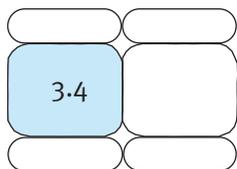




VERSO LA QUARTA GENERAZIONE RADIOMOBILE

Vittorio Trecordi

Lo sviluppo delle reti mobili è tra i fattori che hanno maggiormente influenzato l'evoluzione delle telecomunicazioni, mutando le abitudini degli utilizzatori dei servizi di comunicazione in ambito personale e professionale. Il settore radiomobile mantiene una spinta propulsiva positiva, alimentata dal progresso delle tecnologie e dalla continua innovazione degli ambiti di utilizzo. Il lavoro offre una sintesi sulle tendenze in atto nella rete di trasporto per i servizi radiomobili, correlandola all'evoluzione dei servizi, dei terminali, della struttura della rete di accesso radio e dell'architettura emergente per l'erogazione dei servizi.



1. INTRODUZIONE

La tecnologia radiomobile cellulare standardizzata in Europa dall'ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) nell'ambito dell'iniziativa GSM (*Global System for Mobile communication*) ha portato le telecomunicazioni nei paesi europei a ricoprire livelli di eccellenza riconosciuti in ambito internazionale, sia per la qualità della tecnologia e dei manifatturieri che hanno contribuito al progetto, sia per la penetrazione e ricchezza dei servizi portati sul mercato dagli operatori di telecomunicazioni. Sulla base di quell'esperienza, etichettata come radiomobile di seconda generazione (2G) per distinguerla dal radiomobile cellulare analogico (1G), si è costruita una traiettoria di sviluppo e crescita, contrassegnata da una spinta positiva che attualmente vive la fase di terza generazione (3G) evoluta e tuttavia sembra ancora lontana dall'esaurire i suoi effetti benefici di innovazione e di sviluppo economico.

Questo contributo inquadra le linee di trasformazione dei tre segmenti di rete (accesso, *backhauling*, trasporto) che caratterizza-

no l'intero collegamento per i sistemi mobili di nuova generazione (3G evoluto e 4G), inquadrando nell'evoluzione dei servizi e dei terminali a larga banda e limitandole al solo ambito di proposte in sede europea.

Sono numerosi i lavori che hanno trattato l'evoluzione delle reti mobili, fenomeno di grande rilevanza e complessità, caratterizzato da notevole incertezza sulle tendenze che si affermano, incontrando il favore del mercato (per esempio, [1]). È ovviamente possibile volgere lo sguardo al passato e riesaminare trattazioni del tema oggetto del lavoro, rilevando in modo critico ("col senno di poi" e sulla base della conoscenza accumulata) gli scostamenti tra il livello di comprensione dei fenomeni e la divaricazione delle traiettorie previste rispetto a quelle concretamente realizzate. Nel fare questa valutazione retrospettica il primo rilievo evidente è nella difficoltà incontrata dagli operatori mobili nell'innovare con successo il proprio portafoglio dei servizi, ancora largamente legati all'offerta telefonica e di messaggistica. I tentativi di rinnovare l'offerta nel passaggio alla larga banda con servizi di videochiamata o di

fruizione televisiva basata su standard tradizionali hanno avuto poco successo ed oggi gli operatori mobili si trovano a reagire ad uno stimolo proveniente dall'esterno. Infatti, la vera spinta al decollo della larga banda mobile è venuta da Internet e dall'offerta di alcuni operatori *Over-The-Top*¹ particolarmente illuminati (Apple per prima, seguita a ruota da Google), che hanno contestualmente sviluppato terminali di facile utilizzo (e nel caso di Apple dal design accattivante) e piattaforme per la creazione e lo sviluppo di servizi (gli *Application Store* con i loro sistemi di commercializzazione e gli ecosistemi di sviluppo delle applicazioni). È opportuno osservare che la capacità di Apple e Google di incontrare l'interesse degli utenti si è sviluppata seguendo due modelli di business molto differenti e lontani da quelli degli operatori mobili tradizionali: Apple ha elaborato una proposta di valore a prezzi elevati e con remunerazione nella vendita di prodotti e servizi (propri e di terzi), mentre Google propone una vasta gamma di prodotti e servizi, finora largamente contando sugli introiti pubblicitari.

Queste tendenze emerse ai bordi della rete spingono al potenziamento della capacità della rete radiomobile, soprattutto in termini di capacità di trasporto, per riscontrare il fabbisogno del traffico in forte crescita, ma anche di qualità del servizio, poiché talune applicazioni (come il *video streaming*, la comunicazione vocale e il *gaming-on line*) non possono farne a meno. Gli operatori mobili sono impegnati a conciliare l'esigenza di investire per potenziare le risorse di rete con la necessità di trasformare il proprio portafoglio servizi e la strategia commerciale in modo da mantenere il posizionamento di business e le marginalità, evitando di essere relegati a meri fornitori di una *commodity* (trasporto a qualità indifferenziata) e a competere solo sulla base dei prezzi. In questa linea di ragionamento, appare estremamente incerto il livello di intelligenza che verrà incor-

porato nella rete dell'operatore radiomobile, attraverso architetture di controllo complesse centrate sull'operatore (in linea con la strategia della *IMS - IP Multimedia Subsystem - core network*), rispetto a quello che verrà svolto ai bordi della rete. Il ruolo dell'offerta radiomobile per contrastare il fenomeno del *Digital Divide* a larga banda, portando soluzioni a costo compatibile con il profilo dei ricavi laddove la rete cablata non trova senso economico, rimane indiscusso. Decisamente più controverso è il ruolo di sostituzione e alternativa alla rete cablata per i servizi a larga banda ove non sussistano le barriere del *Digital Divide* in quanto il potenziale e la capacità effettiva di rete del radiomobile rimangono non confrontabili con quelle della rete cablata. In ambedue i casi, le offerte commerciali pubblicizzano la velocità massima teorica di picco raggiungibile, ma solo agli addetti ai lavori è chiaro che gli effetti delle caratteristiche dell'impianto (esempio, lunghezza della tratta di accesso e caratteristiche trasmissive del canale di accesso) e la condivisione delle risorse delle due reti portano a velocità accessibili sensibilmente diverse nei due casi. Gli organismi di regolazione stanno spingendo gli operatori verso maggiore trasparenza nella proposizione commerciale, mentre la differenziazione della qualità sta progressivamente diventando una leva competitiva.

2. L'EVOLUZIONE DEI SERVIZI E I NUOVI TERMINALI

I servizi basilari della comunicazione telefonica personale e ubiqua e lo scambio di messaggi brevi (*Short Message Service* o SMS) ancora oggi rappresentano il maggior valore per la gran parte dei clienti degli operatori radiomobili. Il contributo di questi servizi tradizionali domina tuttora i ricavi degli stessi operatori radiomobili. Tuttavia, l'avvento dell'accesso a larga banda nelle reti ad accesso cablato e radiomobili spinge verso una graduale trasformazione della composizione dei ricavi, tesa a contrastare gli effetti tipici di un mercato maturo, caratterizzato da saturazione, forte standardizzazione dei servizi e competizione basata sul prezzo e conseguente ridimensionamento dell'ARPU (*Average Revenue Per User*, ossia ricavo medio per utente) e tendenza al

¹ Con il termine *Over the Top* si definiscono tutti quegli attori del mercato che sfruttano intensamente le reti per i loro servizi molto redditizi senza partecipare ai relativi costi. Tipici esempi sono Google, Facebook, Twitter, Skype ecc. e potranno essere accompagnati in futuro da gestori televisivi per una distribuzione di programmi in downloading IP a qualità garantita.

consolidamento degli attori di mercato. Gli operatori di telecomunicazioni sono da tempo impegnati in iniziative tese a compensare la contrazione dei ricavi tradizionali con nuove fonti, legate ai servizi a larga banda dati e multimediali. L'offerta di un portafoglio di servizi a larga banda nelle aree scarsamente o non servite dalla rete ad accesso cablato rappresenta una prerogativa dello sviluppo delle reti radiomobili, che si candidano a risolvere i problemi del *Digital Divide* nell'era della larga banda.

Le prime esperienze degli operatori mobili nel lancio di servizi dati e multimediali, basate su servizi di messaggistica multimediale (MMS - *Multimedia Messaging Service*), servizi di video-chiamata, servizi di accesso a contenuti televisivi diffusi in modalità broadcasting (secondo lo standard DVB-H - *Digital Video Broadcasting - Handheld*, legato al digitale terrestre) non hanno determinato una svolta significativa, pagando una modesta corrispondenza rispetto ai veri fabbisogni degli utenti.

I *driver* della vera inversione di tendenza sembrano con quasi certezza i servizi dati (e quindi anche multimediali) in mobilità, riconducibili a due direttrici di mercato:

□ la straordinaria diffusione di dispositivi *smartphone*, terminali con funzionalità straordinariamente evolute rispetto a quelle di un semplice terminale per l'accesso a servizi di telefonia e messaggistica testuale breve, guidata dal fenomeno Apple iPhone, che ha creato le condizioni per un'esperienza d'utente fortemente distintiva dal punto di vista del design e dell'usabilità dello schermo *touch-screen* di grandi dimensioni, magistralmente sfruttato per aprire la via ad una moltitudine di servizi innovativi;

□ il lancio da parte degli operatori radiomobili di un'offerta di accesso radiomobile ad Internet a larga banda, basata su condizioni commerciali "*semi-flat*"² e sull'impiego di semplici

dispositivi (usualmente dotati di interfaccia USB e per questo chiamate "chiavette USB") per l'interfacciamento alla rete radio a larga banda di postazioni di lavoro (PC o laptop).

