



Università degli Studi di Padova

Facoltà di Ingegneria

Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione

Laurea Triennale in Ingegneria delle Telecomunicazioni

# Questione Energetica nelle Reti Ottiche Passive

*di Pinesso Fabio*

Relatore *Professor Marco Santagiustina*

Anno Accademico 2012/2013



*Alla mia famiglia  
che mi ha sempre,  
pazientemente, sostenuto.*



# Indice

---

<b>Introduzione</b>	<b>9</b>
<b>1 La fibra ottica</b>	<b>12</b>
1.1 Legge di Snell	13
1.2 Struttura della fibra ottica	14
1.3 Vantaggi della fibra ottica rispetto ad altri supporti fisici	16
1.4 Sviluppi tecnologici dei dispositivi ottici	16
<b>2 Reti d'accesso ottiche</b>	<b>19</b>
2.1 Reti d'accesso - Principi generali	19
2.2 Reti d'accesso - Larghezza di banda	21

2.3	Evoluzione delle reti ottiche	24
2.4	Reti d'accesso su fibra ottica	27
2.5	Definizione dei termini FTTx	29
<b>3</b>	<b>Le reti ottiche passive</b>	<b>32</b>
3.1	Tipi di reti ottiche	32
3.2	Reti ottiche passive	35
3.2.1	<i>Architettura</i>	35
3.2.2	<i>Gruppi base delle PON</i>	37
<b>4</b>	<b>Gigabit PON</b>	<b>40</b>
4.1	Standard ITU-T G.984	40
4.2	Principi fondamentali della GPON	41
4.3	Caratteristiche della GPON	42
4.3.1	<i>Lunghezza d'onda di funzionamento</i>	42
4.3.2	<i>Forward error correction</i>	42
4.3.3	<i>Transmission containers</i>	43
4.3.4	<i>Allocazione dinamica di banda</i>	44
4.3.5	<i>Sicurezza</i>	45
4.4	La trasmissione nelle GPON	45
4.4.1	<i>Il formato del frame della GPON in downstream</i>	46
4.4.2	<i>Il formato del frame upstream della GPON</i>	47
4.4.3	<i>Metodi di incapsulamento</i>	48
4.5	Splitter ottico	48
4.5.1	<i>Perdita da divisione</i>	49
4.6	Architettura della rete di accesso ottica (link budget)	49

4.6.1	<i>Power budget</i>	50
<b>5</b>	<b>Ethernet PON</b>	<b>52</b>
5.1	Breve storia della EPON	52
5.2	Principi di funzionamento	53
5.3	Multi-Point Control Protocol (MPCP)	57
5.4	Emulazione per la conformità con l'architettura IEEE 802	60
5.4.1	<i>Struttura del frame nello standard IEEE 802.3</i>	61
5.4.2	<i>Point-to-Point Emulation (PtPE)</i>	61
5.4.3	<i>Shared-Medium Emulation (SME)</i>	63
5.4.4	<i>Combinazione delle modalità PtPE e SME</i>	65
5.5	Problemi di sicurezza	66
5.5.1	<i>Intercettazione</i>	67
5.5.2	<i>Theft-of-service</i>	68
5.5.3	<i>Crittografia</i>	68
5.6	10G-EPON	70
5.6.1	<i>Architettura</i>	70
5.6.2	<i>Power budget</i>	71
5.6.3	<i>Forward error correction</i>	71
5.6.4	<i>Compatibilità</i>	72
<b>6</b>	<b>WDM PON</b>	<b>74</b>
6.1	Oltre le TDMA PON	74
6.2	L'architettura della WDM PON	75
6.3	Coarse WDM PON	79
6.4	Power budget	81
6.5	WDM PON attiva	82

6.6 WDM PON ibride	83
6.7 Analisi delle WDM PON	83
<b>7 Problema Energetico</b>	<b>88</b>
7.1 Questione energetica nelle reti ottiche di nuova generazione	88
7.2 Lo sleep mode	90
7.2.1 <i>Power shedding</i>	92
7.2.2 <i>Dozing</i>	93
7.2.3 <i>Deep sleep mode</i>	93
7.2.4 <i>Fast sleep mode</i>	94
7.3 Studio del risparmio energetico nel “active state”	94
7.4 Architetture d'accesso ottiche di prossima generazione	98
7.4.1 <i>40G NRZ TDM-PON</i>	99
7.4.2 <i>STACKED 4x NRZ TDM 10G PON</i>	100
7.4.3 <i>WDM-PON</i>	101
7.4.4 <i>40G OFDM-PON</i>	101
7.4.5 <i>Fibra PtP (1G)</i>	102
7.4.6 <i>1G AON</i>	102
7.4.7 <i>Soluzioni ibride</i>	103
7.5 Risultati	103
7.6 Conclusioni	106
<b>Appendice 1 Glossario</b>	<b>109</b>
<b>Appendice 2 Bibliografia, riferimenti ad immagini e tabelle</b>	<b>121</b>

# Introduzione

---

Durante gli ultimi anni la richiesta di banda per i servizi di telecomunicazioni è aumentata enormemente, e continuerà a crescere ulteriormente (con il conseguente consumo energetico sempre più elevato degli impianti), ponendo di fatto nuove difficoltà e sfide all'industria delle telecomunicazioni che dovrà affrontare il problema del consumo energetico delle reti.

Si stima che tutte le attività connesse all'informazione e le tecnologie della comunicazione (ITC) contribuiscono per il 10% delle emissioni odierne di anidride carbonica, e che a causa dell'enorme crescita della larghezza di banda e dello storage, il consumo energetico sarà destinato ad aumentare. Di conseguenza, le soluzioni “a basso consumo” stanno diventando un tema cruciale sia per la lotta al riscaldamento globale sia per il controllo delle spese, pertanto gli enti di standardizzazione, i fornitori delle attrezzature e il mondo accademico, hanno cominciato a mettere come priorità il

“risparmio energetico” al fine di fornire soluzioni eco-sostenibili nel prossimo futuro.

Sono già stati fatti notevoli progressi per risolvere il problema delle comunicazioni eco-compatibili nell'attuale domanda di traffico: un approccio importante per ridurre il consumo energetico è quello d'utilizzare lo sleep mode per i nodi della rete. La task force per l'efficienza energetica di Ethernet (IEEE 802.3az) con l'approvazione della IEEE Std 802.3az-2010, ad esempio, pone uno sforzo industriale per ridurre il consumo energetico nei collegamenti in rame basati su Ethernet attraverso le modalità a risparmio energetico.

Nelle reti d'accesso in fibra ottica, come ad esempio le reti ottiche passive (passive optical network, PON), ci si aspetta un numero di collegamenti di utenti residenziali e commerciali per i servizi broadband con un ordine di grandezza pari al milione, col contributo risultante di circa il 70% sul consumo energetico totale nella rete fissa di comunicazione. Quindi, le preoccupazioni del crescente consumo energetico sono presenti soprattutto nelle reti d'accesso, poiché sono il primo segmento della rete di telecomunicazioni che connette il “central office” del provider all'utente, e richiede più potenza di una rete dorsale o metropolitana. Infatti, sebbene il consumo energetico individuale di un dispositivo di aggregazione o dorsale è ancora superiore a quello di una singola ONU o OLT, la stima menzionata è rappresentata dalla somma del gran numero di tali dispositivi (la maggior parte proviene dalla ONU).

Di conseguenza, l'industria e il mondo accademico hanno cominciato a studiare tecniche di risparmio per avere un efficace riduzione del consumo energetico anche nelle PON. Finora le “indagini” hanno portato alle tecniche ONU di deep sleep (sonno profondo, cioè spegnimento totale) o dozing (sonnecchiamento, spegnimento parziale) ma, in qualunque caso, tali approcci hanno portato le ONU ad entrare in modalità stand-by (e quindi a consumare meno potenza) solo per lunghi periodi di inattività. D'altra parte, una tecnica di risparmio energetico dinamico delle ONU potrebbe consentire di risparmiare potenza anche durante i periodi attivi di normale funzionamento.

In questa tesi verranno prima elencate e descritte le PON definite dagli organismi di

standardizzazione e successivamente verranno descritte le tecniche di sleep mode. Infine, verranno presentate alcune tecniche di risparmio energetico dinamico con alcuni risultati sull'efficienza di tali tecniche.

# CAPITOLO 1

## LA FIBRA OTTICA

---

Nell'approccio della comunicazione ottiche, l'informazione è trasportata da un punto ad un altro usando la luce come un veicolo ed un supporto fisico come mezzo, in grado di trasmettere dati con un alto bit rate su lunghe distanze, utilizzando una sorgente di luce (laser o LED), una fibra ottica di vetro come mezzo di trasmissione e un rivelatore. Il laser genera un impulso di luce ad una frequenza specifica (chiamato colore o canale) che viene acquisito dal lato ricezione dal rivelatore, e tradotto in un impulso elettrico, che viene quindi utilizzato dal dispositivo dal lato ricevente.

## 1.1 Legge di Snell

La fibra ottica può essere considerata come una guida d'onda dielettrica, realizzata in silice o polimero, di forma cilindrica che permette di convogliare e guidare al loro interno un campo elettromagnetico di frequenza sufficientemente alta, fenomeno che si basa sulla variazione dell'indice di rifrazione all'interno del materiale dielettrico.

Un raggio luminoso che incide su una superficie di separazione tra due mezzi di indici diversi ( $n_1 \neq n_2$ ) viene riflesso e/o rifratto, secondo la nota legge di Snell (o legge dei seni):

$$\frac{\sin(\theta_2)}{\sin(\theta_1)} = \frac{n_1}{n_2} \quad \text{o} \quad n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2) \quad (1.1)$$

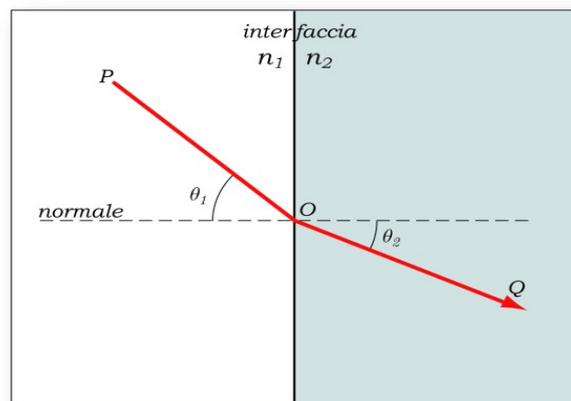


Figura 1.1 *Il fenomeno di rifrazione della luce all'interfaccia tra due mezzi con indice di rifrazione diverso.*

La velocità della luce varia sensibilmente a seconda del mezzo attraversato, nel vuoto tale velocità si indica con “c” e vale circa 300000 Km/s (299792,458 Km/s)

Si definisce indice di rifrazione il rapporto tra la velocità della luce nel vuoto c rispetto a quella nel mezzo v, e si indica con n:

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.2)$$

Nel passaggio da un mezzo più denso a uno meno denso (ovvero  $n_1 > n_2$ ) si può verificare facilmente che l'equazione 1.1 sia priva di soluzioni quando  $\theta_1$  supera un valore che viene chiamato “angolo critico”:

$$\theta_{crit} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (1.3)$$

Quando si presenta la condizione  $\theta_1 > \theta_{crit}$ , non appare alcun raggio rifratto: la luce incidente subisce una riflessione interna totale ad opera dell'interfaccia. Si genera un'onda di superficie, o onda evanescente (*leaky wave*), che decade esponenzialmente all'interno del mezzo con indice di rifrazione  $n_2$ .

## 1.2 Struttura della fibra ottica

I cavi di fibra ottica sono costituiti da strati multipli: come si può vedere dalla figura 1.2, dall'interno verso l'esterno, c'è prima un nucleo di vetro che permette alla luce di propagarsi e poi un rivestimento in vetro circonda il nucleo (cladding, o mantello). Questo a sua volta è circondato da rivestimento in plastica o in Kevlar e, a seconda dell'utilizzo della fibra, viene circondato con più strati protettivi. I cavi standard possono trasportare fino a 912 fibre e tali cavi sono messi nel terreno in condutture dei cavi. Quando le compagnie di telecomunicazione dispiegano i condotti in fibra in un percorso, preparano anche condotti vuoti per un uso successivo. Quindi le aziende possono posare 12 o 30 canali su una rotta e riempirne solo da 2 a 6, lasciando il resto per ampliamenti successivi. Sono disponibili anche cavi, usati per connettere gli utenti, che combinano doppi di rame intrecciato, cavi coassiali, CAT5/6 e più fibre.

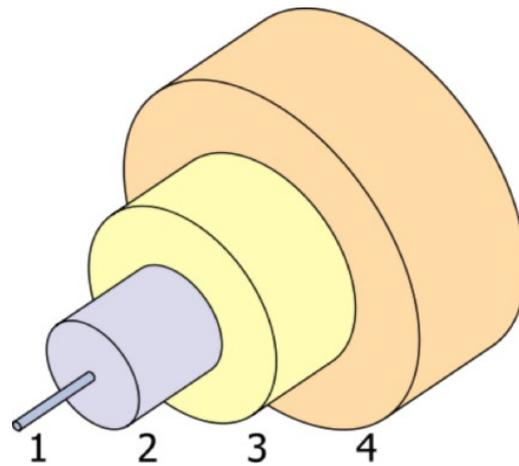


Figura 1.2 *Struttura di una fibra ottica: 1) Nucleo, 2) Mantello, 3) Rivestimento primario plastico e 4) Ulteriori strati/guaine protettive*

In figura 1.3 è rappresentato un cavo in fibra ottica, con la relativa struttura interna

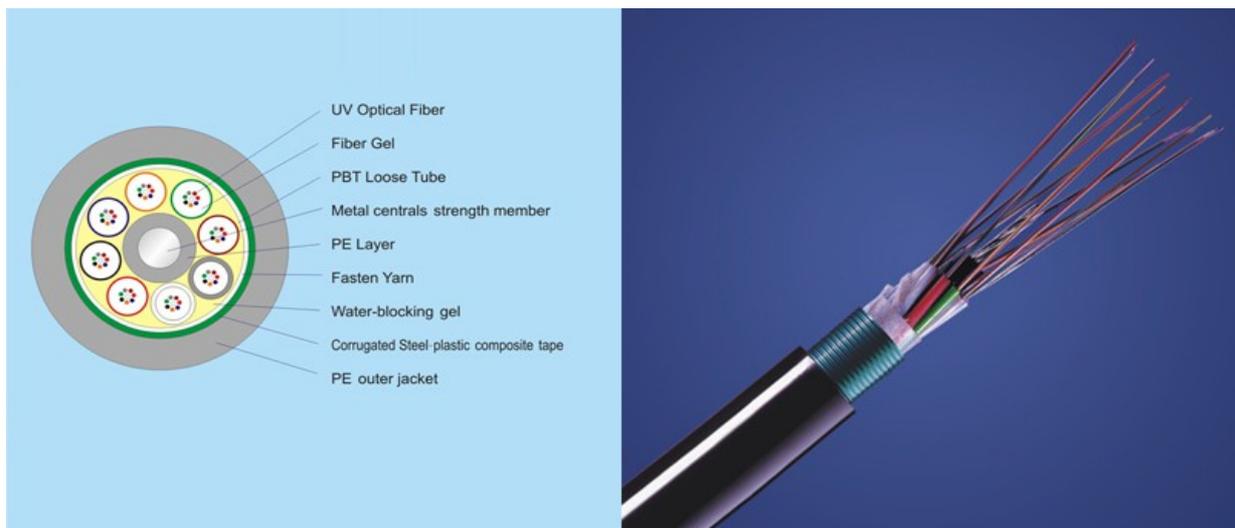


Figura 1.3 *Cavo di fibra ottica*

### 1.3 Vantaggi della fibra ottica rispetto ad altri supporti fisici

Ci sono diversi benefici che le fibre ottiche portano alle reti basate su di esse:

- La larghezza di banda in una rete in fibra è quasi illimitata. Rispetto alle reti satellitari, v'è una maggiore larghezza di banda e basso round-trip-time.
- La bassa attenuazione e dispersione significa che sono necessari pochi ripetitori e rigeneratori di segnale, se non nessuno.
- Nessuna influenza da campi elettromagnetici, alla corrosione, ecc, come nei cavi coassiali o doppini twistati e nessuna influenza dalla pioggia, fogliame, edifici, ecc, come con le comunicazioni wireless.
- Un migliaio di cavi telefonici in doppini twistati pesano 8000 Kg/Km, mentre 912 fibre pesano 495 Kg/Km. I cavi metallici occupano anche più spazio fisico di uno stesso ammontare di fibre.
- I costi di un cavo in fibra per chilometro sono paragonabili a quelli del doppino intrecciato o dei cavi coassiali di lunghezze simili. La capacità della fibra ottica è, tuttavia, significativamente superiore.

### 1.4 Sviluppi tecnologici dei dispositivi ottici

I vantaggi derivanti dall'uso della tecnologia ottica nei sistemi di comunicazione hanno portato ad un enorme sviluppo di dispositivi e sistemi ottici, in quattro generazioni.

- La prima generazione di sistemi a fibre ottiche, basati su componenti optoelettronici in arseniuro di gallio (GaAs), apparsi alla fine degli anni 70, utilizzavano onde elettromagnetiche con lunghezza d'onda corte di 0,85  $\mu\text{m}$  (prima finestra) e fibre ottiche

multimodali. La capacità del sistema era limitata dalla dispersione modale intrinseca di tali fibre multimodali.

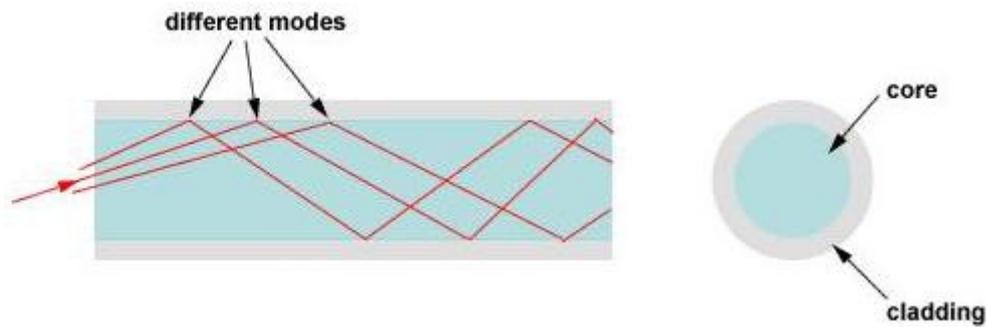


Figura 1.4 *Fibra multimodale*

- La seconda generazione (anni '80) usava una lunghezza d'onda maggiore, di  $1,3 \mu\text{m}$  (seconda finestra), con fibre monomodali le cui perdite vennero ridotte da  $4\text{dB/km}$  a  $0,5 \text{dB/km}$  e diodi ad emissione luminosa (light emitting diode, LED - o diodi laser; laser diode, LD) come sorgenti di luce. Queste modifiche portarono ad un aumento della capacità trasmissiva e della distanza.

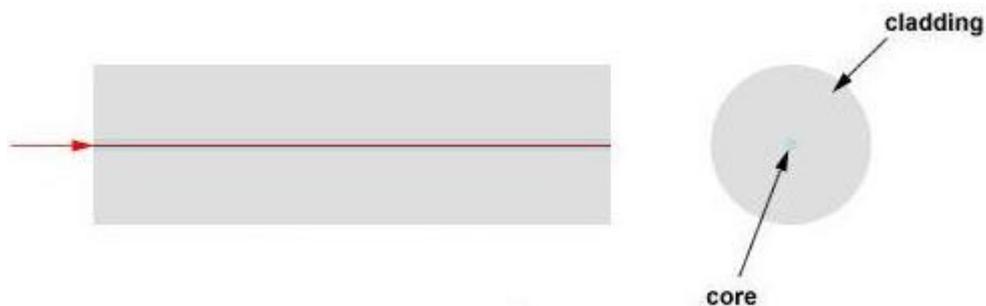


Figura 1.5 *Fibra monomodale*

- I sistemi di terza generazione utilizzavano una lunghezza d'onda di  $1,55 \mu\text{m}$  (terza finestra) e fibre monomodali a dispersione traslata (dispersion-shifted fiber, DSF), diminuendo così la perdita a  $0,22 \text{dB/km}$ , e con un LED a InGaAsP (Indium Gallium Arsenide Phosphide) o un laser a retroazione distribuita (Distributed Feedback Laser,

DFB) come sorgente. Con tale generazione si è potuto raggiungere un bit rate di 2,5Gbps su lunghe distanze, come nel caso di reti long-haul o sottomarine.

- La quarta generazione ha introdotto un nuovo tipo di fibra, cioè la fibra monomodale non-zero dispersion-shifted (NZDSF). Inoltre utilizza una lunghezza d'onda di 1,51  $\mu\text{m}$  o 1,58  $\mu\text{m}$  e la tecnologia WDM.

Per dare un'idea della velocità dello sviluppo, il primo collegamento commerciale in fibra ottica fu posato nell'aprile del 1977 a Long Beach in California con la capacità 6Mbps attraverso l'utilizzo di due fibre, una per direzione di comunicazione e già nei primi anni 80 le compagnie telefoniche cominciarono ad usare in maniera estesa le fibre per aggiornare e costruire le proprie infrastrutture. Nel 1990 nei laboratori Bell, venne trasmesso un segnale di 2.5Gbps senza rigenerazione per 7,5 Km e nel 1991, attraverso amplificatori ottici, i sistemi "totalmente ottici" potevano trasportare 100 volte più informazioni dei cavi con amplificatori elettrici. Nel 1991 iniziò anche lo sviluppo della fibra a cristalli fotonici, che non sfrutta la riflessione totale, ma la diffrazione periodica. Nel 1996 venne posato il primo cavo totalmente in fibra ottica (il TCP-5) con amplificatori ottici attraverso l'Oceano Pacifico, e l'anno successivo il FLAG (Fiber Optic Link Around the Globe) divenne la più grande rete nel mondo, fornendo l'infrastruttura per le applicazioni internet di prossima generazione.

I laser commerciali attualmente in vendita raggiungono la velocità di 10 Gbps, con le ultime tecnologie i 40 Gbps, e nelle recenti ricerche in ambito delle reti commerciali è possibile raggiungere i 106 Gbps con un singolo colore. Al momento sono disponibili in commercio sistemi che permettono di utilizzare 160 colori in una singola fibra, portando un totale di 3,2 Tbps per fibra, invece nei laboratori di ricerca è stata raggiunta anche la velocità di 25 Tbps.

# CAPITOLO 2

## RETI D'ACCESSO OTTICHE

---

### 2.1 Reti d'accesso - Principi generali

Sono definite reti d'accesso tutte quelle reti che connettono gli utenti e le piccole e medie imprese con le sedi centrali di commutazione e le reti di backhaul (reti metropolitane, reti geografiche, dorsali etc). Sono disponibili diverse tecnologie per collegare i clienti a tali centrali di commutazione: possono essere sia di tipo cablato o wireless, e fare uso di vari fili o di frequenze dello spettro. Esistono regole generali che determinano quanto bene certe tecnologie sono utilizzabili per i vari scopi, e il numero di bit che possono trasportare al secondo. Queste regole sono:

- Quando viene utilizzato maggiore banda, può venir inviato un maggior numero di bit.

Questo significa che più alta è la frequenza dello spettro usato per la trasmissione più alta sarà la velocità raggiungibile.

- Una banda di frequenza inferiore viaggia di più (per una data quantità di potenza) e, per il wireless, anche più facilmente, attraverso e intorno gli ostacoli, mentre maggiore è la banda, minore sarà la distanza percorsa e meno facilmente verranno attraversati e aggirati gli ostacoli.

- Maggiore è la potenza utilizzata, maggiore sarà la distanza percorribile.
- Quando si vogliono inviare più bit al secondo, è necessaria maggior potenza.
- La comunicazione su lunghe distanze è influenzata da maggior distorsione, interferenze e rumore.

- Maggiori saranno le linee metalliche in un cavo, maggiore sarà la distorsione, l'interferenza ed il rumore (ciò non è vero per la fibra ottica, dato che due fibre in un normale cavo non interferiscono l'una con l'altra).

- Più rumore, distorsione e interferenze significa meno bit al secondo.
- Più potenza significa più distorsione, rumore e le interferenze.
- Più utenti simultanei su una rete condivisa significa mediamente minore larghezza di banda.

Questi effetti tendono ad essere progressivi e cumulativi piuttosto che lineari.

Questo significa che se una connessione deve trasportare più bit al secondo, il compromesso consiste nell'utilizzare più lo spettro, più potenza, generando meno rumore, con migliore rilevamento del segnale, accorciando la distanza e migliore schermatura. Se si vuole immettere più bit in una connessione questo viene ottenuto utilizzando una combinazione di più spettri, riducendo il numero di utenti simultanei, accorciando la distanza, aumentando la potenza della linea, ecc.

## 2.2 Reti d'accesso - Larghezza di banda

La larghezza di banda è definita in megabit (Mbps) o gigabit (Gbps) al secondo, è costituito dalla combinazione di bit e tempo, ovvero il rate sostenuto, ed il cosiddetto “ultimo miglio” è il fattore determinante nella connessione dell'utente. Ci sono tre elementi che determinano la larghezza di banda:

- **Tempo:** il tempo è uno dei fattori più importanti nella decisione di fare uso di un particolare servizio. Recenti studi hanno dimostrato che gli utenti sono disposti ad attendere in media quattro secondi per una pagina web da caricare<sup>[1]</sup>, se richiede più tempo, il numero degli utenti in attesa diminuisce progressivamente. Inoltre, quando gli utenti devono condividere banda, per esempio perché accedono allo stesso server o condividono la stessa rete di accesso, il numero di utenti simultanei determinerà la velocità di download media per utente. Più veloce è la rete, maggiore è la probabilità che il download di un utente sia già finito prima che un secondo utente ne inizi uno successivo. Ciò si traduce in una non-competizione degli utenti per la stessa larghezza di banda cosicché da dare una migliore “User Experience” (UX). Una rete condivisa potrebbe quindi essere in grado di sostenere un gran numero di download brevi con un UX molto buono, ma potrebbe avere difficoltà a sostenere più flussi di ritmo sostenuto.

- **Bit:** la dimensione dei dati inviati e ricevuti influenza seriamente l'UX. È per questo motivo che vengono continuamente ricercate e sviluppate codifiche migliori e più efficienti. Sviluppi come l'introduzione delle codifiche mp3, MPEG 2 e 4 consentono d'avere file audio e video di dimensioni più piccole, che a sua volta consentono la riduzione della quantità di tempo necessario per accedere a questo contenuto. Questo sviluppo è rafforzato con l'introduzione di reti che consentono di scaricare maggiori quantità di dati.

- **Rate sostenuto:** la combinazione di Megabit e di tempo porta alla quantità di megabit al secondo che la connessione può sostenere. Questa caratteristica è particolarmente importante per le comunicazioni in tempo reale come VoIP, video, etc di modo che i

pacchetti siano accodati e che il ritardo rimanga entro un limite ragionevole, tale da non disturbare la comunicazione. Il rate sostenuto che una connessione può offrire influenzerà quali tipi di applicazioni sono possibili e quanti possono essere utilizzati in parallelo. Come mostra la Figura 2.1, i valori medi del traffico può variare fortemente (30%), se visualizzato su un orizzonte temporale di 100 millisecondi (si noti che minore è la scala temporale e più alta è la fluttuazione).

