

Topologies de xarxes de fibra òptica i gestió de fallades

Josep Maria Fàbrega
Simó Graells

PID_00206963

Índex

1. Xarxes en anell, estrella. Enrutament i WDM. Gestió de fallades.....	5
1.1. Xarxes en bus i en estrella	5
1.1.1. Topologia en bus	5
1.1.2. Topologia en estrella	6
1.2. Xarxes en anell	7
1.3. La capa òptica i la topologia virtual	11
1.4. Nodes de xarxa	12
1.5. Gestió de fallades	14
1.5.1. Gestió de fallades en xarxes punt a punt	14
1.5.2. Gestió de fallades en xarxes genèriques	15
1.5.3. Gestió de fallades en xarxes en anell	17
1.6. Exemples d'assignació de longituds d'ona en xarxes en anell	20
1.6.1. Exemple I	20
1.6.2. Exemple II	23
2. Topologies de fibra fins a la llar (FTTH).....	25
2.1. Punt a punt	27
2.2. Punt a multipunt: xarxes òptiques passives	29
2.2.1. Estàndards despleats: gigabit PON i gigabit Ethernet PON	30
2.2.2. Estàndards en desplegament: 10G-EPON i XG-PON	32
Bibliografia.....	37

1. Xarxes en anell, estrella. Enrutament i WDM. Gestió de fallades

1.1. Xarxes en bus i en estrella

En aquest apartat estudiarem les xarxes *broadcast and select*. Aquest tipus de xarxa envia el senyal rebut de cada node cap a tots els nodes, per tant, no hi ha cap funció d'encaminament. Les dues topologies que s'utilitzen en la construcció de les xarxes *broadcast and select* són la topologia en bus i la topologia en estrella.

1.1.1. Topologia en bus

La topologia en bus s'estructura en un conjunt de nodes que estan connectats entre ells mitjançant un bus tal com indica la figura següent:

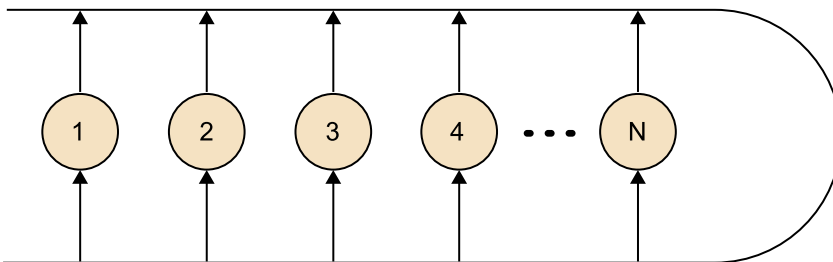


Figura 1. Esquema d'una topologia en bus tancat

Els elements que interconnecten cada node amb el bus són els acobladors i poden tenir les configuracions següents:

- Si connecta el transmissor del node amb el bus, tindrà la configuració:

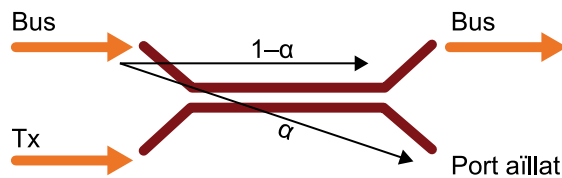


Figura 2. Acoblador d'interconnexió transmissor-bus

- Si connecta el bus amb el receptor del node, tindrà la configuració:

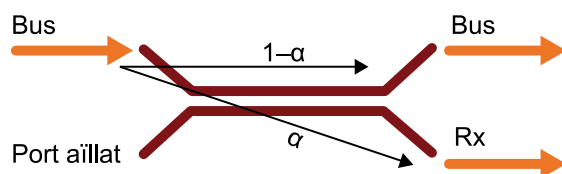


Figura 3. Acoblador d'interconnexió bus-receptor

En tots dos casos, α és la raó d'acoblament.

Suposant que tots els acobladors són idèntics, és important trobar la raó d'acoblament òptima que minimitza les pèrdues en el pitjor cas.

El pitjor cas des del punt de vista de pèrdues és quan es transmet del node 1 al node 2. En aquest cas les pèrdues són:

$$L_{m\grave{a}x} = \alpha^2(1-\alpha)^{2n-3}\gamma^{2n-1} \quad (1)$$

Derivant l'equació anterior respecte de la raó d'acoblament i igualant-la a zero trobarem la raó d'acoblament òptima que minimitza les pèrdues en el pitjor cas.

$$\frac{dL_{m\grave{a}x}}{d\alpha} = 2\alpha(1-\alpha)^{2n-3}\gamma^{2n-1} + (-1)\alpha^2(2n-3)(1-\alpha)^{2n-4}\gamma^{2n-1} = 0 \quad (2)$$

$$2 - 2\alpha - 2\alpha n + 3\alpha = 0 \quad (3)$$

$$2 - 2\alpha n + \alpha = 0 \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{2}{2n-1} \quad (5)$$

Lectura de la fórmula (1)

α^2 : pèrdues degudes a l'entrada al bus des del node 1 i la sortida del bus cap al node 2

$(1-\alpha)^{2n-3}$: pèrdues degudes als acobladors que ens trobem en avançar pel bus

γ^{2n-1} : pèrdues en excés

1.1.2. Topologia en estrella

En la topologia en estrella disposem d'un conjunt de nodes connectats entre ells mitjançant un acoblador en estrella tal com indica la figura:

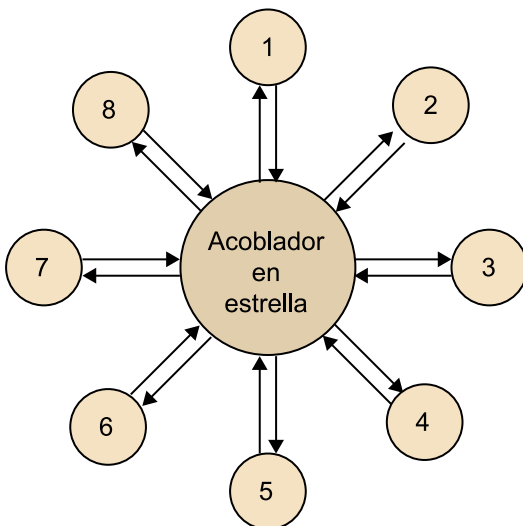


Figura 4. Esquema d'una xarxa en estrella

L'acoblador en estrella es pot construir a partir d'acobladors 2×2 de 3 dB.

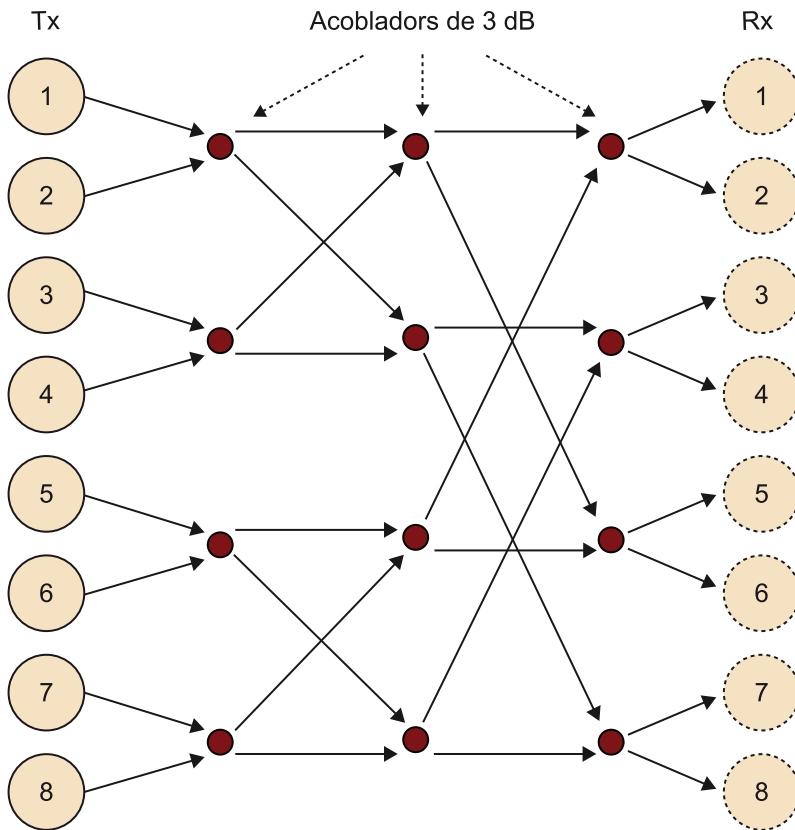


Figura 5. Esquema intern d'un acoblador en estrella

El senyal passarà sempre per un nombre fix d'acobladors, que correspon a $\log_2 n$ (on n és el nombre de nodes). Establím $\alpha = \frac{1}{2}$, així totes les sortides reben la mateixa fracció $\left(\frac{\gamma}{2}\right)^{\log_2 n}$ de potència de cada entrada.

1.2. Xarxes en anell

La topologia en anell és una de les més utilitzades en les xarxes de comunicacions òptiques. En aquesta topologia habitualment s'utilitza WDM de segona generació, cosa que proporciona una funcionalitat més complexa que no pas les xarxes de *broadcast and select*. Bàsicament, es realitza enrutament i commutació de les portadores en funció de la seva longitud d'ona.

El disseny d'una xarxa en anell WDM consistirà a fer una assignació de longituds d'ona que sigui òptima. Per a fer aquesta assignació, partirem de la taula que indica quina és la demanda de trànsit entre nodes.

Veurem el procés de disseny resolent un exemple de disseny d'una xarxa en anell de quatre nodes (A, B, C i D) i l'assignació de longituds d'ona.

Suposem un patró de trànsit tal com:

Referència bibliogràfica

R. Ramaswami; K. N. Sivarajan; G. H. Sasaki (2008). *Optical Networks: A Practical Perspective*. Morgan Kaufmann.

Taula 1. Demanda de trànsit

	A	B	C	D
A	-	1	2	1
B	1	-	2	1
C	2	2	-	2
D	1	1	2	-

Els valors de trànsit especificats en la taula són valors de trànsit normalitzats a la capacitat d'una portadora.

Fixem-nos que aquesta matriu de trànsit és pròpia d'un trànsit simètric, és a dir, que el trànsit entre dos nodes és el mateix entre el primer i el segon, que entre el segon i el primer.

Això fa que el disseny se simplifiqui, ja que només cal resoldre el trànsit per una part de la matriu, és a dir, per la meitat dels enllaços. Aquest disseny és independent del sentit en què anirà la portadora dins l'anell (horari o anti-horari). Una portadora que segueixi el sentit horari per a enllaçar dos nodes, tindrà una altra portadora associada que anirà en sentit contrari i a la mateixa longitud d'ona, ja que, per a aquesta taula de trànsit, els enllaços són bidireccionals i amb un trànsit simètric.

A partir de la taula amb la demanda de trànsit emplenem una taula amb cada un dels enllaços, el trànsit de l'enllaç i l'assignació de longituds d'ona.