La prima componente, ossia il successo degli *smartphone*, è stato anticipato, anche se in misura contenuta e solo per gli utenti affari, dalla soluzione Blackberry di RIM (particolarmente apprezzata per la sua affidabilità nell'accesso ai servizi di mail aziendale). La svolta decisiva avviene nel 2007 con il lancio di Apple iPhone, seguito dall'introduzione sul mercato di una piattaforma aperta per i terminali mobili basata su sistema operativo Android di Google. Le mosse innovative di Apple e RIM hanno stimolato i player dominanti del mercato dei terminali, Nokia in primis, a rispondere con soluzioni competitive sotto il profilo dell'usabilità, della ricchezza delle funzionalità e dei servizi. Il successo di questi terminali e la conseguente impennata del traffico dati, è in parte legata ad un nuovo modello di introduzione di servizi in rete mobile, non più basato solo sull'iniziativa degli operatori mobili, ma sull'approccio mutuato da Internet dei servizi *Over-the-Top*, ossia dei servizi messi a disposizione da soggetti che operano all'esterno della rete, utilizzata per il trasporto dei dati. Il fenomeno degli *Application Store*, i *marketplace* di servizi e applicazioni sviluppati da piccole unità indipendenti e messi in rete per essere acquistati, ha creato le condizioni per un incontro diretto della domanda e dell'offerta con target di mercato svincolato dalla base clienti dell'operatore di comunicazione. La stessa industria del software per i servizi in rete è impattata da queste trasformazioni, rilevate in questa sede in modo superficiale.

La seconda componente, ossia l'aggiunta di una forte capacità dati, ha originato un'ondata di nuove utenze della rete radiomobile focalizzate sull'utilizzo dei servizi dati a larga banda con obiettivo primario l'accesso ad Internet (esempio, *browsing*, *Social Networks* e *mail*, ma anche *streaming video* di brevi filmati di qualità modesta, accessibili da portali tipo "Youtube" e da traffico P2P con *User Generated Content*) e ai servizi Intranet per l'utenza affari (es. accesso alla posta elettronica o l'accesso alle applicazioni aziendali per utenti nomadici e in mobilità).

La proposizione commerciale degli operatori

² Le offerte d'accesso radiomobile a larga banda ad Internet comportano un costo mensile, differenziato per il livello di banda trasmissiva massima teorica (associato alla tecnologia 3G o 3G evoluta utilizzata), indipendente dall'utilizzo se non si supera una soglia sul volume di dati o sul tempo di collegamento. Superata la soglia, le condizioni commerciali comportano una remunerazione a consumo basata sul volume di dati trasferiti.

mobili, indirizzata in particolare all'utenza residenziale, presenta il servizio broadband *wireless* per la prerogativa della mobilità, ma anche come alternativa al servizio con accesso cablato (usualmente ADSL o sue evoluzioni). Nel caso dei servizi d'accesso radio a larga banda ad Internet, le velocità disponibili sono fortemente influenzate dalle condizioni del canale radio, sia per gli effetti della condivisione della capacità trasmissiva tra più utenti agganciati ad una stessa cella, sia per le caratteristiche trasmissive del canale di comunicazione, determinate dal rapporto segnale-interferenza/rumore.

Un'altra componente a fortissimo impatto sia sull'evoluzione del traffico in rete che sull'evoluzione dell'architettura e delle tecnologie in rete - con riflessi anche sul modello di *business* degli operatori - è l'uso del VoIP (*Voice Over IP*), ossia l'uso del canale radio dati a larga banda per accedere ai servizi telefonici. È evidente che l'impiego del servizio dati, a tariffa "semi-flat", per effettuare chiamate telefoniche, prefigura per gli operatori mobili la cannibalizzazione della fonte di ricavo dominante. Pertanto, si sta affermando presso gli operatori radiomobili la pratica di ammettere l'uso del VoIP esclusivamente a fronte del riconoscimento di un sovrapprezzo.

Un lavoro recente [2] esamina l'impatto del VoIP sul business degli operatori mobili, esaminando anche quanto accade in Giappone e Corea (molto avanti nella diffusione del *broadband* mobile). Gli operatori mobili stanno progressivamente trasformando il portafoglio dei servizi e il pricing per contrastare il declino dell'ARPU.

In particolare in Giappone, negli anni dal 2002 al 2010, l'ARPU mobile segna un calo medio del 33% (l'ARPU dati è cresciuto del 58% mentre l'ARPU voce è calato del 54%), con un contributo nel 2010 del 45% dei servizi dati all'ARPU. Allo stesso tempo, la percentuale del traffico dati nella rete dell'operatore giapponese NTT è giunta al 90% del traffico totale in rete nel 2009 (con un tasso medio di crescita annuo negli ultimi 4 anni pari al 54%, invece il traffico voce cala al ritmo del 2%), mentre nello stesso periodo anche nella rete di Vodafone la percentuale del traffico dati è circa il 70% [3].

Il successo di nuovi *player* del mercato della telefonia (Skype ha superato la soglia dei 27

milioni di utenti contemporanei attivi nel mondo e il 12% del traffico a lunga distanza nel 2009 - con tasso di crescita del 40% nel 2010, ma anche Google con la strategia di sviluppo della Google Voice) operanti secondo una logica di servizio *Over-The-Top* è fonte di notevoli preoccupazioni per gli operatori mobili tradizionali. Dista particolare impressione l'approccio aggressivo di Google che dall'agosto 2010, in corrispondenza del lancio di Google Voice per Gmail, e per tutto il 2011, offre chiamate gratuite per gli Stati Uniti e il Canada (per terminazioni fisse e mobili).

3. CRESCITA E MUTAZIONE DELLA MISCELA DI TRAFFICO IN RETE

Il successo dei servizi dati a larga banda, incoraggiato anche da formule tariffarie indipendenti, entro certi limiti, dal tempo di utilizzo e dal peso del traffico, ha determinato un'impenna del traffico nelle reti degli operatori mobili, spingendoli in modo deciso verso il potenziamento delle risorse di rete anche a fronte di condizioni di remunerazione degli investimenti non completamente giustificati. Tra l'altro è importante osservare che, con l'incremento del traffico dati, l'indicatore più significativo della potenzialità della rete di un operatore mobile diventa la capacità gestibile più che la copertura (tipica nel servizio telefonico mobile).

Uno studio recente [4] approfondisce la criticità del modello di *business* degli operatori mobili legato allo sviluppo della larga banda, evidenziando il ruolo non secondario dei ricavi e margini da traffico telefonico mobile. Nel lavoro si sostiene che un utente di traffico dati mobile a larga banda genera circa 130 volte il traffico di un utente telefonico medio, mentre paga l'1% del valore del traffico voce per *MegaByte*. Questa condizione di asimmetria viene etichettata e sottolineata dagli autori come "insostenibile". Autorevoli analisti del mercato prevedono che nei Paesi sviluppati, se gli operatori manterranno forme di tariffazione largamente indipendenti dall'uso per i servizi mobili a larga banda, il traffico per utente crescerà di oltre 0,5 GByte al mese fino al 2015, mentre i ricavi per *GigaByte* caleranno di oltre l'80% [5]. Sulla base di queste previsioni e del-

la propria esperienza sui costi operativi e di capitale degli operatori mobili, un manifatturiero ha prodotto uno studio dal contenuto provocatorio, stimando tra il primo quarto del 2014 e il secondo quarto del 2015 il momento in cui il costo supererà il ricavo per *GigaByte* proprio a causa della divaricazione dei ricavi e dei costi per sostenere il potenziamento della rete per la crescita del traffico dati [6].

Ericsson ha recentemente [7] presentato dati sul traffico trimestrale (confronto 2010-2009 nel primo trimestre) rilevato con misure sulle reti mondiali, evidenziando una crescita del 175% del traffico dati totale (misurato in *Terabyte* al mese sia in *upstream* che *downstream*, escluso il traffico DVB-H, Wimax, M2M e WiFi).

La crescita complessiva dichiarata negli ultimi due anni è del 280% e, dai dati misurati, risulta che già a Dicembre 2009 è avvenuto il sorpasso del traffico dati rispetto al traffico voce (intorno a 140.000 TByte al mese su scala mondiale).

Cisco Systems ha stimato una crescita anno su anno del 92% del traffico dati mobile globale tra il 2010 e il 2015 (da 240.000 TByte³ del 2010 a 6.300.000 TByte al mese nel 2015) [8]. Nel 2010 il traffico mobile globale è cresciuto di 2,6 volte, con un tasso di crescita superiore a quello stimato nella previsione dell'anno precedente

(+159% invece di 149%). Gli *smartphone* rappresentano solo il 13% dei terminali radiomobili, ma generano oltre il 78% del traffico (nel 2010 uno *smartphone* tipicamente ha generato un traffico dati pari a 24 volte quello di un semplice cellulare – 79 MB contro 3,3 MB al mese). Nel 2010 sono stati collegati alla rete mobile circa 3 milioni di *tablet* PC (prevalentemente iPad di Apple) capaci di generare in media 5 volte il traffico di uno *smartphone* (il traffico per *tablet* è 405 MByte al mese contro i 79 MByte al mese per lo *smartphone*). I laptop connessi alla rete mobile nel 2010 sono 94 milioni e mediamente hanno determinato 22 volte il traffico di uno *smartphone* (1,7 GByte di traffico medio al mese per laptop, con una crescita del 49% rispetto al 2009).

