

# RICONFIGURABILITÀ NELLE RETI DI ACCESSO E METRO-ACCESS

Tommaso Muciaccia, Sandro Pileri

Il concetto di “ricongfigurabilità” si coniuga molto bene con un altro trend rilevante nell’evoluzione delle reti di accesso, ovvero l’integrazione tra i sistemi propriamente di accesso e quelli metro in un’unica architettura metro-access, che soddisfi quindi i requisiti di trasparenza e flessibilità richiesti dalle peculiarità emergenti delle nuove tipologie di traffico. In questo articolo vediamo come.

## L’evoluzione del traffico nelle reti di accesso

Le reti di telecomunicazioni si trovano oggi di fronte ad una sfida epocale dettata dalla necessità di disporre di maggiore configurabilità, flessibilità e dinamicità. Questo approccio rivoluzionerà sia il modo di pensare alle reti (non più semplici *dumb pipes*), che il posizionamento degli operatori sul mercato dell’ICT e le loro prospettive di business. Aprire le reti significherà probabilmente favorire la generazione di un ecosistema di soggetti che graviteranno attorno all’operatore di telecomunicazioni e coopereranno per ottimizzare l’utilizzo delle risorse di rete e per offrire al cliente finale servizi sempre più *customer-tailored*. Con il termine “ricongfigurabile”, nel contesto di questo articolo, si intende la possibilità per una rete di adattarsi dinamicamente, anche in tempo reale, alle variazioni delle condizioni nelle quali la rete stessa

si trova ad operare, rispondendo in modo efficace ed efficiente a mutevoli requisiti di capacità, sicurezza e di QoS/QoE.

L’esigenza di rendere ricongfigurabili le reti è avvertita prevalentemente a livello di reti *core* e reti di *data center*. In tali contesti si è affacciata negli ultimi anni la proposta di un nuovo paradigma, il SDN (*Software Defined Networking*), che in estrema sintesi realizza un disaccoppiamento tra il *Control Plane*, cioè il sistema che stabilisce il *routing* del traffico coordinato da un *controller* centralizzato, ed il *Data Plane*, ovvero il sistema sottostante che effettua il *forwarding* del traffico. Il controller SDN definisce la *routing table* di ciascuno *switch/router* mediante la sua interfaccia “*south-bound*” che tipicamente utilizza il protocollo standard *OpenFlow* [1].

Nella recente letteratura scientifica al modello SDN è stata dedicata una grande attenzione e, nel contesto mondiale delle telecomunicazioni, sono già stati effettuati i primi test

e le prime *proof of concept*. Meno esplorata, fino ad ora, è stata invece la possibilità di applicare il concetto di ricongfigurabilità all’estremità della rete più vicina agli utenti, ovvero nei segmenti di accesso e metropolitano. Scaturiscono quindi un paio di domande:

- 1) ha senso applicare questo nuovo approccio anche alle reti di accesso?
- 2) si può estendere il concetto di ricongfigurabilità alle reti di accesso PON che gli operatori stanno realizzando in questi anni?

Sembra che la risposta ai due quesiti sia affermativa, almeno secondo quanto riportano alcune recenti proposte di ricerca in cui tale scenario viene denominato SDAN (*Software Defined Access Networking*) [2] o SDEN (*Software Defined Edge Networking*) [3], ma che, più in generale, potrebbe essere sintetizzato come “reti di accesso ricongfigurabili”, data l’eterogeneità delle soluzioni esplorate non sempre assimilabili al paradigma SDN.

Per comprendere l'opportunità dell'utilizzo del concetto di riconfigurabilità al segmento di accesso, è necessario rispondere ad un'altra domanda: come si stanno modificando la tipologia e la distribuzione del traffico sulle reti di accesso?

Da un lato è evidente che l'emergere dei servizi *bandwidth hungry* raccolti dalle nuove reti d'accesso ottiche sta portando ad una crescita del traffico secondo la legge di Nielsen (aumento del 50% all'anno).

D'altro canto è altrettanto palese che il *cloud computing* e l'impiego sempre maggiore di tecnologie mobili stanno modificando radicalmente sia le caratteristiche del *traffic pattern*, sempre più dinamico e difficilmente predicibile, che le necessità per gestirlo al meglio [4]: le capacità richieste dal *cloud* variano significativamente nel tempo, mentre le peculiarità del traffico raccolto sulla rete mobile sono principalmente la migratorietà e la volatilità [5]. Si pensi, ad esempio, alla distribuzione del traffico nell'arco di una giornata in una grande città: al mattino si potrebbe ipotizzare un picco di traffico nel quartiere d'affari o nelle zone industriali; progressivamente potrebbe spostarsi nelle zone commerciali o in zone dedicate al tempo libero (parchi, impianti sportivi, ecc.); nel corso della serata si potrebbe registrare una forte domanda di banda nelle aree residenziali.

Per gestire in modo efficiente le risorse di rete destinate a servire le diverse aree urbane, è opportuno che le piattaforme di rete siano do-

tate di capacità di riconfigurabilità dinamica in *real-time* in accordo alle diverse tipologie di traffico (*browsing, mailing, file sharing, mobile backhauling, audio streaming, video on demand, servizi cloud*), per soddisfare i diversi requisiti di prestazioni, principalmente in termini di banda disponibile (in *downstream* ed in *upstream*) e di latenza.

Ciò è valido anche e soprattutto per il segmento di accesso in cui l'infrastruttura di rete deve essere ammortizzata su un numero inferiore di utenti. Tale requisito di riconfigurabilità è necessario anche per abilitare la crescita graduale delle applicazioni legate all'IoT: una gestione flessibile del traffico consentirebbe di evitare congestioni sulle reti a causa del traffico generato dal numero enorme di dispositivi che pervadono sempre più le nostre case e le nostre città.