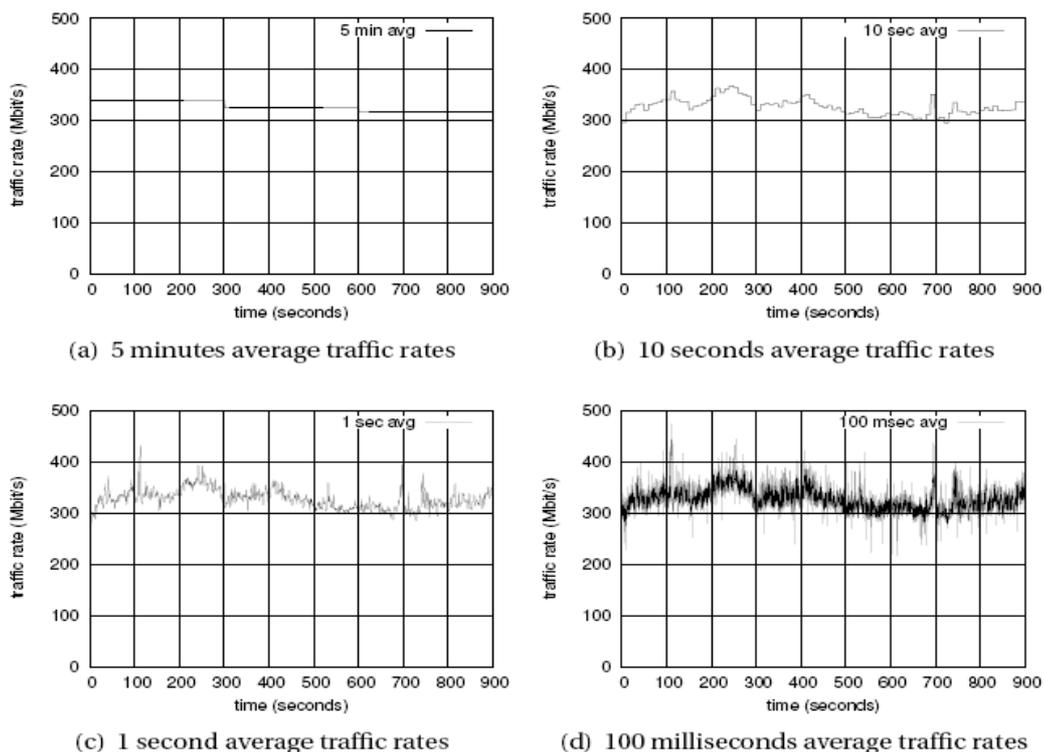


Figura 2.1 *Rate del traffico medio su scale temporali diverse*

La massima larghezza di banda effettivamente disponibile per l'utente finale che una connessione può sostenere sul collegamento fisico dipende dalle caratteristiche fisiche del collegamento stesso e dall'architettura di rete. Su alcune reti (wireless, via cavo e reti ottiche passive) gli utenti devono condividere la stessa rete fisica, e più gli utenti si contendono la stessa banda, meno della stessa mediamente sarà disponibile per utente. La condivisione può anche essere un problema nella parte backhaul della rete, dove ci potrebbe essere meno larghezza di banda (disponibile verso il nucleo della rete) di quella

che tutti gli utenti potrebbero generare singolarmente, anche se, statisticamente, è molto improbabile che tutti gli utenti avranno bisogno della massima larghezza di banda nello stesso momento. Tale improbabilità di utilizzo della banda consente alle aziende di telecomunicazioni di connettere più persone nella parte backhaul, senza ostacolare l'utilizzo della rete dai singoli utenti. Questo è tipicamente il caso in cui le persone utilizzano la rete per leggere le loro e-mail o navigare in rete (questo traffico è di tipo bursty): mentre un utente sta scaricando una pagina web o e-mail, gli altri utenti stanno leggendo e non utilizzando la larghezza di banda disponibile. Guardare i video e utilizzare i servizi peer-to-peer conduce ad un utilizzo meno bursty e più stabile della larghezza di banda (un servizio streaming-on-demand può gravare sulla rete per tutta la durata del film).

Il rapporto tra la quantità massima di banda necessaria se tutti gli utenti dovessero utilizzare la rete a velocità massima, e la larghezza di banda effettiva disponibile è noto come il “rapporto di contesa”, o “Contention Ratio”. Se il tasso è di 1:1, ciò significa che la rete non è “contesa”, quando è 1:10, significa che la larghezza di banda disponibile è condivisa con altri dieci connessioni. Le aziende di telecomunicazioni utilizzano modelli statistici su quante persone utilizzano la rete allo stesso il tempo di stimare un rapporto di contesa ideale.

La domanda è: di quanta banda ha bisogno un utente? La risposta non è solo dipendente dall'uso corrente, ma anche sull'utilizzo futuro previsto. Attualmente vi è una mancanza di dati nella letteratura scientifica sull'uso “normale” delle reti di telecomunicazione. L'unico studio scientifico conosciuto su questo argomento è stato fatto in Giappone<sup>[2]</sup>; esso mostra che circa il 10% degli utenti “in fibra” genera più di 2,5 Gigabyte al giorno nel traffico, ma non c'è netta separazione tra gli utenti che usano pesantemente la rete e utenti “normali”. Inoltre, vi è poca differenza tra l'utilizzo upstream e downstream, contrariamente alle ipotesi attuali, che vede l'utilizzo upstream minore del downstream.

## 2.3 Evoluzione delle reti ottiche

Le reti ottiche si sono evolute in parallelo con i progressi delle fibre ottiche. Per molti anni l'obiettivo principale è stato quello di sviluppare tecnologie per consentire la trasmissione a bit rate più elevati su distanze crescenti.

Le cosiddette reti ottiche di prima generazione sfruttavano solo i vantaggi delle fibre ottiche, lasciando all'elettronica tutta la commutazione e l'elaborazione dei segnali da eseguire. La richiesta di un aumento della banda insieme alla dispendiosità del cablaggio richiese la ricerca di un metodo per aumentare la capacità delle fibre esistenti, senza dover stenderne di nuove. Il primo approccio è stato quello di aumentare il bit rate sostenuto dall'implementazione di tecniche di moltiplicazione, come la moltiplicazione ottica a divisione di tempo (Optical Time Division Multiplexing, OTDM) e la moltiplicazione a divisione di lunghezza d'onda (Wavelength Division Multiplexing, WDM), per superare i deficit dell'elettronica ad alta velocità. Ciò ha portato ad una espansione su larga scala di reti a lunga portata, grazie al traffico crescente. La dense WDM (DWDM) rappresenta il miglior compromesso tra costi e capacità delle reti dorsali fornendo anche vantaggi per le MAN (Metropolitan Area Network). Successivamente, alla fine degli anni 80, la sostituzione dei rigeneratori elettro-ottici con amplificatori ottici introdusse ulteriori miglioramenti nei sistemi ottici.

Le reti ottiche di seconda generazione sono caratterizzate invece da una riduzione dell'uso dell'elettronica, raggiungendo un maggior grado di trasparenza, producendo una capacità di trasmissione effettivamente utilizzata (chiamata Throughput) più elevata, e consentendo alle reti ottiche di fornire più funzionalità, come ad esempio le funzioni di switching e routing. Inoltre, lo strato fisico delle reti di seconda generazione ottiche supporta collegamenti WDM e funzioni add/drop. Queste reti possono offrire tre tipi di servizi ai livelli più alti delle reti. Il primo di questi servizi è un servizio "lightpath", applicabile in reti WDM, in cui viene assegnata una lunghezza d'onda specifica di una

connessione tra due nodi. Il collegamento può essere impostato “up e down” su richiesta (Circuit Switched) o può essere permanente. Il secondo servizio è un servizio di circuito virtuale, un circuito di connessione commutata tra due nodi con una minore risorsa, che permette di gestire un multiplexing statistico o fisso. Il terzo è un servizio datagramma, che permette di trasmettere brevi pacchetti tra i nodi senza la necessità di creare connessioni esplicite.

Nel 1998 l'ITU-T (International Telecommunication Union-Telecommunication Standardization Sector) ha introdotto il concetto di rete di trasporto ottica (optical transport network, OTN), al fine di utilizzare il routing WDM ed eliminare gli effetti del cosiddetto “collo di bottiglia” elettronico nei nodi della rete, aumentando notevolmente la capacità della rete di trasmissione e la velocità dei nodi. La WDM-OTN utilizza dispositivi di moltiplicazione add-drop ottici (optical add/drop multiplexing, OADM) e dispositivi di cross-connection ottici (OXC) nei suoi nodi, eliminando in tal modo la conversione opto-elettronica.

Tuttavia la tradizionale OTN ha molti difetti e non può totalmente soddisfare le esigenze delle reti ottiche. Pertanto, nel 2001, l'ITU-T ha definito l'architettura della rete ottica a commutazione automatica (automatically switched optical network, ASON, figura 2.2). Vengono così introdotti concetti di “switching dinamico” e “meccanismo di cooperazione” tra i livelli: quindi le reti di comunicazione ottiche, oltre ad essere una rete di trasporto, include anche le funzioni di commutazione e di controllo.

Secondo l'architettura di rete ASON possono essere identificati tre i piani:

- un piano (o strato) di trasporto (transport plane, TP), contenente un dato numero di switch (ottici o altro) responsabili del trasporto dei dati degli utenti attraverso le varie connessioni. Tali switch sono connessi l'un l'altro attraverso un'interfaccia fisica (Physical Interface, PI)
- uno strato di controllo (control plane, CP), responsabile della gestione delle risorse e delle connessioni all'interno della rete, che consiste in una serie di controllori di connessione

ottica (Optical Connection Controller, OCC) interconnessi per mezzo delle NNI (Network to Network Interfaces).

- infine, uno strato di gestione (management plane, MP), responsabile della gestione del CP. Questo strato contiene gli “enti di gestione della rete” (Network Management Entity, NM) i quali sono connessi agli OCC del Control Plane con gli NMI-A (Network Management Interface for ASON Control Plane), e sono connessi ad uno degli switch del Transport Plane attraverso gli NMI-T (Network Management Interface for the Transport Network).

L'utente è collegato al Transport Plane attraverso un PI, e al Control Plane con un UNI (User Network Interface).

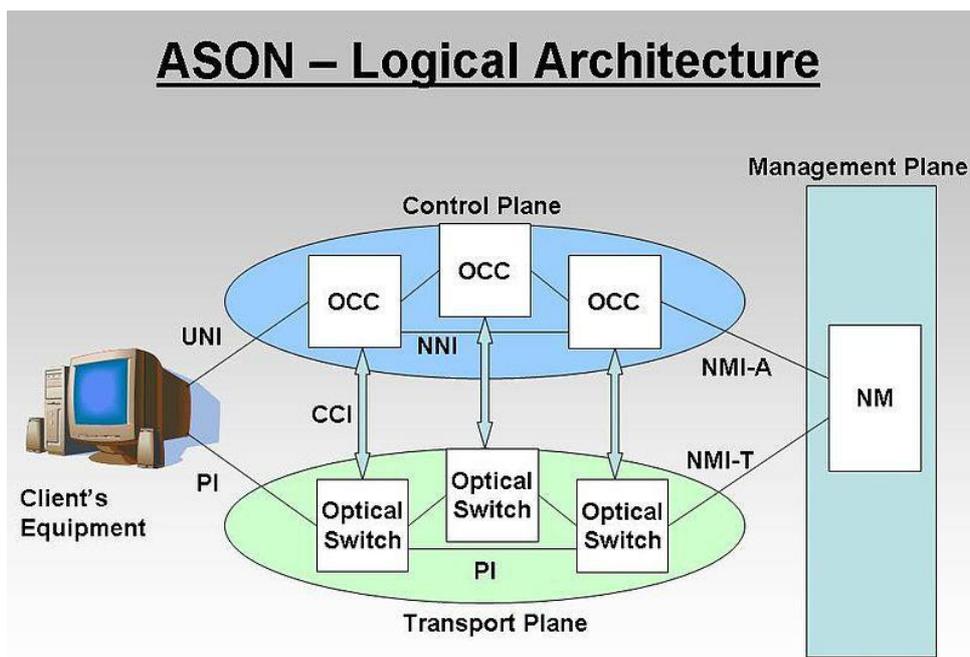


Figura 2.2 Architettura di una rete ASON

## 2.4 Reti d'accesso su fibra ottica

L'uso di nuove tecniche ha aggiornato continuamente le prestazioni delle OTN e di conseguenza, la rete d'accesso ha molti problemi come larghezza di banda ridotta, tassi di insuccesso/tassi di guasto ed elevati costi di funzionamento o manutenzione. I cavi in rame sono ancora i principali mezzi di trasmissione nelle reti di accesso e non sono in grado di supportare nuovi servizi e applicazioni, soprattutto multimediali e servizi a banda larga. Così, la rete d'accesso è diventata il collo di bottiglia delle reti di comunicazione, il cosiddetto “ultimo miglio”.

Le attuali tecnologie di accesso a banda larga, come ad esempio l'asymmetric digital subscriber line (ADSL) basata su linee telefoniche e il modem via cavo (cable modem, CM) basato sulla comune televisione via cavo (CATV), possono incontrare le esigenze di alcuni servizi come la navigazione web, email e così via. Tuttavia, non è in grado di soddisfare le esigenze di larghezza di banda dei servizi multimediali e servizi a banda larga, chiamato anche triple play, come ad esempio internet ad alta velocità, telefono IP e video broadcast, ecc.

Con la tecnologia ADSL il volume del flusso dati in upstream e downstream è asimmetrica, e tale asimmetria è fondamentale appropriata per applicazioni come la navigazione degli utenti in Internet e video-on-demand (VOD), ma non è applicabile alle reti di interconnessione locale (LAN). I servizi di accesso internet sono disponibili tramite la distribuzione ADSL con ATM/Ethernet ed il cliente finale è dotato di dispositivi remoti e ADSL collegati al digital subscriber line access multiplexer (DSLAM) presso il Central Office con cavi telefonici comuni. I dispositivi ADSL remoti forniscono l'interfaccia Ethernet per i computer degli utenti, mentre il DSLAM si collega con il provider di servizi Internet (internet service provider, ISP) di ATM (Asynchronous Transfer Mode) o Fast Ethernet (FE).

D'altra parte, il modem via cavo è un'altra tecnologia broadband con uplink e

downlink asimmetrico ed è adatto per fornire due tipi di servizi: la navigazione Internet ed il VOD. In questo caso, l'accesso ai servizi internet può essere offerto per mezzo di cavi ibridi coassiale-fibra (hybrid fiber-coaxial, HFC), un modem via cavo e l'Ethernet/ATM. L'HFC trasmette un segnale dati agli abbonati mentre il modem via cavo decodifica, demodula e trasmette tale segnale ad un personal computer tramite una porta Ethernet. Per l'uplink, il modem riceve il segnale dal PC e lo invia modulato e codificato ai dispositivi head-end attraverso l'HFC. La larghezza di banda del modem via cavo è maggiore di quella di ADSL. Tuttavia, quando un modem via cavo e l'HFC sono usati per costruire una rete, sorgono un sacco di problemi per quanto riguarda la stabilità, l'affidabilità, l'alimentazione, la gestione e la manutenzione.

In entrambi i casi, la larghezza di banda dei collegamenti della rete è condivisa tra tutti gli utenti e pertanto non possono offrire servizi a banda larga digitali quando il numero di utenti aumenta, poiché la larghezza di banda che viene assegnata a ciascun utente è molto limitata. Pertanto, la rete d'accesso ottica (optical access network, OAN) rappresenta la tendenza verso una rete d'accesso futura, in particolare, la tecnica di moltiplicazione ottica a divisione di codice (optical code division multiplexing, OCDM) può essere una soluzione per far fronte al problema delle risorse condivise.

Le reti di accesso ottiche possono essere suddivise in due categorie: la rete ottica attiva (active optical network, AON), e la rete ottica passiva (PON). La PON ha una architettura semplice e non ha elementi attivi nell'intero collegamento dalla sorgente alla destinazione. In Figura 2.3 sono mostrate diverse implementazioni dell'architettura PON, chiamate FTTx (fiber to the x), dove x ha significati diversi a seconda di dove arriva il collegamento ottico.

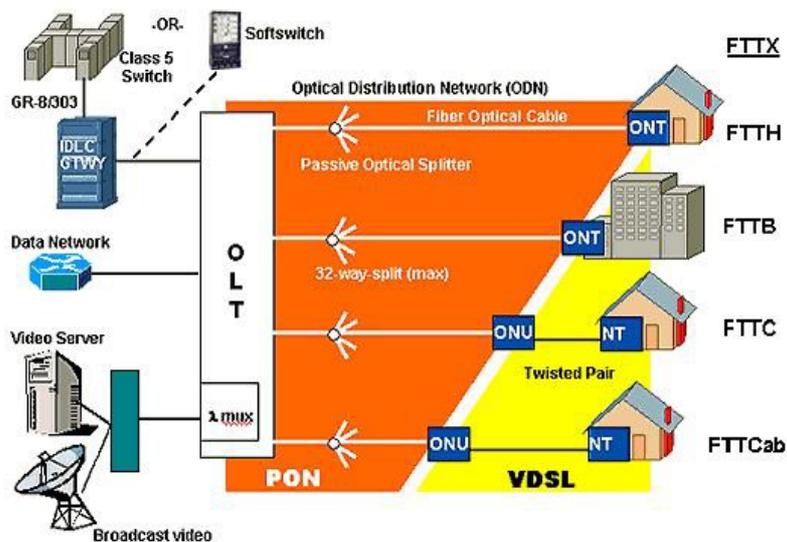


Figura 2.3 Esempi di FTTx: Fibre to the home (FTTH), fibre to the building (FTTB), fibre to the curb (FTTC), fibre to the cabinet (FTTCab).

## 2.5 Definizione dei termini FTTx

Il settore delle telecomunicazioni distingue diverse configurazioni. I termini più in uso oggi sono:

- FTTH - La *fiber-to-the-home* è un'architettura di comunicazione in fibra ottica che raggiunge direttamente l'abitazione dal Central Office. Una volta che la fibra è arrivata a destinazione, come ad esempio una scatola sulla parete esterna di una casa, il segnale può essere diramato in tutto l'ambiente con qualsiasi mezzo, compreso doppino, cavo coassiale, wireless, powerline, o fibra ottica. L'operatore italiano Fastweb ha lanciato il primo servizio "Fiber to the home" nel 2001. Utilizzando un'architettura Active Ethernet Point-to-Point, tale servizio forniva voce, video e dati per migliaia di case di abbonati in Italia con un collegamento in fibra simmetrica dedicata da 100MB. Fastweb utilizzava uno dei primi

gateway residenziali sia per le unità abitative multiple (MDU) che per le case residenziali, purchè fornite di terminali incorporati in fibra ottica, per consentire ai consumatori di condividere i servizi con una gamma di dispositivi elettronici di consumo intorno alla casa.

- FTTB - La *fiber-to-the-building* (o *fiber-to-the-basement*) è un'architettura che si applica necessariamente solo a quelle proprietà che contengono appartamenti. La fibra termina prima di poter realmente raggiungere gli abbonati che vivono nell'edificio, ma arriva comunque all'edificio. Il segnale viene convogliato per il rimanente tratto utilizzando qualsiasi mezzo non-ottico, compresi il doppino telefonico, il cavo coassiale, il wireless, o la powerline.

- FTTC - La *fiber-to-the-curb* è un'architettura di telecomunicazioni basata su cavi in fibra ottica che si collegano ad una piattaforma che serve diversi clienti. Ognuno di questi clienti è collegato a questa piattaforma tramite cavo coassiale o doppino telefonico. Il "marciapiede" (curb) è un'astrazione, e si può altrettanto facilmente dire un dispositivo montato su un palo o un armadio (cabinet) o un capannone di comunicazione, distante poche centinaia di metri dalla sede del cliente, tipicamente 300 m. Tale architettura consente l'erogazione di servizi a banda larga come internet ad alta velocità, con l'utilizzo di simili protocolli tra la piattaforma e l'abbonato, e può usare e infrastrutture esistenti dei cavi coassiali, dei doppiini twistati o della powerline per fornire il servizio "ultimo miglio", con conseguenti limitazioni di larghezza di banda.

- FTTCab – Simile all'FTTC, la *fiber-to-the-cabinet*, è un'architettura di telecomunicazioni basata su cavi in fibra ottica che si collegano ad un cabinet che serve un quartiere, ma tale cabinet (o pole) è più lontano alla sede dell'utente, in genere all'interno dei 1,5 Km. Permette l'erogazione di servizi a banda larga come Internet ad alta velocità. Tra il cabinet ed i clienti vengono utilizzati protocolli di comunicazione ad alta velocità

come l'accesso a banda larga via cavo (in genere DOCSIS) o una qualche forma di Digital Subscriber Line (DSL). Il flusso dati può variare secondo il protocollo utilizzato e secondo quanto vicino è il cliente al cabinet. Inoltre, l'architettura FTTCab usa spesso le infrastrutture esistenti dei cavi coassiali o dei doppiini twistati per fornire il servizio “ultimo miglio”, e per questo motivo è meno costosa da implementare. A lungo termine, tuttavia, il suo potenziale di banda è limitato rispetto alle architetture che portano la fibra ancora più vicina all'abbonato. Una variante di questa tecnica per i fornitori di servizi televisivi via cavo viene utilizzata in un sistema ibrido fibra-coassiale (HFC). A volte alla FTTCab è dato l'acronimo di *Fiber-To-The-Last-Amplifier*, quando vengono sostituiti i cavi coassiali lungo tutta la linea all'ultimo amplificatore (verso l'abbonato) con fibra ottica

## Riferimenti

- 1 [http://www.akamai.com/html/about/press/releases/2006/press\\_110606.html](http://www.akamai.com/html/about/press/releases/2006/press_110606.html)
- 2 "The Impact and Implications of the Growth in Residential User-to-User Traffic", Cho et. al., op.cit.

# CAPITOLO 3

## LE RETI OTTICHE PASSIVE

---

### 3.1 Tipi di reti ottiche

Abbiamo definito le reti di accesso come collegamenti che corrono dalle apparecchiature presso gli edifici degli abbonati (equipment at a customer's premise, CPE) alla struttura di commutazione più vicina, come una centrale di una compagnia telefonica (central office, CO), una estremità di testa CATV (CATV head end, CATV HE), un commutatore ATM o Ethernet, oppure qualsiasi altra interfaccia che conduca infine alla rete di telecomunicazioni globale. Una rete di accesso è una rete di collegamento tra il sito del abbonato e il sito principale del provider. Un perfetto esempio di una rete di accesso tradizionale è una rete di doppini per telecomunicazioni che collegano i singoli telefoni ad un CO.

Il termine "banda larga" si applica oggi ad una rete o ad un collegamento di trasmissione singolo, in grado di fornire trasmissioni ad alta velocità. Le reti d'accesso a banda larga possono essere suddivise in due classi principali: cablate e wireless. Le reti cablate includono una linea telefonica-linea basata su DSL (Digital Subscriber), linee elettriche, TV via cavo ibrido fibra-coassiale e reti di accesso ottiche. Le reti wireless contano oggi su tre diverse tecnologie basate su radio-frequenza e bande microonde, la gamma terahertz dello spettro e collegamenti ottici nello spazio libero, ma è ampiamente riconosciuto nel settore che, in questa fase, solo le reti cablate ottiche possono servire come soluzione più promettente per i problemi di accesso.

Le reti di accesso ottiche includono tre diverse tipologie: cablata, a cablaggio ibrido fibra-coassiale (HFC) e reti ottiche wireless. Le reti HFC sono state installate nel corso del decennio precedente per offrire TV via cavo nelle residenze e sono state ri-progettate negli ultimi dieci anni per renderle in grado di fornire connessioni internet ad alta velocità a tramite modem via cavo. La rete ottica wireless è ancora nella fase di sviluppo della banda larga, anche se di recente sono state pubblicizzate un certo numero di offerte commerciali.

Le reti ottiche cablate sono state sviluppate e distribuite in due versioni principali: le reti ottiche attive (active optical network, AON) e le reti ottiche passive (passive optical networks, PON). Una AON distribuisce componenti attivi e intelligenti lungo il percorso dal CO, o HE, presso gli impianti del cliente. Questi dispositivi attivi possono essere posizionati al bordo della rete di distribuzione, cioè vicino alla sede del cliente, per fornire una maggiore flessibilità nella fornitura di vari servizi, ottenendo prestazioni desiderate, e fornendo una migliore qualità del servizio (quality of service, QoS).

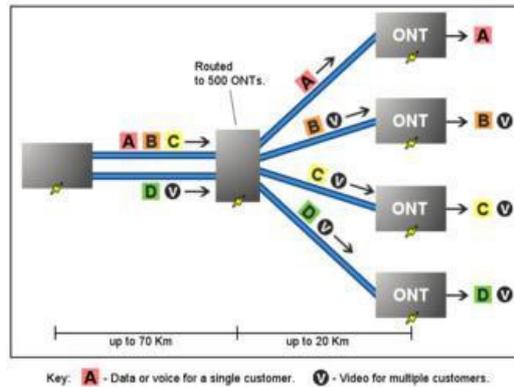


Figura 3.1 *Architettura di una rete ottica attiva*

L'architettura PON implica l'uso di componenti attivi (trasmettitori, ricevitori e amplificatori) solo alle estremità dei collegamenti di rete. L'intero impianto esterno (outside plant, OSP), chiamata anche rete di distribuzione ottica (optical distribution network, ODN), è passivo, da qui il nome rete ottica passiva. Essa consente di minimizzare l'utilizzo di fibre e il numero di ricetrasmittitori mediante l'uso di splitter passivi/accoppiatori. Quindi la PON è una tecnologia che riduce i costi operativi e di manutenzione, essendo anche molto trasparente, limitando la probabilità di errore di linea e dei dispositivi esterni, migliorando anche l'affidabilità dei sistemi, grazie al fatto che la PON può impedire gli effetti di interferenze elettromagnetiche e, come ultima considerazione, è adatta per segnali di qualsiasi formato e bit rate.

## 3.2 Reti Ottiche Passive

### 3.2.1 Architettura

L'architettura di base delle PON è relativamente semplice (figura 3.2): un terminale di linea ottica (optical line terminal, OLT) trasmette un segnale luminoso su una fibra ottica. Tale segnale ottico viene diviso da uno splitter, diramato in tante fibre ottiche quanti sono gli utenti e convertito in un formato elettronico da una unità ottica di rete (optical network terminal, ONU; chiamato anche terminale di rete ottica - optical network terminal, ONT) in cui l'output di questo dispositivo fornisce segnali elettrici ai customer premise equipment (CPE). Le apparecchiature opto-elettroniche attive si trovano solo agli estremi della rete, cioè nelle OLT e nelle ONU, mentre la rete di distribuzione ottica comprende solo componenti passivi. La disposizione fisica della PON implica che non è necessaria nessuna manutenzione sul campo, e pertanto, i costi di gestione sono minimi.

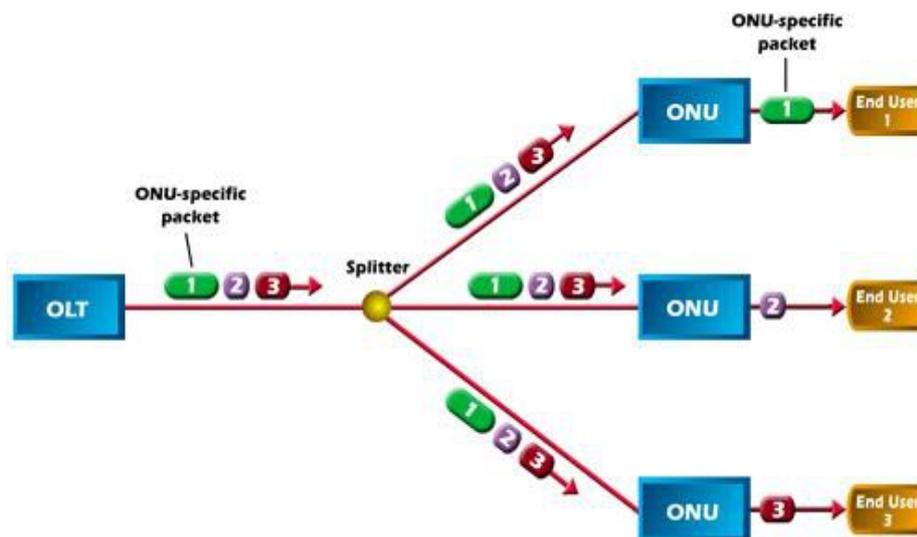


Figura 3.2 *Architettura di una rete ottica passiva*

Le OLT sono localizzate nei Central Office, HE o qualsiasi altro sito principale del

provider per cui il traffico viene convogliato fuori dalla PSTN, Internet, CATV, WAN e MAN. Qui il traffico in ingresso viene convertito al traffico locale per la consegna da e per, gli uffici o le case.

Come già discusso nel paragrafo 2.5, vi sono diverse varianti di distribuzione PON e differiscono solo per la lunghezza del doppino che va dall'ONU al cliente. In questa fase di sviluppo, non esistono soluzioni pratiche che consentono a un operatore di telecomunicazioni di eliminare completamente l'uso del doppino. Tuttavia, poiché la distanza di trasmissione su un filo di rame è molto breve, può essere utilizzata una versione DSL con velocità elevata, chiamata VDSL (o VHDSL, Very High-speed Digital Subscriber Line), per fornire una banda sufficiente per coprire tutte le esigenze del cliente.

Il principio di funzionamento dell'architettura di base di una PON richiede la condivisione dei dispositivi di rete tra il massimo numero di utenti, permettendo all'operatore di rete di dividere il costo di installazione e manutenzione. E cosa maggiore, se necessario, le architetture delle PON sono tali da consentire l'aggiunta di nuovi clienti.