Taula 2. Assignació de longituds d'ona

Enllaç	Trànsit	Portadores	Salts	Trànsit xarxa
AB	1	λ_1	1	1
BC	2	$\lambda_1\lambda_2$	1	2
CD	2	$\lambda_1\lambda_2$	1	2
AD	1	λ_1	1	1
BD	1	λ_2	2	2
AC	2	λ_3	2	4

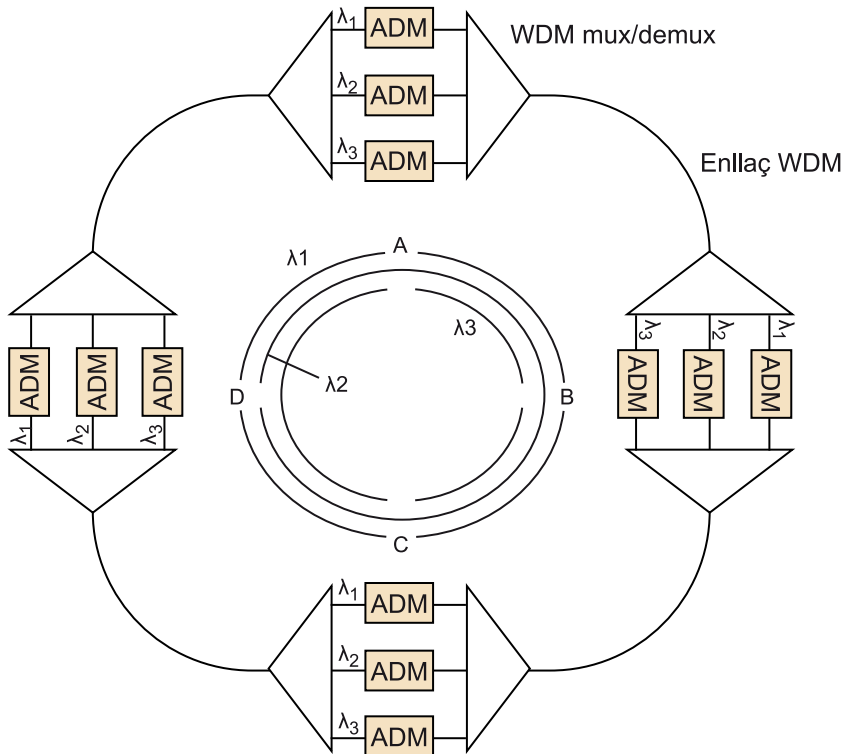


Figura 6. Esquema de la xarxa en anell

Tres longituds d'ona són suficients per a suportar el patró de trànsit proposat (sense considerar cap requeriment de protecció). Fixem-nos en la taula d'assignació de longitud d'ona, hi afegim informació dels salts entre nodes que farem en cada enllaç i hi afegim la columna del trànsit que aporta l'enllaç al conjunt de la xarxa (multipliquem el trànsit pel nombre de salts). Sumant els elements de la columna del trànsit que s'aporta a la xarxa ($1 + 2 + 2 + 1 + 2 + 4 = 12$) i dividint pel nombre de trams de fibra que té l'anell, obtenim el nombre de longituds d'ona ($12/4 = 3$).

Cada node requereix tres ADM, però no s'utilitzen tots; en alguns nodes, el trànsit de determinades longituds d'ona passarà sense ser modificat. Per exemple, en el cas del node A, tot el trànsit de longitud d'ona λ_2 hi passarà a través sense ser alterat.

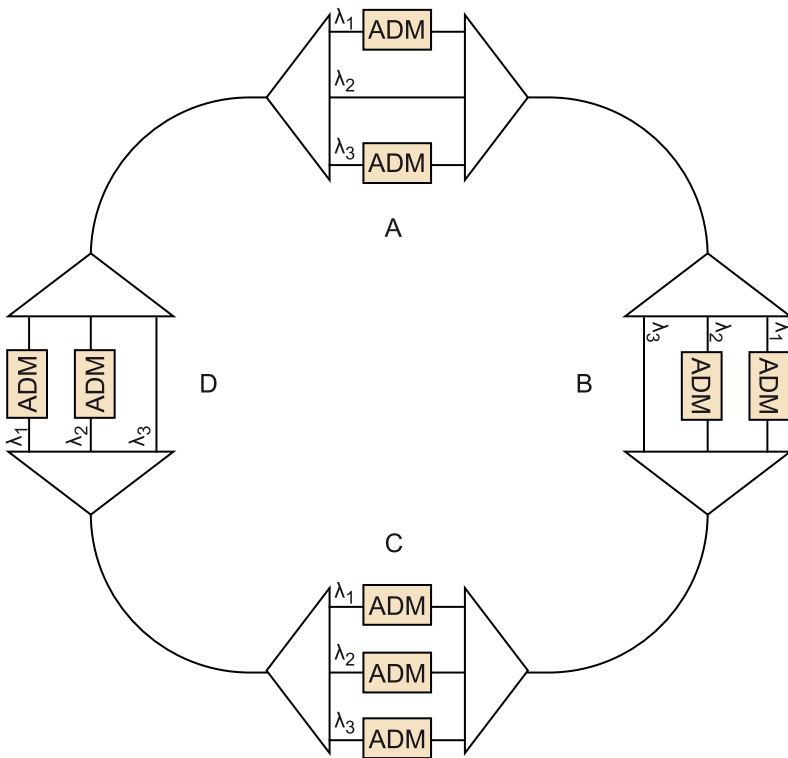


Figura 7. Esquema de la xarxa en anell sense els ADM innecessaris

Des del punt de vista de la capa d'enllaç de la torre OSI, les tres portadores se substitueixen per enllaços físics que interconnecten els ADM. Aquesta topologia es coneix com la topologia virtual d'una xarxa.

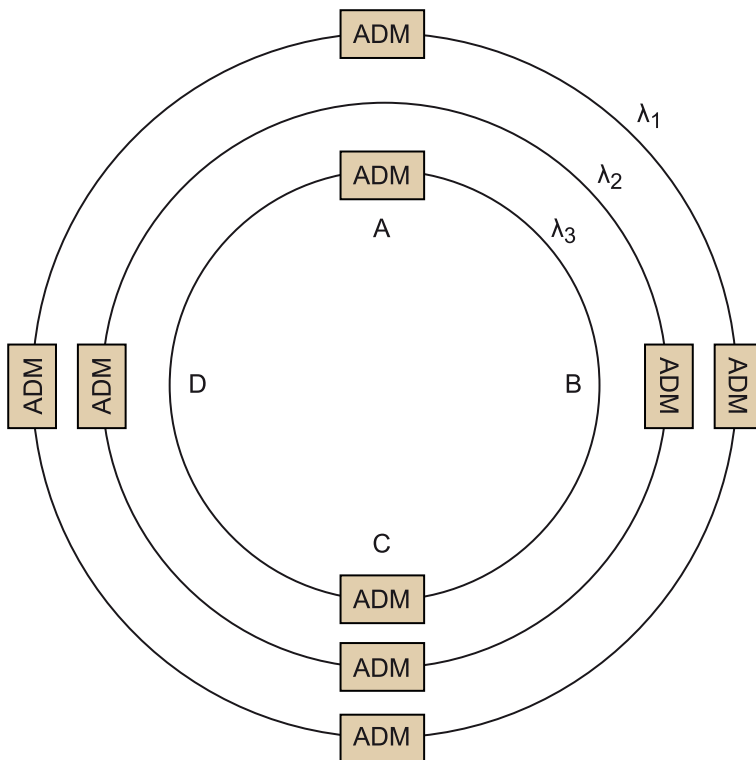


Figura 8. Topologia virtual de la xarxa en anell

1.3. La capa òptica i la topologia virtual

La topologia d'una xarxa per encaminament de longitud d'ona és un conjunt de nodes WXC (*wavelength crossconnect*) units entre ells amb enllaços de fibra òptica formant una malla arbitrària. La xarxa proveeix *lightpaths* entre parells de nodes de xarxa.

Cada *lightpath* té assignada una longitud d'ona i constitueix un enllaç entre nodes. Per tant, es pot separar entre la topologia física que està determinada per uns enllaços de fibra òptica entre nodes (capa física) i la topologia virtual (capa òptica) que està determinada per uns enllaços formats pels *lightpaths* entre nodes.

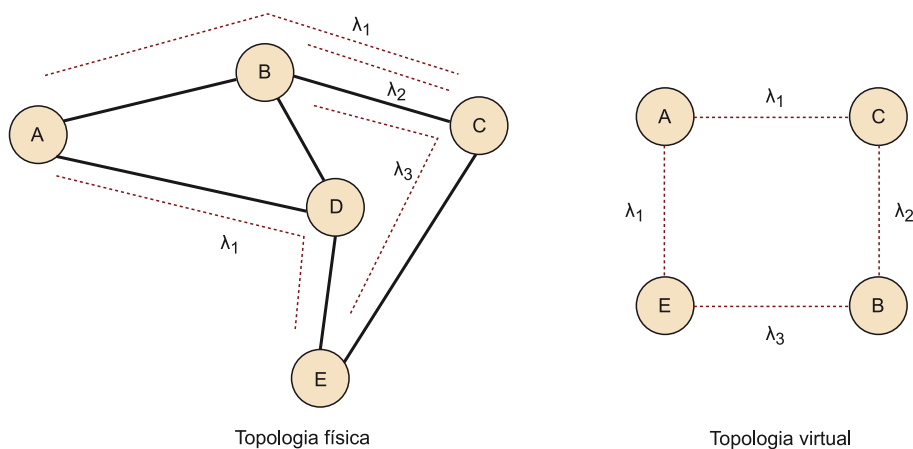


Figura 9. Exemple de topologia física i de topologia virtual d'una mateixa xarxa

Les principals característiques d'una topologia virtual són les següents:

- **Transparència.** Els nodes estan formats majoritàriament per components òptics. En treballar en domini òptic, no tenen dependència amb la modulació o la velocitat emprada en el *lightpath*.
- **Reutilització de longituds d'ona.** Aquestes poden ser reutilitzades en altres parts de la xarxa. El nombre de *lightpaths* pot ser molt més gran que les longituds d'ona del sistema WDM.
- **Fiabilitat.** La xarxa es pot configurar de manera que en el cas de fallada, els *lightpaths* siguin reencaminats per rutes alternatives. A més, molts components òptics utilitzats ja són de per si components amb una alta fiabilitat.
- **Topologia virtual.** És l'esquema que consisteix en els nodes de xarxa i els *lightpath* que s'estableixen entre ells.
- **Commutació de circuits.** Els *lightpaths* poden ser establerts i destruïts segons demanda.

Nota

Un *lightpath* és una connexió de gran amplada de banda que suporta velocitats de gigabits per segon.

1.4. Nodes de xarxa

L'element principal d'un node d'una xarxa és el WXC (*wavelength crossconnect*). Aquest element permet configurar la ruta dels *lightpaths*. El seu diagrama de blocs és el següent:

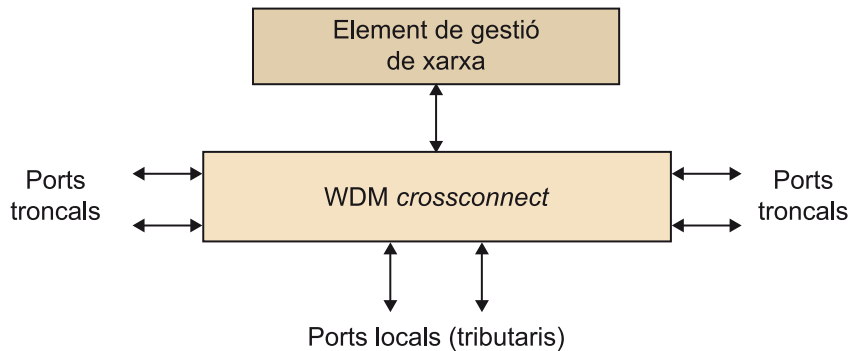


Figura 10. Diagrama de blocs d'un node de xarxa

Els elements d'WXC són els següents:

- **Ports troncats:** ports que connecten els nodes amb els altres nodes de la xarxa.
- **Ports locals:** connecten el *crossconnect* a la font o a la destinació de trànsit. Els *lightpaths* comencen i acaben en els ports locals, els quals poden ser òptics o elèctrics.
- **Element de gestió de xarxa:** part que s'encarrega de controlar i gestionar el funcionament del node i la interconnexió entre nodes o xarxa.

Els components òptics que s'utilitzen per a implementar aquests nodes són:

- multiplexors i desmultiplexors,
- commutadors, i
- convertidors de longitud d'ona.

La imatge següent ens mostra l'esquema d'un *crossconnect* òptic (OXC) sense conversió de longitud d'ona. La implementació es realitza mitjançant multiplexors, desmultiplexors i commutadors.