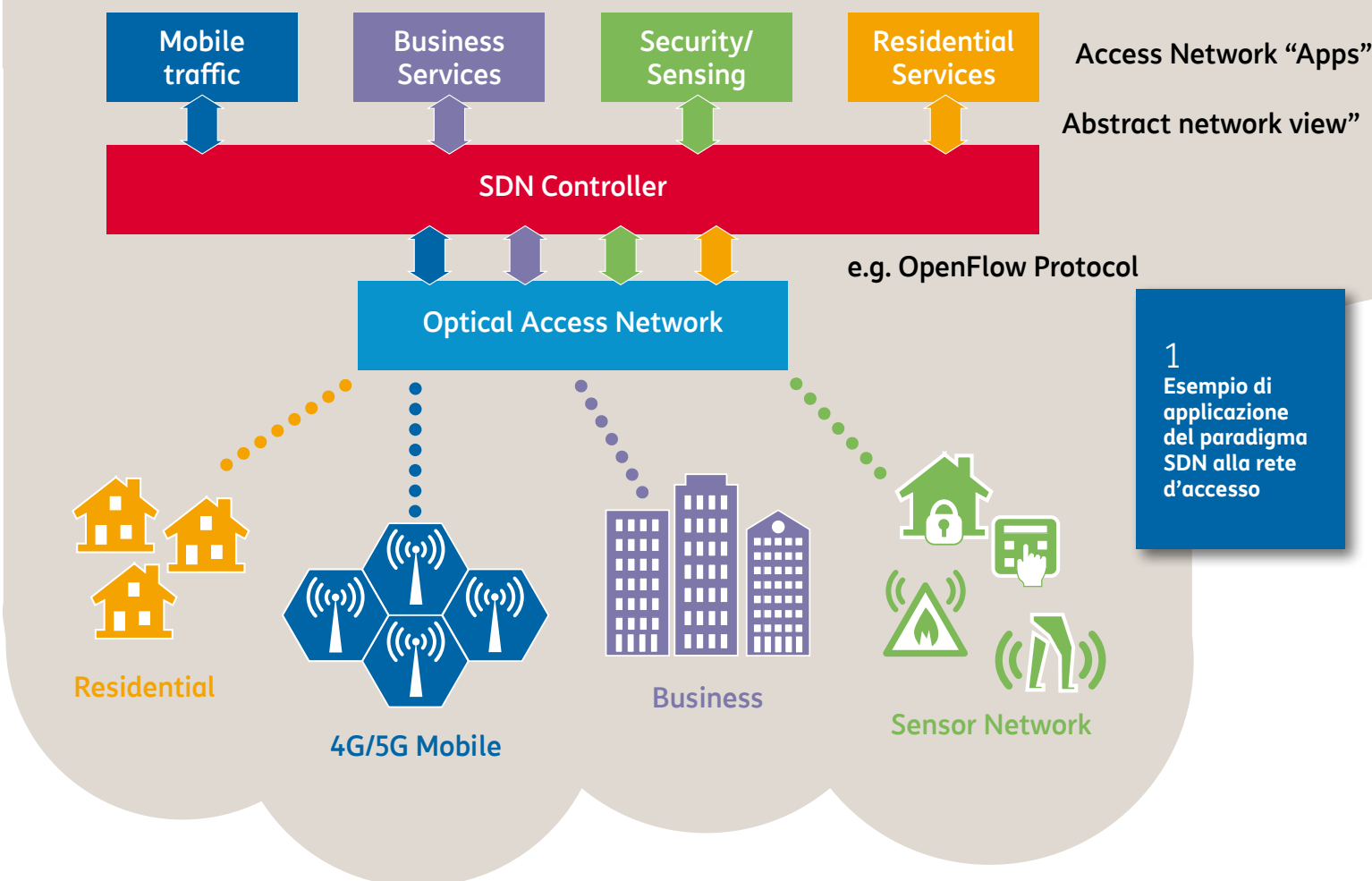
### I vantaggi delle reti di accesso riconfigurabili

L'utilizzo di un approccio "flessibile" e "riconfigurabile" in rete di accesso può implicare la possibilità di virtualizzare ed automatizzare un insieme di operazioni che portano vantaggi agli operatori, ai *vendor* di apparati e agli utilizzatori finali: si ridurrebbero drasticamente i tempi di *provisioning* dei servizi *end-to-end*; gli OpEx per la gestione della rete sarebbero più bassi per gli operatori che potrebbero

contare su "nuovi" ricavi derivanti da nuovi servizi; l'esistenza di un'interfaccia standard comune (sul modello, per esempio, di OpenFlow) semplificherebbe i requisiti per i *vendor*; gli utilizzatori finali potrebbero sperimentare nuovi servizi che potranno essere più facilmente e rapidamente sperimentati, implementati e configurati sulla base delle reali necessità dei clienti.

Una rete di accesso "programmabile", infatti, abiliterebbe o semplificherebbe una serie di funzionalità di controllo, come la gestione del traffico (*tunnel* e *VLAN*), la configurazione degli *access node*, la diagnostica ed il *troubleshooting*. L'operatore potrebbe intervenire nella gestione dinamica dello spettro per minimizzare le interferenze tra sistemi trasmissivi VDSL, in aggiunta eventualmente ai meccanismi di *vectoring*. Si potrebbe anche operare una differenziazione dei servizi per garantire in maniera dinamica *round-trip delay* più bassi per applicazioni come il *gaming online* o la telemedicina [6].

Queste potenzialità, unite alla virtualizzazione del CPE nella cornice della cosiddetta NFV (*Network Function Virtualization*)<sup>1</sup>, consentirebbero di aprire tali funzionalità alla clientela e ciò potrebbe significare rispondere meglio alle esigenze dell'utente: tramite una semplice applicazione *user-friendly* installata nel CPE, per esempio, il cliente potrebbe scegliere un servizio e la qualità del servizio desiderata, essere informato della qualità del servizio e potrebbe bilanciare le sue scelte tramite un *feedback*



che innescherebbe un circolo virtuoso a tutto vantaggio della QoE. Una rete d'accesso pienamente riconfigurabile consentirebbe agli utenti di richiedere banda in *real-time* in *downstream* o in *upstream* (BoD) o di controllare le priorità in base alla tipologia di traffico per gestire ad esempio i diversi *device* connessi in una stessa LAN [6].

In un contesto multioperatore, inoltre, una rete riconfigurabile (per esempio mediante i paradigmi SDN e NFV) potrebbe semplificare i rapporti tra operatore *wholesale* e *retail provider* rendendo più uniformi e facilmente implementabili le *policy* e i vincoli regolatori, poiché verrebbero

gestiti logicamente da un unico sistema centralizzato: il *controller SDN*. Tale sistema centralizzato, peraltro, implementa un'astrazione della rete che potrebbe presentare un'interfaccia comune standard aperta anche ai *retail provider* o ad eventuali terzi che, in tal modo, acquisirebbero l'accesso a varie funzionalità configurative o di diagnostica che attualmente sono a carico esclusivo dell'operatore *wholesale* [6]. Si aprirebbero nuovi scenari e si potrebbero persino abilitare nuove *value-chain* e nuovi modelli di business basati sull'estensione alle reti di accesso del concetto *cloud* di IaaS [8]. Naturalmente tutto ciò implicherebbe la massima atten-

zione da parte del *network provider* agli aspetti di sicurezza, soprattutto nel controllare le autenticazioni in accesso, nell'arbitrare le richieste conflittuali e nel garantire comunque affidabilità all'infrastruttura fisica sottostante.

Una possibilità per raggiungere, nelle reti di accesso, l'obiettivo di riconfigurabilità dinamica per ridurre la probabilità di congestioni e limitare la latenza, è quella di estendere il paradigma SDN alle reti PON implementando nuove funzionalità prevalentemente nei layer 2 e 3 dello stack protocollare ISO/OSI. La **figura 1** illustra questo concetto: le access network "Apps" corrispondono ad



applicazioni sviluppate per ottenere determinati comportamenti della rete di accesso in termini di trasporto di traffico mobile (*backhauling*), di esigenze di servizi per la clientela business e residenziale (banda, latenza, QoS, ecc.), di aspetti di sicurezza, ecc.; gli apparati della rete di accesso ottica (*Optical Access Network*) avranno funzionalità di solo *forwarding* di pacchetti (o trame) demandando allo strato di controllo SDN le funzionalità intelligenti di decisione degli instradamenti, di classificazione e colorazione del traffico, di applicazione di *policy* di trattamento del traffico, di sicurezza e così via. Il piano di controllo gestisce gli apparati di accesso (OLT) tramite un protocollo, per esempio *OpenFlow*.

