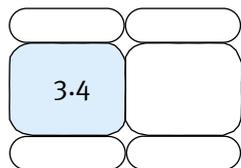




# VERSO UNA RETE TUTTA OTTICA

Gastone Bonaventura

L'articolo riporta in sintesi i problemi relativi all'evoluzione della rete di trasporto dall'attuale rete SDH verso una Rete Tutta Ottica (AON). Il primo passo, in corso di realizzazione in questi ultimi tempi, sarà costituito dalla Rete di Trasporto Ottica (OTN), arricchita da un'architettura di Rete Ottica Commutata Automaticamente (ASON). Nel testo sono anche descritte le maggiori problematiche oggi ancora aperte, la cui soluzione condiziona il successivo passaggio ad una Rete Tutta Ottica.



## 1. INTRODUZIONE

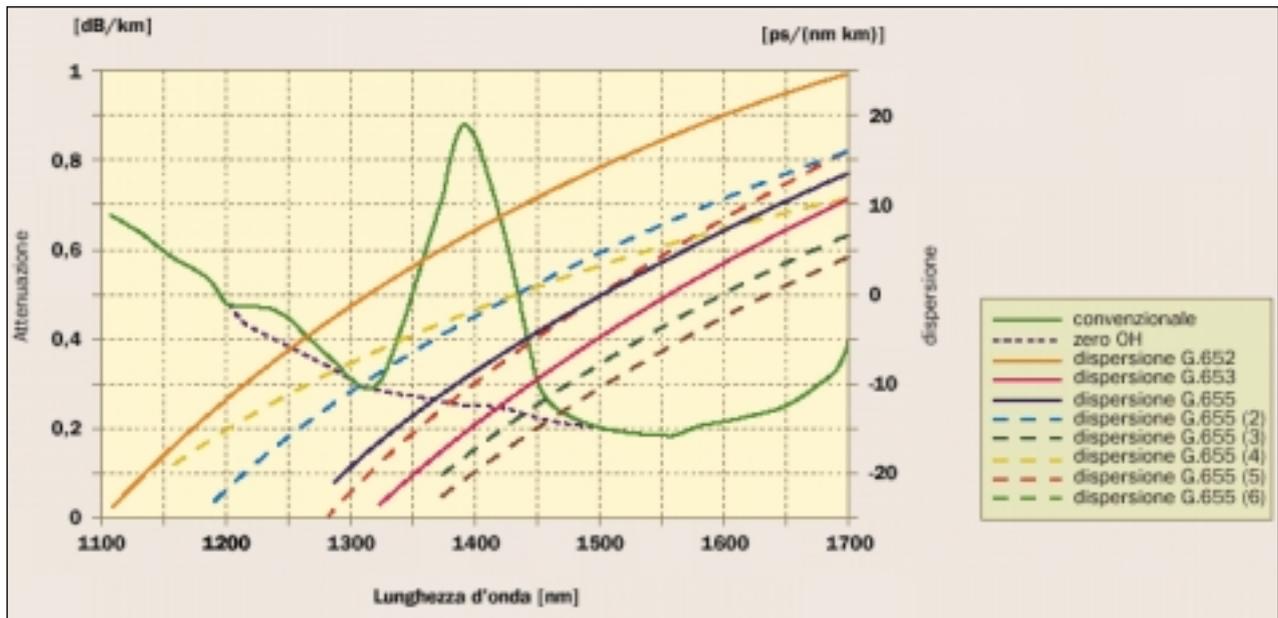
Una rete di trasporto è costituita da una serie di nodi, nei quali si effettua il trattamento dei segnali cliente (come la permutazione, l'estrazione e la reintroduzione dei segnali, la multiplazione ecc.) e da una serie di collegamenti tra i nodi. Da un punto di vista generale, la rete di trasporto si considera divisa in tre parti principali: reti di accesso, reti metropolitane, rete dorsale (*backbone*). Le risorse trasmissive di una rete di trasporto sono adatte a trasportare indifferentemente tutti i diversi tipi di segnali cliente (voce, musica, immagini, dati e video).

Con l'avvento della liberalizzazione delle reti e dei servizi di telecomunicazioni, anche la rete di trasporto di un operatore si trova ora ad operare in regime di competitività con quelle di altri operatori. La sua realizzazione e la successiva gestione devono essere perciò finalizzate a ben precisi obiettivi di costo, di qualità e di flessibilità. Tra questi obiettivi ha assunto di recente una particolare importanza la *disponibilità*, in conseguenza del ruolo sempre più incisivo svolto dalle teleco-

municazioni nello svolgimento di un gran numero di attività economiche. Gli operatori offrono attualmente la capacità trasmissiva con diversi obiettivi di disponibilità (e naturalmente di costo), generalmente divisi in classi che arrivano fino al 99,999% (corrispondente ad un'indisponibilità del servizio di 5 minuti l'anno). È evidente che questi obiettivi pongono alcuni vincoli sia alla struttura della rete (in termini di configurazioni e di ridondanze) sia alle caratteristiche e alla tecnologia degli apparati e dei portanti.

La tecnologia ottica costituisce oggi l'elemento fondamentale per la realizzazione dei collegamenti nelle reti di trasporto, con l'eccezione delle reti di accesso dove rimane predominante l'impiego dei tradizionali conduttori metallici.

In questo articolo viene esaminata la prevedibile estensione dell'impiego delle tecnologie ottiche nelle reti metropolitane e nella rete dorsale in un'evoluzione verso una Rete Tutta Ottica, l'AON (*All Optical Network*). La diffusione delle tecnologie ottiche nella rete di accesso non rientra negli obiettivi di questo articolo.



## 2. LE FIBRE OTTICHE

Nell'ambito delle reti metropolitane e delle reti dorsali la percentuale dei cavi ottici sul totale dei portanti impiegati in Italia supera di molto il 90%, in quanto, dalla seconda metà degli anni Ottanta, tutti i nuovi collegamenti sono stati realizzati in fibra ottica. I vantaggi delle fibre ottiche sui conduttori metallici in termini di prestazioni, ingombro, peso, costo sono, infatti, tali che, non appena la tecnologia è stata sufficientemente matura, il loro impiego nelle reti di telecomunicazioni si è immediatamente generalizzato. Le fibre ottiche impiegate nelle reti di trasporto sono tutte di tipo singolo-modo, costituite da un nucleo e da un mantello concentrici di silice variamente drogata per realizzare il desiderato profilo dell'indice di rifrazione. Il diametro del mantello è di 125  $\mu\text{m}$ , diametro che, con il rivestimento protettivo primario, diventa di 250  $\mu\text{m}$  [1]. I segnali che si propagano lungo le fibre ottiche sono soggetti a degradazioni causate principalmente da: attenuazione, dispersione cromatica, dispersione di polarizzazione, effetti legati alle non linearità.