La figura 1 riporta la proiezione della crescita del traffico pubblicata da Cisco Systems [8]. È opportuno precisare che le previsioni si basano su ipotesi inerziali per quanto riguarda le strategie di commercializzazione dei servizi dati radiomobili a larga banda e potrebbero essere ridimensionate se, come sta iniziando ad accadere, gli operatori si dirigessero verso politiche di prezzo maggiormente orientate al consumo (tipicamente con l'introduzione di limiti sulla quantità di dati compresa nel canone mensile e applicazione di remunerazione a volume oltre la soglia).

Le analisi del traffico generato dagli utenti mobili a larga banda evidenziano come il traffico video stia crescendo nelle reti radiomobili del mondo, determinando il 40% del traffico nel 2010 (per il 2011 si stima che il traffico video salga al 60% con un contributo sia dello *streaming* che delle *video chat*). Le risorse di rete mobile a larga banda sono fortemente sollecitate dalla tendenza emergente del video, caratterizzato da forte fabbisogno di banda e di tempi di consegna limitati.

Un ulteriore elemento degno di nota è la disparità tra i comportamenti degli utenti: il 10% degli utenti sono responsabili dell'85% circa del traffico mobile.

È importante sottolineare che la crescita del traffico dati mobile in futuro sarà fortemente impattata dallo sviluppo delle comunicazioni M2M (*Machine to Machine*) con un aumento importante del numero di terminali appositi (non accompagnato da grandi volumi di traffico).



FIGURA 1

Previsioni di crescita del traffico dati mobile su scala mondiale [8]

³ Un Terabyte è 10^{12} Byte, 1000 TByte sono 1 PByte (10^{15} Byte) e 1000000 TByte sono 1 EByte (10^{18} Byte).

4. IMPATTO DELLA CRESCITA DEL TRAFFICO SULL'ARCHITETTURA E SUL DIMENSIONAMENTO DELLA RETE

La sollecitazione impressa da crescite del traffico sull'architettura e sul dimensionamento della rete ha costretto gli operatori mobili a prestare attenzione al fenomeno e ad intraprendere una serie di attività di carattere tattico e strategico.

La saturazione della risorsa radio in accesso, limitata dalla capacità disponibile a tutti i terminali che simultaneamente sono attivi e comunicano in una regione del territorio, può essere contrastata attraverso il potenziamento della capacità.

Tale fondamentale obiettivo può essere perseguito attraverso differenti linee di azione, non mutuamente esclusive e intraprese con diversa intensità da tutti gli operatori mobili:

- aumento della densità delle celle;
- impiego di bande maggiori (più frequenze per cella o maggiore disponibilità di bande licenziate attraverso operazioni di *refarming* - riassetto o riallocazione - dello spettro e nuove allocazioni, rese possibili dal Dividendo digitale che è reso disponibile - con qualche dubbio di entità per l'Italia - nel passaggio della televisione dall'analogico al digitale)⁴;
- passaggio alle generazioni successive delle tecnologie di accesso in grado di aumentare fortemente la capacità trasmissiva nelle direzioni *downstream* e *upstream* usando in modo sempre più efficiente la risorsa radio.

Un'ulteriore importante opzione per il potenziamento della risorsa radio è l'introduzione di "femtocelle", ossia celle di piccola dimensione da impiegare per la copertura radio all'interno degli appartamenti col risultato di scaricare (denominato come "*offload*") su rete fissa il traffico generato *indoor* (superiore al 50%) [9].

⁴ È opportuno precisare che le caratteristiche della risorsa radio sono fortemente dipendenti dalla gamma di frequenze in cui si colloca la comunicazione. Pertanto, le operazioni di riassegnazione dell'impiego dello spettro delle frequenze per i diversi utilizzi, potrebbero rendere disponibili per la comunicazione radiomobile a larga banda gamme di frequenze (per esempio la banda 800 MHz) in cui il miglioramento delle prestazioni potrebbe avvantaggiarsi della migliore caratteristica trasmissiva della regione di spettro impiegata.

Le femtocelle operano alle medesime frequenze radio usate all'esterno (soggette a licenza) e quindi sono perfettamente compatibili con i terminali ordinari, che "agganciano" la femtocella analogamente a quanto farebbero con la stazione radiobase di una cella radiomobile. Nel caso di terminali equipaggiati con interfacce radio WiFi oltre a quella radiomobile (denominati terminali "*dual-mode*"), la raccolta del traffico radio *indoor* su rete fissa può avvenire attraverso la connessione ad un *access point* WiFi collegato a rete ad accesso cablato.

La crescita del traffico sollecita anche le risorse della rete di *backhauling*, ossia del segmento di rete dell'operatore che collega le stazioni radio base alla rete di trasporto (metropolitana o a grande distanza). La rete di *backhauling* è tradizionalmente basata su tecnologie a commutazione di circuito con canali realizzati in tecnologia cablata, usualmente fasci di canali TDM a 2 Mbit/s, che in futuro sfrutteranno una tratta di rete di accesso in fibra a grande capacità per raccogliere l'utenza mobile e oggi sono spesso realizzati con linee ADSL o ponti radio punto-punto (8 e 34 Mbit/s) sempre più inadeguati ad assecondare le tendenze di crescita. Infatti, il dimensionamento di questi collegamenti, numerosi e costosi, tradizionalmente determinato sulle stime di traffico per la telefonia e la messaggistica breve nelle reti 2G, richiede un sostanzioso potenziamento con il passaggio alla rete 3G e generazioni seguenti soprattutto in relazione all'impetuosa crescita del traffico dati a larga banda.

Ovviamente anche la rete di aggregazione e trasporto del traffico in ambito metropolitano e geografico è sollecitata dall'aumento del traffico e le strategie di ammodernamento praticate dagli operatori prevedono un impiego sempre maggiore delle tecnologie a commutazione di pacchetto, le più adatte alla gestione del traffico dati. In questo *trend* riveste importanza il crescente impiego della tecnologia IP (ossia a livello 3 del modello OSI) con supporto della qualità di servizio, ma anche l'impiego della tecnologia Ethernet (a livello 2 del modello OSI) arricchita con gestione del traffico e della qualità e di prestazioni aggiuntive per l'affidabilità e il trasporto di flussi numerici che riproducono le caratteristiche e i servizi dei circuiti TDM dedicati (*pseudowire emulation*).

Gli interventi di potenziamento delle risorse

dei diversi stadi della rete si associano ad azioni di razionalizzazione e ottimizzazione che, sfruttando le tecnologie più evolute e allineandosi con le architetture di rete emergenti, puntano al raggiungimento di sinergie tra reti dello stesso operatore per l'erogazione di servizi diversi (esempio, 2G, 3G e seguenti, ma anche sinergie tra reti per servizi di rete fissa e mobile e servizi convergenti fisso-mobile), ma anche sinergie tra reti di operatori diversi. Un operatore può perseguire sinergie interne ad esempio praticando la condivisione dei siti e della rete di *backhauling* per servizi differenti. Molto diffusi sono anche gli accordi tra operatori per la condivisione dei siti.

Queste linee di razionalizzazione e ottimizzazione assumono un rilievo fondamentale nel perseguire obiettivi sempre più sfidanti di contenimento dei costi (*Opex e Capex*) a fronte della tendenza descritta di aumento del traffico non associata a un corrispondente aumento dei ricavi.

La nuova pressione sul modello di business degli operatori mobili ha avuto esiti più dirompenti in alcuni casi. In Gran Bretagna due tra i maggiori player del mercato (T-Mobile e Orange) hanno intrapreso la via della fusione sotto un unico *brand* ("*Everything Everywhere*" è il nome eloquente del nuovo soggetto) per affrontare con maggior scala le sfide delle comunicazioni mobili.

Gli operatori che hanno fatto ricorso già da tempo all'esternalizzazione della gestione delle infrastrutture di rete (*outsourcing*), trasferendo al fornitore del servizio (usualmente un manifatturiero) gli oneri di manutenzione (come si è già verificato per 3 Italia con Ericsson), mantengono comunque il presidio sulle strategie di sviluppo della rete per le nuove tecnologie e i nuovi servizi.

Numerosi operatori hanno azionato le leve della gestione del traffico e della politica commerciale differenziata, per gestire gli effetti della crescita del traffico broadband mobile con effetti già nel breve periodo. Ad esempio, per contrastare il degrado diffuso delle prestazioni causato da sovraccarichi delle risorse di rete determinati da pochi utenti, spesso dediti all'utilizzo di servizi di download di file in modalità P2P (attività diffusamente praticata in violazione delle norme a tutela dei diritti d'autore), gli operatori hanno introdotto piani tariffari

che limitano (con l'introduzione di un "*cap*", cioè di un massimale) la quantità di dati che può essere scaricata in un dato periodo di tempo senza incorrere in costi aggiuntivi rispetto all'abbonamento mensile. La politica di *pricing* può prevedere limiti meno stringenti in corrispondenza di fasce di prezzo crescenti ed un costo addizionale per lotti di traffico utilizzato (generalmente un compenso per un determinato volume di dati scambiati nel corso di un mese). Alcuni operatori annunciano al cliente le condizioni di prossimità a soglie di costo addizionale, allo scopo di diffondere la sensibilità dei costi emergenti e di evitare un inconsapevole accumulo di bollette di valore eccezionale (fenomeno del "*bill shock*"). Ad agosto del 2010 l'Autorità per le Garanzie nelle Comunicazioni (AGCOM) ha emesso una Delibera che obbliga gli operatori radiomobili italiani ad attuare misure di annuncio per evitare le "bollette astronomiche" [10].

