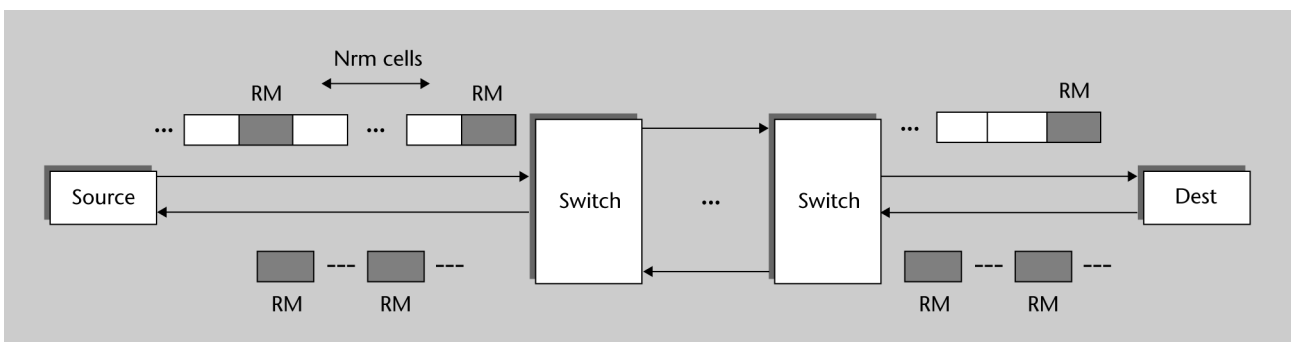
MCR és la sigla de minimum cell rate.

Així, com ja s'ha explicat, la font emissora incrementarà o reduirà la seva taxa de transmissió en funció dels missatges que rebí de la xarxa.

El mecanisme per mitjà del qual la xarxa informa a la font perquè canviï la taxa de transmissió està implementat mitjançant les cel·les RM. Aquestes cel·les es diferencien de la resta, ja que porten l'indicador de tipus de càrrega (PTI) amb un valor de 110.

RM és la sigla de resource management.

Figura 45. Mecanisme ABR




5. Multiprotocol label switching

El Multiprotocol Label Switching (MPLS) és un mecanisme de transport de dades estàndard creat per la IETF i definit al RFC 3031.

La indústria ha estat buscant una solució que combini les millors característiques d'IP i ATM. Això ha conduït a MPLS. El desenvolupament d'MPLS en les xarxes dels operadors d'Internet és possible ja que és transparent per a l'usuari. D'altra banda, té grans conseqüències per a l'arquitectura. MPLS ha canviat el model de commutació unicast basat en la destinació, que s'havia mantingut pràcticament inalterable des del principi d'Internet. A la vegada, també ha impactat en l'arquitectura d'encaminament fent que els protocols d'encaminament executin noves i més complexes tasques.

Així, MPLS és una xarxa privada IP que combina la flexibilitat de les comunicacions punt a punt o internet i la fiabilitat, qualitat i seguretat de les línies privades, Frame Relay o ATM.

5.1. Problemes experimentats pels proveïdors de servei

Veiem primer quins problemes de les xarxes actuals han fet plantejar a les operadores la cerca d'una nova tecnologia: 

- IP i ATM són dues tecnologies desenvolupades de forma separada sense nexes d'unió. Els *switchs* ATM s'encarreguen de moure trànsit en funció dels VCI/VPI dels quals els encaminadors d'accés (en els POP) no tenen coneixement. El mateix passa a la inversa. Els encaminadors fan l'encaminament sense tenir en compte els *switchs* (són transparents per a l'encaminador).
- Escalabilitat. Per a tenir màxima redundància i encaminament òptim cal crear una topologia de circuits virtuals *full mesh*. Això crea un problema d'escalabilitat.
- *Traffic engineering*. TE és el procés pel qual el trànsit es fa òptim per a seguir certs camins basat en requeriments específics. ATM disposa de moltes característiques per a TE. IP també en té alguna. El problema és que en tenir dues tecnologies totalment separades resulta complicat combinar-les per tenir TE extrem a extrem.
- QoS. Passa el mateix que en el cas anterior. Totes dues tecnologies disposen de mecanismes per a proporcionar QoS, però resulta complicat combinar-les.

5.2. Què és MPLS?

MPLS és un mètode d'encaminament de paquets a través de la xarxa que usa per a fer-ho etiquetes inserides en el paquet IP.

Les etiquetes s'insereixen entre la capçalera de nivell 2 i 3 en tecnologies basades en trames i estan contingudes en el VPI/VCI en les tecnologies basades en cel·les.

MPLS combina commutació de nivell 2 i encaminament de nivell 3.

Amb commutació d'etiquetes l'anàlisi de la capçalera nivell 3 es fa només un cop, en ingressar a la xarxa MPLS. En aquest punt, la capçalera nivell 3 és mapejada en una etiqueta de longitud fixa.

5.3. Beneficis d'MPLS

La commutació basada en etiquetes permet als encaminadors i als *switchs* ATM-MPLS prendre decisions d'enviament basades en una senzilla etiqueta en comptes de fer una cerca de ruta basada en la IP destinació. El beneficis que aporta a la xarxa IP són els següents:

- VPN. Els proveïdors poden crear VPN nivell 3 a través del seu *backbone* de xarxa per a diferents clients, usant la mateixa infraestructura sense necessitat d'enciptació i aplicacions d'usuari.
- *Traffic engineering*. Permet optimitzar la utilització de l'amplada de banda de la xarxa i optimitzar els camins.
- QoS. Possibilita aprofitar les característiques de QoS d'IP i ATM.
- Integra IP i ATM.

5.4. Característiques d'MPLS

MPLS ofereix nivells de rendiment diferenciats i prioritització del trànsit, i també aplicacions de veu i multimèdia. Les característiques més importants són:

- MPLS aprofita els avantatges d'ATM, però sense els seus inconvenients.
- Assigna als datagrames de cada flux una etiqueta única que permet una commutació ràpida als encaminadors intermedis (només es mira l'etiqueta i no l'adreça destí).
- Les principals aplicacions són:

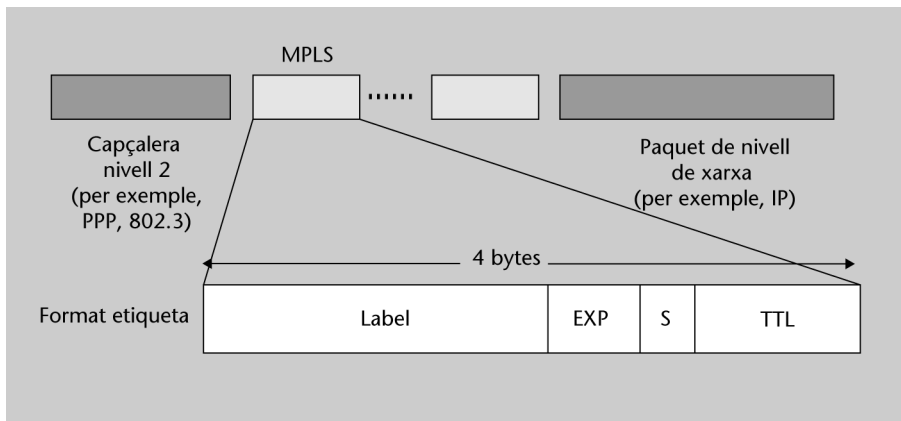
- Funcions d'enginyeria de trànsit (als fluxos de cada usuari se'ls associa una etiqueta diferent).
- Polítiques d'encaminament.
- Servei de VPN.
- Serveis que requereixen QoS.
- MPLS es basa en l'etiquetatge dels paquets d'acord amb criteris de prioritat o qualitat de servei.
- MPLS basa la commutació dels paquets o datagrames en funció de les etiquetes afegides a la capa 2 i etiqueta aquests paquets segons la classificació establerta per la qualitat de servei a l'SLA.
- MPLS és una tecnologia que permet oferir QoS, independentment de la xarxa sobre la que s'implanti.
- L'etiquetatge a la capa 2 permet oferir serveis multiprotocol i ser portable sobre multitud de tecnologies de capa d'enllaç: ATM, Frame Relay, línies dedicades o LANs.

Per a poder crear els circuits virtuals com a ATM, es va pensar a afegir etiquetes als paquets. Aquestes etiquetes defineixen el circuit virtual per a tota la xarxa.

5.5. Pila d'etiquetes MPLS (MPLS label stack)

MPLS, per tant, apareix inicialment com una tecnologia que permet "enganxar" ATM i IP. La pila d'etiquetes MPLS té quatre octets i és com la de la figura 46.

Figura 46. Etiqueta MPLS



Els camps que es mostren en la figura 23 són:

- **Label:** té l'etiqueta i és de 20 bits.
- **Experimental (EXP):** tres bits i serveix per a fer un mapatge al camp ToS d'IP en el camp EXP per a MPLS CoS.
- **S:** MPLS permet incorporar més d'una etiqueta.
- **TTL:** temps de vida del paquet.

5.5.1. Capçalera inserida (*shim header*)

Un cop hem vist com és l'etiqueta cal saber on va. L'etiqueta s'incrusta entre la capçalera de nivell 2 i la capçalera de nivell 3. Com es veu, l'etiqueta MPLS va abans de la capçalera IP, de manera que els encaminadors poden commutar en funció de l'etiqueta en comptes de la capçalera IP.

5.5.2. *Forwarding equivalence class* (FEC)

Conjunt de paquets de nivell 3 que són reenviats de la mateixa manera pel mateix camí i amb el mateix tractament en l'enviament.

Exemples de FEC

Alguns exemples de FEC poden ser:

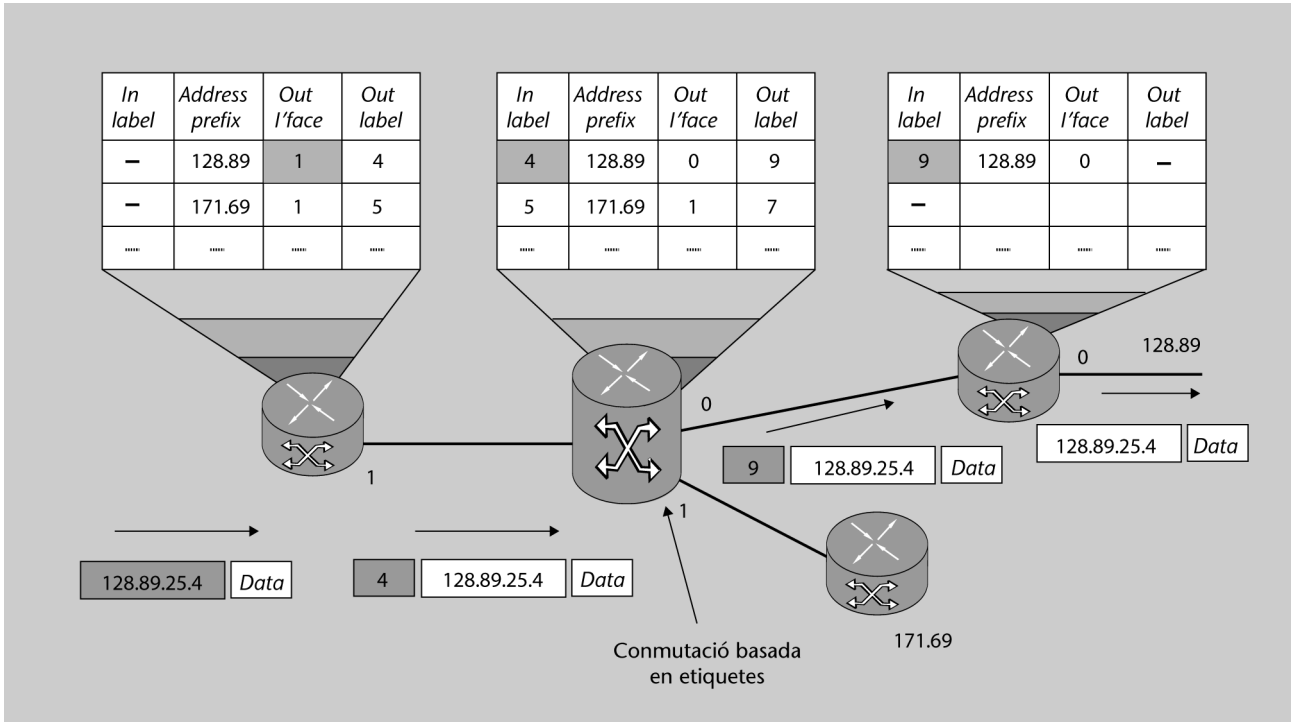
- Paquets de nivell 3 que tenen cert prefix de xarxa.
- Paquets de nivell 3 que van a una destinació concreta.