### 2.1. Attenuazione

L'attenuazione subita da un segnale ottico nella sua propagazione lungo una fibra ottica è dovuta alla combinazione di diversi effetti

(diffusione di Rayleigh, dovuta a fluttuazioni di densità a livello molecolare della silice vetrosa; assorbimento molecolare, massimo nel medio infrarosso; assorbimento atomico, massimo nell'ultra-violetto; presenza di impurezze nella silice della fibra, principalmente dovuta a presenza di ioni ossidrili ecc.).

L'attenuazione varia con la lunghezza d'onda del segnale trasmesso, come mostrato in figura 1, e linearmente con la lunghezza della fibra. Nella figura 1 sono mostrati due andamenti dell'attenuazione: il primo con un piccolo intorno a 1390 nm per la presenza nella fibra di ossidrili  $\text{OH}^-$ . Il secondo, relativo a fibre di recente produzione nelle quali l'ossidrile  $\text{OH}^-$  è stato eliminato, presenta invece una attenuazione regolarmente decrescente con il crescere della lunghezza d'onda fino a circa 1700 nm. La figura mostra ancora che il campo di lunghezza d'onda più attraente, dal punto di vista dell'attenuazione, è nel vicino infrarosso ed è compreso tra 1260 nm e 1675 nm. Il principale organismo di normativa in materia, l'ITU-T (*International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector*) ha suddiviso questo intervallo spettrale complessivo in sei bande (vedi riquadro).

La banda oggi di gran lunga più utilizzata è la banda C (1530-1565 nm) perchè è quella dove si verificano le minori attenuazioni (0,20-0,22 dB/km) e nella quale si ha anche la disponibili-

**FIGURA 1**

*Attenuazione e dispersione cromatica delle fibre ottiche*  
(Fonte: [6])

### Gamma delle lunghezze d'onda

La figura 1 mostra che la gamma di lunghezze d'onda nella quale l'attenuazione delle fibre è sufficientemente bassa (<0,4 dB/km) è molto estesa (oltre 200 nm). Ai fini di utilizzare una comune terminologia L'ITU-T [7] ha suddiviso l'intervallo di lunghezze d'onda nelle sei bande seguenti:

Banda	Nome	Campo
O-Band	Original	1260-1360 nm
E-Band	Extended	1360-1460 nm
S-Band	Short wavelength	1460-1530 nm
C-Band	Conventional	1530-1565 nm
L-Band	Long wavelength	1565-1625 nm
U-Band	Ultralong wavelength	1625-1675 nm

A questo campo complessivo di lunghezze d'onda corrisponde una banda di frequenza di circa 50 mila GHz (50 THz).

lità di una vasta gamma di componenti ottici. Maggiori dettagli sull'impiego delle varie bande di lunghezza d'onda sono riportati nel paragrafo 3 che esamina i sistemi di trasmissione. Infine l'andamento dell'attenuazione in funzione della lunghezza d'onda mostrato in figura 1 è praticamente lo stesso per tutti i diversi tipi di fibra impiegati nelle reti di trasporto in quanto è legato essenzialmente al tipo di materiale impiegato (la silice) e dipende molto poco dalle caratteristiche dimensionali e geometriche della fibra stessa.

### 2.2. Dispersione cromatica

Un secondo tipo di degradazione che subisce un segnale che si propaga in una fibra è dovuto al fatto che la velocità di propagazione varia con la lunghezza d'onda. Considerato che le sorgenti ottiche (laser) non sono in genere monocromatiche, le varie lunghezze d'onda che compongono ogni impulso immesso in fibra, in cui è codificato il segnale di trasmissione, arrivano al punto di ricezione in tempi differenti provocando un allargamento della forma dell'impulso trasmesso. Si ha, quindi, un'interferenza intersimbolica che, ove superi certi limiti, può provocare degli errori nella fase di identificazione alla ricezione degli impulsi o in quella di rigenerazione. L'entità della dispersione cromatica dipende quindi dalla larghezza spettrale delle sorgenti ottiche e dalle

caratteristiche di dispersione delle singole fibre. Tali caratteristiche variano fortemente a seconda del progetto della fibra stessa perchè esse risultano dalla combinazione di un effetto di dispersione del materiale (dovuta alla dipendenza spettrale dell'indice di rifrazione della silice costituente la fibra) e di un effetto di guida (dovuto alle caratteristiche ottico-geometriche della fibra medesima). In conseguenza di questa situazione l'ITU-T ha standardizzato diversi tipi di fibre, ottimizzato ciascuno per un impiego specifico.

La figura 1 mostra l'andamento della dispersione cromatica in funzione della lunghezza d'onda per alcune tipologie di fibre, indicate con il numero della corrispondente Raccomandazione dell'ITU-T [2]. Appare chiaro che l'andamento per le singole fibre è molto simile, ma il punto di zero è posto a lunghezze d'onda diverse, modellando soprattutto l'andamento dell'indice di rifrazione del nucleo, in funzione dei diversi tipi di applicazione (lunghezza d'onda di lavoro, impiego dei sistemi nelle brevi, medie o grandi distanze, sistemi a singolo canale ovvero multicanale ecc.) cui la fibra è destinata. La dispersione cromatica cresce linearmente con la lunghezza del collegamento ed è un fenomeno di natura deterministica per cui può essere compensata con adatti dispositivi prima che raggiunga valori critici.

### 2.3. Dispersione di polarizzazione

La dispersione di polarizzazione è legata alla diversa velocità di propagazione delle due componenti ortogonali del campo elettromagnetico trasmesso lungo la fibra. L'effetto è ancora quello di un allargamento dell'impulso di potenza ottico che dà origine a interferenza intersimbolica. L'entità della dispersione dipende da molti fattori (alcuni variabili nel tempo): il metodo di fabbricazione delle fibre, la struttura del cavo ottico, il tipo di posa, la temperatura ecc..

La dispersione di polarizzazione è quindi un fenomeno di tipo statistico e il problema della sua compensazione è più complesso e non così efficace come quello della dispersione cromatica. Questo tipo di dispersione si accumula con la radice quadrata della lunghezza del collegamento ed i suoi valori tipici non superano generalmente limiti compresi tra 0,2 e 0,5 ps/km<sup>-2</sup>.

