

GRUPPO TELECOM ITALIA

**Seminario IEEE Photonics Society
Pavia, 27 Novembre 2009**

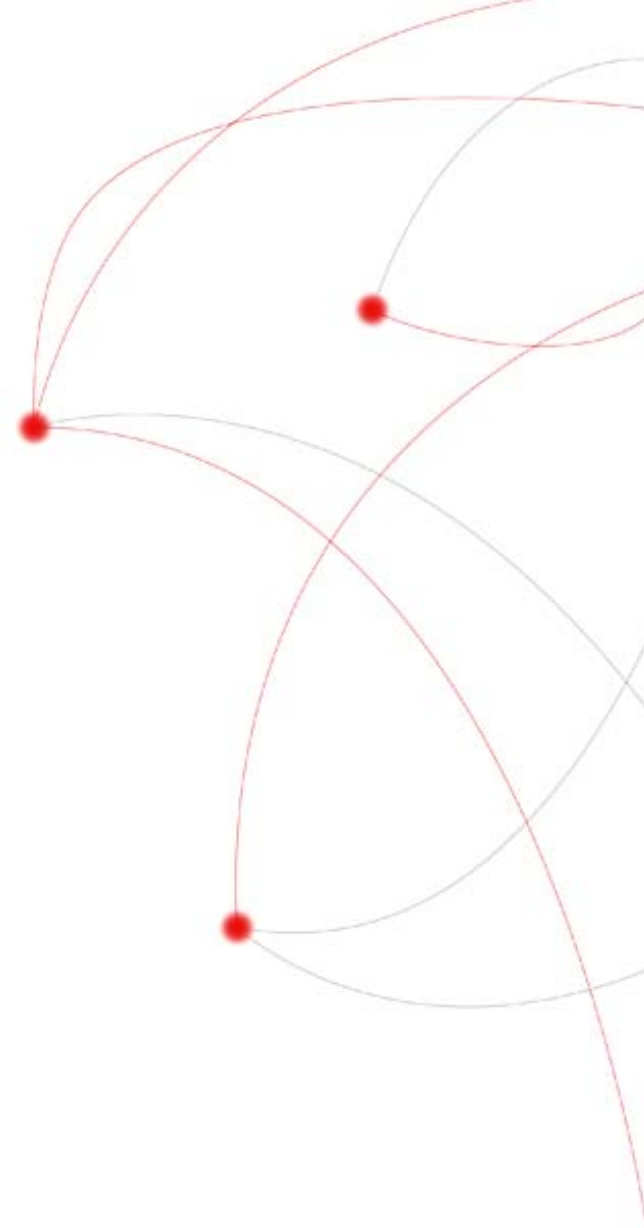
Reti di Trasporto ottico: criteri di progetto ed esempi realizzativi

Piergiorgio Pagnan,

Transport & OPB Innovation

Marco Quagliotti, Marco Schiano

Transport & OPB Innovation





Sommario

Architetture delle reti di trasporto

La rete Phoenix

Il nuovo backbone fotonico

Ambito delle reti di trasporto

- ▶ **Reti concepite per il trasporto ad alta capacità (Tbit/s) su lunga distanza ($\sim 10^3$ km)**
- ▶ **Reti a circuito (possono costituire lo strato “server” di reti a pacchetto, ad es. IP)**
- ▶ **Generalmente classificate in 2 segmenti:**
 - ▶ **Backbone (estensione nazionale o continentale)**
 - ▶ **Metro-Regionale (estensione metropolitana o regionale)**

Organizzazione funzionale di una rete backbone, ASON: Automatically Switched Optical Network

Piano di Gestione

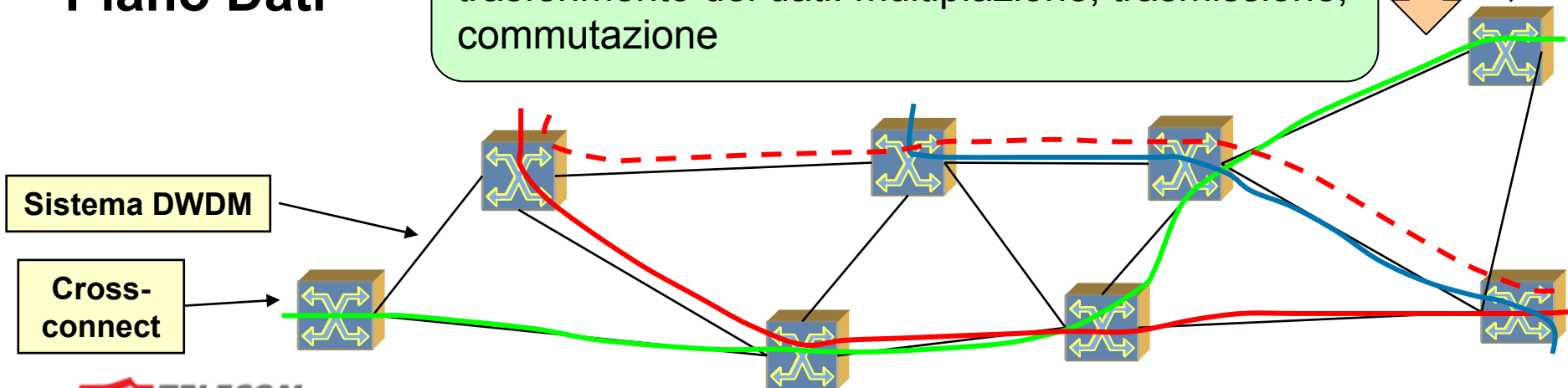
Sistema informativo dedicato a:
configurazione manuale dei circuiti e delle protezioni,
performance Monitoring, gestione degli allarmi ...

Piano di Controllo

Sistema informativo dedicato a:
configurazione automatica dei circuiti e delle protezioni,
dedicate o condivise (restoration), network discovery, ...

Piano Dati

Insieme dei sistemi dedicati alle funzioni di
trasferimento dei dati: moltiplicazione, trasmissione,
commutazione



Funzioni del piano di controllo

▶ **Routing:**

- ▶ **Calcolo del percorso ottimale dei circuiti in rete sulla base di criteri semplici (minima distanza) o più elaborati (traffic Engineering). Protocolli standard GMPLS: OSPF-TE, RFC3630 [1]**

▶ **Signaling:**

- ▶ **Attivazione delle cross-connessioni che consentono di realizzare i circuiti. Protocolli standard GMPLS : RSVP-TE, RFC3209 [2]**

▶ **Discovery:**

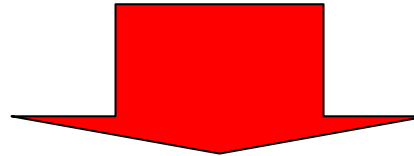
- ▶ **Riconoscimento automatico di nuovo nodi o nuove risorse inserite in rete. Protocolli standard GMPLS : LMP, RFC4209 [3]**

Progettazione di Reti di Trasporto

Esigenze di traffico
(matrice di traffico)

Infrastrutture
esistenti
(cavi, centrali)

Tecnologie
(trasmissione,
multiplicazione,
commutazione)



Grafo di rete
(nodi e link)

Instradamenti
del traffico
(percorsi working e
protection)

Equipaggiamento
di nodi e link

Altre caratteristiche
di rete: scalabilità,
rob. guasti multipli,
costi, affidabilità...

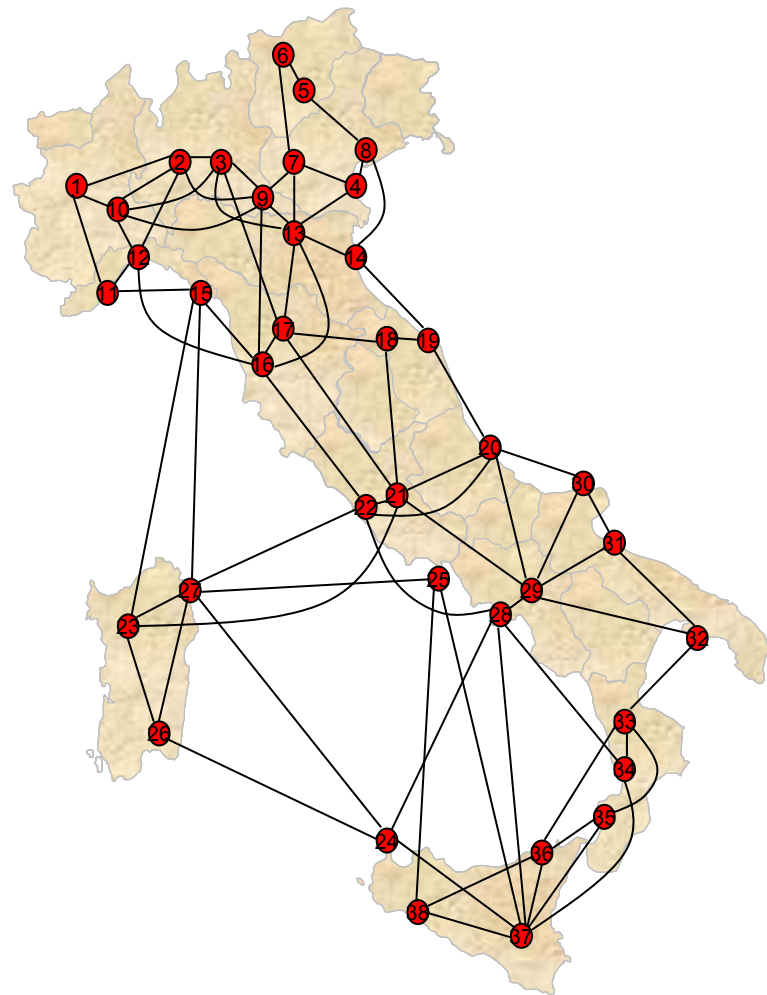
Esempio di matrice di traffico

Sede A	Sede Z	Tipo di circuito	Protezione
Alessandria	Roma	STM-64	Non protetto
Alessandria	Milano	STM-64	Non protetto
Ancona	Roma	GE	Protezione 1+1
Ancona	Torino	STM-64	Restoration “on the fly”
Bologna	Milano	STM-64	Non protetto
Bolzano	Milano	STM-256	Protezione 1+1
Cagliari	Roma	STM-64	Non protetto
Catania	Milano	STM-256	Restoration “Pre-planned”
Catanzaro	Bari	GE	Protezione 1+1

Esempio di grafo di rete

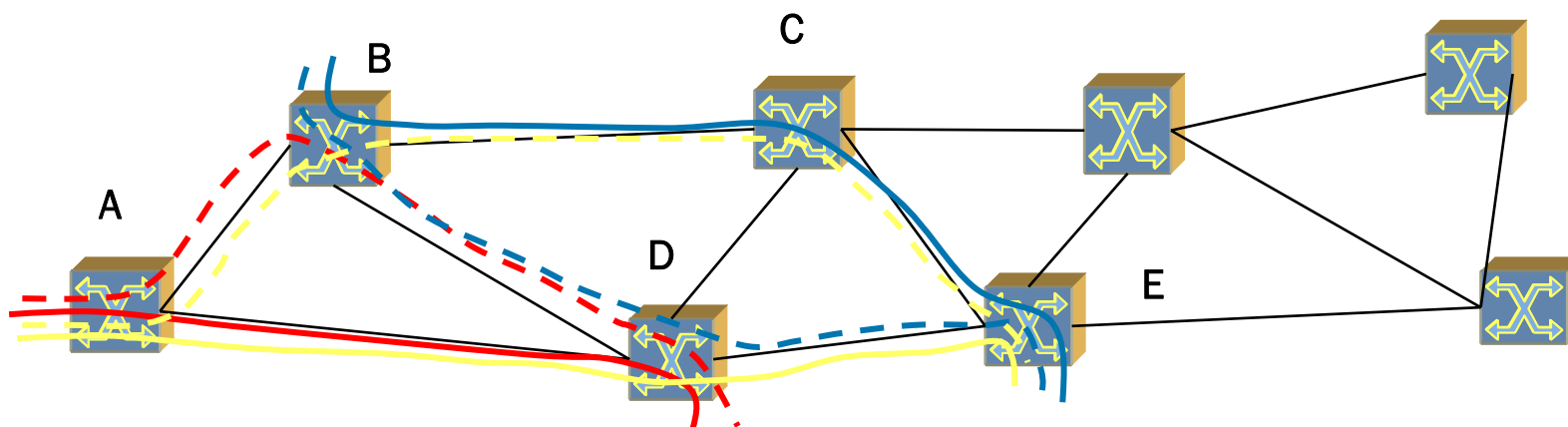
- ▶ Il grafo spesso è assegnato e dipende da vincoli infrastrutturali o di disponibilità di risorse già installate
- ▶ Il grafo si può ridurre manualmente per tentativi oppure utilizzando algoritmi di ottimizzazione
 - ▶ Tecniche esatte (ILP - Integer linear programming): assicurano il ritrovamento di un ottimo assoluto
 - ▶ Tecniche euristiche (tabu search, algoritmi genetici, simulated annealing e altri): per tentativi ed errori si determina una soluzione sub-ottima
- ▶ **Caratteristiche fondamentali del grafo:**
 - ▶ Numero di nodi e link
 - ▶ Grado nodale
 - ▶ Diametro di rete
 - ▶ Numero massimo di hop

Grafo dei cavi di partenza per la ricerca di una topologia sub-ottima



Risorse di protezione dedicate o condivise

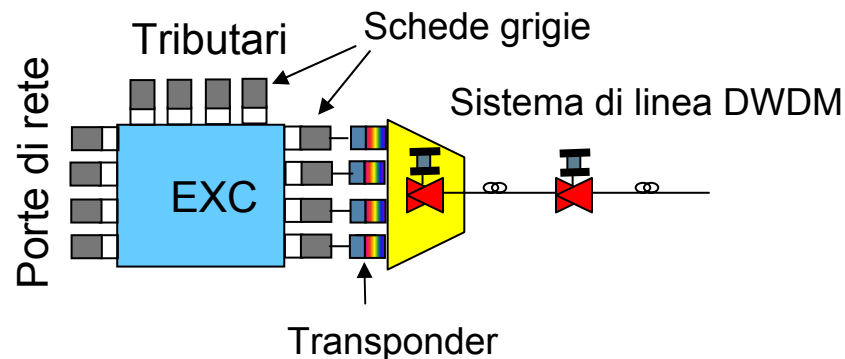
- ▶ Nella protezione dedicata si configura un circuito di protezione su percorso disgiunto completamente dedicato ad un singolo circuito “working”
- ▶ Quando la rete è magliata, si può decidere di condividere le risorse di protezione, cioè allocare una singola risorsa per la protezione di più circuiti
- ▶ Si parla allora di circuiti protetti con “Restoration” che può essere di 2 tipi:
 - ▶ Prepianificata: il circuito di protezione è condiviso ma è calcolato in anticipo;
 - ▶ “On the fly”: il circuito di protezione è calcolato in tempo reale al momento del guasto