La prima proposta di applicazione della SDN alla rete di accesso è stata avanzata da Parol e Pawlowski nel 2013 e successivamente ampliata da Amokrane *et al.* nel 2014 [5]. L'o-

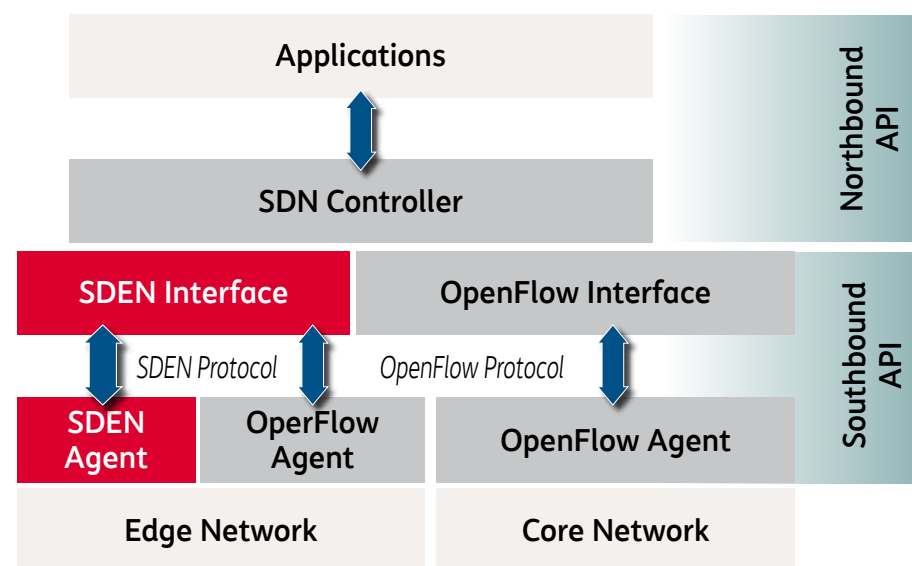
biiettivo di quest'ultimo lavoro consiste nell'estendere il concetto di SDN al segmento di accesso, applicando il protocollo *OpenFlow* alle reti GPON. Concretamente ciò è reso possibile dall'introduzione di due principali novità nella rete di accesso. La prima è la mappatura dei cosiddetti *flows*<sup>2</sup> alle porte GEM che, nello standard GPON, rappresentano una connessione logica tra ONT e OLT con una ben definita *class of service* ed un identificatore univoco. La seconda consiste nel definire un'interfaccia comune tra l'*SDN controller* e gli OLT delle PON mediante un'interfaccia API<sup>3</sup>; il sistema di gestione di una PON, infatti, normalmente consente all'utente amministratore una configurazione manuale della rete che include la definizione dei profili di servizio e gli attributi delle singole porte PON. L'approccio SDEN proposto da Amokrane *et al.*, invece, avendo a disposizione delle API che possono

agire sugli *SDEN agent*, ovvero dei moduli collocati sui nodi OLT della rete (come riportato in **figura 2**), può consentire un controllo *real-time* della PON.

Oltre all'applicazione del paradigma SDN sopra accennato, un'altra possibilità per ottenere reti di accesso riconfigurabili è quella di implementare una configurazione dinamica a livello fisico, come è illustrato nel paragrafo successivo.

## Riconfigurabilità a livello fisico

La dinamicità e l'adattività alla base dello scenario sinora descritto implicano, dal punto di vista dei componenti e dei sistemi *hardware*, dei requisiti cruciali che sono la flessibilità e la programmabilità. In altre parole, sarà necessario sviluppare sistemi fotonici, i cui parametri chiave siano riconfigurabili via *software*: le reti riconfigurabili e *software defined*, in definitiva, richiedono lo sviluppo di un nuovo approccio tecnologico, la *software defined photonics*. Le proposte presenti nella letteratura scientifica riconducibili, diret-



2 Architettura logica di un esempio di SDEN [5]

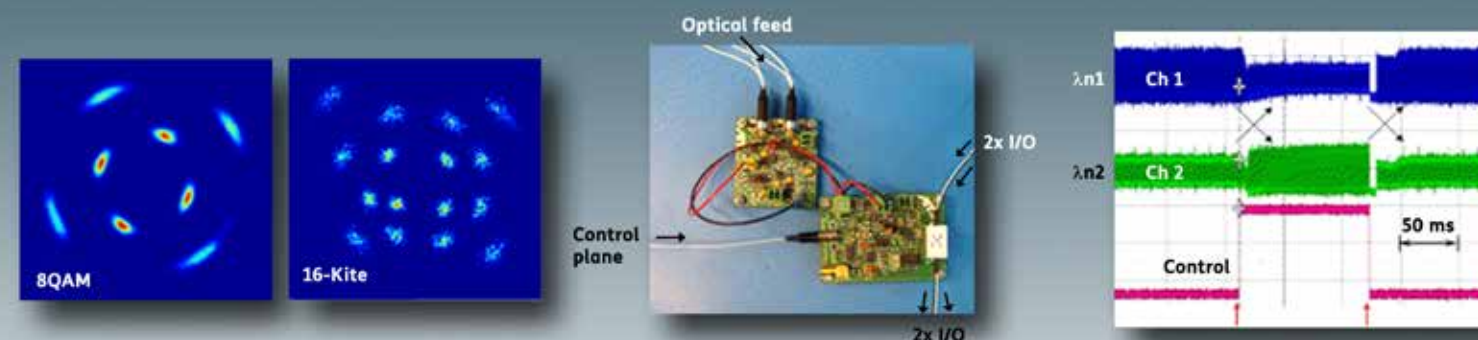
tamente o indirettamente, a questa tematica, sono numerosissime e riconducono per gran parte all'impiego su larga scala della fotonica del silicio (*Silicon Photonics*) in circuiti integrati fotonici. Si potrebbero sintetizzare, a grandi linee, in quattro macro-aree non mutuamente esclusive:

- 1) *transceiver* flessibili;
- 2) griglie WDM flessibili;
- 3) tecniche di *routing* a livello fisico;
- 4) tecniche di *switching* a livello ottico.

Per *transceiver* flessibili si intendono essenzialmente trasmettitori e ricevitori riconfigurabili installati "a bordo" delle OLT e ONU/ONT. Come mostrato in **figura 3**, per esempio, si potrebbero modificare in *real-time* i seguenti parametri:

- il *bit-rate*,
- la potenza trasmessa,
- la tecnica e/o la cardinalità della modulazione,
- la tecnica di codifica,
- la lunghezza d'onda della portante ottica,
- il *payload* del FEC.

3 Transceiver flessibili ed esempi di costellazioni 8-QAM e 16-QAM<sup>4</sup>



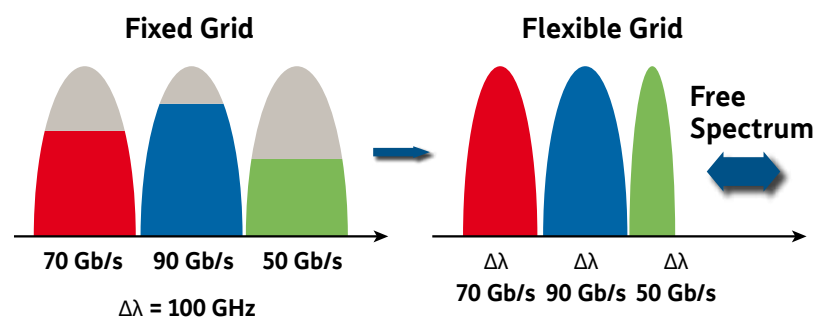
Per far ciò è necessario intervenire sulla sorgente laser, sull'elettronica di pilotaggio della sorgente o su un modulatore ottico esterno. Un esempio di applicazione di questo approccio, proposto da Vacondio *et al.*, dimostra che utilizzando *transponder* coerenti *software-defined*, i cui parametri di trasmissione variano in funzione della distanza dell'utente dall'OLT, è possibile raddoppiare la capacità media per utente in una rete d'accesso basata su moltiplicazione a divisione di tempo [9].

