

Sergio Pompei,
Edion Tego,
Elena Mammi,
Francesco Matera
(Fondazione Ugo
Bordoni)

Elio Restuccia,
Vincenzo Attanasio,
Emanuele Nistri,
Anna Stefania
Michelangeli
(Istituto Superiore
delle Comunicazioni e
delle Tecnologie
dell'Informazione)

Verso il LAB ISCOM 5G: Il segmento XHAUL

Towards the 5G LAB ISCOM: the XHAUL segment

Sommario: *In questo articolo è descritta la piattaforma che è stata realizzata presso l'ISCOM per avere un laboratorio compatibile con gli ambienti 5G che si presenteranno nel giro dei prossimi tre anni. Come vedremo questa piattaforma si basa su una rete sperimentale che rappresenta una rete di trasporto ottimizzata proprio per le connessioni alle base station degli apparati wireless, segmento che oggi viene indicato con il termine **XHaul**, con una serie di strumenti analitici e simulativi per studiare tutte le possibili architetture di rete ibride wireless. In questo articolo in particolare descriviamo questa piattaforma con le sue modalità per la creazione di percorsi logici, denominati slice, per la connessione delle antenne degli apparati wireless e la modalità per la gestione dinamica delle risorse con tecniche Software Defined Networks (SDN). Riportiamo inoltre diversi risultati sperimentali che mostrano l'eccellenza delle scelte fatte.*

Abstract: *This article describes the platform that has been built at ISCOM to have a laboratory compatible with 5G environments that will be present within the next three years. As we will see, this platform is based on an experimental network that represents a transport area optimized for connections to the base stations of wireless devices, a segment that today is referred to as **XHaul**, with a series of analytical and simulative tools to study all the possible hybrid network architectures. In this article in particular we describe this platform with its modalities for the creation of logical paths, called slices, for the connection of the antennas of the wireless devices and the mode for the dynamic management of resources with Software Defined Networks (SDN) techniques. We also report various experimental results that show the excellence of our choices.*

1. Introduzione

La progressiva crescita esponenziale del traffico dati sta spingendo verso una rivoluzione della rete caratterizzata da una crescente capacità, dall'evoluzione del wireless verso il cosiddetto paradigma 5G [1] e, soprattutto, dalla cooperazione tra diversi sistemi cablati e wireless [2], con una adeguata convergenza tra le reti in fibra ottica, spesso denominate come Next Generation Networks (NGN) e quelle radio con particolare rilevanza per quel mondo che va sotto il nome di

Internet delle cose (Machine to Machine, M2M e Device to Device, D2D) [3]. Inoltre, l'evoluzione RAN (Radio Access Network) sfrutterà sempre di più una combinazione di tecniche di virtualizzazione, centralizzazione e coordinamento, che interagiscono tra di loro in diversi modi all'interno di un nuovo concetto definito come C-RAN [4].

Tale evoluzione stimolerà anche la domanda di servizi e applicazioni coinvolgendo sempre più il mondo dei *verticals*. Così la rete dovrà essere sempre più abile a soddisfare, in ogni segmento logico (o fisico), quei requisiti specifici in termini di QoS, larghezza di banda e affidabilità. Questo approccio è stato visto recentemente come una nuova strategia di telecomunicazione denominata *Network Slicing as a Service* (NsaS) [5], che aiuterà gli operatori ad offrire reti ad hoc end-to-end adattate ad ogni esigenza per essere offerte come un servizio. Per tale scopo, nelle reti in fibra ottica la moltiplicazione di lunghezza d'onda (WDM) e quella Optical-Orthogonal Frequency Division Multiplexing (O-OFDM), utilizzate dalle reti core alle reti di accesso, ed in particolare sulle reti passive ottiche (PON), garantiranno enormi capacità [6]. I processi di slicing saranno permessi da tecniche di inoltro che consentono l'implementazione di percorsi virtuali all'interno della stessa infrastruttura [7-10]. Da questo punto di vista il Carrier Ethernet (CE) sembra essere uno dei candidati più interessanti, in particolare per connettere l'unità di base band (BBU), grazie alla sua capacità di gestire reti private VPN di Layer 2 (L2), permettendo connessioni point-to-multipoint e trasmissioni di tipo multicast e broadcast [11-13]. Inoltre CE abilita i processi di virtualizzazione di rete (NFV) [14].