La PON è una classica rete di trasmissione, e in quanto tale, deve costituire una topologia aciclica (per evitare feedback), ad esempio una topologia ad albero, bus o stella (figura 3.3). Oggi, la topologia fisica più adatta per la PON è ad albero, anche se possono essere utilizzate anche topologie a stella singola o gerarchica, e bus.

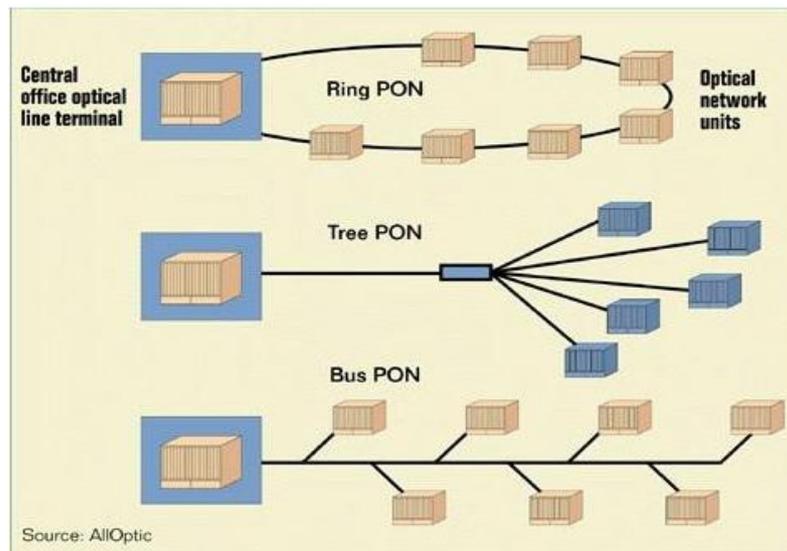


Figura 3.3 *Tipologie delle reti ottiche passive*

### 3.2.2 Gruppi base delle PON

Tutte le PON con multiplazione a divisione di tempo (TDM) possono essere suddivise in due gruppi: uno è il gruppo basato sul ATM (Asynchronous Transfer Mode), che comprende APON (ATM-PON), BPON (Broadcast PON) e la più recente GPON (Gigabit PON), e l'altro è il gruppo basato su Ethernet, che consiste nella EPON (Ethernet PON).

Il gruppo basato sul ATM deve il suo sviluppo alla iniziativa del consorzio full-service-access-networks (FSAN), un gruppo di aziende di telecomunicazioni leader a livello mondiale composta sia da operatori che produttori di apparecchiature. La FSAN di conseguenza ha sviluppato tre versioni del PON: l'APON, la BPON e la GPON. Il termine APON è riservato ad una PON dedicata alla consegna di voce e dati, mentre la BPON denota una versione estesa della rete originale arricchita con capacità di trasmissione e servizi aggiuntivi. La GPON è una versione PON in grado di trasportare traffico nell'ordine di Gbps. Tutti queste versioni PON basate sul ATM sono supportati dagli

standard ITU-T, chiamate “Raccomandazioni” che specificano l'architettura, le attrezzature ed i requisiti di trasmissione per le PON.

Storicamente, quando iniziò lo sviluppo delle PON (1995), l'ATM era sulla buona strada per diventare la tecnologia prevalente in tutti i tipi di reti di dati . Tuttavia, negli ultimi anni Ethernet è diventato lo standard di comunicazione dati universalmente accettato, estendendo il suo utilizzo dalle LAN alle MAN e anche alle WAN. Sembrò abbastanza logico estendere l'uso di Ethernet anche per le reti d'accesso, coprendo così tutte la scala di comunicazione dati con un solo protocollo. Per questo motivo molti produttori hanno sviluppato un'altra versione della PON: Ethernet su PON (EPON), sviluppato ed è supportato dalla IEEE, l'EPON è supportata dal lavoro della task force che si occupa dello standard IEEE 802.3ah.

La differenza fondamentale tra ATM ed Ethernet è che ATM offre un supporto migliore verso tutto il traffico legacy TDM, come ad esempio T/E e SONET/SDH, mentre Ethernet è una tecnologia di trasporto dati che supporta il traffico orientato all'IP. Il problema critico con ATM è che la produzione di componenti ATM oggi è ad un livello relativamente basso, e continua a diminuire, col risultato che i commutatori ATM e le schede di rete sono notevolmente più costose (circa otto volte) rispetto agli stessi componenti Ethernet. D'altra parte, Ethernet continua ad espandersi e, grazie al suo basso costo, questa tecnologia è diventata ubiquitaria, ma è anche interoperabile con un discreto numero di tecnologie legacy. In più, Ethernet è ora in grado di supportare il servizio voce e video, in aggiunta alla sua normale funzione di trasmissione dati, facendolo con un soddisfacente livello di qualità di servizio e infine, la lunghezza variabile del frame Ethernet contrasta vantaggiosamente con lunghezza fissa del frame dell'ATM per quanto riguarda la flessibilità di trasmissione dei vari tipi dati trasmessi.

L'Ethernet PON e la Gigabit PON (GPON) sono gli attuali standard TDM ottici della rete di accesso in cui la distanza fattibile per la fibra che trasporta il segnale dal/al OLT non supera i 20 e 60 km, per le rispettive tecnologie.

La WDM-PON, e l'ibrida TDM/WDM-PON che utilizzano l'Arrayed Waveguide Grating (AWG), sono altre tecnologie future per le reti di accesso ottiche.

# CAPITOLO 4

## Gigabit PON

---

### 4.1 Standard ITU-T G.984

La Gigabit Passive Optical Network (GPON) è una rete passiva ottica definita dalla serie di raccomandazioni ITU-T che va dalla G.984.1 fino alla G.984.7. La GPON ha una maggiore capacità rispetto alla APON e BPON ed è compatibile con gli standard precedenti.

Qui di seguito sono riportati gli standard che definiscono la GPON (in inglese):

G.984.1: Gigabit Passive Optical Network (GPON): General characteristics

G.984.2: Gigabit Passive Optical Network (GPON): Physical Media Dependent (PMD) layer specification

G.984.3: Gigabit Passive Optical Network (GPON): Transmission convergence layer

specification

G.984.4: Gigabit Passive Optical Network (GPON): ONT management and control interface specification

G.984.5: Gigabit Passive Optical Network (GPON): Enhancement band

G.984.6: Gigabit Passive Optical Network (GPON): Reach extension

G.984.7: Gigabit Passive Optical Network (GPON): Long reach

Tale rete è in grado di trasportare non solo il traffico Ethernet, ma anche ATM e TDM (incluso PSTN, ISDN, E1 ed E3) utilizzando il metodo d'incapsulamento GPON (GPON encapsulating method, GEM).

## 4.2 Principi fondamentali della GPON

Le apparecchiature di trasmissione attiva nella rete GPON consiste solo della terminazione della linea ottica (OLT) e l'unità di rete ottica (ONU). L'architettura logica di rete è la già discussa FTTx (par. 2.5). Partendo dalla sede centrale, un solo filamento in fibra ottica monomodale corre verso uno splitter passivo potenza ottica vicino alle abitazioni degli utenti semplicemente dividendo la potenza ottica in N percorsi separati per gli abbonati (possono variare da 2 a 64). Dallo splitter ottico, viene fatto correre verso l'utente (quindi una casa, uno stabile, ecc.) un singolo filamento in fibra monomodale. L'arco di trasmissione in fibra ottica dalla centrale verso ogni utente può arrivare ad essere ampio fino a 20 km.

Lo standard GPON definisce un gran numero di diversi tassi di trasmissione di linea per la direzione downstream e upstream.

Direzione	Bit Rate
Downstream	1244.16 Mbit/s
	2488.32 Mbit/s
Upstream	155.52 Mbit/s
	622.08 Mbit/s
	1244.16 Mbit/s
	2488.32 Mbit/s

Tabella 4.1 *Bit rate nominale della GPON*

Sebbene siano possibili tutte le combinazioni (eccetto il downstream a 1,2 Gbps e l'upstream 2,4 Gbps), i provider spesso offrono solo 1,2 Gbps in upstream e 2,4 in downstream.

## 4.3 Caratteristiche della GPON

### 4.3.1 Lunghezza d'onda di funzionamento

La gamma di lunghezze d'onda di funzionamento è di 1480-1500 nm per la direzione in downstream e 1260-1360 nm per la direzione upstream. Inoltre, le lunghezze d'onda 1550-1560 nm possono essere utilizzate in downstream per la distribuzione video RF.

### 4.3.2 Forward error correction

Il Forward Error Correction (FEC) è una tecnica di elaborazione del segnale che

codifica i dati in modo che gli errori possano essere rilevati e, se possibile, corretti. Col FEC, viene trasmesso con l'informazione originale anche dell'informazione ridondante e la quantità di tale informazioni è piccola, quindi non viene introdotto molto overhead. Il FEC si traduce in un aumento del link budget di circa 3-4 dB. Pertanto, può essere supportato un bit rate più elevato e una distanza più lunga dalla OLT alla ONU, nonché un maggiore numero di divisioni per un singolo “albero” PON.

### 4.3.3 Transmission containers

I transmission containers (T-CONT) sono utilizzati per la gestione (per migliorarne l'uso) dell'allocazione della banda upstream nelle GPON. L'ONU invia il traffico utilizzando uno o più T-CONT e tale meccanismo consente l'attuazione del QoS in direzione upstream.

Ci sono cinque tipi di T-CONT che possono essere assegnati agli utenti:

- Il T-CONT 1, che garantisce un'allocazione fissa della larghezza di banda per applicazioni time-sensitive (tipo VoIP);
- Il T-CONT 2, che garantisce assegnazioni fisse della larghezza di banda per le applicazioni non sensibili al fattore tempo;
- Il T-CONT 3 è mix di banda minima garantita con l'aggiunta di una banda non garantita supplementare;
- Il T-CONT 4 è un meccanismo “best effort”, il traffico viene allocato dinamicamente senza alcuna banda garantita;
- Il T-CONT 5 è mix di tutte le categorie di servizi.

### 4.3.4 Allocazione dinamica di banda

L'allocazione di banda dinamica (Dynamic bandwidth allocation, DBA) è una metodologia che consente una rapida adozione di allocazione della larghezza di banda dell'utente in base alle esigenze di traffico attuali. Il DBA è controllato dalla OLT, che assegna il volume della larghezza di banda verso le ONU. Questa tecnica funziona solo in direzione in upstream, il traffico in direzione downstream viene inviato in broadcast.

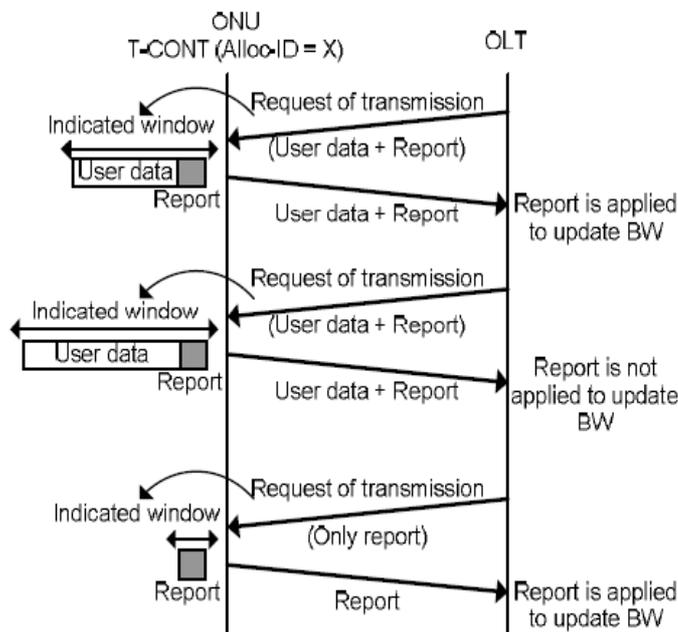


Figura 4.1 processo DBA

Per determinare la quantità di traffico da assegnare ad una ONU, l'OLT ha bisogno di conoscere lo stato del traffico T-CONT associato alla ONU. Nello stato "reporting method", come parte del suo status di traffico, una T-CONT indica quanti pacchetti sono in attesa nel buffer. Una volta che la OLT ha ricevuto questa informazione, è possibile ridistribuire di conseguenza i tributari delle varie ONU. Quando una ONU non ha traffico in attesa di essere inviato, dopo aver ricevuto un tributario invia in upstream una cella di

inattività (idle) per indicare che il buffer è vuoto. Questo informa il OLT che il tributario per quel T-CONT può essere assegnato ad altri T-CONT. Se l'ONU ha una coda lunga in attesa nel buffer, la OLT può assegnare più T-CONT a quella ONU.

### 4.3.5 Sicurezza

La funzionalità di base della GPON è che i dati downstream sono trasmessi a tutte le ONU e ogni ONU ha un “tempo” assegnato in cui i dati appartiene ad essa (come il TDM). Per questo motivo, qualche utente malintenzionato può riprogrammare la propria ONU e acquisire tutti i dati downstream che appartengono a tutti gli ONU connessi allo stesso OLT. In direzione upstream la GPON utilizza una connessione punto-punto in modo tutto il traffico sia assicurato dalle intercettazioni. A causa di ciò, tutte le informazioni riservate in upstream, come la chiave di sicurezza, potrebbero essere trasmesse in chiaro.

Pertanto, la raccomandazione ITU-T G.984.3 descrive l'uso di un meccanismo di sicurezza delle informazioni per garantire che gli utenti siano autorizzati ad accedere solo ai dati a loro destinati. L'algoritmo di crittografia usato è l'Advanced Encryption Standard (AES). Accetta chiavi di crittografia da 128, 192 e 256 byte che rende estremamente difficile compromettere il sistema. Una chiave può essere modificata periodicamente, senza disturbare il flusso di informazioni per migliorare la sicurezza.

## 4.4 La trasmissione nelle GPON

Il GPON utilizza il GEM (GPON Encapsulation Method) come metodo per incapsulare i dati sulla GPON. Sebbene qualsiasi tipo di dato possa essere incapsulato, i tipi effettivi dipendono dalla situazione del servizio. Il GEM fornisce una comunicazione

orientata alla connessione e si basa sulla versione leggermente modificata della raccomandazione ITU-T G.7041 “Generic framing procedure” (le specifiche per l'invio di pacchetti IP su reti SDH)

#### 4.4.1 Il formato del frame della GPON in downstream

Il traffico downstream viene trasmesso dalla OLT a tutti gli ONU con la moltiplicazione TDM, in cui ogni ONU prende in considerazione solo i frame destinati ad esso, i soli leggibili grazie alla crittografia. Il frame dal lato downstream è costituito dal blocco di controllo fisico in downstream (Physical Control Block downstream, PCBd), la partizione ATM e la partizione GEM. Il frame in downstream fornisce il riferimento di tempo comune per la PON e fornisce la segnalazione di controllo comune per il lato upstream. Un diagramma della struttura del frame in downstream è mostrato nella Figura 4.2.

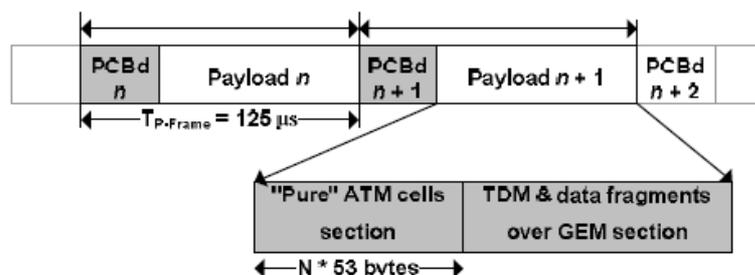


Figura 4.2 *Frame di downstream della GPON*

Il frame è di  $125 \mu s$  per tutte le velocità di trasferimento dati in downstream, mentre la gamma della lunghezza del PCBd è la stessa per tutte le velocità e dipende dal numero di strutture di allocazione per frame. Se non vi sono dati per l'invio, il frame viene comunque trasmesso e utilizzato per la sincronizzazione di tempo.

## 4.4.2 Il formato del frame upstream della GPON

Nel traffico in upstream viene sempre utilizzata la tecnica di multiplexazione TDMA, sotto il controllo del OLT, che assegna slot di tempo con lunghezza variabile a ciascun ONU per la trasmissione sincronizzata del proprio burst di dati. Il frame in upstream è costituito da multiple trasmissioni di tipo burst. Ogni burst in upload contiene al minimo l'overhead del livello fisico (Physical Layer Overhead upstream, PLOu). Oltre al payload, può anche contenere le sezioni PLOAMu (Physical Layer Operations, Administration and Management upstream), PLSu (Power Leveling Sequence upstream) e DBRu (Dynamic Bandwidth Report upstream). Nella figura 4.3 è mostrato un diagramma della struttura del frame in upload.

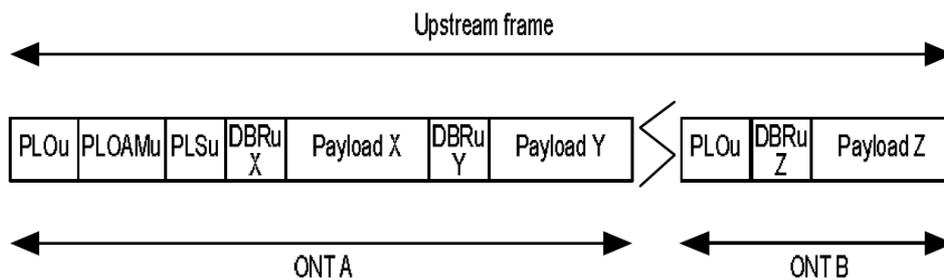


Figura 4.3 *Frame di upstream della GPON*

La lunghezza del frame è uguale in downstream per tutti i rate e ciascun frame contiene un numero di trasmissioni da uno o più ONU. Durante ogni periodo di assegnazione in base al controllo OLT, l'ONU può inviare da uno a quattro tipi di overhead e i dati dell'utente.

### 4.4.3 Metodi di incapsulamento

La GPON supporta due metodi di incapsulamento: il metodo di incapsulamento ATM ed il GEM (GPON Encapsulation Method). Con il GEM, tutto il traffico viene mappato attraverso la rete GPON utilizzando una variante della procedura di inquadramento generico SONET/SDH (generic framing procedure, GFP). Il GEM supporta un trasporto nativo di voce, video e dati senza uno strato di incapsulamento ATM o IP aggiuntivo.

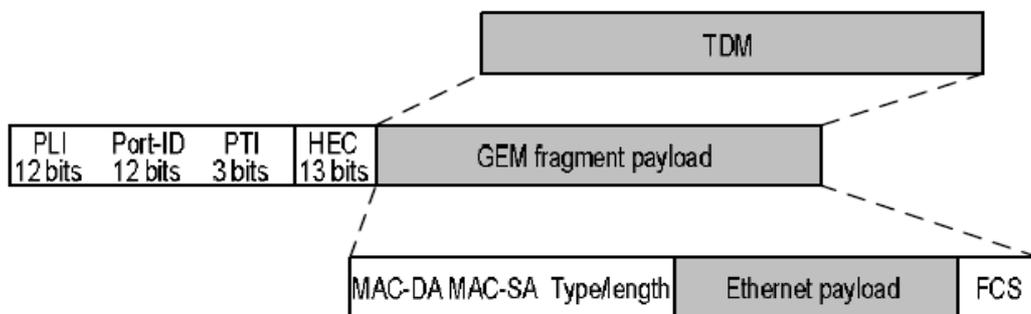


Figura 4.4 Metodo di incapsulamento GEM della GPON

## 4.5 Splitter ottico

Una PON collega una singola fibra da un OLT a più ONU e la connettività punto-multipunto tra OLT e molteplici ONU è ottenuta mediante uno o più dispositivi passivi di ramificazione nel percorso ottico.

Il cuore di tale architettura è lo splitter ottico passivo: questo dispositivo dispone di un ingresso singolo ed uscite multiple. Tipicamente il numero di uscite è  $2^n$  (ad esempio 2, 4, 8, etc) e la potenza ottica è diviso equamente tra le uscite. Come regola pratica (rule of

thumb) della potenza ottica, ogni uscita viene ridotta rispetto all'ingresso di un fattore di  $n \cdot 3,5\text{dB}$  ( $10 \log 2^n = n \cdot 10 \log 2 = n \cdot 3 \text{ dB}$ ; vengono aggiunti  $0,5 \text{ dB}$  per includere le perdite dello splitter).

Tale dispositivo è bi-direzionale e per questo lo splitter viene talvolta indicato come un divisore/accoppiatore. Il segnale ottico viene attenuato della stessa quantità di circa “ $n \cdot 3,5\text{dB}$ ” in entrambe le direzioni.

#### 4.5.1 Perdita da divisione (Splitting loss)

Uno dei parametri fondamentali per ogni progettista della rete FTTx è l'intervallo realizzabile tra il CO e gli abbonati, in altre parole, il massimo budget ottico consentito nel sistema. Il budget ottico è costituito dalle attenuazioni dei giunti, dei connettori, dalla fibra di trasmissione e dagli splitter ottici. Lo splitter è di gran lunga la componente più esigente in termini di perdite (una tipica attenuazione di uno splitter ottico 1:32 può variare tra i  $17 \text{ dB}$  e  $18 \text{ dB}$ ).

### 4.6 Architettura della rete di accesso ottica (link budget)

Una PON come sappiamo è composta dalla OLT, dalle ONU e dalla rete di distribuzione ottica (optical distribution network, ODN), che costituisce il supporto di trasmissione ottico per il collegamento dalla OLT alle ONU. Le caratteristiche dell'ODN, come l'attenuazione, sono molto importanti nella progettazione di reti ottiche di accesso. Normalmente l'ODN è costituita dai seguenti elementi ottici passivi: fibre ottiche, connettori di fibre ottiche, componenti passivi ramificati, attenuatori ottici passivi e giunzioni. Le attenuazioni nel percorso sono associate agli elementi appena citati. Il link

budget è indicato nella tabella 4.2 e comprende tutti i componenti ottici tra OLT e ONU.

Minimum optical loss	Path loss [dB]
1490 nm	13
1310 nm	13
1490 nm	28
1310 nm	28

Tabella 4.2 *Budget loss per il sistema GPON*

#### 4.6.1. Power budget

La potenza del trasmettitore e la sensibilità del ricevitore sono due parametri che definiscono la portata possibile della rete di accesso. Nella Tabella 4.3 sono mostrati i parametri tipici dei ricetrasmittitori a burst mode disponibili in commercio in grado di supportare 1,25 Gbps. Per calcolare lo scenario peggiore del power budget, la sensibilità del ricevitore minimo viene sottratta dalla potenza minima di trasmissione. Per questi dispositivi il power budget disponibile è tipicamente tra i 22 dB e 23 dB. Sulla base di questi valori la perdita totale nella rete è nota e la portata massima della rete può essere calcolata dalla (4.1), dove P è il power budget, l'FCA è l'attenuazione della fibra (Fiber Cable Attenuation) espresso in dB/m, L è la distanza e SL è la perdita dello splitter (splitter loss):

$$P = FCA \cdot L + SL + Penalties \quad (4.1)$$

Per “Penalties” (penalità), s'intendono le attenuazioni aggiuntive quali perdite di giunzioni e connettori (budget loss). L'attenuazione tipica di una fibra monomodale è di circa 0,4 dB/m per una lunghezza d'onda di 1310 nm e 0,3 dB/m per 1550 nm (ITU-T

Rec. G.652.C e G.652.D).

Ad esempio, supponendo che il budget di potenza sia pari a 23 dB, che venga utilizzato una fibra monomodale alla lunghezza d'onda di 1550 nm, il SL sia di 14 dB e ci siano due giunzioni meccaniche e due connettori, la portata massima della rete può essere calcolata da (4.1):

$$\frac{23 [dB] - 14 - 2 \cdot 0.5 [dB] - 2 \cdot 0.5 [dB]}{FCA [dB/m]} \approx 20 \text{ Km} \quad (4.2)$$

I power budget minimi per le configurazioni tipiche delle PON sono riportati nella Tabella 4.3.

ONU	L [Km]	$\lambda$ [nm]	FCA [dB/m]	SL [dB]	Penalties [dB]	Power budget richiesto [dB]
16	10	1310	0.4	14.5	2.5	21
16	20	1550	0.3	14.5	2.5	23
32	10	1310	0.4	17	2.5	23.5
32	20	1550	0.3	17	2.5	25.5

Tabella 4.3 *Il bilancio di potenza minima per la configurazione diversa PON*

# CAPITOLO 5

## Ethernet PON

---

### 5.1 Breve storia della EPON

Nel novembre del 2000 l'IEEE 802.3 annunciò un bando per un nuovo gruppo chiamato “Ethernet in the First Mile” (EFM) per estendere lo standard Ethernet all'area d'accesso dei clienti.

L'ethernet su fibra punto-multipunto (conosciuta anche come EPON) divenne una delle aree d'interesse del gruppo insieme all'Ethernet su rame, Ethernet su fibra multipunto (P2P) e OAM. Nel settembre 2001 il consiglio di standardizzazione IEEE approvò la richiesta di autorizzazione del progetto EFM, causando la formazione della task force P802.3ah, terminando la propria licenza nel giugno 2004 culminato con la

ratificazione dello standard IEEE 802.3ah.

L'IEEE 802.3 si è focalizzata nei due strati più bassi del modello di riferimento OSI: lo strato fisico e lo strato data link. Ognuno di questi strati è ulteriormente diviso in sottostrati ed interfacce, in figura 5.1 vengono mostrati tali sotto-strati definiti per i dispositivi Ethernet che operano ad 1 Gbps (da qui il nome 1G-EPON).

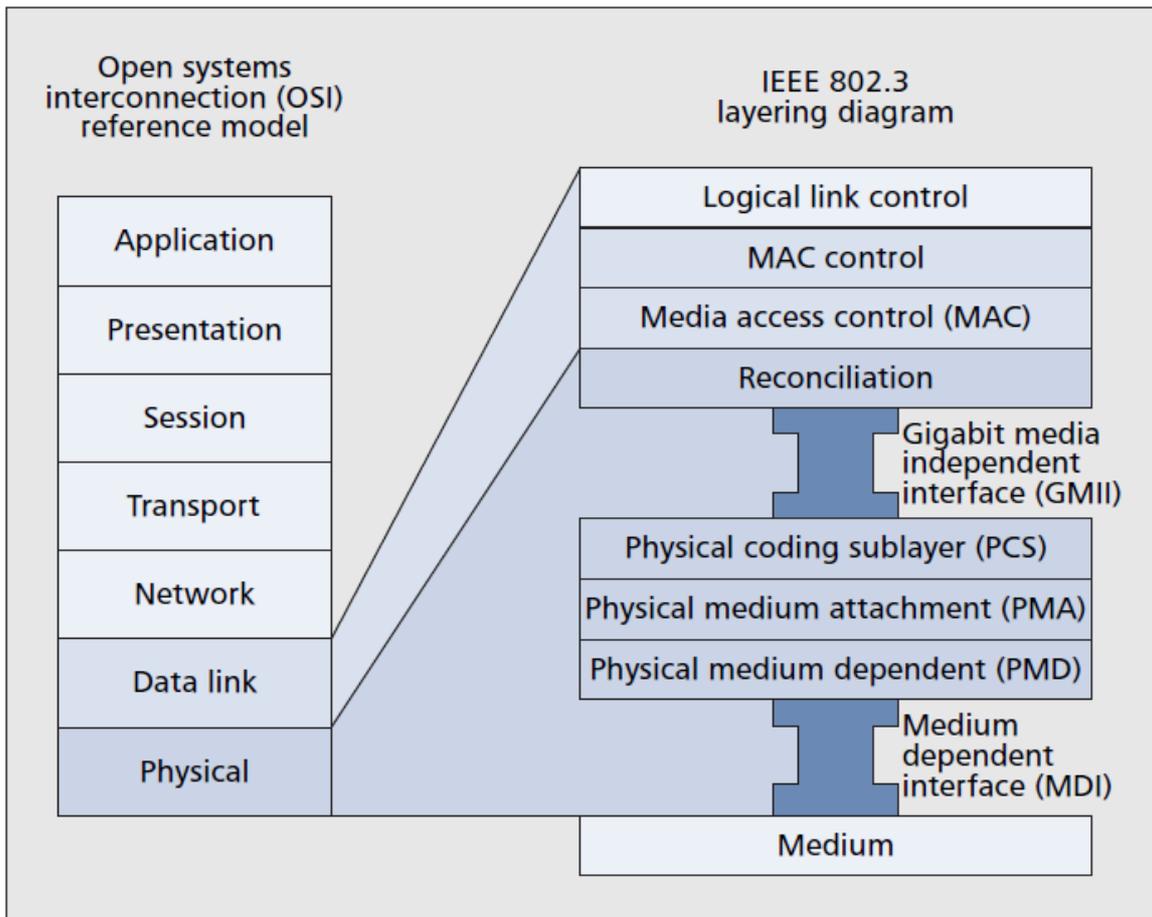


Figura 5.1 Relazione tra il modello IEEE 802.3 col modello OSI di riferimento.

