

FIBRE OTTICHE RIVOLUZIONANO I SISTEMI DI TELECOMUNICAZIONE

Il mondo delle Telecomunicazioni è sempre stato oggetto di ricerca e sperimentazione di applicazioni per migliorarne la sua funzionalità ed affidabilità, ma soprattutto per incrementare la capacità trasmissiva di informazione, che con il passare degli anni si è fatta sempre più esigente. I primi vettori o supporti impiegati sono stati i doppiini telefonici, i cavi telefonici, i cavi coassiali, per giungere ai collegamenti in ponte radio. Le informazioni da trasmettere erano le semplici comunicazioni telefoniche o collegamenti telegrafici, telesegnalazioni, telecomandi relativi a automatizzazione impiantistica, scambio di dati numerici fra centri di calcolo e terminali ad essi collegati e via dicendo. Comunque l'obiettivo da raggiungere è sempre stato quello di sfruttare al massimo le possibilità trasmissive del supporto impiegato, infatti anche sul normale cavo telefonico furono realizzate in passato tecniche di moltiplicazione di canale, riuscendo a trasmettere N canali telefonici (300-3400 Hz.) contemporaneamente, creando delle sottoportanti distanziate fra loro di 4 Khz. (4-8-12-16 e così via), ognuna modulata da un diversa fonia, fino ad arrivare ad una capacità massima di frequenza supportata dal vettore. La società TELETTRA di Vimercate produceva delle apparecchiature denominate "frequenze vettrici" che su cavo assicuravano il trasporto di 12 canali contemporanei in banda fonica, ma si andava anche oltre i 12 canali, con questa tecnica multiplex denominata FDM (Frequency Division Multiplexing) o meglio: divisione di frequenza moltiplicata. I singoli canali telefonici venivano traslati, andando a modulare le sottoportanti in SSB per un miglior utilizzo dello spettro utile. In ricezione, con opportuni filtri di canale dalle varie sottoportanti demodulate si estraevano le informazioni relative ad ogni canale associato. Senza entrare in molti dettagli tecnici, su un singolo doppiino di collegamento avevamo a disposizione 12 canali telefonici contemporaneamente. La stessa tecnica, con qualche variante circuitale, è approdata anche sui collegamenti in ponte radio, dove il ministero per i collegamenti civili, aveva concesso una fetta di banda intorno ai 450 MHz., con una canalizzazione però ristretta, che al massimo consentiva la trasmissione contemporanea di 6 canali fonici. Queste apparecchiature ricetrasmittenti, operanti in modulazione di frequenza, erano chiamate "ponti radio pluricanale" ed hanno costituito per molto tempo un valido collegamento per raccordare il traffico telefonico e dati fra le varie località. Venivano prodotti da varie ditte: GTE-MARELLI, SELENIA, SIAE (450 3B3), quest'ultimo un vero gioiello, rimasto in servizio fino alla metà degli anni 1980 ed oltre, con bassissima percentuale di guasti. Naturalmente, la nascita delle prime reti di trasmissione dati locali (LAN), che interconnettevano grossi calcolatori, e banche dati, fra aziende pubbliche e private, poli universitari e di ricerca, portarono allo sviluppo di reti a commutazione di pacchetto, prima ancora di arrivare a internet. Da questo scenario, tracciato frettolosamente, ma durato più di un decennio, emergeva sempre più la necessità di avere vettori con ulteriori capacità trasmissive, in pratica dotati di una maggior banda trasmissiva, e quindi non rimaneva che salire in frequenza per ottenere questi risultati, poiché la banda aumenta al salire della frequenza di impiego. Pertanto, per quanto riguarda i collegamenti civili, i vettori radio cominciarono ad operare nella banda dei 2,3 Ghz. Ed il numero di canali passò a 60-120 per ogni singolo collegamento, dando così un ulteriore respiro, per qualche anno, all'affannosa corsa della fame di collegamenti. Inoltre le apparecchiature ricetrasmittenti si erano evolute, passando dall'analogico al digitale, migliorando in capacità trasmissiva, affidabilità e miglior funzionamento anche con tratte radio più critiche, dove il rapporto segnale-rumore era piuttosto scarso riuscivano ad effettuare buoni collegamenti. La codifica del segnale era in PCM (Pulse Code Modulation o modulazione impulsiva in codice) ed il tipo di modulazione prevalentemente usata era il PSK (Phase Shifting Key o a spostamento di fase), a questo punto occorrerebbe entrare nei particolari di queste tecniche, ma provocherebbe una trattazione più approfondita che possiamo intraprendere in altri ambiti. Va detto che, nello stesso periodo evolutivo, erano allo studio altre tecnologie, seguendo sempre la regola: "salire in frequenza per avere più banda a disposizione", quindi non rimaneva che adottare un vettore o mezzo trasmissivo di frequenza più elevata, cioè **la luce**. La scelta cadde sulla radiazione elettromagnetica dell'infrarosso, una banda di frequenza inferiore a quella della luce visibile, ma molto maggiore di

quella delle microonde radio, infatti la gamma dell'infrarosso si misura in nano-metri (ovvero un milionesimo di millimetro) e i vari studi fatti portarono all'utilizzo delle **Fibre Ottiche**, come nuovo supporto trasmissivo per tali lunghezze d'onda.

BREVI CENNI STORICI

Fino dai primi anni del 1970, anche in Italia sono iniziate le sperimentazioni per l'utilizzo delle fibre ottiche al posto dei cavi tradizionali. Il problema era maggiormente sentito per l'interconnessione ed il relativo scambio dati fra gli elaboratori dei grossi centri di calcolo delle università ed istituti di ricerca, dove il flusso informativo era notevole. Un forte impulso di ricerca, nel settore della fibra ottica, fu dato dal CSELTE (Centro Studi E Laboratori Telecomunicazioni) di Torino, con realizzazione dei primi cablaggi cittadini in fibra ottica, in collaborazione con Pirelli e Sirti. Questo primo cablaggio cittadino della lunghezza di ben 9 Km., risultò all'epoca il più lungo a livello mondiale e destinato a soppiantare la rete di cablaggio fatta con cavo coassiale. Successivamente l'intenso sforzo di ricerca, compiuto dalle varie nazioni tecnologicamente più avanzate, ha permesso di effettuare collegamenti per distanze sempre più grandi, abbattendo i valori di attenuazione che all'inizio erano proibitivi per le lunghe distanze (svariate decine di dB a chilometro). I vantaggi derivanti da questa nuova tecnologia sono principalmente:

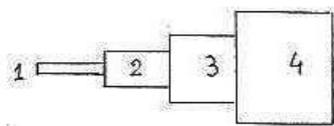
- **Larghezza di banda.** L'elevatissima frequenza del segnale luminoso rende possibili modulazioni con bande molto larghe, quindi con capacità trasmissive di alcuni ordini di grandezza superiori a quelle ottenibili con cavo coassiale o delle trasmissioni radio in banda millimetrica, grazie anche a tecniche di multiplexazione a divisione di lunghezza d'onda WDM (Wavelength Division Multiplexer) si arriva a modulazioni di alcuni Giga bits/sec.
- **Immunità da interferenze e isolamento elettrico.** La trasmissione su fibra ottica è pressoché immune da interferenze elettromagnetiche ed anche l'interferenza fra fibre adiacenti (diafonia) è ben controllata, inoltre il collegamento è isolato elettricamente ed è ideale per gli ambienti dove i campi elettromagnetici di disturbo sono di notevole entità.
- **Sicurezza.** La segretezza del segnale trasmesso è garantita, essendo impossibile prelevare una parte del segnale ottico trasmesso, transitante sulla fibra.
- **Affidabilità.** Le ultime tecnologie sui componenti ottici assicurano una vita media di 20-30 anni.
- **Peso e dimensioni.** A parità di capacità trasmissiva un cavo in fibra ottica ha peso e volume inferiori all'equivalente cavo in rame, oltre ad offrire maggior flessibilità e maneggevolezza.
- **Bassa attenuazione.** Le fibre ottiche dell'ultima generazione, come vedremo, presentano attenuazioni di circa $0,20 \div 0,25$ dB/Km., consentendo di avere passi di ripetizione elevati, con notevoli vantaggi sulla semplicità del sistema.

COSA SONO LE FIBRE OTTICHE.

Generalmente sono dei filamenti vetrosi sottilissimi in grado di far passare al loro interno la luce, come se fossero delle minuscole guide d'onda dielettriche. Le migliori fibre si ottengono partendo da una base di silice drogata con elementi come il boro, il fosforo, il fluoro ed altri materiali per controllare l'indice di rifrazione lungo il percorso interno.