In questo articolo mostriamo come il laboratorio ISCOM NGN è stato configurato per realizzare una infrastruttura in grado di rispondere alle caratteristiche descritte sopra, descrivendo la nostra visione di *slicing*, tenendo conto degli approcci dello strato 2-3 che operano dal segmento di accesso domestico a quello metro e core, con alcuni test sperimentali in merito al nostro approccio CE basato sulla tecnica Backbone Bridge-Traffic Engineering (PBB- TE) all'interno di una rete GMPLS [1] che include sia una parte regionale che una di accesso che dovrebbe connettersi alle Base Station (BS) con connessioni di tipo backhauling o fronthauling. In pratica le sperimentazioni riguarderanno quel segmento di rete oggi definito come **Xhaul** [15], che parte dalle antenne radio fino a raggiungere i punti di presenza (PoP) nelle reti core di uno o più service provider, attraversando elementi di instradamento ad alta capacità e connessioni eterogenee (ad esempio, fibra ottica o wireless, rame ad alta capacità, o onde millimetriche) che collegano le celle radio (sia macro che micro, pico e femto) anche con mini data center.

In particolare mostriamo i vantaggi di avere degli accessi basati sugli apparati NG-PON2 che risultano particolarmente importanti per avere basse latenze. Inoltre riportiamo anche la nostra modalità per la gestione dinamica delle risorse con un approccio Software Defined Network (SDN).

Questo articolo è strutturato nella seguente maniera. Dopo questa introduzione nel Par. 2 è riportata una breve panoramica sui servizi 5G. Nel Par. 3 descriviamo l'ambiente di studio che abbiamo realizzato per affrontare le svariate dinamiche sul 5G, con particolare rilevanza per le

tecniche riguardanti l'XHaul. Nel Par. 4 riportiamo i risultati per le tecniche di backhaling e di slicing, nel Par. 5 descriviamo il nostro approccio SDN con test riguardanti aspetti di disaster recovery. Nel Par. 6 descriviamo l'ambiente per i test di QoS per apparati wireless con alcune misure su smartphone in modalità Wi-Fi. Le conclusioni sono riportate nel Par. 7.

2. I servizi di tipo 5G

Prima di procedere alla descrizione dell'infrastruttura del laboratorio riportiamo alcune caratteristiche essenziali che riguarderanno i servizi 5G, che ci aiuteranno anche a capire le scelte che sono state fatte in questa attività. In particolare in questo articolo ci interessiamo solo degli aspetti del 5G che riguardano le ricadute che possono avere sulla realizzazione della rete di trasporto (accesso-metro-core), e questo proprio per definire le configurazioni da attuare sulla rete NGN ISCOM per renderla idonea alla connessione con apparati di tipo 5G.

In particolare facciamo riferimento al raggruppamento di industrie, operatori e centri di ricerca che hanno formato la *Next Generation Mobile Network Alliance* [8] e che ha cercato di evidenziare tutte le trasformazioni che la rete NGN, sia di tipo Core che di accesso, dovrà subire per rendersi adeguata alle reti 5G.

In realtà tale documento presenta diverse disamine dei servizi 5G, senza mai entrare del dettaglio delle tecnologie delle reti access-core, ed in particolare di come queste possono essere utilizzate. Tuttavia proprio la disamina dei servizi 5G ci permetterà di avere una accurata conoscenza delle prestazioni necessarie, permettendoci di fare le nostre proposte per la rete access-core e di sperimentarle sul test bed ISCOM.