## 5.2 principi di funzionamento

Lo standard IEEE 802.3 definisce due configurazioni base per una rete Ethernet. In una configurazione può essere distribuita su un mezzo condiviso utilizzando il protocollo

CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection). Nell'altra configurazione, le stazioni possono essere connesse attraverso un switch utilizzando collegamenti punto-punto full-duplex. Le proprietà delle EPON sono tali che possono non essere considerate nè un mezzo condiviso nè una rete punto-punto, ma piuttosto una combinazione delle due.

Nella direzione downstream, i frames Ethernet trasmessi dalla OLT passano attraverso uno splitter passivo 1:N e raggiungono ogni ONU (N tipicamente varia tra i 4 ed i 64). Questo comportamento è simile ad una rete con mezzo condiviso. Poichè Ethernet è “broadcast” per natura, dal lato downstream si adatta perfettamente con l'architettura PON: i pacchetti sono trasmessi dall'OLT ed estratti dalle ONU destinatarie attraverso un indirizzo MAC (media access control) come mostrato in figura 5.2a.

Nella direzione upstream, a causa della proprietà direzionale del combiner ottico passivo, i frame dati da ogni ONU arriveranno soltanto alla OLT e non alle altre ONU. In questo senso, nella direzione upstream, il comportamento delle EPON è più simile ad un'architettura punto-punto. Comunque, diversamente da una vera rete punto-punto, i frame trasmessi simultaneamente da diverse ONU possono collidere e quindi, nel lato upstream, le ONU devono utilizzare una qualche meccanismo per evitare le collisioni dei dati ed far condividere equamente la capacità trasmissiva della fibra.

Un meccanismo per l'accesso al mezzo trasmissivo basato sulla contesa (qualcosa di simile al CSMA/CD) è difficile da implementare perché le ONU non possono rivelare collisioni all'OLT. L'OLT potrebbe individuare una collisione ed informare le ONU attraverso un segnale di jamming, ma comunque, i ritardi di propagazione nelle PON (che possono oltrepassare i 20 Km di lunghezza) possono grandemente ridurre l'efficienza di tale meccanismo. Il funzionamento basato sulla contesa ha anche lo svantaggio di fornire un servizio non deterministico (ad esempio il throughput di un nodo o l'uso di un canale potrebbero essere descritti con una media statistica). Non c'è garanzia che un nodo ottenga accesso al mezzo in ogni piccolo intervallo di tempo, mentre ciò non è un problema nelle

reti aziendali basate sul CSMA/CD, dove i collegamenti sono corti ed il traffico è solitamente dati. L'accesso di rete dei clienti invece, oltre ai dati, deve supportare servizi video e voce, e quindi deve fornire alcune garanzie sulla consegna puntuale in queste tipologie di traffico.

Per introdurre il “determinismo” nella consegna dei frame, sono state proposte alcune soluzioni non basate sulla contesa. La figura 5.2b illustra un flusso dati upstream a divisione di tempo in una EPON.

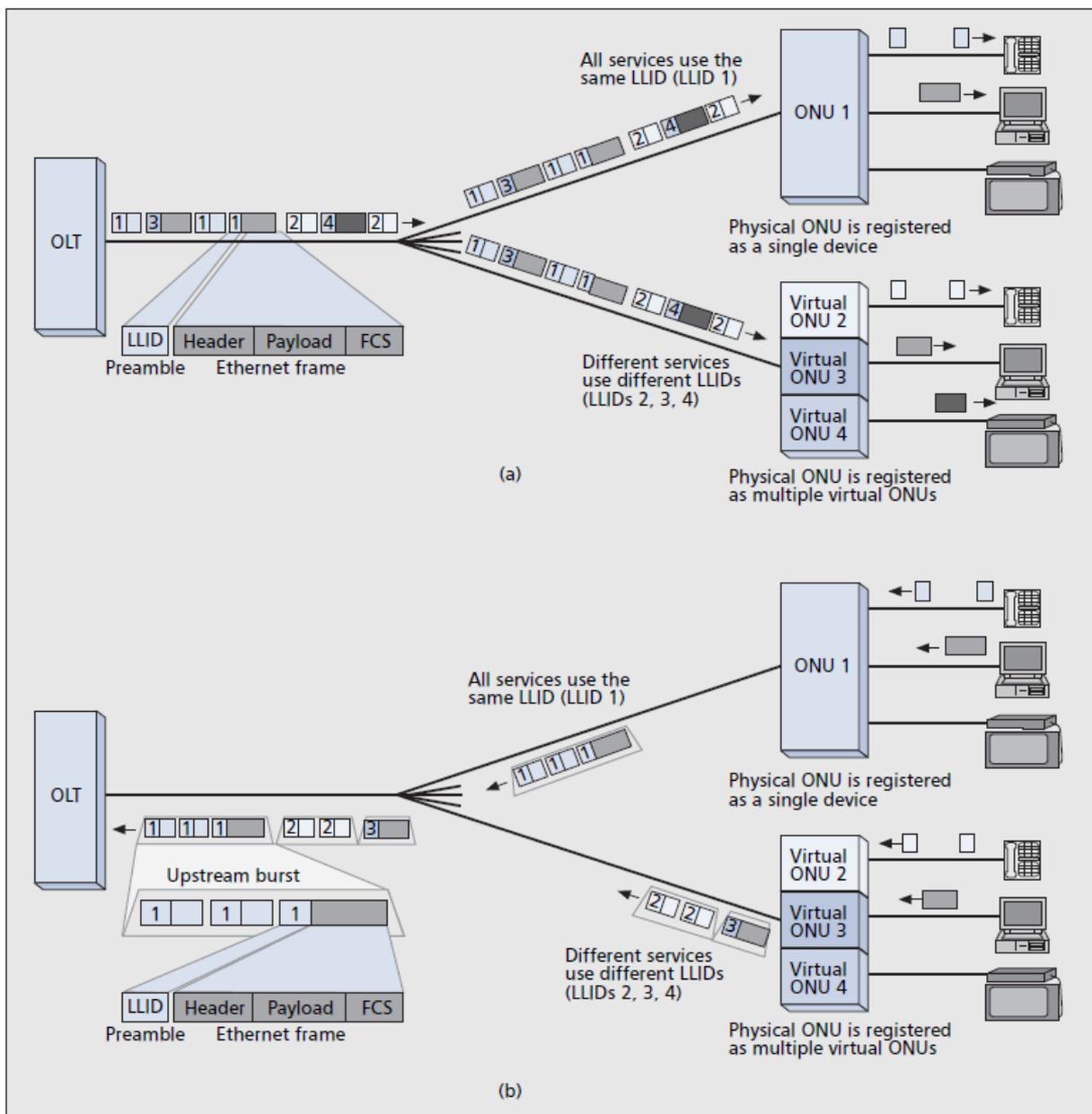


Figura 5.2 a) *flusso downstream* b) *flusso upstream*

Tutte le ONU sono sincronizzate su di un tempo di riferimento e ad ogni ONU è allocato un intervallo temporale (timeslot) in cui ogni timeslot è capace di trasportare alcuni frame Ethernet. Una ONU deve bufferizzare i frame ricevuti dal cliente fino all'arrivo del timeslot, con il conseguente ed immediato invio di tutti i frame immagazzinati alla massima velocità del canale (burst). Se non dovessero esserci frame da inviare allora viene trasmesso un carattere “idle” di 10 caratteri. I possibili sistemi di allocazione del timeslot possono variare dall'allocazione statica (time-division multiple access, TDMA) ad uno schema ad adattamento dinamico basato sulla dimensione istantanea della coda in ogni ONU (multiplexing statistico). Ovviamente ci sono più tipologie di allocamento, che includono sistemi che utilizzano concetti di priorità di traffico, quality of service (QoS), Service-Level Agreements (SLA), etc..

E' anche possibile creare un approccio decentralizzato per avere un sistema di assegnazione dinamico, nel quale l'ONU decide quando inviare dati e per quanto tempo. Questi sistemi sono simili all'approccio “token passing”, ad eccezione del fatto che in questo caso l'anello è passivo. In tale schema, l'ONU prima di inviare dati, invia un “messaggio speciale” per dichiarare quanti dati invierà, e l'ONU che dovrebbe trasmettere successivamente monitorerà la trasmissione dell'ONU precedente, temporizzando la propria trasmissione di modo che arrivi all'OLT giusto dopo la trasmissione della precedente e quindi non ci saranno collisioni e banda sprecata (questo procedimento è simile all' “hub polling”<sup>[1]</sup>). Tuttavia, questo sistema ha una grande limitazione: la rete dovrebbe diventare ad anello o stella, e tali tipologie dovrebbero essere evitate in quanto (a) potrebbe richiedere più fibre da posare, o (b) potrebbe essere già stata precedentemente posato un impianto di fibre con una diversa tipologia. In generale, un algoritmo dedicato dovrebbe sostenere una qualunque tipologia di PON punto-multipunto.

In una rete d'accesso ottica possiamo solo contare nella connettività tra l'OLT verso ogni ONU (per il downstream) e tra l'ONU verso l'OLT (per l'upstream), e questo è vero

per ogni tipologia di rete PON, pertanto l'OLT rimane l'unico dispositivo che può arbitrare l'accesso a divisione di tempo su un canale condiviso.

La sfida di implementare un sistema di arbitraggio dinamico basato sull'OLT sta nel fatto che l'OLT non conosce quanti byte vengono bufferizzati da ogni ONU ed il comportamento burst del traffico dati preclude ogni predizione di occupazione della cosa per ogni ragionevole accuratezza. Per ottenere un'assegnazione accurata dei timeslot, l'OLT dovrebbe conoscere esattamente lo stato di un dato ONU. Una soluzione potrebbe essere un sistema basato sul polling con messaggi Grant/Request: dall'ONU vengono inviati messaggi di richiesta (Request) per segnalare cambiamenti di stato nello stesso, come ad esempio l'ammontare di dati bufferizzati, l'OLT elabora tutti i messaggi di Request ed alloca differenti timeslot per ogni ONU, consegnando alle rispettive ONU le informazioni sull'assegnamento degli slot attraverso un messaggio Grant.

Il vantaggio di avere un'intelligenza centralizzata per l'algoritmo di assegnazione degli slot, sta nel fatto che l'OLT conosce lo stato dell'intera rete e può cambiare su un altro metodo di allocazione basandosi sulle informazioni ricevute, mentre le ONU non hanno bisogno di monitorare lo stato della rete, negoziare o conoscere nuovi parametri: questo renderà le ONU più semplici e meno costose, e renderà l'intera rete più robusta.

### **5.3 Multi-Point Control Protocol (MPCP)**

Per supportare l'allocazione del timeslot da parte del OLT, è stato sviluppato il multi-point control protocol (MPCP). Questo protocollo si affida a due messaggi Ethernet: *Gate* e *Report*. L'OLT invia all'ONU un messaggio di *Gate* che viene utilizzato per assegnare uno timeslot di trasmissione. Il messaggio di *Report* viene utilizzato dall'ONU per trasmettere le proprie condizioni locali (come ad esempio l'occupazione del buffer) e permettere all'OLT di fare un'assegnazione intelligente dell'allocazione. Entrambi i

messaggi sono frame del sotto-strato MAC Control.

Ci sono due modalità di funzionamento dell'MPCP: l'auto-discovery (inizializzazione) ed il normale funzionamento. La modalità auto-discovery viene utilizzato per individuare una nuova ONU connessa alla rete, per ricavarne il round-trip-time (RTT) e l'indirizzo MAC, più altri parametri aggiuntivi. La modalità “normale” viene impiegata per permettere la trasmissione a tutte le ONU inizializzate.

Poiché più di una ONU alla volta può richiedere l'inizializzazione, l'auto-discovery è una procedura handshake basata sulla contesa. Ad alto livello, si svolge come segue:

- Utilizzando il messaggio di gate, l'OLT invia una richiesta a tutte le ONU non registrate di trasmettere
- L'ONU non registrata risponde usando un messaggio di richiesta di registrazione *Register Req* (report)
- Quando ricevuto ed approvato, l'OLT registra l'ONU usando il messaggio *Register*
- L'handshake termina col *Register\_Ack* di riconoscimento da parte dell'ONU

Si noti che quando l'OLT riceverà il *Register Req* da una ONU non inizializzata, conoscerà il suo indirizzo MAC ed il suo RTT. La figura 5.3 illustra come il RTT di una ONU sia esattamente la differenza tra l'orario in cui il *Report* viene ricevuto dall'OLT ed il messaggio di *Gate* inviato dall'OLT (gli “orari” di invio dei messaggi vengono descritti dal timestamp incluso nel messaggio stesso)

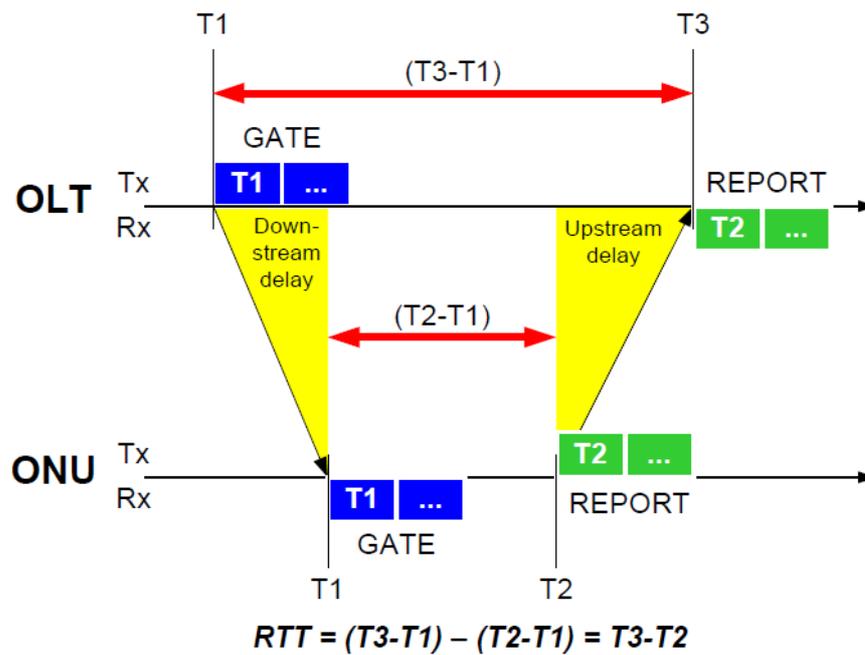


Figura 5.3 La misurazione del Round Trip Time

Dal momento che più ONU non inizializzate potrebbero rispondere allo stesso messaggio di *Gate*, il messaggio di *Report* potrebbe collidere, e in tal caso, alle ONU col messaggio colliso non verrebbe assegnato alcuno slot per le normali operazioni. Se una ONU non dovesse ricevere un'assegnazione all'interno di un certo intervallo di timeout (in cui verrà dedotta la presenza di una collisione), l'ONU tenterà di rinviare il messaggio dopo un intervallo casuale di tempo. L'intervallo di tempo è scelto casualmente da un intervallo che raddoppia per ogni collisione verificata, per esempio usando l'exponential backoff.

Durante le operazioni di steady state (la modalità normale, stazionaria), l'OLT controlla la finestra di trasmissione delle ONU con i messaggi di *Gate*, mentre le ONU riporteranno il loro stato di coda usando i messaggi di *Report*. L'OLT calcolerà quindi la lunghezza della finestra di trasmissione usando il DBA.

## 5.4 Emulazione per la conformità con l'architettura IEEE 802

L'architettura IEEE 802 definisce due tipi di collegamenti: il mezzo condiviso ed il full duplex. Nel mezzo condiviso, tutte le stazioni sono connesse in un singolo dominio d'accesso dove può trasmettere al più una stazione alla volta e tutte le stazioni possono ricevere, mentre, il segmento full-duplex è un collegamento punto-punto che connette due stazioni (o stazione e bridge) di modo che entrambe possano trasmettere e ricevere contemporaneamente e, da queste definizioni, si evince che tutte le stazioni connesse alla stessa porta di un bridge possono comunicare con le altre senza l'aiuto del bridge stesso.

Questo comportamento del bridge ha portato ad un interessante problema: gli utenti connessi a differenti ONU della stessa PON sono impossibilitati a comunicare con un altro, senza che l'informazione venga elaborata allo strato 3 (Network) od oltre.

Per risolvere questo inconveniente, e per assicurare un'integrazione senza giunzioni con le altre reti Ethernet, i dispositivi collegati con l'EPON vengono forniti di un ulteriore sotto-strato che, basandosi sulla sua configurazione, emulerà o un mezzo condiviso, od uno punto-punto. Tali sotto-strati vengono chiamati rispettivamente Shared-Medium Emulation (SME) e Point-to-Point Emulation (PtPE), e risiedono sotto lo strato MAC per preservare le operazioni MAC esistenti definite dallo standard IEEE 802.3. Il funzionamento dello strato di emulazione si affida sulla codifica dei frame Ethernet con “tag” unici per ogni ONU (figura 5.6). Questi tag vengono chiamati “link ID” (ID di collegamento) e sono posti nel preambolo prima d'ogni frame.

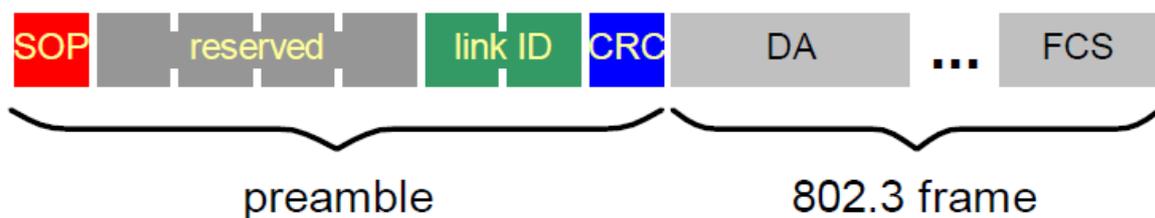


Figura 5.6 *Il campo link ID incluso nel preambolo del frame*

### 5.4.1 Struttura del frame nello standard IEEE 802.3

Il frame Ethernet è strutturato con un iniziale preambolo e dallo Start Frame Delimiter. A seguito dei quali, ogni frame continua con un Header che contiene gli indirizzi MAC di destinazione e sorgente. La sezione mediana è l'informazione a carico (payload), che include qualunque altro Header degli altri protocolli (ad esempio il protocollo IP) trasportati nel frame. Il frame termina con un controllo di ridondanza ciclico di 32 bit, usato per rilevare un qualsiasi danneggiamento dei dati.

Nella tabella sottostante viene esposto il frame Ethernet completo per una MTU di 1500 otteti (byte). Alcune implementazioni della Gigabyte Ethernet (e velocità maggiori) supportano anche frame maggiori.

Preamble	Start of frame Delimiter	MAC Destination	MAC Source	802.1Q tag (optional)	Ethertype (Ethernet II) or length (IEEE 802.3)	Payload	Frame check Sequence (32-bit CRC)	Interframe Gap
7 octets	1 octet	6 octets	6 octets	(4 octets)	2 octets	42-1500 octets	4 octets	12 octets
		64-1522 octets						
		72-1530 octets						
		84-1542 octets						

Tabella 5.1 *Struttura del frame Ethernet*

### 5.4.2 Point-to-Point Emulation (PtPE)

Nella modalità di emulazione punto-punto, l'OLT deve avere  $n$  porte MAC (interfacce), una per ogni ONU (figura 5.7). Quando viene inviato un frame in downstream (cioè dall'OLT all'ONU), il sotto-strato PtPE nella OLT inserirà il link ID associato con una particolare porta MAC da cui quel frame è partito (figura 5.7a). Anche se il frame di fatto è inviato ad ogni ONU, solo un sotto-strato PtPE verificherà l'uguaglianza tra il link

ID del frame ed il valore assegnato all'ONU, accettando il frame e facendolo passare allo strato MAC per ulteriori verifiche. Si noti che gli strati MAC delle altre ONU non vedranno mai quel frame e, in questo senso, c'è la parvenza che il frame sia stato inviato ad un singolo ONU attraverso un collegamento punto-punto.

Nella direzione in upstream, l'ONU inserirà il suo link ID assegnato nel preambolo di ogni frame trasmesso. Il sotto-strato PtPE nella OLT demultiplexerà il frame alla porta MAC appropriata basandosi sul link ID univoco (figura 5.7b).

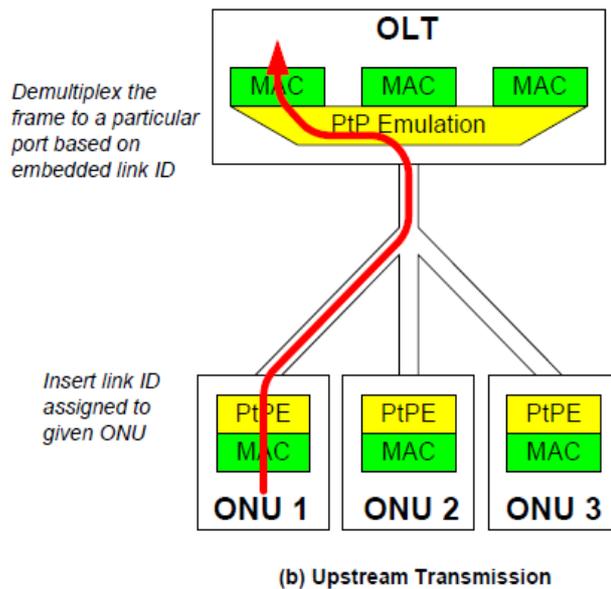
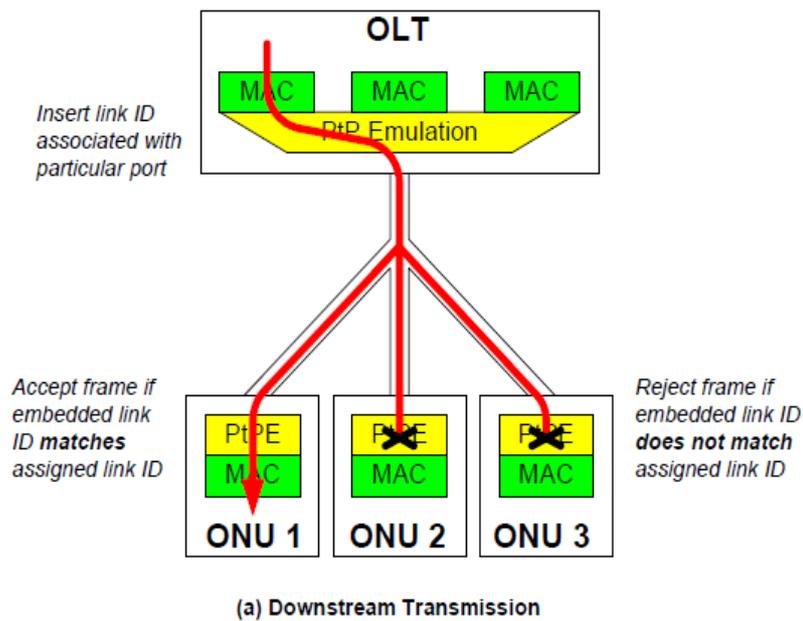


Figura 5.7 *Emulazione Punto-Punto*

La configurazione PtPE è totalmente compatibile col bridging poiché ogni ONU è connessa ad una porta indipendente del bridge ed il bridge posto nella OLT (figura 5.8) trasporterà il traffico inter-ONU tra le sue porte

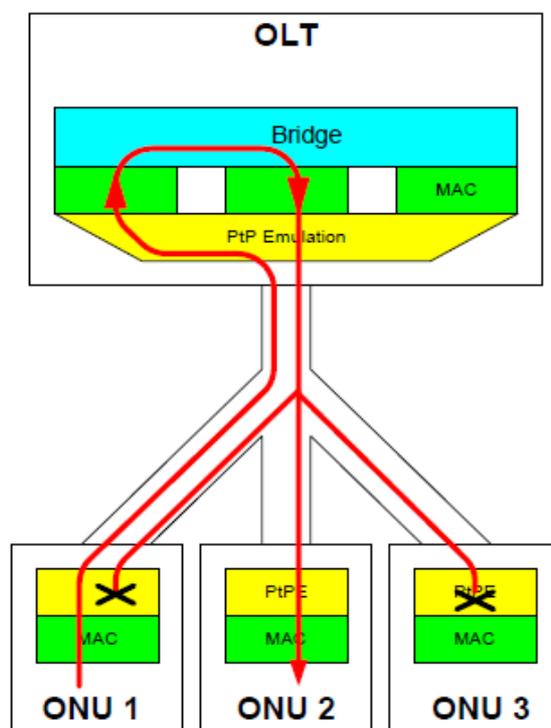


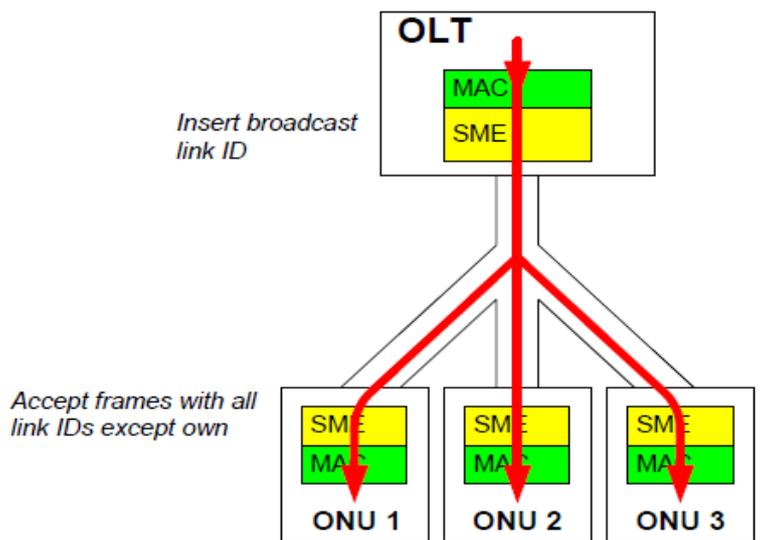
Figura 5.8 *Bridging tra ONU con l'emulazione punto-punto*

### 5.4.3 Shared-Medium Emulation (SME)

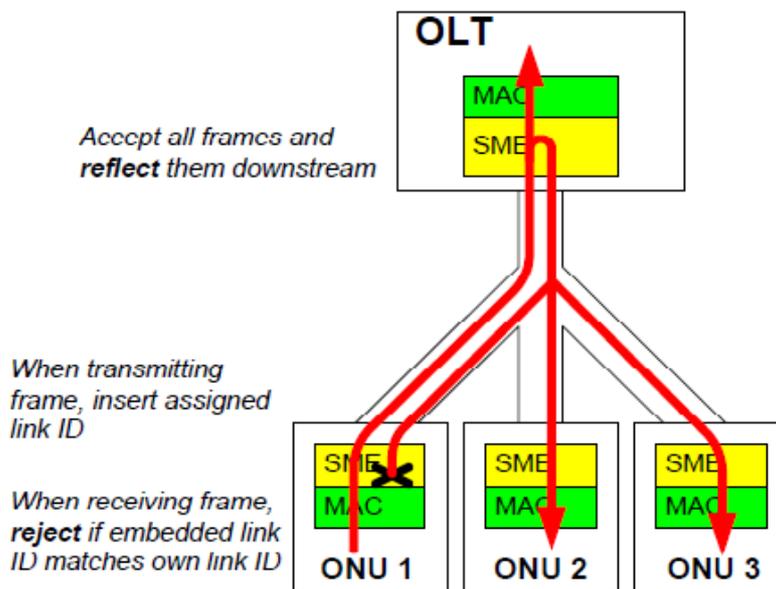
Con l'emulazione del mezzo condiviso, i frame vengono trasmessi da ogni nodo (OLT o qualunque ONU). Nella direzione downstream, l'OLT inserirà un link ID di "broadcast" che verrà accettato da ogni ONU (figura 5.9a), mentre per assicurarsi l'operatività dei dati in upstream dello SME, il sotto-strato SME nella OLT dovrà duplicare i dati verso tutte le ONU (figura 5.9b). Per evitare che una ONU riceva i propri frame, il sotto-strato SME di ogni ONU accetterà un frame solo se il link ID del dato frame sarà diverso dal link ID

assegnato a quel ONU.