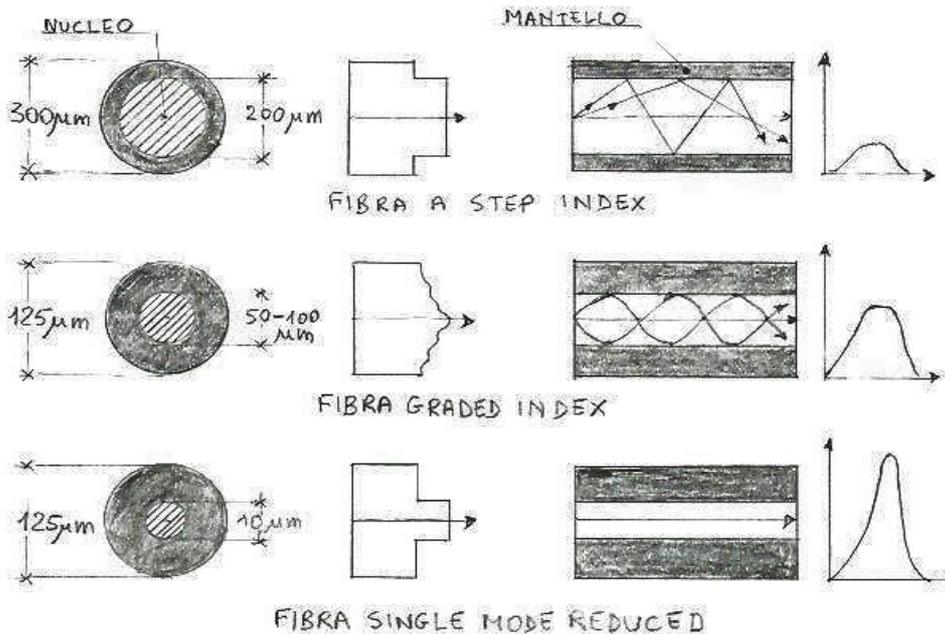
Dal punto di vista propagativo la fibra può essere paragonata, come già detto, ad una guida d'onda dielettrica, riuscendo a confinare i raggi luminosi iniettati al suo interno, di lunghezza d'onda del vicino infrarosso (800-900 nm) e lontano infrarosso (1300-1550 nm.), per le quali la fibra ottica presenta la minima attenuazione.

Da un punto di vista fisico il sottile filo di vetro a base di silice ha al proprio interno un nucleo cilindrico dielettrico denominato "core" di diametro di alcune decine di μm con un certo indice di rifrazione, rivestito da un secondo materiale "mantello" concentrico, anch'esso di vetro trasparente



- | | | |
|---|-----------------------|-------------------|
| 1 | NUCLEO CENTRALE | 10 μm |
| 2 | MANTELLINO (CLADDING) | 125 μm |
| 3 | SEPARATORE | 250 μm |
| 4 | RIVESTIMENTO | 400 μm |

COMPOSIZIONE DI FIBRA OTTICA



La figura evidenzia l'andamento del raggio di luce all'interno delle diverse tipologie di fibre ottiche

alla luce e alla radiazione infrarossa, ma con indice di rifrazione di poco inferiore al "core" (2-9 per mille in meno). Nel punto di contatto dei due materiali si ha pertanto variazione di indice di rifrazione andando a delimitare un cono di propagazione con un angolo di incidenza ottimale rispetto alla sorgente luminosa iniettata che si propagerà agevolmente nella fibra. Il mantello che circonda il "core" della fibra, crea un'interfaccia ottica progettata per riflettere quasi tutta la luce all'interno della fibra, essendo anch'esso fatto di silice

Il "core" ed il "mantello" sono a loro volta ricoperti da un rivestimento primario di materiale plastico per la protezione della fibra dalle abrasioni meccaniche, il suo diametro è di 250 μm .

Il primo tipo di fibra ad essere prodotto fu chiamato "step index", poiché il mantello aveva un indice di rifrazione differente dal nucleo, pertanto la luce rimbalzava fuori dai lati ed era riflessa a gradini, dal mantello, dentro il nucleo della fibra. In questo modo la luce riflessa fa un percorso più lungo, rispetto alla luce che viaggia al centro del nucleo e questo porta ad una limitazione della velocità di trasmissione, per fenomeni di ritardo di gruppo. Successivamente il progetto fu migliorato passando al tipo di fibre ad indice di rifrazione graduato "graded index", dove l'indice di

rifrazione diminuisce gradualmente rispetto alla distanza dal centro del nucleo della fibra, in tal modo si ha un percorso della luce più curvato nella riflessione verso il nucleo, con il risultato di aumentare notevolmente (fattore 50) la capacità trasmissiva. Poi con l'avvento delle fibre "single mode", realizzate con un diametro del nucleo piccolissimo, al cui interno la luce viaggia in maniera diretta, tutte le problematiche sono state superate, ed è quella maggiormente usata per coprire collegamenti a lunga distanza. Tralasciamo gli altri tipi e parleremo, da qui in avanti, di fibre ottiche monomodali SINGLE MODO REDUCED che fanno parte dei collegamenti per telecomunicazioni che descriverò in seguito.

FIBRA OTTICA SUO FUNZIONAMENTO

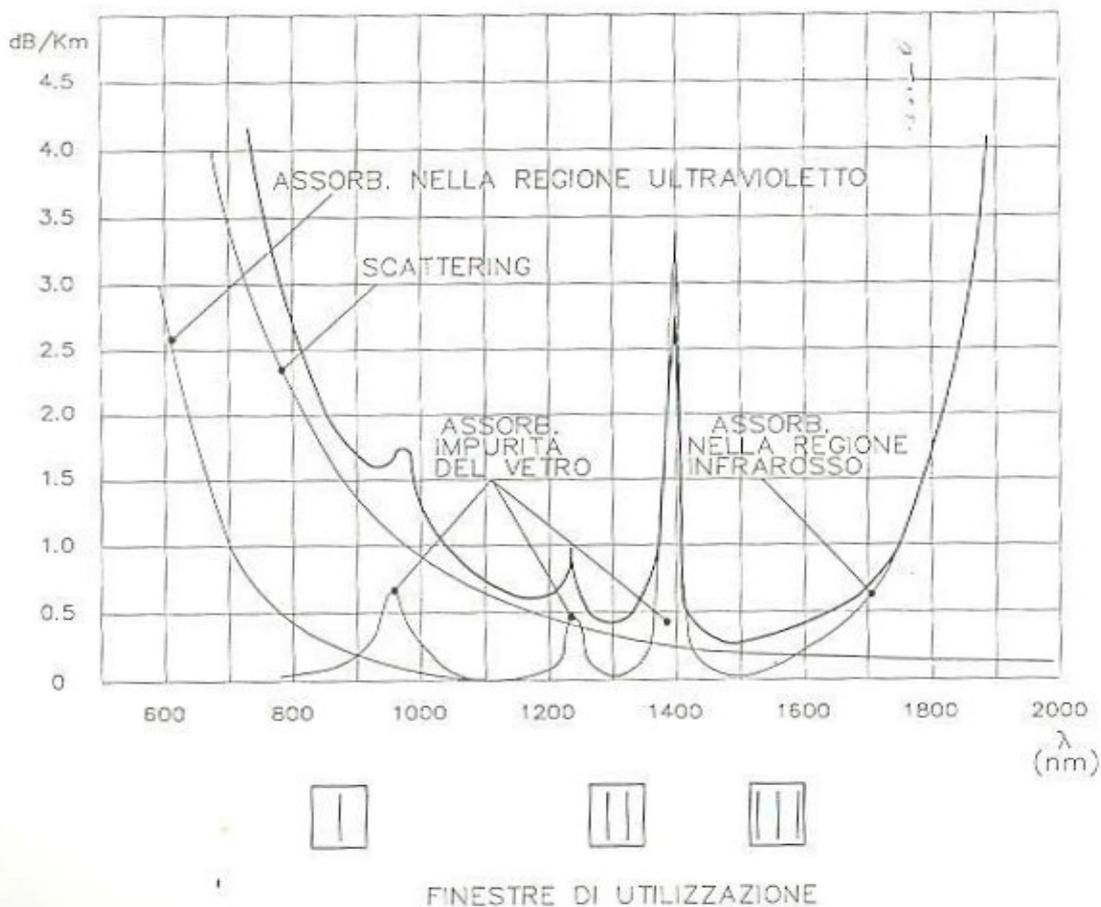
Descrivere il funzionamento delle fibre ottiche, facendo a meno delle necessarie formule che lo regolano, non è facile e richiederebbe ampi spazi di scrittura, proveremo a farne a meno cercando di elencare in maniera sommaria le relazioni fondamentali del sistema. Troviamo la legge della riflessione e legge di Snell per la rifrazione, oltre a valutare un parametro detto di "apertura numerica", esprime la minore o maggiore facilità con cui si può introdurre la luce in una fibra mantenendo i raggi luminosi dentro un cono, delimitato da un angolo limite di accettazione. Per quei raggi entranti con angoli di incidenza superiore, avremo rifrazione nel mantello. Inoltre si dovrebbe parlare di perdite di diffusione o di Rayleigh, che indicano l'attenuazione che la radiazione luminosa subisce nell'attraversare l'interno dei filamenti di pasta vetrosa che costituiscono la fibra. Inoltre oltre alle perdite per diffusione, l'attenuazione dell'energia luminosa all'interno del vetro è principalmente dovuta all'assorbimento di ioni metallici ed altre impurità presenti nel materiale, nonostante le sofisticate procedure costruttive tese a conferire al vetro una notevole purezza. Le migliori fibre si ottengono partendo da una base di silice drogata con elementi come il boro, il fosforo, il fluoro ed altri, per controllare l'indice di rifrazione lungo il raggio della fibra. Nonostante tutto ciò si manifestano picchi di assorbimento su particolari lunghezze d'onda, intorno ai 940 nm e 1400 nm, oltre a questi si verificano altri fenomeni di assorbimento intorno ai 1700 nm. La curva di attenuazione di una fibra non è uniforme ma presenta dei minimi di attenuazione in corrispondenza di determinate "finestre" di lunghezza d'onda, dove la trasparenza è massima, consigliandone l'utilizzo in tali spazi o finestre.