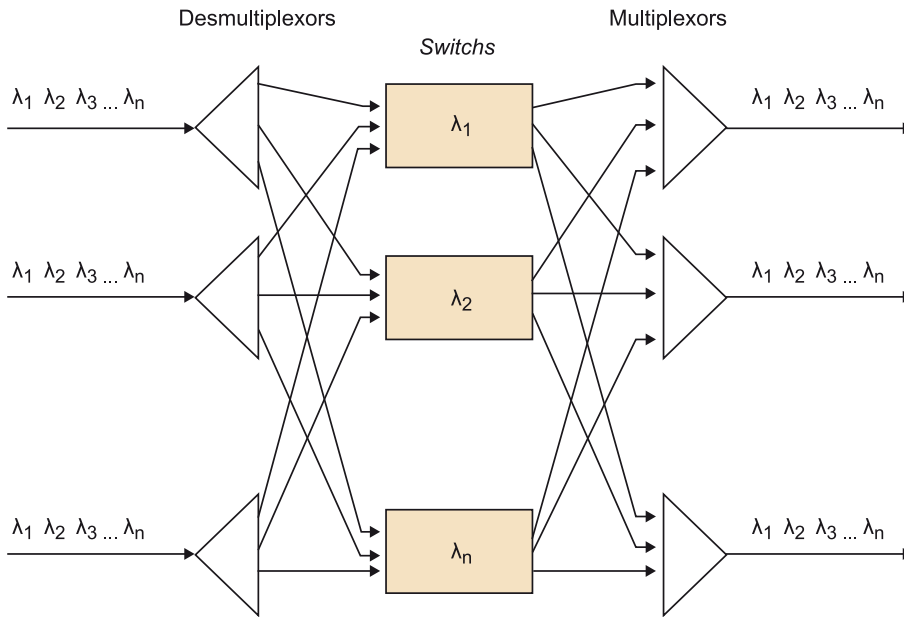


Figura 11. Crossconnect òptic (OXC) sense conversió de longitud d'ona

L'esquema del mateix dispositiu òptic però amb capacitat de conversió de longitud d'ona, és a dir, un WXC, és el següent:

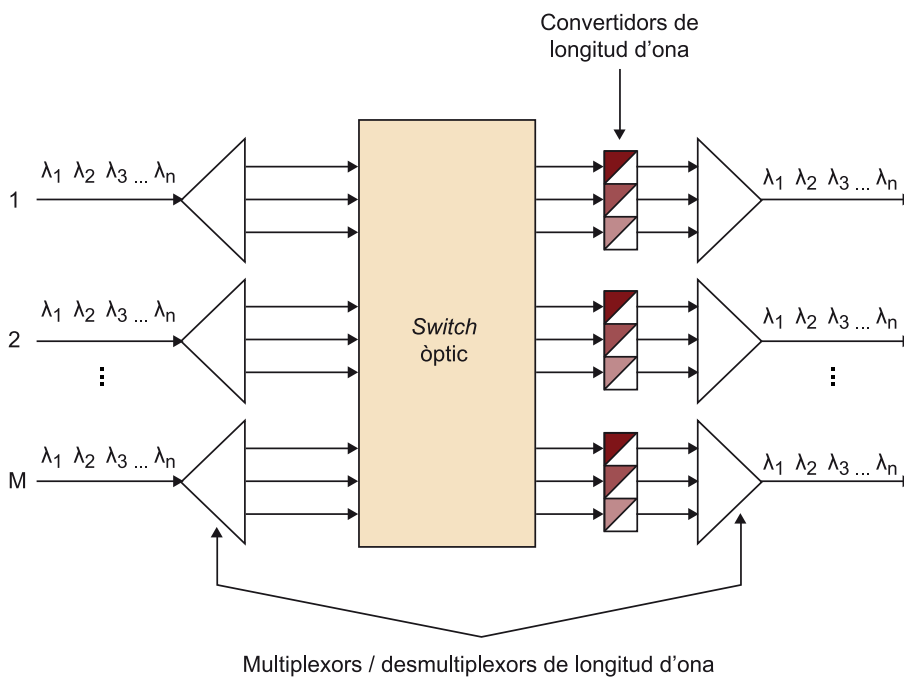


Figura 12. Crossconnect amb capacitat per a conversió de longitud d'ona

En els WXC electrònics és més fàcil la conversió de longitud d'ona, ja que només cal convertir la informació elèctrica a òptica mitjançant un làser a la longitud d'ona que ens interessi. En la figura següent trobem l'esquema d'un WXC electrònic.

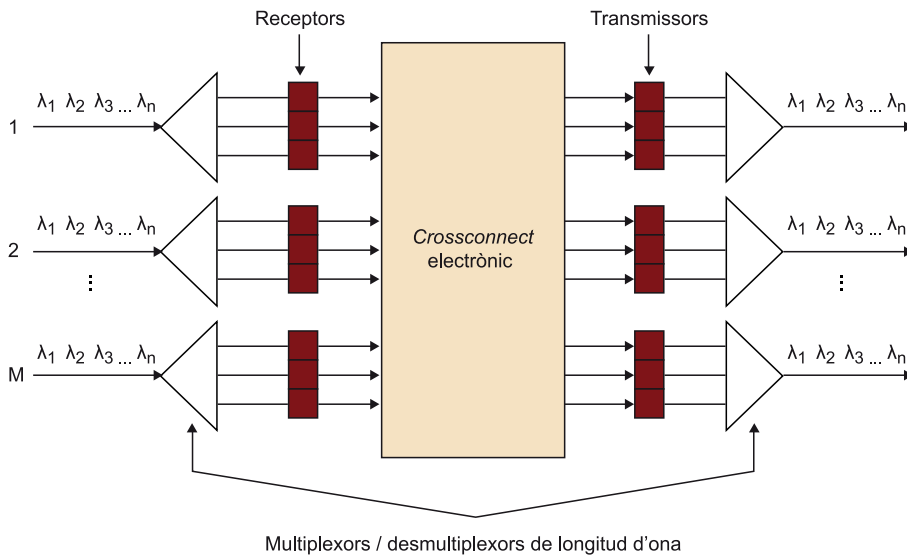


Figura 13. Crossconnect electrònic

Cal tenir en compte que en xarxes i enllaços d'alta velocitat els *crossconnects* han de ser òptics.

1.5. Gestió de fallades

1.5.1. Gestió de fallades en xarxes punt a punt

En aquest apartat estudiarem les estratègies de protecció enfront de fallades de les xarxes punt a punt. Aquestes estratègies són les següents:

- **Protecció 1+1.** El sistema de protecció 1+1 implementa l'enllaç mitjançant dues fibres. A la sortida del transmissor se situa un divisor de potència per tal d'enviar la informació simultàniament per les dues fibres. En el receptor se situa un commutador que tria una de les dues fibres. En cas que la fibra de treball pateixi una fallada, el receptor commuta cap a la fibra de protecció.

Cal notar que el sistema és ràpid, ja que el receptor no ha d'informar l'emissor de la fallada. El principal problema d'aquest sistema és que tenim 3 dB de pèrdues al divisor de l'emissor.

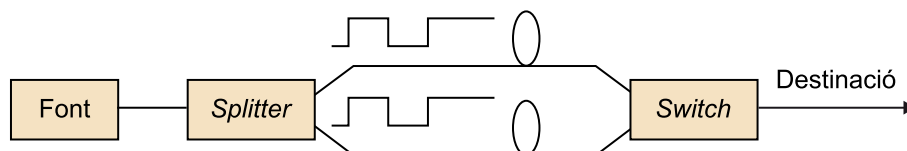


Figura 14. Esquema de protecció 1+1

- **Protecció 1:1.** El sistema de protecció 1:1 implementa l'enllaç amb una fibra de protecció i una fibra de treball. A la sortida del transmissor se situa un commutador que selecciona la fibra de treball en operació normal. En el receptor se situa un commutador que escull la fibra de treball. En cas que la fibra de treball pateixi una fallada, el receptor commuta cap a la fibra de protecció. Quan això ocorre, el receptor ha d'avisar l'emissor perquè també

Nota

La protecció 1:1 permet utilitzar la fibra de protecció per a enviar informació de baixa prioritat si el sistema funciona correctament.

commuti cap a la fibra de treball. Això es realitza mitjançant el protocol APS (*automatic protection switching*). Aquest sistema no és tan ràpid com l'1+1 però aprofitem millor la potència de la font en no tenir un divisor a l'emissor.

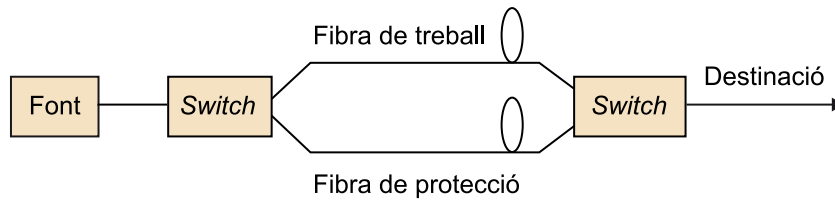


Figura 15. Esquema de protecció 1:1

- **Protecció 1:N.** El sistema 1:N és molt similar al sistema 1:1. El funcionament és exactament el mateix amb l'excepció que utilitzem una fibra de protecció per diverses fibres de treball.

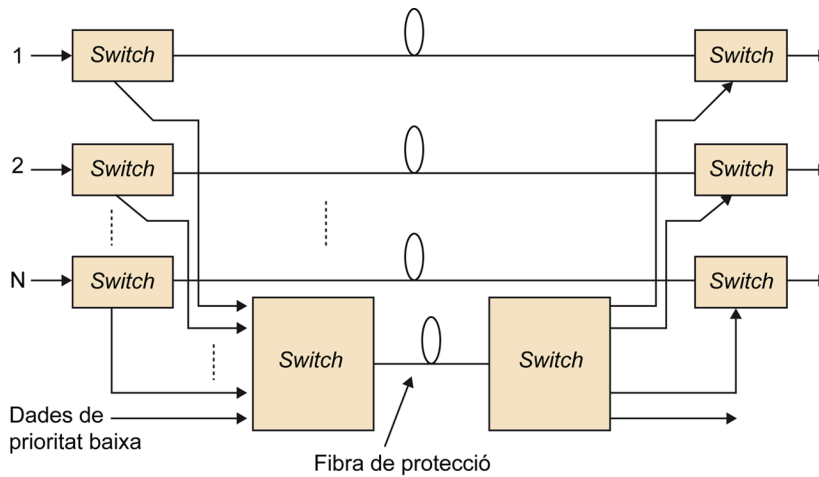


Figura 16. Esquema de protecció 1:N

Nota

El sistema 1:N redueix costos de fibra enfront del sistema 1:1, però només pot restaurar la informació d'una sola fibra.

1.5.2. Gestió de fallades en xarxes genèriques

En aquest apartat veurem les estratègies de protecció davant de fallades de les xarxes genèriques.

En l'exemple següent, en operació normal la xarxa uneix els nodes A i C seguint el camí ABC.

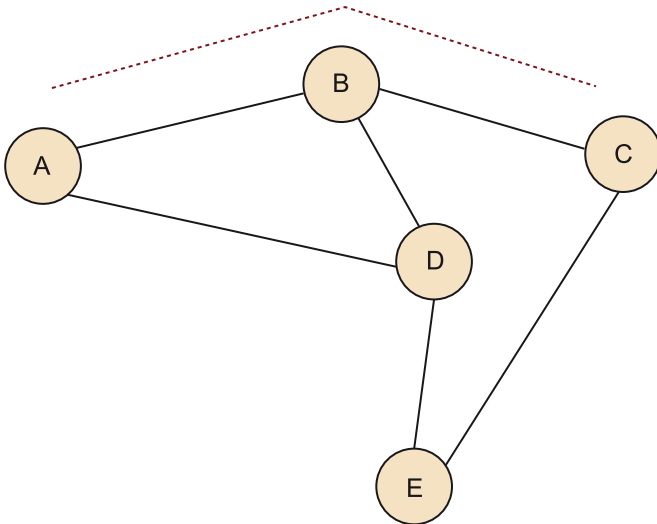
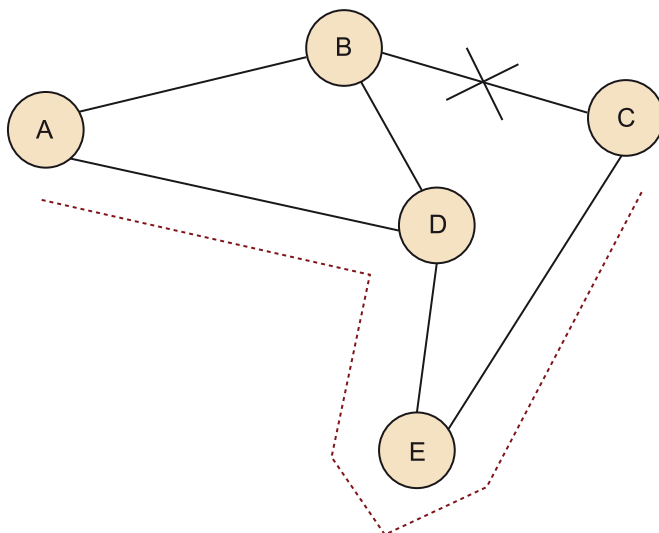


Figura 17. Esquema de xarxa mallada amb comunicació entre nodes A i C

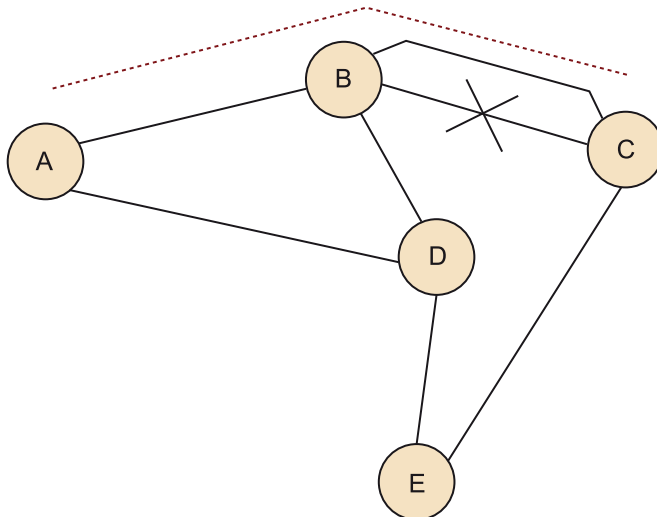
En una xarxa genèrica (suposem una xarxa mallada amb diversos nodes) podem implementar les proteccions següents:

- **Path switching.** En cas de fallada d'algun enllaç, hem de buscar un nou enllaç o una ruta alternativa. En aquest tipus de protecció, el node origen de la informació busca la ruta alternativa per enviar el trànsit cap al node destinació.