Tecnologie: reti opache e reti traslucide

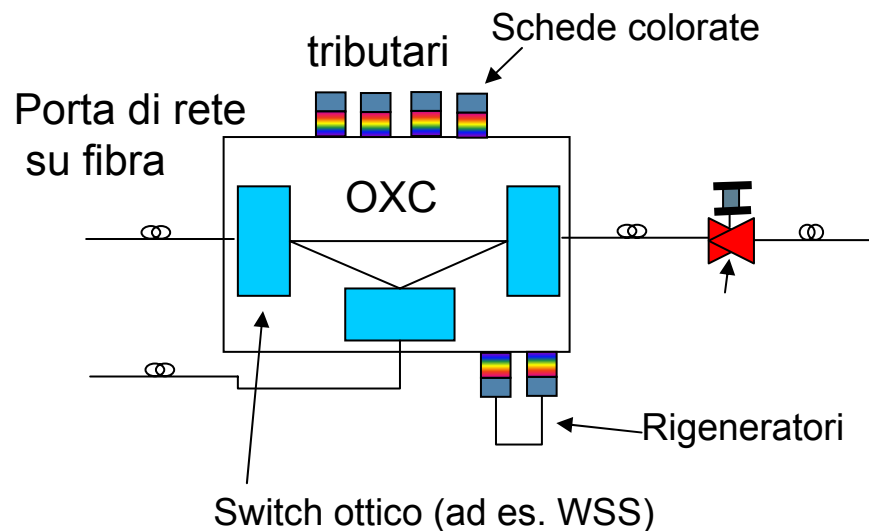
▶ Rete opaca, ad esempio SDH o OTN

- ▶ Conversione elettro-ottica su ogni interfaccia tributarie e di rete
- ▶ Commutatori EXC (matrice elettrica)
- ▶ Progetto ottico semplice, ma con molti transponder



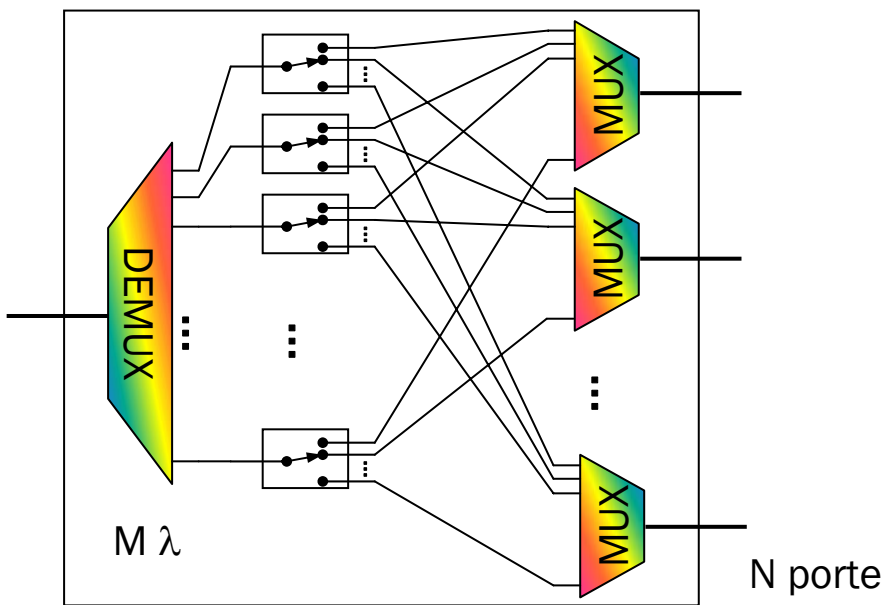
▶ Rete traslucida (al limite trasparente)

- ▶ Connessioni instradate in trasparenza ottica senza conversioni (se possibile)
- ▶ Nodi trasparenti OXC o ROADM
- ▶ Progetto ottico più delicato per assicurare continuità e basso degrado del segnale su tutto il percorso E2E (OSNR, PMD, CD, ...)