Il white paper **NGMN White paper** [8] distingue otto use cases che individuano dei gruppi di servizi con specifiche richieste prestazionali; riportiamo tale elenco descrivendo tra le parentesi il servizio più caratteristico:

- * Broadband access in dense area (pervasive video);
- * Broadband access everywhere (50 Mb/s per tutti);
- * Higher user mobility (High speed train);
- * Massive Internet of things (sensor networks);
- * Extreme real-time communications (tactile internet);
- * Lifeline communications (natural disaster);
- * Ultra reliable communications (E-Health services);
- * Broadcast-like services (Broadcast-like services).

Nella tabella 1 riportiamo i principali Key Performance Indicators (KPI's) per gli 8 case studies elencati.

Use case category	User Experienced Data Rate	E2E Latency	Mobility
Broadband access in dense areas	DL: 300 Mbps UL: 50 Mbps	10 ms	On demand, 0-100 km/h
Indoor ultra-high broadband access	DL: 1 Gbps, UL: 500 Mbps	10 ms	Pedestrian
Broadband access in a crowd	DL: 25 Mbps UL: 50 Mbps	10 ms	Pedestrian
50+ Mbps everywhere	DL: 50 Mbps UL: 25 Mbps	10 ms	0-120 km/h
Ultra-low cost broadband access for low ARPU areas	DL: 10 Mbps UL: 10 Mbps	50 ms	on demand: 0-50 km/h
Mobile broadband in vehicles (cars, trains)	DL: 50 Mbps UL: 25 Mbps	10 ms	On demand, up to 500 km/h
Airplanes connectivity	DL: 15 Mbps per user UL: 7.5 Mbps per user	10 ms	Up to 1000 km/h
Massive low-cost/long-range/low-power MTC	Low (typically 1-100 kbps)	Seconds to hours	on demand: 0-500 km/h
Broadband MTC	See the requirements for the Broadband access in dense areas and 50+Mbps everywhere categories		
Ultra-low latency	DL: 50 Mbps UL: 25 Mbps	<1 ms	Pedestrian
Resilience and traffic surge	DL: 0.1-1 Mbps UL: 0.1-1 Mbps	Regular communication: not critical	0-120 km/h
Ultra-high reliability & Ultra-low latency	DL: From 50 kbps to 10 Mbps; UL: From a few bps to 10 Mbps	1 ms	on demand: 0-500 km/h
Ultra-high availability & reliability	DL: 10 Mbps UL: 10 Mbps	10 ms	On demand, 0-500 km/h
Broadcast like services	DL: Up to 200 Mbps UL: Modest (e.g. 500 kbps)	<100 ms	on demand: 0-500 km/h

Tabella 1. Key Performance Indicators (KPI's) per gli 8 case studies elencati [8]

Use case category	Connection Density	Traffic Density
Broadband access in dense areas	200-2500 /km ²	DL: 750 Gbps / km ² UL: 125 Gbps / km ²
Indoor ultra-high broadband access	75,000 / km ² (75/1000 m ² office)	DL: 15 Tbps/ km ² (15 Gbps / 1000 m ²) UL: 2 Tbps / km ² (2 Gbps / 1000 m ²)
Broadband access in a crowd	150,000 / km ² (30.000 / stadium)	DL: 3.75 Tbps / km ² (DL: 0.75 Tbps / stadium) UL: 7.5 Tbps / km ² (1.5 Tbps / stadium)
50+ Mbps everywhere	400 / km ² in suburban 100 / km ² in rural	DL: 20 Gbps / km ² in suburban UL: 10 Gbps / km ² in suburban DL: 5 Gbps / km ² in rural UL: 2.5 Gbps / km ² in rural
Ultra-low cost broadband access for low ARPU areas	16 / km ²	16 Mbps / km ²
Mobile broadband in vehicles (cars, trains)	2000 / km ² (500 active users per train x 4 trains, or 1 active user per car x 2000 cars)	DL: 100 Gbps / km ² (25 Gbps per train, 50 Mbps per car) UL: 50 Gbps / km ² (12.5 Gbps per train, 25 Mbps per car)
Airplanes connectivity	80 per plane 60 airplanes per 18,000 km ²	DL: 1.2 Gbps / plane UL: 600 Mbps / plane
Massive low-cost/long-range/low-power MTC	Up to 200,000 / km ²	Non critical
Broadband MTC	See the requirements for the Broadband access in dense areas and 50+Mbps everywhere categories	
Ultra-low latency	Not critical	Potentially high
Resilience and traffic surge	10,000 / km ²	Potentially high
Ultra-high reliability & Ultra-low latency* (* the reliability requirement for this category is described in Section 4.4.5	Not critical	Potentially high
Ultra-high availability & reliability* (* the reliability requirement for this category is described in Section 4.4.5	Not critical	Potentially high
Broadcast like services	Not relevant	Not relevant