Oltre a ciò, numerosi operatori hanno introdotto tecniche di gestione del traffico, tese a limitare le risorse disponibili per traffici di tipo P2P, a salvaguardia della disponibilità di risorse per utenti che accedono ad altri servizi (salvaguardia di un principio di equità di trattamento e di protezione dei diritti dei clienti ad accedere ad un servizio con livelli minimi di qualità). L'attuazione di politiche di gestione del traffico richiede l'analisi dei dati in transito con tecniche di DPI (*Deep Packet Inspection*) per riconoscere il tipo di traffico e condizionarne il flusso (per esempio, limitando la banda a disposizione di un tipo di traffico o di ogni utente perseguendo obiettivi di equa distribuzione delle risorse). L'introduzione dei meccanismi di condizionamento del traffico solleva l'attenzione dei Regolatori per rilevare abusi riconducibili a discriminazioni contrarie alla libera concorrenza, carenza di trasparenza delle condizioni contrattuali e possibili violazioni delle norme sulla Privacy imputabili al trattamento delle informazioni tratte dall'analisi del traffico.

5. LA RETE RADIOMOBILE

Le numerose trasformazioni in atto nei servizi e nelle miscele di traffico nelle reti radiomobili sono strettamente connesse ad evoluzioni nelle reti dispiegate dagli operatori. Nel seguito si esaminano le linee di sviluppo che hanno ca-

ratterizzato l'evoluzione delle reti mobili in questi ultimi anni nei diversi segmenti costitutivi della rete. Innanzitutto si affronta l'evoluzione della rete di accesso, maggiormente correlata all'offerta di servizi e alle prestazioni offerte all'interfaccia con terminali e utenti. A seguire, si tratta l'evoluzione dell'architettura della rete di trasporto, presentando in modo disgiunto la porzione di rete che collega le stazioni radio base e i nodi di aggregazione (generalmente identificata con il termine di rete di "backhauling").

5.1. Tecnologia e prestazioni della nuova rete di accesso in tecnologia WCDMA

Le tecnologie di accesso delle reti radiomobili cellulari impiegate dagli operatori mobili europei hanno subito in pochissimi anni progressi molto rilevanti, riconducibili a tre onde di innovazione ben distinguibili.

La prima onda è partita dal GSM (2G), funzionante in Europa nella gamma di frequenze 900 MHz (e 1800 MHz in parte) con passi di canalizzazione di 200 kHz per una banda totale allocata di 120 MHz. Il GSM è principalmente concentrato sulla telefonia radiomobile cellulare e sulla possibilità di comunicazione dati sotto forma di messaggi brevi (i ben noti SMS). Con l'introduzione del GPRS (*Generalized Packet Radio Service* ovvero la cosiddetta generazione 2,5G) si è reso disponibile il trasporto dei dati a commutazione di pacchetto a velocità massima dell'ordine degli 80 kbit/s per utente (il massimo teorico è 171,2 kbit/s). L'avvento dell'EDGE (*Enhanced Data rates for GSM Evolution*) ha consentito agli operatori di sfruttare in modo più efficiente lo spettro, grazie all'adozione adattativa di una modulazione di ordine superiore (8 PSK per 8 *Phase Shift Keying*) che ha consentito di triplicare la velocità massima di trasferimento dati del GPRS. La rete di accesso radio sviluppatasi secondo questa ondata tecnologica è denominata GERAN (*GSM EDGE Radio Access Network*) e comprende la porzione di rete che include le BTS (*Base Tran-*

sceiver Station) e i relativi BSC (*Base Station Controllers*).

La seconda ondata tecnologica è quella dell'UMTS (3G), caratterizzato dall'uso della tecnica di modulazione WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*) ed operante nella gamma di frequenze attorno ai 2 GHz. UMTS è stato impostato fin dall'inizio per offrire più servizi (voce, dati, videocomunicazione) con gli standard 3GPP⁵ della serie 3.x.y del 2000 (la cosiddetta "Release 99").

Con il termine UTRAN (*UMTS Terrestrial Radio Access Network*) si indica la rete di accesso radio della tecnologia 3G e sue evoluzioni e comprende la sezione di rete che include i Node B (le stazioni radio base dell'UMTS) ed i RNC (*Radio Network Controller*).

Il 3GPP ha progressivamente sviluppato le evoluzioni del 3G attraverso una serie di versioni le cui caratteristiche sono sintetizzate nella tabella 1 e che rappresentano il massimo sfruttamento della tecnologia CDMA prima del salto tecnologico rappresentato dall'introduzione di metodi più avanzati di modulazione.

L'elemento più evidente del progresso delle versioni, partendo dalla 5 alla 8 e seguenti (attualmente sono in lavorazione la 9, la 10 e la 11), è l'incremento della velocità trasmissiva di picco messa a disposizione di una cella e condivisa da tutte le comunicazioni attive nella medesima, sia per le comunicazioni da terminale a rete (*upstream*), che nella direzione opposta (*downstream*). Queste miglie, a parità di sistema di modulazione WCDMA, unite a molte altre meno evidenti come la riduzione dei ritardi o l'ottimizzazione delle tecniche di recupero degli errori o la robustezza del segnale ai bordi della cella, sono dovute ad una serie di innovazioni introdotte nelle tecniche di modulazione e di codifica, ma anche nella struttura delle trame, nei protocolli, nella distribuzione delle funzioni tra elementi dell'architettura di rete, introduzione di sistemi d'antenna più sofisticati (come per esempio la tecnica MIMO o *Multiple In Multiple Out*), ampliamento del

⁵ Il 3GPP (*3-rd Generation Partnership Project*) è un'alleanza, formalizzata nel dicembre 1998, tra diversi enti internazionali di standardizzazione per sistemi di telecomunicazioni. Allo stato attuale, l'alleanza 3GPP ha coperto le specifiche di tutto il sistema GSM (includendo GPRS e EDGE), del sistema W-CDMA (UMTS in Europa) e si sta occupando di tutte le specifiche del futuro sistema di quarta generazione LTE (includendo LTE-Advanced). L'obiettivo originale del 3GPP è stato quello di produrre specifiche tecniche per un sistema mobile di terza generazione basato sulla *Core Network GSM*.

	R.99	Rel. 5	Rel. 6	Rel. 7		Rel. 8		Rel. 9
Anno finalizzazione standard	2000	2002	2004	2007		2009		2010-11
Tecnica	W-CDMA	HSDPA	HSDPA/HSUPA HSPA	HSPA + (step 1)	HSPA + (step 2)	HSPA+ (step 3 option 1)	HSPA+ (step 3 option 2) DC-HSPA	HSPA + evolution
Velocità massima DL (Mbit/s)	2	14,4	14,4	21,6	28,8	42	42	84
Velocità massima UL (Mbit/s)	0,384	0,384	5,76	5,76	11,5	11,5	11,5	23
RTT (ms)	40 - 60			25 - 35				
Modulazione e altre caratteristiche trasmissive	QPSK DL QPSK UL	16 QAM DL QPSK UL	16 QAM DL QPSK UL	64 QAM DL QPSK UL	16 QAM + 2 × 2MIMO DL & 16 QAM UL	64 QAM + 2 × 2MIMO DL & 16 QAM UL	64 QAM Dual- Cell HSDPA & 16 QAM UL	64 QAM Dual- Cell HSDPA + 2 × 2MIMO DL & 64 QAM UL
Dimensione del canale	5 MHz	5 MHz	5 MHz	5 MHz	5 MHz	5 MHz	2 × 5 MHz	2 × 5 MHz

TABELLA 1

Caratteristiche delle tecnologie di accesso radiomobile 3G [11]

numero di canali o della dimensione del canale stesso. A partire dalla *Release 5* si sono adottate tecniche adattative di modulazione e codifica in grado di rilevare la condizione del canale di comunicazione e di impiegare la configurazione più adatta alla situazione (esempio, non si impiegano modulazioni di ordine elevato se il rapporto segnale e rumore è critico). È opportuno sottolineare che molte migliorie sono state espressamente pensate per essere messe in campo sulle reti e sui terminali della generazione precedente, attraverso semplici *upgrade* software e laddove questo non è stato possibile, sono comunque state adottate politiche di dispiegamento che consentissero la coesistenza di comunicazioni corrispondenti a generazioni 3G successive, massimizzando il riutilizzo delle risorse di rete. La velocità di trasmissione massima teorica delle tecniche 3G evolute in fase di commercializzazione ancora in forma sperimentale è basata sulle evoluzioni dell'HSPA, denominate HSPA+, e riguarda velocità massime teoriche di 21,6 e 28,8 Mbit/s *downstream* e 5,76 e 11,2 Mbit/s nella direzione *upstream*.