Le griglie WDM flessibili sono già da qualche anno una possibilità concreta per le reti *backbone*. Come si può notare in **figura 4**, se la spaziatura tra le portanti ottiche di un sistema di moltiplicazione a divisione di lunghezza d'onda non è strettamente vincolata ad una griglia prestabilita (per esempio quella DWDM), è evidente che la banda allocabile per ciascuna portante può essere gestita in modo dinamico ottimizzando l'efficienza spettrale ma anche, indirettamente, l'efficienza energetica con conseguente risparmio in termini di OpEx per l'operatore. L'estensione della modulazio-

ne WDM alle reti PON [10] renderà opportuno utilizzare tecniche come questa per adeguare la capacità del link alle esigenze degli utenti. L'impiego di griglie flessibili in rete ottica riconfigurabile RFON (*Reconfigurable Flexible Optical Network*), è stato oggetto di indagine da parte di Oliveira *et al.* su un *test-bed* costituito da 4 nodi dotati di *switch* selettivi in lunghezza d'onda (WSS), amplificatori ottici e un sistema di supervisione e *monitoring* dei canali ottici [11]. Cvjetic *et al.* hanno proposto, invece, l'utilizzo di griglie flessibili in rete di accesso e di aggregazione in un'architettura basata sul protocollo *OpenFlow* [12].

Il *routing* di lunghezze d'onda è un modo per instradare il traffico senza ricorrere a conversioni elettro-ottiche. Nelle reti *backbone* degli operatori sono già presenti da alcuni anni nodi ROADM in grado di operare tale funzione impiegando tecnologie MEMS o LCoS [13]. Entrambe le tecnologie non rappresentano tuttavia la soluzione ottimale per un impiego su larga scala nelle reti di accesso, in cui il costo, i volumi, i consumi energetici e l'affidabilità sono fattori estremamente critici. Soluzioni al-

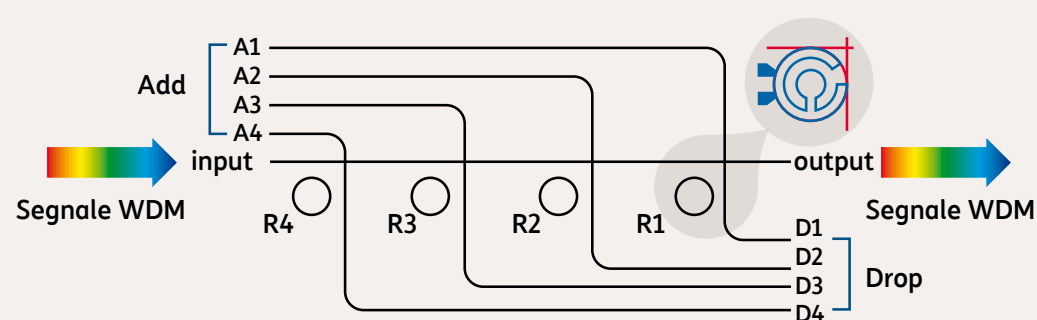
#### 4 Schematizzazione dei vantaggi nell'applicazione di griglie WDM flessibili



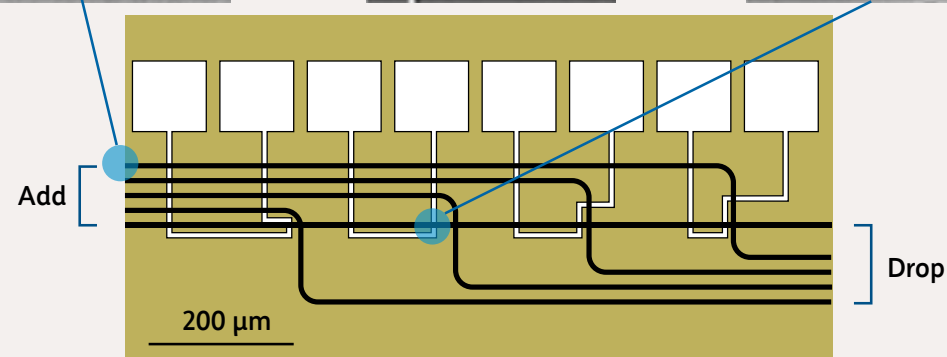
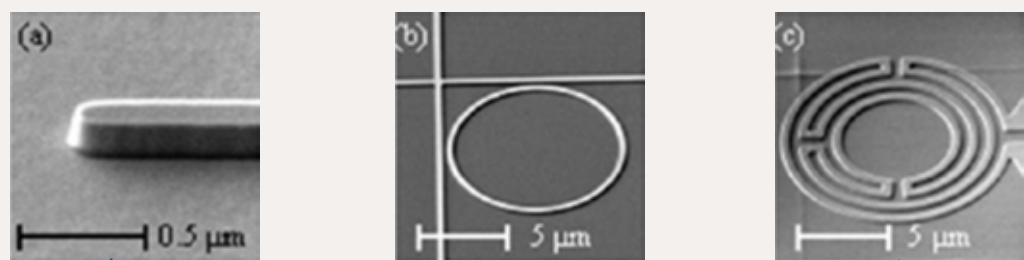
ternative sono state avanzate negli ultimi anni nel mondo della ricerca: si sono proposti, per esempio, ROADM basati su micro-risonatori ad anello (come quello rappresen-

tato in **figura 5**) che sono realizzabili nella piattaforma tecnologica SOI, la più semplice da integrare con l'elettronica di controllo CMOS. L'utilizzo in rete di accesso di ROADM

basati su micro-risonatori ad anello configurabili termicamente è stato dimostrato da Klein *et al.* che hanno fabbricato un dispositivo in tecnologia  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$  con un *footprint* di



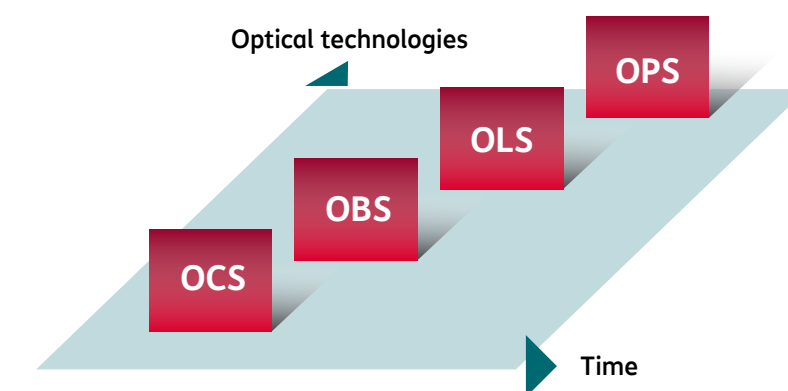
#### 5 Esempio di ROADM basato su micro-risonatori ad anello<sup>5</sup>



appena  $2\text{mm}^2$  in grado di operare in seconda ed in terza finestra [14]. Tre caratteristiche sono necessarie per i ROADM di nuova generazione: la proprietà "colorless", ovvero la possibilità di consentire l'add/drop di canali a qualsiasi lunghezza d'onda; la proprietà "directionless", ovvero la possibilità di instradare il segnale da qualsiasi porta di ingresso a qualsiasi porta d'uscita; la proprietà "contentionless", ovvero la possibilità di gestire i conflitti nell'utilizzo delle risorse (porte di uscita e lunghezze d'onda). A queste proprietà se ne può aggiungere una quarta, la proprietà "gridless", ovvero la compatibilità del dispositivo con le griglie WDM flessibili. Se il dispositivo possiede tutte e quattro le caratteristiche si parla di CDC/G ROADM.

Il *routing* di lunghezza d'onda è solo una delle possibilità per instradare il traffico in una rete WDM riconfigurabile; dal punto di vista concettuale, si tratta di una "semplice" commutazione di circuito ottico, denominata OCS (*Optical Channel Switching*). Esistono tuttavia tecniche più sofisticate, sintetizzate in **figura 6** e di seguito brevemente descritte, che permetterebbero di adattare la rete in modo più "granulare" ed efficiente alle variazioni del traffico.