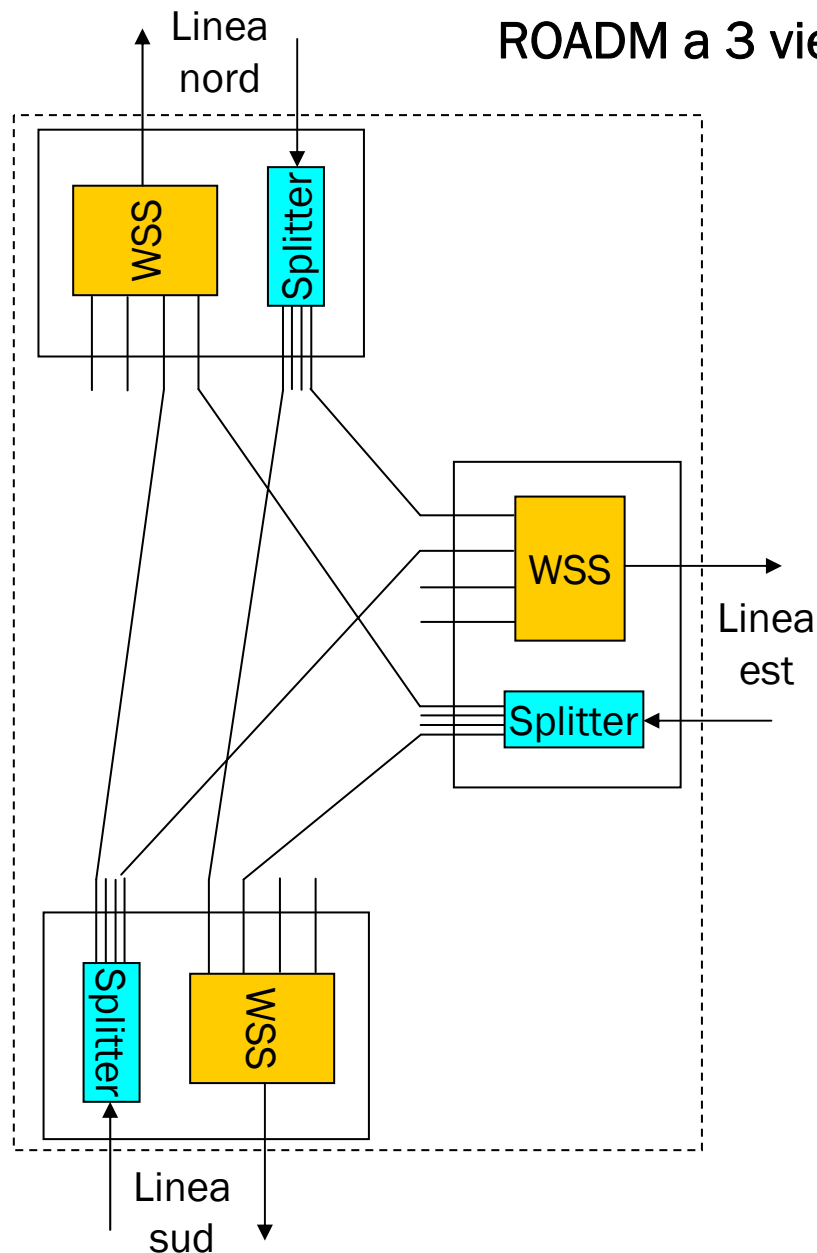
WSS e nodi ROADM

Schema funzionale di un WSS

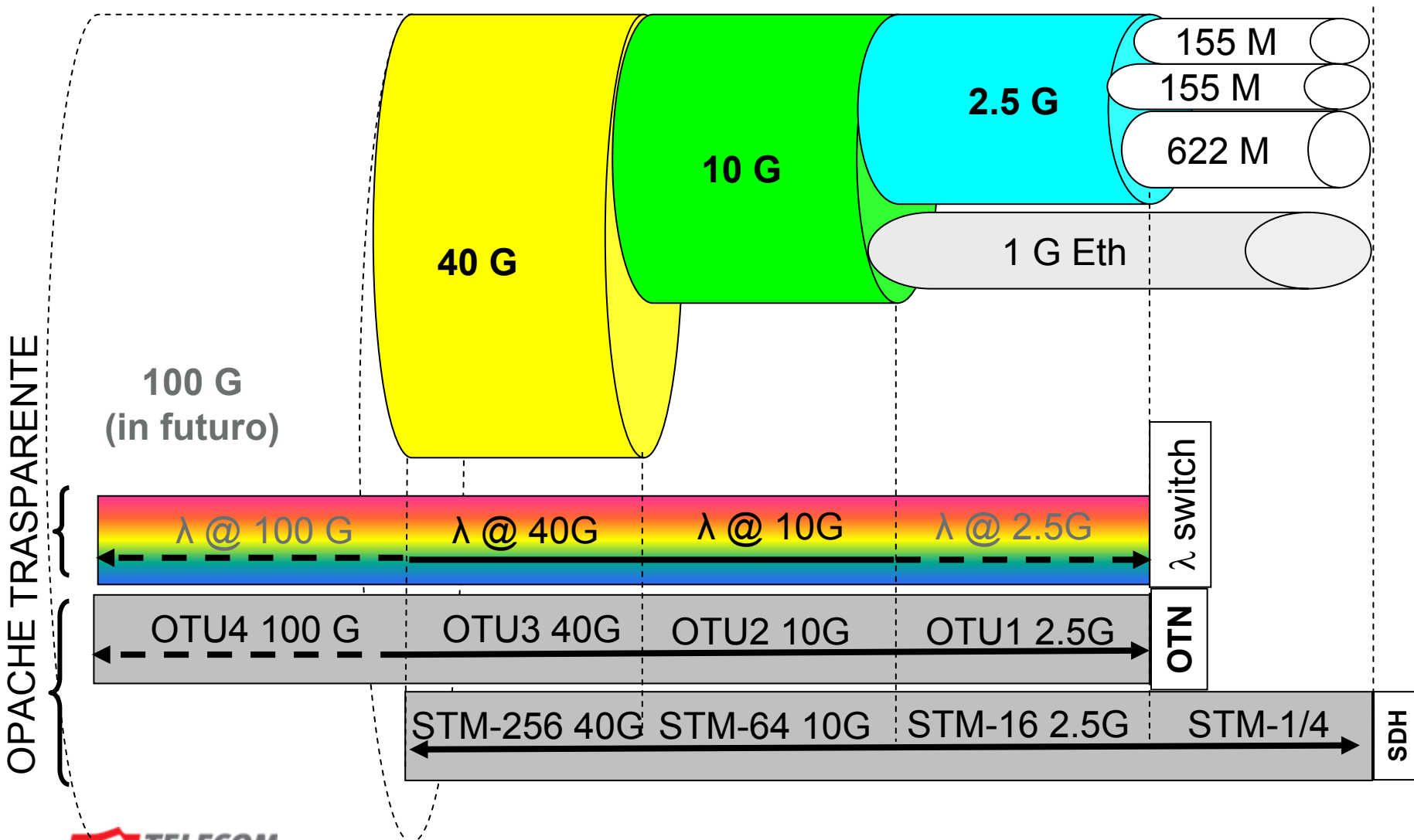


WSS $M \lambda$, $1 \times N$ porte

Schema nodo ROADM a 3 vie

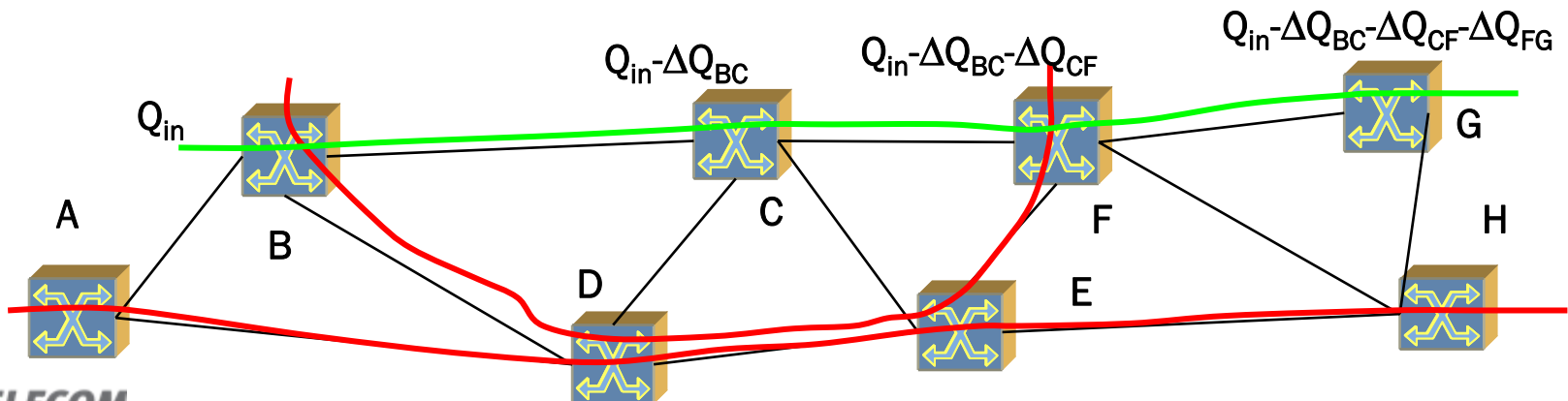


Gerarchia di multiplazione nelle reti di trasporto



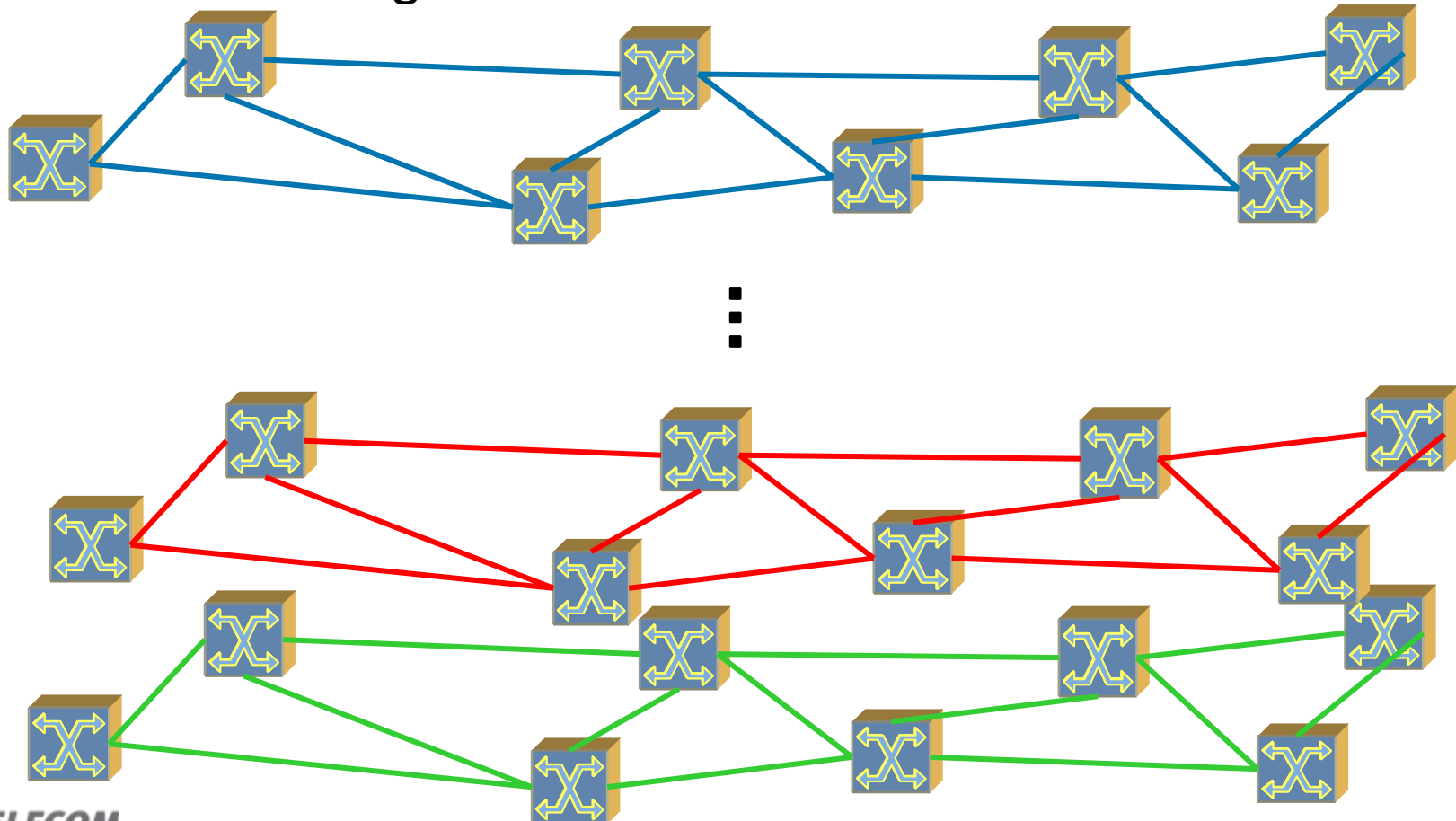
Routing delle domande di traffico

- ▶ In genere è del tipo Shortest Path, minimizzando una metrica assegnata: peso amministrativo, numero hop, distanza
- ▶ Deve tener conto delle esigenze di resilience (protezione dedicata o condivisa), in relazioni a guasti singoli o multipli di link o nodo
- ▶ Nel caso opaco è più semplice, routing e dimensionamento disaccoppiati: prima si instradano i circuiti, poi si dimensionano le tratte e i nodi)
- ▶ Nel caso trasparente il problema è complicato dal requisito di continuità della lunghezza d'onda e dal limiti trasmissivi e il problema va risolto nel suo insieme: IA-RWARP Impairment Aware – Routing, Wavelength Assignment and Regenerator Placement



RWA

- ▶ **Suddivisione della rete in N reti a singola lunghezza d'onda**
- ▶ **Routing in una singola rete se possibile, altrimenti passaggio in un'altra rete tramite convertitori di lunghezza d'onda**



Impairment Aware RWA: fattore Q

$$BER = \frac{\text{bit errati}}{\text{bit trasmessi}}$$

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right)$$

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0}$$

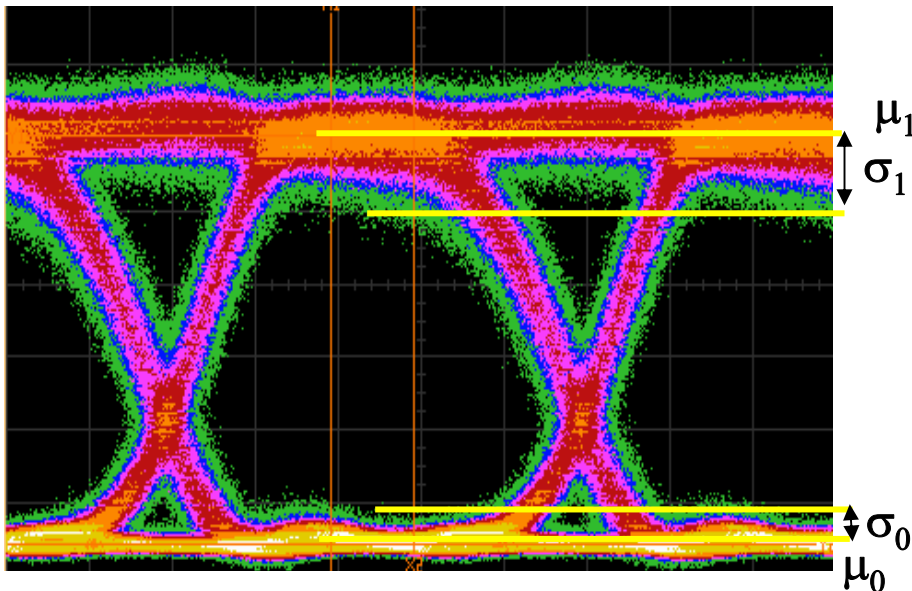
Bit Error Rate (BER): probabilità di errore in ricezione di un simbolo trasmesso

Fattore di qualità Q di Personik legato al Bit Error Rate (BER).

Es. $Q=7 \longleftrightarrow Ber=10^{-12}$

μ_1 (μ_0) : livello medio del bit uno (zero)

σ_1 (σ_0) : relativa deviazione standard



- ▶ **Effetti non lineari, dispersione, rumore degli amplificatori ottici, ecc.. sommandosi al rumore termico e di tipo shot del ricevitore, alterano m e s**
- ▶ **L'impatto sulla qualità del collegamento è dunque direttamente collegabile ad una penalità su Q**

Impairment Aware RWA: evoluzione del fattore Q

- ▶ **Evoluzione di Q lungo il collegamento:**

$$Q_{fin} = Q_{OSNR} - \Delta Q_{CD} - \Delta Q_{PMD} - \Delta Q_{NL}$$

- ▶ **Nota il tipo di fibra (D, γ), per ogni valore di ΔQ_{NL} vale la relazione:**

$$P_{ch} N_{sezioni} = \text{const}$$

- ▶ **Più in dettaglio:**

$$P_{ch} N_{sezioni} \gamma = aD + b$$

- ▶ **I coefficienti a e b sono determinati con simulazioni numeriche**

Esempio di output degli strumenti di dimensionamento

Connection type	10 G	2.5 G	Lambda 10 G	Protected	Non Prot.
Quantity	442	59	467	34	433

Route	Num hop min	Num hop average	Num hop max	Len min Km	Len average Km	Len max Km
Working	1	1.8	5	23	778	1800
Back-up	2	3.1	5	311	909	2094

Link	nodo	nodo	lambda @ 10 G	Systems @ 80 Lambdas (design)	Systems @ 80 Lambdas (75 % max)
BOP_MIM	BOP	MIM	91	2	2
BOP_RMI	BOP	RMI	88	2	2
TOR_MIB	TOR	MIB	77	1	2
TOR_RMS	TOR	RMS	76	1	2
PAR_CAT	PAR	CAT	55	1	1
CAT_MAZ	CAT	MAZ	54	1	1
PAR_MAZ	PAR	MAZ	54	1	1
MIM_PDS	MIM	PDS	53	1	1
RMI_NOL	RMI	NOL	53	1	1
BOP_PDS	BOP	PDS	51	1	1
BOP_ANC	BOP	ANC	49	1	1
NOL_CAT	NOL	CAT	49	1	1
PES_CAT	PES	CAT	48	1	1
RMS_PES	RMS	PES	48	1	1
ANC_RMI	ANC	RMI	47	1	1
NAP_RMS	NAP	RMS	45	1	1
NAP_PAR	NAP	PAR	43	1	1
RMS_RMI	RMS	RMI	26	1	1
MIM_MIB_2	MIM	MIB_2	19	1	1
ANC_PES	ANC	PES	6	1	1
MIM_MIB_1	MIM	MIB_1	4	1	1
NAP_NOL	NAP	NOL	4	1	1

1040	24	26
------	----	----

Sommario

Architetture delle reti di trasporto

La rete Phoenix

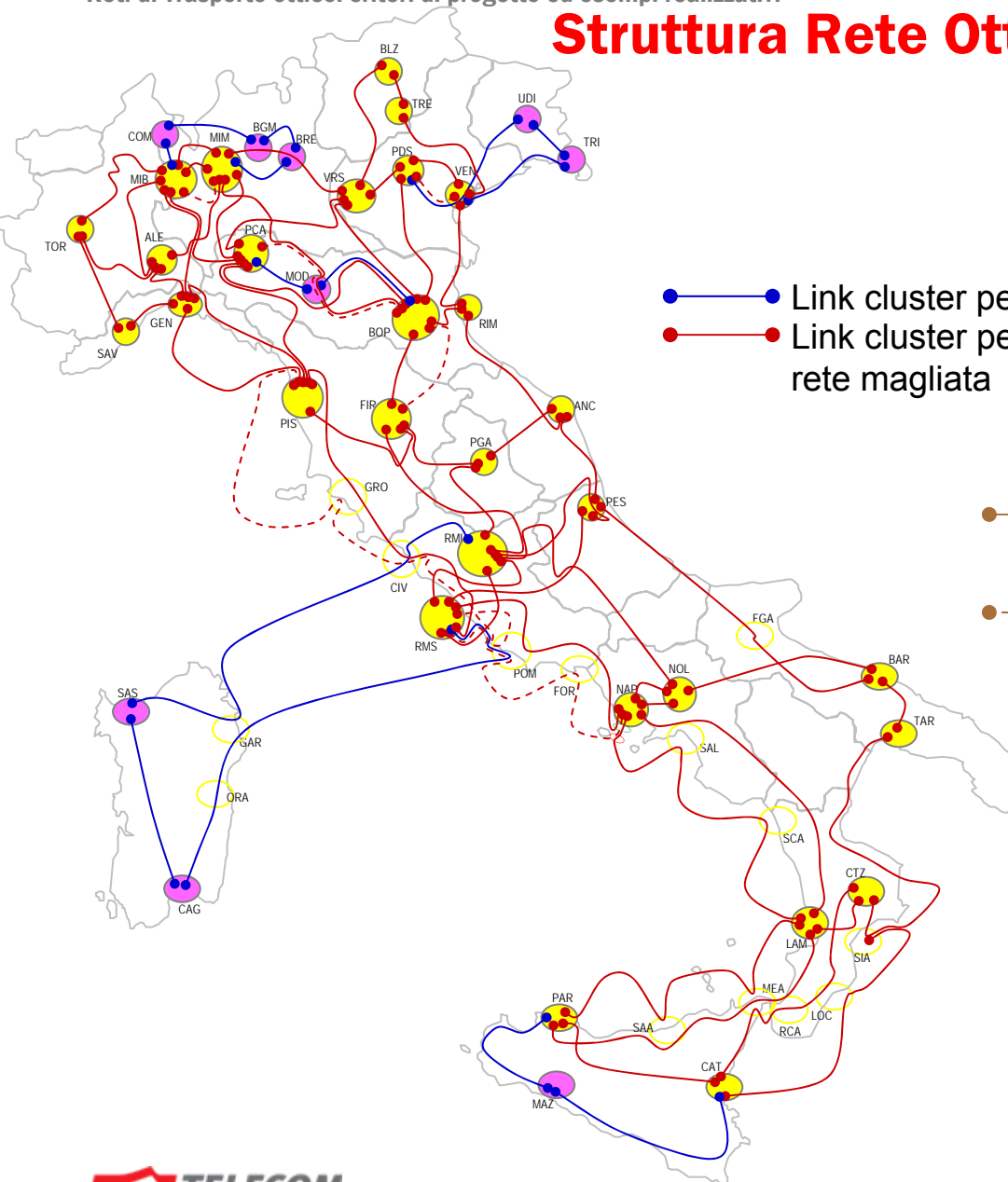
Il nuovo backbone fotonico

Caratteristiche generali

- ▶ **Phoenix è una ASON basata su cross-connect ad alta capacità (80 - 960 Gbit/s) con matrici elettriche, connessi tra di loro mediante sistemi DWDM**
- ▶ **Ciascun cross-connect è equipaggiato con due controllori con capacità elaborativa sufficiente a gestire protocolli di routing e segnalazione (control plane) per implementare meccanismi di Fast Restoration**
- ▶ **Il routing è centralizzato (ASTN-M) mentre la segnalazione è distribuita: il piano di controllo è quindi semi-distribuito. I protocolli sono quelli tipici delle reti IP MPLS (OSPF-TE, RSVP-TE) adattati ai contesti trasmissivi**
- ▶ **Trasporta flussi da 155 Mbit/s a 10 Gbit/s**
- ▶ **Restoration *end-to-end pre plannad* per il primo guasto (80-250 ms)**
- ▶ **Restoration *end-to-end on the fly* per guasti successivi al primo (40-50 s)**