## 2.4. Non-linearità

In generale l'indice di rifrazione del materiale costituente la fibra non dipende dall'intensità del campo elettromagnetico che lo attraversa. Ma per intensità particolarmente elevate, quali quelle rese disponibili da molti amplificatori ottici, l'indice di rifrazione può mostrare una dipendenza dall'intensità. La non-linearità può provocare diversi tipi di degradazione del segnale trasmesso. Il più temibile è generalmente l'interazione a quattro fotoni, più nota come FWM (*Four Wave Mixing*), che dà origine ad alcune repliche del segnale stesso a lunghezze d'onda diverse. Questi segnali spuri possono andare a cadere in corrispondenza di altri canali provocando rumore e/o diafonia. Naturalmente questo tipo di degradazione ha un impatto solamente nel caso di sistemi che trasmettono più canali ottici sulla stessa fibra (sistemi WDM). Gli effetti delle degradazioni dovute alla non linearità delle fibre sono tanto maggiori quanto più bassa è la dispersione cromatica nella gamma di lunghezze d'onda di lavoro.

Le caratteristiche geometriche, dimensionali e ottiche delle fibre possono essere scelte in modo da ridurre l'entità di una delle degradazioni di cui sopra (spesso però a scapito delle altre) in funzione della loro utilizzazione.

La fibra G.652, che è decisamente la più diffusa (costituisce, infatti, oltre l'80% delle fibre posate nel mondo), presenta una dispersione cromatica relativamente alta nella banda 1530-1565 nm, ma ha effetti non lineari molto ridotti. La fibra G.655 è caratterizzata da una dispersione cromatica sufficientemente elevata nella stessa banda per limitare gli effetti delle non linearità, ma abbastanza bassa per non rendere eccessivamente complesso il

problema della compensazione. La fibra G.656, che costituisce lo standard più recente, è invece caratterizzata da una dispersione cromatica relativamente bassa in tutta la banda 1460-1625 nm (bande S + C + L).

## 3. I SISTEMI OTTICI DI TRASMISSIONE

I sistemi ottici di trasmissione comprendono gli apparati necessari per trasmettere sulle fibre ottiche i segnali clienti. Essi possono essere suddivisi in due grandi categorie: i sistemi a canale singolo e quelli multicanale.

### 3.1. I sistemi a canale singolo

I sistemi a canale singolo, sono chiamati anche TDM (*Time Division Multiplexing*) in quanto i segnali trasmessi sono multiplati a divisione di tempo; essi trasmettono un solo canale ottico su una coppia di fibre, che è necessaria perchè i segnali cliente sono bidirezionali. I sistemi ottici a canale singolo sono costituiti, in linea di principio (Figura 2), da un terminale trasmittente (dove si effettua, in particolare, la conversione elettro-ottica del segnale da trasmettere), da un terminale ricevente (dove si effettua, tra l'altro, la conversione ottico-elettrica del segnale ricevuto) e da un numero di amplificatori ottici che è funzione della lunghezza del collegamento da realizzare. In pratica, l'impiego dei sistemi TDM è limitato a collegamenti sufficientemente corti da non richiedere amplificatori intermedi. Il costo dell'inserzione in linea di amplificatori intermedi giustifica in genere l'installazione di un sistema WDM atto ad utilizzare gli amplificatori di linea con più canali. Il campo di impiego dei sistemi ottici TDM va

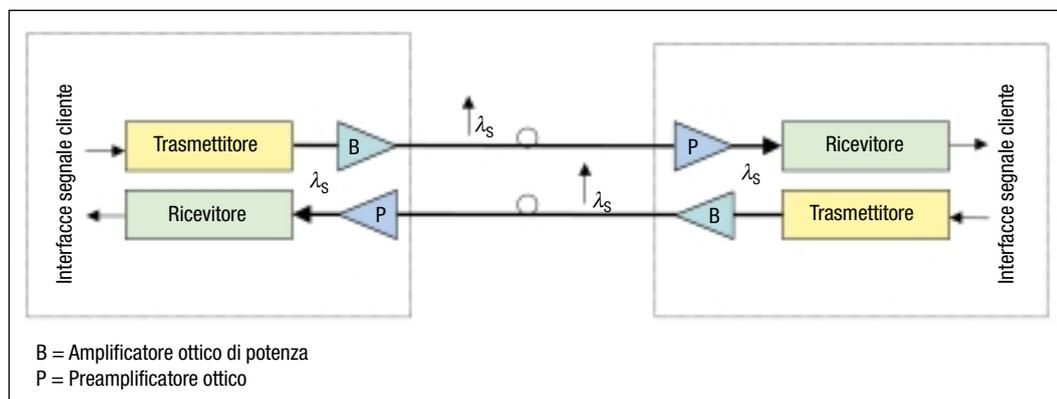


FIGURA 2

Schema di un sistema ottico TDM

quindi dai raccordi all'interno delle centrali ai collegamenti periferici nelle reti metropolitane. Le Raccomandazioni ITU-T [3] prevedono lunghezze fino a 160 km per sistemi con capacità fino a 2,5 Gbit/s e lunghezze fino a 120 km per sistemi con capacità fino a 10 Gbit/s. La tecnologia ottica attuale consente tuttavia di realizzare anche sistemi TDM senza amplificazione intermedia dell'ordine di 250-300 km per applicazioni particolari, come, per esempio, i collegamenti sottomarini.

### 3.2. I sistemi WDM

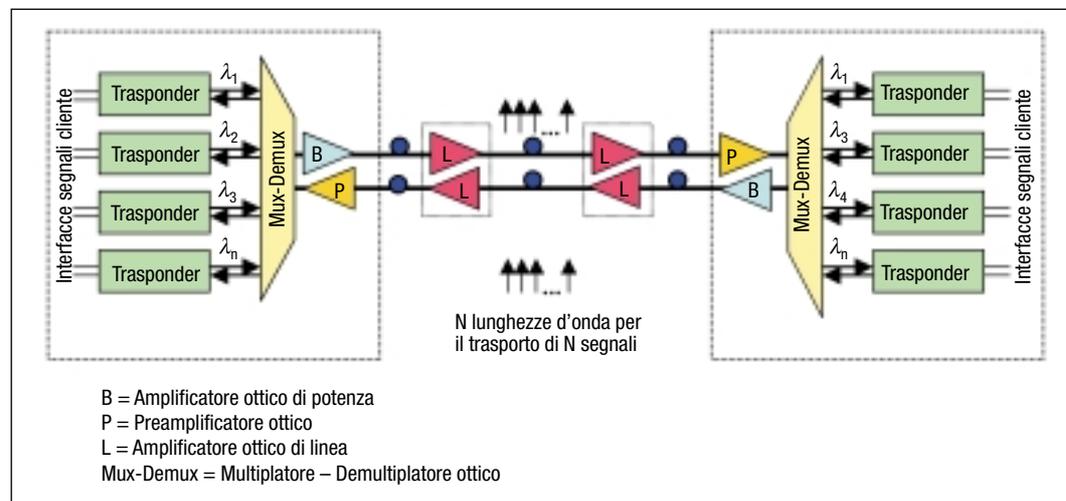
I sistemi multi-canale, indicati generalmente come WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), trasmettono invece molti canali a diversa lunghezza d'onda su una coppia di fibre ottiche. In questi sistemi i terminali trasmettenti, le cui uscite sono evidentemente a lunghezze d'onda differenti, sono seguiti da un moltiplicatore ottico che ha il compito di affiancare tutti i canali da trasmettere sulla stessa fibra (Figura 3). Un demoltiplicatore ottico con funzioni complementari a quelle del moltiplicatore riporta in ricezione tutti i canali alla stessa lunghezza d'onda. La lunghezza tipica delle sezioni di amplificazione è di 80 km. La rigenerazione elettrica fatta nel terminale ricevente annulla gli effetti di tutte le degradazioni (legate alle fibre e agli apparati) introdotte lungo il collegamento.