5.6. Arquitectura MPLS

L'arquitectura MPLS està formada per dos plànols:

- **Control.** El plànol de control és responsable d'unir una etiqueta a les rutes de la xarxa (FEC) i redistribuir aquesta unió als altres encaminadors MPLS. Com que estem dient que s'uneix l'etiqueta a una ruta de xarxa cal que l'encaminador tingui una taula d'encaminament. Per a redistribuir les etiquetes el protocol bàsic és LDP (*label distribution protocol*). El LIB (*label information base*) és un mapatge d'etiquetes d'entrada amb etiquetes de sortida, juntament amb interfície de sortida i informació de la línia. Com s'ha comentat anteriorment el FEC (*forwarding equivalence class*) és un grup de paquets IP que són tractats de la mateixa manera. Per exemple, una subxarxa destinació pot correspondre a un FEC. FEC està basat en diversos criteris, com poden ser IP ToS bits, números de port, etc.
- **Encaminament (*forwarding*).** Un encaminador MPLS commuta els paquets IP en comptes d'encaminar-los. Així, la taula LIB es construeix en el plànol de control i només aquelles etiquetes en ús resideixen en *label forwarding information base* (LFIB). Per tant, LFIB és un subconjunt de LIB. Un altre component del plànol de *forwarding* és la taula *forwarding information base* (FIB). La crea Cisco quan usa *Cisco express forwarding* (CEF).

Figura 47. Commutació MPLS

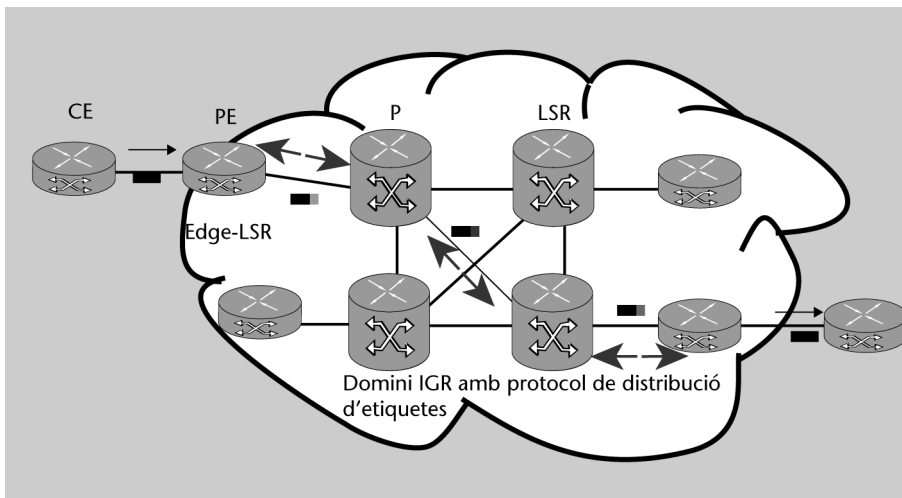


5.7. Components de xarxa MPLS

Els components de xarxa MPLS són els següents (figura 48):

- **CE (customer edge)**. Encaminador que connecta la xarxa d'usuari amb el proveïdor de servei
- **PE (provider edge)**. Encaminador de l'operadora que connecta a l'usuari amb la xarxa del proveïdor.
- **P (provider)**. Equip que està en la xarxa del proveïdor i que només està connectat amb altres equips de l'operadora.

Figura 48. Components de la xarxa MPLS



Els equips PE i P són *label switch routers* (LSR). Es poden distingir dos tipus d'LSR:

- **LSR** és un encaminador/*switch* que és capaç de commutar paquets basat en etiquetes. El CE no és un equip LSR.
- **Edge-LSR**. Terme més específic per als encaminadors PE. En el cas de les xarxes MPLS és l'equip que agafa trànsit IP no etiquetat i posa una etiqueta per a enviar-lo al següent LSR. També fa el procés invers. Quan rep un paquet d'un LSR treu l'etiqueta abans d'enviar-lo al següent node de la xarxa IP.
- **Label switched path (LSP)**. És el conjunt d'LSR que el paquet ha de seguir en el seu flux cap a la destinació.

LSP són adequats usant diversos protocols en funció dels diversos mòduls de control necessaris: LDP, *resource reservation protocol amb traffic engineering extensions* (RSVP-TE), *constraint-based routed LDP* (CR-LDP) o extensions de protocols d'encaminament com *multiprotocol BGP*.

L'LSP pot ser considerat el camí sobre un conjunt d'LSR que els paquets que pertanyen a cert FEC usen en el seu viatge per a obtenir la seva destinació.

5.7.1. Establiment de l'LSP

L'establiment de l'LSP es pot fer de dues maneres:

- Amb control independent.
- Amb control per ordre.

Tots dos mètodes tenen els seus avantatges i inconvenients. El control independent permet una convergència més ràpida, mentre que el control per ordre permet una capacitat més gran de prevenció de bucles.

Establiment LSP amb control independent

En el mètode de control independent per a establir els LSP, cada LSR divideix els seus prefixos de destinació en FEC. Les etiquetes s'assignen a cada FEC, i la unió d'etiquetes és informada a cada veí LSR. Els LSR creen una LFIB fent un mapatge entre els FEC i els seus salts següents. L'LSR normalment corre un protocol d'encaminament unicast tipus OSPF, i usa la informació proporcionada per aquests per crear el mapatge FEC en el salt següent.

Després de crear la unió local, l'LSR distribueix informació de les unions locals als seus veïns LSR usant LDP o extensions d'un protocol d'encaminament modificat.

Quan un LSR adjacent rep informació d'una etiqueta d'unió d'un veí, examina la presència d'una unió local en els seus LFIB. Si hi ha unió local, actualitza

l'etiqueta de sortida per a aquella entrada amb el valor de la nova etiqueta rebuda. L'LSR té ara una entrada LFIB completa i preparada per a reenviar paquets.

La unió d'etiquetes es distribueix només entre encaminadors adjacents.

En casos com d'enginyeria de trànsit MPLS, la distribució d'informació basada en restriccions ha de ser executada en ordre per trobar els camins adequats a través de la xarxa. La informació de les restriccions ha de ser distribuïda de manera consistent a través de la xarxa MPLS.

Establiment LSP amb control per ordre

En el mètode de control per ordre per establir els LSP, els LSR *ingress o egress* inicien el procés. El que inicia fa la selecció de FEC, i tots els LSR a través de l'LSP usen el mateix FEC. El control per ordre de l'establiment LSP requereix que la unió d'etiquetes es propagui per tots els LSR abans que es puguin establir els LSP. Això fa que la convergència sigui més lenta. En canvi té una capacitat millor per a prevenir bucles.

Se sol usar el mode de control independent per a l'establiment en entorns basat en paquets i el mode de control per a ordre en ATM.

5.8. Protocol de distribució d'etiquetes (LDP)

El protocol de distribució d'etiquetes (LDP) s'usa conjuntament amb protocols d'encaminament de nivell 3 per a distribuir informació d'etiquetes entre els dispositius LSR en una xarxa commutada per etiquetes. LDP distribueix etiquetes entre veïns mitjançant el protocol TCP port 646.

LDP: *label distribution protocol.*

L'objectiu d'LDP és ajudar en l'establiment d'LSP usant una sèrie de procediments per a distribuir les etiquetes entre veïns LSR.

LDP proporciona un mecanisme per a descobrir els veïns i establir comunicació. Defineix quatre classes de missatges:

- **Descobriments (*discovery*).** Corren sobre UDP i usen missatges HELLO multicast per a aprendre sobre els veïns LSR que tenen directament connectats. Llavors estableixen una connexió TCP i una sessió LDP eventual. Les sessions LDP són bidireccionals. L'LSR a l'altre extrem pot informar o demanar informació d'unions de l'altre extrem de la connexió.
- **Adjacència (*adacency*).** Corre sobre TCP i proporciona inici de sessió, de manera que permet negociar certs paràmetres de funcionament entre veïns.
- **Informació d'etiquetes (*label advertisement*).** Proporciona informació de les etiquetes i el FEC corresponent.

- Notificació (*notification*). Permet enviar missatges d'avís per a informar bàsicament de problemes.

La distribució i assignació d'etiquetes amb LDP es pot executar de diferents modes:

- *Downstream-on-demand mode LDP*. Permet a l'LSR demanar de forma explícita al següent salt per a un FEC particular, l'etiqueta que cal unir a aquest FEC.
- *Unsolicited downstream mode LDP*. Permet a l'LSR distribuir una unió al veí LSR encara que aquest no l'hagi demanat explícitament.

Qualsevol dels dos modes poden ser usats en la mateixa xarxa simultàniament. Això es negocia entre LSR durant la fase d'inicialització (*initialization*).

Figura 49. Negociació LDP

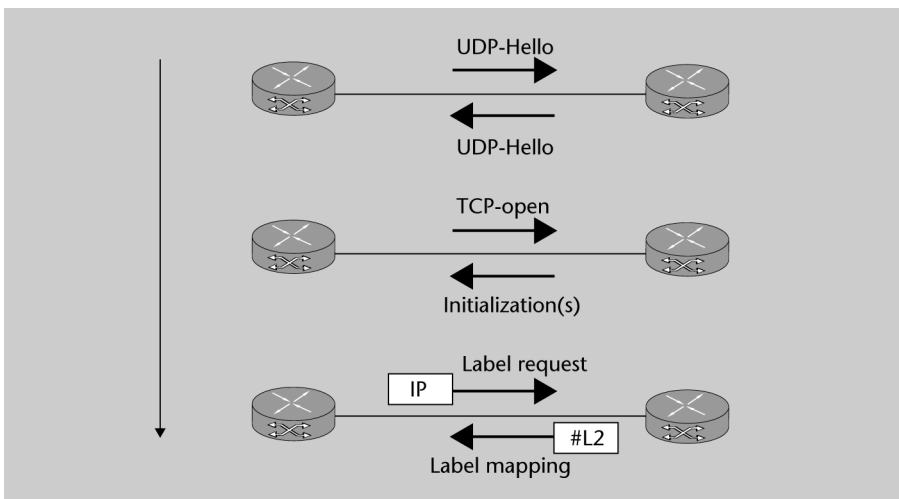
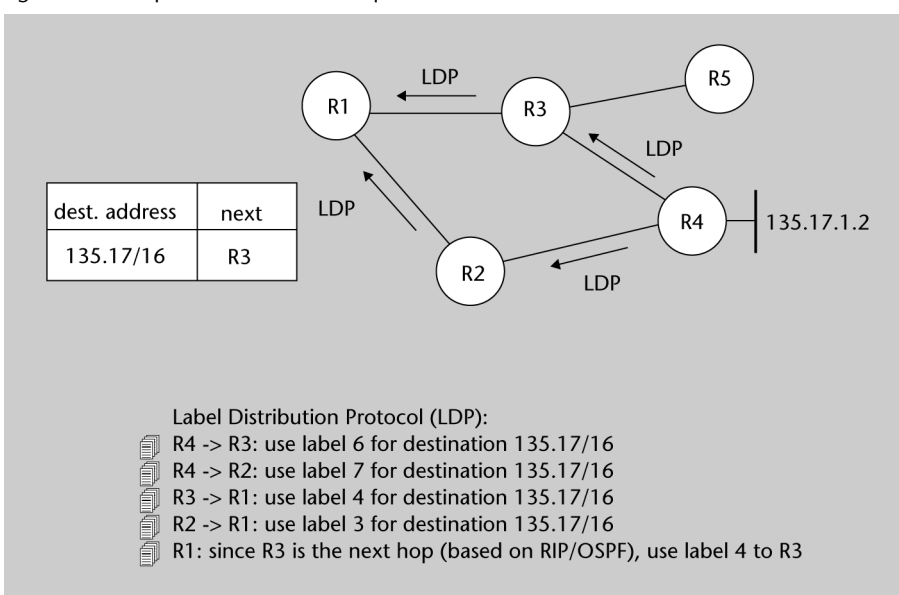