5.2. La rivoluzione LTE (4G)

La terza ondata di innovazione, introdotta a partire dalla *Release 8* del 3GPP, è quella della LTE o *Long Term Evolution* che rappresenta il

vero e proprio sistema di quarta generazione (4G), basato su tecniche di modulazione più sofisticate e a maggior potenziale di prestazioni ed efficienza nell'uso della risorsa radio rispetto al WCDMA. In particolare per lo strato fisico, il sistema LTE impiega le modulazioni OFDMA (*Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*) in *downlink* e SC-FDMA (*Single-carrier Frequency Division Multiple Access*) in *uplink*. Inoltre, LTE offre servizi radiomobili nativamente basati su un modello che privilegia la commutazione di pacchetto basata sul protocollo IP e la riduzione drastica del numero dei nodi della rete (realizzando il modello di "rete piatta") al fine di migliorare i ritardi delle comunicazioni e di ridurre i costi di esercizio delle reti.

Il sistema LTE non contempla un dominio a commutazione di circuito e questo fa nascere una particolare attenzione alle modalità di trasporto dei servizi telefonici, in relazione ai requisiti particolari di ritardo e sincronizzazione di quei servizi. LTE è inoltre progettato a impiegare in modo spinto le tecniche di diversità d'antenna o MIMO, portandole a gradi elevati (4 × 4, 8 × 8). L'architettura evoluta della UTRAN di LTE è molto compatta. Gli eNB (*enhanced Node B*), sono arricchiti di funzioni di controllo in precedenza svolti da RNC e sono equipaggiati per svolgere funzioni di ottimiz-

Categoria di User Equipment	Velocità massima (Mbit/s)		Numero di flussi MIMO	Modulazione massima DL	Modulazione massima UL
	DL	UL			
1	10	5	1	64 QAM	16 QAM
2	50	25	2		
3	100	50	2		
4	150	50	2		
5	300	75	4		64 QAM

TABELLA 2
Caratteristiche delle tecnologie LTE [12]

zazione e organizzazione cooperativa automatica, secondo il paradigma delle SON (*Self Organizing Networks*). Inoltre, gli eNB sono interfacciati tra loro e sono in grado di gestire la mobilità locale. Gli eNB sono direttamente collegati a blocchi funzionali incaricati di gestire la mobilità degli utenti (sono i MME o *Mobility Management Entity*) e a blocchi funzionali deputati a gestire il traffico utente (i S-GW o *Serving Gateway*).

L'architettura di rete associata all'LTE prevede la coesistenza di diverse tecnologie di accesso, incluse tecnologie di accesso estranee agli sviluppi del 3GPP (come per esempio WiFi e WiMax), con l'obiettivo di rendere possibile la mobilità tra tecnologie di accesso e diversi modelli di *roaming*. La diafrasi tra i due organismi di standardizzazione IEEE e 3GPP si è risolta a favore di quest'ultimo che sta guardando tutto in una visione unificata, anche se alcuni stimoli nell'impiego della modulazione OFDM sono proprio partiti da IEEE [1].

LTE offre flessibilità nell'uso dei canali di comunicazione che possono avere ampiezza diversa (da 1,4, 3, 5, 10, fino a 20 MHz) consentendo pertanto maggiore efficienza e maggiori gradi di libertà d'uso delle frequenze radio. Le velocità di trasmissione massime attualmente ipotizzate sono dell'ordine delle centinaia di Mbit/s in *downstream* e di diverse decine di Mbit/s in *upstream*, con efficienza spettrale di 5,6/2 Bps/Hz/sito per le direttrici *down* e *up* rispettivamente (valori doppi rispetto ad HSPA+). I ritardi introdotti dalle reti LTE sono decisamente più contenuti di quelli delle reti radiomobili precedenti (meno di 20ms contro 40 ms di 3G/HSPA+ e 400 ms di 3G GPRS/EDGE) (Tabella 2).

Nella specifica LTE contenuta nella *Release 8*

del 3GPP è presente la funzione di femtocella, denominata *Home extended Node B* (HeNB), che consente di scaricare la rete di traffico generato *indoor* e di offrire migliore qualità trasmissiva. Le estensioni di HeNB previste dalla *Release 9* (associata all'*Enhanced-LTE*) comprendono la possibilità di configurare gruppi chiusi di utenti a livello di rete, creando delle liste di clienti autorizzati ad usare l'HeNB, rendendo possibile la mobilità automatica di un utente da una cella esterna verso l'HeNB (*inbound mobility*).

La tecnica LTE rappresenta la frontiera dell'innovazione per gli operatori radiomobili che confidano molto nella possibilità di fronteggiare in modo economicamente sostenibile la crescita del traffico. A gennaio 2011 sono 18 le reti LTE attive nel mondo con un'offerta commerciale. Esse operano a bande di frequenza tra 700 MHz e 2.6 GHz ed utilizzano la variante FDD (*Frequency Division Duplexing*), anche se si ipotizza l'impiego anche della variante TDD (*Time Division Duplexing*) nel corso del 2011 [13]. La variante FDD richiede l'impiego di bande accoppiate (*paired*) per le comunicazioni *upstream* e *downstream* rispettivamente, ponendo quindi vincoli sulle caratteristiche della regione di spettro utilizzabile (nelle regioni di spettro non accoppiate si usa la variante TDD).

Uno degli elementi che condizioneranno il decollo delle reti LTE è la disponibilità di terminali con interfacce radio predisposte per LTE. I primi terminali immessi nel mercato nel corso del 2010 hanno consentito di avviare le offerte commerciali e ci si attende che progressivamente vengano rilasciati terminali multistandard di varia natura (*smartphone*, *tablet* e *chiavette USB*) equipaggiati di interfacce LTE.

5.3. Considerazioni sull'impiego dello spettro radio

La risorsa chiave della comunicazione radio-mobiliare è lo spettro, ossia la porzione di frequenze utilizzate dagli operatori. In Europa sono attualmente in corso operazioni di ristrutturazione (*refarming*) dell'uso delle frequenze tra i sistemi 2G e 3G. I sistemi 3G vengono spostati sulle bande a 900 MHz utilizzate dai sistemi 2G, per sfruttare al meglio le caratteristiche favorevoli di tali frequenze.

Oltre a queste operazioni di ottimizzazione dell'uso delle frequenze già disponibili per le comunicazioni radiomobili, per assecondare la crescita del traffico mobile a larga banda la leva principale è l'allocazione di nuove frequenze per gli accessi mobili a larga banda, in particolare per i nuovi sistemi di tipo LTE.

I sistemi 4G necessitano di ampie porzioni dello spettro, dai 20 ai 70 MHz. In Europa per il lancio del nuovo sistema LTE sono previste due possibili bande: da 2.500 a 2.690 MHz (problematica per le comunicazioni *out-door*), e da 790 a 862 MHz (derivata dal "dividendo digitale", ossia dal passaggio dalla diffusione televisiva analogica al digitale, con guadagno di efficienza nell'uso dello spettro). Molti grandi Paesi europei, tra cui Inghilterra, Francia e Germania, hanno avviato le procedure di assegnazione agli operatori delle bande del dividendo digitale tramite gare competitive col fine di stimolare lo sviluppo della larga banda mobile per la crescita del Paese e di incamerare gli introiti per le licenze 4G. In Germania l'asta (articolata su 41 blocchi di frequenze nelle bande 800 MHz, 1.8 GHz, 2 GHz e 2.6 GHz) è terminata con un ricavo complessivo di 4.38 miliardi di Euro.

5.4. L'architettura della rete di trasporto

Il percorso evolutivo segnato dal 3GPP per il *mobile* ha impattato anche la struttura dell'architettura della rete di trasporto. In particolare, partendo dalla *Release 6* del 3GPP, si è progressivamente cercato di ridurre il numero di nodi di rete attraversati dai dati d'utente e dai flussi di segnalazione, perseguendo l'obiettivo di ridurre i ritardi e di contenere i costi. L'evoluzione delle generazioni delle reti radiomobili a larga banda comporta una crescita notevole non solo del traffico utente, ma anche della segnalazione. Il contenimento dei ri-

tardi per entrambi i traffici è sempre più determinante progredendo verso l'offerta di tutti i servizi (inclusi quelli *real-time* come la telefonia) sulla rete dati.

La figura 2 mostra come nel caso della *Release 6* i flussi dati utente e di segnalazione dal Node B attraversino nell'ordine l'RNC (*Radio Network Controller*), l'SGSN (*Serving GPRS Support Node*) e il GGSN (*Gateway GPRS Support Node*)⁶. Con l'opzione "*direct tunnel*" della *Release 7*, il traffico dati utente non passa attraverso l'SGSN consentendo di ridurre il ritardo per i dati utente. L'opzione "*Internet-HSPA*" (I-HSPA) della *Release 7* accumula le funzioni di RNC direttamente nell'apparato che svolge funzioni di Node B anticipando quanto proposto nella *Release 8* con la rete piatta dell'LTE. In quest'ultimo caso, l'*extended Node B* (eNode B) da un lato invia il flusso dati utente direttamente al SAE GW (*System Architecture Evolution GateWay*) che gestisce la mobilità ed instrada i dati verso la opportuna rete a pacchetto, dall'altro invia la segnalazione al MME (*Mobility Management Entity*) che gestisce le funzioni che consentono il *roaming* e la raggiungibilità di un utente (con il supporto della connessione al HSS (*Home Subscriber Server*), oltre alla sicurezza. Sul lato destro della figura 2 si evidenzia la tendenza a sostituire nella rete di trasporto progressivamente il ruolo della commutazione di circuito con quello della commutazione di pacchetto, la sola prevista dalla *Release 8*.