La prima finestra è stata la prima ad essere impiegata, per i dispositivi ottici allora disponibili tecnologicamente, ed è collocata ad una lunghezza d'onda di 850 nm, con attenuazione di 2 dB/Km. La seconda finestra è situata in corrispondenza della lunghezza d'onda dove è minima la dispersione di energia ottica, favorendo l'ottenimento di larghissime bande di modulazione. Ciò si verifica a 1300 nm, con attenuazione di 0,46 dB/Km.

La terza finestra è situata in corrispondenza della lunghezza d'onda di 1550 nm. Dove abbiamo la minima attenuazione: 0,23 dB/Km.

I sistemi di trasmissione utilizzano sorgenti luminose specializzate per inviare impulsi ad alta velocità sul relativo cavo in fibra ottica. Le sorgenti luminose emettono un fascio di luce, non diffuso, ad una particolare lunghezza d'onda ed attualmente le due sorgenti maggiormente impiegate sono: **LED** (Light Emitting Diode), che ha un basso costo ed una limitata gamma dinamica.

LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) con costi molto più elevati, ma fornendo una migliore gamma dinamica. Il led emette potenze di 0,1 mW, che accoppiate in fibra arrivano a 50 μ W con banda di modulazione di circa 50 Mhz., inoltre la sua luce è scarsamente direttiva e poco monocromatica. Il laser emette radiazioni luminose con alta purezza spettrale ed angolo di radiazione piccolissimo favorendo così una diffusione ottimale all'interno della fibra, arrivando ad emettere potenze di 100 mW, che accoppiate in fibra raggiungono svariati mW, inoltre la banda di modulazione può estendersi fino a 10 Ghz. Le sottostanti figure e tabella riassumono quanto sommariamente descritto.



	LASER	LED
AFFIDABILITA'	ELEVATA (vita media: $10^6 - 10^7$ ore)	ELEVATA (vita media: $10^5 - 10^6$ ore)
LUNGH. D'ONDA	800÷1550 nm	800÷1550 nm
POTENZA	ELEVATA (10÷100 mW)	BASSA (0,1÷1 mW)
EFFICIENZA	ELEVATA (>20 %)	BASSA (0,1 %)
SPETTRO D'EMISSIONE	STRETTO (0,1÷2 nm)	LARGO (50÷100 nm)
ACCOPIAMENTO IN FIBRA OTTICA	BUONA EFFICIENZA	DIFFICOLTOSA
MODULAZIONE	FINO A 10 GHz	FINO A 50 MHz
DIMENSIONE	MINIMA	MINIMA
COSTO	MEDIO (TECNOLOGIA DEI SEMICONDUTTORI)	MEDIO (TECNOLOGIA DEI SEMICONDUTTORI)

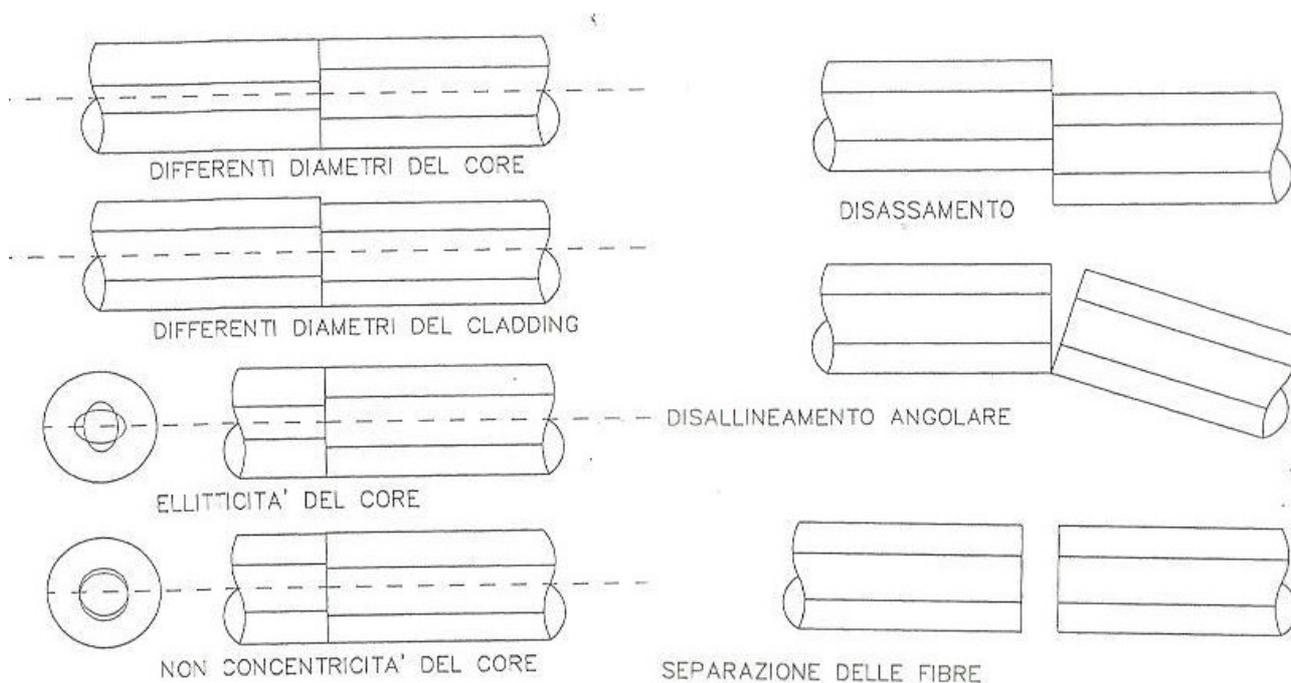
Per concludere, nei sistemi moderni di telecomunicazione a fibra ottica vengono usati quasi esclusivamente diodi LASER con fibre monomodali. I LED sono utilizzati con fibre multimodali per trasmissione dati, LAN, reti di distribuzione.

Per quanto riguarda la ricezione, nei collegamenti in fibra ottica, vengono impiegati dei “fotorivelatori” che trasformano gli impulsi di luce, utilizzati per la trasmissione ed emessi dalle sorgenti ottiche, in impulsi elettrici da inviare alla successiva catena di elaborazione. Detti dispositivi a semiconduttore sono essenzialmente diodi particolari : 1) DIODO PIN (Positivo-Intrinseco Negativo) 2) DIODO A VALANGA APD (Avalanche Photo Detector), all'interno dei quali, l'energia ceduta dai fotoni in arrivo, provoca nella struttura cristallina che li compone, una proporzionale liberazione di elettroni. Caratteristiche preminenti sono : la **sensibilità**, ovvero la capacità di rivelare, con minime potenze ottiche associate ad una trasmissione numerica, un flusso di simboli con bassi tassi d'errore; la **responsività**, ovvero la risposta del fotorivelatore al variare della lunghezza d'onda, in definitiva la relazione tra numero di elettroni prodotti e numero di fotoni incidenti; **tempo di risposta** che sarebbe il ritardo con il quale il fotorivelatore converte il segnale ottico di fibra in segnale elettrico, in pratica con questo parametro si stabilisce la massima frequenza del segnale trasmesso in linea senza perdita di informazione. Esistono differenze prestazionali fra diodi PIN e diodi APD, quest'ultimi hanno maggiore guadagno e sensibilità, ma richiedono tensioni di polarizzazione più alte e risentono delle variazioni di temperatura, inoltre hanno costi maggiori, il tutto dipende dalle applicazioni d'impiego.