Figura 50. Exemple de distribució d'etiquetes

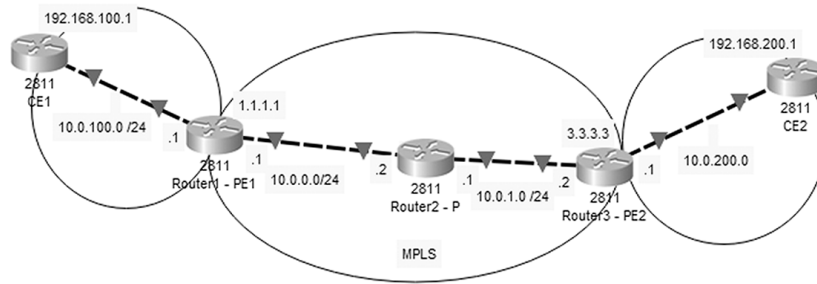


5.9. Exemple de topologia MPLS

A continuació, es mostra una topologia on tenim dues seus, CE1 i CE2, amb adreces 192.168.100.1 i 192.168.200.1 que es connecten mitjançant una xarxa MPLS. La xarxa MPLS està formada per dos encaminadors PE, Router1-PE1, que anomenarem R1, i Router3-PE2, que anomenarem R3, i un encaminador P, el Router2-P, que anomenarem R2. A la figura es mostren les adreces utilitzades per cadascuna de les xarxes. El que es vol és el següent:

- Mostrar la configuració bàsica.
- Taules de commutació MPLS.
- Captura de trànsit per a veure com s'insereixen i extreuen les etiquetes en els encaminadors PE i P.

Figura 51. Exemple de topologia de xarxa MPLS



El primer que es mostra és la configuració bàsica dels encaminadors:

Tenim les xarxes extrem connectades a CE1 i CE2, respectivament. Aquests dos encaminadors només tenen configurat l'enllaç fastEthernet que els connecta amb els PE, R1 i R3, respectivament, i una ruta per defecte. Per a simular la xarxa que es connecta al CE s'ha treballat amb adreces *loopback* en tots dos encaminadors.

Configuració bàsica dels encaminadors CE1 i CE2

Configuració CE1	Configuració CE2
<pre>hostname CE1 interface Loopback0 ip address 192.168.100.1 255.255.255.255 ! interface FastEthernet0/0 ip address 10.0.100.2 255.255.255.0 ! ip route 0.0.0.0 0.0.0.0 10.0.100.1</pre>	<pre>hostname CE2 interface Loopback0 ip address 192.168.200.1 255.255.255.255 ! interface FastEthernet0/0 ip address 10.0.200.2 255.255.255.0 ! ip route 0.0.0.0 0.0.0.0 10.0.200.1</pre>

A continuació, es mostra la configuració d'R1 i R3, que són els dos encaminadors PE. El més important d'aquestes configuracions rau en les interfícies fastEthernet, que connecten amb la xarxa MPLS. En aquest cas, mitjançant el

comandament *mpls ip*, s'indica que treballin amb etiquetes MPLS dinàmiques. Per altra banda, necessitem establir una sessió multiprotocol BGP entre R1 i R3, tal com es mostra a la configuració.

Configuració R1	Configuració R3
<pre>hostname R1 ! interface Loopback0 ip address 1.1.1.1 255.255.255.255 ! interface FastEthernet0/0 ip address 10.0.0.1 255.255.255.0 duplex auto speed auto mpls ip ! interface FastEthernet0/1 ip address 10.0.100.1 255.255.255.0 duplex auto speed auto ! router ospf 1 log-adjacency-changes network 1.1.1.1 0.0.0.0 area 0 network 10.0.0.0 0.0.0.255 area 0 ! router bgp 1 no synchronization bgp log-neighbor-changes network 10.0.100.0 mask 255.255.255.0 redistribute static neighbor 3.3.3.3 remote-as 1 neighbor 3.3.3.3 update-source Loopback0 no auto-summary ! ip route 192.168.100.0 255.255.255.0 10.0.100.2 !</pre>	<pre>hostname R3 ! interface Loopback0 ip address 3.3.3.3 255.255.255.255 ! interface FastEthernet0/0 ip address 10.0.1.3 255.255.255.0 duplex auto speed auto mpls ip ! interface FastEthernet0/1 ip address 10.0.200.1 255.255.255.0 duplex auto speed auto ! router ospf 1 log-adjacency-changes network 3.3.3.3 0.0.0.0 area 0 network 10.0.1.0 0.0.0.255 area 0 ! router bgp 1 no synchronization bgp log-neighbor-changes network 10.0.200.0 mask 255.255.255.0 redistribute static neighbor 1.1.1.1 remote-as 1 neighbor 1.1.1.1 update-source Loopback0 no auto-summary ! ip route 192.168.200.0 255.255.255.0 10.0.200.2 !</pre>

L'encaminador R2 treballa com a dispositiu de tipus P a la xarxa MPLS i, si ens hi fixem, la seva configuració és senzilla. De la mateixa manera que succeïa als encaminadors R1 i R3, cal activar *mpls ip* a les dues interfícies connectades.

```

Configuració R2
hostname R2
!
interface Loopback0
no ip address
!
interface FastEthernet0/0
ip address 10.0.0.2 255.255.255.0
duplex auto
speed auto
mpls ip
!
interface FastEthernet0/1
ip address 10.0.1.2 255.255.255.0
duplex auto
speed auto
mpls ip
!
router ospf 1
log-adjacency-changes
network 10.0.0.0 0.0.0.255 area 0
network 10.0.1.0 0.0.0.255 area 0
!

```

A la figura següent es mostren els *logs* en què es veu que el node R2 (encaminador de tipus P) s'ha enviat un missatge LDP amb els seus veïns un cop li hem indicat que treballi amb MPLS.

Figura 52.

```

R2(config-router)#mpls ldp autoconfig
R2(config-router)#
*Mar  1 00:08:04.499: %LDP-5-NBRCHG: LDP Neighbor 1.1.1.1:0 (1) is UP
R2(config-router)#
*Mar  1 00:08:22.887: %LDP-5-NBRCHG: LDP Neighbor 3.3.3.3:0 (2) is UP

```

A continuació, es mostren les taules de commutació dels tres nodes MPLS. R1 és un node PE. En aquest encaminador es veu que, per a accedir a la xarxa remota 3.3.3.3, posarà l'etiqueta 17 i enviarà el paquet a l'encaminador 10.0.0.2

Figura 53. Taula encaminador R1

```

R1#sh mpls forwarding-table
Local  Outgoing  Prefix          Bytes tag  Outgoing  Next Hop
tag    tag or VC  or Tunnel Id    switched   interface
16     17        3.3.3.3/32      0          Fa0/0     10.0.0.2
17     Pop tag    10.0.1.0/24     0          Fa0/0     10.0.0.2
18     Untagged  192.168.100.0/24 0          Fa0/1     10.0.100.2

```

L'encaminador R2 és un encaminador de tipus P. Tal com es pot observar a la figura següent, quan li arriba un paquet amb etiqueta 16, R2 commuta sense etiqueta, ja que la taula li indica que el salt següent és un encaminador PE i, en conseqüència, ja no cal que torni a etiquetar. El mateix passa amb els paquets amb etiqueta 17. Un cop rep el paquet amb etiqueta 17, el commuta per la interfície fa0/1 sense etiquetar ja que el node següent és un node PE. En

aquest cas passa això perquè si examinem la topologia només tenim un node P.

Figura 54. Taula encaminador R2

```
R2#sh mpls forwarding-table
Local  Outgoing  Prefix          Bytes tag  Outgoing  Next Hop
tag    tag or VC  or Tunnel Id    switched   interface
16     Pop tag    1.1.1.1/32      0          Fa0/0     10.0.0.1
17     Pop tag    3.3.3.3/32      126        Fa0/1     10.0.1.3
```

R3 és similar a R1. La figura següent ens mostra la taula d'encaminament. En aquest cas, si mirem la primera entrada de la taula, podem veure que R3 utilitza l'etiqueta 16 quan s'envien paquets al destí 1.1.1.1.

Figura 55. Taula encaminador R3

```
R3#sh mpls forwarding-table
Local  Outgoing  Prefix          Bytes tag  Outgoing  Next Hop
tag    tag or VC  or Tunnel Id    switched   interface
16     16         1.1.1.1/32      0          Fa0/0     10.0.1.2
17     Pop tag    10.0.0.0/24     0          Fa0/0     10.0.1.2
18     Untagged  192.168.200.0/24 0          Fa0/1     10.0.200.2
```

Finalment, fem servir el comandament *traceroute*. Aquest comandament ens va indicant tots els salts realitzats (encaminadors intermedis per on passa) des de l'origen fins al destí. Ens serveix per a comprovar el que s'ha explicat a les taules de commutació i veure com cada node va incorporant, modificant o extraient l'etiqueta MPLS.

Ho farem en dos casos:

1) entre R1 i l'adreça destí 3.3.3.3. Si ens hi fixem, per a arribar al destí fa dos salts. El primer va d'R1 (PE) fins a R2 (P) que, en ser a dins de la xarxa MPLS, incorpora l'etiqueta 17. El segon salt va d'R2 (P) fins a R3 (PE) i, en aquest cas, ja no cal etiquetar.

Figura 56. Traceroute entre R1 i l'adreça 3.3.3.3

```
R1#traceroute 3.3.3.3

Type escape sequence to abort.
Tracing the route to 3.3.3.3

 1 10.0.0.2 [MPLS: Label 17 Exp 0] 36 msec 20 msec 32 msec
 2 10.0.1.3 28 msec 44 msec 24 msec
```

2) En aquest segon cas es mostra el camí entre R3 i l'adreça *loopback* generada a R1 (1.1.1.1). Ara R3 etiqueta amb valor 16 quan envia el paquet a R2. En el segon salt, R2 envia el paquet a R1 sense etiquetar perquè sap que R1 és un encaminador PE.

Figura 57. Traceroute entre R3 i l'adreça 1.1.1.1

```

R3#traceroute 1.1.1.1

Type escape sequence to abort.
Tracing the route to 1.1.1.1

  1 10.0.1.2 [MPLS: Label 16 Exp 0] 28 msec 44 msec 24 msec
  2 10.0.0.1 24 msec 20 msec 24 msec

```

Per a veure com els paquets s'envien amb la capçalera MPLS i poder examinar-ne els diversos camps, realitzem un *ping* entre R1 i l'adreça *loopback* d'R3. En paral·lel, capturem amb un analitzador de protocols el trànsit que arriba a la interfície fastEthernet0/0 de l'encaminador R2.

La captura de l'analitzador de protocols es pot observar a la figura següent. La figura ens mostra que a l'encaminador R2 li arriba el paquet amb la capçalera MPLS que, com s'ha explicat, s'insereix entre la capçalera Ethernet i la capçalera IP. La capçalera en hexadecimal té el valor: 00 01 11 ff. Els 20 bits de més pes de la capçalera corresponen a l'etiqueta i serien: 00 01 1 (en hexadecimal), que passat a decimal és el número 17. Ens mostra també que els bits del camp Experimental estan a 0 i el temps de vida (TTL) està a 255.