Lo SME richiede solo una porta MAC all'OLT e la funzionalità dello strato fisico (uno sotto-strato dello SME) fornisce la comunicabilità ONU-ONU, eliminando così la necessità di un bridge.



(a) Downstream Transmission



(b) Upstream Transmission

Figura 5.9 Emulazione del mezzo condiviso

#### 5.4.4 Combinazione delle modalità PtPE e SME

Anche se entrambi sistemi discussi offrono delle soluzioni alle questioni relative allo standard 802.1, entrambe le emulazioni presentano degli inconvenienti:

- il PtPE preclude la possibilità d'avere una singola copia in broadcast/multicast quando l'OLT invia un frame ricevuto da diverse ONU. Questa caratteristica è molto importante per servizi come il video-broadcast o qualunque altro servizio broadcast in tempo reale, e, per supportare tale servizio, le OLT che operano in modalità PtPE devono duplicare ogni volta i pacchetti con link ID diversi;
- lo SME fornisce invece capacità multicast/broadcast, ma poiché ogni frame in upstream viene duplicato in downstream, viene sprecata una gran quantità di banda in downstream.

Per raggiungere un'operatività ottimale, è ragionevole l'idea di progettare una PON con un'emulazione SM e PtP combinata. Con una tale configurazione, in una EPON con  $n$  ONU, l'OLT conterrà  $n+1$  porte MAC: una per ogni ONU (PtPE) ed una per il broadcasting (SME) (figura 5.10), mentre ogni ONU avrà due porte MAC: una per il collegamento PtPE ed una per lo SME.

Per separare il traffico in maniera ottimale, la decisione verso quale porta saranno inviati i dati verrà decisa dagli strati superiori al MAC (ad esempio usando VLAN). Solo l'informazione che deve essere trasmessa a tutti verrà inviata alla porta collegata allo SME.

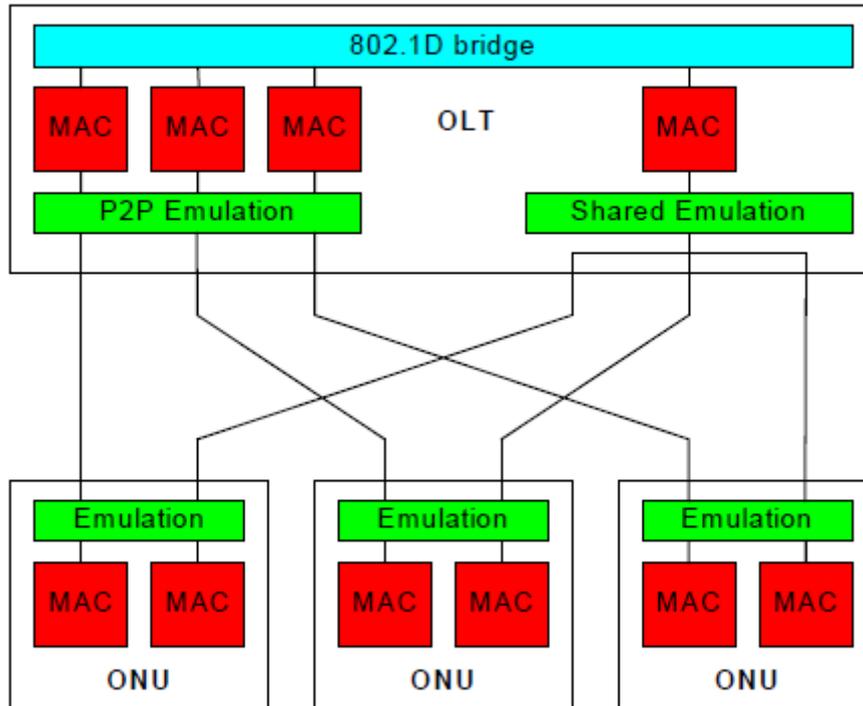


Figura 5.10 *Combinazione delle emulazioni PtP e SM.*

## 5.5 Problemi di sicurezza

La sicurezza non è mai stato un punto di forza delle reti Ethernet. Nei collegamenti full-duplex punto-punto, la sicurezza non è un problema critico perché ci sono solo due stazioni comunicanti tramite un canale privato. Nella Ethernet half-duplex condivisa le preoccupazioni riguardanti la sicurezza sono minime, poiché gli utenti appartengono ad un unico dominio amministrativo e sono tutti soggetti alle stesse regole.

L'EPON, comunque, ha un diverso insieme di requisiti, soprattutto a causa dell'utilizzo a cui è destinato: offre servizi ad utenti privati, ma ha un canale downstream di tipo broadcast. In generale, per assicurare la sicurezza nella EPON, l'operatore di rete dovrebbe essere capace di garantire la privacy degli utenti, e dovrebbe fornire dei meccanismi per controllare l'accesso degli utenti alle infrastrutture.

Per l'ambiente d'accesso residenziale, l'utente s'aspetta che le proprie informazioni rimangano private e, per l'ambito lavorativo, questo è un aspetto fondamentale. I due maggiori problemi associati con la mancanza di sicurezza sono la predisposizione dell'utente ad essere intercettato dal vicino (un problema degli utenti), e la predisposizione del theft-of-service, che è invece un problema del provider.

### 5.5.1 Intercettazione

Nelle EPON, è possibile intercettare il traffico tramite una ONU operante in modalità promiscua (promiscuous mode): essendo esposta a tutto il traffico di downstream, tale ONU può captare tutto il traffico destinato alle altre. L'emulazione punto-punto aggiunge il link ID che permette alla ONU di riconoscere i frame destinati a loro e filtrare/scartare gli altri, ma è anche vero che tale meccanismo non offre una sicurezza adeguata, visto che il filtraggio può essere disabilitato e tutto il traffico può diventare visibile.

Il traffico upstream è invece relativamente più sicuro, poiché viene multiplexato ed è visibile solo dalla OLT (dovuto alla direttività dei combiner passivi). Sebbene nei combiner passivi possano avvenire riflessioni, la trasmissione downstream avviene in una lunghezza d'onda diversa della trasmissione upstream, e quindi le ONU sono “cieche” dal traffico riflesso che non viene elaborato dai circuiti di ricezione. Il traffico upstream può venir comunque intercettato dagli splitter o combiner. Nelle porte inutilizzate (essendo gli splitter/combiner simmetrici, sono disponibili più porte) potrebbe essere connesso un dispositivo sensibile al traffico upstream, che sarebbe in grado di intercettare tutte le comunicazioni upstream e reindirizzarlo “in downstream”.

## 5.5.2 Theft-of-service

Il furto di servizio avviene quando un utente impersona un suo vicino, e trasmette frame che non appartengono alla propria connessione. L'OLT ottiene l'identità dell'utente attraverso il link ID inserito da ogni ONU nel preambolo del frame, ma tale link ID può essere falsificato da una ONU malintenzionata durante la trasmissione in upstream. Ovviamente per poter trasmettere nel timeslot dirottato, l'ONU dovrebbe anche essere capace di intercettare i messaggi di *Gate* destinati alle vittime.

## 5.5.3 Crittografia

L'intercettazione delle trasmissioni può essere evitata attraverso una chiave di crittografia non condivisa, così da creare un collegamento punto-punto che permetta di comunicare privatamente tra l'OLT e le diverse ONU. In più la crittografia nelle trasmissioni upstream previene la falsificazione delle ONU: l'informazione in arrivo in una data ONU potrà essere decrittata con una chiave disponibile solo a quella ONU.

La crittografia e la decrittazione possono essere implementate nello strato fisico, data link o negli strati più alti:

- l'implementazione della codifica negli strati superiori cifrerà solo il payload del frame MAC, lasciando gli headers col normale codice. In questa condizione, il MAC in trasmissione calcolerà l'FCS per il payload crittografato, ed il MAC ricevente verificherà l'integrità del frame ricevuto prima di inviare il payload agli strati superiori per la decrittazione; questo significa che, per quanto si eviterà letture del payload da parte di ONU "malintenzionate", tali ONU saranno ancora capaci di leggere l'indirizzo MAC.

- in alternativa, la crittografia può venir svolta sotto lo strato MAC, ed in tale condizione, il “motore crittografico” codificherà l'intero stream di dati, includendo l'header e l'FCS. In ricezione, la decrittazione avverrà prima della verifica FCS, e poiché le chiavi di cifratura sono diverse per ogni ONU, i frame destinati ad altre ONU non verranno decrittati in maniera corretta e sarà quindi scartato. Questo sistema impedisce qualunque reperimento d'informazione da parte di ONU malintenzionate, e perciò sembra essere il metodo più affidabile.

La trasmissione in downstream della EPON è un canale di comunicazione basato sul frame, in cui ogni frame viene indirizzato a diverse destinazioni. Poiché ogni frame è una parte di informazione indipendente, il metodo di cifratura non può essere di flusso (cifrario a flusso) e la soluzione più appropriata è una cifratura a blocchi, che codifica ogni frame separatamente.

Il campo link ID localizzato in ogni preambolo di frame viene utilizzato per definire il canale tra la OLT ed una ONU (PtPE), ma tale header può anche venir usato come sostegno al meccanismo di cifratura. A questo scopo uno dei byte riservati nell'header verrà usato come identificatore di chiave (key identifier) (figura 5.11) e, basandosi sul valore di questo campo dati, sarà possibile sapere se il frame è criptato e quale chiave è stata utilizzata.

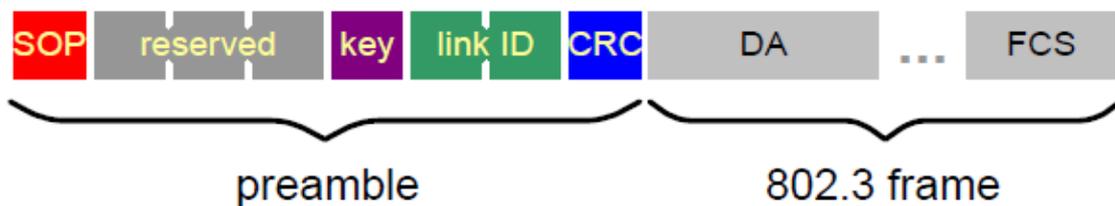


Figura 5.11 *Il preambolo del frame con, incorporati, il link ID e la chiave*

Ogni ONU mantiene una chiave (valida per la sessione corrente) ed l'identificatore

fa riferimento a tale chiave, per mantenere indefinitamente la sicurezza del canale stabilito viene periodicamente cambiata la chiave di cifratura (re-keying) e, nel caso in cui il frame non dovesse essere stato cifrato, al key identifier verrebbe assegnato un valore di default.

Poiché la cifratura a blocchi sfrutta blocchi di dimensione fissa, mentre il frame Ethernet ha una dimensione variabile, le due dimensioni, nella maggioranza dei casi, possono non coincidere. Per risolvere il problema, uno dei metodi è l'utilizzo del bit stuffing per raggiungere la dimensione del blocco richiesta, anche se tale soluzione risulta essere debole per la crittografia.

## 5.6 10G-EPON

Il 10 Gbit/s Ethernet Passive Optical Network, meglio conosciuto come 10G-EPON, è uno standard avviato nel 2006 e ratificato nel 2009 come standard IEEE 802.3av.

### 5.6.1 Architettura

L'architettura della Ethernet PON da 10 Gbps si divide in due tipologie: simmetrica ed asimmetrica.

L'architettura simmetrica (10/10G-EPON) supporta canali di trasmissione e ricezione da 10Gbps. L'idea principale era quella di fornire un'adeguata banda upstream e downstream per le strutture residenziali multi-familiari: una volta installato in configurazione MDU (multi dwelling unit, unità multi-abitativa), una EPON può connettere fino a 1000 clienti.

L'architettura asimmetrica (10/1G-EPON) risulta essere meno complessa della

sorella simmetrica, in quanto le specifiche si basano su tecnologie già mature. La trasmissione upstream, come specificato nello standard IEEE 802.3ah, è identica al 1G-EPON ed utilizza ricetrasmittitori ottici in modalità burst, mentre la trasmissione in downstream, che sfrutta la modalità continua, si basa su dispositivi Ethernet punto-punto da 10Gbps

## 5.6.2 Power budget

Lo standard 802.3av definisce vari power budget. Nella tabella sottostante (tabella 5.2) sono mostrati i vari tipi. La sigla PRX indica l'architettura asimmetrica, mentre PR quella simmetrica, mentre il valore rappresenta la sua classe.

Power Budget	Downstream Rate (Gbps)	Upstream Rate (Gbps)	Channel Insertion Loss (dB)	Note
<b>PRX10</b>	10,3125	1,25	20	Compatibile col power budget PRX10 del 1G-EPON
<b>PRX20</b>	10,3125	1,25	24	Compatibile col power budget PRX20 del 1G-EPON
<b>PRX30</b>	10,3125	1,25	29	
<b>PR10</b>	10,3125	10,3125	20	Compatibile col power budget PRX10 del 1G-EPON
<b>PR20</b>	10,3125	10,3125	24	Compatibile col power budget PRX20 del 1G-EPON
<b>PR30</b>	10,3125	10,3125	29	

tabella 5.2 *Power budget del 10G-EPON*

## 5.6.3 Forward error correction

Il 10G-EPON utilizza un meccanismo FEC convoluzionale basato sul Reed-Solomon(255, 223), obbligatorio per tutti i canali operanti a 10 Gbps, mentre nel caso del

canale a 1 Gbps (10/1G-EPON) il codice utilizzato è un FEC a blocco che utilizza il Reed-Solomon(255, 239).

#### 5.6.4 Compatibilità

Lo standard 10G-EPON definisce un nuovo strato fisico, mantenendo il più possibile tutti gli strati superiori invariati, così da mantenere la compatibilità delle tecnologie legacy, tipo sistemi di gestione delle reti, sistemi OAM, DBA, scheduling e così via. Viene posta particolare enfasi il fatto di poter effettuare operazioni simultanee con sistemi PON da 1 Gbps e 10 Gbps nello stesso impianto esterno. Nelle trasmissioni di downstream i canali dei due sistemi sono separati: con una banda di 1480-1500 nm per le trasmissioni da 1Gbps e 1575-1580 nm per le trasmissioni da 10 Gbps, mentre per le trasmissioni upstream la banda si sovrappone: 1260-1360 nm per il canale da 1 Gbps e 1260-1280 per la 10 Gbps. Lo spettro condiviso è quello a bassa attenuazione cromatica, e deve essere diviso nel tempo (dual-rated TDMA)

Varie implementazioni delle OLT possono supportare i due rate di trasmissione, solo per il downstream, solo per l'upstream o in entrambe le direzioni. La tabella 5.3 mostra quali tipi di ONU sono supportate dalle varie implementazioni nelle OLT:

Implementazione delle OLT	Tipi di ONU supportate
Downstream: due lunghezze d'onda; Upstream: rate singolo	(1) 1G-EPON ONU (2) 10/1G-EPON ONU
Downstream: singola lunghezza d'onda; Upstream: dual rate	(1) 10/10G-EPON ONU (2) 10/1G-EPON ONU
Downstream: due lunghezze d'onda; Upstream: dual rate	(1) 1G-EPON ONU (2) 10/1G-EPON ONU (3) 10/10G-EPON ONU

Tabella 5.3 Implementazione e supporto delle OLT dei rate verso le ONU

La figura 5.12 illustra l'architettura nel caso di coesistenza delle due reti:

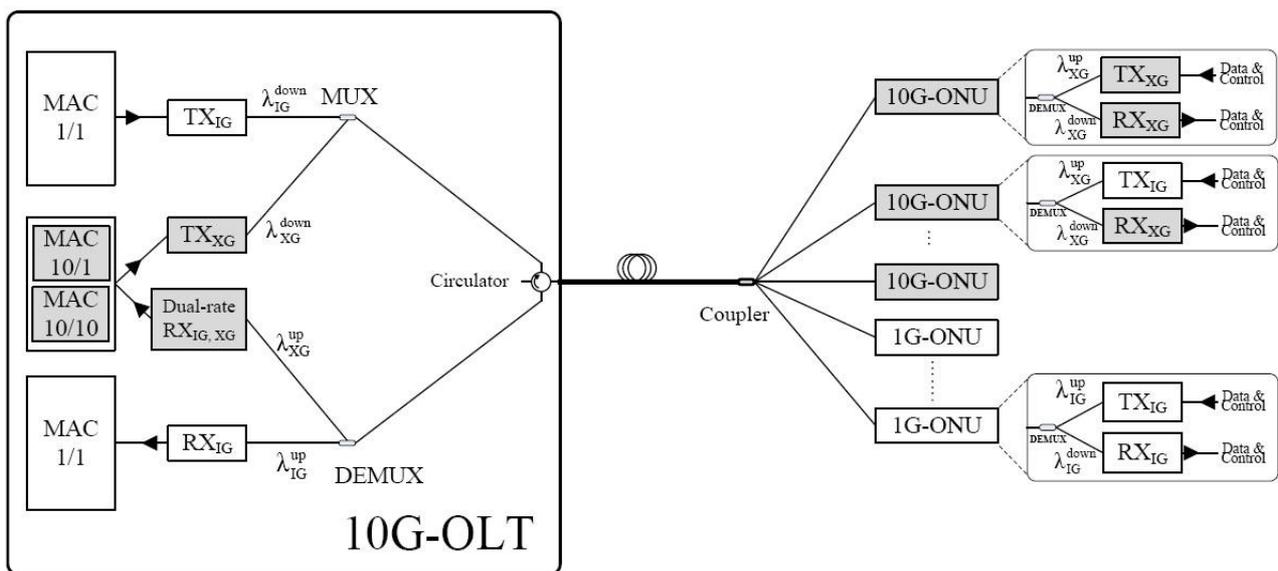


Figura 5.12 Architettura della OLT per la coesistenza della 1G-PON e 10G-PON

## Riferimenti

1 J. L. Hammond and P. J. P. O'Reilly. Performance Analysis of Local Computer Networks, Addison Wesley, 1987.

# CAPITOLO 6

## WDM PON

---

### 6.1 Oltre le TDMA PON

Per più di una decade sono state studiate e discusse varie tipologie di PON per le varie applicazioni FTTx, ma solo due varianti di TDMA hanno preso piede: la GPON, distribuita soprattutto negli USA ed in Europa; e la EPON, distribuita in Giappone e Corea.

In molti sono ormai dell'idea che le PON con accesso TDM non possano più far fronte ai requisiti delle reti future e del power budget disponibile. Quest'ultimo limita sia il rapporto di divisione della PON (splitting ratio) sia la portata/distanza tra l'OTL e l'ONU.

Questi problemi possono essere mitigati con l'introduzione delle PON con accesso di

multiplazione a divisione di lunghezza d'onda (wavelength division multiplexing, WDM ), in cui ad ogni ONU viene assegnata una singola lunghezza d'onda. Ogni ONU lavora su un bit rate individuale piuttosto che con un bit rate aggregato, e poiché le varie ONU sono separate da una lunghezza d'onda “fisica” sono intrinsecamente rappresentati gli aspetti della privacy, della sicurezza e dell'integrità della rete.

Le WDM PON possono anche essere combinate con l'aggiunta della tecnologia TDMA (in particolare con gli standard GPON e EPON), e questa combinazione conduce alle WDM-TDMA PON che migliora la scalabilità attraverso uno “splitting ratio” fino a 1:1000. Inoltre le PON, usando le tecniche WDM standard (in particolare l'amplificazione broadband), può anche supportare delle distanze maggiori, nel raggio di 100 Km, che porta al concetto di PON attive, le quali possono giocare un ruolo importante in uno scenario futuro di convergenza degli accessi metropolitani e di backhaul.

## 6.2 L'architettura della WDM PON

Negli ultimi anni sono state fatte molte proposte per le WDM PON e queste quasi esclusivamente assumono la “forma” delle Dense WDM PON (DWDM PON), o delle Ultra Dense WDM PON (UDWDM PON).

Mentre molte delle proposte sono tecnicamente interessanti, è chiaro che i costi e le prestazioni (come per esempio, la banda per utente, lo splitting ratio, la portata massima) sono i criteri dominanti per un successo commerciale.

L'architettura base di una WDM PON è mostrata in figura 6.1, e viene fatto uso o di un array di laser a lunghezza d'onda fissa o di un laser a multi-frequenza (multi-frequency laser, MFL). L'architettura “broadcast-and-select” in figura 6.1a mostra tutte le lunghezze d'onda trasmesse in downstream attraverso una splitter passivo 1:N. Ogni ONU seleziona la propria lunghezza d'onda dal flusso in arrivo usando un filtro individuale, e

utilizza un'altra lunghezza d'onda per la trasmissione upstream. Il flusso in upstream viene passivamente combinato in un accoppiatore 1:N. Ovviamente questa architettura soffre delle perdite di potenza dovute allo splitter e combiner, tanto quanto i problemi di sicurezza in trasmissione già presenti nella TDMA. In più, non ci dovranno essere ONU identiche, a meno che i filtri di ricezione che di trasmissione non siano sintonizzabili.

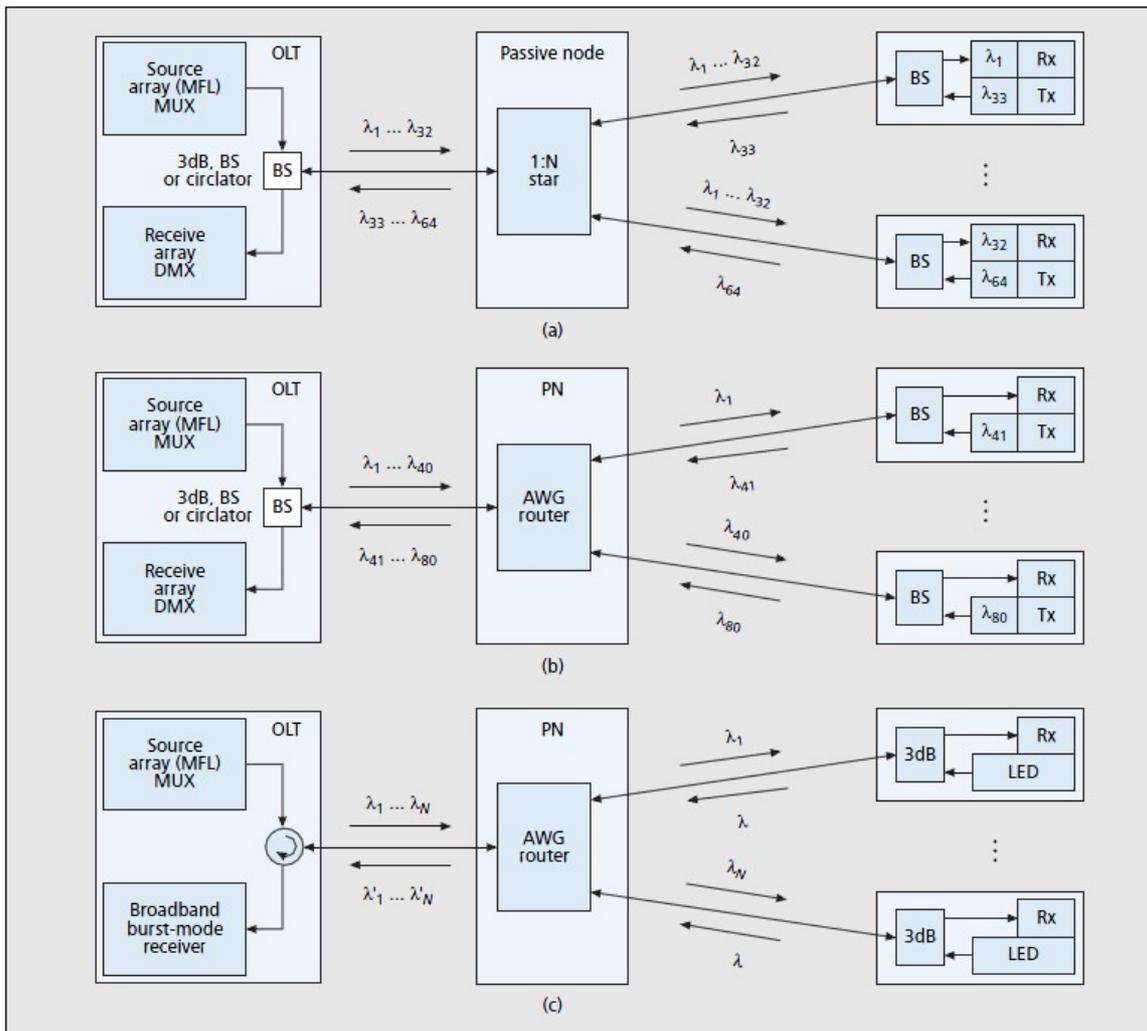


Figura 6.1 Architetture WDM-PON di base: a) WDM-PON broadcast-and-select con splitter/combiner nei nodi passivi; b) AWG-based wavelength routing PON (MFL: multi-frequency laser; BS: band splitter); c) wavelength routing with spectrum slicing based on LED-based colorless ONUs.

In figura 6.1b è mostrata invece una PON con instradamento delle lunghezze d'onda basato su AWG (arrayed waveguide grating). In questo caso, lo splitter/accoppiatore passivo viene sostituito con un router di lunghezza d'onda AWG. Tale schema offre una minore insertion loss (le AWG hanno un insertion loss tipico di 5dB indipendentemente dal numero di lunghezze d'onda), ed in più non sono necessari ricevitori selettivi di lunghezza d'onda, nel lato trasmissione delle ONU (upstream) resta comunque indispensabile un trasmettitore di lunghezza d'onda univoco (o sintonizzabile). Una variante della PON con instradamento a lunghezza d'onda (wavelength routed) utilizza una cascata di filtri AWG, sfruttando il comportamento di routing periodico di tali filtri, per migliorare la scalabilità.

Può essere realizzato l'uso di ONU identiche dall'utilizzo di un'unica lunghezza d'onda condivisa anche per l'upstream. Tale approccio con la WDM PON viene chiamato Composite WDM PON (CPON<sup>[1]</sup>) e quindi porta a delle semplificazioni nell'architettura e nelle operazioni della WDM PON. Questo avviene però al costo di banda totale in upstream, e la necessità di tecniche TDMA sempre per l'upstream.

Per unificare la progettazione delle ONU, come alternativa, possono essere usate delle sorgenti ultra-broadband (per esempio LED) che “affettano” spettralmente il segnale in upstream, ma fanno soffrire le ONU di basso power budget a causa di una bassa efficienza di accoppiamento dei LED nella fibra monomodale, ed inoltre viene richiesta una tecnica d'accesso (burst mode) dovuta alla banda limitata in upstream. Nelle OTL i circolatori possono essere usati al posto dei band splitter (BS) per abilitare il “funzionamento bidirezionale su una singola fibra” (single-fiber working, SFW) (figura 6.1c).

Un altro approccio che porta all'uniformità delle ONU fa uso dei modulatori ottici di banda, come ad esempio gli amplificatori ottici a semiconduttore (semiconductor optical amplifier, SOA), con l'affiancamento dei “seed laser”. Nel ONU, il segnale ricevuto viene diviso ed alimentato/rigenerato rispettivamente nel ricevitore e nel modulatore (SOA). Questo sistema porta ad unificare le ONU, con l'inconveniente di avere il flusso

downstream e upstream nella stessa lunghezza d'onda, che conduce ad usare una fibra doppia (bidirectional operation over a fiber pair) od un accesso condiviso. Quest'ostacolo è il maggior difetto, insieme ai costi dei trasmettitori basati sul SOA.

La combinazione del SFW (un requisito di rete nella maggior parte dei casi) con una ONU colorless (senza lunghezze d'onda specifiche) e seed-based porta al SOA riflettente (reflective SOA, RSOA). In questo caso, un'estremità del SOA è totalmente riflettente cosicché l'input e l'output, amplificati e modulati, vengano accoppiati nell'altra estremità della fibra singola.

Un'alternativa alle RSOA sono i modulatori riflettenti ed elettro-assorbenti (reflective electro-absorption modulator, REAM) ed i laser Fabry-Perot ad iniezione bloccata (injection-locked Fabry-Perot laser, IL FP) .

In figura 6.2a è mostrato un diagramma a blocchi di una SFW PON con ONU colorless basate su RSOA: come input per le ONU vengono utilizzate delle lunghezze d'onda di tipo “seed” da un laser multi-frequenza (multi-frequency laser, MFL ). I segnali “seed” non sono modulati nella OLT e possono essere facilmente separati nel ONU da un semplice splitter WDM, e poiché vengono utilizzate lunghezze d'onda dedicate per i seed signal, il numero delle ONU deve essere limitato. In figura 6.2 i segnali trasmessi e ricevuti nel OLT sono amplificati da un EDFA per una maggiore portata.