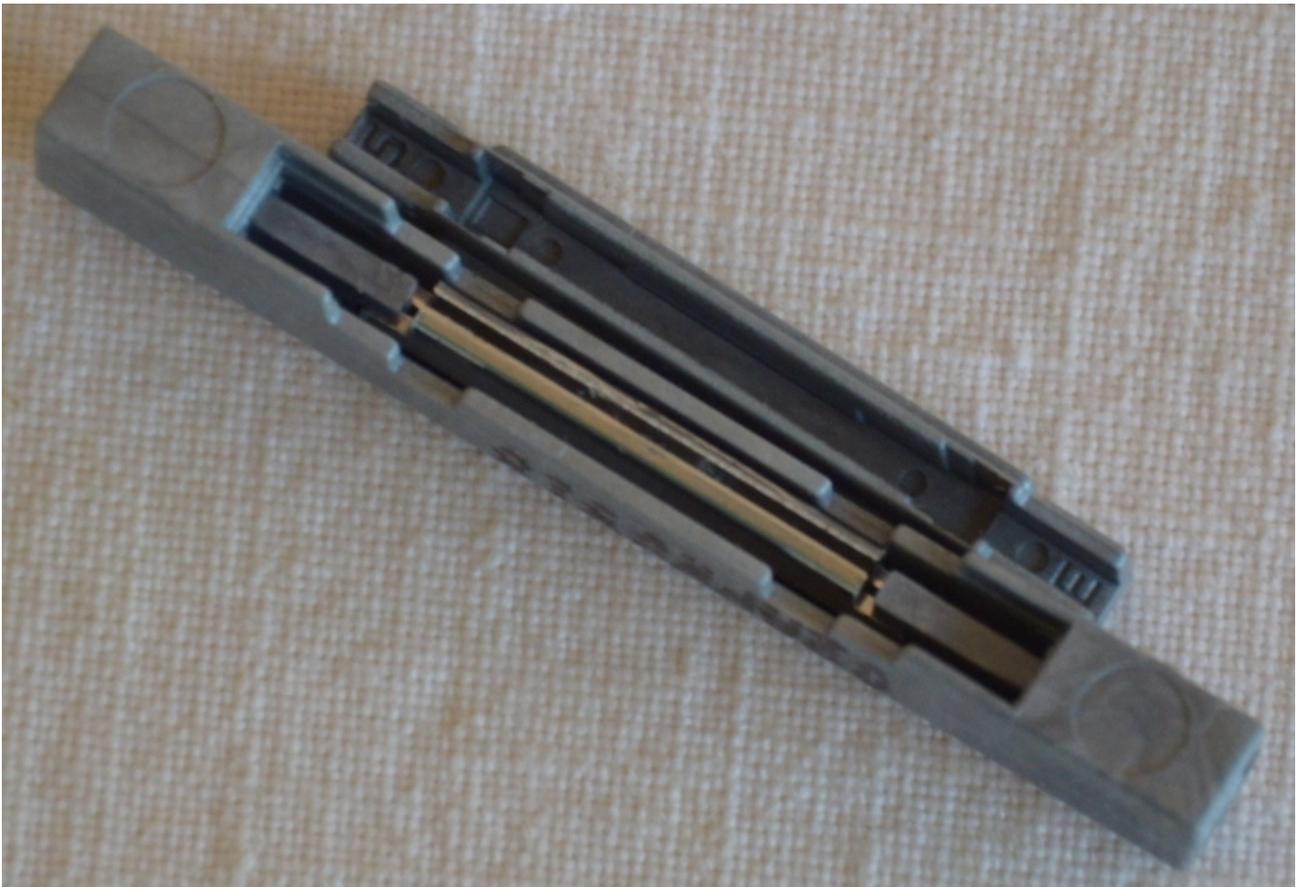
Vorrei ricordare che, tutti i dati tecnici e costruttivi elencati fino a qui e nel seguito, si riferiscono al periodo che va dagli inizi degli anni 1990 fino al 2005, le teorie sono tuttora valide, ma la tecnologia odierna ha fatto passi da gigante, pertanto sul piano prestazionale alcuni dati sono senz'altro inferiori a quelli attuali.

COMPONENTI ED ACCESSORI

GIUNTI E LORO PROBLEMATICHE DI ESECUZIONE



I cavi in fibra ottica potrebbero essere oggi prodotti con lunghezze del centinaio di Km., ma la loro installazione sarebbe molto difficoltosa, pertanto vengono generalmente forniti con pezzature di circa 4 Km., di conseguenza per tratte di collegamento molto più lunghe è necessario giuntare fra di loro le singole fibre dei cavi impiegati nella tratta da realizzare. I giunti devono essere perfetti per limitare al minimo le perdite introdotte dalla giunzione, alcune intrinseche delle fibre come: lievi differenze fra i diametri del nucleo o del mantello della fibra, oppure ellitticità del nucleo, o una non



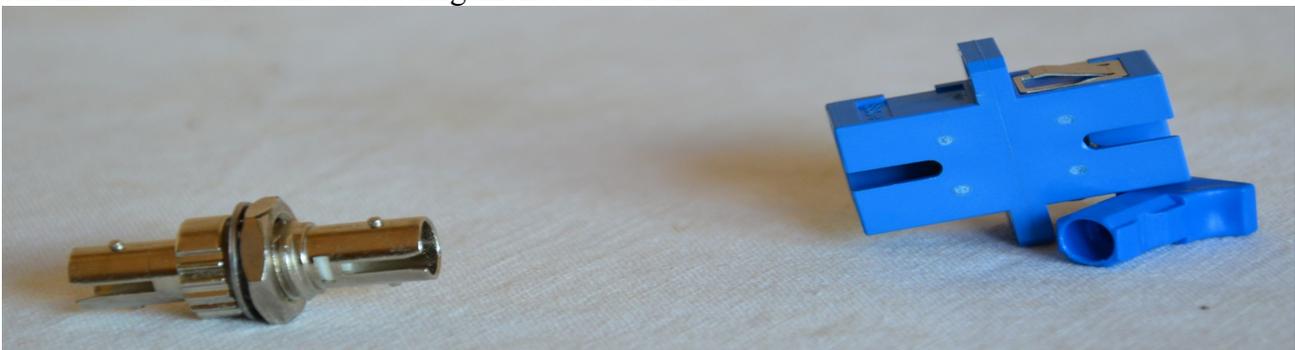
Giunto meccanico con coperchio di protezione

concentricità dello stesso; altre perdite dovute ad effetti esecutivi della giunzione come disallineamento o disassamento. I giunti possono essere **meccanici** oppure a **fusione**. In entrambi i casi l'operatore deve avere una buona preparazione ed operare con precisione, metodo, e soprattutto nella massima pulizia ed in assenza di polvere che possono influire sul buon esito della giunzione. Le fibre da unire devono avere le estremità piatte e levigate, senza spaccature o altri difetti, pertanto gli utensili di taglio e preparazione devono essere precisi specialmente per intaccare il vetro e scoprirlo per poi tagliarlo ed ottenere un buon profilo, come già detto. Successivamente la superficie delle fibre devono essere pulite con un tampone imbevuto di una soluzione di alcol prima di procedere alla giunzione. Segue poi la fase di allineamento in cui si cerca di ottimizzare la posizione delle due fibre su un supporto guida, (tegolino) per poi essere bloccate nella posizione ideale raggiunta; questo avviene col giunto meccanico, di cui esistono varie versioni, a seconda delle case costruttrici, con perdite variabili fra 0,2 e 0,05 dB.

Il giunto a fusione è eseguito mediante rammollimento e successiva saldatura delle fibre, precedentemente preparate come già descritto, saldatura che avviene per effetto di una scarica elettrica fra due elettrodi, posti in prossimità delle fibre, tenute ferme e premute una contro l'altra, realizzando la continuità ottica voluta. A giunzione avvenuta i punti di giunzione vengono preservati con compound e tubetti protettivi che assicurano la stabilità della giunzione e protezione da agenti esterni (polvere, sporcizia, umidità). Il giunto meccanico è abbastanza semplice nella sua esecuzione ed è poco costoso, la sua perdita nel migliore dei casi è circa 0,1 dB, mentre il giunto a fusione perde 0,05 dB ed è piuttosto costoso in quanto richiede una macchina giuntatrice abbastanza sofisticata, gestita da micro- processore che provvede all'allineamento automatico delle fibre ed alla successiva fusione, il tutto avviene in pochi secondi. L'operatore deve solo preparare le fibre come sopra descritto e successivamente proteggerle, le operazioni sono veloci, estremamente affidabili e ripetitive, la macchina ottimizza sempre la giunzione ed è ormai il sistema più usato.