A seconda delle applicazioni, la spaziatura tra i canali in termini di lunghezza d'onda (o, equivalentemente, di frequenza) è diversa. Da questo punto di vista i sistemi WDM si dividono in due grandi categorie: i sistemi

DWDM (Dense WDM) con spaziature tra i canali dell'ordine dei 100 GHz in frequenza (circa 0,8 nm in lunghezza d'onda) e i sistemi CWDM (Coarse WDM) con spaziatura tra i canali di 20 nm in lunghezza d'onda (circa 1600 GHz in frequenza).

**I sistemi DWDM**, stante la piccola spaziatura in frequenza tra i canali, hanno un'elevata capacità in termini di numero di canali trasmessi sulla stessa coppia di fibre; campo tipico di applicazione per questi sistemi è costituito oggi dalle reti dorsali. I sistemi più diffusi consentono la trasmissione di 40 canali a 10 Gbit/s spazati di 100 GHz nella banda C (1530-1565 nm), su distanze di oltre 600 km senza rigenerazione elettrica intermedia [4]. Sono disponibili sul mercato anche soluzioni più avanzate con 80 e 160 canali a 10 Gbit/s, con spaziature inferiori a 100 GHz e allocazione nelle bande C + L, che possono coprire senza rigenerazione intermedia distanze superiori a 1000 km [4]. In applicazioni particolari, come i collegamenti transatlantici, si sono superate anche distanze di 8 mila km senza rigenerazione intermedia; questo risultato è stato reso possibile soprattutto dalla particolarità dell'ambiente di posa e dall'adozione di sezioni di amplificazione relativamente corte (50 km). L'impiego di soluzioni così avanzate accresce l'importanza di alcuni aspetti del progetto e della gestione dei sistemi DWDM, quali, per esempio quelli di seguito riportati:

**a.** al crescere della distanza tra due punti di rigenerazione elettrica consecutivi, il problema del cumulo degli effetti delle degradazioni dovute alle fibre ottiche e agli apparati (soprat-



**FIGURA 3**  
**Schema di un sistema ottico WDM**

tutto rumore introdotto dagli amplificatori ottici) diventa sempre più difficile da gestire. Sono quindi necessarie tecniche sempre più raffinate di compensazione delle dispersioni, di equalizzazione, di regolazione dei livelli ecc.;

**b.** sistemi DWDM dei tipi sopra indicati danno la possibilità di trasmettere su una coppia di fibre capacità superiori a 1 Tbit/s (1 Tbit/s = 1000 Gbit/s). Considerato che i cavi ottici contengono sempre alcune decine di fibre (l'ultima rete di cavi ottici posata da Telecom Italia, la T-Bone, ha 48 coppie di fibre per cavo) si vede come la capacità trasmessa su un cavo ottico può arrivare a diverse decine di Tbit/s. A fronte di capacità di quest'ordine di grandezza trasmissibili su un solo cavo, gli effetti di possibili guasti avrebbero conseguenze disastrose sul traffico su esse instradato, è perciò necessario adottare strutture di rete ridondate (ad anello ovvero a maglia) con opportune capacità di scorta per effettuare, con tempestività, il reinstradamento dei flussi interessati dal guasto.

**I sistemi CWDM**, stante l'elevata spaziatura tra i canali, sono caratterizzati da un limitato numero di canali (non superiore a 18 con spaziatura di 20 nm) [5] e dal fatto che essi occupano un'estesa gamma di lunghezze d'onda che va da 1260 a 1610 nm (banda O + E + S + C + L). La frequenza di cifra massima oggi prevista dalla normativa ITU-T per tali sistemi è di 2,5 Gbit/s. Le distanze massime sono dell'ordine di 80 km, pari cioè ad una tratta senza amplificazione. Non sono infatti ancora disponibili amplificatori per l'intera gamma 1260 -1610 nm.

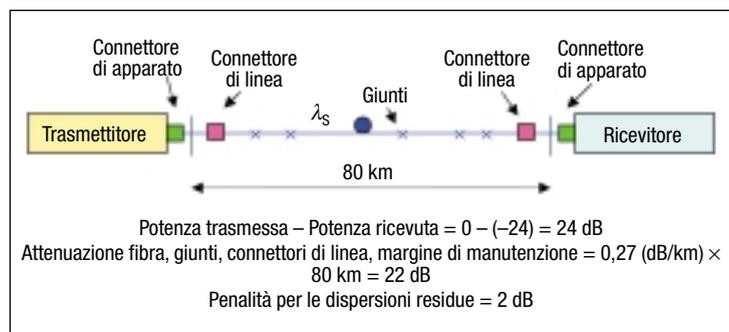
I sistemi CWDM trovano quindi applicazioni ideali nelle reti metropolitane. La realizzazione di sistemi CWDM a 16-18 canali richiede inoltre la disponibilità di fibre caratterizzate dall'assenza del picco di attenuazione dovuto all'ossidrilico OH<sup>-</sup>, fibre che oggi, come si è detto, sono però ancora poco diffuse. Le applicazioni attualmente più comuni sono quindi limitate a 8 canali nella banda 1460 -1610 nm. A fronte di queste limitazioni i sistemi CWDM hanno però il vantaggio di costare molto meno dei sistemi DWDM, perchè l'ampia spaziatura tra i canali consente l'impiego di componenti più a buon mercato, quali sorgenti laser non controllate in temperatura e filtri meno sofisticati.