L'approccio ideale per rispondere a questi requisiti sarebbe teoricamente la OPS (*Optical Packet Switching*), ovvero una commutazione di pacchetto eseguita interamente nel dominio ottico. L'implementazione a livello ottico della commutazione di pacchetto consentirebbe l'appli-



#### 6 Tecnologie di switching ottico ordinate in base alla complessità implementativa e alle fasi in cui se ne prevede l'impiego

cazione del concetto di IPoWDM, da molti ritenuto il "Sacro Graal" delle telecomunicazioni ottiche, che semplificherebbe notevolmente la pila protocollare, riducendo i costi operativi della rete. Poiché le tecnologie attuali non consentono questa possibilità, un approccio pratico per implementare la OPS è rappresentato dalla OLS (*Optical Label Switching*) in cui solo l'*header* del pacchetto (l'etichetta, appunto) viene processato elettronicamente. Una soluzione meno sofisticata ma più facilmente implementabile è rappresentata dalla OBS (*Optical Burst Switching*) che non ha la pretesa di instradare i singoli pacchetti ma gruppi di pacchetti (*burst*) processando un segnale *out-of-band* che contiene le informazioni per l'indirizzamento. La tecnica OBS viene talvolta definita OFS (*Optical Flow Switching*)

nel caso in cui si stabilisca un flusso *end-to-end* ed i *burst* siano molto lunghi (dell'ordine di 100 ms). La tecnica OBS presuppone una netta separazione tra il piano di controllo ed il piano dati e l'utilizzo di protocolli che definiscano le modalità con cui i *burst* devono essere gestiti dai router ottici; in particolare si può operare una distinzione tra protocolli definiti "2-way reservation", in cui è richiesto un *acknowledgment* da parte del nodo ricevente prima dell'inoltro dei *burst*, e protocolli definiti "1-way reservation", che non richiedono *acknowledgment* e quindi consentono una riduzione dei tempi di latenza [15].

### Convergenza metro-access

L'impiego dei ROADM e delle evolute tecniche di *switching* descritte finora consentirebbe di integrare in un'unica rete *all-optical* i segmenti *access* e *metro*: molte delle architetture proposte che realizzano tale

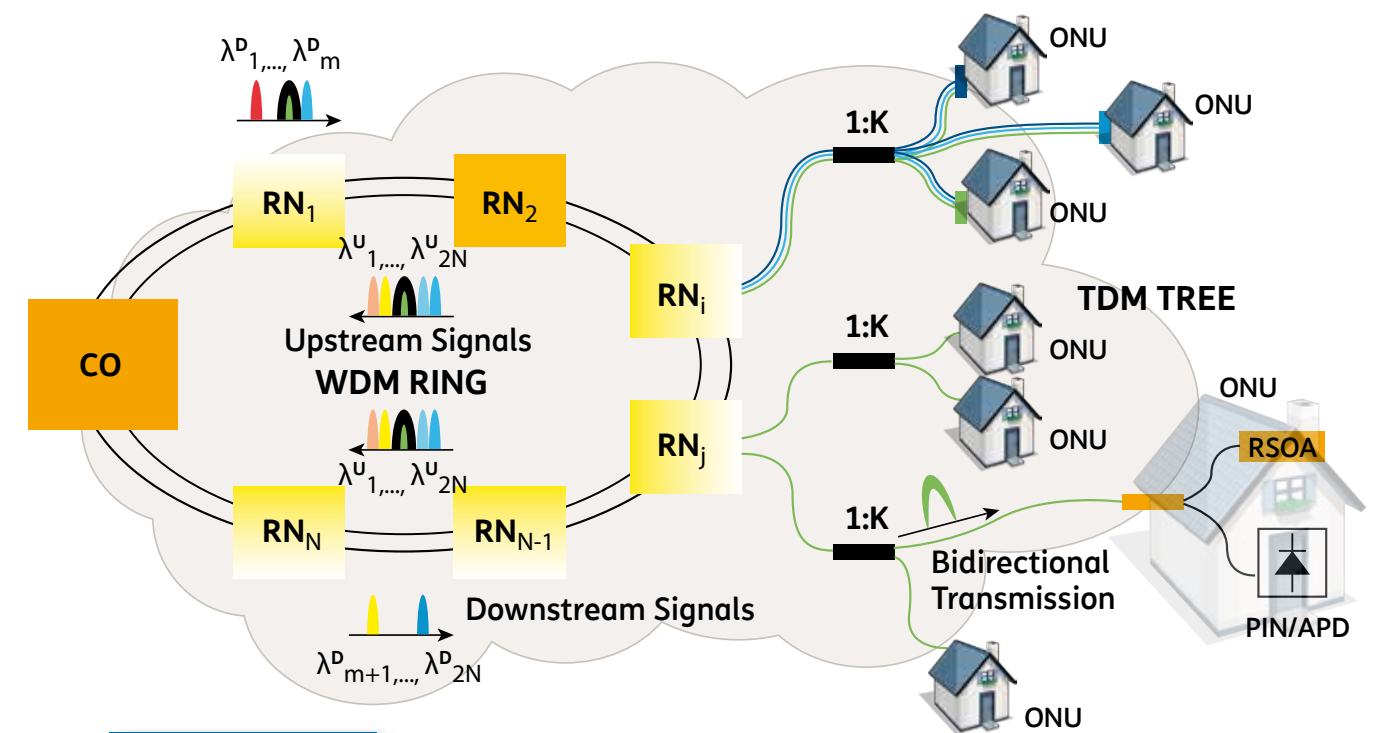
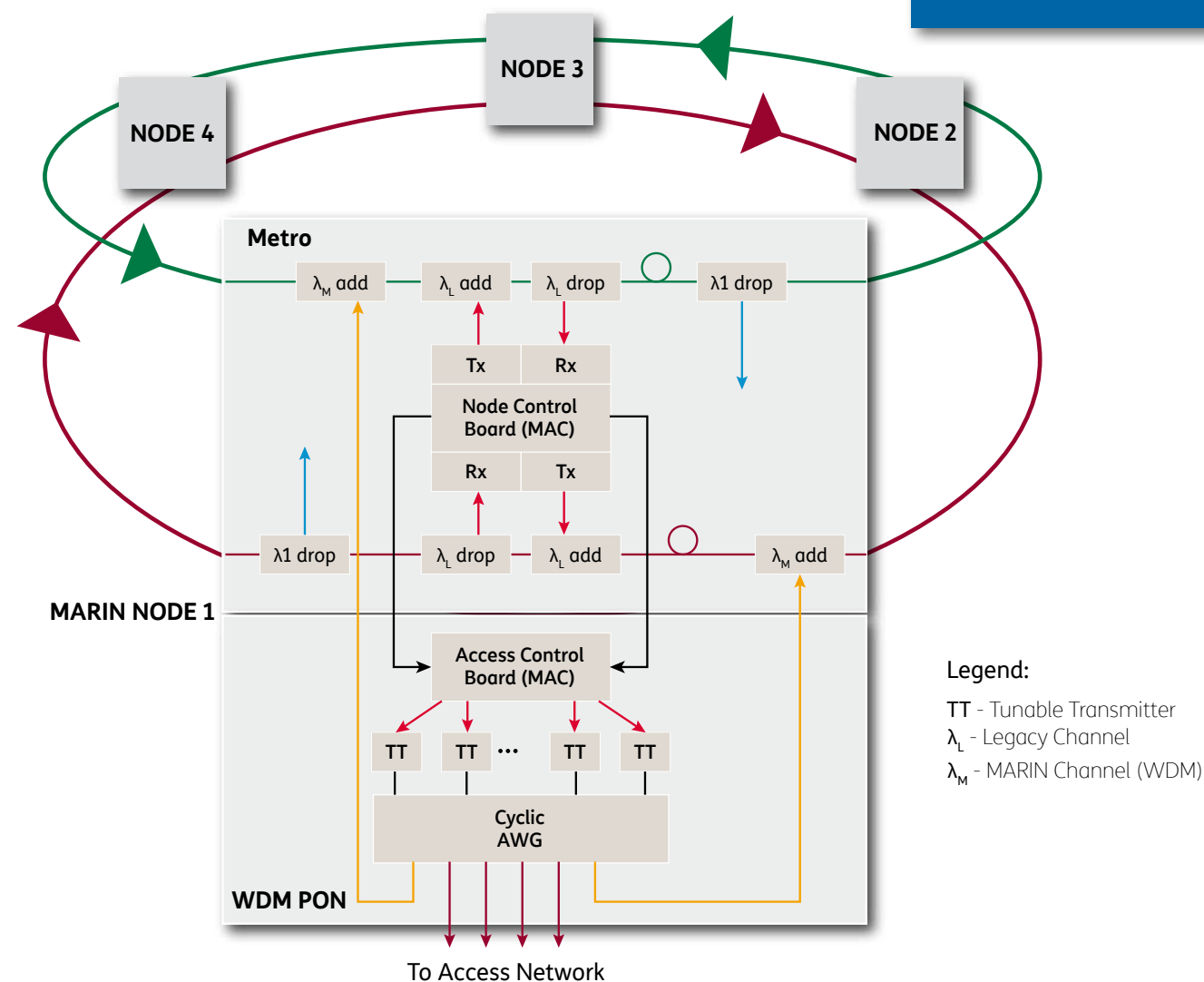
convergenza consistono in un anello *metro* che raccoglie il traffico da un certo numero di alberi PON collegati all'anello mediante ROADM. L'utilizzo di architetture basate sulla WDM in rete di accesso, ritenuto un verosimile scenario a medio e lungo termine [10], estenderà il campo di applicazione delle PON rispetto agli attuali standard GPON. La riduzione delle perdite di inserzione degli splitter (sostituiti dagli AWG) con conseguente incremento del *power budget* e quindi del *reach*, abiliterà infatti l'utilizzo delle tecnologie PON nelle reti *metro-access* unificate. Tali reti dovranno supportare tre applicazioni principali: accesso ot-