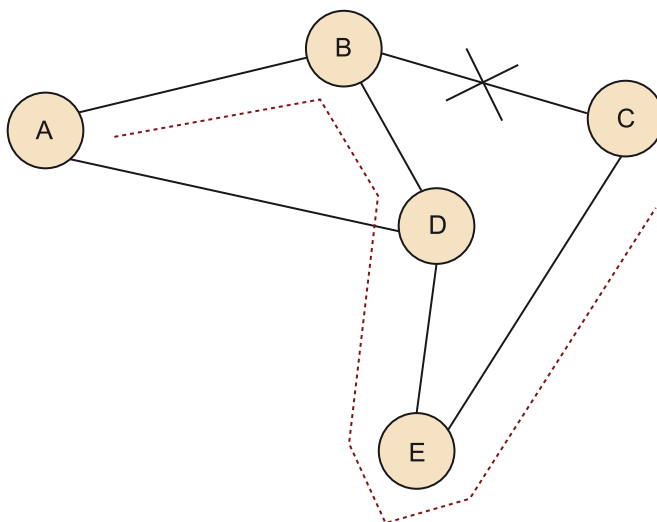
Cal notar que si falla un dels enllaços de la xarxa tots els nodes han de saber que l'enllaç ha fallat, ja que qualsevol node pot transmetre informació. Per tant, en cas de fallada s'ha de notificar a la resta de nodes.

Figura 18. Esquema de xarxa mallada amb *path switching*

- **Line switching.** A diferència de la protecció *path switching*, els nodes extrems a la fallada són els encarregats de restaurar la ruta. Podem trobar dos tipus de protecció *line switching*:
 - **Span protection:** el trànsit s'enruta per una fibra de protecció que tingui l'enllaç (vegeu proteccions en enllaços punt a punt).

Figura 19. Esquema de xarxa mallada amb *span protection*

- **Path protection:** el trànsit s'enruta per un camí alternatiu fins a arribar a l'altre node extrem a la fallada i d'allà continua fins al node destí.

Figura 20. Esquema de xarxa mallada amb *path protection*

1.5.3. Gestió de fallades en xarxes en anell

Les xarxes en anell són les xarxes més utilitzades en comunicacions òptiques. En aquest tipus de xarxes tenim diferents estratègies de protecció segons si l'anell és unidireccional o bidireccional. Les més conegudes són les següents:

- **UPSR (*unidirectional path switching ring*).** Es tracta d'un anell amb dos fibres, una fibra transmet la informació en sentit horari i l'altra en sentit antihorari. El receptor rep la informació per les dues fibres i escull aquella mitjançant la qual la informació li arriba amb més potència.

Nota

El funcionament de l'UPSR és similar a l'1+1 que s'utilitza en enllaços punt a punt.

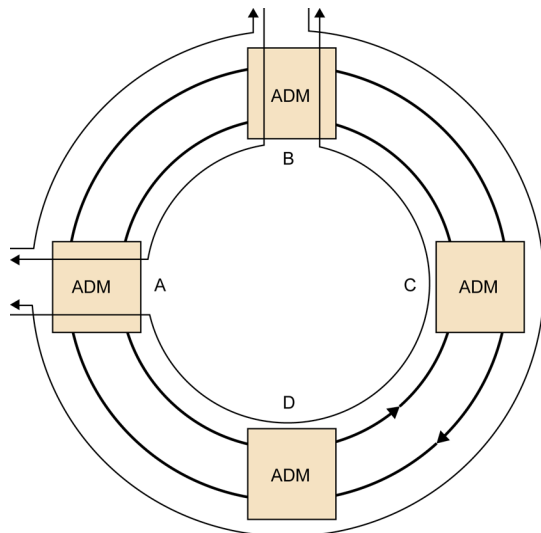


Figura 21. Esquema de xarxa en anell UPSR

- **BLSR/4 (bidirectional line switching ring / 4 fibers)**. S'utilitzen quatre fibres per a unir els nodes de l'anell. Dues fibres estan destinades a treball (una per cada sentit, ja que l'enllaç és bidireccional) i les altres dues fibres estan destinades a protecció (també una per cada sentit).

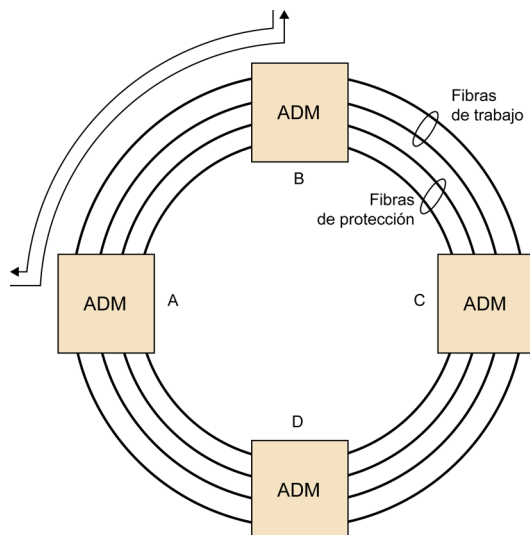


Figura 22. Esquema de xarxa en anell BLSR/4

En aquest sistema, basat en *line switching*, es poden utilitzar dos tipus de proteccions:

- **Span protection**: si es trenca una o les dues fibres de treball, es fa passar la informació per les fibres de protecció.

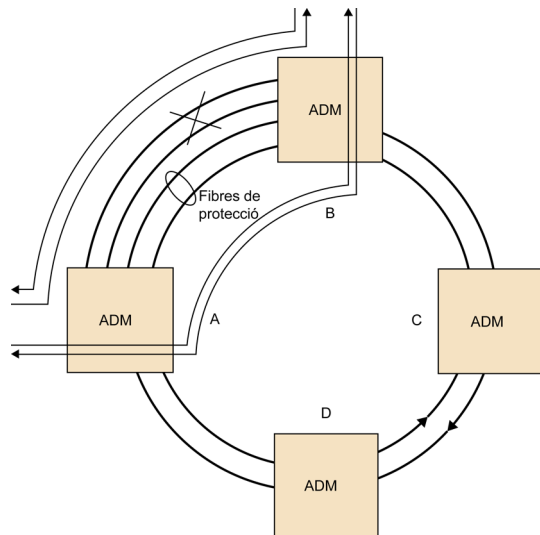


Figura 23. Esquema de xarxa en anell BLSR/4 amb *span protection*

- **Line protection:** si es trenquen les fibres de treball i les fibres de protecció, es restaura l'anell mitjançant les fibres de protecció de la resta de l'anell.

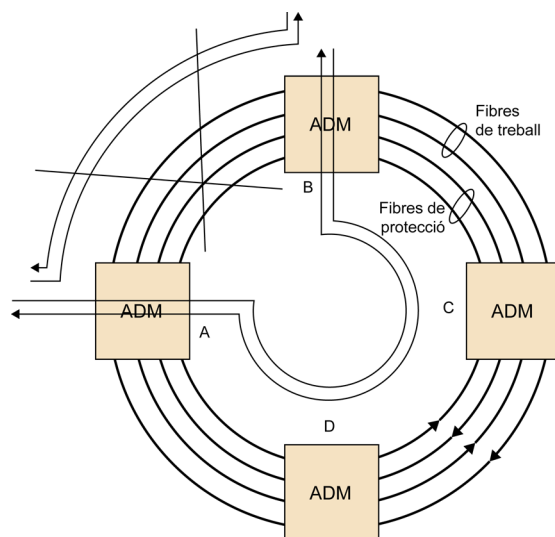


Figura 24. Esquema de xarxa en anell BLSR/4 amb *line protection*

- **BLSR/2 (bidirectional line switching ring / 2 fibers).** S'utilitzen dues fibres per a unir els nodes de l'anell. Les dues fibres estan destinades a treball (una per cada sentit, ja que l'enllaç és bidireccional) i també a protecció. Lògicament, si les dues fibres són de treball i de protecció, s'ha de dimensionar la seva capacitat perquè pugui enrutar el trànsit en cas de fallada. Per això, cada fibra es dimensiona el doble de la capacitat de l'enllaç. En cas de fallada, aquesta configuració només permet *line protection*. Si falla un enllaç es restaura l'anell mitjançant les dues fibres de la resta de l'anell.

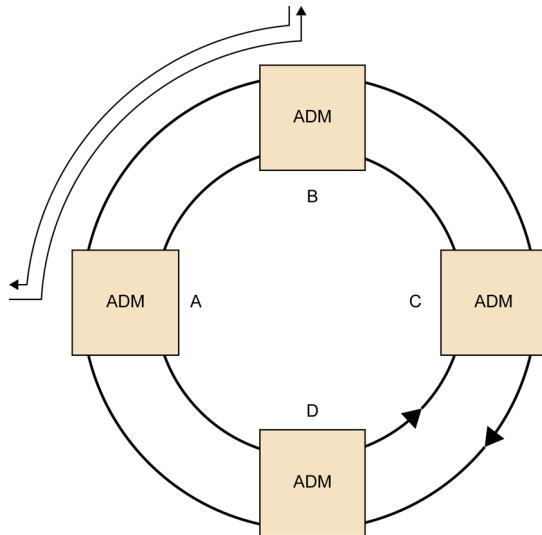


Figura 25. Esquema de xarxa en anell BLSR/2

1.6. Exemples d'assignació de longituds d'ona en xarxes en anell

1.6.1. Exemple I

Disposem d'una estructura de xarxa de fibra òptica en anell amb quatre nodes que implementa un sistema de protecció BLSR/4. La taula de trànsit de dades normalitzada és la següent:

Taula 3. Demanda de trànsit

	A	B	C	D
A	–	1	2	1
B	1	–	2	1
C	2	1	–	2
D	2	1	2	–

Feu una assignació òptima de longituds d'ona entre nodes. És factible eliminar *add drop multiplexers* (ADM) dins dels nodes? Quins eliminaríeu?

Si ens fixem en la matriu de trànsit veurem que es tracta de trànsit bidireccional però no és totalment simètric. Per exemple, observem que el trànsit del node C al node B és d'1, en canvi, el trànsit del node B al node C val 2. Això mateix també passa en l'enllaç del node D al node A, i del node A al node D.

No podem resoldre el problema només per a una part de la matriu, sinó que ho haurem de fer per a la matriu sencera. A més, pel fet de no ser un trànsit simètric farem una assignació de longituds d'ona per l'anell en sentit horari i una altra pel sentit antihorari.

1) Assignació de longituds d'ona per l'anell amb sentit horari

La taula d'assignació de longituds d'ona és la següent:

Taula 4. Assignació de longituds d'ona en sentit horari

Enllaç	Trànsit	Portadores
AB	1	λ_1
BC	2	$\lambda_1\lambda_2$
CD	2	$\lambda_1\lambda_2$
DA	2	$\lambda_1\lambda_2$
AC	1	λ_3
CA	1	λ_3
DB	1	λ_4

A continuació podem veure l'esquema de xarxa per a l'anell amb sentit horari.