Struttura Rete Ottica Phoenix

**struttura di rete a 38
nodi sede di ODXC**



● — ● Link cluster per raccordo
● — ● Link cluster per rete magliata

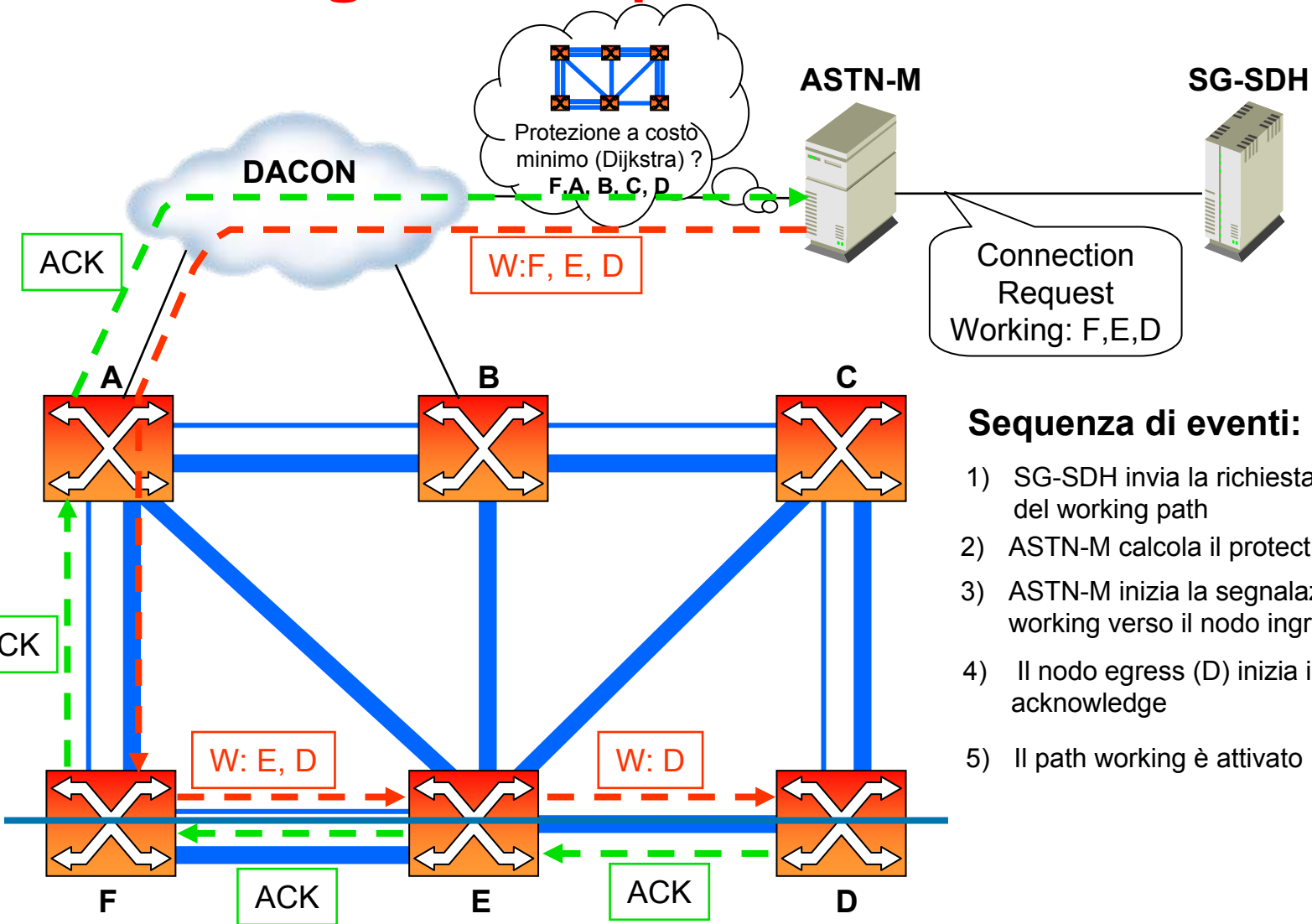
● — ● Direttrici di evoluzione infrastrutturale
● - - - ● Direttrici di evoluzione dimensionale

● Nodi sulla maglia sede di MSH2K
● Nodi sui raccordi sede di MSH2K
● Nodi intermedi sulla maglia

Alcuni esempi di funzionamento

- ▶ **Il provisioning**
- ▶ **Il ripristino (primo guasto e secondo guasto)**

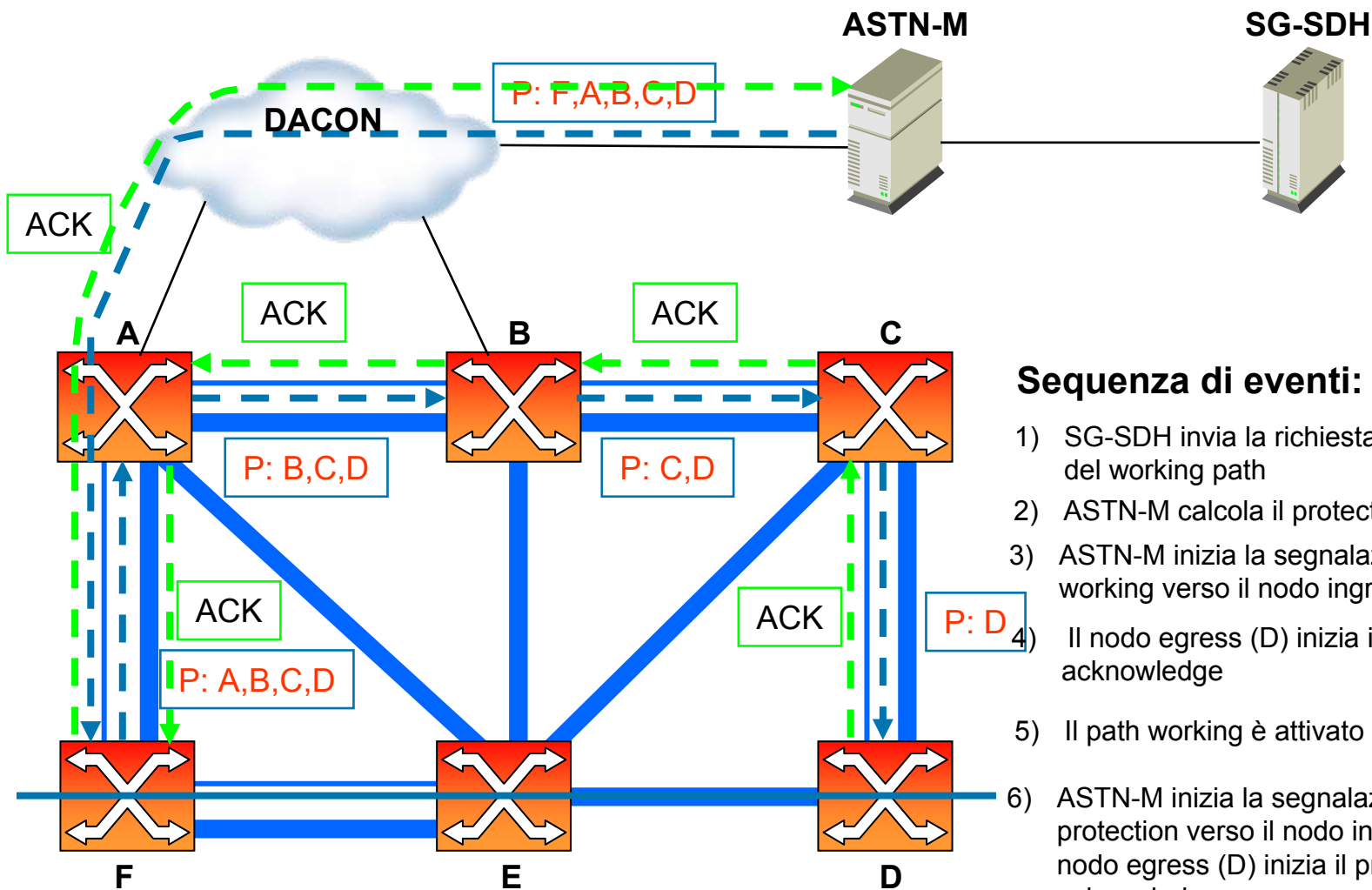
Provisioning di un VC4 path restored



Sequenza di eventi:

- 1) SG-SDH invia la richiesta di attivazione del working path
- 2) ASTN-M calcola il protection path
- 3) ASTN-M inizia la segnalazione del path working verso il nodo ingress (F).
- 4) Il nodo egress (D) inizia il processo di acknowledge
- 5) Il path working è attivato

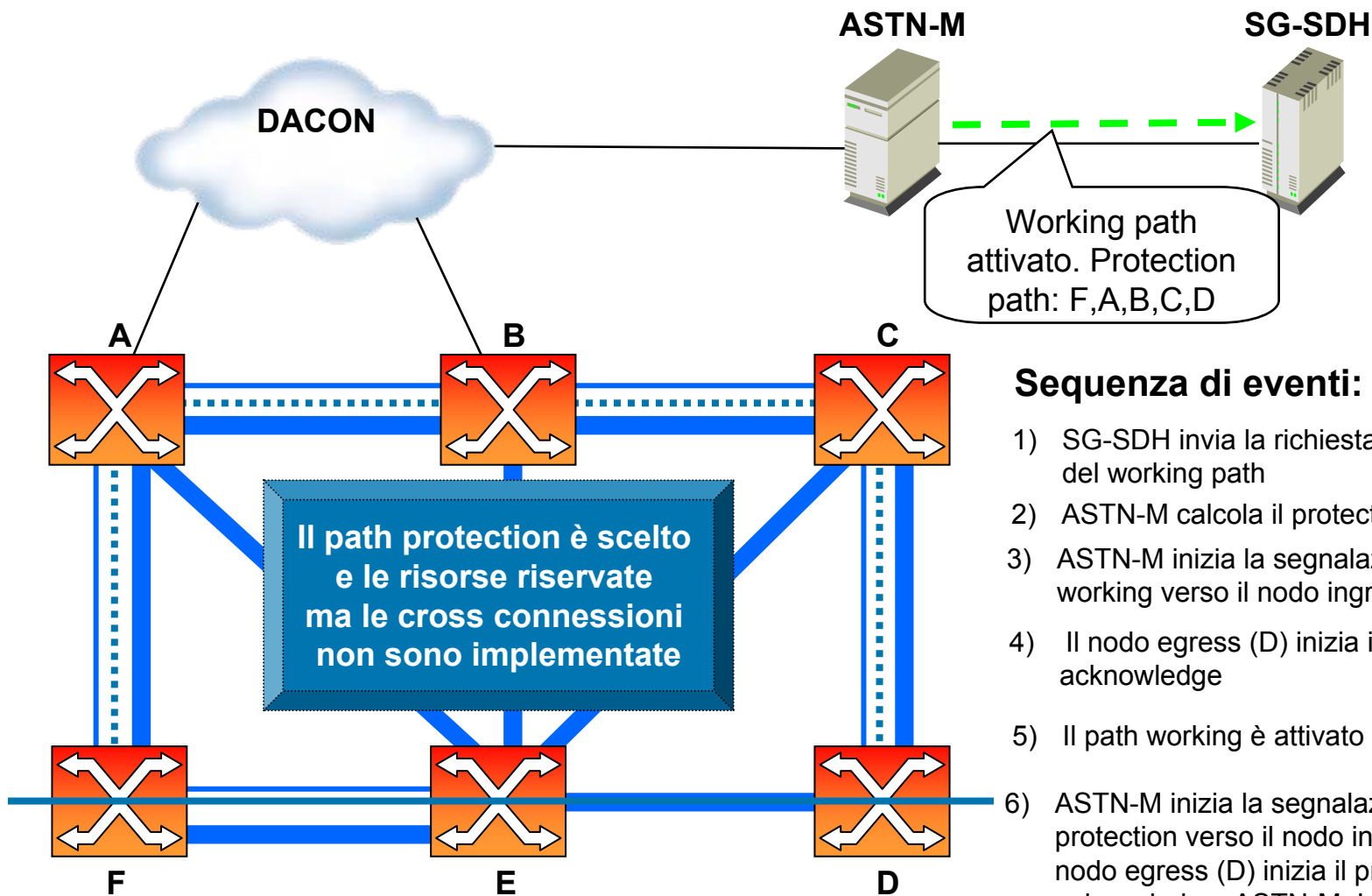
Provisioning di un VC4 path restored



Sequenza di eventi:

- 1) SG-SDH invia la richiesta di attivazione del working path
- 2) ASTN-M calcola il protection path
- 3) ASTN-M inizia la segnalazione del path working verso il nodo ingress (F).
- 4) Il nodo egress (D) inizia il processo di acknowledge
- 5) Il path working è attivato
- 6) ASTN-M inizia la segnalazione del path protection verso il nodo ingress (F). Il nodo egress (D) inizia il processo di acknowledge