Tabella 2. Principali caratteristiche in termini di densità e traffico

3. L'ambiente per gli studi sul 5G realizzato da ISCOM-FUB

Nella figura 1 descriviamo la nostra piattaforma con molteplici funzioni per esser utilizzate in molti degli ambienti che caratterizzeranno le reti 5G dei prossimi anni; essa consiste di:

- una infrastruttura di rete core-metro-access, con l'introduzione di una nuova rete NG-PON2, che è stata configurata per gestire il trasporto delle informazioni verso le

reti wireless disponibili nei prossimi anni in ambito 5G, con specifici KPI richiesti dalle release dei nuovi sistemi wireless;

- di un insieme di tool analitici e simulativi che permettono di studiare le prestazioni di reti wireless con topologie complesse, sia in termini di copertura che di consumi energetici, considerando sia le bande radio oggi disponibili che quelle di prossima utilizzazione;
- di metodologie per la caratterizzazione del canale, specialmente per quelle ad alte frequenze su cui il comportamento della propagazione ha ancora degli aspetti non facilmente descrivibili per la presenza di molti aspetti con comportamento aleatorio.

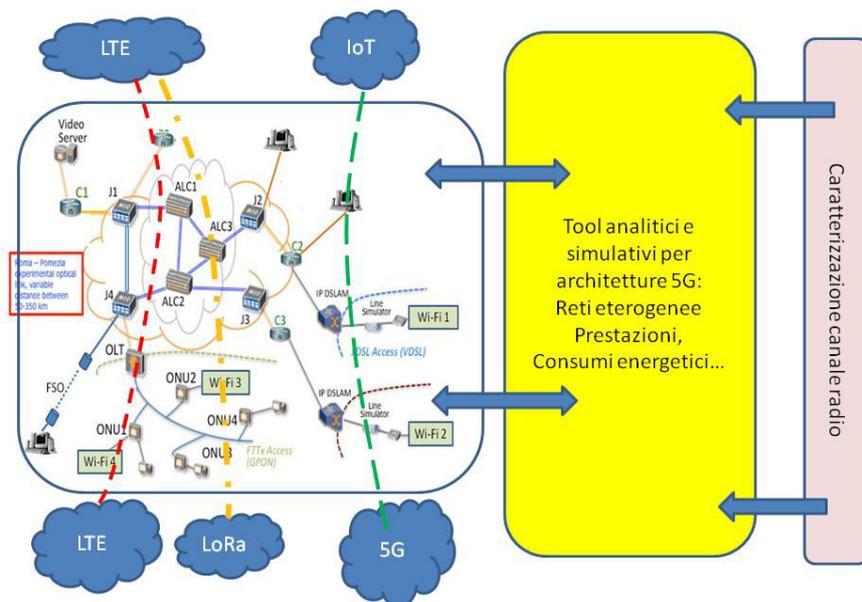


Figura 1. L'ambiente 5G realizzato da FUB e ISCTI. Le linee tratteggiate rappresentano i circuiti logici e fisici implementati in questo progetto per garantire i parametri KPI tipici del 5G

Il laboratorio Core-Metro-Access, riportato a sinistra della Figura 1, dovrà poi essere connesso con apparati wireless che al momento non sono presenti. Si spera inoltre che questo *LAB 5G ready* diventerà un punto di attrazione per future sperimentazioni regionali e nazionali, specialmente perchè questo lab può mettere a disposizione tutta una serie di apparati che non sono facilmente reperibili tra enti pubblici e terzi, a cominciare proprio dalla rete NGPON2, che proprio in questo progetto si è rivelata come una fondamentale infrastruttura per la connessione di reti eterogenee costituite da macro e micro cell.