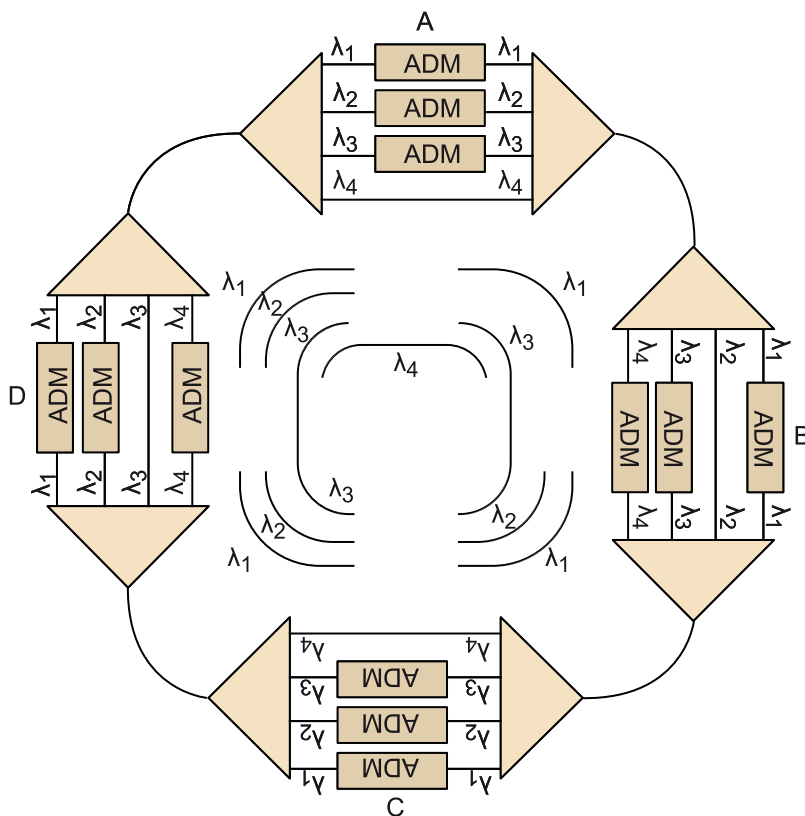


Figura 26. Esquema de la xarxa en anell (sentit horari)

Fixem-nos en l'esquema proposat: en els nodes A i C no afegirem ni traurem informació de λ_4 , i en els nodes B i D no afegirem ni traurem informació de λ_3 . Per tant, a cada node es pot eliminar un *add drop multiplexer*.

2) Assignació de longituds d'ona per l'anell amb sentit antihorari

La taula d'assignació de longituds d'ona és la següent:

Taula 5. Assignació de longituds d'ona en sentit antihorari

Enllaç	Trànsit	Portadores
BA	1	λ_1
CB	1	λ_1
DC	2	$\lambda_1\lambda_2$
AD	1	λ_1
BB	1	λ_2
AC	1	λ_3
CA	1	λ_3

A continuació podem veure l'esquema de xarxa per a l'anell amb sentit antihorari.

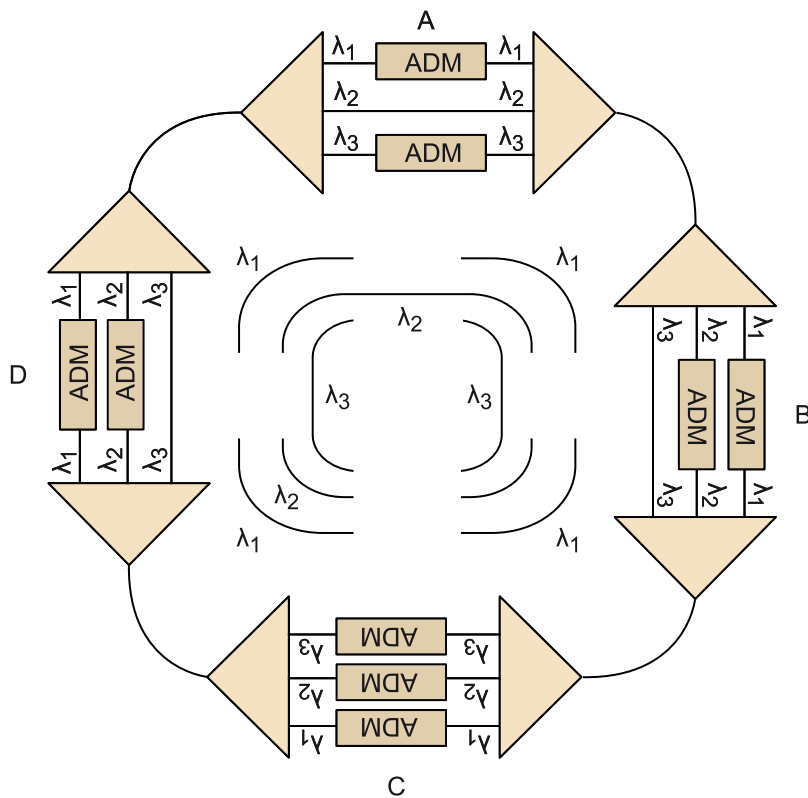


Figura 27. Esquema de la xarxa en anell (sentit antihorari)

Fixem-nos en l'esquema proposat: en el nodes A no afegirem ni traurem informació de λ_2 , i en els nodes B i D no afegirem ni traurem informació de λ_3 . Per tant, es pot eliminar un *add drop multiplexer* als nodes A, B i D.

1.6.2. Exemple II

Disposen d'una xarxa en anell bidireccional que queda definit per figura següent, on es representa només l'anell en què la informació flueix en sentit horari. Els ADM que es mostren a cada node de la figura s'utilitzen, és a dir, no són redundants. Tant l'anell horari com l'antihorari suporten un sistema WDM de quatre portadores cadascun amb un trànsit simètric entre nodes. En tots els enllaços entre els nodes tenim les quatre portadores assignades, per tant, no queden canals lliures del sistema WDM.

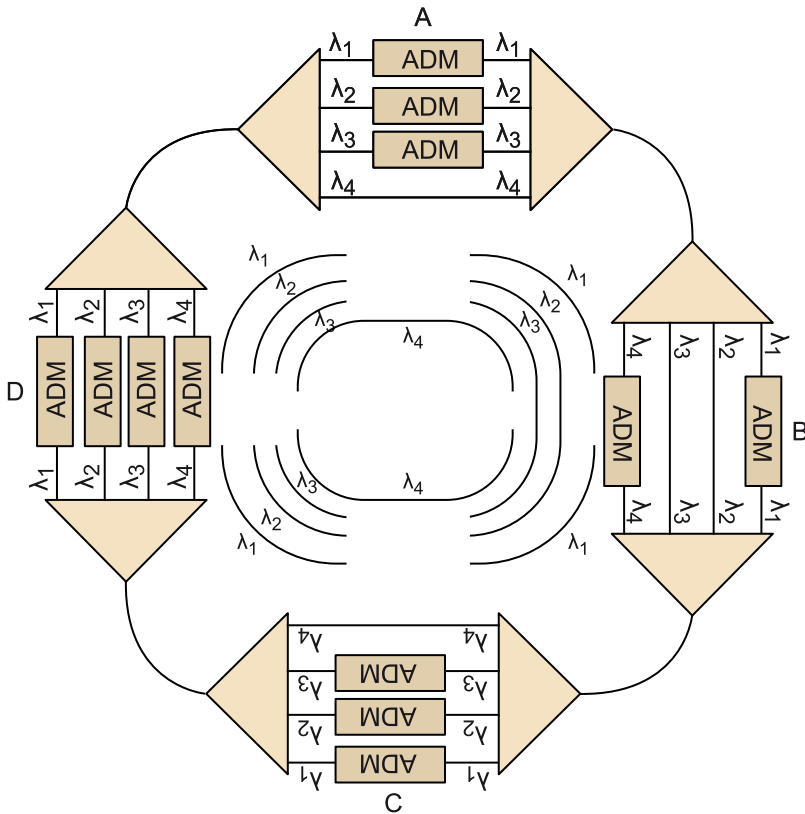


Figura 28. Esquema de la xarxa en anell

A partir de figura deduiu la matriu d'assignació de trànsit entre nodes.

Tal com s'indica, l'anell és bidireccional, això significa que tenim un anell de fibra que funciona en sentit horari i un anell en sentit antihorari. En la figura tenim representat només l'anell tenint en compte un sentit, l'anell en sentit contrari tindrà la mateixa distribució de nodes i d'ADM que el que tenim representat, ja que el trànsit és simètric.

Sobre l'esquema de xarxa i veient la distribució d'ADM en cada node, traçarem els enllaços que hi ha entre nodes. Si en un node trobem un ADM a la longitud d'ona de la qual estem traçant l'enllaç, voldrà dir que aquell node serà font i destinació del trànsit d'aquella longitud d'ona. Si en un node trobem que no hi ha ADM a la longitud d'ona de la qual estem traçant l'enllaç, voldrà dir que aquell node ni treu ni afegeix trànsit a la portadora d'aquella longitud d'ona.

Cal tenir en compte, tal com diu l'enunciat, que en tots els enllaços entre els nodes tenim les quatre portadores assignades. Per tant, no queden portadores sense assignar entre nodes.

Una vegada coneixem els diferents enllaços de l'anell, podem fer una taula amb els enllaços, el trànsit suportat per aquests i l'assignació de portadores.

Taula 6. Assignació de longituds d'ona

Enllaç	Trànsit	Portadores
AB	1	λ_1
BC	1	λ_1
CD	3	$\lambda_1\lambda_2\lambda_3$
DA	3	$\lambda_1\lambda_2\lambda_3$
DB	2	λ_4
AC	2	$\lambda_2\lambda_3$

Cal notar que el sentit dels enllaços de la taula anterior és sempre en sentit horari. A partir de la taula anterior podem emplenar la part de la matriu de trànsit que correspon al sentit horari. Tenint en compte que els enllaços tenen un trànsit bidireccional i simètric podem emplenar la resta de matriu de trànsit.

Taula 7. Demanda de trànsit

	A	B	C	D
A	-	1	2	3
B	1	-	1	2
C	2	1	-	3
D	3	2	3	-

2. Topologies de fibra fins a la llar (FTTH)

Les xarxes d'accés constitueixen el darrer segment de la xarxa d'un operador de telecomunicacions abans d'arribar a l'usuari final. Actualment, les xarxes d'accés fix es basen principalment en cables de coure. Aquests cables van ser originalment instal·lats per a la transmissió analògica de senyals a baixa freqüència amb l'única finalitat de donar servei de telefonia. A causa de la seva disponibilitat, amb l'adveniment de la comunicació de dades entre ordinadors, aquestes línies de coure han estat utilitzades també per a la transmissió de senyals digitals. Amb tot i això, la seva capacitat és limitada i, per tant, aquesta part de la xarxa d'accés constitueix el que es coneix com a *bottleneck* o coll d'ampolla.

Durant molts anys, s'han fet prediccions optimistes de forma recurrent, que deien que la fibra òptica ben aviat s'estendria fins a les cases, més que res pels beneficis potencials que ofereix aquesta tecnologia. Per desgràcia, aquestes visions han acabat sucumbint a les realitats de l'economia, la regulació i l'interès dels principals operadors en la persistència i explotació de les infraestructures existents.

Avui en dia, el concepte de fibra fins a la llar (FTTH) s'està convertint en una realitat, mentre que les noves aplicacions estan a l'espera, a punt per a usuaris potencials: intercanvi de fitxers, vídeo sota demanda, videoconferència i televisió sobre IP. L'entreteniment, però, no és l'únic ús de l'amplada de banda, sinó que també es poden tenir beneficis socials i ambientals a partir d'una bona infraestructura que ofereixi banda ampla: telemedicina, *e-learning*, teletreball, càmeres de seguretat amb connexió a Internet i serveis de monitoratge remot d'energia. Malgrat que aquestes són les aplicacions que ara com ara es veuen evidents, també en poden aparèixer de noves en un futur més proper, capaces de millorar la nostra qualitat de vida. Així, la innovació contínua i, segons el que es creu, les necessitats d'amplada de banda continuaran creixent; cosa que fa que, ara per ara, només les tecnologies de fibra fins a la llar siguin les clares candidates per a donar servei amb l'amplada de banda demanada.