Figura 58. Captura amb analitzador de protocols d'un paquet *ping* per a mostrar capçalera MPLS

```

▶ Frame 16: 118 bytes on wire (944 bits), 118 bytes captured (944 bits) on interface 0
▶ Ethernet II, Src: c2:01:f3:cc:00:00 (c2:01:f3:cc:00:00), Dst: c2:02:ed:b4:00:00 (c2:02:ed:b4:00:00)
▶ MultiProtocol Label Switching Header, Label: 17, Exp: 0, S: 1, TTL: 255
  0000 0000 0000 0001 0001 ..... = MPLS Label: 17
  ..... 000. .... = MPLS Experimental Bits: 0
  ..... 1 ..... = MPLS Bottom Of Label Stack: 1
  ..... 1111 1111 = MPLS TTL: 255
▶ Internet Protocol Version 4, Src: 10.0.0.1, Dst: 3.3.3.3
▶ Internet Control Message Protocol

0000  c2 02 ed b4 00 00 c2 01 f3 cc 00 00 88 47 00 01
0010  11 ff 45 00 00 64 00 00 00 00 ff 01 ab 92 0a 00
0020  00 01 03 03 03 03 08 00 61 ff 00 00 00 00 00 00
0030  00 00 00 3b 1c 10 ab cd ab cd ab cd ab cd ab cd
0040  ab cd ab cd ab cd ab cd ab cd ab cd ab cd ab cd
0050  ab cd ab cd ab cd ab cd ab cd ab cd ab cd ab cd
0060  ab cd ab cd ab cd ab cd ab cd ab cd ab cd ab cd
0070  ab cd ab cd ab cd

```

A continuació, fem un *ping* des d'R1 a la interfície *loopback* d'R3 i en paral·lel capturem el trànsit que passa per R2, tant a la interfície fa0/0 com a la interfície fa0/1.

Quan capturem a fa0/0 tenim el trànsit provinent d'R1 encapsulat, mentre que per fa0/1 sortirà el trànsit desencapsulat.

Figura 59. Captura de trànsit *ping* entre CE1 i CE2 a l'encaminador R2

```
* 20 17.851000 10.0.100.2 192.168.200.1 ICMP 118 Echo (ping) request id=0x0004, seq=0/0, ttl=254 (reply in 21)
* 21 17.902000 192.168.200.1 10.0.100.2 ICMP 114 Echo (ping) reply id=0x0004, seq=0/0, ttl=253 (request in 20)
  Frame 20: 118 bytes on wire (944 bits), 118 bytes captured (944 bits) on interface 0
  Ethernet II, Src: c2:01:f1:ec:00:00 (c2:01:f1:ec:00:00), Dst: c2:02:4c:f8:00:00 (c2:02:4c:f8:00:00)
  MultiProtocol Label Switching Header, Label: 17, Exp: 0, S: 1, TTL: 254
  Internet Protocol Version 4, Src: 10.0.100.2, Dst: 192.168.200.1
  Internet Control Message Protocol

  Frame 21: 114 bytes on wire (912 bits), 114 bytes captured (912 bits) on interface 0
  Ethernet II, Src: c2:02:4c:f8:00:00 (c2:02:4c:f8:00:00), Dst: c2:01:f1:ec:00:00 (c2:01:f1:ec:00:00)
  Internet Protocol Version 4, Src: 192.168.200.1, Dst: 10.0.100.2
  Internet Control Message Protocol
```

Annex

1. Xarxa digital de serveis integrats (XDSI)

El concepte de *xarxa digital de serveis integrats* sorgeix a mitjan dècada dels vuitanta. La ITU-T (en aquells moments CCITT), en les seves reunions de 1984 i 1988, defineix la XDSI com una xarxa basada en els aspectes següents:

- el compromís internacional;
- la substitució progressiva de la xarxa telefònica tradicional;
- el completament digital (extrem a extrem), i
- la integració de tots els serveis de telecomunicació presents i futurs.

Segons la ITU-T, la xarxa digital de serveis integrats es defineix com una xarxa evolucionada de la xarxa de telefonia digital integrada que permet la connexió digital extrem a extrem per a donar suport a una àmplia gamma de serveis, als quals els usuaris poden accedir mitjançant un conjunt limitat de terminals estàndard multipropòsit.

La XDSI defineix una arquitectura de protocols que només especifica els protocols de senyalització, com ara el protocol Q.921 i el Q.931, i els del nivell físic. No inclou cap protocol específic per al transport de dades d'usuari, ja que es pot utilitzar qualsevol dels protocols que ja existeixen.

La XDSI de banda estreta pretén integrar tots els serveis que proporcionen les xarxes actuals: veu, paquets, enllaços punt a punt,... però no les LAN, ni la televisió. Per poder interconnectar-hi els terminals actuals s'han dissenyat uns **adaptadors de terminal (TA)**.

Es pot establir una equivalència entre els nivells del model OSI i l'arquitectura XDSI, tal com es mostra en la figura 60:

- El nivell 1 defineix la interfície física dels accessos bàsic (I.430) i primari (I.431).
- En el nivell 2 el protocol que defineix les trames és el **LAPD (*link acces protocol D channel*)**. Està basat en la recomanació Q.921, que descriu els procediments que assegurin la comunicació sense errors sobre l'enllaç físic i defineix la connexió lògica entre l'usuari i la xarxa. En aquest nivell 2 di-

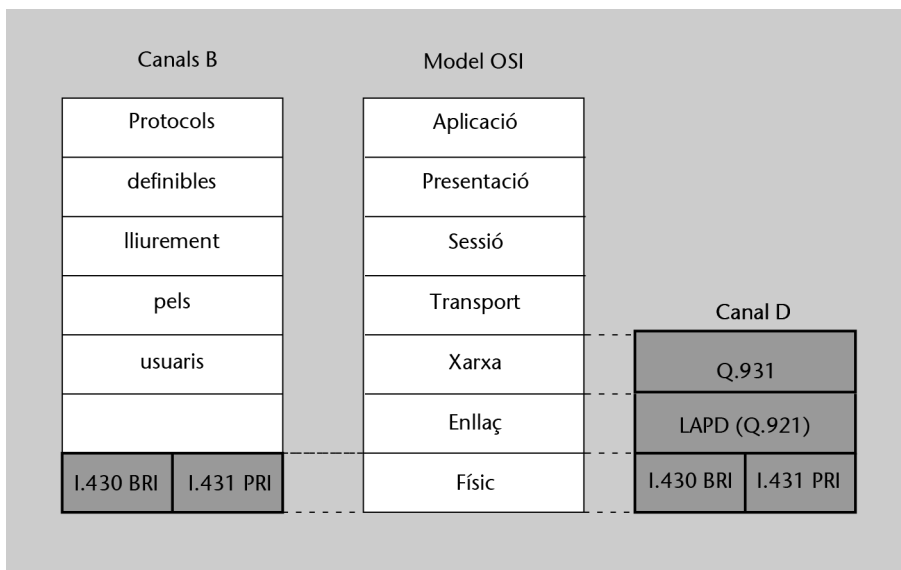
LAPD

El protocol d'accés a enllaç pel canal D (LAPD) és el protocol que descriu les trames en el nivell d'enllaç de dades.

ferenciem entre el canal de senyalització (canal D), i el de dades d'usuari (canal B). Tota transmissió pel canal D es fa amb trames LAPD, que s'intercanvien entre l'equip de l'abonat i el commutador XDSI, independentment del tipus d'informació.

- El protocol a nivell 3 està basat en la recomanació Q.931, que especifica els procediments per a establir, mantenir i finalitzar les connexions dels canals B, i la senyalització de control entre l'usuari i la xarxa sobre el canal D.

Figura 60. Equivalència entre els nivells del model OSI i l'arquitectura XDSI



1.1. Arquitectura de la XDSI

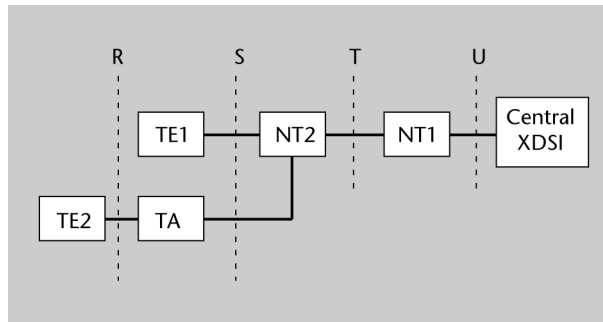
L'accés digital d'usuari a la XDSI permet connectar diferents tipus de terminals d'usuari a la xarxa mitjançant un accés digital normalitzat. Inclou les instal·lacions d'usuari i els equips i línies que uneixen l'usuari al node d'accés.

La XDSI defineix com és la configuració de la interfície entre usuari i xarxa (UNI, *user to network interface*) i l'estructura d'accés, és a dir, com la xarxa proporcionarà a l'usuari l'accés als diferents serveis. ⚠

La **configuració de referència** de l'accés d'usuari a la xarxa segons la ITU-T es basa en dos conceptes:

- **Grups funcionals**, o conjunt de funcions que calen per a accedir a la XDSI.
- **Punts de referència**, o interfícies de comunicació entre els diferents grups funcionals.

Figura 61. Configuració de referència de l'accés d'usuari a la XDSI



1.1.1. Grups funcionals

S'anomenen grups funcionals perquè no descriuen cap terminal específic, sinó un conjunt genèric d'equips amb les seves funcions i responsabilitats. Els grups funcionals definits per la recomanació I.411 de la ITU-T són els següents:

- **NT1** (terminació de xarxa 1). És a casa de l'abonat i constitueix la frontera entre la xarxa pública i la privada. La pot controlar el proveïdor d'XDSI. És el responsable de fer les funcions de baix nivell associades a la terminació física i elèctrica de la xarxa (nivell 1 d'OSI), com són: control del bucle local, alimentació de potència, multiplexatge de les connexions. Pot suportar múltiples dispositius: telèfon, ordinador, alarma, etc. multiplexats.
- **NT2** (terminació de xarxa 2). Equip d'usuari que realitza certes funcions de gestió interna del trànsit d'usuari i de l'accés a la xarxa pública (nivell 2 i 3 d'OSI), com són: senyalització dels terminals, multiplexatge dels canals de conversa i senyalització, commutació local, concentració del trànsit.
- **TE1** (equip terminal 1). Perifèric que integra els protocols XDSI i que, per tant, es pot connectar directament a les interfícies S i T. Per exemple, el telèfon digital, el tèlex a 64 kbits/s, el facsímil del grup 4 a 64 kbits/s.
- **TE2** (equip terminal 2). Perifèric que utilitza els actuals protocols i interfícies no adaptades a la XDSI. Es connecta al bus passiu de la XDSI mitjançant un adaptador de terminal a la interfície R.
- **AT** (adaptador de terminal). És l'equip que permet la connexió dels terminals NT2 (no XDSI) a la interfície S (XDSI). Realitza les funcions de conversió de protocols entre la interfície R i la S. Per exemple, acobla el telèfon analògic o un terminal de dades amb interfície V.24 o V.35.

Exemple d'equip NT2

Un exemple d'equip NT2 és una central de commutació, o PBX (*private branch exchange*), o les xarxes d'àrea local (LAN).

Exemple d'equip TE2


Un exemple d'equip TE2 és el telèfon analògic tradicional, els PC, els terminals de dades amb interfície V.24 o V.35.