### 3.3. Criteri di progetto dei collegamenti ottici

L'obiettivo di progetto per un collegamento ottico compreso tra due punti di rigenerazione elettrica è quello di garantire un tasso di errore, *BER* (*Bit Error Rate*), migliore di  $1 \times 10^{-12}$ . L'ammontare complessivo delle degradazioni che si accumulano lungo il collegamento deve essere perciò mantenuto entro limiti ben precisi in modo da rispettare questo obiettivo. I parametri degli apparati e delle fibre da considerare sono, come si è visto, assai numerosi; il progetto non è quindi semplice e, naturalmente, diventa sempre più complesso al crescere della lunghezza del collegamento, della frequenza di cifra dei canali, del numero dei canali trasmessi su una stessa coppia di fibre [6].

A titolo indicativo si danno qui di seguito alcuni criteri suggeriti dall'ITU-T [7] per il progetto di un collegamento ottico a 10 Gbit/s per un singolo canale. Nell'esempio è in particolare considerato un sistema a 10 Gbit/s con una potenza immessa in fibra all'uscita del trasmettitore di 0 dBm e una potenza accettata all'ingresso del ricevitore atta a soddisfare l'obiettivo di *BER* di cui sopra, pari a -24 dBm. Entrambi i valori di potenza sono considerati a fine vita e comprendono quindi i margini di deterioramento degli apparati stessi. Sono quindi disponibili 24 dB per compensare le degradazioni introdotte nel collegamento (Figura 4).

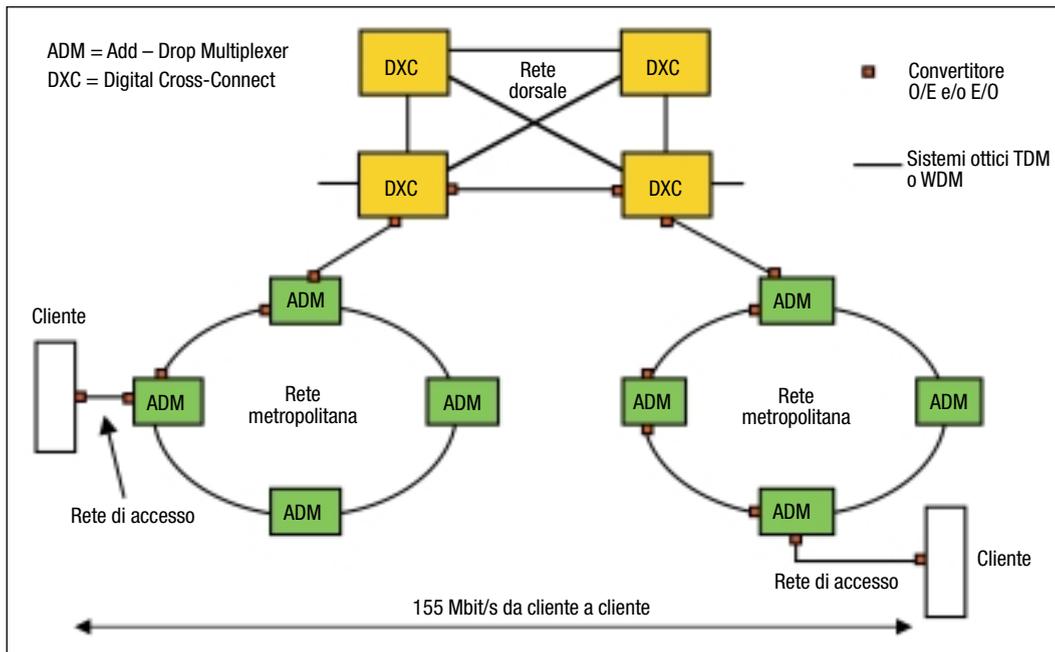
Sempre in [7] l'attenuazione delle fibre a 1550 nm è assunta essere 0,27 dB/km, comprendendo in questo valore l'attenuazione della fibra (0,22 dB/km), quella dei giunti, quella dei connettori terminali e il margine di manutenzione del cavo, atto a consentirne il



**FIGURA 4**

Esempio di budget di potenza per un sistema TDM a 10 Gbit/s





**FIGURA 5**  
 Schema di un generico collegamento in una rete SDH

Un secondo punto di debolezza è relativo, in particolare, alla gerarchia di multiplexione SDH progettata per un'utilizzazione prevalente con segnali telefonici. La rete SDH presenta quindi alcuni limiti in una visione delle telecomunicazioni sempre più orientata al trasporto dei dati. In particolare, i dati devono essere sempre mappati nei *payload* SDH per essere trasportati sui sistemi ottici. Non è infatti possibile una trasmissione diretta al livello ottico, in quanto tutte le funzionalità di gestione sono concentrate negli apparati SDH. Gli attuali sistemi ottici di trasmissione non hanno alcuna funzione di controllo delle prestazioni, ma hanno solo alcune funzioni di allarme (mancanza della potenza ottica). In particolare, per esempio, i codici di linea NRZ (*Non Return to Zero*) e RZ (*Return to Zero*) non presentano alcuna ridondanza che consenta di effettuare una valutazione, anche se grossolana, delle prestazioni di errore al livello ottico, proprio perchè sono stati sviluppati per operare in sinergia con la SDH. L'ultima generazione di apparati SDH, arricchita di nuove prestazioni per essere più aperta al mondo dei dati (funzionalità di *Generic Frame Procedure* e *Virtual Concatenation*), mantiene però la necessità di dover in ogni caso utilizzare lo strato SDH e sostenere il costo dei relativi apparati.