La demanda de velocitat per part de l'usuari s'espera que sigui més i més gran en un futur pròxim. Precisament, el 1998 Jakob Nielsen va predir que l'amplada de banda mitjana per usuari s'incrementaria en un 50% per any. Amb les dades de què es disposa avui, es veu com s'ha anat complint durant els darrers anys. És important remarcar que, en cas que continuï aquesta tendència, s'espera que el 2020 cada usuari demani una amplada de banda mitjana d'1 Gb/s.

Nota

FTTH és l'abreviatura de l'anglès *fiber to the home*.

Nota

IP és l'abreviatura de l'anglès *Internet protocol*.

Enllaç recomanat

Si voleu saber més sobre la llei de Nielsen, podeu veure l'enllaç següent:
<http://www.nngroup.com/articles/niensens-law-of-internet-bandwidth/enlla%E7>

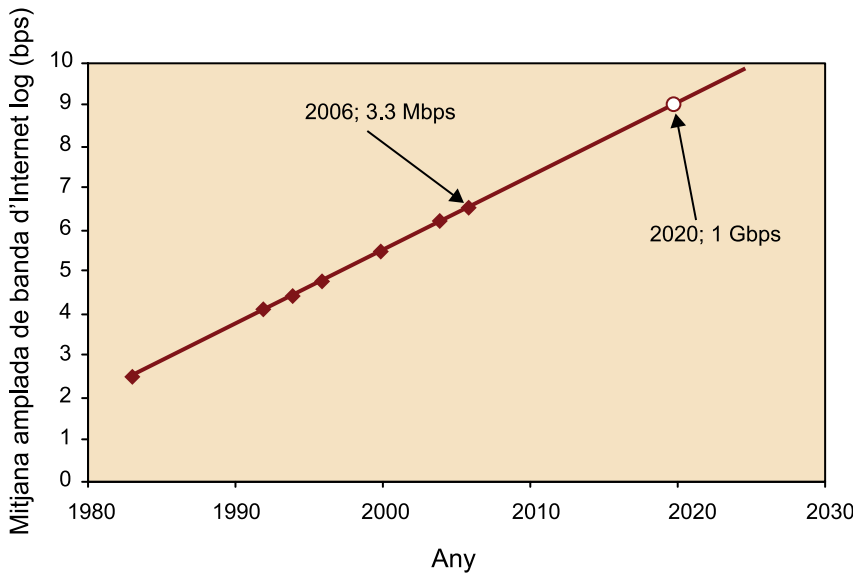


Figura 29. Predicció de la llei de Nielsen sobre l'amplada de banda i dades obtingudes fins a 2006 (punts quadrats)

Amb la clara finalitat de donar suport a les necessitats i serveis mencionats anteriorment, els darrers anys s'han proposat una sèrie de tecnologies, cadascuna amb una sèrie d'avantatges i inconvenients. Les taules 8 i 9 enumeren les solucions disponibles per a les aplicacions del mercat d'accés.

Fins fa pocs anys, la solució adoptada per a donar accés de banda ampla als usuaris va ser la de reaprofitar l'amplada de banda dels cables de coure ja instal·lats i acostar la fibra òptica cada cop més a prop de l'usuari final. Aquest va ser l'objectiu de les tecnologies de fibra fins a la vorera (FTTC). El problema que tenen és que estan molt limitades per la capacitat del coure, per la qual cosa per a augmentar l'amplada de banda (i la velocitat del servei) només es pot fer disminuint la distància màxima coberta per la xarxa d'accés. Per exemple, VDSL2 pot proporcionar 100 Mb/s per usuari, però només a una distància màxima de 300 m.

Nota

FTTC és l'abreviatura de l'anglès *fiber to the curb*. La majoria d'aquestes tecnologies donaven (i donen) servei basant-se en les populars tècniques xDSL.

Taula 8. Tecnologies actuals per al servei de banda ampla basades en cable de coure

	ADSL				VDSL				
	Basic	+	2	2+	Basic		2		
Velocitat de baixada (Mb/s)	3	8	15	20	13	26	52	30	100
Distància (km)	3	3	6	1,5	1,5	1	0,3	1	0,3

Taula 9. Tecnologies actuals per al servei de banda ampla basades en fibra òptica

	BPON	GPON	EPON
Velocitat de baixada (Mb/s)	155,52	1.244,16	
	622,08	2.488,32	1.000
	1.244,26		

	BPON	GPON	EPON
Distància (km)	20	20	10

Aquesta és la raó per la qual la fibra fins a la llar ha aparegut i s'està convertint en una realitat en moltes regions del món. En primer lloc van aparèixer enllaços de fibra punt a punt (PtP), mentre que últimament les xarxes òptiques passives (PON) punt a multipunt són emprades per a implementar la fibra fins a la llar, principalment a l'Àsia i als Estats Units. La primera generació de PON (principalment els estàndards GPON i EPON) ofereix amplades de banda de gigabit per segon, típicament compartida entre unes quantes desenes d'usuaris. En aquests sistemes, l'amplada de banda efectiva garantida a l'usuari és de 40-80 Mb/s, ja que la velocitat de bit és compartida entre usuaris del mateix segment, per exemple, 32.

Precisament ara estem vivint el desplegament de les xarxes FTTH, basades en les normes GPON i EPON. Però els ens d'estandardització estan treballant per a incloure sistemes FTTH de més capacitat. Per exemple, l'IEEE ha acabat recentment la norma P802.3av 10G-EPON, mentre que l'ITU també té pràcticament acabada la norma XG-PON de 10 Gb/s. En aquests sistemes, l'amplada de banda garantida per usuari serà de 150-300 Mb/s aproximadament, atès que la velocitat de 10 Gb/s també és compartida entre els usuaris d'un mateix segment, típicament 32.

En el futur, les següents generacions de PON estaran disponibles (de la mateixa manera que hem tingut diverses generacions d'xDSL), amb el clar objectiu d'aconseguir una capacitat més gran, un cost més baix i de donar nous serveis.

Així, per a una millor comprensió del que està passant, ens centrarem a proporcionar una visió clara de quines són les tecnologies i arquitectures que es poden trobar en les xarxes òptiques d'accés actuals.

2.1. Punt a punt

Les xarxes òptiques d'accés punt a punt sorgeixen de l'extensió dels enllaços de llarga distància, que també es realitzen d'aquesta manera. Un exemple és el que es mostra en la figura 30. Típicament es fa servir una sola fibra en cada direcció de l'enllaç. Així, una fibra s'utilitza per a la comunicació descendent, mentre que una segona fibra es fa servir per a la comunicació ascendent. Això vol dir que un gran nombre de connexions punt a punt requeriria molts components actius, a més d'un cable que contingués moltes fibres. Per tant, els costos d'instal·lació i manteniment serien prohibitius comparats amb una xarxa tradicional de distribució basada en coure.

Nota

PtP és l'abreviatura de l'anglès *point to point* i PON, de *passive optical network*.

Nota

IEEE és una associació dedicada a la innovació i estandardització. La sigla correspon al seu nom en anglès: Institute of Electrical and Electronics Engineers. ITU és la Unió Internacional de Telecomunicacions, una entitat d'estandardització en l'àmbit mundial. La sigla també correspon al seu nom en anglès: International Telecommunications Union.

Com a conveni, es diu que la comunicació descendent (o de baixada) és aquella que va de la centralita als usuaris, mentre que la de sentit ascendent és aquella que va dels usuaris cap a la centralita.

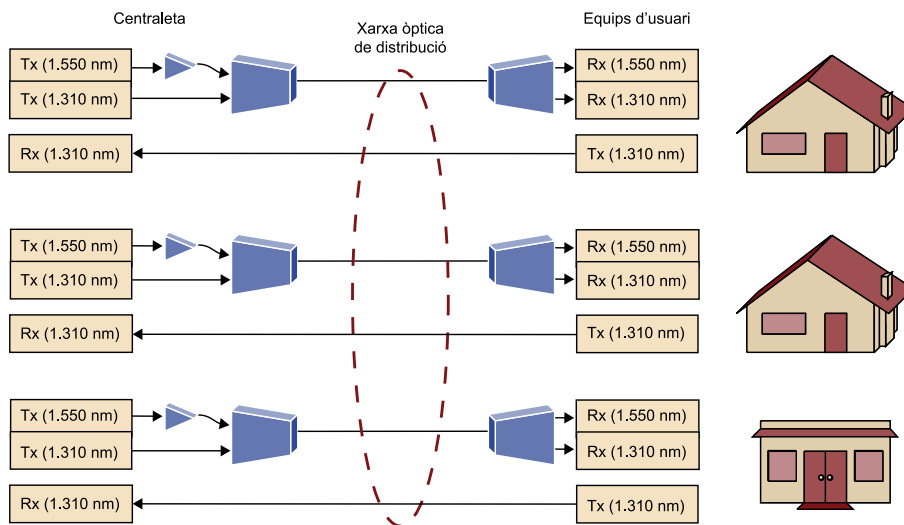


Figura 30. Xarxa òptica passiva amb arquitectura punt a punt

Pel que fa a l'amplada de banda, en una xarxa punt a multipunt no es comparteix entre els diferents usuaris, perquè cada abonat té els seus propis transmissor i receptor dedicats en la centralita. Això vol dir que per a un sistema STM-16/OC-48¹ (que normalment s'utilitza en aquestes xarxes punt a punt), la velocitat de bit entregada a cada client és de 2.488,32 Mb/s.

A més, aquestes arquitectures no preveuen cap mena de multiplexació d'usuaris per divisió de longitud d'ona, per la qual cosa només se serveix un sol canal per fibra. En un principi, la comunicació es realitza en dues longituds d'ona diferents:

- 1.310 nm per a la veu i les dades digitals,
- 1.550 nm per al vídeo analògic (principalment, distribució de televisió per cable).

Noteu que, per tant, l'enllaç de 1.550 nm és unidireccional, mentre que el de 1.310 nm també té la seva fibra de tornada cap a la centralita.

Pel que fa als transmissors i receptors, cal dir que es fa servir una modulació d'intensitat. Com que les longituds d'ona estan fixades segons els serveis, i les velocitats de transmissió no són excessivament altes, es fan servir làsers de modulació directa com a transmissors. Respecte a la recepció, es passa per un filtre òptic (per a seleccionar la longitud d'ona depenent del servei) i es fa servir una fotodetecció directa, sense cap mena de preamplificador òptic. Per això, per a cobrir un bon marge d'atenuació de la xarxa, cal un fotoreceptor de baixa sensibilitat, per exemple, un que estigui basat en fotodíode d'allau o APD.

⁽¹⁾STM-16/OC-48 és l'estàndard de l'ITU per a transmissió de dades orientat a xarxes de llarga distància.

Nota

APD és l'abreviatura de l'anglès *avalanche photodiode*.

Una altra característica interessant d'aquestes xarxes és el fet que no hi ha ampliació òptica en la planta de distribució, per la qual cosa cada enllaç òptic queda limitat a una distància aproximada de 100 km. Com que les xarxes d'accés típiques solen tenir distàncies màximes de fins a 20 km, utilitzar arquitectures de punt a punt per a aquestes aplicacions significa perdre una gran quantitat de recursos i diners. Per aquest motiu, les arquitectures de xarxa que es fan servir de manera més àmplia són aquelles amb esquemes de connexió punt a multipunt.

2.2. Punt a multipunt: xarxes òptiques passives

L'arquitectura de xarxa punt a multipunt sorgeix de la necessitat d'una alternativa a les xarxes punt a punt. En la figura 31 podeu veure un esquema. Bàsicament estan compostes per una centralleta i un arbre de fibra on a cada branca hi ha un usuari connectat. La xarxa de distribució òptica inclou una fibra d'alimentació (en anglès, *feeder*), una etapa de distribució (divisor de potència de la figura 31) i diverses fibres que connecten amb l'usuari final. A diferència de l'arquitectura punt a punt, els clients comparteixen l'accés a la centralleta utilitzant una multiplexació en el domini temporal (TDM). Així, com més gran és el nombre d'usuaris connectats, l'amplada de banda efectiva per usuari es redueix.

Nota

TDM és l'abreviatura de l'anglès *time division multiplexing*.