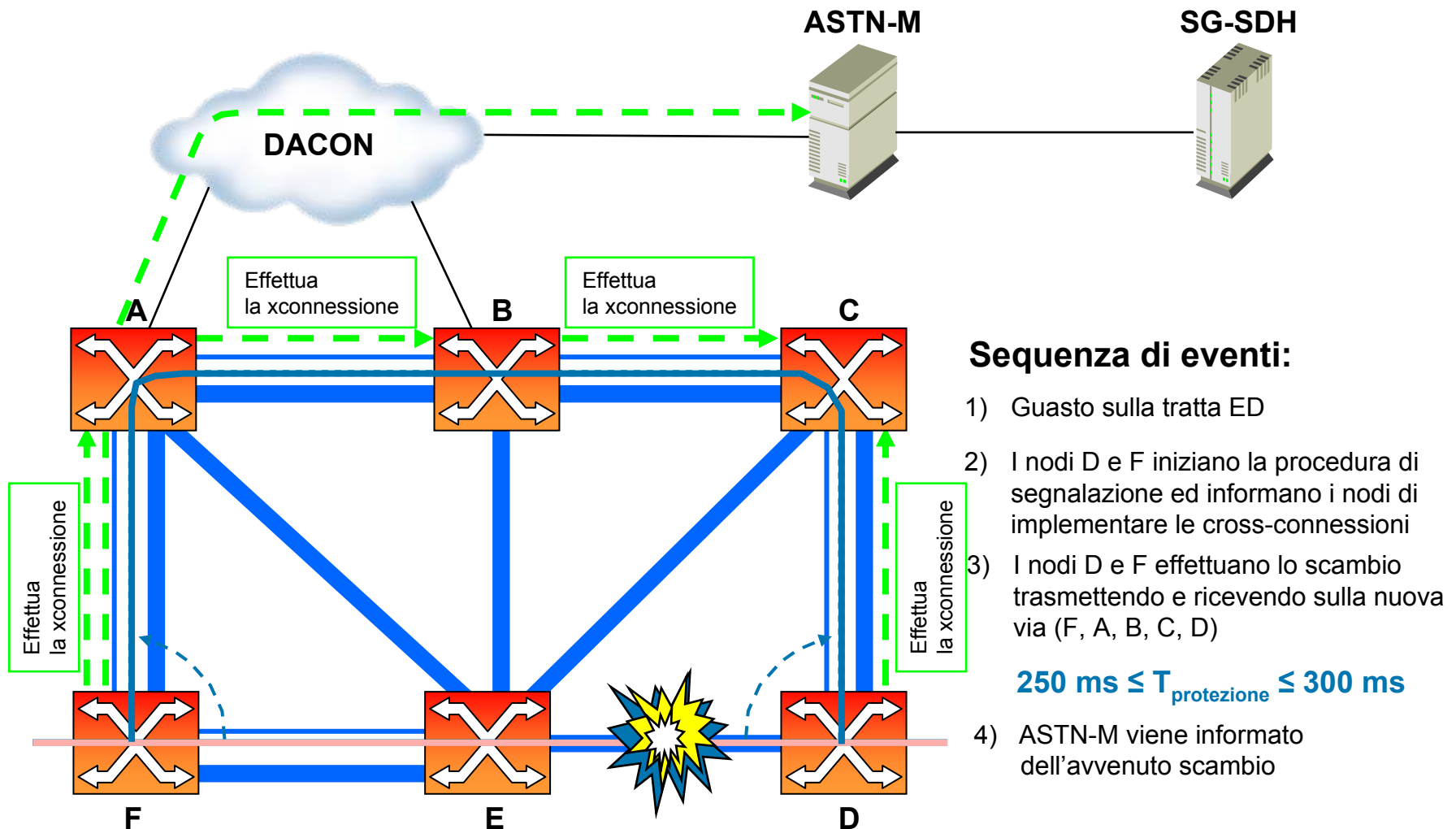
Provisioning di un VC4 path restored



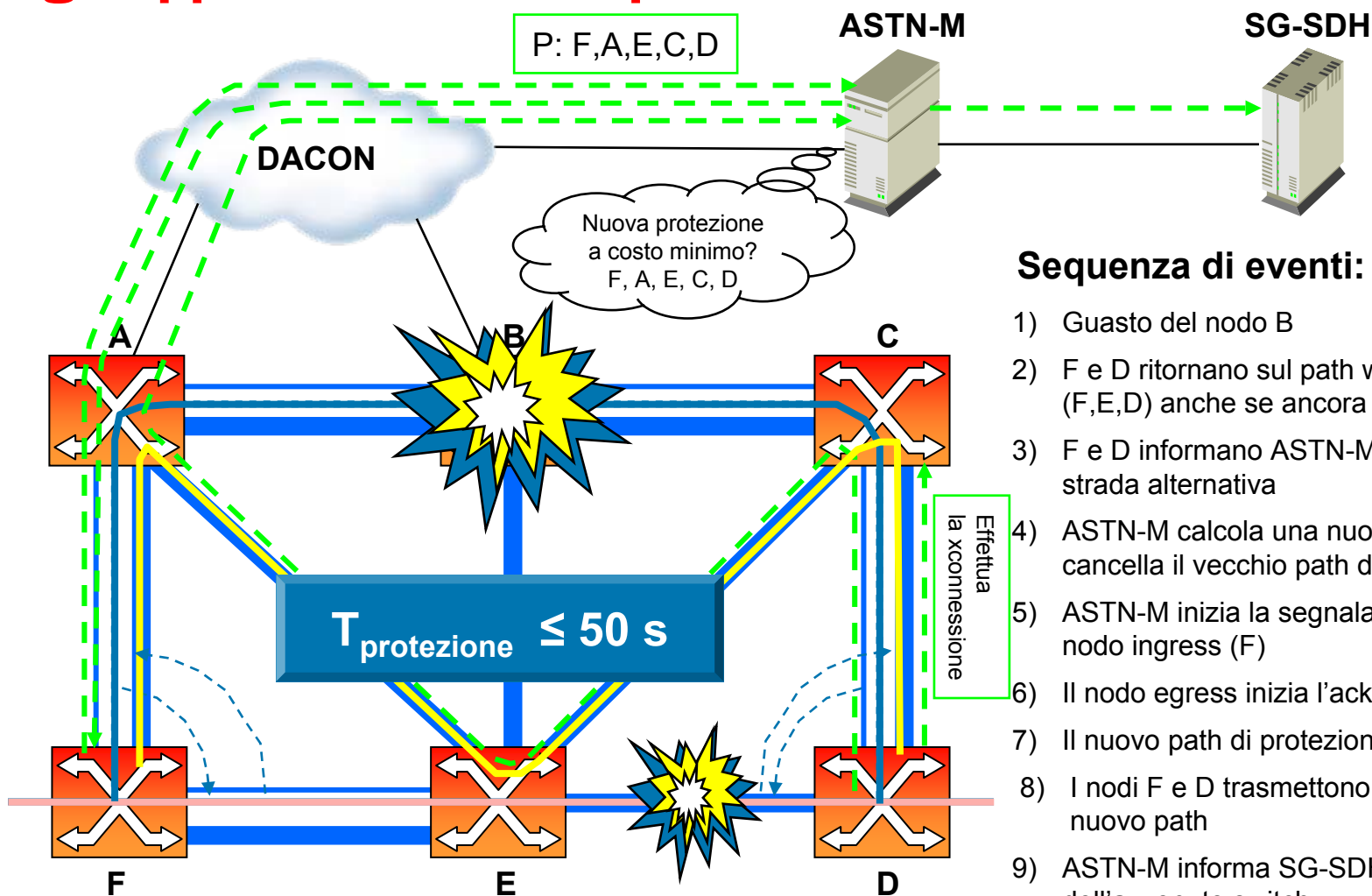
Sequenza di eventi:

- 1) SG-SDH invia la richiesta di attivazione del working path
- 2) ASTN-M calcola il protection path
- 3) ASTN-M inizia la segnalazione del path working verso il nodo ingress (F).
- 4) Il nodo egress (D) inizia il processo di acknowledge
- 5) Il path working è attivato
- 6) ASTN-M inizia la segnalazione del path protection verso il nodo ingress (F). Il nodo egress (D) inizia il processo di acknowledge. ASTN-M Informa SG-SDH

Primo guasto, gli apparati: “sappiamo cosa fare!”



Secondo guasto e successivi, gli apparati: “ASTN-M pensaci tu!”



Sequenza di eventi:

- 1) Guasto del nodo B
- 2) F e D ritornano sul path working (F,E,D) anche se ancora fuori servizio
- 3) F e D informano ASTN-M che serve un strada alternativa
- 4) ASTN-M calcola una nuova via e cancella il vecchio path di protezione
- 5) ASTN-M inizia la segnalazione verso il nodo ingress (F)
- 6) Il nodo egress inizia l'acknowledge
- 7) Il nuovo path di protezione è attivo
- 8) I nodi F e D trasmettono e ricevono sul nuovo path
- 9) ASTN-M informa SG-SDH dell'avvenuto switch

Comportamento della rete

- ▶ **Phoenix esegue quotidianamente con successo operazioni di protezione sia in caso di lavori programmati sia in caso di guasti. Inoltre opera continue riottimizzazioni delle vie dedicate alle protezioni (riduzione della lunghezza)**
- ▶ **Stima operazioni di protezione nel 2005: più di 11000**
 - ▶ **Numero di scambi forzati *working - protection* per l'esecuzione dei lavori programmati: 1374**
 - ▶ **Numero di scambi *working - protection* per eventi di guasto o malfunzionamento (stima): 4000**
 - ▶ **Numero di ricalcoli della via di *protection* per eventi di guasto, malfunzionamento o riottimizzazione (stima): 6000**

Sommario

Architetture delle reti di trasporto

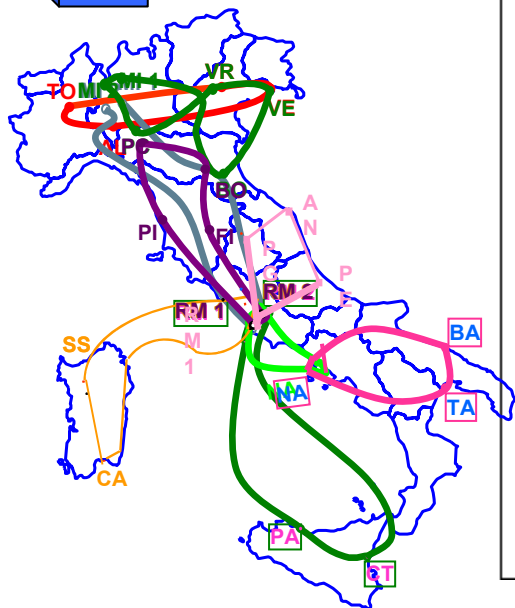
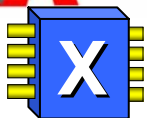
La rete Phoenix

Il nuovo backbone fotonico

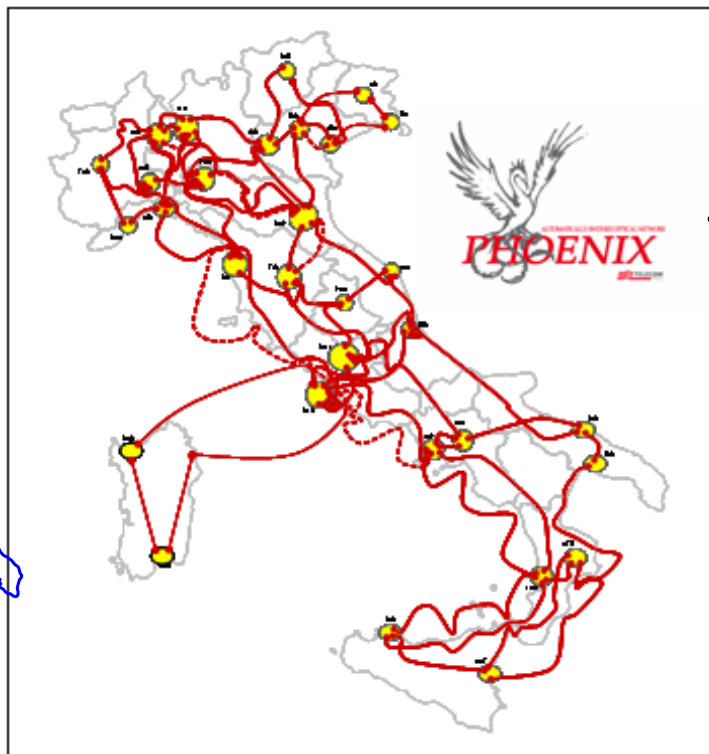
Perché un nuovo Backbone fotonico?

- ▶ **Per soddisfare la crescente domanda di traffico**
 - ▶ **Delle reti domestiche (specialmente il backbone IP)**
 - ▶ **Delle reti internazionali**
 - ▶ **Del mercato emergente delle circuiti ottici “wholesale”**
- ▶ **Per ridurre i costi (investimenti e costi operativi)**
- ▶ **Per migliorare l’affidabilità dei servizi “pregiati”**
- ▶ **Per riorganizzare la rete di trasporto in una singola piattaforma facilmente gestibile, dismettendo i sistemi DWDM punto-punto attuali**

Le reti "client" domestiche

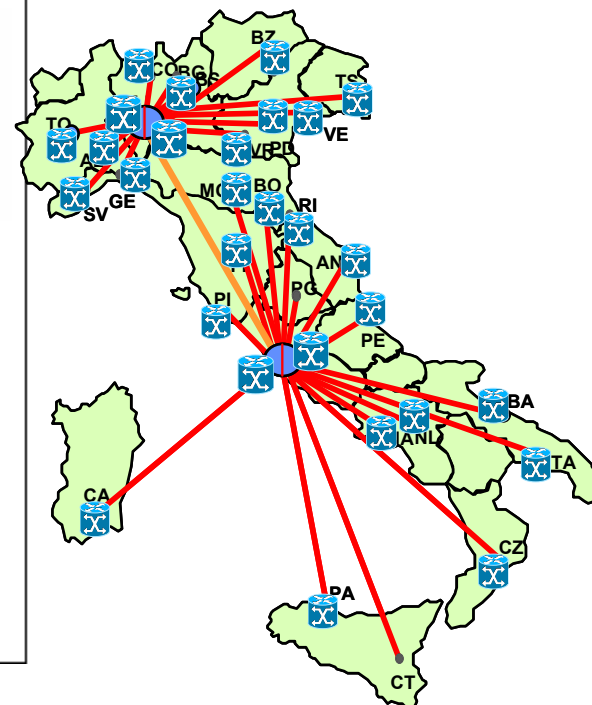


- ▶ Anelli SDH a 2.5 Gbit/s
- ▶ Servizi VC4 strutturati
- ▶ Affidabilità eccellente (MS-SPRing)



- ▶ Rete ASON magliata
- ▶ Cross-connect SDH e link DWDM
- ▶ Control Plane, routing centralizzato

Architettura del backbone IP OPB: Optical Packet Backbone



- ▶ CRS 1 Tera-routers nel core
- ▶ Interfacce POS a 10 Gbit/s per tutti i link
- ▶ Interfacce POS a 40 Gbit/s nel core

Trasporto Sud-Nord del traffico internazionale



▶ Il traffico proveniente dal medio e lontano oriente è convogliato in Sicilia da sistemi sottomarini

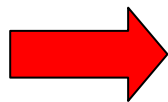
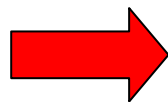
▶ Deve essere instradato a Milano dove sono dislocati i POP della rete Pan-Europea di Telecom Italia Sparkle