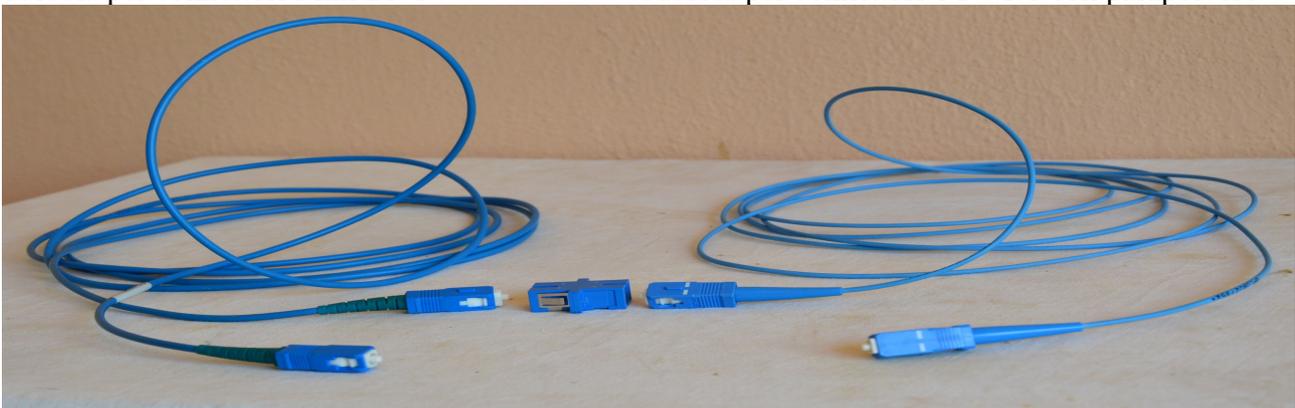
CONNETTORI E CAVI

I connettori possiamo definirli giunti mobili che permettono la connessione e la sconnessione manuale fra due terminazioni di fibra in una centrale o per collegarsi a strumenti di misura o per interfacciarsi con le apparecchiature di rete, in pratica sono i terminali delle fibre ottiche. Sono più difficili da realizzare rispetto ai giunti, poiché devono introdurre perdite bassissime pur essendo mobili e quindi non ci devono essere problemi di allineamento, inoltre fra un'inserzione e un'altra deve esserci ripetibilità, tenendo presente che le tolleranze di allineamento per fibre monomodali devono essere inferiori al micron. La connessione avviene per affacciamento delle superfici frontali delle fibre da connettere, che fanno capo ai rispettivi connettori. In pratica tutte le connessioni sono costituite da due spine e da una bussola che ha funzione di guida per le spine. I connettori più usati sono i "butt jointed", dove il nucleo della fibra viene infilato nel foro capillare di un inserto ceramico, protetto da una camicia esterna di acciaio inossidabile (ferula), per mantenere il proprio allineamento, fino alla testa del connettore, il tutto è poi bloccato tramite avvitatura o crimpaggio. Questa lavorazione avviene durante la fabbricazione per ottenere i migliori risultati di interfacciamento e ridotte perdite di inserzione. Queste ultime sono dovute al disassamento, all'inclinazione ed all'allontanamento dei rispettivi nuclei delle fibre affacciate. Importante è contenere l'eccentricità delle ferule monomodali sotto gli 0,5 micron. ed avere la perdita di ritorno (rapporto fra la potenza incidente e la frazione di essa riflessa dal componente) superiore a 45 dB, con perdita di inserzione di 0,1 dB; ciò è ottenuto ricorrendo a lappature e sagomature convesse delle superfici terminali delle fibre per un migliore contatto fisico (PC). Il più usato è il connettore SC-PC, che nel suo insieme, è costituito da due spine cilindriche dotate di una chiave di riferimento che ne consente l'accoppiamento secondo una posizione radiale prestabilita e da un manicotto contenente una bussola cilindrica con un taglio laterale, la meccanica si avvale di un innesto "push-pull" che assicura un perfetto contatto fisico fra le teste dei due terminali di fibra, con una ripetitività di alto grado a seguito di ripetute inserzioni. Questo connettore fa parte dei connettori a baionetta come l'altro tipo denominato ST che viene usato con fibre multimodali, in precedenza chiamato Mini BNC che è stato largamente usato nelle



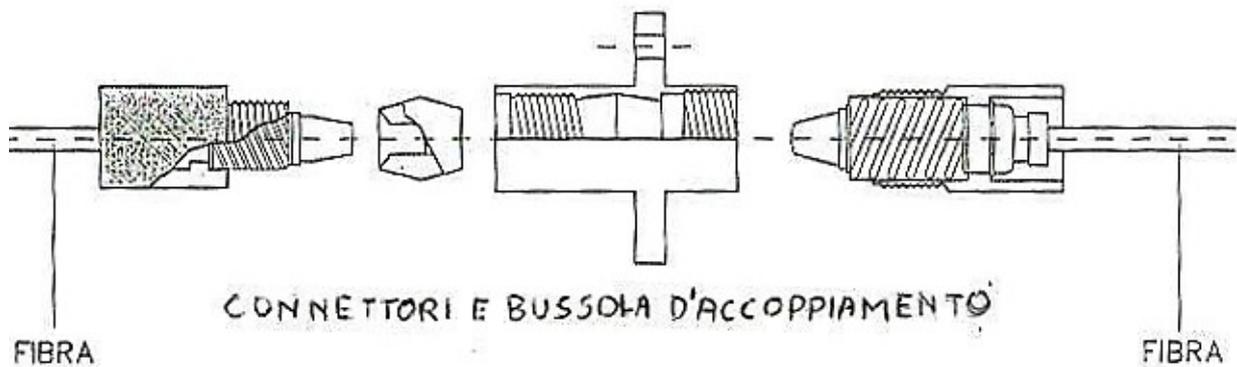
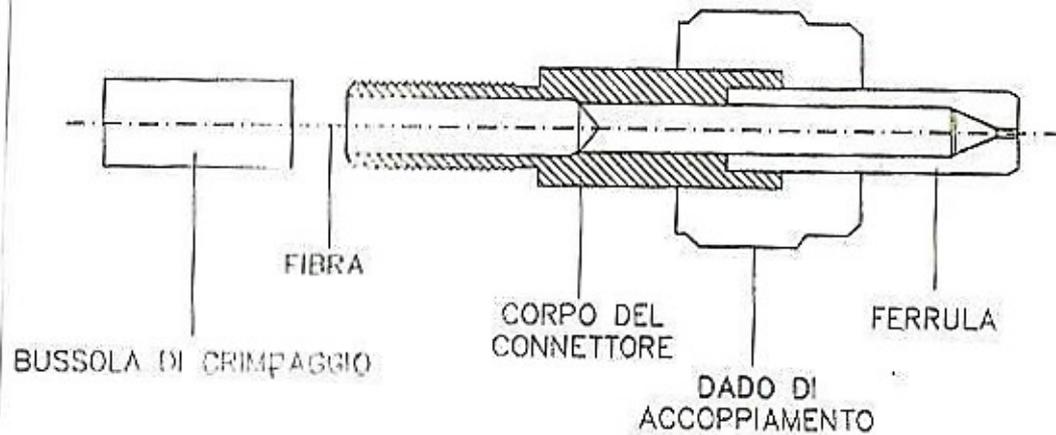
bussola per connettori Mini BNC

bussola per connettori SC – PC con parapolvere

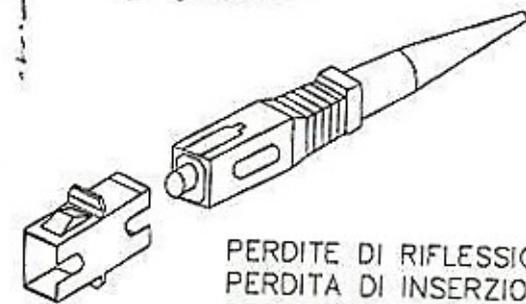


connessione fra due cavetti in fibra già attestati con connettori SC-PC

CONNETTORE OTTICO BUTT JOINTED



CONNETTORE SC-PC E BUSSOLA



PERDITE DI RIFLESSIONE	$\leq -45\text{dB}$
PERDITA DI INSERZIONE	$\leq 0.10\text{dB}$
DEVIAZIONE STANDARD	$\leq 0.05\text{dB}$
N. INSERZIONI	> 1000

reti locali IBM Token-Ring. Così come negli anni '80 per le fibre ottiche veniva impiegato il connettore BICONIC, ormai in disuso.