1.1.2. Punts de referència

Els punts de referència són les interfícies de comunicació, que poden ser físiques o lògiques, entre els grups funcionals. La recomanació I.411 de la ITU-T defineix els punts de referència següents:

- **Punt de referència R**, tots els protocols o interfícies no compatibles de les sèries V i X, com el V.24, X.21, X.25, etc. Cada fabricant el podria definir a la seva mida. Està, per tant, entre l'adaptador de terminal, AT, i el dispositiu no compatible, TE2.
- **Punt de referència S**, punt d'accés universal a la XDSI, entre TE1 i NT2. Defineix el cabal i l'estructura de canals útils per a l'accés a la XDSI. Serveix per a qualsevol terminal i per a qualsevol servei. Pot coincidir, o incloure, el punt T. És un bus passiu a quatre fils d'1 km de longitud màxima i permet connectar fins a vuit terminals TE1 i AT, de manera que formin una petita xarxa local. La velocitat de la trama bàsica és de 192 kbits/s i la velocitat neta és de 144 kbits/s.
- **Punt de referència T**, interfície entre NT1 i NT2. Si no hi ha NT2 es considera idèntic a S i es parla del punt S/T. Fa les funcions d'alimentació, activació i desactivació de terminals, petició i permís per a accedir al canal de senyalització per a transmetre dades i la temporització de bits.
- **Punt de referència U**, l'utilitzat a la mateixa línia que connecta l'abonat amb la central local XDSI (bucle d'abonat). Adapta els senyals de la xarxa per enllaçar-los al bucle local, per tant, passa de dos a quatre fils.

1.2. Accés d'usuari a la XDSI

El mitjà pel qual es transmet la informació i que utilitzen els usuaris per interconnectar-se a la XDSI s'anomena **canal**. És una part de la capacitat de transmissió que té una interfície. Els canals es combinaran en estructures d'interfície que definiran la capacitat màxima de transmissió de la informació. 

La recomanació I.421 de la ITU-T estableix els tipus de canals següents:

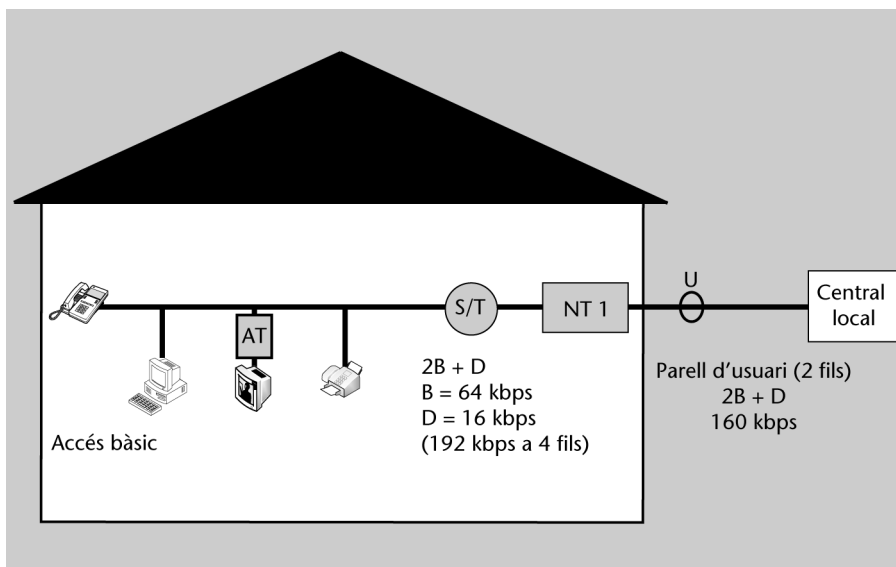
- **Canal B**. És l'anomenat canal d'usuari. És un canal *full-duplex* de 64 kbits/s que transporta informació entre els usuaris i no porta informació de senyalització.
- **Canal D**. És un canal *full-duplex* que treballa a 16 o 64 kbits/s que transporta la informació de senyalització entre l'usuari i la xarxa. Porta la senyalització per a controlar les trucades associades als canals B. Utilitza la

senyalització per canal comú, ja que s'utilitza un mateix canal per a enviar la informació de senyalització de tots els canals B multiplexada estadísticament sobre el mateix canal D. També es pot utilitzar per a transmetre informació d'usuari en forma de paquets a baixa velocitat.

Per tant, l'accés a la XDSI es fa en els punts de referència S i T, els quals s'han d'ajustar a unes estructures de transmissió que s'ofereixen a l'usuari com a paquet. Aquestes estructures són els accessos següents:

- **Accés bàsic (BRI).** Aquest tipus d'accés està format per dos canals B *full-duplex* de 64 kbits/s i un canal D *full-duplex* a 16 kbits/s (2B+D). La capacitat de l'accés és de 144 kbits/s ($2 \times 64 \text{ kbits/s} + 16 \text{ kbits/s}$), però cal afegir-hi els bits de control, manteniment i sincronisme que fan que la velocitat binària total en el punt S sigui de 192 kbits/s. Aquest servei el poden suportar la majoria de les línies d'abonat a dos fils que hi ha. Intenta satisfer les necessitats de la majoria d'usuaris particulars i petites oficines. Permet l'ús simultani de veu i diverses aplicacions de dades, com poden ser accés a commutació de paquets, servei d'alarma, facsímil, videotext, etc. Les especificacions de l'accés bàsic són a la recomanació I.430 de la ITU-T. ⚠

Figura 62. Accés bàsic (BRI) a la XDSI

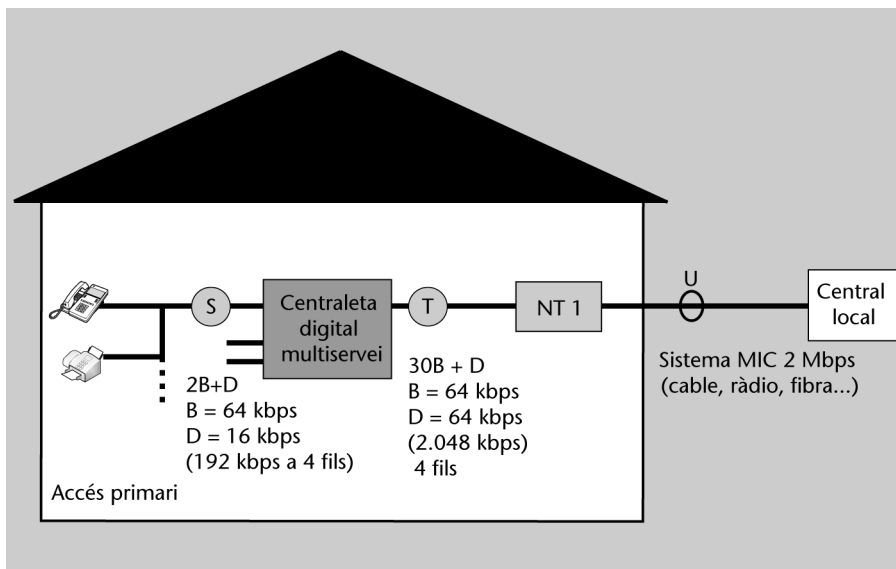


Per a la transmissió a través del canal B s'utilitza la multiplexació per divisió en el temps, on cada TE té assignat un interval temporal en la trama. En canvi, en el canal D tots els TE connectats comparteixen el trànsit, tant per a transmetre senyalització com per a transmetre dades en mode paquet.

- **Accés primari (PRI).** Està destinat a usuaris amb necessitats de més capacitat de transmissió, com ara oficines amb PBX, LAN o bases de dades. No hi ha acord en una única velocitat de transmissió de dades, ateses les diferents jerarquies de transmissió digital. A Europa la velocitat estàndard de l'accés pri-

mari és de 2,048 Mb/s de la trama E1. Està format per 30 canals B *full-duplex* de 64 kb/s i un canal D *full-duplex* de 64 kb/s (30B+D). Als EUA i al Japó és un accés 23B+D (T1), per tant a una velocitat d'1,544 Mb/s. Si l'usuari necessita menys velocitat és possible utilitzar estructures intermèdies (nB+D), que utilitzen canals H (múltiples de canals B). Les especificacions de l'accés primari són a la recomanació I.431 de la ITU-T. ⚡

Figura 63. Accés primari (PRI) a la XDSI



1.3. Protocols de la XDSI

1.3.1. Nivell físic

El protocol de nivell físic varia en les interfícies S i U. Està basat en les recomanacions I.430 (BRI) i I.431 (PRI) de la ITU-T. Descriu la connexió física entre l'equip terminal (TE) i el terminal de xarxa 2 (NT2), per tant, el punt de referència S/T. Defineix el connector, les característiques elèctriques, codificació de línia i entramat. És una connexió síncrona, sèrie i *full-duplex*. Els canals B i D són multiplexats en el temps sobre la mateixa línia en la mateixa trama, des de l'NT1 a casa de l'abonat fins a la central telefònica local.

L'accés bàsic és una línia d'usuari de dos fils acabada amb un NT1 amb 1 a 8 TE multiplexats. La trama consta del següent:

- 48 bits que es repeteixen cada 250 μ s;
- velocitat de transmissió binària de 192 kb/s;
- canal D format per 4 bits per trama distribuïts entre els canals B.

L'**accés primari** és un enllaç amb trenta-dos canals normalment cap a una PBX que fa les funcions d'NT1 i NT2. La trama consta del següent:

- trenta-dos canals de 64 kbits/s, trenta canals B, un canal D i un de sincronisme;
- velocitat de transmissió binària de 2,048 Mbits/s;
- canal D amb el mateix protocol que en l'accés bàsic però a més velocitat.

1.3.2. Nivell d'enllaç

Basat en la recomanació Q.921, el nivell d'enllaç descriu els procediments que assegurin la comunicació sense errors sobre l'enllaç físic i defineix la connexió lògica entre l'usuari i la xarxa. El protocol que defineix les trames és el **LAPD**.

Les seves funcions són les de qualsevol protocol de nivell 2 orientat a bit:

- Delimitació de les trames, alineació i transparència.
- Control de la seqüència per mitjà dels camps $N(s)$ i $N(r)$.
- Detecció i recuperació d'errors en la connexió de dades.
- Independent del flux de transmissió de bits del nivell 1.
- Control de flux.

El LAPD realitza dos tipus d'operacions:

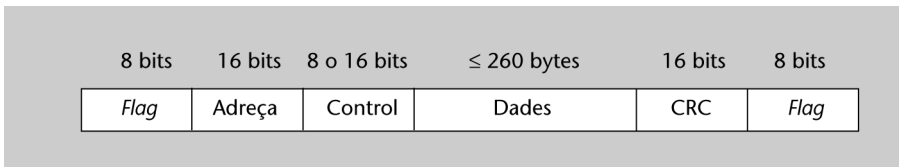
- **Operació sense reconeixement.** Permet transferir informació del nivell 3 amb trames no numerades (sense reconeixement). Aquest servei no garanteix que la informació arribi a la destinació, ni informa a l'emissor si la transmissió falla. No proporciona control d'errors ni de flux, només utilitza la detecció d'errors per a descartar trames errònies. S'utilitza per a la transmissió ràpida de dades (per exemple, alarmes).
- **Operació amb reconeixement.** En aquest cas s'estableix una connexió lògica entre dos usuaris abans de produir-se l'intercanvi de dades. La informació d'usuari es transmet amb trames amb una seqüència reconeguda. El protocol inclou control d'errors i de flux.

El format de trama dels dos tipus d'operacions és idèntic, amb excepció del camp d'adreçament.


Format de trama

Hi ha tres tipus de trames que suporten els dos tipus d'operacions indicades. Cada trama està delimitada al principi i al final amb dues *flags* de 8 bits. També inclou un camp per a la **correcció d'errors** (CRC). El camp d'**informació** conté les dades de nivell 3.

Figura 64. Estructura de la trama LAPD



Les característiques principals són en els camps d'adreça i de control:

- **Camp d'adreça.** Per a entendre l'adreçament cal tenir en compte que el LAPD utilitza dos nivells de multiplexatge: 
 - Nivell d'abonat: diversos dispositius d'usuari poden compartir la mateixa interfície física.
 - Nivell de dispositiu: a cada dispositiu d'usuari hi pot haver diferents tipus de trànsit (paquets, senyalització, etc.).

CRC

CRC són les sigles del codi de redundància cíclica utilitzat per a la detecció d'errors en la trama.