Opportunità offerte dalle nuove tecnologie fotoniche

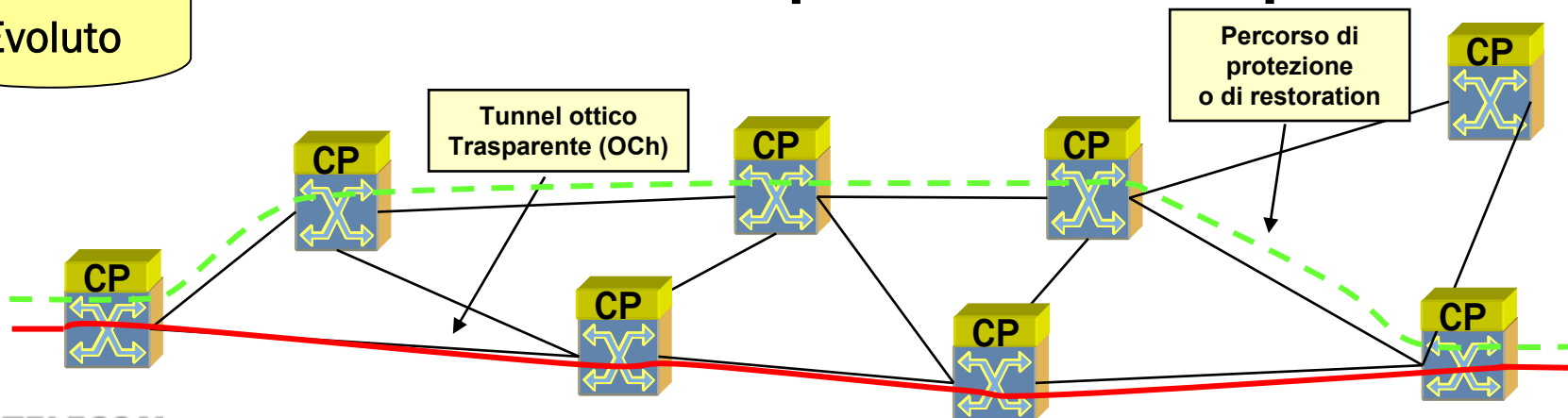
Ultra Long-Haul
DWDM

Multi-degree
ROADM

Control Plane
GMPLS
Evoluto



- ▶ **Minor numero di rigeneratori**
- ▶ **Risparmio negli investimenti**
- ▶ **“Provisioning” end-to-end**
- ▶ **Protezione e restoration di OCh**
- ▶ **Risparmio nei costi operativi**



Struttura del nuovo Backbone fotonico

Schema preliminare Del nuovo backbone



- ▶ **Diametro di rete: 2400-3100 km (working-protection)**
- ▶ **Massimo numero di hop: 11**
- ▶ **Grado nodale: 2÷5 (media 3.1)**

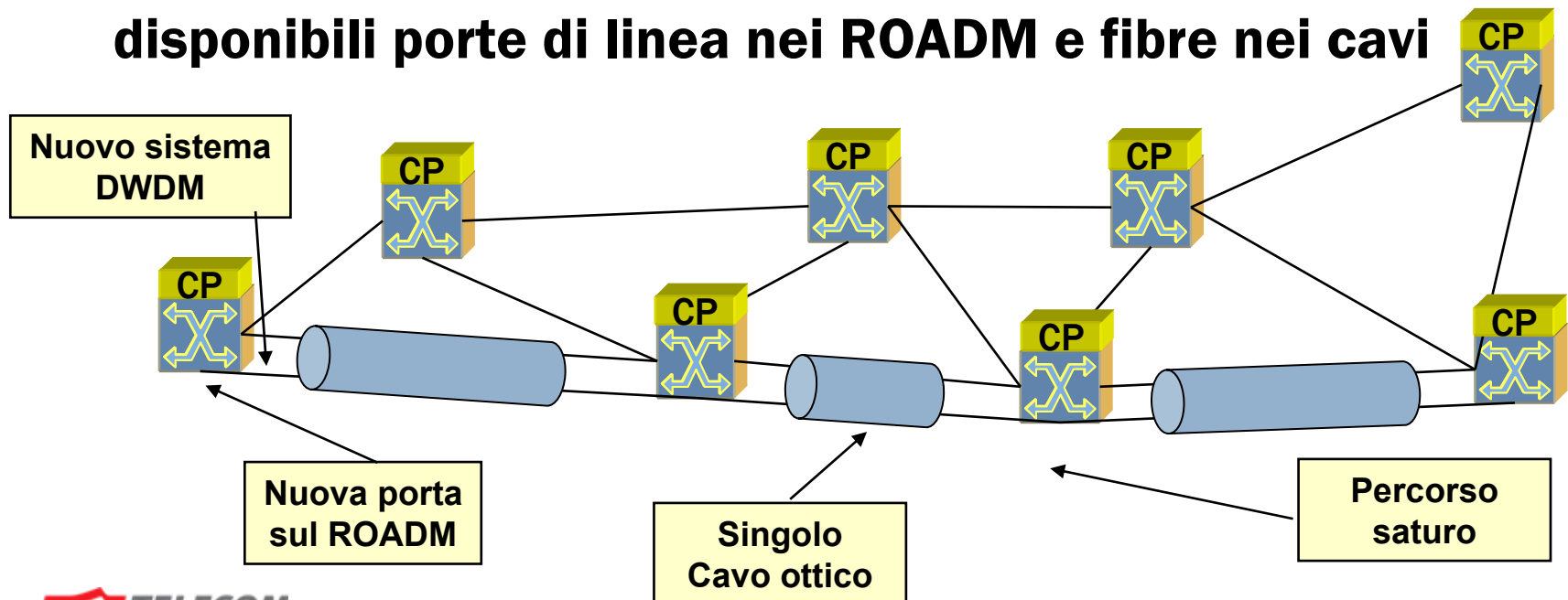
- ▶ **Tecnologia:**
- ▶ **~40 nodi a commutazione di λ basati su ROADM**
- ▶ **~60 sistemi DWDM ULH con 80 lambda**
- ▶ **Fibre G.655 e G.652**
- ▶ **Canali ottici (OCh) a 10 e 40 Gbit/s**
- ▶ **Pronto per trasmissione a 100 G**

Dimensionamento preliminare della rete

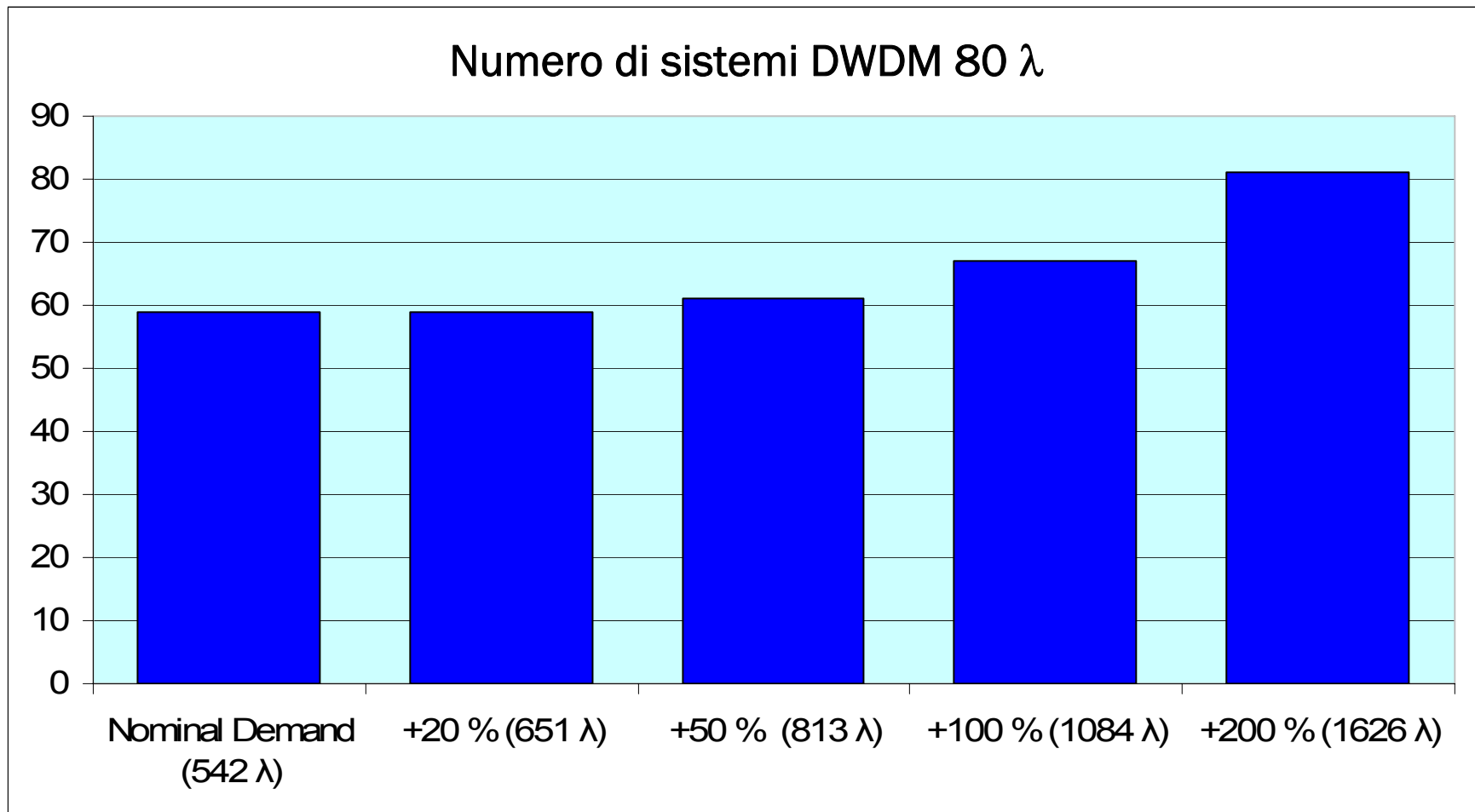
- ▶ **Stima delle esigenze di traffico fino al 2011:**
 - ▶ **542 canali ottici (misti 10 e 40 Gbit/s)**
 - ▶ **~ 100 canali ottici per la protezione del traffico**
 - ▶ **Massimo numero di hop: 9**
 - ▶ **Lunghezza massima dei canali ottici: ~ 1600 km**
 - ▶ **Traffico totale in rete: 6 Tbit/s**
- ▶ **Nessun problema di congestione di λ almeno fino al 2011**

Analisi di scalabilità della rete

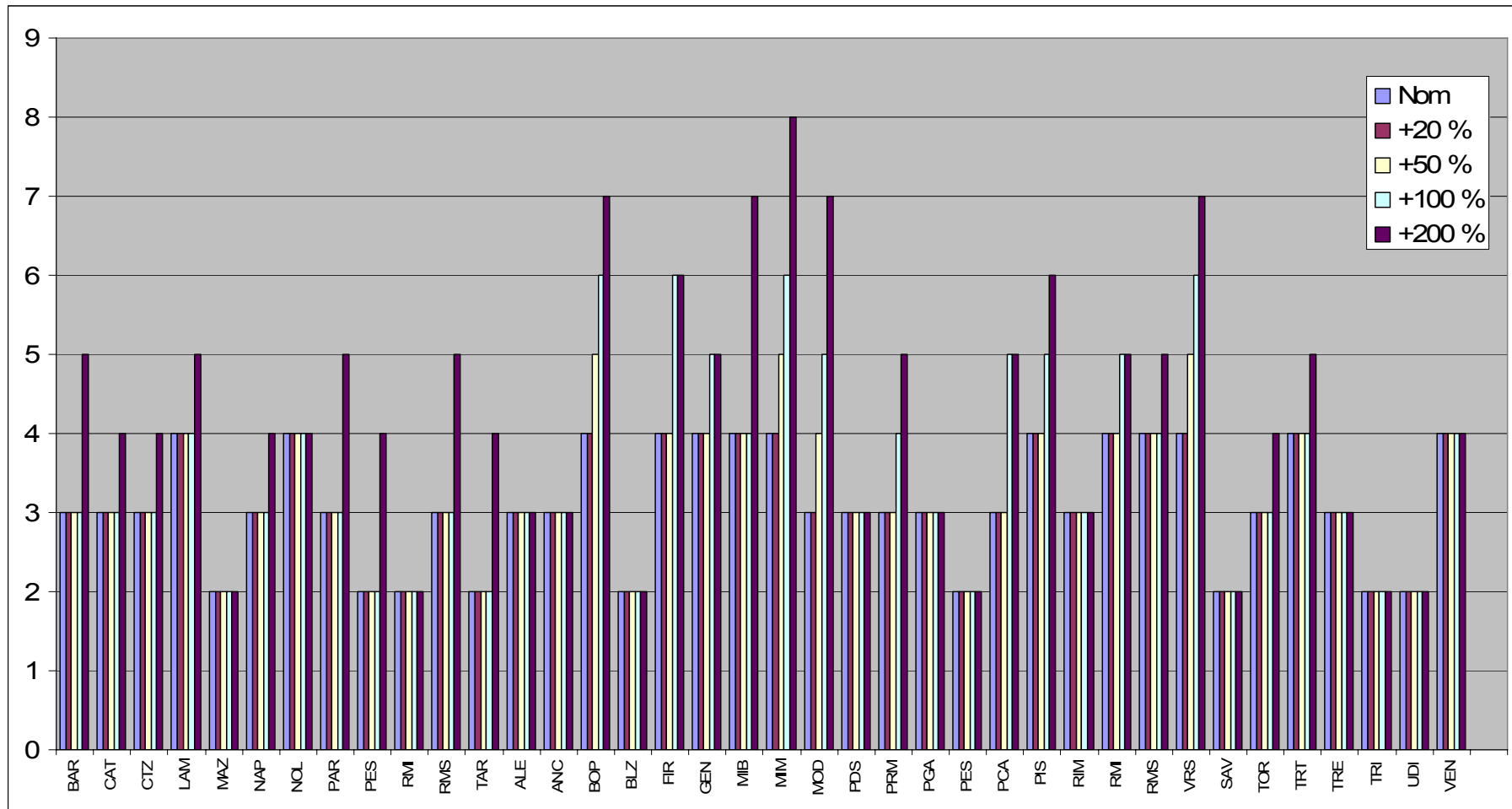
- ▶ L'aumento del numero di OCh è limitato dalla possibile saturazione dei collegamenti DWDM
- ▶ Il modo più semplice per potenziare la rete è aggiungere collegamenti DWDM in parallelo, a condizione che siano disponibili porte di linea nei ROADMs e fibre nei cavi