Un'alternativa alle lunghezze d'onda “seed” dedicate, è il riutilizzo della lunghezza d'onda di trasmissione della OLT (o di ricezione dell'ONU), esposta in figura 6.2b. Per la modulazione appropriata viene richiesto, come la OOK nella RSOA, un segnale “seed” con inviluppo costante, che può essere ottenuto con una modulazione FSK nel flusso downstream, rimpiazzato poi dal RSOA con la modulazione OOK per il flusso upstream. Nelle ONU i due flussi vengono poi combinati da un accoppiatore a 3dB.

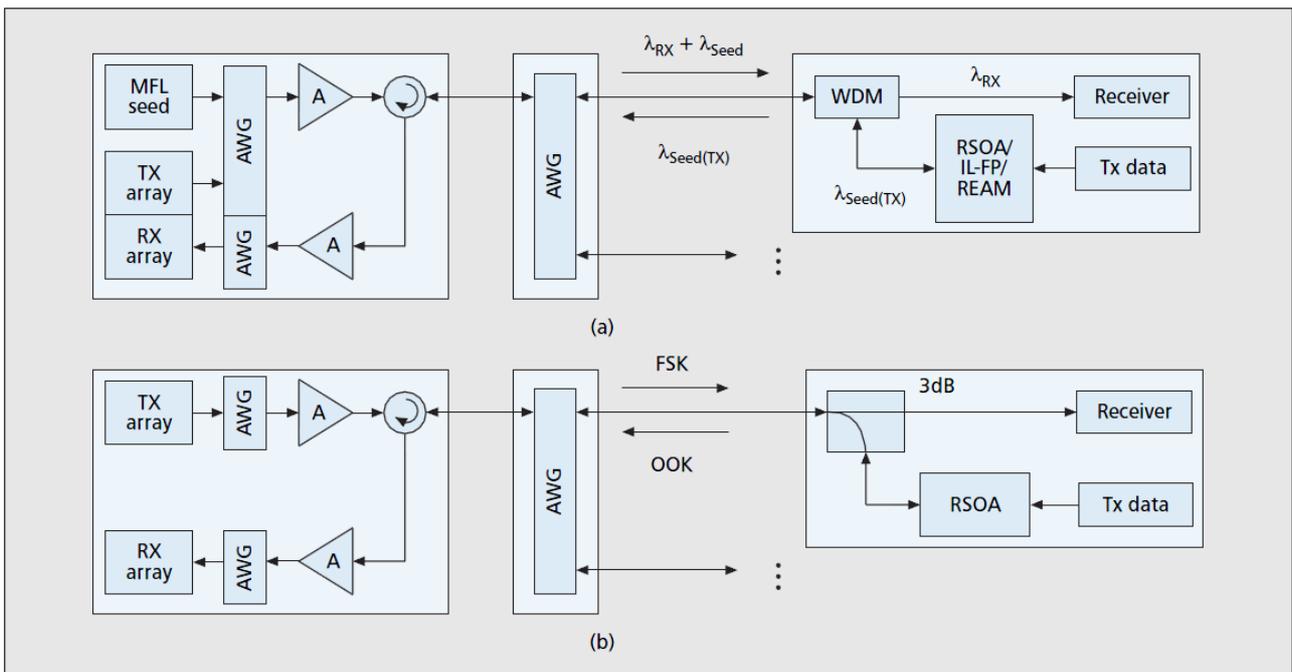


Figura 6.2 ONU colorless con funzionamento a fibra singola e basati su laser RSOA, REAM, o IL-FP: a) differenti "seed" e lunghezze d'onda per il payload in downstream; b) modulazione FSK per il downstream e OOK per l'upstream.

### 6.3 Coarse WDM PON

Le WDM PON discusse fino ad ora sono basate sulla "dense" WDM e, nonostante la maggiore larghezza di banda rispetto alle GPON/EPON, queste architetture portano ad un vertiginoso incremento dei costi a causa del utilizzo dei trasmettitori DWDM. Si potrebbe considerare quindi la CWDM PON come un'alternativa a basso costo.

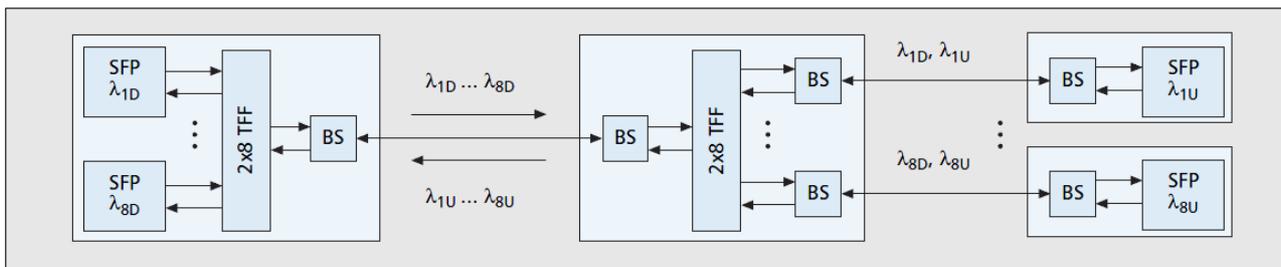


Figura 6.3 Una semplice WDM-PON basata sul small-form factor pluggables (SFP) CWDM. (Nota: il TFF è un filtro CWDM sottile)

In figura 6.3 è mostrata una CWDM PON classica, che utilizza uno small-form factor pluggables (SFP) CWDM a basso costo. Da un punto di vista *CapEx*, questi transceiver offrono il più basso costo per i componenti delle WDM PON nel mercato odierno, mentre da un punto di vista *OpEx* quest'approccio non può competere con un'architettura “colorless”, però l'*OpEx* è mantenuto ancora basso perchè gli SFP sono facilmente “pluggabili” nel territorio e, soprattutto, il numero delle varianti dei diversi ricetrasmittitori è limitato.

Il CWDM PON in figura 6.3 utilizza 16 lunghezze d'onda CWDM per supportare 8 ONU in configurazione SFP, che è quasi il range totale di frequenze per il CWDM (lo standard ITU-T G.694.2 prevede 18 lunghezze d'onda che spaziano dai 1270 nm ai 1610 nm , con un intervallo di 20 nm). Questo significa che viene coperto l'intervallo attorno ai 1410 nm, che presenta una forte attenuazione a causa water peak (cioè, l'assorbimento della luce da parte degli ioni OH). Quindi, le CWDM PON forniscono soltanto un basso rapporto di divisione (low splitting ratio) e per ottenerlo sono necessarie delle fibre low-water-peak.

## 6.4 Power budget

Le CWDM PON hanno comunque un vantaggio significativo per quanto riguarda il power budget. Dalla tabella 6.1 si possono vedere i power budget delle PON DWDM e CWDM. Le attenuazioni dei componenti sono i valori tipici, sono assunti trasmettitori SFP di 1.25 Gbps, e i power budget risultanti sono validi solo per ricevitori a diodo PIN. Gli APD possono essere usati per l'aumento del budget, però con lo svantaggio di aumentare sensibilmente i costi delle ONU.

40-Channel DWDM-PON		8-Channel CWDM-PON	
Component	dB (m)	Component	dB (m)
1G laser Tx [dBm]	1.0	1G laser Tx [dBm]	1.0
AWG Mux [dBm]	- 5.0	TFF Mux [dB]	- 3.5
AWG Router [dBm]	- 5.0	TFF DMX [dB]	- 3.5
Band Splitter [dBm]	- 1.5	Band Splitter [dBm]	- 1.5
1G PIN Rx [dBm]	- 23.0	1G PIN Rx [dBm]	- 23.0
Power budget [dB]	11.0	Power budget [dB]	14.0

Tabella 6.1 *Power budget di WDM-PON non amplificate*

Il power budget in tabella 6.1 è calcolato come differenza tra la potenza d'uscita garantita dal trasmettitore nella fibra e la sensibilità minima del ricevitore, ridotta dalla somma di tutte le attenuazioni ( $\Sigma L$ ) più  $G$ , cioè il guadagno di tutti gli amplificatori opzionali aggiuntivi (in tabella  $G$  viene considerato 0)

$$B = Tx_{\min} - Rx_{\min} - \Sigma L_{\text{Componenti}} + G \quad (6.1)$$

$B$  è il valore di budget che può essere usato per la trasmissione.

Un importante aspetto delle WDM PON è la loro integrazione con gli amplificatori

operazionali. Tale integrazione potrebbe essere necessaria sia per aumentare la portata, o per permettere una divisione aggiuntiva TDM/TDMA per lunghezza d'onda, richiesto per un enorme incremento delle divisioni totali ben oltre l'1:100.

## 6.5 WDM PON attiva

L'amplificazione nelle WDM PON può non essere ristretta ai booster ed ai preamplificatori nella OLT, come visto in figura 6.2 ma, con lo scopo di aumentare la portata e lo split ratio, possono venire incorporate le fibre attive remote (remote active fibres) od i nodi remoti attivi (remote active nodes). L'amplificazione tramite fibre remote può essere basata sull'amplificazione Raman o su fibre drogate all'erbio (remotely-pumped). L'integrazione dei nodi attivi con EDFA aggregati (lumped) porta al concetto di WDM PON attiva, o super WDM PON (figura 6.4).

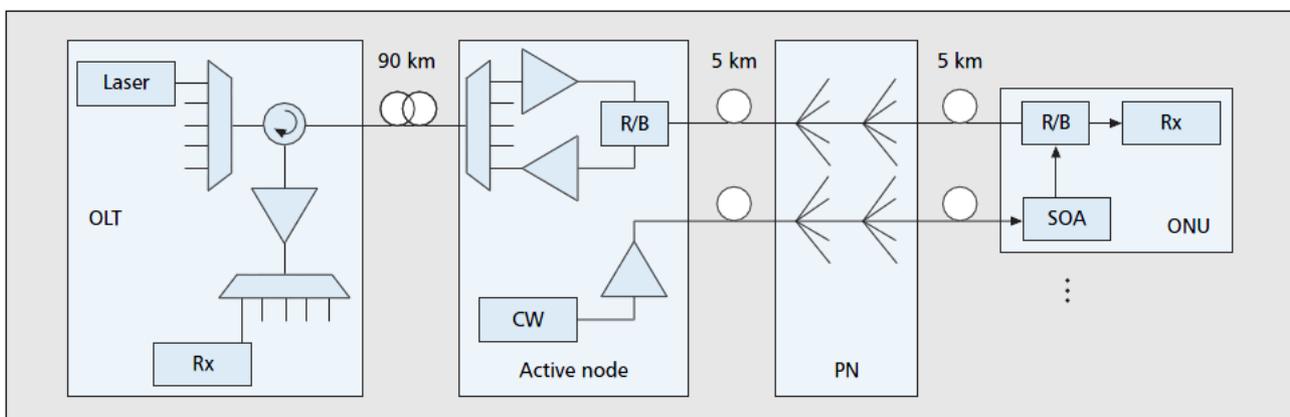


Figura 6.4 WDM-PON con nodi intermedi attivi e passivi ed ONU colorless.

## 6.6 WDM PON ibride

Tutte le WDM PON possono essere usate in combinazione con le tecnologie TDMA (GPON ed EPON) per aumentare lo split ratio. Questo significa che la tecnologia GPON/EPON viene eseguita in coppia con le lunghezze d'onda delle DWDM o delle CWDM, invece d'utilizzare lunghezze d'onda standard per l'upstream ed il downstream. Da questa combinazione di tecnologie oltre ad aumentare lo split ratio, si aumenta anche l'attenuazione dovuta all'accumulo di componenti, per questo c'è la necessità di sostituire i ricevitori a basso costo basati su diodo PIN, con dei ricevitori APD (avalanche photodiode, fotodiodo a valanga) o integrare ulteriori amplificatori.

## 6.7 Analisi delle WDM PON

Le WDM PON possono offrire diversi bit rate per lunghezza d'onda sia per l'upstream che per il downstream, e tale flessibilità fornisce scalabilità sia per lo split ratio che per il "bit rate per ONU". La tabella 6.2 riassume i parametri delle tipologie di WDM PON discusse fino ad ora.

	Spilitter WDM-PON	AWG-based PON	CWDM-PON	Cascade AWGs
<b>Downstream/ Upstream Bit Rate [Gbps]</b>	1, 2.5, 4, 10 dedicated	1, 2.5, 4, 10 dedicated	1, 2.5, 4, 10 dedicated	1, 2.5, 4, 10 dedicated
<b>Wavelengths Grid</b>	100 (50) Ghz	100 GHZ, 50 Ghz interleaved	20 nm (L-, C-, S-, and O- bands)	100 GHZ, 50 Ghz interleaved
<b>Max. Split</b>	1:32	1:40	1:8	1:40
<b>Max. Budget [dB]</b>	8 (1G APD)	10 (1G PIN)	13 (1G PIN)	12 (1G APD)
<b>ONU link cost [rel.]</b>	242 (1G per $\lambda$ )	256 (1G per $\lambda$ )	122 (1G per $\lambda$ )	300 (1G per $\lambda$ )
	<b>Amplified DWDM</b>	<b>CWDM + TDMA</b>	<b>DWDM + TDMA</b>	<b>Amplified, TDMA</b>
<b>Downstream/ Upstream Bit Rate [Gbps]</b>	1, 2.5, 4, 10 dedicated	Up to ~ 1 Gbps ( ~250 Mbps for 1:8 split and 2.5 G aggregate bit rate, 90% efficiency)	Up to ~ 1 Gbps ( ~500 Mbps for 1:4 split and 2.5 G aggregate bit rate, 90% efficiency)	Up to ~ 1 Gbps ( ~250 Mbps for 1:8 split and 2.5 G aggregate bit rate, 90% efficiency)
<b>Wavelengths Grid</b>	100 (50) Ghz	20 nm	100 (50) Ghz	100 (50) Ghz
<b>Max. Split</b>	1:40	1:64	1:160	> 1:320
<b>Max. Budget [dB]</b>	>30, salable	11 (1:64, 2G5 APD)	11 (1:160, 2G5 APD)	> 30, scalable
<b>ONU link cost [rel.]</b>	280 (1G per $\lambda$ , PIN, 1 active node, plus booster and pre-amp in OLN)	132 (1G per $\lambda$ )	234 (1G per $\lambda$ )	190 (1G per $\lambda$ , PIN, 1 active node, plus booster and pre-amp in OLN)

Tabella 6.2 *Parametri delle WDM-PON e WDM/TDMA-PON ibride.*

Gli split ratio elencati risultano o dalla tecnologia WDM utilizzata e dai propri componenti, o dal massimo valore di attenuazione che può essere tollerata dal progetto relativo.

I “link cost” sono i costi dei collegamenti “dual-ended”, che includono le rispettive porzioni dei componenti più comuni come lo splitter, shelves, etc. Il costo  $C$  viene ottenuto come somma di tutti i componenti, diviso per il numero di collegamenti ONU, e normalizzato per il costo della GPON ( $C_{GPON}$ )

$$C = (\sum C_{Shelves} + \sum C_{Transceivers} + \sum C_{Filters} + \sum C_{Splitters/Couplers} + \sum C_{FPGAs/ASICs} + \sum C_{Amplifiers}) \cdot R_s / W / C_{GPON} \cdot 100 \quad (6.2)$$

dove  $R_s$  è lo split ratio per lunghezza d'onda.

Il bit rate per ONU per le WDM PON sono i bit rate dei rispettivi transceiver, ad

esempio 1.25 Gb/s, 2.49 Gb/s, 4.3 Gb/s, o 9.98 Gb/s. Questi bit rate devono essere ridotti dagli overhead dei rispettivi protocolli di trasporto. Per le WDM+TDMA PON, il bit rate per ONU  $R_{B,ONU}$  è il bit rate del canale WDM  $R_{B,WDM}$  moltiplicato per il successivo fattore di divisione (splitting factor) della TDMA,  $RS$ , e per l'efficienza TDMA,  $\eta$ :

$$R_{B,ONU} = R_{B,WDM} \cdot RS \cdot \eta \quad (6.3)$$

Si noti che in questo caso è stato utilizzato  $\eta = 0.9$ , assumendo un'efficienza simile a quella della GPON.

I bit rates per ONU, i power budget e costi risultanti sono illustrati in figura 6.5 (per le PON WDM/WDMA e WDM/TDMA prese in considerazione).

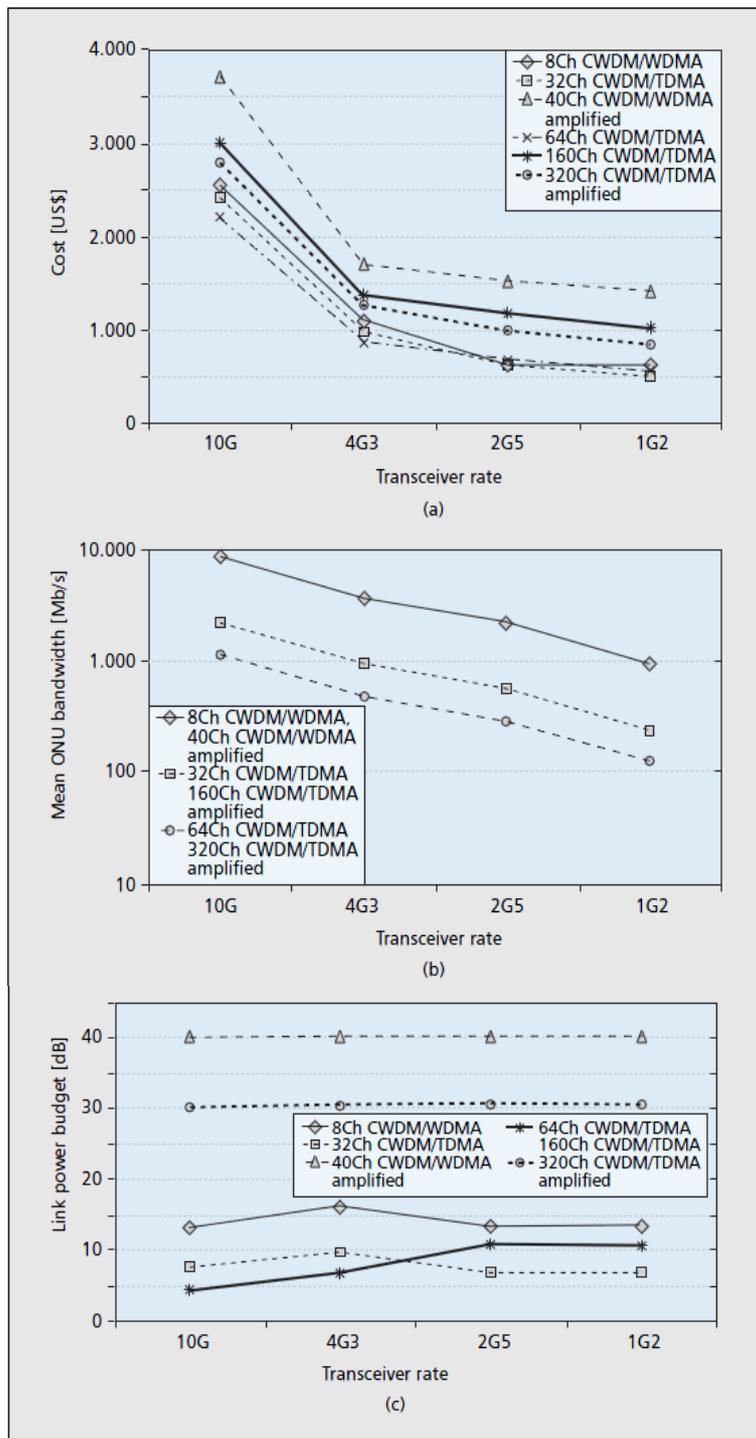


Figura 6.5 *Analisi delle WDM-PON a) Costo per collegamenti ONU dual-ended; b) Banda media per-ONU in Mbps; c) Link power budget.*

Le curve del costo e del power budget per le CWDM PON con 32 canali TDMA aggiuntivi sono comparabili al TDMA a 64 canali dal fatto che sono stati usati ricevitori

PIN finché hanno portato a risultati di bilancio ragionevole; nei casi del 4.3G e 10G di bit rate per lunghezza d'onda, sono stati utilizzati i ricevitori APD, anche per i bassi tassi di divisione TDMA, il che spiega il comportamento delle prestazioni del costo e del power budget.

La differenza di costo significativa tra le DWDM e le CWDM PON provengono quasi esclusivamente dalla differenza tra i laser CWDM e DWDM. Ad esempio, gli SFP del CWDM sono significativamente meno costosi rispetto agli SFP del DWDM a causa di un progetto più semplice (per esempio, non hanno bisogno di dispositivi di raffreddamento). In combinazione con la multiplexazione TDM/TDMA per lunghezza d'onda, la CWDM PON può anche essere venduta a dei prezzi inferiori della GPON pur fornendo significativamente più un bit rate per ONU maggiore ed un power budget migliore.

## Riferimenti

- 1 A. Banerjee et al., "Wavelength-Division Multiplexed Passive Optical Network (WDM-PON) Technologies for Broadband Access: A Review," Invited, J. Opt. Networking, vol. 4, no. 11, Nov. 2005, pp. 737–58

# CAPITOLO 7

## PROBLEMA ENERGETICO

---

### 7.1 Questione energetica nelle reti ottiche di nuova generazione

Per alcuni operatori, i costi connessi al consumo energetico nelle reti in esercizio rappresentano una spesa rilevante, anche grazie all'introduzione di norme più severe in tale ambito: nel marzo 2007 il Consiglio Europeo ha approvato l'obiettivo di ridurre le emissioni europee di gas serra del 20 per cento rispetto ai livelli del 1990 entro il 2020.

C'è anche una maggiore consapevolezza che un utilizzo più efficiente dell'energia nelle reti di telecomunicazioni avrebbe il duplice effetto non solo di abbassare il consumo energetico del settore del “Information and Communications Technology” (ICT), ma anche di abbassare l'impatto ambientale di molte attività umane. Il consumo energetico è un concetto che è passato dall'essere “totalmente trascurabile” a “fondamentale” nella

progettazione delle reti.

Dal punto di vista della sostenibilità, il “carbon footprint” (cioè la quantità di gas serra prodotti direttamente o indirettamente) associato all'accesso a banda larga si estende oltre la pura dissipazione di potenza delle apparecchiature di rete, fino ad includere le fasi come la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione e la dismissione. Assumendo una media globale di consumo elettrico, un' "analisi del ciclo di vita" (life cycle assessment, LCA) di una rete fissa a banda larga, principalmente una digital subscriber line (DSL)<sup>[1]</sup>, dimostra che il consumo energetico delle apparecchiature è la principale causa del carbon footprint. Tuttavia, considerando che l'accesso fiber-to-the-home (FTTH) richiede una posa di fibre su larga scala, si potrebbe sostenere che, per la FTTH, il contributo della distribuzione, a seconda di come essa è allocata, diventerebbe altrettanto significativa. Secondo uno studio LCA<sup>[2]</sup> sugli scenari di implementazione della FTTH eseguite per il Consiglio Europeo su tale architettura d'accesso, l'80 per cento del consumo energetico per la posa dell'FTTH è legato alla produzione, al trasporto, alla distribuzione e alla dismissione, e di questi, l'83 per cento è legato alla distribuzione delle attrezzature passive. Tuttavia, questo studio si limita a 15 anni di vita per l'infrastruttura d'accesso di rete e non comprende le ONU.

Nelle reti odierne, il consumo energetico è dominato dal segmento d'accesso a causa della grande quantità di elementi distribuiti nelle reti. Oltre ai Data Center, che rappresentano un contributo significativo e in rapida crescita della potenza nelle reti, il contributo relativo al consumo energetico tende ad aumentare quanto più ci avviciniamo al cliente. Quindi, il segmento di accesso, in particolare l'attrezzatura nell'edificio del cliente (il cosiddetto customer premise equipment, CPE), presenta un contributo dominante della potenza della rete. Nell'accesso ottico, il consumo energetico del ONU dipende dalla progettazione del sistema: differenti sistemi richiedono diversi componenti e funzionalità sul lato ONU. Di conseguenza, la conoscenza del consumo energetico dell'architettura d'accesso di prossima generazione richiede la comprensione del consumo energetico dei nuovi sistemi, e l'impatto che avrà sia sul lato cliente che su quello dell'operatore, nonché il

cambiamento dalla distribuzione attuale a quella futura. Tutti questi aspetti sono essenziali per le decisioni in materia d'investimento a lungo termine nelle infrastrutture in fibra

## 7.2 Lo sleep mode

Il confronto del consumo energetico di diverse soluzioni d'accesso richiede un approccio olistico. Il consumo energetico della rete totale dipende dalla progettazione del sistema, dall'architettura e dalla gestione dinamica della potenza, come ad esempio lo “sleep mode”.

Oltre all'ottimizzazione del consumo energetico statico (attraverso la progettazione del sistema), uno dei modi più promettenti per ridurre la potenza nella rete d'accesso è attraverso la gestione dinamica dell'energia per aumentare il comportamento adattativo di carico del consumo energetico. Ciò è dovuto alla combinazione di un grande contributo all'alimentazione della rete e, mediamente, di un basso utilizzo della rete di accesso rispetto ad altre parti della rete. Quindi, la potenza complessiva del segmento d'accesso può essere drasticamente ridotta, ottimizzando il consumo energetico dei dispositivi installati presso gli utenti finali: una soluzione è quella di sfruttare la modalità di sospensione (stand-by) dei dispositivi, quando non trasmettono né ricevono traffico.

La motivazione di tale approccio deriva dalla natura di alcune PON che sono basate su trasmissioni multiple a divisione di tempo (TDM), cioè il traffico downstream viene trasmesso dal OLT verso tutte le ONU, ma viene scartato se non è ricevuto dal giusto destinatario. Ciò comporta notevole spreco d'energia poiché ogni ONU deve ricevere e decodificare i dati destinati alle altre ONU. Per risparmiare energia, ogni ONU potrebbe rimanere in modalità “sleep” qualora la trasmissione non dovesse ricevere dati destinati a sé. Analogamente, se una ONU non ha necessità di trasmettere, potrebbe rimanere in stand-by, mentre le altre sono in trasmissione. In pratica, ogni unità ottica può risparmiare

energia passando dinamicamente alla modalità sleep quando non deve inviare o ricevere traffico.

Tuttavia, per attuare tale modalità, è necessario risolvere alcuni problemi. Nelle reti TDMA le ONU sincronizzano il loro clock locale con quello delle OLT per mezzo dei loro circuiti di clock e recupero dati (clock and data rescue, CDR), che ricevono il flusso continuo di bit (dati o idle) dalla OLT, quindi se l'ONU interrompe la ricezione dei dati trasmessi in downstream, la sincronizzazione del clock dell'ONU viene perduta e l'attuale architettura ONU richiede tempi lunghi di recupero quando il circuito di clock dell'unità si "risveglia" dalla modalità sleep. Inoltre, la mancanza di sincronizzazione tra le diverse ONU potrebbe provocare collisioni dei pacchetti dati trasmessi alla OLT.

In generale, l'energia consumata ( $E_C$ ) da ogni ONU che sfrutta la modalità sleep durante un ciclo di trasmissione  $T_C$  (cioè il tempo che intercorre tra due trasmissioni consecutive upstream dalla stessa ONU) può essere scritta come:

$$E_C = P_S T_S + P_{ON} ( T_{ON} + T_{OH} ) = ( P_{ON} - P_S ) ( T_{ON} + T_{OH} ) + P_S T_C \quad (7.1)$$

dove  $P_{ON}$  e  $P_S$  sono la potenza consumata dal circuito ricevente della ONU durante il tempo in cui l'unità è accesa (ON) ed in modalità sleep (S), rispettivamente,  $T_{OH}$  è il tempo necessario per il ricevitore di sincronizzarsi con il clock della OLT e riguadagnare la sincronizzazione con lo scheduling di downstream (overhead). L'equazione (7.1) mostra che l'energia consumata da una ONU in un ciclo è linearmente dipendente non solo dal tempo in cui la stazione è accesa, ma anche dall'intervallo di tempo richiesto per la sincronizzazione della stessa. Inoltre,  $E_C$  è direttamente proporzionale alla potenza consumata durante il tempo di sleep mode  $P_S$ .

Questo indica che si possono sfruttare due dimensioni per diminuire l'energia consumata dalla ONU:

1) il tempo, cioè la durata dell'intervallo di sincronizzazione e del periodo di attività

2) la potenza consumata, soprattutto quando la ONU è in modalità sleep

Le soluzioni più popolari e discusse per migliorare il consumo energetico dal lato ONU possono essere classificate nelle tecniche ONU di: Power shedding, Dozing, Deep sleep e Fast sleep<sup>[3]</sup>.