tico residenziale condiviso, accesso ottico dedicato per i clienti *business*, *backhauling* dei nodi della rete radiomobile (4G/5G). Tali applicazioni potrebbero essere fornite da un'infrastruttura unificata ibrida WDM/TDM-PON [16].

Una possibile soluzione *cost-effective* potrebbe essere quella di utilizzare la WDM nel segmento *metro* e la TDM nel segmento di accesso. Ovviamente ci sarebbero sfide tecnologiche da affrontare: per ampliare il *reach* potrebbero essere necessari amplificatori ottici nei RN; andrebbe anche gestita la trasmissione *burst-mode* implicita della TDM.

Una delle prime proposte di convergenza *metro-access* è stata l'architettura MARIN, presentata nel 2007. Si tratta di una rete costituita da anelli DWDM interconnessi tra loro, ciascuno dei quali ha una propria CO che gestisce la distribuzione/raccolta del traffico delle WDM PON collegate all'anello. I nodi della rete sono di due tipologie: il MARIN gateway svolge funzioni di *add/drop* verso gli alberi PON; il MARIN switch svolge funzioni di *routing* del traffico *metro*. I nodi utilizzano trasmettitori

### 7 Architettura di rete metro-access MARIN [17]



### 8 Architettura di rete metro-access SARDANA [18]

sintonizzabili, sfruttano le proprietà cicliche dell'AWG e fanno ricorso alla OBS (vedi figura 7) [17].

L'architettura SARDANA, proposta nel 2011 da un consorzio internazionale di operatori, vendor e istituti di ricerca, è forse l'esempio più noto di convergenza *metro-access*. Tale architettura, raffigurata in figura 8, prevede un anello bidirezionale WDM a 32 lunghezze d'onda che si interfaccia con degli alberi TDM PON a 10 Gbps mediante RN che effettuano l'*add/drop* dei canali. Si tratta di nodi ottici passivi, poiché tutta l'elettronica risiede in un unico nodo di controllo, ovvero un CO

sede di OLT localizzato sull'anello WDM. Ciascun RN è equipaggiato con uno splitter, per la distribuzione sulla relativa PON, ed un EDFA con una pompa laser remota localizzata nel CO, per estendere il *reach*.

Le ONT sono equipaggiate con *transceiver colorless* basati su RSOA che riflettono e rimodulano il segnale ottico ricevuto in downstream per generare il traffico *upstream*. La topologia ad anello è chiaramente strategica dal punto di vista della resilienza della rete, considerando che garantisce due vie di collegamento tra l'OLT e ciascuna ONT con un tempo di ripristino, in caso di eventuale guasto, inferiore a 50 ms [18]. Recentemente sono state proposte altre architetture *metro-access* riconfigurabili. Particolarmente interessante è quella presentata da

Schrenk et al. basata su nodi ROADM passivi che effettuano uno *switching* ottico dinamico utilizzando meccanismi di "energy scavenging": tali dispositivi, infatti, non necessitano di alimentazione elettrica locale ma si auto-alimentano mediante segnali ottici a -10 dBm che potrebbero anche essere i segnali di traffico, piuttosto che un segnale di pompa [19].

Un'ulteriore possibilità emergente, infine, è l'integrazione delle reti ottiche con la tecnologia *wireless* nelle reti *metro-access*, esempio del trend di convergenza fisso-mobile, che potrebbe essere effettuato secondo gli approcci MoF (*Microwave-Over-Fiber*) o RoF (*Radio-Over-Fiber*) che prevedono la modulazione del segnale a radiofrequenza sulle lunghezze d'onda ottiche [20].



## Requisiti delle reti metro

Riuscire a realizzare una rete metropolitana *all-optical*, come nelle architetture *metro-access* descritte, consentirebbe di evitare le conversioni ottico-elettro-ottiche (O-E-O): si stima che circa il 60-70% dei costi operativi associati complessivamente ad una rete sia proprio legato ai *transponder* ottici che effettuano tali conversioni [13]. Ridurre le conversioni O-E-O è di fondamentale importanza non solo dal punto di vista della riduzione dei consumi energetici ma anche dal punto di vista del rispetto dell'ambiente: nel 2007 il 37% delle emissioni di carbonio dell'intero settore ICT era associato all'infrastruttura di telecomunicazione e dei dispositivi; le reti metropolitane e di accesso contribivano all'energia totale delle reti per circa il 60% [21].