Per a tractar-los, el LAPD té el camp d'adreça format per dos identificadors:

- **Identificador de punt final de terminal (TEI):** identifica el terminal d'usuari. Normalment aquest valor l'assigna dinàmicament la XDSI quan rep una petició de connexió del terminal. Tots els terminals del mateix bus han de tenir un TEI diferent.
 - **Identificador de punt d'accés al servei (SAPI):** identifica el punt d'accés al servei per part de la xarxa i de l'usuari de la interfície UNI, i identifica el tipus de trànsit.
- **Camp de control.** Identifica el tipus de trama. N'hi ha de tres tipus:
 - **Trames d'informació (I).** S'utilitzen per a transmetre la informació del nivell de xarxa. S'utilitzen els camps de número de seqüència d'emissió i de recepció per a poder fer el control de les trames i de flux i mantenir l'ordre de les trames en l'enllaç de dades.
 - **Trames de supervisió (S).** S'utilitzen per a controlar l'estat de l'enllaç de dades. Fa funcions com ara senyalitzar la recepció d'una trama fora de seqüència, contestar trames d'informació rebudes, realitzar sondejos a l'altre extrem i respondre'ls. Ho són: *receiver ready* (RR), *receiver not ready* (RNR) i *reject* (REJ).

Adreça = TEI + SAPI

- **Trames no numerades (U).** S'utilitzen per a iniciar i tancar els canals lògics del nivell d'enllaç. Per exemple: connexió en mode sincronisme equilibrat (SABME), desconnexió (DISC), indicació de recepció (UA), etc.

1.3.3. Nivell de xarxa

En aquest nivell no es defineix cap protocol específic per a l'intercanvi de dades d'usuari, de manera que es pot utilitzar qualsevol tipus de protocol pel canal B com és l'IP. D'altra banda la recomanació Q.931 especifica els procediments per a establir, mantenir i finalitzar les connexions en els canals B i la senyalització de control d'usuari a usuari sobre el canal D. Per a això ha de dur a terme, entre altres funcions, el control de connexió de la xarxa, l'intercanvi d'informació entre l'usuari i la xarxa, el control de flux i congestió, la detecció i la recuperació d'errors, i el control de la trucada.

1.3.4. SS7 (sistema de senyalització núm. 7)

El sistema de senyalització per canal comú núm. 7 és un protocol de senyalització definit per la ITU-T que utilitzen les xarxes de telefonia públiques. Aquest sistema defineix els procediments per a inicialitzar i gestionar les trucades telefòniques a través d'una xarxa paral·lela a la xarxa de dades, de manera que la senyalització no hagi de viatjar per la mateixa xarxa per on es transmet la trucada telefònica, tant si és analògica com si és digital. Aquestes funcions les realitza intercanviant missatges entre els diferents components del sistema. El seu funcionament està optimitzat per canals dúplex de transmissió digital de 64 kbits/s.

Com que les funcions i requisits per a la xarxa de senyalització són lleugerament diferents en la interfície UNI i en els punts intermedis de la xarxa, l'arquitectura dels protocols de senyalització és diferent en la interfície UNI i en la NNI. En la interfície UNI s'utilitza el protocol Q.931, mentre que en la interfície NNI s'utilitza l'SS7.

Així, doncs, quan l'usuari vol fer una trucada, en la fase d'establiment de la connexió s'intercanviaran uns quants missatges Q.931 amb el node d'accés a la XDSI. Aquest node d'accés convertirà aquests missatges Q.931 en missatges SS7 que encaminarà per la XDSI cap al node de sortida.

1.4. Serveis de la XDSI

Les recomanacions de la sèrie I.200 de la ITU-T, conegudes com a capacitats de servei, classifiquen i descriuen els serveis que ha de permetre la XDSI. Es poden estructurar en tres categories:

1) **Serveis bàsics o portadors.** Els serveis portadors permeten l'accés a la xarxa bàsica i transferir informació entre usuaris a través d'una interfície normalitzada. N'hi ha de dos tipus:

a) **Commutació de circuits pel canal B.** Aquests serveis proporcionen els mitjans per a transmetre informació entre usuaris en temps real i sense alterar el contingut del missatge independentment del contingut i aplicació. El canal B s'utilitza per a la transmissió de les dades d'usuari d'extrem a extrem. Els usuaris poden utilitzar qualsevol protocol per a comunicar-se. Són serveis caracteritzats perquè tota la senyalització d'establiment, control i alliberament d'un canal digital s'efectua pel canal D. Els serveis estan estructurats en 8 kHz, això indica que, a més dels bits d'informació, es passa informació de rellotge a 8 kHz que delimita les dades en unitats de 8 bits.

b) **Commutació de paquets sobre canal B i D.** Aquests altres serveis portadors es caracteritzen per tenir funcions de tractament d'informació estructurada en paquets. La informació de senyalització d'establiment, control i alliberament d'un canal digital s'efectua tant pel canal D com pel canal B, subdividint-lo en diferents canals lògics. S'utilitza per a aquelles aplicacions a les quals no els afecti el retard, com seria la transferència de fitxers.

2) **Teleserveis o serveis de valor afegit.** Són serveis que utilitzen els serveis portadors i implementen nivells superiors. S'ofereixen en la interfície usuari terminal i no a S/T. Els poden oferir tant les operadores com terceres companyies. La recomanació I.212 defineix alguns d'aquests serveis, com són el videotext, el facsímil, la telefonia digitalitzada, etc.

3) **Serveis suplementaris.** Aquests serveis modifiquen o complementen un determinat servei de valor afegit per tal que ofereixi altres funcions que ja té la xarxa. Hi ha molts serveis suplementaris disponibles, entre els quals hi ha la identificació de la trucada entrant, la multiconferència, el redireccionament de trucades, la informació de tarifació, etc.

Resum

En aquest mòdul hem vist els conceptes bàsics de diferents sistemes de comunicacions que s'utilitzen actualment.

Hem començat veient diferents conceptes relacionats amb les xarxes de comunicacions, i més concretament les xarxes de gran abast, com són els tipus de commutació, centrant-nos en les xarxes de commutació de paquets o bé les tècniques d'encaminament.

En els punts següents hem tractat d'explicar les principals xarxes WAN que s'utilitzen actualment desenvolupades per ordre cronològic. D'aquesta manera hem començat mostrant el concepte de xarxa telefònica commutada i la seva evolució des de la xarxa de commutació de circuits analògica fins a l'actualitat, passant per la seva digitalització fins al bucle d'abonat, i acabant per la tecnologia sobre la mateixa línia d'abonat (xDSL).

Posteriorment hem exposat la xarxa de commutació de paquets més utilitzada actualment, el Frame Relay, i hem analitzat els protocols i la gestió que fa del trànsit.

S'ha explicat la xarxa ATM, un primer pas per a combinar la simplicitat de la commutació de circuits amb la flexibilitat de paquets, a la vegada que s'intenta ajustar la xarxa a les necessitats del trànsit en cada moment.

Pel que fa a la xarxa troncal de les operadores i internet, s'han explicat les característiques principals del protocol MPLS. S'ha justificat la motivació d'aquesta tecnologia i els elements clau per al seu funcionament.

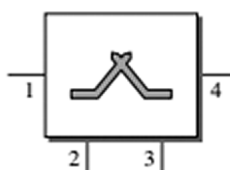
Activitats

- Esbrineu el funcionament dels protocols que s'utilitzen per al control de flux i d'errors en el nivell de l'enllaç de dades: parada i espera (*stop and wait*), *go back N*, ARQ amb repetició selectiva.
- Tenint en compte l'esquema de la xarxa de la figura 18, obteniu les taules d'encaminament corresponents als nodes 4, 5 i 6, aplicant el criteri del camí més curt i tenint en compte les taules dels altres tres nodes.
- Tenint en compte les característiques de la trama E1, descrites a la recomanació ITU-T G.732, comproveu que la velocitat de transmissió del sistema és de 2.048 kbits/s.
- Expliqueu els diferents tipus d'accés d'usuari a la XDSI que hi ha i quins canals utilitza.
- Expliqueu les principals diferències en el nivell d'enllaç entre X.25 i Frame Relay.
- Compareu la velocitat d'accés i el CIR en Frame Relay. Quina funció tenen en la gestió del trànsit?
- Busqueu quina és la funció del punter dins la capçalera de la cel·la ATM.
- Describeu els mecanismes de formació de les normes SONET i SDH. Expliqueu-ne la relació.
- Expliqueu el mecanisme d'identificació d'un circuit virtual a través d'una xarxa ATM.

Exercicis d'autoavaluació

- Segons la longitud del paquet hem observat que varia el temps necessari de transmissió. Volem calcular quina és la millor longitud del paquet per tal que la transmissió sigui el més ràpida possible si volem enviar un missatge de 48 bytes a través d'una xarxa de paquets. Suposem que entre el terminal origen i el de destinació els paquets travessen dos nodes, i que la capçalera de control és de 4 bytes. Calculeu quina diferència de temps hi hauria si es fessin servir paquets de 48 bytes de dades, de 16 bytes i de 6 bytes.
- Calculeu el temps de transmissió d'un missatge de $M = 128$ bytes a través d'un enllaç format per $N = 5$ nodes amb temps de propagació als enllaços $T_p = 5$ ms, i velocitat de transmissió dels nodes $v_t = 64$ kbits/s. Feu el càlcul per als dos models de xarxes que s'indiquen:
 - Una xarxa de commutació de circuits amb temps de commutació en els nodes negligible.
 - Una xarxa de commutació de paquets en mode datagrama.
 - Mida dels paquets, $P = 16$ bytes.
 - Temps d'espera a les cues negligible.
- A la figura següent es mostra una xarxa basada en circuit virtual:

Incoming		Outgoing	
Port	VCI	Port	VCI
1	14	3	22
2	71	4	41
2	92	1	45
3	58	2	43
3	78	2	70
4	56	3	11



Indica el port de sortida i el VCI per als paquets d'entrada següents:

- Paquet 1: 3, 78
- Paquet 2: 2, 92
- Paquet 3: 4, 56
- Paquet 4: 2, 72

On el primer número és el port d'entrada i el segon és el VCI d'entrada.

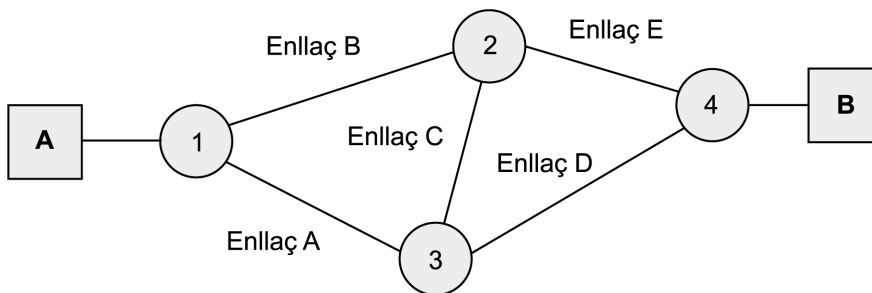
4. Considereu una xarxa de commutació amb les característiques següents:

- 5 nodes
- velocitat de transmissió de cada enllaç = 9.600 bps
- paquets de 1.040 bits amb capçaleres de 16 bits
- temps de propagació de cada enllaç = 10 ms
- temps de procés de cada node = 1 ms
- temps d'establiment de trucada = 200 ms

Es demana calcular el temps necessari per a transmetre un fitxer de 8.192 bits (des que surt el primer bit del primer node fins que surt l'últim bit de l'últim node) fent servir:

- xarxa de commutació de circuits
- xarxa de commutació de missatges
- xarxa de commutació de paquets

5. El dibuix següent representa una part d'una xarxa de commutació de paquets de tipus datagrama.



En aquesta xarxa es vol transmetre un fitxer de 220.000 bytes des del punt A fins al punt B. Els paquets són de 1.024 bytes de longitud total, amb capçaleres de 24 bytes.