Per quanto riguarda i cavi in fibra ottica, relativi ad un collegamento con altra località, essi vengono fatti afferire in una sala apparati, dove saranno attestati su un ripartitore ottico, come avviene per i cavi telefonici, al fine di essere interconnessi ad apparecchiature di rete o realizzare connessioni con fibre di altri collegamenti. Le operazioni si svolgono come segue: Le fibre ottiche del cavo in arrivo

vengono fatte pervenire in un armadio dedicato dove verrà montato il sub-telaio del ripartitore ottico, vengono sguainate dai loro involucri protettivi ed una volta messe a nudo vengono tagliate a misura lasciando sempre una scorta in lunghezza, poi una ad una vengono preparate e pulite per essere giuntate a fusione con una giuntatrice automatica, come già descritto. La giunzione avviene con cavetto in fibra di identiche caratteristiche sul suo lato libero, poiché all'altro estremo detto cavetto ha già montato un connettore SC-PC attestato in fabbrica di produzione, quindi con una sola fusione la fibra è già connettorizzata con il massimo di efficienza. Questo connettore si inserisce a baionetta sul retro del cassetto su cui sono fissate le bussole di raccordo, tante quante sono le fibre contenute nel cavo. Questa operazione si ripete fino al completamento della cablatura ottica, naturalmente tutte le operazioni vengono eseguite proteggendo le connessioni, fissando la cablatura negli appositi alloggi del cassetto e via dicendo; sul frontale del cassetto si affacciano le altre facce delle bussole guida che consentono l'inserzione dei cavetti in fibra (connettorizzati dal fabbricante da ambo i lati), che permettono di effettuare tutte le operazioni di ripartizione, collegamento e monitoraggio su quel collegamento. Il cassetto di ripartizione è protetto dalla polvere e sporcizia, inoltre, le bussole di connessione che non hanno cavetti di collegamento connessi devono essere sempre protette con appositi cappucci para polvere. Vedremo in seguito, come vengono identificate e numerate le varie fibre di un cavo, seguendo un codice colori abbastanza universale, con numeri riportati sulle bussole del cassetto ottico.

REALIZZAZIONE DI UN COLLEGAMENTO PUNTO – PUNTO

Vedremo come realizzare un collegamento a lunga distanza in fibra ottica con trasmissione convenzionale a modulazione di intensità ed a rivelazione diretta. Il flusso dei dati da trasmettere verrà inviato al trasmettitore che lo codifica e lo associa ad un segnale ottico che viene inviato in fibra. In ricezione viene effettuata una conversione ottico-elettrica tramite un fotorivelatore e dal segnale elettrico si ricava il simbolo trasmesso. In pratica il ricevitore è composto da un fotorivelatore, un amplificatore e da circuiti di elaborazione del segnale, di cui una delle funzioni più importanti è l'estrazione del segnale di sincronismo per identificare l'inizio e la fine di ogni bit. La qualità del collegamento viene espressa in termini di tasso d'errore o BER (Bit Error Rate) che rappresenta la probabilità di ricevere un bit errato ogni mille milioni (1×10^{-9}) che è un valore tipico. Pertanto per progettare un buon collegamento in fibra, si può fare riferimento a quanto veniva effettuato per i collegamenti in ponte radio, dove veniva calcolato, con apposita formula, l'attenuazione di tratta nello spazio libero, a quella frequenza di funzionamento, il guadagno delle antenne (in TX e in RX), l'attenuazione dei cavi coassiali impiegati, l'attenuazione dei connettori e relativi gruppi di accoppiamento, si teneva conto della sensibilità del ricevitore per un dato rapporto segnale/rumore al fine di dimensionare la potenza del trasmettitore, fermo restando un buon margine di segnale, rispetto a tutte le attenuazioni misurate e calcolate, in grado di assicurare tassi di errore accettabili dai sistemi asserviti. Ho cercato di descrivere la cosa non facendo uso di formule, che avrebbero richiesto ampi spazi descrittivi entrando in tutti i particolari progettuali, la descrizione è sommaria e lo stesso cercherò di fare con le fibre ottiche, che richiederebbero maggior ricorso a formule specifiche.

Per la fibra ottica si procede come segue: conoscendo la lunghezza di tratta del collegamento ed il tipo di fibra ottica impiegato, che presenta una data attenuazione (dB/Km.) sappiamo subito l'attenuazione presentata dal cavo in fibra; con il computo metrico delle pezzature di cavo necessario stabiliamo il numero di giunzioni che dovranno essere fatte in linea, (di ogni giunzione ne conosciamo l'attenuazione); dobbiamo inoltre attestare due connettori finali ai due estremi della linea, con relative bussole e l'esecuzione di altre due giunzioni; infine ci saranno altre attenuazioni da considerare, anche se di piccola entità. Sommando tutte queste perdite conosceremo la teorica attenuazione in dBm di tutto il collegamento, permettendoci di scegliere il trasmettitore della potenza adeguata per coprire in sicurezza, con buoni margini di errore, l'intera tratta. Naturalmente ho tralasciato vari parametri che vorrebbero essere rappresentati con formule specifiche, ma mi limiterò ad elencarli: margine di esercizio del cavo, margine di esercizio e d'invecchiamento delle

apparecchiature, ecc.; il tutto si supera aggiungendo qualche dB in più ai calcoli effettuati, per arrivare ad avere dai 6 ai 7 dB di margine, che assicureranno un eccellente collegamento esente da errori. La scelta dei trasmettitori e ricevitori per fibre ottiche è fatta per classi o gerarchie, che ne stabiliscono la potenza, la larghezza di banda, la sensibilità e via dicendo, con i quali si possono realizzare collegamenti superiori ai 100 Km. con buoni margini di errore, senza ricorrere ad amplificatori ottici intermedi, adottati in genere per tratte superiori ai 180 Km.

ESEMPIO DI CALCOLO

Supponiamo di dover realizzare un collegamento fra due località distanti 45 Km., con fibre monomodali SMR con n° 10 bobine ciascuna lunga 4,5 Km., quindi avremo:

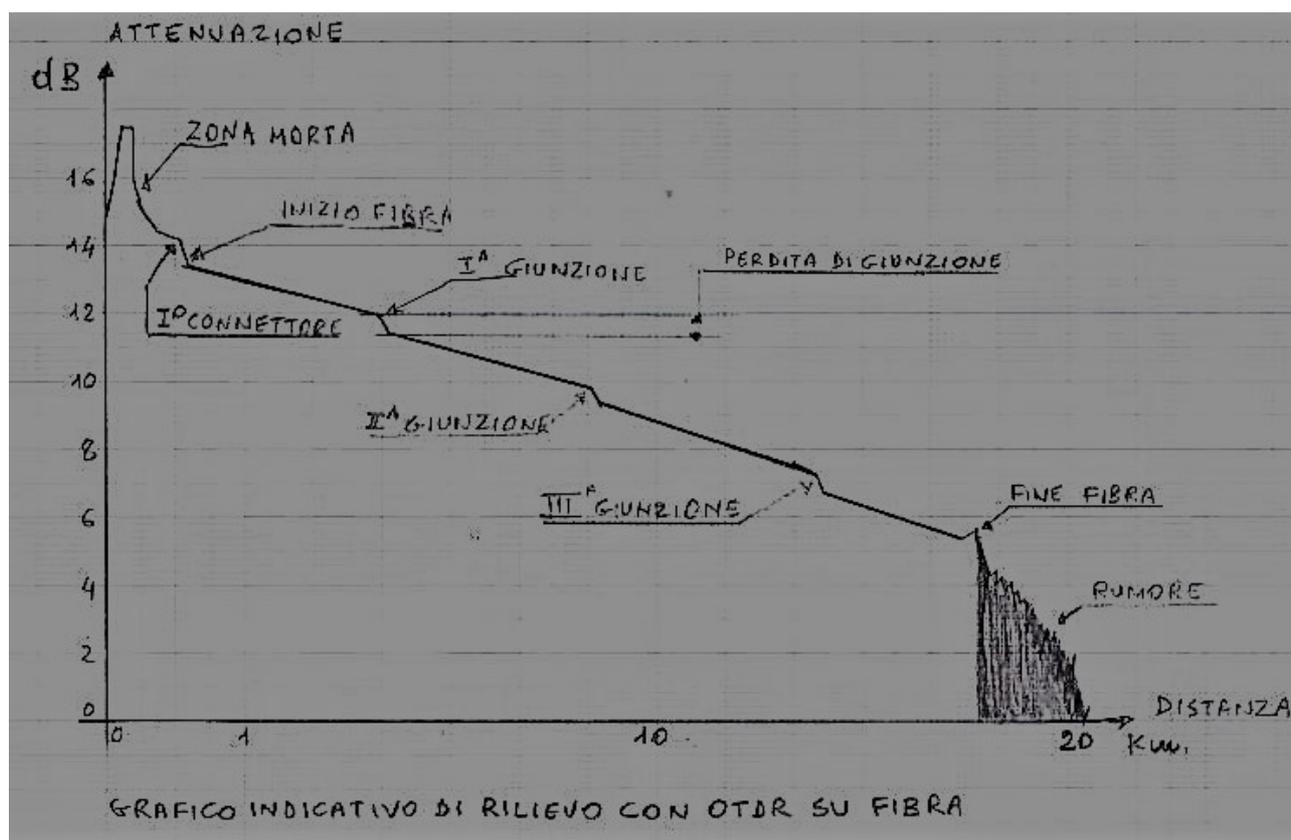
- attenuazione di fibra $0,25 \text{ (dB/Km)} \times 45 \text{ Km.} = 11,25 \text{ dB}$
- attenuazione giunti $0,06 \text{ (dB a giunto)} \times 9 \text{ giunti} = 0,54 \text{ dB}$
- attenuazione giunzioni terminali $0,06 \text{ dB} \times 2 \text{ giunti} = 0,12 \text{ dB}$
- attenuazione connettori terminali e bussole d'accoppiamento $0,5 \text{ dB} \times 2 = 1 \text{ dB}$
- Attenuazione totale dell'intero collegamento = 12,91 dB