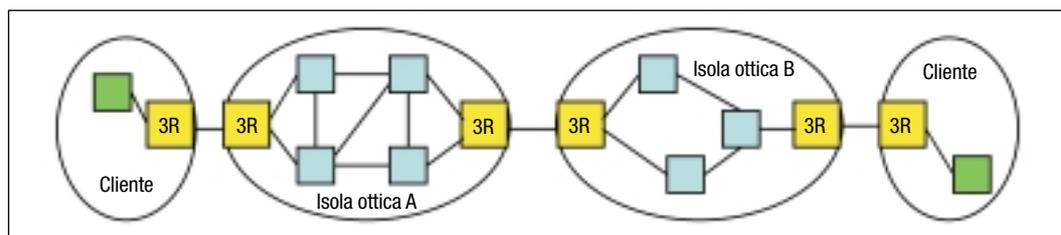
## 5. OTN: LA RETE DI TRASPORTO OTTICA

Con l'OTN (*Optical Transport Network*) si persegue l'obiettivo di eliminare i punti di debolezza della rete SDH indicati al paragrafo precedente e, allo stesso tempo, di fare un ulteriore passo verso una Rete Tutta Ottica. Le caratteristiche della OTN sono ormai ben definite in una serie di Raccomandazioni ITU-T [8]. Una OTN è composta da un insieme di elementi di rete ottici ONE (*Optical Network Element*), connessi da collegamenti in fibra ottica, atti a fornire funzionalità di trasporto, multiplexione, instradamento, gestione, supervisione di canali ottici che trasportano segnali cliente, con un trattamento eseguito *predominantly* in regime fotonico. Il termine *predominantly* chiarisce che la OTN non è una rete tutta ottica. I punti qualificanti della OTN sviluppati nel seguito sono: l'architettura, la gerarchia dei canali ottici, la loro trama e una certa trasparenza ottica [9]. In analogia con la rete SDH, l'architettura della rete OTN è strutturata su tre livelli: canale ottico, sezione di multiplexione dei canali ottici, sezione di trasmissione (tra terminali e/o tra amplificatori ottici adiacenti). Ciascuno di questi tre livelli ha precisi obiettivi nel quadro generale del controllo e della gestione. Per il trasporto di segnali cliente l'OTN definisce tre tipologie di contenitori: la prima

(ODU-1) adatta a trasportare segnali cliente con frequenza di cifra fino a 2,5 Gbit/s; la seconda (ODU-2) per segnali da 2,5 a 10 Gbit/s; la terza (ODU-3) per segnali da 10 a 40 Gbit/s. Tali tipologie di contenitori costituiscono anche gli elementi di una gerarchia ottica OTH (*Optical Transport Hierarchy*) che consente il trasporto di quattro ODU-1 in un ODU-2 e di quattro ODU-2 in un ODU-3, nonché diverse altre combinazioni di canali. Segnali cliente di ogni tipo (IP, ATM, Ethernet, STM-N) possono essere mappati in questi contenitori: all'ingresso della rete è previsto che i trasponder, oltre ad assegnare al canale ottico la giusta lunghezza d'onda, provvedano anche ad inserire i singoli segnali nei canali ottici (a seconda, naturalmente, della capacità che essi hanno, in modo da ottenere il massimo rendimento) e a completare con cifre di riempimento la parte della trama che rimane libera. Questa caratteristica della OTN garantisce un'elevata trasparenza ai segnali cliente all'interno del canale ottico prescelto. La trama di ciascuno dei tre tipi di canale è costituita da un *payload*, nel quale sono mappati i dati, e da un *overhead*, dove sono contenute tutte le informazioni necessarie per la gestione delle configurazioni e degli allarmi, nonché per il controllo delle prestazioni. Con canali ottici OTN così strutturati (*payload + overhead*) si supera il vincolo dell'impiego del livello SDH, in quanto ciascun canale ottico è dotato di tutte le risorse necessarie per la propria gestione. I segnali cliente dati possono essere quindi immessi e trasportati sui canali ottici senza dover essere prima mappati nelle trame SDH. D'altra parte i canali cliente SDH possono trovare posto nei canali ottici al pari dei segnali dati. Una caratteristica della OTN è la trasparenza ottica, cioè la capacità della rete di trasportare segnali ottici su lunghe distanze e attraverso i suoi nodi senza necessità di conversioni O/E e E/O. Questa trasparenza non è assoluta per via di diverse limitazioni

(che rendono conto della parola *predominantly* posta nella definizione) dovute sia al già citato accumulo delle degradazioni nella trasmissione ottica sia al fatto che non tutte le funzionalità di rete possono al momento essere svolte al livello ottico. La tecnologia rende infatti disponibili oggi apparati per la derivazione e per l'introduzione di canali ottici OADM (*Optical Add Drop Insert Multiplexer*), ma per i ripartitori ottici PXC (*Photonic Cross-Connect*) la situazione è più articolata. I PXC attualmente sul mercato hanno infatti ancora caratteristiche insufficienti per un loro estensivo impiego in rete sotto l'aspetto dell'affidabilità, dell'ingombro, del consumo e soprattutto, del costo. Dal punto di vista della trasparenza ottica, l'OTN si presenta quindi come costituita da un insieme di isole ottiche trasparenti (Figura 6) di dimensioni limitate (100-200 km), all'interno delle quali i canali ottici sono sempre mantenuti al livello ottico, collegate tra loro da rigeneratori 3R (per eliminare le degradazioni accumulate) e/o da permutatori per canali ottici, che effettuano tuttavia le permutazioni al livello elettrico.

Un notevole arricchimento dell'OTN è dato dalla ASON (*Automatic Switched Optical Network*) [10]. Un'architettura ASON è basata sulla realizzazione di un piano di controllo in grado di svolgere alcune funzioni tipiche dei sistemi di gestione centralizzati e posto tra i vari elementi di rete ottici della OTN e il piano di gestione (Figura 7). A questo scopo ogni ONE dovrebbe essere dotato di un OCC (*Optical Connection Control*) in grado di interconnettersi con gli altri OCC e con il sistema di gestione centralizzato e di impartire comandi a uno o più ONE. Si vogliono così rendere più semplici, più diretti e più rapidi i processi di attivazione, di cessazione, di modifica di istruzione di ciascun canale ottico, facendo svolgere le operazioni direttamente dagli organi di controllo presenti negli ONE dove sono



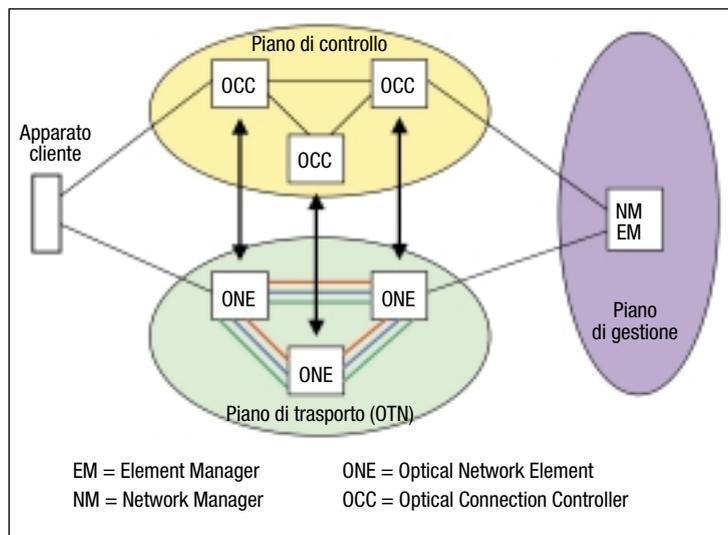
**FIGURA 6**  
La trasparenza ottica nella OTN

raccolte e continuamente aggiornate tutte le informazioni necessarie.