En el moment d'enviar el fitxer, la ruta que segueixen els paquets és a través dels nodes 1, 3 i 4. Al cap de 2 segons, i a causa d'un problema detectat a l'enllaç A, la xarxa decideix canviar a la ruta constituïda pels nodes 1, 2, 3 i 4.

Suposeu que els nodes de la xarxa només tenen espai per a un paquet. Considereu que el node 1 té un temps de procés negligible, el node 2 de 50 ms, el node 3 de 20 ms i el node 4 de 10 ms, i que el temps de transferència comença en el node 1 a partir de la transmissió del primer bit, i acaba en el node 4 amb el processat de l'últim bit.

Característiques de la xarxa:

Enllaç	Velocitat de transmissió	Velocitat de propagació	Distància (km)
A	2.048 kbps	2×10^8 m/s	100
B	256 kbps	2×10^8 m/s	100
C	128 kbps	2×10^8 m/s	100
D	8.192 kbps	3×10^8 m/s	72.000
E	2.048 kbps	2×10^8 m/s	1.500

Es demana que calculeu:

- a) El temps de propagació i de transmissió d'un paquet en cada enllaç.
- b) La cadència màxima possible per a cadascuna de les rutes.
- c) El nombre de paquets que es transmetran per cada ruta.
- d) El temps total de transferència del fitxer.

Nota: a l'exercici la cadència de procés en un node es defineix com a:

$$\lambda_{\text{node}} = \frac{1}{\text{Temps de procés d'un paquet}}$$

La cadència de transmissió d'un enllaç (en paquets/s) és:

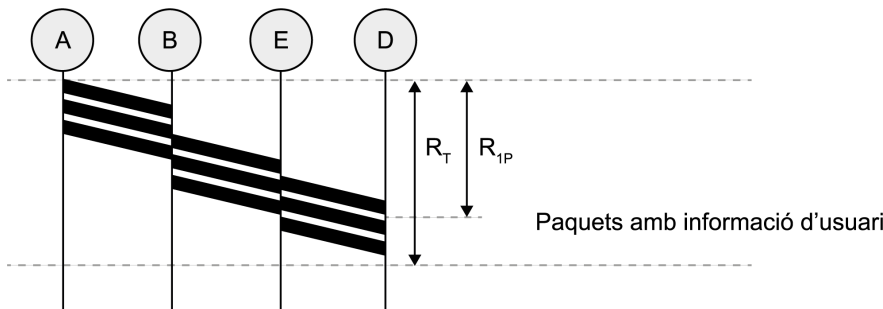
$$\lambda_{\text{enllaç}} = \frac{1}{\text{Temps de transmissió d'un paquet}}$$

La cadència de la ruta és:

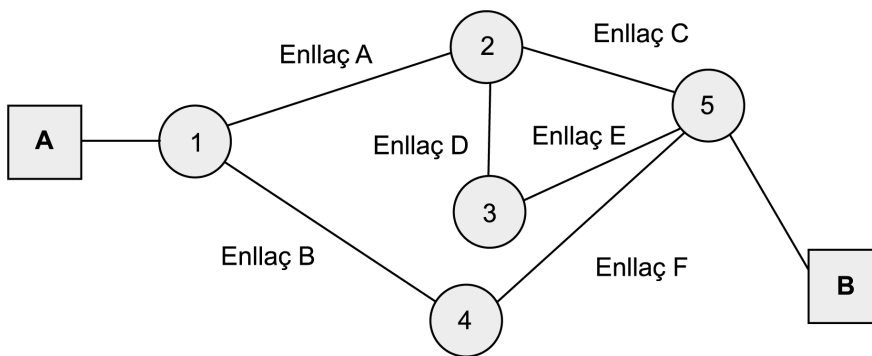
$$\lambda_{\text{ruta}} = \min(\lambda_{\text{enllaç}}, \lambda_{\text{node}})$$

Segons la figura, el temps total de transmissió, que anomenem R_T , i el temps de transmissió del primer paquet, que anomenem R_{1P} , es relacionen amb la cadència de la ruta i amb el nombre de paquets, N_{paq} , amb la fórmula següent:

$$R_T = R_{1P} + \frac{N_{\text{paq}} - 1}{\lambda_{\text{ruta}}}$$



6. En la següent xarxa de commutació de paquets de tipus datagrama es vol transmetre un missatge de 14.112 bytes des d'una font A, que genera bits a 64 kbps, fins a un destí B. Tots els mitjans de transmissió són coaxials amb velocitat de propagació $v_{\text{pro}} = 200.000$ km/s. Tots els nodes tenen temps de procés de 10 ms.



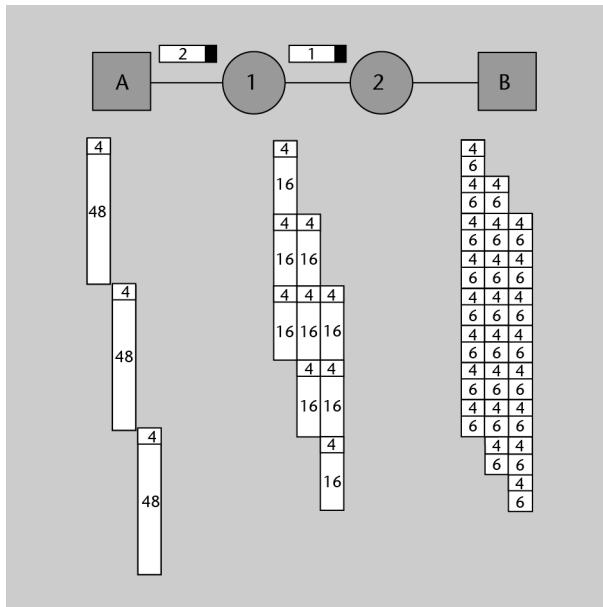
Enllaç	Velocitat de transmissió	Velocitat de propagació	Distància (km)
A	256 kbps	2×10^8 m/s	1400
B	512 kbps	2×10^8 m/s	1000
C	256 kbps	2×10^8 m/s	200
D	1.024 kbps	3×10^8 m/s	800
E	2.048 kbps	2×10^8 m/s	5.000

Enllaç	Velocitat de transmissió	Velocitat de propagació	Distància (km)
F	128 kbps	2×10^8 m/s	600

Si els paquets tenen una longitud de 256 bytes, dels quals 32 bytes són de capçalera, quina de les tres rutes possibles entre A i B és l'òptima pel que fa al retard total de transmissió del missatge?

Solucionari

1. La longitud del paquet es va reduint, però la longitud de la capçalera es manté sempre amb una longitud de 4 bytes, de manera que si reduïm gaire la longitud dels paquets acabarà augmentant el temps de transmissió. Calculem el temps que tardarà a transmetre's la informació suposant que no hi ha retard en els nodes intermedis.



- a) Per a paquets de 48 bytes, el temps de transmissió serà $(48 + 4) \times 3 = 156$ vegades el temps de transmissió d'un byte.
- b) Per a paquets de 16 bytes, el temps de transmissió serà $(16 + 4) \times 5 = 100$ vegades el temps de transmissió d'un byte.
- c) Per a paquets de 6 bytes, el temps de transmissió serà $(6 + 4) \times 10 = 100$ vegades el temps de transmissió d'un byte.

Hi ha una longitud de paquet que fa la transmissió òptima, que estaria entre els paquets de 6 bytes i 16 bytes, s'obtidria de buscar el valor N que ens faci mínima l'expressió següent:

$$\frac{d}{dN} \left[(N + 4) \left(\frac{48}{N} + 2 \right) \right] = 0$$

El valor que minimitza el temps de transmissió és $N = 9$.

2. Calculem el temps de transmissió per als dos supòsits:

- a) Una xarxa de commutació de circuits. Primer s'ha d'establir el circuit i després es transmeten les dades, per tant:

$$T_{\text{Total}} = T_{\text{establiment}} + T_{\text{transmissió}} = [(N - 1) \cdot T_p] \cdot 2 + \left[(N - 1) \cdot T_p + \frac{M}{v_t} \right]$$

$$T_{\text{Total}} = [(5 - 1) \cdot 5 \text{ ms}] \cdot 2 + \left[(5 - 1) \cdot 5 \text{ ms} + \frac{128}{64 \text{ kbps}} \right] = 40 + 22 = 62 \text{ ms.}$$

b) Una xarxa de commutació de paquets en mode datagrama. Només hem de tenir en compte la transmissió de les dades, per tant:

$$T_{\text{Total}} = T_{\text{paquet}_1} + T_{\text{nodes}} + T_{\text{transmissió}} = (N-1) \cdot T_p + (N-2) \frac{P}{v_t} + \frac{M}{v_t}$$

$$T_{\text{Total}} = (5-1) \cdot 5 \text{ ms} + (5-2) \cdot \frac{16}{64 \text{ kbps}} + \frac{128}{64 \text{ kbps}} = 20 + 0,75 + 2 = 22,75 \text{ ms.}$$

En aquest cas, en què la transmissió és de poques dades, és més ràpid el mode datagrama que qualsevol tècnica de commutació de circuits.

3. El port de sortida i el VCI són, respectivament:

- a) Paquet 1: 2, 70
- b) Paquet 2: 3, 11
- c) Paquet 3: 1, 45
- d) Paquet 4: 4, 41

4. Per a la xarxa de commutació de circuits:

$$T_T = T_{\text{establiment}} + T_{\text{prop}} + T_{\text{transmissió}} = 0,2 + 4 \cdot 0,01 + \frac{8.192}{9.600} = 1093,33 \text{ ms}$$

Per a la xarxa de commutació de missatges:

$$T_T = 4 \cdot T_{\text{prop}} + 4 \cdot T_{\text{proc}} + 4 \cdot T_{\text{trans}} = 4 \cdot (0,01 + 0,001 + \frac{8.192}{9.600}) = 3.457,33 \text{ ms}$$

Per a la xarxa de commutació de paquets:

$$T_T = R_{\text{paquet}_1} + \frac{N_{\text{paquets}} - 1}{\lambda}$$

$$T_{Tx} = \frac{1.040}{9.600} \text{ s}$$

$$N_{\text{paquets}} = \frac{8.192}{1.440 - 16} \text{ paquets}$$

$$\lambda = \min\left(\frac{1}{T_{Tx}}, \frac{1}{T_{\text{proc}}}\right) = 9,23 \frac{\text{paquets}}{\text{s}}$$

$$R_{\text{paquet}_1} = 4 T_{\text{prop}} + 4 T_{\text{proc}} + 4 T_{Tx} = 477,33 \text{ ms}$$

$$T_T = 1.235,72 \text{ ms}$$

5. En un paquet hi ha $1.024 - 24 = 1.000$ bytes. El nombre de paquets que cal enviar és:

$220.000 \text{ bytes} / 1.000 \text{ bytes/paquet} = 220$ paquets.

El temps de transmissió d'un paquet és: $1.024 \text{ bytes} \times 8 \text{ bits/byte} / V_{\text{transmissió}}$

El temps de propagació és: $\text{distància (km)} \times 1.000 / V_{\text{propagació}}$

La cadència de l'enllaç és: $1 / T_{\text{Transmissió}}$

La cadència del node és: $1 / T_{\text{proc}}$

Enllaç	Temps Transmissió (ms)	Temps Propagació (ms)	λ (paquets/s)
A	4	0,5	250
B	32	0,5	31,25
C	64	0,5	15.625
D	1	240	1.000
E	4	7,5	250

Node	T _{proc} (ms)	λ (paquets/s)
1		
2	50	20
3	20	50
4	10	100

La cadència per a cadascuna de les rutes és el mínim de la λ de nodes i enllaços de la ruta.