Pertanto dovranno essere scelte apparecchiature di trasmissione con potenze d'uscita che tenendo conto dell'attenuazione calcolata, dell'invecchiamento dell'impianto e dispositivi vari, assicurino comunque un margine di sicurezza, come già detto, di 6 dB. Quando le distanze sono superiori si scelgono apparati di gerarchia superiore, oppure si fa ricorso, ferma restando la potenza in gioco, a apparecchiature contemplanti tecniche FEC (Forward Error Correction), in pratica si tratta di un meccanismo tecnico di rilevazione e successiva diretta correzione di errore, attraverso introduzione di bit ridondanti sul flusso informativo dati. Con tale tecnica si abbatta drasticamente il BER, passando da $1 \cdot 10^{-9}$ (senza FEC) a $1 \cdot 10^{-15}$ (con FEC), che equivalgono al recupero di 4 – 5 dB, sul margine di collegamento, permettendo così di affrontare collegamenti più lunghi. Ricorrendo inoltre a dispositivi di post-amplificazione in emissione con ulteriore recupero di altri 15 dB di margine ed infine adottando, in ricezione, dei preamplificatori, con ulteriore apporto di altri 5 dB per un totale circa 25 dB si superano agevolmente distanze molto superiori ai 150 Km.. Come ripeto questi dati erano validi circa 20 anni fa, adesso si va ben oltre.

STRUMENTI DI MISURA PER I COLLEGAMENTI IN FIBRA OTTICA

Una volta realizzato il collegamento occorre verificarne l'effettiva funzionalità, andando a misurare, l'intera attenuazione con appositi strumenti di misura. Il primo apparecchio di verifica è un POWER METER (misuratore di potenza) ottico. Esso è composto da un generatore o sorgente di luce, che viene connesso con appositi cavetti e connettori, sopra descritti, ad una estremità del collegamento, mentre all'altra estremità remota viene connesso un rilevatore di potenza ottica, che misurerà il segnale ricevuto stabilendo così la reale attenuazione del collegamento. La misura è unidirezionale, ma normalmente, invertendo la strumentazione, si effettua anche nell'altro senso per un migliore riscontro. Va detto che, prima di effettuare le prove, vengono tarati gli strumenti (emettitore e rilevatore) sulla lunghezza d'onda voluta (850, 1300, 1550 nm.), connettendoli fra di loro mediante due “cavetti di lancio” e bussola d'accoppiamento, che dovranno essere gli stessi nella successiva prova sul campo. Il livello di emissione espresso in dBm viene visualizzato e registrato sul rilevatore, per essere settato poi a zero, in modo da avere in fase di misura sulla fibra l'esatta attenuazione dell'intero collegamento, così da non ricorrere a operazioni di sottrazione dal valore in dBm trasmesso. Naturalmente se si dispone di due coppie di apparecchi e di due operatori si evita di far diversi chilometri per raggiungere l'altra località, fermo restando di effettuare le operazioni di taratura prima della prova reale. Tutte queste semplici operazioni vanno svolte provvedendo a “soffiare” con apposita bomboletta d'aria i vari connettori e bussole sui quali si va ad agire, la polvere e la sporcizia falsano le misure, ricordandosi di inserire sempre i cappucci anti-polvere su tutti gli organi di connessione a misure terminate. Queste prove sono le più semplici ed immediate, ma non danno certo indicazioni riguardo le caratteristiche dei vari segmenti di fibra che

compongono l'intero collegamento, in particolare le perdite nei vari giunti e l'esatta ubicazione fra di loro lungo la linea con la mappatura del collegamento, che tornerà utilissima quando nel futuro su detto collegamento dovranno essere fatte operazioni di manutenzione o di riparazione, stabilendo se su quella tratta ci sono giunzioni da rifare e vedendo il margine che rimane sull'intero percorso. Lo strumento che consente tutto ciò si chiama OTDR (Optical Time Dominion Reflectometer) o meglio riflettometro ottico nel dominio del tempo. L'OTDR, lancia impulsi di luce generati da un diodo laser, dentro una fibra, impulsi di durata calibrata e di lunghezza d'onda selezionabili, che caratterizzano il collegamento fino in fondo e ritornano indietro fino all'OTDR. Il segnale, mediante un accoppiatore è riversato su un ricevitore, dove viene convertito in un segnale elettrico per essere analizzato in forma visibile su uno schermo. L'OTDR misura il segnale di ritorno nei confronti del tempo, i valori temporali sono automaticamente moltiplicati per la velocità della luce all'interno della fibra, (dipendente da l'indice di rifrazione) ottenendo la distanza.

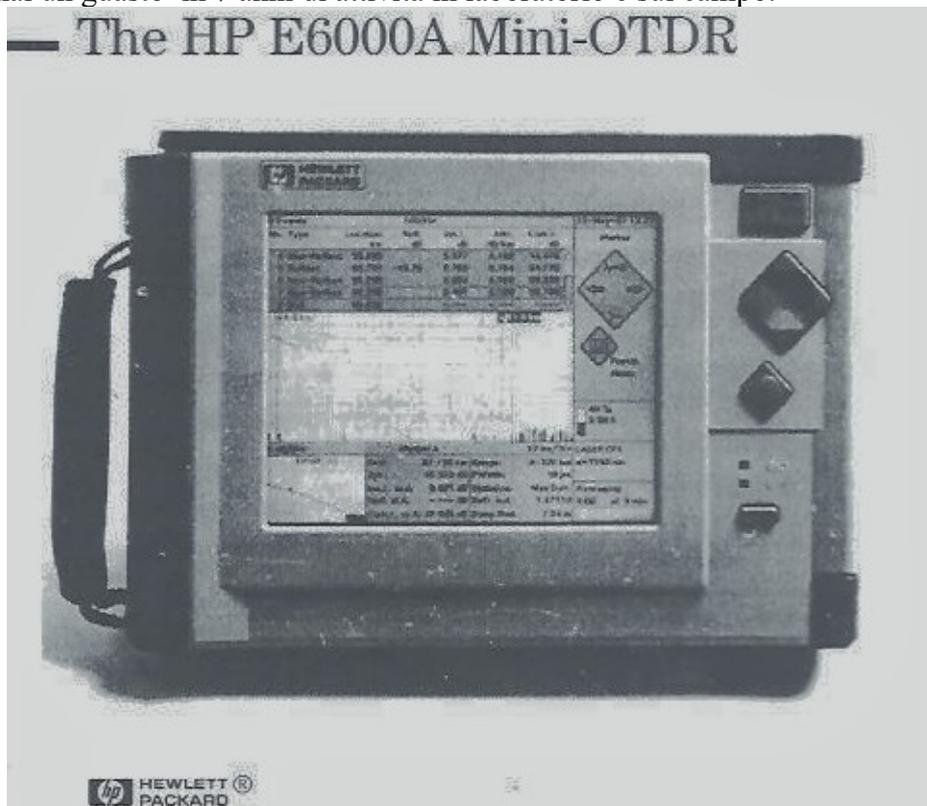


Finché il collegamento è solo un segmento di fibra di cui si conosce l'indice di rifrazione, vedremo un andamento progressivo di attenuazione dovuto soltanto ad impurità costruttive della fibra con retrodiffusione del segnale secondo la legge di Rayleigh, in quanto il mezzo di propagazione è omogeneo (come se in un cavo non ci fosse variazione d'impedenza), ma, come nel nostro caso in presenza di numerosi giunti e connessioni, questi provocano variazioni di rifrazione, favorendo un aumento di energia che ritorna verso la sorgente, (riflessione di Fresnel), come se in un cavo ci fossero variazioni di impedenza. Questi sono proprio gli eventi che sono evidenziati lungo il cammino della fibra con valori di attenuazione in concomitanza