La necessità di ripensare l'architettura e la gestione del traffico sulle

reti metro deriva anche da un'altra considerazione: contestualmente alla diffusione dei servizi ultra-broadband nelle reti ad alta capacità su cui negli ultimi anni si stanno concentrando gli investimenti delle telco, anche i requisiti di banda sul segmento metro aumenteranno considerevolmente, trainati essenzialmente dal video IP e dai servizi *cloud*. In altri termini, infatti, poiché le applicazioni *client-server* richiedono sempre più l'accesso a Data Base distribuiti che devono comunicare tra loro, si assiste ad un progressivo aumento del traffico "orizzontale", oltre che a quello "verticale" tra *client* e *server*. Secondo uno studio di Alcatel Lucent, il traffico sulle reti metro è in crescita del 560% dal 2012 alla fine del 2017, con un tasso pari a circa il doppio rispetto a quello previsto sulle reti *backbone* [22]. Quest'ultimo dato è confermato dalle previsioni di Cisco (riportate in **figura 9**), secondo le quali alla fine del 2019 il traffico sulle reti metro

rappresenterà il 66% del traffico IP complessivo. Particolarmente indicativo è che nel 2017 si prevede che il 75% del traffico sarà terminato localmente all'interno della rete metro, ovvero solo il restante 25% uscirà da tale segmento per attraversare le reti *backbone* [23]. Fino ad oggi il traffico metro era caratterizzato prevalentemente da flussi "north-south", ovvero dall'utilizzatore finale ad una "sorgente di contenuti" centralizzata a livello nazionale e accessibile tramite *backbone*. Grazie allo sviluppo delle CDN, le "sorgenti di contenuti" saranno sempre più distribuite sul territorio in *data center* il più possibile vicini agli utenti per migliorare la QoE (basti pensare ad applicazioni come il *caching* di contenuti video). Per di più il traffico metro si sta evolvendo sempre di più nei flussi "east-west", ovvero tra nodi interni

alla rete metro, tipicamente tra *data center* locali per il *delivery* dei servizi *cloud* [22].

Non è inverosimile prevedere che la crescita delle tipologie di traffico sopra descritte renderanno nei prossimi anni la rete metro il nuovo collo di bottiglia dell'intera rete di telecomunicazioni per l'erogazione dei nuovi servizi *bandwidth-intensive*. Pensare di ovviare al problema incrementando semplicemente la capacità dei vari link di comunicazione probabilmente non potrà rappresentare una soluzione *cost-effective*. Un ulteriore requisito, per la verità non nuovo, per le reti metropolitane è relativo alla loro affidabilità e ai meccanismi di protezione dai guasti che possano garantire una bassa probabilità di fuori servizio. Da sempre le reti metro, infatti, hanno topologie ad anello che assicurano una doppia via fisica diversificata per i collegamenti e tipicamente nelle reti metro WDM si impiegano anelli a doppia fibra. Nell'ultimo de-

cennio sono state proposte anche soluzioni ad anello a singola fibra bidirezionale auto-ripristinante che sono basate su particolari *add-drop multiplexer* bidirezionali. [24]

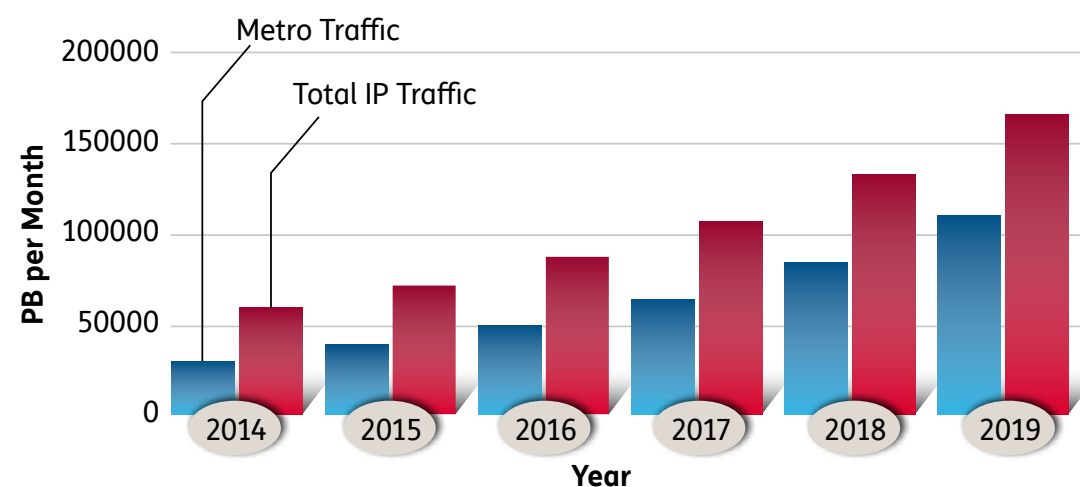
L'auto-ripristino naturalmente implica il ricorso a meccanismi di "ri-configurazione" (in questo caso di auto-riconfigurazione) che riconducono tale specifica nell'alveo del requisito principale che rimane quello della flessibilità nelle sue varie declinazioni che includono anche il supporto di VLAN configurabili, la facilità di *provisioning* dei nuovi collegamenti, tecniche di controllo della congestione e di allocazione dinamica della banda, tecniche di *policing* e di *shaping* nell'ottica di migliorare la QoS.

## Conclusioni

I trend qui delineati, le sfide tecnologiche e le possibili soluzioni innovative proposte dalla ricerca scientifica

pongono l'accento sulla necessità e sull'opportunità strategica di pensare a nuove soluzioni per le reti di accesso e metro-access.

In un suo saggio del 2009 [25], il sociologo Manuel Castells, riferendosi alle reti nella loro accezione di forma organizzativa (un gruppo di persone, un movimento, un'azienda, etc.), individuava tre caratteristiche principali che garantiscono la loro efficienza: la scalabilità, ovvero la capacità di variare le proprie dimensioni, la capacità di sopravvivenza, ovvero di resistere agli attacchi esterni e la flessibilità, appunto, ovvero la capacità di riconfigurarsi in sintonia con l'ambiente in mutamento. E' interessante e, al tempo stesso, affascinante riconoscere come queste peculiarità "sociologiche" corrispondano perfettamente alle opportunità "tecnologiche" offerte dall'applicazione alle reti metro e metro-access del concetto di riconfigurabilità nella prospettiva dei possibili scenari futuri ■



9  
Previsione di crescita del traffico  
Cisco 2015 [23]

## Note

- 1 Con il termine *Network Function Virtualization* si intende, semplificando molto, la virtualizzazione delle funzioni di rete implementandole in *software* (VNF) su *virtual machine*. Un altro concetto base della NFV è il disaccoppiamento delle funzioni di rete dall'*hardware* in modo che possano essere implementate su *hardware* COTS. [7]
- 2 Molto sinteticamente, nella terminologia di *Open-Flow*, un flusso rappresenta una sequenza di pacchetti che, all'interno di un apparato di rete *Open-Flow compliant*, hanno in comune una o più azioni

eseguite dal nodo su quei pacchetti.

- 3 Una API è un insieme di funzioni *software* di un sistema (in questo caso del *controller SDN*) che possono essere invocate da altri sistemi (nel nostro caso dalle applicazioni). Chi invoca una funzione deve naturalmente conoscere la "segnatura" della funzione che consiste nel nome della funzione e nel tipo e numero di parametri da passare.