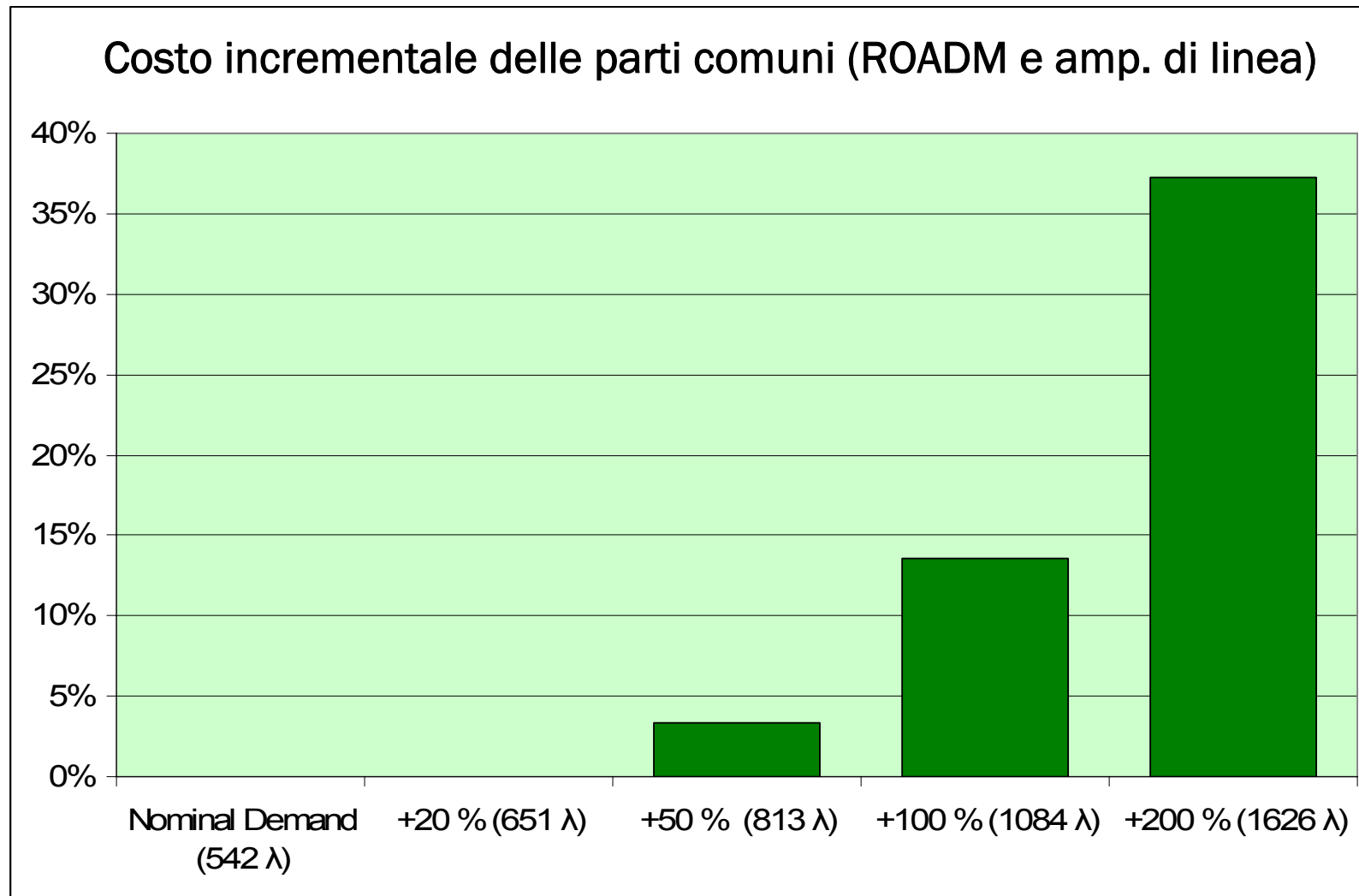
Numero di sistemi DWDM in funzione del numero di OCh



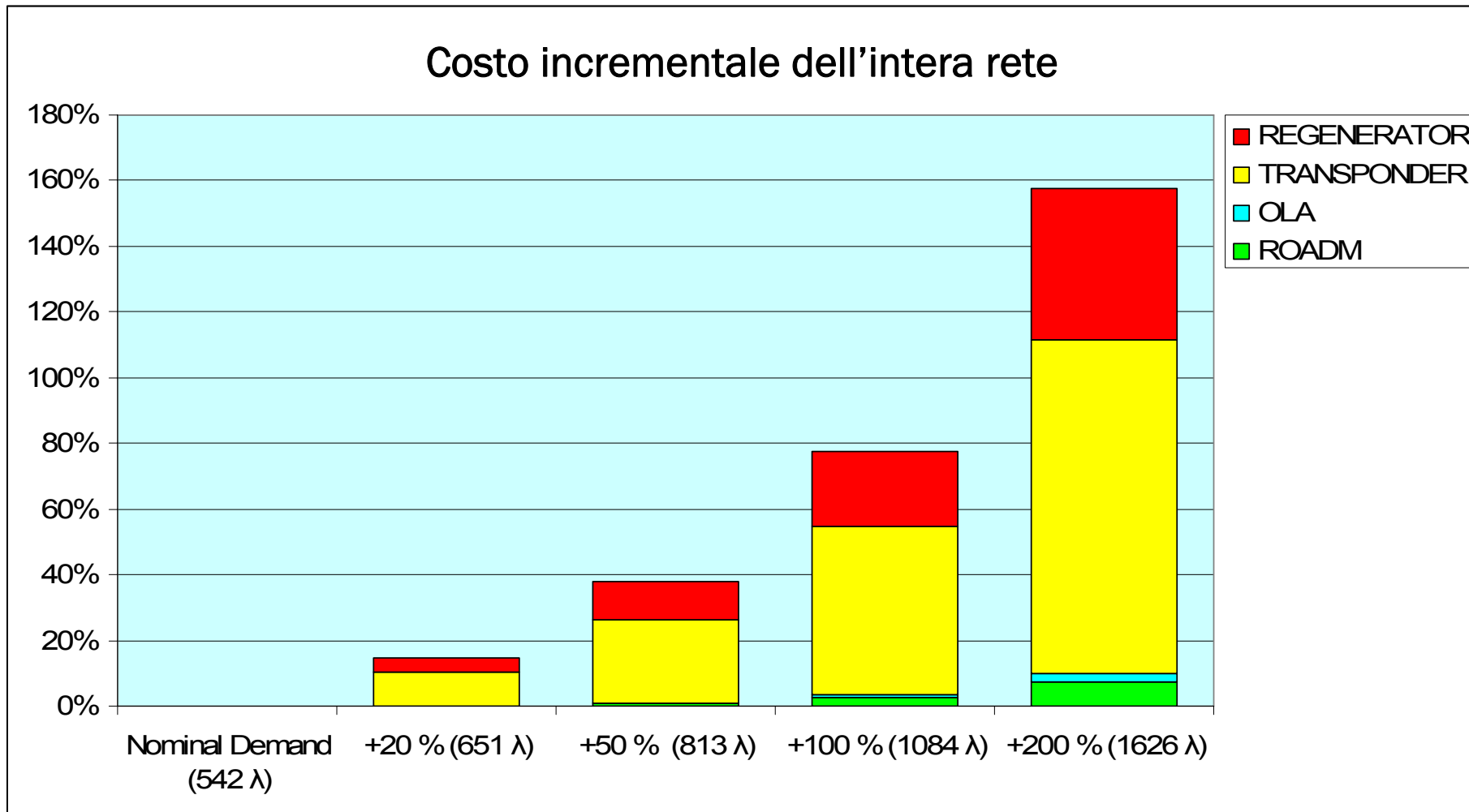
Numero di vie dei ROADM in funzione del numero di OCh



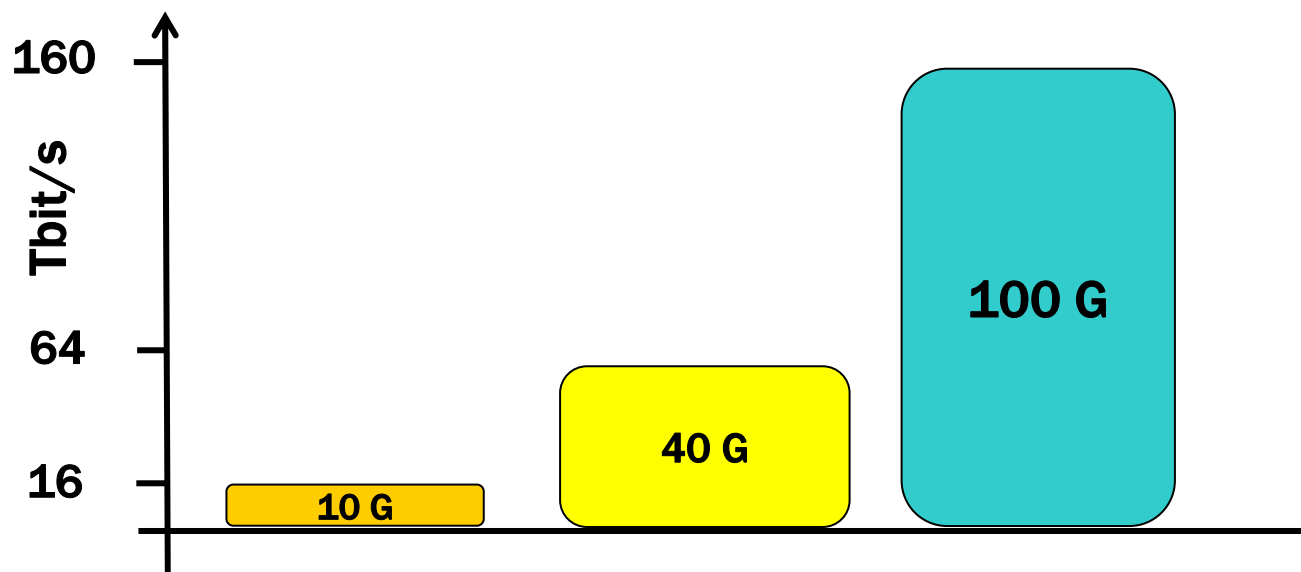
Costo delle parti comuni in funzione del numero di OCh



Costo della rete in funzione del numero di OCh



Capacità della rete in funzione del bit rate dei canali

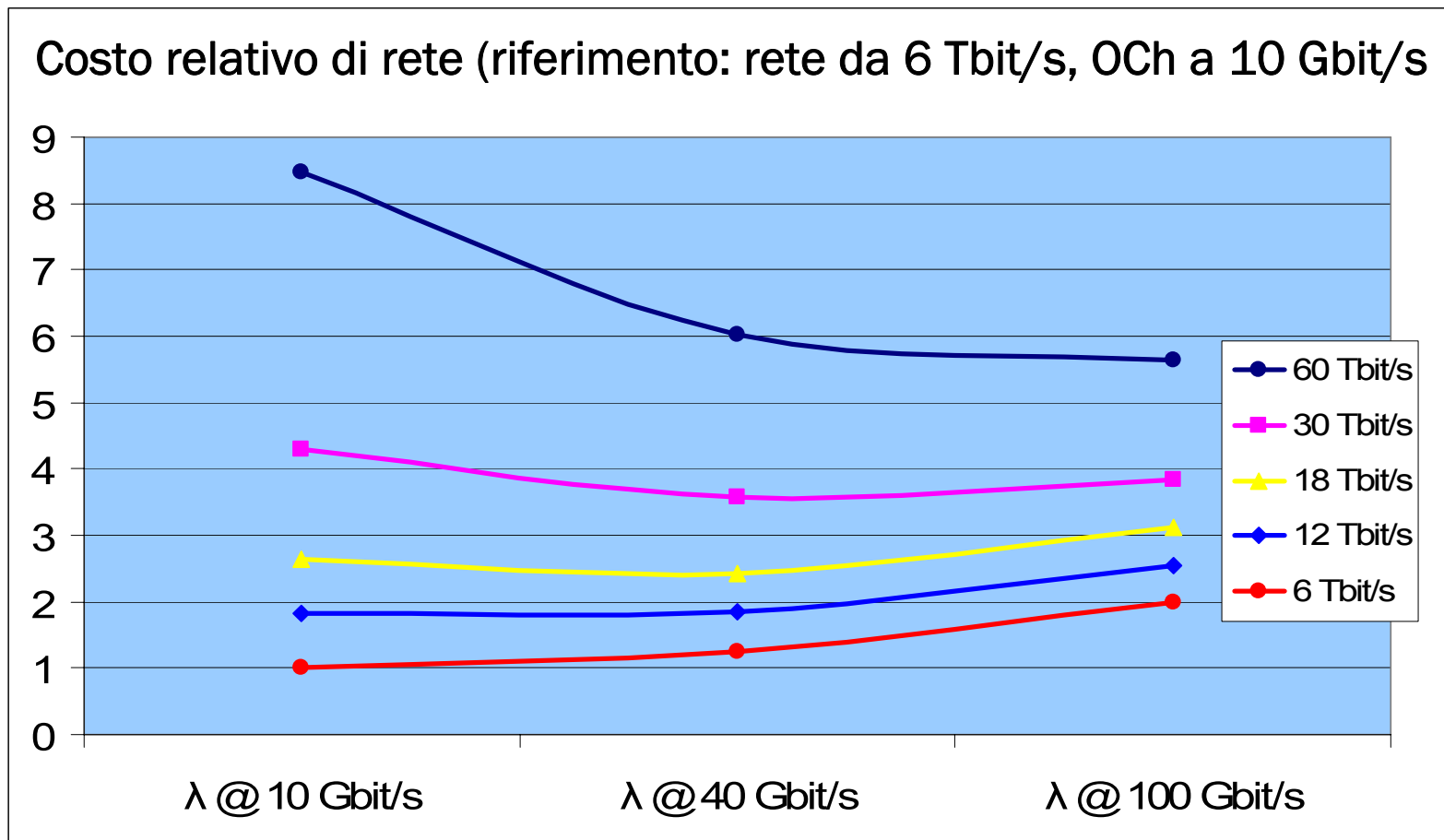


- ▶ In base all'attuale distribuzione del traffico, la rete supporta fino a **1600 canali ottici**
- ▶ La capacità totale può variare da **16 a 160 Tbit/s** in funzione del bit rate dei canali ottici (**10 – 100 Gbit/s**)