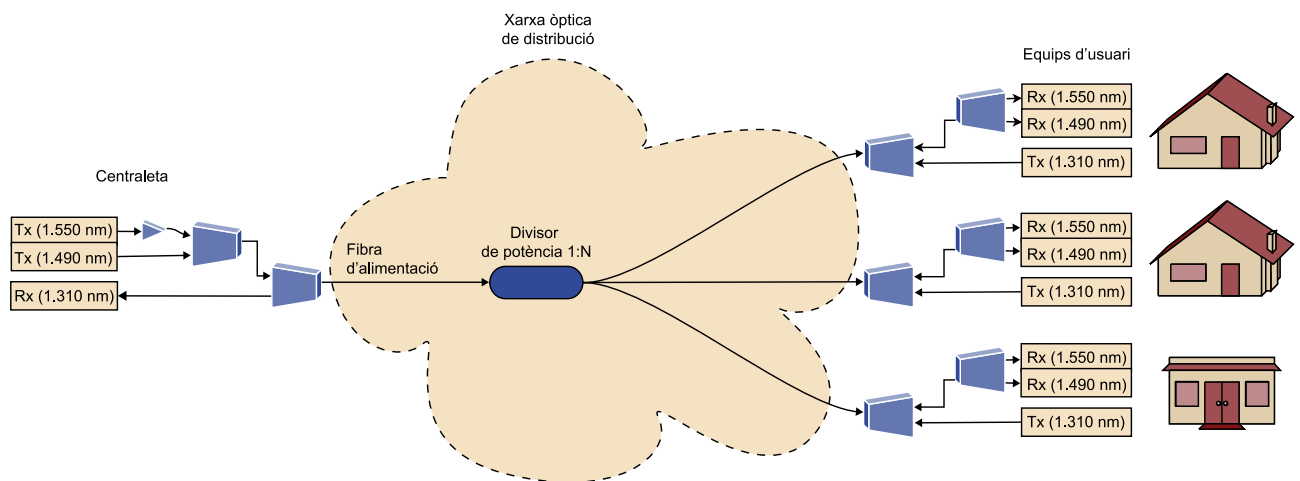


Figura 31. Xarxa òptica passiva amb arquitectura punt a multipunt

Malgrat que les xarxes punt a punt també són passives, quan en la bibliografia es parla de PON o xarxes òptiques passives en general és per a referenciar arquitectures punt a multipunt.

Per la seva popularitat, les implementacions de xarxes punt a multipunt són les més regulades per les organitzacions d'estandardització. Concretament, les normes més populars són les següents:

- EPON (suportada pel grup IEEE Ethernet), i
- GPON (suportada per l'ITU).

Tal vegada la diferència més gran entre les dues normes resideix en la seva arquitectura de protocol. GPON ofereix ATM per a veu, Ethernet per a dades i una encapsulació patentada per a altres serveis. EPON, en canvi, fa servir IP per a transmetre dades, veu i vídeo.

Malgrat aquestes diferències, totes dues normes s'implementen amb transmissors i receptors de modulació d'intensitat i detecció directa. De la mateixa manera que en les xarxes punt a multipunt, les velocitats de transmissió no són excessivament altes, per la qual cosa es fan servir làsers de modulació directa i baix cost (per exemple, làser de cavitat Fabry-Pérot). Respecte a la recepció, és idèntica a les xarxes punt a punt i es fa servir un filtre òptic seguit d'una fotodetecció directa i sense cap mena de preamplificador òptic.

A continuació comentarem breument aquests estàndards i les seves noves versions (10G-EPON i XG-PON) i n'assenyalarem les característiques principals: la relació de divisió (és a dir, el nombre màxim d'usuaris que poden servir), la distància màxima, les longituds d'ona utilitzades i el tipus de xarxa de dades.

2.2.1. Estàndards despleats: gigabit PON i gigabit Ethernet PON

Com s'ha dit abans, GPON és un estàndard que suporta una solució multiprotocol de transport. Els circuits virtuals s'estableixen per a diferents tipus de serveis utilitzant tecnologia ATM. Aquest tipus de transport ofereix una alta qualitat de servei, però implica també una sobrecàrrega significativa perquè cal establir els circuits virtuals per a cada tipus de servei.

Quant al nombre d'usuaris a servir, GPON preveu relacions de divisió de 16, 32 i 64, cosa que vol dir que aquest és el nombre màxim de clients als qual es pot donar servei en una sola xarxa. Malgrat que la distància típica en PON és de 20 km, la distància màxima especificada per GPON pot ser de fins a 60 km. Nogensmenys, els equips GPON estan dissenyats per a unes pèrdues d'enllaç màximes de 30 dB, per la qual cosa 60 km és una distància poc suportada per a donar servei a 32 usuaris.

De la mateixa manera que en l'arquitectura de xarxa que acabem de descriure, cada usuari està connectat a una sola fibra i per a aconseguir comunicació simultània en tots dos sentits es fan servir longituds d'ona diferents per als sentits de comunicació ascendent i descendent. Precisament, el marge entre 1.260 nm i 1.360 nm (centrat a 1.310 nm) està reservat per a la comunicació

Bibliografia recomanada

Sobre EPON:

G. Kramer (2004). *Ethernet Passive Optical Networks*. McGraw-Hill.

Sobre GPON:

M. Hajduczenia; H. J. A. da Silva (2009, juny). "Next generation PON systems - current status". A: *Proceedings of the International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2009)*.

Nota

ATM és un concepte per a possibilitar la transferència de dades de mode asíncron i inclou la multiplexació per divisió en temps. És l'abreviatura de l'anglès *asynchronous transfer mode*.

Nota

La comunicació simultània en tots dos sentits també s'anomena *full-duplex*.

ascendent, mentre que el rang de 1.480 nm a 1.500 nm es fa servir per a la comunicació descendent. També GPON conserva la superposició de vídeo analògic utilitzat en les arquitectures punt a punt, que es col·loca en la banda que va de 1.550 nm a 1.560 nm.

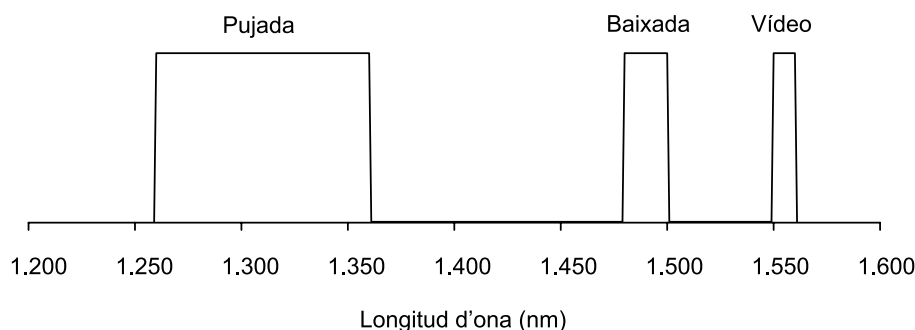


Figura 32. Ocupació de longituds d'ona de GPON i EPON

Finalment, pel que fa a la velocitat de connexió, són compatibles diverses velocitats de dades. Aquestes es mostren en la taula 10. Bàsicament es preveuen dos tipus de velocitats de baixada (1.244,16 Mb/s i 2.488,32 Mb/s). Aleshores, per a cadascun d'aquests casos hi ha diverses proporcions asimètriques i simètriques que es poden utilitzar en el sentit ascendent, des de 155,52 Mb/s fins a 2.488,32 Mb/s. Amb tot i això, les velocitats més utilitzades corresponen a la combinació de 2.488,32 Mb/s en sentit descendent i 1.244,16 Mb/s en sentit ascendent.

Taula 10. Velocitats suportades per GPON

Baixada	Pujada
1.244,16 Mb/s	155,52 Mb/s
1.244,16 Mb/s	622,08 Mb/s
1.244,16 Mb/s	1.244,16 Mb/s
2.488,32 Mb/s	155,52 Mb/s
2.488,32 Mb/s	622,08 Mb/s
2.488,32 Mb/s	1.244,16 Mb/s
2.488,32 Mb/s	2.488,32 Mb/s

EPON, en canvi, proporciona connectivitat per a qualsevol tipus de comunicació per paquets basada en IP o d'altre tipus. Com que els dispositius Ethernet són a totes les parts de la xarxa, sia de forma local a casa i/o en tot el camí a través de les xarxes troncales regionals, nacionals i mundials, la implementació d'EPON pot arribar a ser altament rendible des del punt de vista de protocol.

Pel que fa al nombre d'usuaris a servir, EPON preveu coeficients de divisió de 16 i 32, aquest darrer amb conjunció amb el fet de codificar les dades per a la correcció d'errors. El codi corrector especificat és l'RS(255,239), que pot corregir els errors de transmissió convertint una probabilitat d'error en el bit de 10^{-4}

(pitjor cas) en una probabilitat d'error de 10^{-15} . En EPON, ambdues relacions de divisió es poden utilitzar per a cobrir la distància màxima, especificada en 20 km.

Finalment, EPON fa servir el mateix marge de longituds d'ona que GPON: per a la comunicació ascendent, el marge de 1.260-1.360 nm; per a la comunicació descendent, els 1.480-1.500 nm, i els 1.550-1.560 nm per a la difusió de vídeo analògic. Les velocitats de dades suportades són d'1 Gb/s per a totes les direccions de l'enllaç, tant en sentit ascendent com en sentit descendent.

Com a punt final, cal dir que el que s'ha presentat aquí és només una descripció molt qualitativa de com funcionen aquestes normes, si hi voleu aprofundir una mica més, recomanem que feu un cop d'ull als estàndards en qüestió.

2.2.2. Estàndards en desplegament: 10G-EPON i XG-PON

La norma 10G-EPON (definida com a IEEE std 802.3av) es va iniciar amb l'objectiu d'afegir velocitats de fins a 10 Gb/s a la norma EPON. Per tal d'aconseguir una actualització sense problemes, se suposa que els tres tipus de velocitats de trànsit següents poden coexistir en la mateixa xarxa passiva:

- Simètric de 10 Gb/s en sentit ascendent/descendent
- Asimètric de 10 Gb/s en sentit descendent i 1 Gb/s en sentit ascendent
- 100% compatible amb EPON, amb velocitat simètrica d'1 Gb/s en sentit ascendent/descendent

Els senyals descendents es transmeten des de la centraleta en bandes de longituds d'ona diferents en funció de la velocitat. Així, 1 Gb/s es transmet als 1.480-1.500 nm, mentre que a 1.575-1.580 nm s'hi transmeten 10 Gb/s. En l'equip receptor de l'usuari se selecciona un senyal o altre mitjançant l'ús d'un filtre òptic.

D'altra banda, els senyals ascendents es transmeten en una banda de longitud d'ona similar i amb un cert encavalcament (1.260-1.360 nm per a 1 Gb/s i 1.260-1.280 nm per a 10 Gb/s) en els terminals d'usuari. Com que la multiplexació es realitza en el domini temporal, per a rebre senyals ascendents consecutius que tenen diferents velocitats i potències (procedents d'equips d'usuaris diferents amb diferents nivells de potència), a la centraleta es necessita un doble receptor capaç de rebre aquestes ràfegues.

Enllaços recomanats

En els enllaços següents us podeu baixar totes dues normes en format PDF:

Especificacions de medi físic de G-PON:
http://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e%20id=T-REC-G.984.2-200303-I!!PDF-E%20type=items

Especificacions de capa d'accés de G-PON:
http://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e%20id=T-REC-G.984.3-200803-I!!PDF-E%20type=items

Especificacions d'Ethernet (inclou EPON): <http://standards.ieee.org/about/get/802/802.3.html>

Referència bibliogràfica

K. Tanaka; A. Agatha; Y. Horiuchi (2010). "IEEE 802.3av 10G-EPON standardization and its research and development status". *IEEE / OSA Journal of Lightwave Technology* (vol. 4, núm. 28).