Ruta 1: 1 - A - 3 - D - 4 λ = 50 paquets/s

Ruta 2: 1 - B - 2 - C - 3 - D - 4 λ = 15,625 paquets/s

Després de 2 segons, per la ruta 1 han passat 2×50 paquets = 100 paquets. Per la ruta 2 passaran $220 - 100 = 120$ paquets.

$$T_T = 2 + T_{120}$$

$$T_T = 2 + T_{\text{primer paquet ruta 2}} + \frac{119}{\lambda_{\text{ruta 2}}}$$

$$T_{\text{primer paquet ruta 2}} = 418 \text{ ms}$$

$$T_T = 10,034 \text{ s}$$

6. La font genera $64 \cdot 1.000 / (256 - 32) \cdot 8 = 35,71$ paq/s. El temps de transmissió de cada paquet és 27,34 ms. Els nodes processen $1/0,01 = 100$ paq/s.

Enllaç	T _{prop} (ms)	T _{transmissió}	λ _{enllaç} (paq/s)
A	7	8	125
B	5	4	250
C	1	8	125
D	4	2	500
E	25	1	1000
F	3	16	62,25

En les tres rutes la cadència serà : 35,71 paq/s i, per tant, serà òptima la que tingui menys retard en el primer paquet.

Ruta 1:

$$R_i = T_{\text{tx font}} + T_{\text{proc 1}} + T_{\text{prop A}} + T_{\text{Tx A}} + T_{\text{proc 2}} + T_{\text{prop C}} + T_{\text{Tx C}} + T_{\text{proc 5}} + T_{\text{Tx Destí}} = 0,110 \text{ s}$$

Ruta 2:

$$R_i = T_{\text{tx font}} + T_{\text{proc 1}} + T_{\text{prop A}} + T_{\text{Tx A}} + T_{\text{proc 2}} + T_{\text{prop D}} + T_{\text{Tx D}} + T_{\text{proc 3}} + T_{\text{prop E}} + T_{\text{Tx E}} + T_{\text{proc 5}} + T_{\text{Tx Destí}} = 0,148 \text{ s}$$

Ruta 3:

$$R_i = T_{\text{tx font}} + T_{\text{proc 1}} + T_{\text{prop B}} + T_{\text{Tx B}} + T_{\text{proc 4}} + T_{\text{prop F}} + T_{\text{Tx F}} + T_{\text{proc 5}} + T_{\text{Tx Destí}} = 0,117 \text{ s}$$

La ruta òptima és la ruta 1 per A i C.

Glossari

AAL m Vegeu *ATM adaptation layer*.

adaptador de terminal *m* Dispositiu que proporciona compatibilitat XDSI als equips que no són XDSI.
sigla TA

add-drop multiplexer *m* Equip multiplexor que permet inserir i extreure tributaris d'una xarxa SDH.
sigla ADM

ADM *m* Vegeu *add-drop multiplexer*.

asynchronous transfer mode *m* Mode de transferència asíncron.
sigla ATM

ATM *m* Vegeu *asynchronous transfer mode*.

ATM adaptation layer *m* Capa d'adaptació ATM que permet de mapar diferents protocols sobre ATM.
sigla AAL

available bit rate *m* Classe de servei ATM en què la xarxa controla la velocitat de transferència de l'emissor mitjançant cel·les de gestió.
sigla ABR

ABR *m* Vegeu *available bit rate*.

ADSL *f* Vegeu *línia d'abonat digital asimètrica*.

backward explicit congestion notification *m* Bit activat per la xarxa Frame Relay que informa l'emissor que hi ha congestió en el camí de l'origen a la destinació.
sigla BECN

BECN *m* Vegeu *backward explicit congestion notification*.

basic rate interface *m* Accés bàsic XDSI que utilitza dos canals B i un canal D.
sigla BRI

BRI *m* Vegeu *basic rate interface*.

bloqueig *m* Situació que experimenten les xarxes de commutació quan una connexió no es pot establir perquè no estan disponibles tots els recursos necessaris.

CIR *f* Vegeu *committed information rate*.

circuit virtual *m* Enllaç de comunicacions, de veu o de dades, que l'usuari veu com un circuit punt a punt dedicat. Un circuit virtual es correspon amb un camí lògic, no físic.
sigla VC

committed information rate *f* Velocitat mitjana de bits per segon que la xarxa accepta suportar per a una determinada connexió.
sigla CIR

congestió *f* Caiguda del rendiment d'una xarxa provocada per l'entrada de paquets per sobre de la capacitat de la xarxa.

cyclic redundant code *f* Codi de redundància cíclica per detecció d'errors.
sigla CRC

CRC *f* Vegeu *cyclic redundant code*.

data communications equipment *m* Dispositiu de commutació de la xarxa Frame Relay o X.25 i que pertany a la xarxa.
sigla DCE

data link channel identifier *m* Valor únic que s'assigna a l'extrem d'un PVC en una xarxa Frame Relay. Aquest valor identifica un extrem d'un PVC particular en un canal d'accés d'usuari en una xarxa Frame Relay i només té significat local.
sigla DLCI

data terminal equipment *m* Dispositiu final de transmissió o recepció de dades en una xarxa Frame Relay o X.25. És el dispositiu d'usuari.
sigla DTE

datagrama *m* Paquet que no segueix cap camí prefixat per dins de la xarxa i, per tant, fa que calgui prendre una decisió d'encaminament per a aquest paquet en cada node que travessa.

DCE *m* Vegeu *data communications equipment*.

DLCI *m* Vegeu *data link channel identifier*.

DTE *m* Vegeu *data terminal equipment*.

encaminament *m* Decisió sobre el camí que seguirà un paquet, des de l'origen fins a la destinació, a través d'una xarxa de commutació.

FECN *m* Vegeu *forward explicit congestion notification*.

forward explicit congestion notification *m* Bit activat per la xarxa Frame Relay que informa al DTE receptor que hi ha congestió en el camí de l'origen a la destinació.
sigla FECN

Frame Relay *m* Tecnologia WAN basada en commutació de paquets i circuits virtuals.

HDLC *m* Vegeu *high level data link control*.

high level data link control *m* Protocol de comunicacions genèric de nivell d'enllaç desenvolupat per l'organització ISO.
sigla HDLC

International Telecommunication Union - Telecommunications Organisme d'estandarditzacions que proposa recomanacions per a les comunicacions internacionals. Anteriorment, aquest organisme s'anomenava Comité Consultif International Telegraphique Téléphonique (CCITT).
sigla ITU-T

línia d'abonat digital asimètrica *f* Tecnologia que permet utilitzar el bucle d'abonat de la xarxa telefònica convencional per a accedir a xarxes de dades d'alta velocitat.
sigla ADSL

LAN *f* Vegeu *xarxa d'àrea local*.

LAPB *f* Vegeu *link access procedure balanced*.

LAPD *m* Vegeu *link access procedure on the D channel*.

link access procedure balanced *f* Protocol de la capa d'enllaç de les xarxes X.25, que deriva d'HDLC.
sigla LAPB

link access procedure on the D channel *m* Protocol de la capa d'enllaç XDSI pel canal D. S'utilitza per a transmetre la senyalització de la XDSI.
sigla LAPD

network to network interface *f* Interfície entre dos commutadors ATM.
sigla NNI

NNI *f* Vegeu *network to network interface*.

node *m* Dispositiu multiplexor encarregat d'encaminar les dades cap a la destinació.

open systems interconnection *m* Model de comunicació entre dispositius. Defineix una arquitectura de set nivells de funcions de comunicació.
sigla OSI

OSI *m* Vegeu *open systems interconnection*.

paquet *m* Conjunt de bytes que circulen per una xarxa de commutació com una unitat. Es compon de dues parts: capçalera i dades d'usuari.

PBX *m* Vegeu *private branch exchange*.

PDH *f* Vegeu *plesiochronous digital hierarchy*.

permanent virtual circuit *m* Enllaç lògic en què el seu origen, destinació i classe de servei han estat definits per l'administrador de la xarxa.
sigla PVC

plesiochronous digital hierarchy *f* Jerarquia digital plesiòcrona en la qual es basa la XDSI.
sigla PDH

PRI *m* Vegeu *primary rate interface*.

primary rate interface *m* Accés primari XDSI.
sigla PRI

private branch exchange *m* Commutador de telefonia analògica o digital situat a casa de l'abonat i utilitzat per a connectar xarxes de telefonia públiques i privades.
sigla PBX

PVC *m* Vegeu *permanent virtual circuit*.

QoS *f* Vegeu *quality of service*.

quality of service *f* Descripció de la qualitat d'una connexió.
sigla QoS

SDH *f* Vegeu *synchronous digital hierarchy*.

signalling system number 7 *m* Protocol de senyalització utilitzat en la interfície NNI, és a dir, entre els nodes interns d'una xarxa pública.
sigla SS7

SONET *f* Vegeu *synchronous optical network*.

SS7 *m* Vegeu *signalling system number 7*.

SVC *m* Vegeu *switched virtual circuit*.

switched virtual circuit *f* Connexió de circuit virtual establerta a la xarxa sota la demanda de l'usuari.
sigla SVC

synchronous digital hierarchy *f* Jerarquia digital síncrona.
sigla SDH

synchronous optical network *f* Especificació ANSI compatible amb SDH, utilitzada als EUA.
sigla SONET

TA *m* Vegeu adaptador de terminal.

unspecified bit rate *f* Classe de servei ATM *best effort* que no especifica paràmetres de qualitat de servei.
sigla UBR

UBR *f* Vegeu *unspecified bit rate*.

UPC *m* Vegeu *usage parameter control*.

usage parameter control *m* Funció ATM que s'encarrega de monitoritzar el compliment del contracte de trànsit per l'usuari.
sigla UPC

user to network interface *f* Interfície entre l'usuari i la xarxa.
sigla UNI

UNI *f* Vegeu *user to network interface*.

variable bit rate *f* Classe de servei ATM per a aplicacions de velocitat variable i amb requeriments de sincronització entre emissor i receptor.
sigla VBR

VBR *f* Vegeu *variable bit rate*.

VC¹ *m* Vegeu *circuit virtual*.

VC² *m* Vegeu *virtual channel*.

virtual channel *f* Descriu un flux unidireccional de cel·les ATM amb el mateix identificador de canal virtual.
sigla VC

VC *f* Vegeu *virtual channel*.

virtual path *m* Descriu un flux unidireccional de cel·les ATM que pertanyen a un grup de VC i que tenen el mateix identificador de trajecte virtual.
sigla VP

VP *m* Vegeu *virtual path*.

WAN *f* Vegeu *xarxa de gran abast*.

X.25 *f* Tecnologia WAN basada en commutació de paquets i circuits virtuals, predecessora de la tecnologia Frame Relay.

xarxa d'àrea local *f* Xarxa que permet interconnectar estacions properes físicament.
sigla LAN

xarxa de gran abast *f* Xarxa que permet interconnectar estacions que no estan properes físicament.
sigla WAN

xarxa digital de serveis integrats *f* Xarxa de commutació de circuits completament digitalitzada que ofereix serveis de veu i dades.

XDSI *f* Vegeu *xarxa digital de serveis integrats*.

Bibliografia

Black, U. (1997). *Tecnologías emergentes para redes de computadoras* (2a. ed.). Mèxic, DF: Prentice Hall.

Caballero, J. M. (1998). *Redes de banda ancha*. Barcelona: Marcombo.

Forouzan, A. (2013). *Data Communications and Networking* (5a. ed.). McGraw-Hill.

Freeman, R. L. (1999). *Fundamentals of Telecommunications*. Nova York: John Wiley and Sons.

Halsall, F. (1998). *Comunicación de datos, redes de computadores y sistemas abiertos* (4a. ed.). Mèxic, DF: Addison Wesley.

Stallings, W. (1998). *ISDN and Broadband ISDN with Frame Relay and ATM* (4a. ed.). Upper Saddle River: Prentice Hall.

Stallings, W. (2004). *Redes e Internet de alta velocidad. Rendimiento i calidad de servicio* (2a. ed.). Madrid: Pearson Prentice Hall.

Stallings, W. (2014). *Data and Computer Communication* (10a. ed.). Pearson Education.

Tanenbaum, A. S. (2011). *Computer Networks* (5a. ed.). Prentice Hall.