Durata attesa per la rete

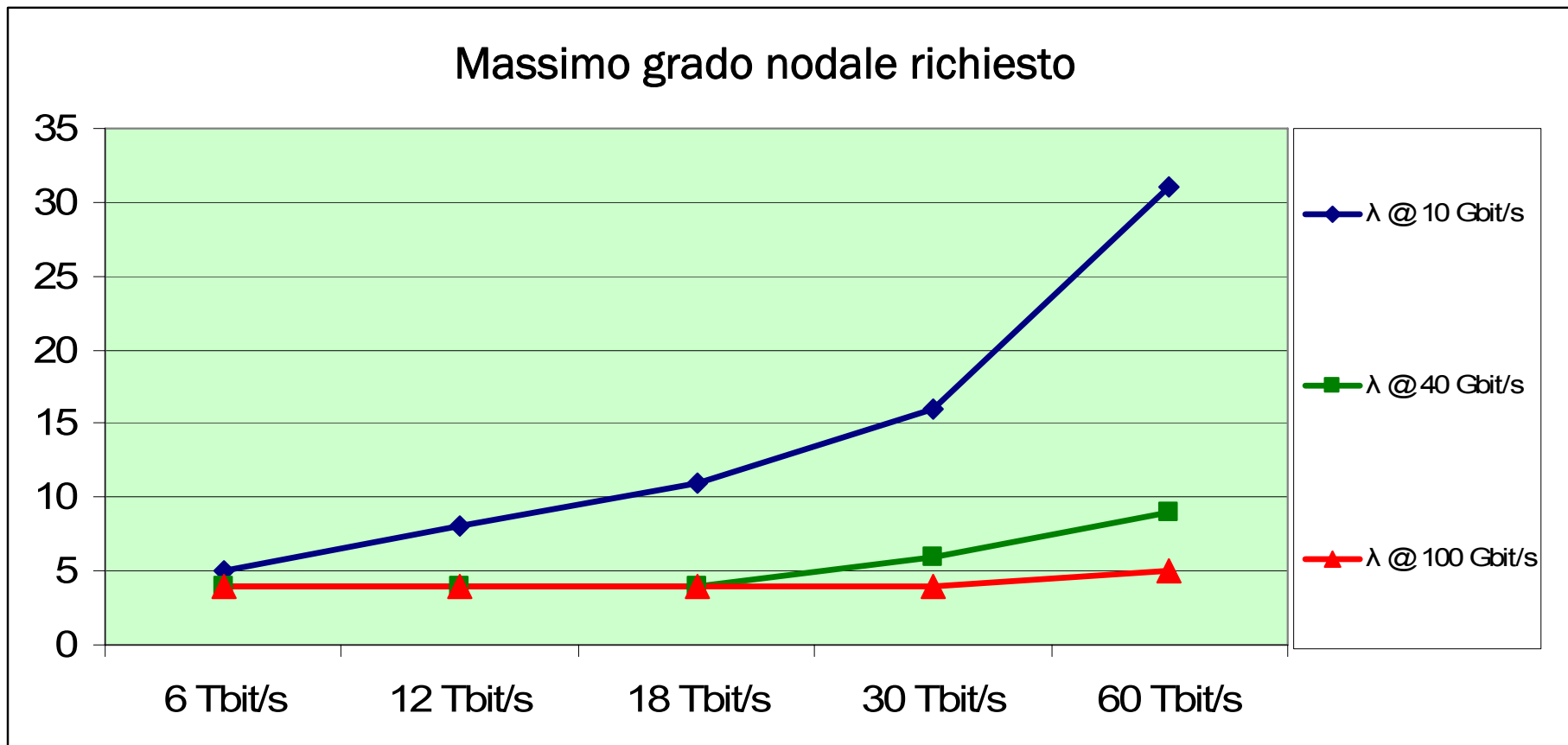
- ▶ **Dispiegamento iniziale a partire da 1Q 2010**
- ▶ **Le previsioni di traffico sul lungo termine non sono affidabili, tuttavia si può affermare che:**
 - ▶ **Se il tasso di crescita annuo del traffico sarà del 25%, il carico totale della rete sarà 55 Tbit/s nel 2020**
 - ▶ **Tassi di crescita più elevati, fino al 40% all'anno, possono essere supportati nel prossimo decennio con l'impiego di sistemi a 100 Gbit/s**

Convenienza economica dei sistemi a 100 Gbit/s



Ipotesi sui rapporti dei costi dei transponder: 40G/10G=2.5, 100G/40G=2

Impatto del bit rate dei canali ottici sul grado nodale



Risparmi energetici ed altri benefici operativi

- ▶ **In confronto al trasporto su sistemi DWDM punto-punto, si stima un risparmio energetico compreso tra 20 e 30%**
- ▶ **Il risparmio energetico è dovuto principalmente alla riduzione del numero di rigeneratori, mentre il consumo dei ROADMs è molto piccolo**
- ▶ **La nuova rete comporta numerosi altri benefici:**
 - ▶ **Notevole riduzione delle parti di ricambio (minor numero di rigeneratori);**
 - ▶ **Risparmio del ~40% nel costo di creazione dei circuiti;**
 - ▶ **Opportunità di trasferire i circuiti delle reti “legacy” razionalizzando il trasporto nel backbone**

Evoluzione della rete e prospettive di ricerca

- ▶ **Architettura di nodi con add/drop “colorless-directionless”**
- ▶ **Coesistenza di canali ottici modulati in intensità a 10 Gbit/s ed in fase a 40 Gbit/s**
- ▶ **Gittata dei sistemi a 100 Gbit/s**
- ▶ **Piano di controllo**
- ▶ **Velocità dei meccanismi di restoration**
- ▶ **....**

Architettura dei nodi ROADM

- **Complessità delle architetture “Colorless Directionless” basate su WSS**

P. Roorda, B. Collings “Evolution to Colorless and Directionless ROADM Architectures”, Paper NWE2, OFC 2008

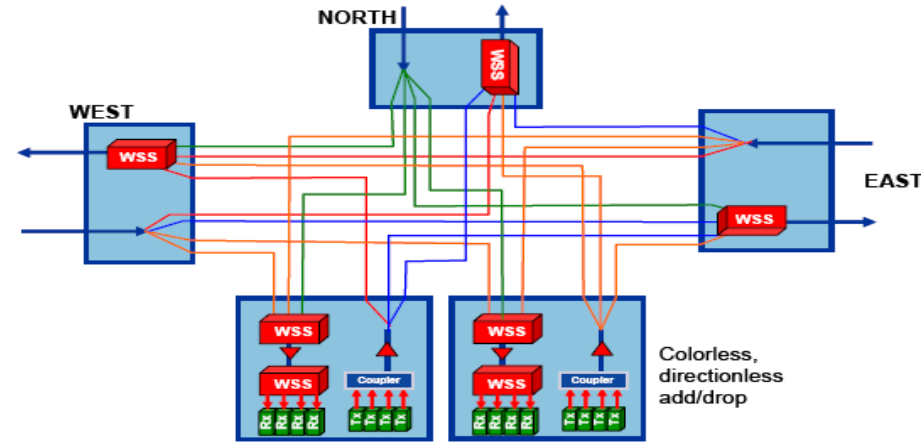


Figure 2. 3-D ROADM node with colorless and directionless add/drop switching

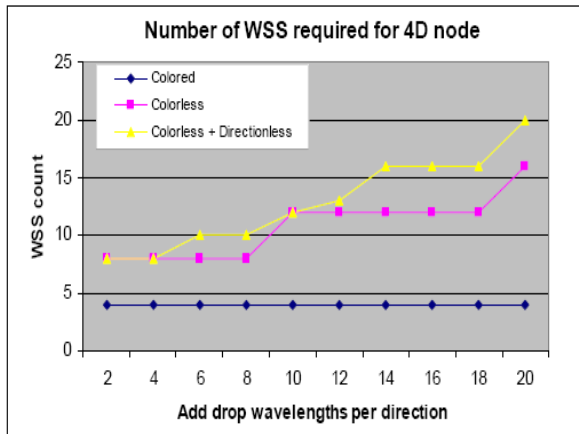


Figure 3. Number of 1x9 WSS required to support 4D ROADM

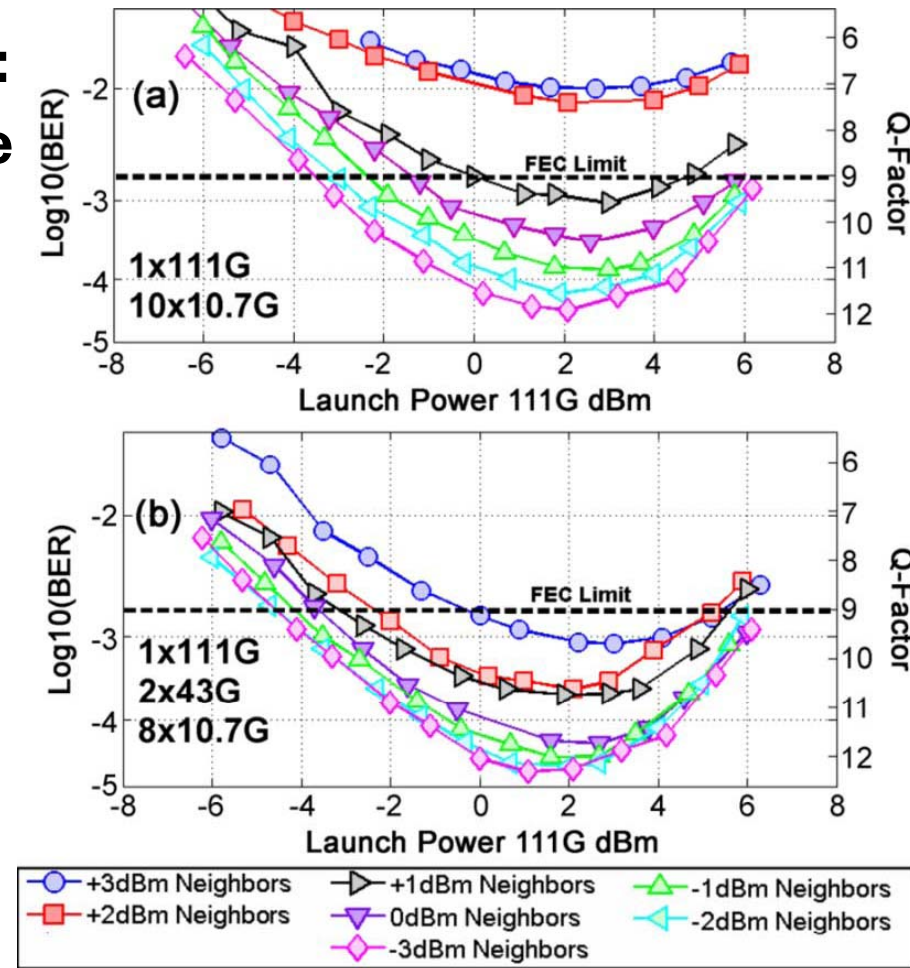
- **Nuove architetture dotate di migliore scalabilità sono già state proposte**
- **Impiegano nuovi componenti ottici (ad es. matrici a MEMS)**

Coesistenza di canali a 10 Gbit/s e 40 Gbit/s

- ▶ **In una prima fase, la rete verrà equipaggiata con canali a 10 Gbit/s modulati in intensità e a 40 Gbit/s modulati in fase**
- ▶ **La potenza di lancio dei canali a 10 Gbit/s dovrà essere limitata per evitare diafonia sui canali a 40 Gbit/s**
- ▶ **Questo potrebbe limitare seriamente la gittata dei canali a 10 Gbit/s**
- ▶ **Una possibile soluzione è l'allocazione dei canali a 10 e a 40 Gbit/s in sottobande separate**

Gittata dei sistemi a 100 Gbit/s

- ▶ **Prestazioni attese a 100 Gbit/s: almeno 1000 km, possibilmente 1500 (senza rigenerazione)**
- ▶ **Alfiad, M.S. et al., *111-Gb/s Transmission Over 1040-km Field-Deployed Fiber With 10G/40G Neighbors*, IEEE Photonics Technology Letters, Volume 21, Issue 10, May 15, 2009, Pagg. 615 - 617**



Piano di controllo e velocità della Restoration ottica

- ▶ **Il Piano di Controllo delle reti fotoniche trasparenti è sviluppato a partire dal Piano di Controllo delle reti opache (specialmente SDH) con l'aggiunta delle funzioni IA-RWA (Impairment Aware Routing and Wavelength Assignment)**
- ▶ **Questa tecnologia non è stata ancora collaudata estensivamente in campo**
- ▶ **Il tempo di Restoration ottica è ancora limitato da:**
 - ▶ **Meccanismi di adattamento al carico degli amplificatori ottici;**
 - ▶ **Equalizzazione della potenza dei singoli canali ottici;**
 - ▶ **Tempo di intervento dei meccanismi di compensazione della dispersione cromatica (specialmente se ottici)**

Bibliografia

- ▶ **[1] RFC3630 - Traffic Engineering (TE) Extensions to OSPF Version 2**
- ▶ **[2] RFC3209 - RSVP-TE: Extensions to RSVP for LSP Tunnels**
- ▶ **[3] RFC4209 - Link Management Protocol (LMP) for Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) Optical Line Systems**
- ▶ **[4] R. S. Tucker et al., “Evolution of WDM Optical IP Networks: A Cost and Energy Perspective”, IEEE JLT, VOL. 27, NO. 3, FEBRUARY 1, 2009**
- ▶ **[5] Adel A. M. Saleh, and Jane M. Simmons, “Evolution Toward the Next-Generation Core Optical Network”, IEEE JLT, VOL. 24, NO. 9, SEPTEMBER 2006**

Ringraziamenti

Ringraziamo i colleghi di Telecom Italia per i contributi fondamentali alla stesura di questo lavoro:

Sergio Augusto

Maurizio Bartoli

Valentina Brizi

Carlo Cavazzoni

Andrea Di Giglio

Giuseppe Ferraris

Marco Quagliotti

Alberto Rossaro