### 7.2.1 Power shedding

La tecnica di power shedding sfrutta il fatto che alcune funzionalità delle ONU possono non essere necessarie per un periodo di tempo definito, e quindi possono venir spente. Questo approccio di “spegnere” i meccanismi (le funzionalità) interni, mantiene comunque il collegamento pienamente attivo, il che significa che i ricetrasmittitori delle ONU sono sempre attivi.

Un metodo di power shedding esteso permette all'utente di informare l'operatore dei periodi di tempo specifici durante il quale in dato servizio non viene utilizzato e dà modo all'operatore di spegnere tali interfacce ONU non richieste dall'utente. Tale soluzione può essere conveniente per entrambi: mentre l'operatore non necessita di decidere quando spegnere le interfacce ONU, il cliente può regolare il consumo della propria ONU. In ogni caso, è l'OLT il responsabile per il controllo e la gestione del servizio: l'ONU toglie e ripristina la corrente solo quando viene indicato dalla OLT.

Uno dei vantaggi del power shedding è che è una tecnica ben conosciuta e sperimentata, già largamente applicata nei telefoni cellulari, PC laptop e monitor industriali. In più, secondo uno studio ITU-T, tale tecnica può salvare oltre il 70% della potenza in “active state” di una normale ONU nord-americana, mentre le dimensioni di una batteria di riserva possono essere ridotte del 50%<sup>[3]</sup>.

## 7.2.2 Dozing

La tecnica di dozing prevede che il trasmettitore ONU possa essere spento per un certo periodo di tempo, mentre il ricevitore rimane sempre acceso. Questo implica che una “dozing ONU” (sonnecchiante) ignori la propria allocazione dei timeslot in upstream fintanto che non ha traffico da inviare, ma mantenga il collegamento downstream pienamente funzionante e permetta una consegna continua di traffico verso il CPE. In qualunque caso, l'ONU può essere “svegliata” da una specifica richiesta da parte dell'OLT o da agenti locali. Esempi di tali “agenti locali” possono essere la ricezione di traffico upstream da parte di qualunque UNI (User Network Interface) o il traffico generato da un processo interno.

Nel frattempo l'OLT deve inviare grant di upstream alle ONU semi-dormienti senza aspettarsi risposta, cosicché possano recuperare la sincronizzazione immediatamente nel caso di presenza di traffico da inviare.

## 7.2.3 Deep sleep mode

La modalità deep sleep è caratterizzata dal fatto che il ricevitore e la maggior parte delle funzionalità rimangono completamente spenti per l'intera durata dello stato “power save”. Solo alcune funzionalità base rimangono (opzionalmente) attive, come la “rilevazione di attività” e qualche temporizzazione locale. Una ONU in modalità deep sleep può essere “svegliata” quando viene accesa dall'utente o quando la temporizzazione locale scade. Per evitare inutili “condizioni d'allarme” la OLT deve essere informata della transizione della ONU in modalità deep sleep; mentre l'ONU è in tale stato la OLT può decidere se mantenere o eliminare il traffico downstream, e può anche allocare traffico upstream senza però aspettarsi alcuna risposta. In qualunque caso, l'OLT deve allocare un grant in

upstream per permettere all'ONU uscita dalla modalità sleep di recuperare la sincronizzazione in tempi ragionevoli.

Questa modalità è utile ad esempio quando il cliente spegne il proprio terminale (pc, modem, router etc.) o quando il service provider pensi che la perdita di servizio dovuta allo “deep sleep” sia tollerabile.

#### 7.2.4 Fast sleep mode

La modalità “fast sleep” prevede che, mentre l'ONU è nello stato “power save”, essa attraversi una sequenza ciclica di sleep, ognuna composta da un periodo di inattività e un periodo attivo. Durante il periodo inattivo l'ONU si comporta come se fosse nella modalità deep sleep, mentre durante il periodo attivo, l'ONU è totalmente operativa.

La transizione tra i due periodi è sincronizzata e controllata dall'OLT tra tutte le ONU in modalità fast sleep (infatti una ONU entra in modalità fast sleep solo quando viene ricevuto il relativo messaggio dall'OLT).

Una ONU si sveglia quando il timer scade e genera un segnale di “wake up” (dopo un periodo di tempo prestabilito dalla OLT). Dopo che la ONU si è svegliata, entra nello stato sincronizzazione prima di recuperare completamente la normale funzionalità. Mentre l'ONU sta “dormendo”, la OLT bufferizza il traffico downstream indirizzato ad essa, cosicché possa essere trasmesso e ricevuto quando l'ONU si sveglia.

### 7.3 Studio del risparmio energetico nel “active state”

Le opportunità di sfruttamento della modalità Sleep possono essere maggiori in

alcuni sistemi rispetto ad altri, in questo paragrafo confrontiamo invece la dissipazione energetica nello stato “attivo”.

Oltre allo “sleep mode” sono in corso studi condotti sia all'interno della comunità di ricerca, sia da gruppi di lavoro in seno agli organi di standardizzazione, per la definizione di parametri di misurazione appropriati e metodi di misurazione per l'efficienza energetica delle apparecchiature a banda larga, che forniscano così una misura utile a minimizzare il consumo energetico della rete totale. In generale, è difficile confrontare sistemi con diverse funzionalità e capacità, poiché per le reti di accesso non è possibile presentare il consumo energetico come una misura di “energia per bit trasportato”, quindi è più opportuno confrontare i sistemi rispetto alla capacità di linea (power-per-line) e raggrupparli in diverse categorie separate, dato che potrebbero non essere confrontabili direttamente gli uni con gli altri.

Il principale produttore di “consumo energetico” è il tipo di tecnologia che viene usata nel CPE, quindi è fondamentale capire la power-per-line potenziale dei diversi sistemi di prossima generazione, ma al di là della capacità di linea del sistema anche l'aspetto dell'architettura influisce sul consumo energetico complessivo della rete. Una possibile riduzione energetica della rete potrebbe essere ottenuta aumentando la condivisione delle risorse di rete tra i clienti. Con un minor numero di nodi e più grandi, si potrebbe sfruttare una minore power-per-line negli elementi della rete con numero di porte più elevato, un più alto tasso d'utilizzo degli elementi nei nodi più grandi della rete, e la riduzione dei punti di aggregazione e collegamenti mediante i nodi di consolidamento. Diversi sistemi offrono diverse capacità per i nodi di consolidamento attraverso varie funzionalità (rispetto alla portata, al numero di clienti per fibra, all'ingombro), ed un confronto tra il consumo energetico dei sistemi è rilevante solo per sistemi che offrono un paragonabile tasso di consolidamento dei nodi. In questo paragrafo diamo per scontato che siano pienamente utilizzate tutte le porte del sistema, e non vedremo “miglioramenti potenziali” associati a diversi gradi di utilizzo delle porte per le diverse architetture.

Quindi, per rendere equo il confronto tra diversi sistemi/architetture, un punto critico riguarda la definizione di “parametri” per il confronto, sia tra la rete di accesso e le apparecchiature dell'utente finale, nonché tra la rete di accesso e la rete di backhaul. Il consumo energetico è particolarmente sensibile ai “parametri di confronto” sul lato cliente.

Per quanto riguarda il CPE vi è un'ampia varianza nel consumo energetico, dipeso dalla funzionalità dei dispositivi e da come la rete domestica è stata disposta. Poiché ci sono differenze abbastanza grandi nel consumo energetico dell'ONU per i diversi sistemi, correlati a differenti componenti ottici ed altri elementi richiesti, l'ONU deve essere incluso nel confronto: l'ONU studiata verrà divisa in una parte di base comune a tutti (che contiene funzionalità di una ONU base), e una parte specifica del sistema (Figura 7.1). La parte specifica del sistema della ONU conterrà componenti ottici specifici ed elementi di elaborazione dei segnali necessari per ciascuna delle diverse soluzioni.

La demarcazione della rete di backhaul invece è complicata dal nodo di consolidamento dove il confine d'accesso dei vari sistemi può essere spostato verso la metro/core network. Al fine di confrontare sistemi che offrono diversi nodi di consolidamento, parte della rete di backhaul deve essere inclusa nel confronto. Si userà un approccio semplificato e confronteremo i sistemi con due scenari di riferimento, a 20 km e 60 km di portata.

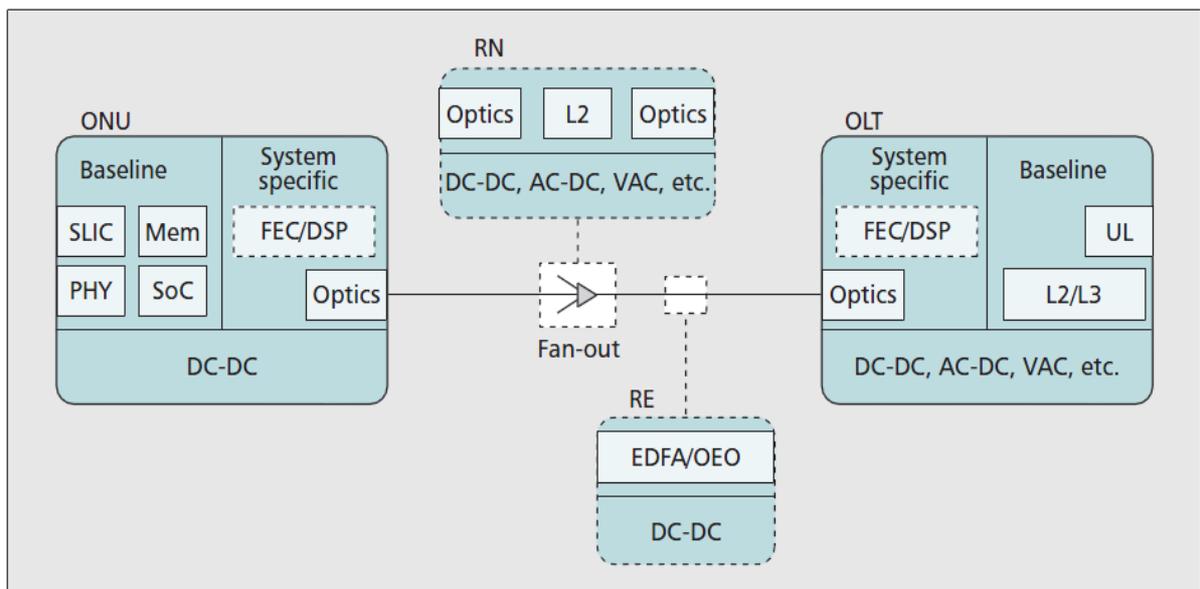


Figura 7.1 *Modello per il confronto del consumo energetico.*

Un'altra questione di interesse sono le specifiche delle apparecchiature presenti nel CO o nei nodi remoti che devono essere inclusi nel confronto. Solo una parte del consumo energetico totale di un sito o di nodo è effettivamente associato alle attuali apparecchiature a banda larga. Vi è un'ulteriore variazione nel consumo energetico a seconda delle apparecchiature ausiliarie, che a sua volta dipendono dalla regione e dal CO. Per il modello di accesso multiplexer DSL (DSLAM) può essere usato un modello proposto dalla ETSI (European Telecommunication Standard Institute), dove le apparecchiature sono classificate come a banda larga o ausiliarie: per le apparecchiature a banda larga, il consumo d'energia viene valutata all'ingresso in DC, mentre il consumo energetico del sito è definito all'ingresso AC, che comprende anche le perdite dei raddrizzatori e i consumi dei sistemi climatici. In pratica, il consumo di corrente alternata può essere modellato con un fattore di proporzionalità rispetto al consumo di corrente continua attraverso un "site factor": il consumo energetico delle apparecchiature a banda larga dipende dalla tecnologia utilizzata, mentre il consumo di energia delle apparecchiature ausiliarie dipende dall'ubicazione e dalla zona. Per i nodi remoti e apparecchiature del CO, vengono presi in considerazione sia

il site factor sia la perdita di conversione DC-DC (assumiamo un'efficienza di conversione del 80%), mentre per le ONU e per gli estensori di portata (Reach Extenders, RE), teniamo in considerazione solo perdita di conversione DC-DC.

## **7.4 Architetture d'accesso ottiche di prossima generazione**

I sistemi d'accesso di prossima generazione (oltre il 10G TDM-PON) dovrebbero fornire un rate sostenibile di downstream fino a 1 Gbps e rate upstream fino a 250 Mbps con un fan-out di almeno 1:64 con una capacita d'estensione di 100 Km per supportare il nodo di consolidamento (considerato una strada importante per ridurre i costi della rete d'accesso).

Sono stati proposti diversi sistemi che sono in grado di soddisfare i requisiti di banda degli accessi di rete, come la WDM PON, la Stacked TDMPON, la WDM/TDM PON ibrida, e l'Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) PON, che presentano tutti diversi compromessi in termini di costo, potenza e prestazioni. Tutte le soluzioni considerate sono illustrate nella figura 7.2, e la dissipazione di potenza delle componenti specifiche sono elencati nella Tabella 7.1 (I valori si basano su stime attuali e possono cambiare a seconda dell'evoluzione dei diversi componenti).

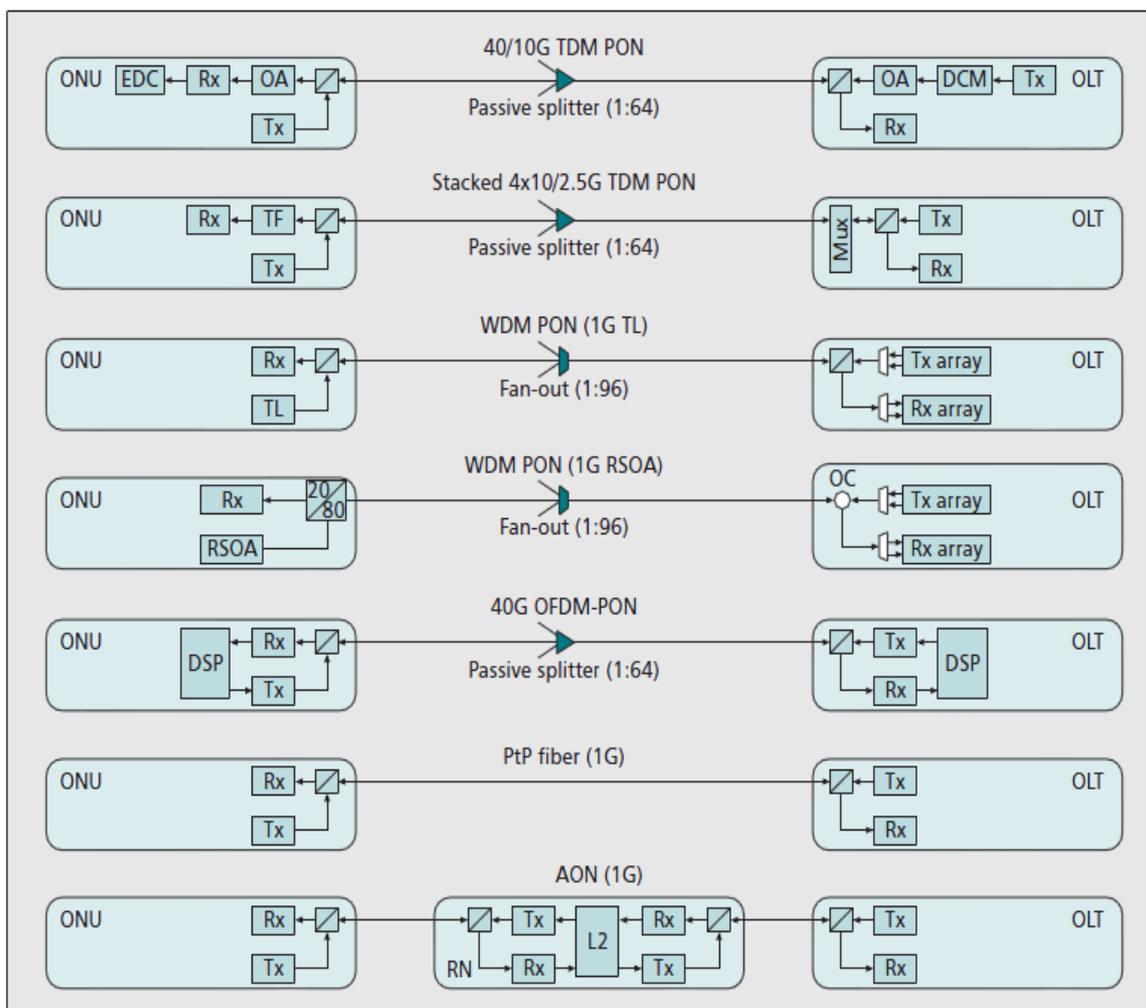


Figura 7.2 *Schemi degli accessi ottici di prossima generazione*

### 7.4.1 40G NRZ TDM-PON

Così come le soluzioni dell'attuale generazione delle PON sono basate sulla codifica non-return to zero (NRZ) on-off keying (OOK), una naturale evoluzione è la 40G NRZ TDM-PON. Il principale problema con la trasmissione a 40G NRZ è il limite di dispersione che, senza alcuna forma di compensazione, si riduce a 4 km (a 1550 nm). Quindi viene richiesta una compensazione della dispersione e un'amplificazione di potenza ottica per soddisfare i 20 Km come requisito base della portata. In Figura 7.2 viene presentata una

soluzione 40G TDM-PON che comprende un modulo di compensazione della dispersione (dispersion compensation module, DCM) ed un dispositivo elettronico di compensazione della dispersione (electronic dispersion compensation, EDC) in post-elaborazione dal lato ONU.

Una portata maggiore richiede l'introduzione di estensori di portata (mid-span reach extenders) con un'aggiuntiva amplificazione del segnale ottico e compensazione della dispersione mediante con o amplificatori a fibra drogata a Erblio (EDFA) con un DCM, o una conversione ottica-elettronica-ottica (OEO) .

#### 7.4.2 Stacked 4x NRZ TDM 10G PON

Un'alternativa al 40G NRZ PON è la sovrapposizione di quattro 10G TDM PON (XG-PON) a diverse lunghezze d'onda sulla stessa ODN per fornire una capacità totale di 40Gbps in downstream e di 10G in upstream. Il consumo energetico è simile a quello del 10G TDM-PON, tranne per il fatto che il numero di ONU per ricetrasmittitori OLT è ridotto, con il conseguente aumento del consumo di potenza per linea della porta OLT.

Per questo sistema assumiamo 16 ONU per lunghezza d'onda. La portata del sistema è anche leggermente ridotta rispetto ai tradizionali XG-PON a causa dei componenti aggiuntivi nel percorso ottico, ma l'estensione della portata può essere ottenuta mediante un EDFA, un amplificatore ottico a semiconduttore (SOA), o un OEO.

### 7.4.3 WDM-PON

La moltiplicazione per divisione di lunghezza d'onda offre un modo interessante per aumentare la capacità in una PON. Sono disponibili diverse varianti, ma verranno considerate solo le due principali: la prima è basata su laser sintonizzabili (tunable laser, TL) e la seconda sugli amplificatori ottici riflettenti a semiconduttore (RSOAs), entrambe presso la ONU.

Per la prima variante si sono assunti i laser sintonizzabili con un dispositivo di raffreddamento termoelettrico, mentre per la seconda variante si assume una soluzione basata sulla lunghezza d'onda di riutilizzo ed una rimodulazione RZ/IRZ. Entrambi questi sistemi sono illustrate in Figura 7.2.

A differenza dei sistemi precedenti, entrambi si basano su un “wavelength splitting fan-out” piuttosto che su uno splitter di potenza ottica. Ciò si traduce in riduzione della perdita ottica e di una maggiore portata. Qui assumiamo 96 canali bidirezionali per una capacità totale di 96 Gbps. La soluzione basata su laser sintonizzabili può raggiungere oltre i 60 km senza estensori di portata, mentre per la soluzione basata su RSOA la portata di 60 km viene raggiunta mediante un EDFA.

### 7.4.4 40G OFDM-PON

La moltiplicazione OFD (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) offre un metodo alternativo per aumentare l'efficienza spettrale nella trasmissione ottica.

L'informazione è trasportata attraverso più sotto-portanti ortogonali ravvicinate e ogni banda OFDM, avente diverse sotto-portanti, richiede soltanto un singolo ricetrasmittitore.

I vantaggi delle OFDM PON comprendono la resilienza verso la dispersione cromatica, mentre gli svantaggi includono la sensibilità al rumore di fase, un grande

rapporto peak-to-average-power (PAPR), una richiesta di alta risoluzione dei convertitori analogico-digitale (ADC) e una maggiore quantità di elaborazione dei dati su entrambi i lati del collegamento. Si può ottenere anche un'estensione della portata, preferibilmente mediante un EDFA.

#### 7.4.5 Fibra PtP (1G)

Le soluzioni precedentemente descritte sono tutte basate sulla rete di distribuzione ottica PON. Una topologia alternativa è l'architettura punto-punto (point-to-point, PtP), in cui ogni abbonato è collegato direttamente al CO attraverso una fibra.

Quest'architettura richiede un aggiornamento meno complesso per ottenere velocità maggiori, ma richiede un condotto ampio (per il gran numero di fibre) e un ampio footprint nel CO. Tuttavia, gli estensori di portata non sono necessari, anche in uno scenario di "long reach".

#### 7.4.6 1G AON

Le reti ottiche attive (Active optical networks, AONs) offrono una soluzione d'accesso alternativa, offrendo maggiore flessibilità, ma al costo di un ulteriore nodo remoto attivo in campo, che necessita di alimentazione e di manutenzione. Per il nostro confronto assumiamo che ogni nodo remoto supporti 16 porte da 1G in downlink e una porta di uplink da 10G.

### 7.4.7 Soluzioni ibride

Oltre alle soluzioni descritte, esistono varie ed interessanti soluzioni ibride che combinano i vantaggi delle diverse soluzioni (solitamente WDM, con qualche altra soluzione). Un esempio è il sistema ibrido WDM/TDM basato sul 10G TDM PON in cui si combina l'efficienza delle risorse hardware (multiplexing statistico) della TDM-PON, con l'aumento della capacità complessiva della tecnologia WDM. Sono anche possibili diverse combinazioni di downstream e upstream che potrebbero essere motivate dalle differenze nei costi associati con la tecnologia di trasmissione e ricezione, combinata con la grande sensibilità dei costi dal lato ONU.

## 7.5 Risultati

Basandosi sulla dissipazione di potenza dei vari componenti dei sistemi elencati nella Tabella 7.1, e sul valore della dissipazione di potenza di riferimento per l'ONU e la OLT, si può calcolare la potenza totale di ciascuna soluzione d'accesso.

La dissipazione di potenza di riferimento della ONU è stimato a 3,65 W, ed è costituito dai contributi del system-on-chip (SoC) con 2.5 W, dal GbE PHY con 0.5 W, dal doppio subscriber line interface circuit (SLIC) con 0,25 W, dalla memoria (0,12 W), e da vari altri componenti (0,38 W). La precisione della base di riferimento comune non pregiudica la differenza nel consumo energetico tra le diverse soluzioni. Il consumo totale di energia dell'ONU viene calcolato dal contributo di riferimento, dal contributo specifico del sistema, e dalla perdita DC-DC.

La dissipazione di potenza di riferimento per la OLT è modellato per unità di capacità backplane che assumiamo a 1,25 W/(Gb/s). Questa cifra viene estrapolata dalla dissipazione di potenza massima della porta della XG PON<sup>[4]</sup>, prima di tutto sottraendo la

potenza dissipata dalle funzionalità specifiche della XG PON: la dissipazione di potenza di riferimento per porta sarà quindi diversa per sistemi che supportando diverse capacità complessive in downlink.

Componente	Dissipazione di potenza [W]
<b>40G NRZ TDM PON</b>	
40G/10G TR <sub>x</sub> (OLT)	16
SOA (OLT, ONU)	1
10G/40G TR <sub>x</sub> (ONU)	8
EDC (ONU)	2
EDFA (RE)	6
<b>Stacked 4×10G NRZ TDM PON</b>	
10G/2.5G TR <sub>x</sub> (OLT)	4
2.5G/10G TR <sub>x</sub> (ONU)	2.5
EDFA (RE)	6
OEO (RE)	6.5
<b>WDM-PON (TL)</b>	
1G TL + APD (ONU)	3.5
TR <sub>x</sub> array per porta (OLT)	0.8
<b>WDM-PON (RSOA)</b>	
1G RSOA + APD (ONU)	1
TR <sub>x</sub> array per porta (OLT)	0.8
<b>OFDM-PON</b>	
OLT TR <sub>x</sub> (OLT)	3.5
DSP per canale (OLT)	0.5
ONU TR <sub>x</sub> (ONU)	3.5
DSP (ONU)	4
EDFA (RE)	6
<b>1G PtP fiber Ethernet</b>	
1G TR <sub>x</sub> (OLT, ONU)	1
<b>1G AON</b>	
10G Tr <sub>x</sub> (OLT, RN)	4
1G TR <sub>x</sub> (ONU, RN)	1

Tabella 7.1 *Stima dei valori tipici di dissipazione di potenza per i componenti specifici dei vari sistemi delle differenti soluzioni d'accesso ottico*

I risultati dei diversi sistemi sono esposti in Figura 7.3:

- Tutte le soluzioni PON supportano i 20 km senza il reach extender, mentre per i 60 km di portata tutte le soluzioni, tranne la WDM-PON basata sul TL, hanno bisogno degli estensori di portata.
- In termini di consumo energetico, c'è poca differenza tra gli scenari da 20 km e da 60 km, a causa del piccolo contributo da parte del RE.
- I risultati mostrano un potenziale minor consumo energetico per linea da parte della WDM-PON basata sul RSOA, dello stacked 4x10G TDM-PON, e dalla fibra PtP. È interessante notare che nelle soluzioni del TDM PON e OFDM PON, una porzione piuttosto grande del consumo d'energia è all'ONU, mentre per la WDM-PON e la fibra PtP una grande porzione è al OLT. Per il lato OLT, la soluzione TDM-PON offre un consumo energetico molto basso, e questo fatto rimane ancora per la 40G NRZ TDM PON. Per la WDM-PON, l'integrazione elettronica e fotonica può potenzialmente ridurre il contributo OLT al consumo totale energetico nei sistemi futuri.
- In termini di gestione della potenza dinamica, la riduzione potenziale del consumo di potenza sul lato ONU dovrebbe essere uguale (in senso relativo) per le diverse soluzioni. Per la AON e la fibra PtP c'è un maggiore potenziale per la riduzione dei consumi dal lato OLT, ma sebbene la fibra PtP e l'AON sembrano validi per quanto riguarda l'efficienza energetica, ci sono inconvenienti che devono essere ulteriormente analizzati: ci sono costrizioni concrete per l'utilizzo di fibre PtP nello scenario del nodo di consolidamento e per architetture AON c'è una differenza significativa nell'utilizzo delle porte rispetto alle altre architetture che potrebbero influenzare i risultati.

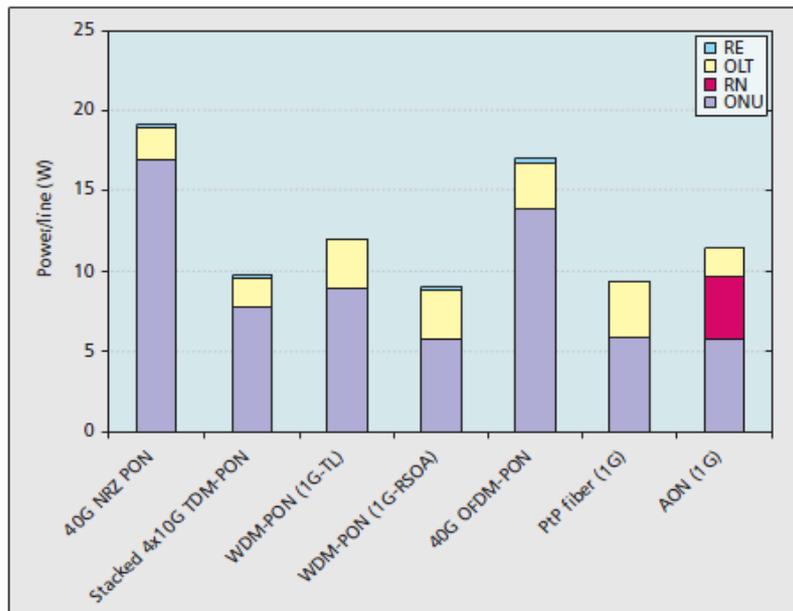


Figura 7.3 Dissipazione di potenza delle differenti soluzioni di accesso ottico

## 7.6 Conclusioni

La combinazione del limite di dispersione in rapida diminuzione della NRZ OOK per i crescenti tassi di accesso, e il desiderio di raggiungere una maggiore portata d'accesso al fine di abilitare il nodo di consolidamento, stanno attirando l'attenzione di nuovi strumenti per potenziare le capacità di accesso in rete, e uno dei criteri di selezione di spicco, a parte il costo, sarà di efficienza energetica.