Il ruolo crescente della commutazione di pacchetto nella rete di trasporto propone alterna-

⁶ Node B è un termine usato nell'UMTS per denotare la BTS (o stazione radio base). Il *Radio Network Controller* o RNC controlla uno o più Node-B sovrintendendo a funzioni quali la gestione della risorsa radio, il supporto alla mobilità e la cifratura dei dati trasmessi al terminale mobile. Il *Gateway GPRS Support Node* o GGSN è un nodo che funge da *gateway* tra una rete radio a commutazione di pacchetto basata su GPRS e altre reti a pacchetto, tra cui Internet. Il GGSN svolge funzioni di conversione di protocollo, agendo nel caso del versante Internet come un router IP ed assegna gli indirizzi IP. Il *Service GPRS Support Node* o SGSN svolge funzioni di controllo (localizzazione e tracciamento del terminale, autenticazione, gestione della mobilità, instradamento, supporto al *roaming* ecc.) ed è il punto di accesso del terminale radiomobile alla rete a pacchetto.

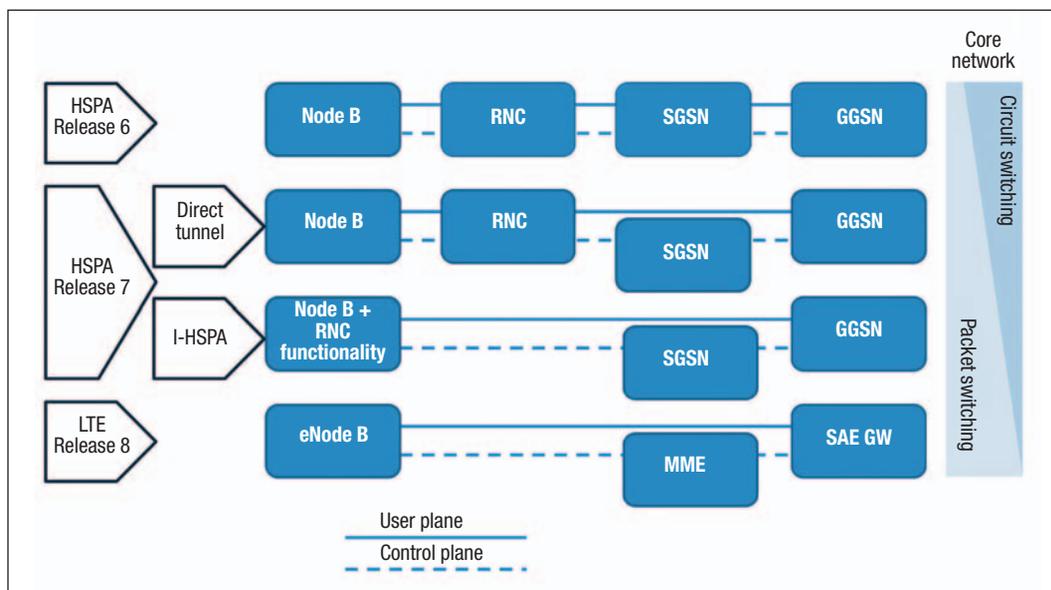


FIGURA 2

I flussi dei dati utente e della segnalazione nell'evoluzione dell'architettura della rete di trasporto

tive di sviluppo della rete degli operatori. L'impiego di combinazioni di tecnologie di livello 2 (*Ethernet*) e di livello 3 evoluto (IP/MPLS e IPv6) offre diverse alternative in tutte le sezioni della rete, dalla rete di dorsale, alla rete di aggregazione fino alla rete di *backhauling*. Nel lavoro ci si soffermerà maggiormente sulla sezione di *backhauling* in quanto interessata da sollecitazioni maggiori per gli scenari di evoluzione descritti. Per quanto riguarda le scelte degli operatori per la rete di trasporto, si rileva una generale tensione a perseguire scelte che consentano di contenere i costi di investimento e operativi, soprattutto per la porzione di trasporto che vede il servizio di accesso ad Internet come driver principale. Le architetture di trasporto emergenti in ambito 3GPP, anche nelle evoluzioni oltre la *Release 8* (ossia la *Release 9, 10 e 11* attualmente in lavorazione per la definizione dell'*Advanced LTE*), puntano a realizzare una rete di trasporto multi-accesso (accessi da RAN 3GPP e da reti WiFi, WiMax di varia natura) basata su IP (denominata *Enhanced Packet Core – EPC*), in grado di connettere gli utenti ai servizi dell'operatore / degli operatori interconnessi (secondo 3GPP con il modello IMS o *Internet Multimedia Subsystem*) e ai servizi Internet. Le funzioni cardine dell'EPC sono la gestione delle funzioni di sicurezza all'accesso (*Authentication Authorization Accounting – AAA*) alla rete, la mobilità e la ge-

stione della connettività, l'applicazione delle *policy* per la *Quality of Service (QoS)*, la raccolta di elementi per la fatturazione, il supporto della gestione delle sessioni con mobilità e adattamento rispetto alle caratteristiche del terminale e la gestione dell'intercetto legale e delle chiamate di emergenza.

5.5. La rete di backhauling

Come già detto, nelle reti radiomobili la porzione di rete identificata come "*backhauling*" trasporta il traffico tra le stazioni radiobase (BTS nella GERAN e Node B nella UTRAN) e i nodi di concentrazione e controllo del traffico (BSC nella GERAN e RNC nella UTRAN). In termini più generali, si definisce *backhauling* l'insieme delle soluzioni di rete che consentono ai siti radiomobili di comunicare con il PoP (*Point of Presence*) di rete, cioè il punto di accesso alla dorsale (*backbone*) dell'operatore mobile (Figura 3).

L'aumento del traffico generato dalla crescita dei servizi radiomobili a larga banda, abilitato dalle crescenti prestazioni delle tecnologie della rete di accesso radio, richiede un corrispondente potenziamento della rete di *backhauling* [14].

Va precisato che la rete di *backhauling* normalmente aggrega i traffici provenienti da più nodi periferici (BTS o Node B) con architetture di concentrazione di tipo gerarchico che possono

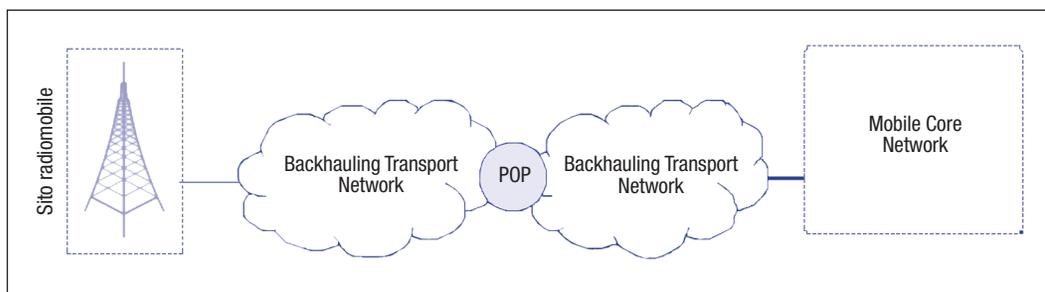


FIGURA 3
La rete di backhauling

essere organizzate su più livelli intermedi (progressivamente affasciando traffico su linee a più alta velocità). Le reti di *backhauling* degli operatori inoltre, generalmente raccolgono traffico da reti di accesso in tecnologie diverse che coesistono nella medesima regione di territorio (esempio, GERAN e UTRAN) e quindi sono progettate e realizzate per soddisfare simultaneamente fabbisogni diversi (nella GERAN è prevalente l'esigenza del trasporto del traffico telefonico, mentre nella UTRAN l'esigenza del trasporto del traffico dati a larga banda è sempre più preminente).

Nel caso 2G e 2,5 la rete di *backhauling* è generalmente realizzata in tecnologia TDM e ha un dimensionamento basato sul trasporto delle comunicazioni telefoniche a commutazione di circuito e dei dati a bassa velocità con tecnologie GPRS/EDGE. Pertanto le configurazioni tipiche vedono l'impiego di linee dirette numeriche della capacità di uno o qualche E1 (2 Mbit/s) in tecnologia PDH (*Plesiochronous Digital Hierarchy*), realizzate con ponti radio punto-punto o con circuiti dedicati affittati.

Con l'avvento del 3G e delle sue evoluzioni, per far fronte ai fabbisogni di capacità crescente e anche alla progressiva maggiore presenza di traffico dati, inizialmente si è introdotta la tecnologia di trasporto ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) su circuiti tipicamente di capacità $n \times E1$, realizzati nuovamente con ponti radio punto-punto o con circuiti dedicati affittati ricavati da reti SDH (talvolta sostituiti da tratte in fibra o dall'uso di linee xDSL col fine di ridurre i costi, con velocità massima condizionata dalla lunghezza del *local loop* e dalle caratteristiche interferenziali del cavo). L'introduzione di ATM ha avuto il fine di inserire la moltiplicazione statistica e la possibilità di gestire in modo più flessibile ed efficiente la capacità dei circuiti, allocandoli

in base alle esigenze del traffico dati, per sua natura discontinuo ed evitando sprechi di capacità trasmissiva causati da un'attribuzione rigida dei canali alle comunicazioni attive (anche in assenza di traffico). Il traffico 2G viene trasportato su ATM utilizzando il *Circuit Emulation Service* (CES) e il livello di adattamento AAL2 (*ATM Adaptation Layer 2*) per traffico CBR, rt-VBR e UBR (*Constant Bit Rate, real time-Variable Bit Rate e Unspecified Bit Rate*), mentre per il trasporto di IP e Ethernet su ATM si utilizza il *Classical IP over ATM* (CLIP) e *LAN Emulation* (LANE) con livello di adattamento AAL5.