4 <http://www.warp5.eu/tech.html>

5 <http://ir.semi.ac.cn/bitstream/172111/7023/1/28.pdf>

## Bibliografia

- [1] L. Grossi, E. Maffione, G. Marasso, S. Ruffino, "SDN e NFV: Quali Sinergie?", Notiziario Tecnico - Telecom Italia, N. 2, pp. 48-65, 2014.
- [2] K. Kerpez, G. Ginis, "Software-Defined Access Networks (SDAN)", 48th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS), Princeton (NJ), 2014.
- [3] A. Amokrane, J. Xiaoy, J. Hwang, N. Anerousis, "Dynamic Capacity Management and Traffic Steering in Enterprise Passive Optical Networks", IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM), Ottawa (ON), 2015.
- [4] R. Roy, W. van Etten, "Case for Dynamic Reconfigurability in Access Networks", Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering, Vol. 6, pp. 240-250, 2009.
- [5] A. Amokrane, J. Hwang, J. Xiao, N. Anerousis, "Software defined enterprise passive optical network", 10th International Conference on Network and Service Management (CNSM), Rio de Janeiro, 2014.
- [6] G. Ginis, S. Galli, M. Goldberg, "Software Defined Access Networking: Taking NFV and SDN to the Edge", ASSIA White Paper, 2014.
- [7] E. Demaria, A. Pinnola, N. Santinelli, "La Virtualizzazione di Rete: lo standard NFV", Notiziario Tecnico - Telecom Italia, N. 2, pp. 84-97, 2015.
- [8] K. Katsalis et al., "CONTENT Project: Considerations towards a Cloud-based Internetworking Paradigm", IEEE SDN for Future Networks and Services (SDN4FNS), Trento, 2013.
- [9] F. Vacondio, O. Bertran-Pardo, Y. Pointurier, J. Fickers, A. Ghazisaeidi, G. de Valicourt, J.-C. Antona, P. Chanclou, S. Bigo, "Flexible TDMA access optical networks enabled by burst-mode software defined coherent transponders", Eu. Conf. and Exhibition on Optical Commun. (ECOC), London, 2013.
- [10] T. Muciaccia, S. Pileri, "Reti WDM PON: principali sfide", Notiziario Tecnico - Telecom Italia, N. 2, pp. 126-139, 2014.
- [11] N. Cvijetic, A. Tanaka, P. Ji, K. Sethuraman, S. Murakami, T. Wang, "SDN and OpenFlow for dynamic flex-grid optical access and aggregation networks", IEEE/OSA J. Lightwave Techn., vol. 32, no. 4, pp. 864-870, 2014.
- [12] J. Oliveira, M. Siqueira, G. Curiel, A. Hirata, F. van't Hooft, D. Macedo, M. Colazza, and C. Rothenberg, "Experimental testbed of reconfigurable flexgrid optical network with virtualized GMPLS control plane and autonomic controls towards SDN", SBMO/IEEE MTT-S Int. Microwave Optoelect. Conf. (IMOC), pp. 1-5, 2013.
- [13] S. Augusto, V. Brizi, R. Tavilla, "L'evoluzione della trasmissione ottica", Notiziario Tecnico - Telecom Italia, N. 1, pp. 60-89, 2009.
- [14] E. J. Klein, P. Urban, G. Sengo, L. T. H. Hilderink, M. Hoekman, R. Pellens, P. van Dijk, A. Driessen, "Densely integrated microring resonator based photonic devices for use in access networks", Optics Express, Vol. 15, No. 16, 2007.
- [15] S. J. B. Yoo, "Optical Packet and Burst Switching Technologies for the Future Photonic Internet", Journal of Lightwave Technology, Vol. 24, Issue 12, pp. 4468 - 4492, 2006.
- [16] S. Pato, J. Pedro, J. Santos, H. Silva, J. Pires, P. Monteiro, "All-Optical Remote Node for Cost-Effective Metro-Access Convergence", Conf. on Telecommunications (ConfTele), S.ta Maria Feira, Portugal, 2009.
- [17] S. Wong, W. Shaw, K. Balasubramanian, N. Cheng, L. Kazovsky, "MARIN: Demonstration of a Flexible and Dynamic Metro-Access Integrated Architecture", IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM '07), Washington (DC), 2007.
- [18] J. Hoover, J. Van Horne, "SARDANA Tackles The Bandwidth Challenge", Broadband Communities, October 2011.
- [19] B. Schrenk, F. Laudenbach, R. Lieger, T. Lorünser, P. Bakopoulos, A. Poppe, M. Stierle, H. Avramopoulos, H. Leopold, "Passive ROADM Flexibility in Optical Access With Spectral and Spatial Reconfigurability", IEEE Journal On Selected Areas In Communications, Vol. 33, No. 12, pp. 2837-2845, 2015.[24]
- [20] V. Reddy, L. Jolly, "Radio over Fiber (RoF) Technology and Integration of Microwave and Optical Network for Wireless Access", International Conference and Workshop on Emerging Trends in Technology (ICWET), Malaysia, 2015.
- [21] P. Castoldi, L. Valcarengi, I. Cerutti, "Efficienza energetica nelle reti a larga banda", La Comunicazione, Vol. LVII, pp. 37-42, 2011.
- [22] Bell Labs, Metro Network Traffic Growth: An Architecture Impact Study, Alcatel-Lucent Strategic White paper, 2013.
- [23] Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2014-2019, Cisco White Paper, 2015.

- [24] Z. Wang, C. Lin, C. Chan, "Demonstration of a Single-Fiber Self-Healing CWDM Metro Access Ring Network With Uni-directional OADM", IEEE Photonics Technology Letters,

- Vol. 18, No. 1, 2006.  
[25] M. Castells, "Communication Power", Oxford University Press, New York, 2009.

## Acronimi

API	Application Program Interface	OFS	Optical Flow Switching
AWG	Array Waveguide Grating	OLS	Optical Label Switching
BoD	Bandwidth on Demand	OLT	Optical Line Termination
CDN	Content Delivery Network	ONT	Optical Network Termination
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor	ONU	Optical Network Unit
CO	Central Office	OpEx	Operational Expenditures
CPE	Customer Premises Equipment	OPS	Optical Packet Switching
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing	PON	Passive Optical Network
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier	QoE	Quality of Experience
FEC	Forward Error Correction	ROADM	Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer
GPON	Gigabit-capable Passive Optical Network	RSOA	Reflective Semiconductor Optical Amplifier
IaaS	Internet as a Service	RN	Remote Node
IoT	Internet of Things	SARDANA	Scalable Advanced Ring Dense Access Network Architecture
IPoWDM	Internet Protocol over Wavelength Division Multiplexing	SDN	Software Defined Network
LAN	Local Area Network	SOI	Silicon On Insulator
LCoS	Liquid Crystal on Silicon	TDM	Time Division Multiplexing
MARIN	Metro Access Rings Integrated Network	VDSL	Very-high speed Digital Subscriber Line
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems	VLAN	Virtual Local Area Network
NFV	Network Functions Virtualization	VNF	Virtual Network Function
OBS	Optical Burst Switching	WDM	Wavelength Division Multiplexing
OCS	Optical Channel Switching	WSS	Wavelength Selective Switch



**Tommaso Muciaccia** [tommaso.muciaccia@telecomitalia.it](mailto:tommaso.muciaccia@telecomitalia.it)

ingegnere elettronico, entra in Azienda nel 2012. Si è occupato della progettazione esecutiva della rete d'accesso ultra-broadband in rame e fibra ottica e di project management con riferimento ai programmi di interventi per lo sviluppo della banda ultralarga nelle regioni Puglia e Basilicata (bandi EUROSUD). Oggi si occupa della definizione operativa e del presidio a livello nazionale del piano di sviluppo FTTH relativamente alla network construction. Collabora con il Photonics Research Group del Politecnico di Bari ed è coautore di pubblicazioni su riviste scientifiche internazionali. ■



**Sandro Pileri** [sandro.pileri@telecomitalia.it](mailto:sandro.pileri@telecomitalia.it)

ingegnere elettrotecnico con master in telecomunicazioni. Assunto nel 1982 presso la Scuola Superiore Guglielmo Reiss Romoli, iniziando l'attività di docenza nel campo delle reti telefoniche PSTN, ISDN, Rete Intelligente e delle reti dati (Frame Relay, ATM e IP). Negli ultimi anni si è occupato di Telefonia su IP e di evoluzione della rete di accesso fissa. Dal 1999 al 2007 è stato professore a contratto del corso Reti e Sistemi di TLC presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di L'Aquila. Dal 2010 lavora come docente e project manager presso la società Telecom Italia HR Services nella service unit Education. ■