Considerando che una parte piuttosto grande del consumo energetico collegato alla rete d'accesso è associato al consumo energetico della ONU, è di importanza cruciale per gli accessi ottici di prossima generazione capire come sistemi, architetture e tecnologie diverse influiscano sul consumo energetico alle ONU.

Il confronto in questo capitolo dimostra che la 40G NRZ OOK PON porta grandi consumi alla ONU, mentre l'OFDM porta ad aumentare la dissipazione di potenza all'ONU a causa di una elaborazione più elevata.

Lo Stacked 10G TDM-PON invece dimostra una significativa efficienza energetica e può rappresentare un'alternativa interessante nel breve termine.

A lungo termine, la WDM-PON è un'opzione energetica efficiente, che offre un basso consumo energetico alla ONU e con l'aumentare dell'integrazione fotonica ed elettronica, nel futuro delle WDM PON, ci possiamo aspettare una ridotta dissipazione di potenza anche nel lato OLT.

## Riferimenti

- 1 J. Malmudin and D. Lundén, ISSST 2010, Washington.
- 2 Developing a Generic Approach for FTTH Solutions Using LCA Methodology, Ecobilian S.A., FTTH Council Europe, Feb. 2007.
- 3 ITU-T Recommendation G.Sup45, *GPON power conservation*, 2009
- 4 Code of Conduct on Energy Consumption of Broadband Equipment, European Commission, v. 4, Feb. 10, 2011.



# APPENDICE 1

## Glossario

---

## **Arrayed waveguide gratings**

L'Arrayed waveguide grating (AWG) è comunemente utilizzato come (de)multiplexer ottico nei sistemi WDM. Tali dispositivi hanno la capacità di multiplexare un gran numero di flussi trasmissivi in una singola fibra ottica e di demultiplexare un singolo canale dal flusso, incrementando considerevolmente la capacità trasmissiva della rete ottica

## **Bit Stuffing**

In informatica il bit stuffing è una tecnica che consiste nell'aggiungere dei bit a zero ad un flusso di dati numerici. Tali bit aggiunti non trasportano informazione, ma sono utilizzati tipicamente per i seguenti motivi:

- Per prevenire che i dati siano interpretati come dati di controllo, come per esempio accade per il protocollo X.25. In questo caso infatti il protocollo prevede l'utilizzo di 6 bit consecutivi ad 1 per segnalare l'inizio e la fine di un frame di dati, quindi se i dati da trasmettere contengono 5 bit a 1 di seguito, viene inserito uno zero dopo il quinto 1 per evitare che i dati siano interpretati come una sequenza di controllo. Il bit 0 viene inserito dopo il quinto bit 1 indipendentemente dal bit successivo (0 o 1): questo perché la stazione di ricezione scarterà in ogni caso il bit 0 successivo a una sequenza di cinque 1 consecutivi.
- Alcuni protocolli prevedono frame di dimensione fissa, gli zeri possono essere inseriti per raggiungere queste dimensioni.
- Altri protocolli prevedono un flusso continuo di dati, gli zeri possono essere inseriti per assicurare la continuità del flusso.

## **Bridge**

In informatica e telecomunicazioni un bridge (letteralmente ponte) è un dispositivo di rete che si colloca al livello datalink del modello ISO/OSI e che traduce da un mezzo fisico ad un altro all'interno di una stessa rete locale. Esso è quindi in grado di riconoscere, nei segnali elettrici che riceve dal mezzo trasmissivo, dei dati organizzati in strutture dette

trame (in inglese frame), di individuare all'interno di esse l'indirizzo del nodo mittente e quello del nodo destinatario e in base a questi operare un indirizzamento dei pacchetti tra più segmenti di rete ad esso interconnessi

### **Cifrario a flusso**

In crittografia, un “cifrario a flusso” (anche “cifrario a caratteri”) è un cifrario simmetrico nel quale i simboli (i bit) che codificano il testo in chiaro sono cifrati indipendentemente l'uno dall'altro e nel quale la trasformazione dei simboli successivi varia con il procedere della cifratura. Un altro termine usato per tale cifrario è “cifrario a stati”, termine che ricorda che la cifratura di ogni simbolo dipende da uno stato corrente. Tipicamente nella pratica, i simboli sono singoli bit o byte.

### **Circolatore ottico**

Un circolatore ottico è un componente della fibra ottica che può essere usato per separare i segnali ottici che viaggiano in direzioni opposte nella fibra, analogamente al circolatore elettronico.

### **CMTS**

Un Cable Modem Termination System (o CMTS) è una parte dell'apparecchiatura collocata tipicamente nel cavo headend, o nel hubsite, della società, ed è usato per fornire un servizio dati ad alta velocità. Un CMTS fornisce molte delle funzioni offerte dal DSLAM nei sistemi DSL.

### **DOCSIS**

Il Data Over Cable Service Interface Specification (DOCSIS) è uno standard internazionale delle telecomunicazioni che permette un aggiuntivo trasferimento dati ad alta velocità su

un sistema di cavi televisivi esistente. Può essere impiegato da molti operatori di televisione via cavo per fornire un accesso internet attraverso le loro infrastrutture ibride fibra-coassiale (HFC).

## **DSLAM**

In telecomunicazioni per DSLAM, acronimo di Digital Subscriber Line Access Multiplexer, si intende un apparato elettronico di trasmissione di rete che esplica le funzioni di moltiplicazione/demoltiplicazione di linea di accesso numerica e modulazione da e verso il doppino dell'utente finale, cioè nella rete di accesso, adatto a portare un segnale a banda larga xDSL fino all'utenza finale e viceversa a riceverlo, e installabile in vari possibili punti della rete di accesso tra l'utente e la prima centrale telefonica (Stadio di Linea) in funzione delle velocità di trasmissione offribili all'utente. È un dispositivo attivo ovvero alimentato elettricamente.

## **Forward Error Correction (FEC)**

In un sistema di telecomunicazione il termine Forward Error Correction (FEC) indica un meccanismo di rilevazione e successiva correzione degli errori a valle di una trasmissione digitale ottenuta grazie alla codifica di canale ovvero attraverso l'introduzione di ridondanza di bit al flusso informativo. In particolare il parametro FEC indica quanti dei bit trasmessi vengono utilizzati per correggere eventuali errori in ricezione.

Le due principali categorie di codici FEC sono a “codice a blocco” e a “codice convoluzionale”:

- I codici a blocco lavorano solo con pacchetti, o simboli, di valore fissato di bit.
- I codici convoluzionali lavorano invece con un flusso di bit o simboli di lunghezza variabile.

## **Funzione Add/Drop**

Il termine Add-Drop (ossia aggiungi-togli) fa riferimento alle caratteristiche specifiche della moltiplicazione SDH/SONET e WDM, che consentono di spillare o inserire direttamente singoli tributari senza dover demoltiplicare o rimoltiplicare l'intero flusso aggregato. In questo modo, è possibile inserire o estrarre flussi tributari in modo selettivo da qualsiasi nodo della rete, lasciando in configurazione "passante" tutti gli altri flussi tributari che non terminano sul nodo specifico. Questa caratteristica consente di far convergere in un unico elemento di rete, l'ADM (Add-Drop Multiplexer), due funzionalità che, nelle reti plesiocrone, vengono normalmente svolte da due elementi di rete distinti: la funzione di terminale di linea (apparato di accesso alla rete) e la funzione di ripartitore (apparato di distribuzione in rete dei singoli tributari).

## **Exponential backoff**

L'exponential backoff è un algoritmo che usa un feedback per diminuire moltiplicativamente il rate di un processo, in modo da trovare, gradualmente, un rate adeguato alle necessità.

## **Generic Framing Procedure**

Il Generic Framing Procedure (GFP) è una tecnica di multiplexaggio definita dallo standard ITU-T G.7041 che permette la mappatura dei segnali degli strati superiori a lunghezza variabile su una rete di trasporto commutazione di circuito, come l'OTN, l'SDH/SONET o PDH.

## **Insertion loss**

L'Insertion Loss (Perdita di Inserzione) è la perdita di potenza di un segnale risultante dall'inserimento di un dispositivo all'interno di una linea di trasmissione o in una fibra ottica ed è solitamente espressa in decibel (dB).

## **Interframe gap (IFG)**

I dispositivi Ethernet devono lasciare un periodo minimo di “idle” (di inattività) tra la trasmissione di un frame e l'altro, chiamati interframe gap (IFG), interframe spacing o interpacket gap (IPG). Tale periodo permette ai dispositivi di prepararsi per la ricezione del frame successivo.

## **Internet Protocol**

In telecomunicazioni e informatica Internet Protocol (IP) è il protocollo di rete su cui si basa la rete Internet ed appartiene al terzo strato (network) secondo la classificazione ISO/OSI. L'IP è un protocollo di interconnessione di reti (Inter-Networking Protocol), nato per interconnettere reti eterogenee per tecnologia, prestazioni, gestione. Pertanto IP è spesso implementato sopra altri protocolli di livello collegamento, come Ethernet o ATM. È un protocollo di “best effort” nel senso che fa il massimo di quello che può fare senza garantire alcuna forma di affidabilità della comunicazione in termini di controllo di errore, controllo di flusso e controllo di congestione a cui quindi dovranno supplire i protocolli di trasporto di livello superiore (livello 4) quale ad esempio TCP.

## **Legacy System**

Il legacy system è un sistema di computer, una tecnologia od un programma datato ma ancora in uso, solitamente perchè ancora adatto per le esigenze dei clienti, anche se sono disponibili soluzioni più recenti e/o più efficienti.

## **Life Cycle Assessment**

Life Cycle Assessment (in italiano "analisi del ciclo di vita", conosciuto anche con l'acronimo LCA) è una metodologia di analisi che valuta un insieme di interazioni che un prodotto o un servizio ha con l'ambiente, considerando il suo intero ciclo di vita che include i punti di pre-produzione (quindi anche estrazione e produzione dei materiali),

produzione, distribuzione, uso (quindi anche riuso e manutenzione), il riciclaggio e la dismissione finale. La LCA è riconosciuta a livello internazionale attraverso alcune norme ISO (International Organization for Standardization).

### **Maximum Transmission Unit (MTU)**

In telecomunicazioni con Maximum Transmission Unit (MTU) (in italiano, unità massima di trasmissione) si indica le dimensioni massime in byte di un pacchetto dati che può essere inviato attraverso un protocollo di comunicazione in una rete di telecomunicazioni. Tale parametro è di solito associato alle interfacce di comunicazione quali schede di rete o porte seriali. Il concetto di MTU si ripresenta a diversi livelli, assumendo diversi nomi, ma il termine MTU indica propriamente la dimensione massima del pacchetto in IP. IP viene molto spesso trasportato su Ethernet, che ha normalmente uno spazio massimo di 1500 byte per il campo dati, a cui si aggiungono 26 byte [22 byte di intestazione Ethernet + 4 byte di Cyclic Redundancy Check (CRC)], portando la dimensione massima del frame Ethernet a 1526 byte.

### **Modello di Business**

Il modello di business è l'insieme delle soluzioni organizzative e strategiche attraverso le quali l'impresa acquisisce vantaggio competitivo. In particolare, il modello di business:

- fornisce le linee guida con cui l'impresa converte l'innovazione in acquisizione di valore (profitto) senza prescindere da una adeguata strategia in grado di apportare un vantaggio competitivo nei confronti della concorrenza (traccia così una direzione a cui probabilmente faranno seguito i follower);
- definisce una organizzazione che consenta di condividere la conoscenza all'interno dell'azienda e valorizzare le proprie risorse umane favorendo le condizioni ideali per incentivare l'innovazione;
- individua i rapporti di interazione e cooperazione con fornitori e clienti (mercato)

valorizzando le proprie scelte (di modello e/o di business);

- stabilisce le metodologie e gli strumenti per analizzare in modo critico e continuativo i risultati ottenuti dal proprio modello di business confrontandoli con quelli dei propri concorrenti. Il modello di business è uno dei principali strumenti a disposizione del management per interpretare e gestire in maniera vincente le dinamiche interne ed esterne all'azienda.

## **OAMP**

OAMP, o anche OAM&P, è l'acronimo di “Operations Administration Maintenance and Provisioning” (Operazioni, amministrazione, mantenimento e fornitura). La “T”, aggiunta in tempi recenti (OAMPT), sta per “troubleshooting” (risoluzione dei problemi) e riflette l'uso delle operazioni nell'ambiente di rete. Il termine viene usato per descrivere la raccolta di discipline generali, qualsiasi pacchetto di software specifico, o funzionalità che una determinata società utilizza per tenere traccia di queste cose. Anche se il termine, e il concetto, è nato nel mondo della telefonia cablata, tale disciplina si è ampliata in altri ambiti in cui si svolge lo stesso tipo di lavoro, compresa la televisione via cavo e molti aspetti del servizio internet e di operazioni della rete. L'“Ethernet OAM” è un altro concetto recente in cui viene utilizzata questa terminologia.

## **OpEx/CapEx**

La spesa operativa od OpEx (dal termine inglese OPERating EXpenditure, ovvero spesa operativa) è il costo necessario per gestire un prodotto, un business od un sistema altrimenti detti costi di O&M (Operative and Management) ovvero costi operativi e di gestione. La sua controparte, la spesa di capitale o CapEx (dall'inglese CAPital EXpenditure, ovvero spese per capitale), è il costo per sviluppare o fornire asset durevoli per il prodotto od il sistema. Per esempio, l'acquisto di una fotocopiatrice è da considerarsi CapEx, mentre il costo annuale per carta, toner, alimentazione e manutenzione rappresenta

l'OpEx. Per sistemi più estesi come quelli di business, l'OpEx può anche includere il costo della manodopera e quelli dei siti, come l'affitto ed i relativi servizi.

### **Promiscuous mode**

Nelle reti di computer, il promiscuous mode (o promisc mode) è una modalità per un controllore di interfaccia di rete cablata ( network interface controller, wired NIC) od una wireless NIC che permette di ricevere tutti i dati piuttosto che solo i propri. Questa modalità è normalmente usata per il packet sniffing che avviene in un router od in un computer collegato ad un hub (al posto di uno switch).

### **Scalabilità**

Il termine scalabilità, nelle telecomunicazioni, nell'ingegneria del software, in informatica, e in altre discipline, si riferisce, in termini generali, alla capacità di un sistema di "crescere" o "decretere" (aumentare o diminuire di scala) in funzione delle necessità e delle disponibilità. Un sistema che gode di questa proprietà viene detto scalabile. L'uso più tradizionale si riferisce alla scalabilità di carico, ovvero la capacità di un sistema di incrementare le proprie prestazioni (il proprio throughput nel caso di sistemi trasmissivi) se a tale sistema vengono fornite nuove risorse (per esempio, nel caso del software, maggiore potenza di processore o processori aggiuntivi). Quanto un determinato sistema sia scalabile dipende dalla sua architettura software e/o architettura hardware; per esempio, la presenza di uno o più colli di bottiglia potrebbe rendere ininfluyente l'aumento della potenza di calcolo complessiva. Questa dipendenza dall'architettura vale anche, in termini generali, per le altre accezioni in cui si può intendere il termine "scalabile".

### **Seed laser**

Un "seed laser" è un laser di solito a singola frequenza il cui flusso viene introdotto (seminato, seed) nel flusso di un altro laser o di uno strumento di amplificazione.

### **Service Level Agreement (SLA)**

I Service Level Agreement (in italiano, accordo sul livello del servizio) in sigla SLA sono strumenti contrattuali attraverso i quali si definiscono le metriche di servizio (es. qualità di servizio) che devono essere rispettate da un fornitore di servizi (provider) nei confronti dei propri clienti/utenti. Di fatto, una volta stipulato il contratto, assumono il significato di obblighi contrattuali.

### **Small form-factor pluggable transceiver (SFP)**

Il small form-factor pluggable (SFP) è un transceiver compatto di tipo “hot-swap” usato sia per le telecomunicazioni che per le applicazioni delle comunicazioni dati. Il form factor e l'interfaccia sono specificati da una MSA (multi-source agreement).

### **SONET/SDH (tradurre)**

Il Synchronous Optical Networking (SONET) ed il Synchronous Digital Hierarchy (SDH) sono protocolli di multiplexaggio standardizzati che trasportano molteplici flussi di bit attraverso una fibra ottica utilizzando laser o led.

### **Timestamp (o marcatura temporale)**

Una marca temporale (timestamp) è una sequenza di caratteri che rappresentano una data e/o un orario per accertare l'effettivo avvenimento di un certo evento. La data è di solito presentata in un formato compatibile, in modo che sia facile da comparare con un'altra per stabilirne l'ordine temporale. L'ISO ha definito l'ISO 8601 come standard per le marche temporali.

## **Truck roll**

Riferimento alla necessità di inviare un tecnico in un camion per l'installazione, spostamento o riconfigurazione in qualche modo di un elemento di apparecchiature o di un sistema di fili e cavi, o forse per rispondere a una chiamata di servizio o di un'interruzione di rete. Poiché un "truck roll" è costoso, i fornitori di servizi tendono a preferire le reti e gli elementi di rete che sono auto-riparanti o che può essere configurato e riconfigurato da remoto.

## **Unbundling Local Loop**

Con Unbundling Local Loop (Accesso disaggregato alla rete locale), o spesso con il suo acronimo ULL, si indica la possibilità che hanno i nuovi operatori telefonici, da quando è stato liberalizzato il mercato delle telecomunicazioni, di usufruire delle infrastrutture esistenti, proprietà di altro operatore, per offrire ai clienti servizi propri, pagando un canone all'operatore legalmente proprietario delle infrastrutture. L'ULL è anche noto come "liberalizzazione dell'ultimo chilometro" (o "liberalizzazione dell'ultimo miglio").

## **User Experience**

Per esperienza d'uso (più nota come User Experience o UX) si intende ciò che una persona prova quando utilizza un prodotto, un sistema o un servizio. L'esperienza d'uso concerne gli aspetti esperienziali, affettivi, l'attribuzione di senso e di valore collegati al possesso di un prodotto e all'interazione con esso, ma include anche le percezioni personali su aspetti quali l'utilità, la semplicità d'utilizzo e l'efficienza del sistema.

## **VLAN**

Il termine VLAN (Virtual LAN) indica un insieme di tecnologie che permettono di segmentare il dominio di broadcast, che si crea in una rete locale (tipicamente IEEE 802.3) basata su switch, in più reti locali logicamente non comunicanti tra loro, ma che

condividono globalmente la stessa infrastruttura fisica di rete locale. Le applicazioni di questa tecnologia sono tipicamente legate ad esigenze di separare il traffico di gruppi di lavoro o dipartimenti di una azienda, per applicare diverse politiche di sicurezza informatica

## **APPENDICE 2**

Bibliografia, riferimenti ad immagini e tabelle

## Bibliografia

- Piero Castoldi, Luca Valcarenghi, Isabella Cerutti; “Efficienza energetica nelle reti a larga banda”, La Comunicazione, 2011
- Björn Skubic and Einar In de Betou, Tolga Ayhan, Stefan Dahlfort; “Energy-Efficient Next- Generation Optical Access Networks” IEEE Journals & Magazines, 2012
- Clearly D., Haran O., Kramer G., Ruo Ding Li, Oron, M., Pfeiffer T.; “An introduction to PON technologies” IEEE Journals & Magazines , 2007
- “Developments in Fibre Technologies and Investments”, Directorate for Science, Technology and Industry Committee for Information, Computer and Communications policy, 2008
- Ivica Cale, Aida Salihovic, Matija Ivekovic; “Gigabit Passive Optical Network – GPON”; IEEE Journals & Magazines
- Djafar K. Mynbaev; “Analysis of quality of service provisioning in passive optical networks”; IEEE Journals & Magazines
- Klaus Grobe, Jörg-Peter Elbers; “PON in Adolescence: From TDMA to WDM-PON”; IEEE Journals & Magazines, 2008
- Glen Kramer, Biswanath Mukherjee, Ariel Maislos; EPON (chapter 8) [[users.encs.concordia.ca/~assi/.../epon\\_wiley.pdf](http://users.encs.concordia.ca/~assi/.../epon_wiley.pdf)]; Wiley
- Next Generation Optical Access Networks;Valentina Sacchieri; 2010
- Sleep mode scheduling technique for energy saving in TDM-PONs; Martina Fiammengo; Master of Science Thesis, Stockholm, Sweden 2011
- <http://www.fiber-optics.info/history/P3/>
- <http://www.timbercon.com/history-of-fiber-optics/>
- Energy Efficiency in Optical Access Networks - Luca Valcarenghi, Shing-Wa Wong, Divanilson R. Campelo, She-Hwa Yen, Shinji Yamashita, Pier Giorgio Raponi, Leonid Kazovsky, and Piero Castoldi

- fonti Wikipedia

## Riferimenti alle immagini

**figura 1.1** [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/it/9/96/Legge\\_di\\_Snell.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/it/9/96/Legge_di_Snell.png)

**figura 1.2** [http://it.wikipedia.org/wiki/Fibra\\_ottica](http://it.wikipedia.org/wiki/Fibra_ottica)

**figura 1.3** <http://en.potelecom.com/imageRepository/8f9b4acf-dab1-456b-ae24-4a6ed987b78a.jpg>

**figura 1.4** [http://www.fiberoptics4sale.com/Merchant2/fofs\\_img/fiber-mode.gif](http://www.fiberoptics4sale.com/Merchant2/fofs_img/fiber-mode.gif)

**figura 1.5** [http://www.fiberoptics4sale.com/Merchant2/fofs\\_img/fiber-mode.gif](http://www.fiberoptics4sale.com/Merchant2/fofs_img/fiber-mode.gif)

**figura 2.1** “Developments in Fibre Technologies and Investments”, Directorate for Science, Technology and Industry Committee for Information, Computer and Communications policy, 2008

**figura 2.2** [http://en.wikipedia.org/wiki/File:ASON\\_Logical\\_Architecture.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:ASON_Logical_Architecture.jpg)

**figura 2.3** <http://syaifulrohman.wordpress.com/2010/12/18/fttx-fiber-to-the-x-alternative-solution-broadband-access-in-indonesia/>

**figura 3.1** [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/74/PON\\_vs\\_AON.png /350px-PON\\_vs\\_AON.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/74/PON_vs_AON.png/350px-PON_vs_AON.png)

**figura 3.2** [http://www.technicaljones.com/PON\\_Sept%202010.jpg](http://www.technicaljones.com/PON_Sept%202010.jpg)

**figura 3.3** <http://4.bp.blogspot.com/-MtbhKY510wA/T8CZg3WysaI/AAAAAAAAAAek/nMR2mGhJL0s/s1600/pon29.jpg>

**figura 4.1** Gigabit Passive Optical Network - GPON ; I. Cale , A. Salihovic , M. Ivekovic ;

**figura 4.2** Gigabit Passive Optical Network - GPON ; I. Cale , A. Salihovic , M. Ivekovic ;

**figura 4.3** Gigabit Passive Optical Network - GPON ; I. Cale , A. Salihovic , M. Ivekovic ;

**figura 4.4** Gigabit Passive Optical Network - GPON ; I. Cale , A. Salihovic , M. Ivekovic ;

**figura 5.1:** Clearly D., Haran O., Kramer G., Ruo Ding Li, Oron, M., Pfeiffer T.; “An

introduction to PON technologies” IEEE Journals & Magazines , 2007

**figura 5.2:** Clearly D., Haran O., Kramer G., Ruo Ding Li, Oron, M., Pfeiffer T.; “An introduction to PON technologies” IEEE Journals & Magazines , 2007

**figura 5.3:** Glen Kramer, Biswanath Mukherjee, Ariel Maislos; EPON (chapter 8) [users.encs.concordia.ca/~assi/.../epon\_wiley.pd...]; Wiley

**figura 5.4:** Glen Kramer, Biswanath Mukherjee, Ariel Maislos; EPON (chapter 8) [users.encs.concordia.ca/~assi/.../epon\_wiley.pd...]; Wiley

**figura 5.5:** Glen Kramer, Biswanath Mukherjee, Ariel Maislos; EPON (chapter 8) [users.encs.concordia.ca/~assi/.../epon\_wiley.pd...]; Wiley

**figura 5.6:** Glen Kramer, Biswanath Mukherjee, Ariel Maislos; EPON (chapter 8) [users.encs.concordia.ca/~assi/.../epon\_wiley.pd...]; Wiley

**figura 5.7:** Glen Kramer, Biswanath Mukherjee, Ariel Maislos; EPON (chapter 8) [users.encs.concordia.ca/~assi/.../epon\_wiley.pd...]; Wiley

**figura 5.8:** Glen Kramer, Biswanath Mukherjee, Ariel Maislos; EPON (chapter 8) [users.encs.concordia.ca/~assi/.../epon\_wiley.pd...]; Wiley

**figura 5.9:** Glen Kramer, Biswanath Mukherjee, Ariel Maislos; EPON (chapter 8) [users.encs.concordia.ca/~assi/.../epon\_wiley.pd...]; Wiley

**figura 5.10:** Glen Kramer, Biswanath Mukherjee, Ariel Maislos; EPON (chapter 8) [users.encs.concordia.ca/~assi/.../epon\_wiley.pd...]; Wiley

**figura 5.11:** Glen Kramer, Biswanath Mukherjee, Ariel Maislos; EPON (chapter 8) [users.encs.concordia.ca/~assi/.../epon\_wiley.pd...]; Wiley

**figura 5.12:** <http://zeitgeistlab.ca/doc/10G-EPON.html>

**figura 6.1:** PON in Adolescence: From TDMA to WDM-PON ; Klaus Grobe, Jörg-Peter Elbers ; IEEE applications & Practice: topics in optical communications ; 2008

**figura 6.2:** PON in Adolescence: From TDMA to WDM-PON ; Klaus Grobe, Jörg-Peter Elbers ; IEEE applications & Practice: topics in optical communications ; 2008

**figura 6.3:** PON in Adolescence: From TDMA to WDM-PON ; Klaus Grobe, Jörg-Peter

Elbers ; IEEE applications & Practice: topics in optical communications ; 2008

**figura 6.4:** PON in Adolescence: From TDMA to WDM-PON ; Klaus Grobe, Jörg-Peter Elbers ; IEEE applications & Practice: topics in optical communications ; 2008

**figura 6.5:** PON in Adolescence: From TDMA to WDM-PON ; Klaus Grobe, Jörg-Peter Elbers ; IEEE applications & Practice: topics in optical communications ; 2008

**figura 7.1:** Björn Skubic and Einar In de Betou, Tolga Ayhan, Stefan Dahlfort; “Energy-Efficient Next- Generation Optical Access Networks” IEEE Journals & Magazines, 2012

**figura 7.2:** Björn Skubic and Einar In de Betou, Tolga Ayhan, Stefan Dahlfort; “Energy-Efficient Next- Generation Optical Access Networks” IEEE Journals & Magazines, 2012

**figura 7.3:** Björn Skubic and Einar In de Betou, Tolga Ayhan, Stefan Dahlfort; “Energy-Efficient Next- Generation Optical Access Networks” IEEE Journals & Magazines, 2012

## Riferimenti alle tabelle

**tabella 4.1:** Gigabit Passive Optical Network - GPON ; I. Cale , A. Salihovic , M. Ivekovic ;

**tabella 4.2:** Gigabit Passive Optical Network - GPON ; I. Cale , A. Salihovic , M. Ivekovic ;

**tabella 4.3:** Gigabit Passive Optical Network - GPON ; I. Cale , A. Salihovic , M. Ivekovic ;

**tabella 5.1:** [http://en.wikipedia.org/wiki/Ethernet\\_frame](http://en.wikipedia.org/wiki/Ethernet_frame)

**tabella 5.2:** <http://en.wikipedia.org/wiki/10G-EPON>

**tabella 5.3:** <http://en.wikipedia.org/wiki/10G-EPON>

**tabella 6.1:** PON in Adolescence: From TDMA to WDM-PON ; Klaus Grobe, Jörg-Peter Elbers ; IEEE applications & Practice: topics in optical communications ; 2008

**tabella 6.2:** PON in Adolescence: From TDMA to WDM-PON ; Klaus Grobe, Jörg-Peter

Elbers ; IEEE applications & Practice: topics in optical communications ; 2008

**tabella 7.1:** Björn Skubic and Einar In de Betou, Tolga Ayhan, Stefan Dahlfort; “Energy-Efficient Next- Generation Optical Access Networks” IEEE Journals & Magazines, 2012