A partire dalla *Release 5* di tabella 1 all'interfaccia tra la stazione radiobase Node B e il nodo di controllo RNC (*Jub*) oltre all'ATM è stato introdotto anche il protocollo IP per il trasporto della segnalazione e dei dati nel *backhauling*. L'opzione IP consente di ridurre l'*overhead*⁷ e di estendere in modo sinergico con quanto accade sia lato terminale e servizi, che con quanto accade lato rete geografica, l'uso nativo del protocollo IP.

Il ruolo del protocollo IP e della tecnica a commutazione di pacchetto nelle reti radio-mobili è andato crescendo nel tempo, sia per il ruolo che l'IP ha assunto grazie all'affermazione di Internet (quindi sul versante dei servizi), sia per il valore centrale dell'IP nella realizzazione delle reti di trasporto dei dati, inizialmente nel *Packet Switched Domain* (ossia nell'ambito della rete per i servizi dati) e progressivamente per il trasporto di ogni tipo di servizio. Il protocollo IP, corredato generalmente dal protocollo di rete MPLS (*Multi-Protocol Label Switching*) per le sue prestazioni di gestione della qualità, di ingegner-

⁷ Laddove il protocollo IP è trasportato su ATM, generalmente in via transitoria, l'*overhead* protocol-lare aumenta.

ria del traffico e di protezione in caso di guasti, ha esteso il proprio ruolo nella dorsale di rete (*core*), nella rete di aggregazione e nel *backhauling*.

L'impiego di IP/MPLS si propone progressivamente anche nella periferia della rete di dorsale proprio per la sua capacità di indirizzare al meglio i requisiti emergenti del traffico dati delle reti mobili a larga banda. MPLS è stato progressivamente arricchito di funzionalità per il trasporto di flussi TDM e ATM, incluse prestazioni di trasporto del segnale di sincronismo, di salvaguardia della qualità del servizio (ritardo, varianza, perdita), di gestione della rete. In ambito IETF⁸ (*Internet Engineering Task Force*) e ITU⁹ (*International Telecommunications Union*) sono state sviluppate le specifiche per lo *Pseudo Wire Emulation Edge-to-Edge* (PWE3), ossia per i servizi di emulazione per il trasporto di flussi TDM e ATM su IP/MPLS [15]. Il trasporto su reti IP/MPLS di flussi TDM ed ATM avviene per mezzo di servizi che emulano sulla rete a commutazione di pacchetto di tipo datagramma, propria del protocollo IP, il comportamento della rete a commutazione di circuito, nel caso del TDM, e a commutazione di pacchetto a circuito virtuale, nel caso di ATM.

Il *Broadband Forum*, organizzazione per la promozione di soluzioni di mercato nelle reti a larga banda, ha emesso una specifica tecnica che espressamente indirizza le soluzioni IP/MPLS per il *backhauling* delle reti mobili [16]. Nel documento vengono definite le opportunità di impiego dell'IP/MPLS nelle reti di *backhauling*, distinguendo il caso delle "reti centralizzate", ossia le reti 2G e 3G evolute con architettura ad albero gerarchica, rispetto al caso delle "reti piatte", ossia il caso delle reti emergenti con LTE e 4G in cui l'architettura della rete mobile periferica è di tipo magliato e si ammettono flussi di traffico *any-to-any*.

Nel documento del *Broadband Forum* vengono sviscerate le ipotesi di impiego di IP/MPLS nelle reti mobili di tipo centralizzato e piatto. Nel caso di rete piatta sono presentate due varianti: nel primo caso si ipotizza l'uso di VPN

di livello 3, ossia di reti private virtuali IP costruite grazie ad MPLS, nel secondo si ipotizza l'impiego di VPN di livello 2 per il trasporto via IP/MPLS di traffico Ethernet.

Col crescere del fabbisogno di capacità e di flessibilità ed efficienza d'uso della medesima, il potenziamento delle tecnologie usate per le velocità inferiori presenta forti limiti nella crescita dei costi e nell'incapacità di offrire la flessibilità e l'efficienza richiesta. Progressivamente è diventato sempre più conveniente ed opportuno ricorrere a soluzioni di *backhauling* basate su Ethernet (a 10/100 Mbit/s) che meglio rispondono ai requisiti emergenti. Peraltro l'opportunità scaturisce dal crescente sviluppo del ruolo della tecnologia Ethernet evoluta nelle reti degli operatori proprio per l'economicità e la flessibilità della soluzione di livello 2 del modello di riferimento OSI. Per soddisfare alcuni requisiti fondamentali del *backhauling* per i traffici 2G è stato necessario arricchire le funzionalità di base delle reti Ethernet: in particolare la propagazione dei segnali di sincronismo, disponibile con le tecniche PDH/SDH e utile per i servizi a commutazione di circuito. Oltre ai flussi TDM di connessione tra BTS e BSC delle reti 2G, anche i flussi ATM tra Node B e RNC sono trasportati su Ethernet con servizi di emulazione atti a preservare le caratteristiche dei protocolli e dei flussi, tra cui la latenza (*latency*) ridotta, la varianza del ritardo (*jitter*) limitata e la perdita di dati (*loss*) contenuta.

Il *Metro Ethernet Forum* (MEF), organismo associativo per lo sviluppo di standard di mercato per la promozione del servizio Ethernet nelle reti degli operatori (inizialmente a livello di reti metropolitane, ma successivamente in un contesto generale), ha sviluppato una serie di specifiche che indirizzano gli arricchimenti necessari delle norme per la fornitura del servizio Ethernet nelle reti di *backhauling*. Questa evoluzione assume particolare valore con il passaggio ad LTE in quanto si presta ad indirizzare al meglio l'esigenza di comunicazioni di tipo magliato tra Node B e sistemi della dorsale e dei Node B tra loro.

⁸ La IETF (*Internet Engineering Task Force*) è un'associazione internazionale aperta di progettisti di rete, operatori, manifatturieri e ricercatori. IETF si occupa degli standard per i protocolli Internet.

⁹ La ITU (*International Telecommunication Union*) è il più antico organismo di standardizzazione con competenze estese a tutti i settori delle telecomunicazioni.

In particolare, il documento “*Mobile Backhaul Implementation Agreement*” (MEF 22)¹⁰ [17] fornisce le linee guida per l’implementazione delle reti di *backhaul* mobile su *Carrier Ethernet*. Il documento definisce i requisiti e le raccomandazioni per gli apparati, l’architettura e le soluzioni per la gestione e l’esercizio delle reti di *backhauling* mobili su *Carrier Ethernet*. Il documento MEF 22 fornisce un modello di riferimento ed elenca diversi scenari che indirizzano situazioni di migrazione all’uso del *backhauling Ethernet*, identificando alle interfacce di servizio con l’operatore del *Carrier Ethernet* (UNI - *User Network Interface*) tutti i parametri di servizio per i diversi traffici, incluse le prestazioni di trasporto del segnale di sincronismo, di gestione della rete e di garanzia della qualità del servizio. Il documento propone l’impiego di diverse varianti del servizio *Carrier Ethernet* già definite in ambito MEF: *Ethernet Private Line Service*, *Ethernet Virtual Private Line Service*, *Ethernet Private LAN Service*, *Ethernet Virtual Private LAN service*, *Ethernet Private Tree Service* e *Ethernet Virtual Private Tree Service*. Per quanto riguarda il trasporto dei segnali di sincronismo, MEF 22 propone l’uso di una tecnica di “*Packet Based Synch*” basata su flussi dedicati di pacchetti (esempio, IEEE 1588 V2 [18], NTP [19]) o sull’uso del *clock* trasportato dai circuiti emulati (per esempio, con metodi di *Differential Clock Recovery*, *Adaptive Clock Recovery* richiamati in MEF 22). Per il recupero del riferimento di frequenza, è disponibile anche lo standard sviluppato da ITU per Ethernet sincrona ITU-T G.8262/Y.1362 [20].

Dal punto di vista dei portanti fisici per il traffico di *backhauling*, gli operatori stanno progressivamente sostituendo l’uso delle coppie in rame impiegate per linee dedicate o accessi DSL e dei ponti radio TDM, con portanti in ponte radio in tecnica a pacchetto di maggiore capacità e flessibilità e con portanti in fibra (soprattutto laddove i piani di cablatura legati allo sviluppo della *Next Generation Access* – NGA hanno portato al dispiegamento di tale mezzo).

¹⁰ È già stata approvata ad ottobre 2010 la seconda bozza del MEF 22.1 “*Mobile Backhaul Implementation Agreement Phase 2*” che tratta anche l’evoluzione verso LTE.