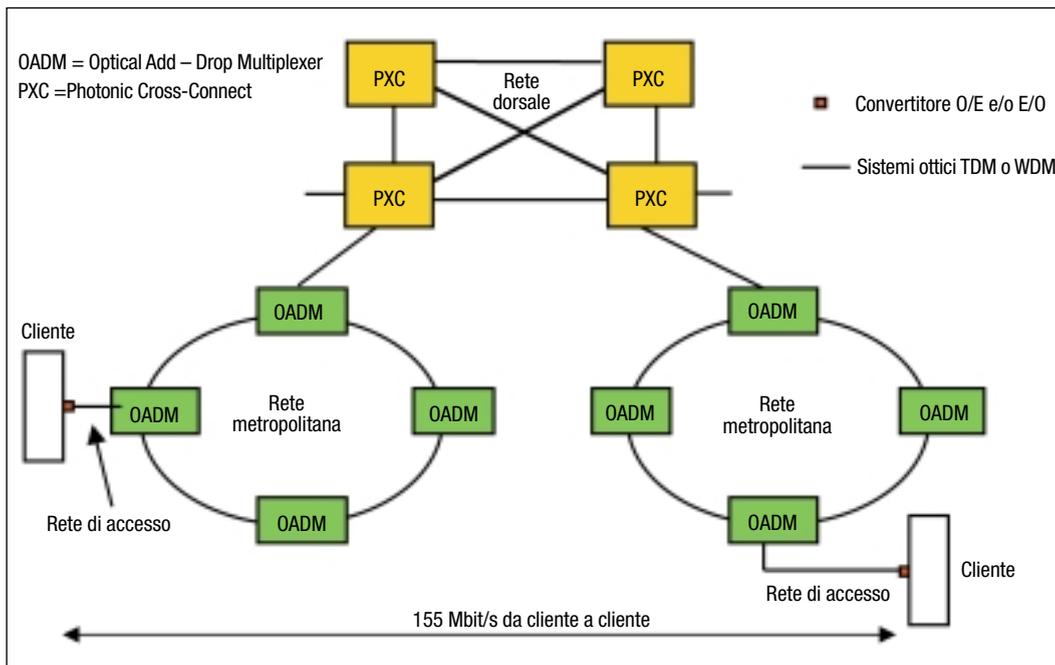
Un'architettura ASON con intelligenza distribuita presenta numerosi vantaggi rispetto ad un'architettura tradizionale con un'intelligenza concentrata nel sistema di gestione. I tempi per l'esecuzione delle operazioni di configurazione si riducono a qualche decina di millisecondi o a qualche secondo a fronte di qualche decina di minuti necessari con il sistema centralizzato. Inoltre l'ASON consente non solo di migliorare la qualità dei servizi di trasporto offerti (in termini di tempi di attivazione e di reistrazione in caso di guasti), ma anche di offrire nuovi servizi come la *Bandwith on Demand* e la *Optical Virtual Private Network*. I clienti possono con il primo servizio attivare e rimuovere servizi di connettività in tempi brevi e con tariffazione a tempo e con il secondo effettuare autonomamente le operazioni di configurazione dei flussi trasmissivi della propria rete. Le Raccomandazioni ITU-T per la ASON sono ormai praticamente complete [11], anche se le prime sperimentazioni in campo iniziate di recente (in Italia sono state avviate da 8-10 mesi) sono ancora basate su prodotti di un singolo produttore (gli ONE e il Piano di Controllo sono dello stesso fornitore e non sono possibili interconnessioni tra Piani di Controllo di fornitori diversi)

## 6. AON: LA RETE TUTTA OTTICA

La Rete Tutta Ottica costituisce per i gestori l'obiettivo finale dell'evoluzione della rete di trasporto, poichè essa consente di eliminare quasi completamente i rigeneratori elettrici posti all'interno della rete di trasporto e permette di avere una completa trasparenza ai servizi. L'evoluzione della OTN verso la AON dovrebbe avvenire con una graduale estensione della superficie delle isole ottiche fino al costituirsi di un'unica isola ottica (Figura 8) nella quale il se-



**FIGURA 7**  
Architettura di una ASON



**FIGURA 8**  
Schema di un generico collegamento in una rete AON

gnale cliente subisce una conversione elettro-ottica nel punto di origine (sede A del cliente) e una conversione ottico/elettrica nel punto di destinazione (sede B del cliente). Questa evoluzione sarà possibile a mano a mano che saranno disponibili gli elementi di rete che operano al livello ottico finora mancanti (PXC, convertitori di lunghezza d'onda, rigeneratori ottici ecc.) e che, al contempo, saranno ottimizzate le modalità di compensazione delle degradazioni che si accumulano al livello ottico (equalizzazione, regolazione ecc.). In realtà la realizzazione di una AON non è solamente legata alla disponibilità di apparati e di componenti più evoluti, ma anche ad altri vincoli posti dalla operatività e dalla gestione della rete di trasporto [12, 13].

Allo stato attuale una rigenerazione al livello elettrico sembra essere sempre necessaria nel punto di interfaccia tra la rete del cliente e la rete dell'operatore allo scopo di mantenere ben distinte e separate le responsabilità a fronte del rispetto del SLA (*Service Level Agreement*). Uno o due punti di rigenerazione dovrebbero rimanere ancora presenti tra i diversi livelli di rete (accesso, rete metropolitana, connessioni dorsali) per effettuare operazioni di raggruppamento (*grooming*) dei segnali cliente di piccola media / capacità in flussi di capacità superiore, per avere un'elevata percentuale di utilizzazione dei sistemi di trasmissione.

Un altro punto critico di una rete tutta ottica riguarda la difficoltà di mantenere sotto controllo la qualità dei canali ottici [14]. La misura diretta delle prestazioni di errore, i cui obiettivi sono definiti nei SLA, è infatti possibile solo al livello elettrico. Le misure effettuate al livello ottico (*optical monitoring*) come la potenza trasmessa e ricevuta dai singoli canali e dai segnali multiplati, il rapporto segnale / rumore ottico e la deviazione di frequenza dei canali, mentre consentono di effettuare una corretta gestione dei guasti, danno solo un'"indicazione" di come stanno andando le prestazioni di errore e non una misura delle prestazioni stesse.