Perciò vengono visualizzate tutte le variazioni di potenza sul segnale di ritorno su tutta la distanza ed in particolare si analizza tutto il profilo del collegamento, con l'esatta lunghezza dello stesso, l'allocatione delle giunzioni con relative perdite individuali, di connessione e di giunzione con connettori e infine l'attenuazione totale. Il ricevitore è in grado di rivelare segnali debolissimi di retrodiffusione o backscattering in genere da 40 a 80 dB più bassi in potenza rispetto ai segnali lanciati, consentendo di individuare la minima variazione sul collegamento. L'importante è settare l'OTDR, con l'esatto indice di rifrazione indicato dal costruttore per quel tipo di fibra e per la

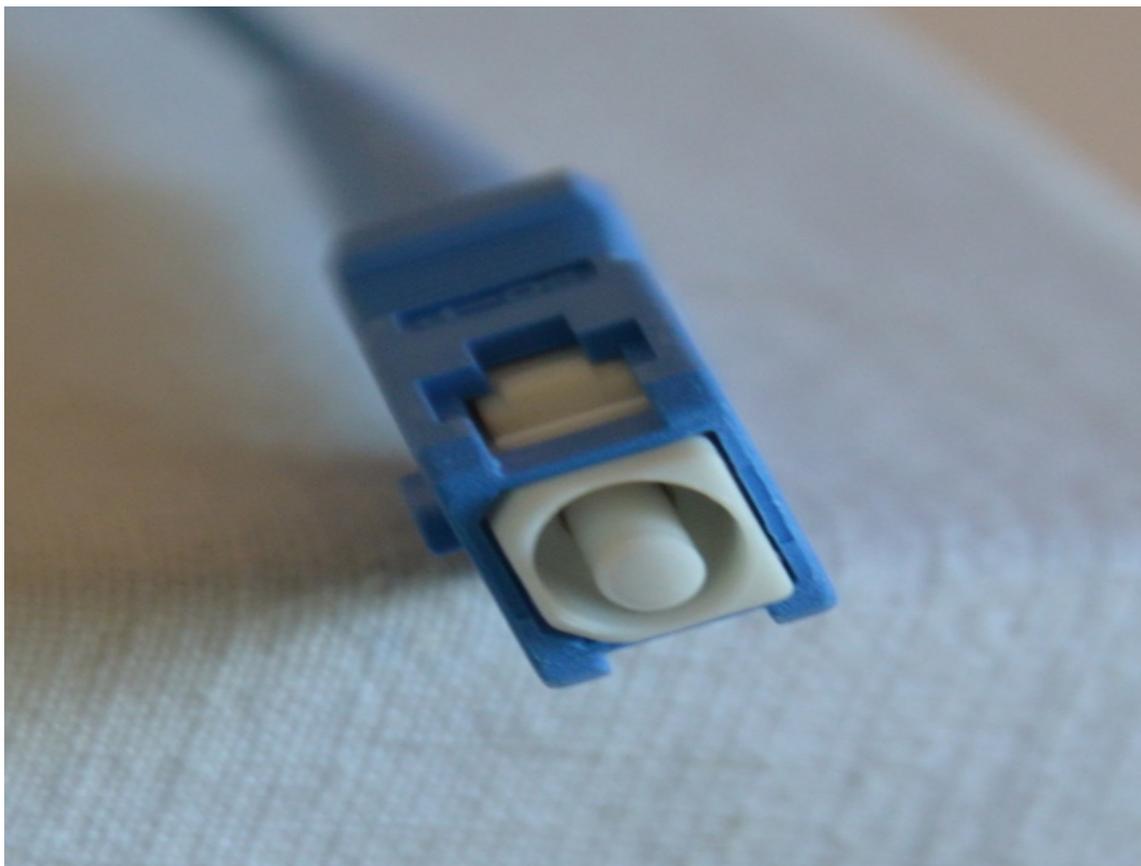
lunghezza d'onda impiegata, da questi parametri dipende la precisione di misura.

L'OTDR ha il vantaggio di far eseguire tutte le misure da un solo lato del collegamento, evitando costosi spostamenti fra le due località. La fine della fibra è evidenziata da un picco sul segnale di ritorno, se questa è terminata su un connettore aperto, oppure in caso di rottura, si vede precipitare il segnale ai livelli di rumore. All'inizio del collegamento (da dove vengono eseguite le prove) il ricevitore dell'OTDR vede il primo connettore d'unione alla fibra con un picco altissimo di segnale, che non consente di misurare la sua riflettanza e perdita, venendosi a trovare in una zona morta di misura, dovuta alla inesistente distanza fra trasmissione e ricezione (saturazione del ricevitore), distanza che dovrà essere di circa 10-15 metri di fibra, pertanto il problema viene risolto con l'inserzione di una bobina di lancio, costituita da circa 100 metri di fibra già connettorizzata fra OTDR e collegamento sotto esame. Il metraggio aggiuntivo sarà poi sottratto automaticamente dallo strumento, una volta posizionati i suoi cursori grafici di inizio e fine fibra. Con i cursori grafici, posizionati sui vari eventi del grafico, si ricavano tutti i dati inerenti l'attenuazione, la distanza, la riflettanza del connettore, ecc., con la possibilità di zoom. Lo strumento, opera sulle varie lunghezze d'onda, tipiche delle varie finestre, sulle quali si può scegliere la durata degli impulsi ottici (valori tipici: 10 ns ÷ 10 µs), pertanto, per fibre di lunghezza ridotta cercheremo di usare impulsi di breve durata, che hanno il pregio di una maggiore risoluzione degli eventi, mentre, per collegamenti oltre i 100 Km. di lunghezza dovranno essere impiegati impulsi di maggior durata, per riuscire a superare l'attenuazione della lunga distanza. Il range dinamico è superiore ai 40 dB, la precisione di misura anche su distanze ragguardevoli di diverse decine di chilometri è inferiore ad 1 metro, per valori di lunghezza inferiori siamo nell'ordine di approssimazioni centimetriche. Questo è utilissimo nella ricerca di un guasto su una linea individuando con estrema precisione il punto di avaria. La tracciatura grafica degli eventi di linea richiede qualche decina di secondi, mentre per collegamenti lunghissimi, una rappresentazione grafica pulita può richiedere un massimo di 3 minuti. Di OTDR ce ne sono tanti tipi: ANDO, ANRITSU, TEKTRONIX, H.P., più o meno equivalenti, personalmente ho impiegato per molti anni HP portatile serie 6000 che aveva incorporato un misuratore di potenza, precedentemente descritto, che facilitava il compito di verifica sul campo, con un unico apparecchio si coprivano tutte le esigenze, con possibilità di poter registrare tutti i dati di misura e relativi grafici, in quel periodo (circa 15 anni fa) aveva ottime prestazioni, mai un guasto in 7 anni di attività in laboratorio e sul campo.



Da tutto quanto detto finora penso che, questa prima “infarinata”, abbia dato una idea dell'aspetto tecnico relativo alle fibre ottiche, senza entrare in tanti particolari che riguardano maggiormente i progettisti di queste reti. Per chi si vuole cimentare nel campo delle misurazioni su questi collegamenti occorre rispettare certe regole: 1) occorre una buona strumentazione di cui abbiamo già parlato, con accessori quali fibra di lancio, cavetti o bretelle ben connettorizzate ed affidabili; 2) massima pulizia ricorrendo ad eliminare polvere e sporcizia prima di connettersi per eseguire le misure; 3) settare l'OTDR con il giusto indice di rifrazione specifico della fibra sotto misura, scegliere la giusta lunghezza d'onda e soprattutto la durata degli impulsi luminosi, in relazione alla lunghezza del collegamento; 4) porre attenzione nel posizionamento dei cursori grafici sugli eventi registrati e nell'azzeramento del misuratore di potenza, per non avere valori falsati; 5) ogni 12-18 mesi, verificare la calibrazione degli strumenti ottici impiegati, da un istituto certificato o dal costruttore. Molto dipende dal modo di utilizzo da parte dell'operatore che, se rispetta le accortezze e la pulizia nell'uso, le calibrazioni vengono fatte, ma come verifica e senza intervenire fattivamente sui vari dispositivi della strumentazione.

Le attrezzature hanno costi abbastanza elevati, specialmente per quanto riguarda le esecuzioni di giunti sui cavi in fibra, dove per realizzare dei buoni giunti a fusione, occorre affidarsi alle apposite macchine giuntatrici automatiche, gestite da microprocessore, che oltretutto richiedono, per la preparazione dei cavi una serie di arnesi ed accessori oltre ad una grande manualità e professionalità, che si acquisisce naturalmente nel tempo. Per fibre utilizzate per reti locali (multimodali), si può ricorrere a giunzioni meccaniche, oppure eseguire una riparazione di emergenza su cavi in fibra monomodali, accettando perdite di giunzione un po' più alte.



Particolare della “ferrula” di un connettore SC-PC già attestato su singolo cavo in fibra SMR