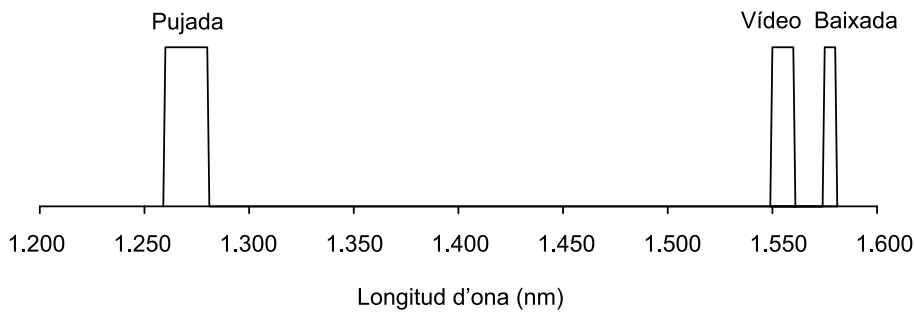


Figura 33. Ocupació de longituds d'ona comuna entre 10G-EPON i XG-PON

En la norma 10G-EPON també es considera la superposició de vídeo analògic, així com també va ser inclòs en EPON (utilitzant la banda de 1.550 nm a 1.560 nm). A més, 10G-EPON utilitza un codi corrector d'errors de guany més gran, el Reed-Solomon (255,223), per a reduir al màxim el cost dels transceptors òptics. La coexistència de 10G-EPON i EPON es pot aconseguir mitjançant l'ús d'aquestes especificacions i fent servir un algoritme dinàmic d'assignació d'amplada de banda a doble velocitat (que quedaria fora de la norma). D'aquesta manera els operadors de xarxa podrien actualitzar els sistemes PON sense problemes.

Per la seva banda, l'ITU acaba de desenvolupar la norma XG-PON Q2/15, que s'enfoca a velocitats de 2.488,32 Mb/s per al sentit ascendent i 9.953,28 Mb/s per al descendent. En aquest cas, s'estudien les funcionalitats següents:

- Internet d'alta velocitat,
- emulació i/o simulació de serveis tradicionals,
- IPTV, i
- xarxa de serveis a mòbil (amb el requisit afegit de sincronització de temps entre centraleta i terminal d'usuari).

Per a tot això, la migració de manera suau des de GPON és un dels requisits. Ara com ara, l'abast màxim entre centraleta i els terminals d'usuari s'estableix en 20 km i 40 km, mentre que la seva extensió a 60 km es diu que s'afegirà en una versió revisada.

L'assignació de longituds d'ona en XG-PON és la mateixa que la de distribució IEEE 10G-EPON, de manera que els components òptics puguin ser comuns entre ambdós estàndards. A més, s'espera que el marge de longituds d'ona de XG-PON es pugui augmentar en un futur, per a emplenar també la regió de 1.290-1.330 nm per a la comunicació ascendent i els 1.480-1.500 nm per al flux de dades descendent. En qualsevol cas, l'assignació específica de longituds

d'ona ha de permetre que, per a un cas concret, tant XG-PON com 10G-EPON coexisteixin en la mateixa fibra sense superposicions de longituds d'ona entre ells.

De la mateixa manera que en IEEE 10G-EPON, la qüestió de com implementar un algoritme de correcció d'errors és un dels temes importants. En aquest cas concret, es fa servir el codi RS(248, 216) per a la baixada, que relaxa la probabilitat d'error objectiu a 10^{-3} . Per a la pujada es fa servir l'RS(248, 232), que relaxa la probabilitat d'error objectiu a 10^{-4} .

Les pèrdues màximes entre la centraleta i els terminals d'usuari s'especifiquen sobre els 35 dB, per la qual cosa molts dels operadors de xarxa que ja hagin desplegat la generació anterior de PON, podrien reutilitzar la infraestructura de fibra ja existent.

Una característica important que s'està discutint és el fet de si cal incloure també la multiplexació per divisió de longitud d'ona perquè les xarxes siguin capaces de servir a més usuaris. En el moment actual, sembla que no és probable que aparegui una revisió d'XG-PON en aquest sentit, per la qual cosa caldrà esperar a un nou estàndard per a incloure aquest tipus de multiplexació.

Igual que en l'apartat anterior, volem recordar-vos que aquesta és només una descripció qualitativa dels estàndards i que, si voleu entrar més en detall sobre el seu funcionament, us recomanem que us els mireu amb calma.

Exemple: Càlcul de la cobertura d'una xarxa XG-PON

En aquest exemple veurem com es calcularia la cobertura d'una xarxa d'accés, per exemple una que compleixi l'estàndard XG-PON.

Si consulteu la normativa de capa física d'XG-PON, veureu que s'especifiquen molts tipus de xarxa, cadascuna pensada per a cobrir un marge d'atenuació determinat. Per a aquest exemple ens fixarem en la xarxa estesa de classe E2b.

Així, tindrem que la centraleta emet una potència entre els 14,5 dBm i els 16,5 dBm, i que en la baixada s'especifica una sensibilitat de -21,5 dBm per a la probabilitat d'error objectiu de 10^{-3} . Respecte a la pujada, trobem que el terminal d'usuari transmet a una potència que està entre 2 dBm i 7 dBm, i que la sensibilitat en recepció s'especifica com a -33,5 dBm per a la probabilitat d'error objectiu de 10^{-4} . Per aquest motiu, en tots dos casos (pujada i baixada), estarem tenint una cobertura d'atenuació mínima de 35 dB.

D'aquestes pèrdues que cobreix la xarxa, hem de descomptar 6 dB per a tenir en compte altres degradacions que ens poden afectar el sistema:

- **Relació d'extinció.** En una modulació real, sempre tindrem una relació d'extinció que en aquest estàndard es defineix com a més gran de 8,2 dB. Per tant, en el pitjor cas de relació d'extinció estarem tenint una penalització en sensibilitat lleugerament per sobre d'1 dB.
- **Dispersió i no-linealitats de la fibra.** En un principi, la dispersió és un paràmetre que no afectarà gaire la comunicació, pel fet de transmetre a relativament poca distància. Respecte a les no-linealitats, és possible tenir una certa penalització per bé que estem transmetent a una potència bastant alta a la baixada, però per a aquesta velocitat i sense senyals a longituds d'ona properes no és un efecte important. Amb tot, podem deixar un marge d'1 dB addicional per a tenir en compte aquestes degradacions.

Enllaços recomanats

Des dels enllaços següents us podeu baixar totes dues normes en format PDF:

Especificacions de medi físic de XG-PON:
http://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e%20id=T-REC-G.987.2-201010-I!!PDF-E%20type=items

Especificacions de capa d'accés de XG-PON:
http://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e%20id=T-REC-G.987.3-201010-I!!PDF-E%20type=items

Especificacions de 10G-EPON: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.3av-2009.pdf>

- **Variacions en la fabricació dels dispositius.** Sempre es poden tenir variacions entre les prestacions dels dispositius reals respecte dels seus fulls d'especificacions, i per això se solen deixar 2 dB de marge per a compensar aquest efecte.
- **Envelliment de l'enllaç.** Amb el pas dels anys, un determinat enllaç perd prestacions de funcionament, que es poden traduir en increments d'atenuació. En general, se solen deixar 2 dB de marge per a aquest terme.

Tenint en compte aquests factors, ens queda un marge net de 29 dB d'atenuació per a treballar i dimensionar la xarxa. A partir d'aquí és possible fer el càlcul de la distància màxima i el nombre d'usuaris tenint en compte que sempre haurem de complir:

$$A(\text{dB}) = L \cdot \alpha + 3\log_2 N \quad (6)$$

Lectura de la fórmula (6)

$A = 29$ dB: marge d'atenuació que hem fixat

L : distància màxima (en km)

α : pèrdues de la fibra (en dB/km)

N : nombre d'usuaris.

Noteu que considerem que N ha de ser sempre una potència de 2, pel fet que els divisors de potència es fabriquen concatenant acobladors 50:50. Per tant, per a servir a un nombre d'usuaris que no sigui potència de 2, haurem de dimensionar la xarxa per tal que N sigui la potència de 2 immediatament superior.

Per exemple, si volem cobrir un veïnat de 100 llars, haurem de dimensionar la xarxa amb $N = 128$, perquè l'altre valor vàlid per sota seria $N = 64$ i ens quedariem curts.

Pel que fa a la resta, podem considerar que despleguem una fibra monomode estàndard, amb pèrdues per atenuació de $\alpha = 0.25$ dB/km. Noteu que considerem les pèrdues iguals pel sentit ascendent i descendent per a simplificar els càlculs.

A continuació, podem expressar el nombre d'usuaris en funció de la distància màxima per al nostre cas. Això es pot veure de manera gràfica en la figura 34, els valors rellevants de la qual els podeu veure en la taula 11.

Taula 11. Nombre d'usuaris, velocitats mínimes per usuari (baixada i pujada) i les corresponents distàncies màximes

Nombre d'usuaris	Velocitat de baixada	Velocitat de pujada	Distància màxima
512	19,4 Mb/s	4,9 Mb/s	8 km
256	38,9 Mb/s	9,7 Mb/s	20 km
128	77,8 Mb/s	19,4 Mb/s	32 km
64	155,5 Mb/s	38,9 Mb/s	44 km
32	311 Mb/s	77,8 Mb/s	56 km

A partir dels resultats de la figura 34, cal tenir en compte un parell de coses. Primer, que si fem una xarxa amb un abast molt localitzat, el màxim nombre d'usuaris als quals es pot donar servei és de $N = 512$ (pèrdues de 27 dB). I és que si fem $N = 1.024$, les pèrdues pugen fins a 30 dB, 1 dB per sobre del marge de 29 dB que hem establert. En segon lloc, cal tenir en compte que segons l'estàndard XG-PON les relacions de divisió vàlides són sempre superiors a 32. Per això, estem limitats a una distància màxima de la xarxa de 56 km.

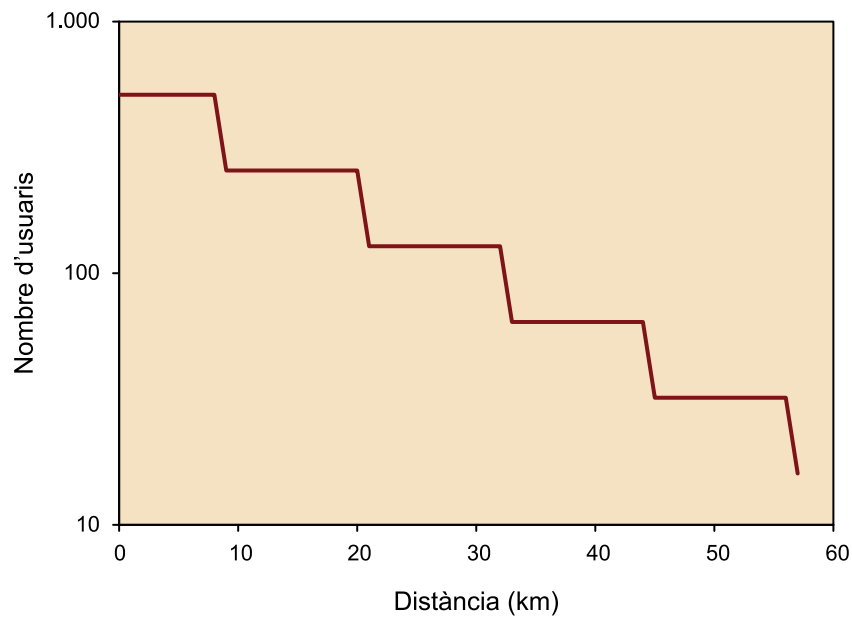


Figura 34. Nombre d'usuaris en funció de la distància màxima per a la xarxa de l'exemple proposat

Per acabar, a partir d'aquí podem trobar també les velocitats mínimes per usuari en cada cas. Com que la xarxa estandarditzada té fixades les velocitats agregades (2.488,32 Mb/s de pujada i 9.953,28 Mb/s de baixada), només hem de dividir-les pel nombre d'usuaris concurrents en el pitjor dels casos. Els valors resultants per a cada cas els podeu veure en la taula 11.

Bibliografia

Kramer, G. (2004). *Ethernet Passive Optical Networks*. McGraw-Hill.

Hajduczenia, M.; da Silva, H. J. A. (2009, juny). "Next generation PON systems - current status". A: *Proceedings of the International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2009)*.

Ramaswami, R.; Sivarajan, K. N.; Sasaki, G. H. (2008). *Optical Networks: A Practical Perspective*. Morgan Kaufmann.

Tanaka, K.; Agatha, A.; Horiuchi, Y. (2010). "IEEE 802.3av 10G-EPON standardization and its research and development status". *IEEE / OSA Journal of Lightwave Technology* (vol. 4, núm. 28).