Per rendersi conto della entità del problema basti pensare ad un canale ottico Venezia-Napoli nel quale si accumulerebbero le degradazioni di 800 km di cavo ottico, di sedici amplificatori ottici bidirezionali e di quat-

tro permutatori ottici. Ove si registrasse all'interfaccia tra la rete e il cliente finale una degradazione, per esempio, del tasso di secondi con errore (senza un'interruzione del canale ottico), le "indicazioni" ottenute dai parametri ottici controllati sarebbero quasi sempre tardive (rispetto al momento nel quale il cliente avverte la degradazione) e spesso insufficienti a individuare con tempestività e precisione le cause e il punto del degrado. Un miglioramento di questa situazione si verificherà con il diffondersi dei punti di misura dei parametri di qualità ottici in tutti i punti critici degli apparati e con l'acquisizione di una vasta messe di dati e di correlazioni. Tuttavia, allo stato attuale, una soluzione soddisfacente del problema non sembra vicina e quindi anche in una rete tutta ottica sarà necessario disporre di rigeneratori elettrici sui quali terminare provvisoriamente in più punti successivi il canale degradato, per localizzare il punto in cui si origina la degradazione del segnale.

A fronte delle criticità insite nelle nuove tecnologie, delle esigenze di raggruppamento di canali, delle carenze della supervisione al livello ottico, alcuni gestori cominciano a chiedersi se quello di una Rete Tutta Ottica sia veramente l'obiettivo da raggiungere o se invece sia solo un obiettivo a cui tendere. A questa riconsiderazione degli obiettivi non è estranea la comparsa sul mercato di nuovi trasponder realizzati con tecnologia SFP (*Small Form Factor Pluggable*) che hanno già oggi dimensioni, consumi e costi inferiori a quelli tradizionali, e che lasciano intravedere la possibilità di essere realizzati in nuove versioni di costo ben inferiore. L'impiego di questi trasponder potrebbe infatti ridurre di molto l'onere complessivo legato alla presenza di punti di conversione ottico-elettrico-ottico.

## 7. CONCLUSIONI

Le fibre ottiche e i sistemi di trasmissione ottici, a venti anni dalla loro prima introduzione nella rete di trasporto, hanno praticamente sostituito i conduttori in rame nelle reti metropolitane e nelle reti dorsali in tutte le applicazioni (collegamenti terrestri e sottomarini di ogni tipo e di ogni capacità). Tuttavia, l'attuale

rete di trasporto SDH è rimasta sostanzialmente elettrica perchè, anche se i nodi sono collegati con sistemi ottici, tutte le operazioni che sono effettuate sui segnali nei nodi stessi sono ancora svolte al livello elettrico.

Solo di recente sono state standardizzate architettura, funzionalità e apparati per una *Rete di Trasporto Ottica* (OTN) in grado di costituire e gestire canali ottici trasparenti all'interno di isole ottiche di limitata dimensione e le prime realizzazioni di questa rete sono ora in corso. Di pari passo con la OTN sta procedendo lo sviluppo di una architettura di rete ottica intelligente (ASON) che ne costituisce un arricchimento realizzando un Piano di Controllo atto ad effettuare in modo automatico le funzioni di gestione delle configurazioni dei canali ottici.

La strada da percorrere per arrivare alla realizzazione di una Rete Tutta Ottica (AON) non sembra nè breve, nè facile, in quanto mancano ancora alcuni elementi essenziali (i permutatori fotonici) e allo stesso tempo perchè devono essere risolte numerose problematiche di gestione e, più in particolare, quelle legate ai limiti intrinseci del monitoraggio ottico. Tuttavia i vantaggi che le società manifatturiere e i gestori di rete vedono all'orizzonte fanno ritenere che il cammino verso questo obiettivo procederà ancora speditamente, salvo l'effettuazione di periodiche verifiche per definire quale sia veramente il punto di arrivo più conveniente.

In questa rapida analisi dell'evoluzione della rete di trasporto verso una soluzione tutta ottica si è focalizzata più volte l'attenzione sugli standard e sui problemi di gestione, che spesso sono un pò trascurati nella letteratura tecnica, ma che, a parere dello scrivente,

più di altri decretano il successo o il fallimento di una tecnologia.

## Bibliografia

- [1] Montalti F.: Fibre ottiche per sistemi DWDM. *Notiziario Tecnico Telecom Italia*, n. 3, dicembre 2001.
- [2] *Fibre ottiche*: Raccomandazioni ITU-T G.652, G.653, G.654, G.655, G.656.
- [3] *Sistemi ottici TDM*: Raccomandazioni ITU-T G.957, G.691, G.693.
- [4] *Sistemi DWDM*: Raccomandazioni ITU-T G.694.1, G.692, G.696.1.
- [5] *Sistemi CWDM*: Raccomandazioni ITU-T G.694.2, G.695.
- [6] Aureli G., Pagnan P.: I sistemi DWDM: problematiche trasmissive e loro impatto sul progetto dei collegamenti. *Notiziario Tecnico Telecom Italia*, n. 2, dicembre 2000.
- [7] *Optical system design and engineering considerations*. ITU-T Supplemento n. 39.
- [8] *OTN*: Raccomandazioni ITU-T G.872, G.709.
- [9] Aureli G., Pagnan P.: La Rete di Trasporto Ottica (OTN): stato dell'arte e prospettive evolutive. *Notiziario Tecnico Telecom Italia*, n. 1, dicembre 2001.
- [10] Pagnan P.: La gestione del backbone di trasporto ottico. *Notiziario Tecnico Telecom Italia*, n. 2, dicembre 2002.
- [11] *ASON*: Raccomandazioni ITU-T G.8080, G.7712 / G.7717.
- [12] Bonaventura G., Pagnan P., Augusto S.: *La Rete Tutta Ottica: problemi aperti*. Fotonica 2003.
- [13] Bonaventura G., Pagnan P., Augusto S.: *Conditions for developing All Optical Islands as a part of a Cost-Effective and Future-proof Migration Strategy to an All Optical Network*. IIR Conference, Londra, aprile 2002.
- [14] Bonaventura G., Pagnan P., Farina T.: *Optical monitoring for DWDM systems*. IIR Conference, Cannes, giugno 2004.

GASTONE BONAVENTURA ha speso la vita professionale operando con diversi gestori di telecomunicazioni (Azienda di Stato per i Servizi Telefonici, Italcable, SIP, STET, Telecom Italia).

Per conto di Telecom Italia, è oggi Vice-Presidente della Commissione 15 (Reti Ottiche di Trasporto) dell'ITU-T e Presidente del Working Party "Tecnologia Ottica". È anche docente di "Impianti di Telecomunicazioni" nel Corso post-lauream per ingegneri tenuto dal Ministero delle Comunicazioni.

gastone.bonaventura@telecomitalia.it