L’evoluzione dell’architettura e delle tecnologie di *backhauling* per reti mobili può essere descritta in tre fasi distinte:

□ fase 1 - *Backhaul* TDM/ATM: in questa fase il traffico delle BTS è trasportato su flussi PDH e, attraverso una rete di aggregazione TDM in tecnologia SDH, al BSC e da questo alla dorsale di rete, mentre il traffico dei Node B delle reti 3G è trasportato su flussi ATM sulla rete di aggregazione SDH al RNC e alla dorsale di rete;

□ fase 2 - *Backhaul* ibrido TDM/Pacchetto: alla soluzione della fase 1 si affianca in parallelo il trasporto del traffico dei Node B interessati da fabbisogno di traffico elevato su *backhaul* in tecnologia *Ethernet* e IP, ed attraverso rete di aggregazione a pacchetto *Ethernet* e IP verso RNC e dorsale;

□ fase 3 - *Backhaul* a pacchetto: i flussi PDH, ATM ed *Ethernet*/IP vengono trasportati verso BSC e RNC e rete di dorsale da reti di *backhauling* e di aggregazione a pacchetto in tecnologia *Ethernet* e IP, con l’impiego di tecniche di emulazione per il trasporto dei flussi PDH e ATM.

6. CONCLUSIONI

Il settore delle comunicazioni mobili ha conosciuto uno sviluppo straordinario in pochi anni. Anche di fronte alla saturazione del mercato della telefonia cellulare, il settore offre spunti di evoluzione, trasformazione e crescita che riguardano l’evoluzione dei servizi dati e la diffusione di terminali telefonici evoluti (*smartphone*), di nuovi dispositivi (come *Ebook* o *Tablet PC*) e di sistemi di interfacciamento di massa alla rete radiomobile a larga banda per PC. Le trasformazioni in atto sollecitano le architetture di trasporto delle reti radiomobili e mettono in discussione i modelli di business consolidati, compromettendo le forme di remunerazione consolidate. A fronte di queste sollecitazioni, si affacciano nuove architetture di rete e nuove soluzioni tecnologiche che si prefiggono un miglior allineamento con gli scenari emergenti per capacità, flessibilità e bilanciamento dei costi e dei ricavi. L’implementazione di queste proposte evolutive, ratificate dagli organismi di standardizzazione riconosciuti (3GPP e ITU), non è esente da incognite. Le principali trasformazioni in pieno corso riguardano il potenziamento della rete di accesso radio grazie alle nuove tecniche di modulazione/codifica e ai

nuovi terminali, la transizione del *backhauling* da linee dedicate TDM su coppie in rame o ponti radio a tratte a pacchetto Ethernet/IP su reti a larga banda con portanti in ponte radio ad alta velocità o in fibra, l'*offloading* del traffico con l'uso di WiFi e femtocelle. Le trasformazioni che si affacciano in orizzonte prospettico riguardano l'introduzione dell'LTE, con il trasporto a commutazione di pacchetto e la rete piatta e la ristrutturazione delle attribuzioni dello spettro.

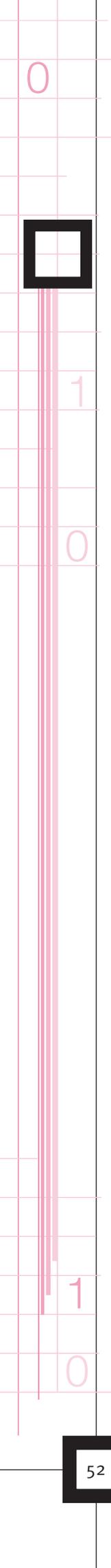
Gli attori di questo mercato che intendano conservare un ruolo da protagonista (o che più modestamente aspirino a permanere nel mercato) non possono esimersi dal mantenere un presidio costante e consapevole sulle tendenze evolutive delle soluzioni tecniche e del business, sempre più complesse ed aggravate dalla coesistenza di ondate di tecnologie e servizi che si sovrappongono e dalla convergenza di settori di mercato, ben disgiunti in tempi non lontani.

Ringraziamenti

L'autore ringrazia l'ing. G. Vannucchi per l'appassionata e preziosa revisione e i colleghi ing. G. Bruzzi e ing. A. Soracco per la rilettura e i consigli competenti.

Bibliografia

- [1] Piermarini R., Vannucchi G.: Tecnologie wireless per le reti a larga banda – Scenari evolutivi. *Mondo Digitale*, n. 3, settembre 2007, http://www.mondodigitale.net/Rivista/07_numero_3/Vannucchi%20p.18-32.pdf.
- [2] Jaokar A., Sharma C.: *Mobile VoIP approaching the tipping point*. Febbraio 2010, http://www.futuretext.com/downloads/mobile_voip.pdf.
- [3] Morgan Stanley Research: *The Mobile Internet Report*. Dicembre 2009, http://www.morganstanley.com/institutional/techresearch/pdfs/mobile_internet_report.pdf.
- [4] Markendahl J., Mäkitalo Ö., Werding J., Mölleryd B.G.: *Business Innovation Strategies to Reduce the Revenue Gap for Wireless Broadband Services*. Communications & Strategies, n. 75, 3-rd quarter 2009, p. 35. http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1559116.
- [5] Norman T., Mason A.: *Is LTE the last opportunity for MNOs to participate in content revenue?*. Settembre 2010, http://www.analysismason.com/AboutUs/News/Insight/LTE_last_chance_Sep2010/
- [6] Tellabs: *Tellabs End of Profit study executive summary*. Febbraio 2011, http://www.tellabs.com/markets/tlab_end-of-profit_study.pdf.
- [7] Ericsson: *Mobile data traffic surpasses voice*. Press release, marzo 2010, <http://www.ericsson.com/news/1396928>.
- [8] Cisco Systems: *Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2010-2015*. Febbraio 2011, http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white_paper_c11-520862.pdf.
- [9] Casale R., Catalano G., Dionisi S., Franceschini G.: La Femtocella una stazione radio mobile a larga banda in casa. *Mondo Digitale*, n. 2, giugno 2009, http://www.mondodigitale.net/Rivista/09_numero_2/Casale_p_40_57_.pdf.
- [10] AGCOM, Delibera n. 326/10/CONS: *Stop alle bollette astronomiche per gli utenti di Internet mobile*. Agosto 2010, <http://www.agcom.it/default.aspx?DocID=4708>
- [11] 3GPP TS 25.306 V8.10.0 (2010-09): *Technical Specification 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; UE Radio Access capabilities*. (Release 8), settembre 2010, http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/25_series/25.306/25306-8a0.zip.
- [12] 3GPP TS 36.306 V9.3.0 (2010-09): *Technical Specification, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio access capabilities*. (Release 9), settembre 2010, http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.306/36306-930.zip.
- [13] Analysys Mason, Whitepaper for GSMA: *The momentum behind LTE*. gennaio 2011, <http://www.gsmamobilebroadband.com/upload/resources/files/Momentum%20behind%20LTE%20white%20paper%20-%20Jan10.pdf>.
- [14] Tipmongkolsilp O., Zaghloul S., Jukan A.: *The Evolution of Cellular Backhaul Technologies: Current Issues and Future Trends*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 13, n. 1, First Quarter 2011 97, gennaio 2011, <https://dl.comsoc.org/comsocdl/document-Downloader/Data/livepubs/surveys/public/2011/jan/pdf/06Tipmongkosilp.pdf>.
- [15] Bryant S., Pate P.: *Pseudo Wire Emulation Edge-to-Edge (PWE3) Architecture*. IETF RFC 3985, marzo 2005, <http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc3985.txt>
- [16] Broadband Forum: *MPLS in Mobile Backhaul Networks Framework and Requirements*. Technical Specification, IP/MPLS Forum 20.0.0, ottobre 2008, <http://www.broadbandforum.org/technical/download/ipmpls/IPMPLSForum20.0.0.pdf>.

- 
- 
- [17] Metro Ethernet Forum: *Mobile Backhaul Implementation Agreement*. MEF22, febbraio 2009, http://www.metroethernetforum.org/MSWord_Documents/MEF_22.doc.
- [18] IEEE: *1588-2008 IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems*. Luglio 2008, http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=4579760.
- [19] Mills D.L.: *Network Time Protocol (Version 3) Specification, Implementation and Analysis*. IETF RFC1305, marzo 1992, <http://www.eecis.udel.edu/~mills/database/rfc/rfc1305/rfc1305a.pdf>.
- [20] ITU-T, Raccomandazione G.8262/Y.1362: Timing characteristics of a synchronous Ethernet equipment slave clock. Luglio 2010, <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.8262-201007-1/en>.

VITTORIO TRECordi, laureatosi con lode in Ingegneria Elettronica al Politecnico di Milano nel 1986, ha conseguito il Master CEFRIEL in tecnologia dell'informazione nel 1988. Dopo brevi periodi in Laben e Pirelli Cavi, è stato impiegato presso il CEFRIEL fino al 1998, occupandosi di ricerca, formazione e consulenza nel settore delle reti innovative. Nel 1998, lasciò l'incarico di Direttore Tecnico del CEFRIEL, per fondare insieme al Prof. Decina e all'Ing. Randi una società di consulenza, la ICT Consulting della quale è attualmente Direttore Generale. Dal 1993 è docente presso la sede distaccata di Cremona del Politecnico di Milano ove attualmente tiene il corso di "Infrastrutture e protocolli per Internet". È stato autore di una cinquantina di pubblicazioni di ricerca per congressi e riviste in ambito internazionale e di numerose pubblicazioni nazionali, tra cui un libro: "Nuovi modelli di business: evoluzione delle architetture di rete e dei servizi", Franco Angeli, 2002.
E-mail: trecordi@ictc.it