Tramite questa piattaforma, oltre ai casi che riportiamo in questo articolo, saranno possibili tutta una serie di studi che possono coprire una serie di argomenti tipici delle tematiche sul 5G che vengono in genere suddivise in tre diverse categorie: **Enhanced Mobile Broadband (eMBB)**, **Massive machine type communications (mMTC)** e **Ultra-reliable and low latency communications (URLLC)**.

4. Connessioni logiche e fisiche per celle: backhauling

L'utilizzo della porzione di spettro a più alte frequenze e bande sempre maggiori, insieme a una maggiore richiesta di copertura comportano come ricaduta la **densificazione** delle infrastrutture wireless con dispiegamento di smallcell per l'offloading della rete di macrocelle. Questo determinerà però un aumento dei collegamenti (fibra e ponti radio) per rilegare le celle con un conseguente aumento dei costi infrastrutturali. La nuova rete di quinta generazione però si mostra flessibile sull'impiego di qualsiasi tecnologia per la sezione di accesso, con l'obiettivo però di rispettare i parametri di rete preposti tra cui throughput e latenza.

L'architettura base che abbiamo preso in considerazione per reti ultrabroadband mobile è quella riportata in Figura 2, dove a livello di accesso le reti in fibra di tipo P2P e GPON, verranno gestite con tecniche slicing atte a creare circuiti logici e fisici a bassissima latenza. La configurazione tipica utilizzata per HetNet sarà basata su backhauling con P2P per macrocelle e GPON e NGPON2 per small cell, e la rete sarà in grado di gestire in modo dinamico (secondo schemi tipici delle SDN) le risorse disponibili (essenzialmente connessioni ottiche GbE) sfruttando le conoscenze che possono provenire da una rete di monitoraggio per la valutazione della QoS presso gli utenti o per la conoscenza del traffico in rete.

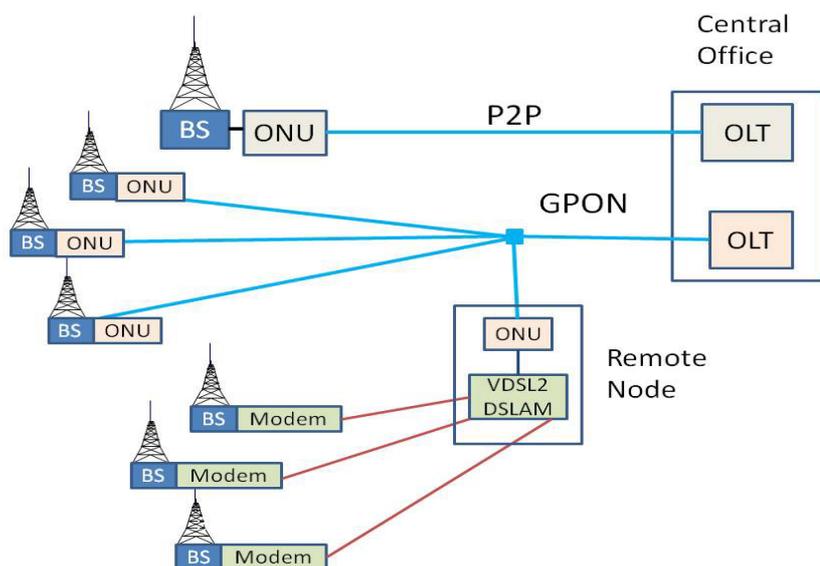


Figura 2. Configurazione backhauling per copertura con Macro-Micro celle

Nella **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** si riporta la configurazione utilizzata nel LAB NGN per studiare le prestazioni di queste reti specialmente dal punto di vista della latenza.

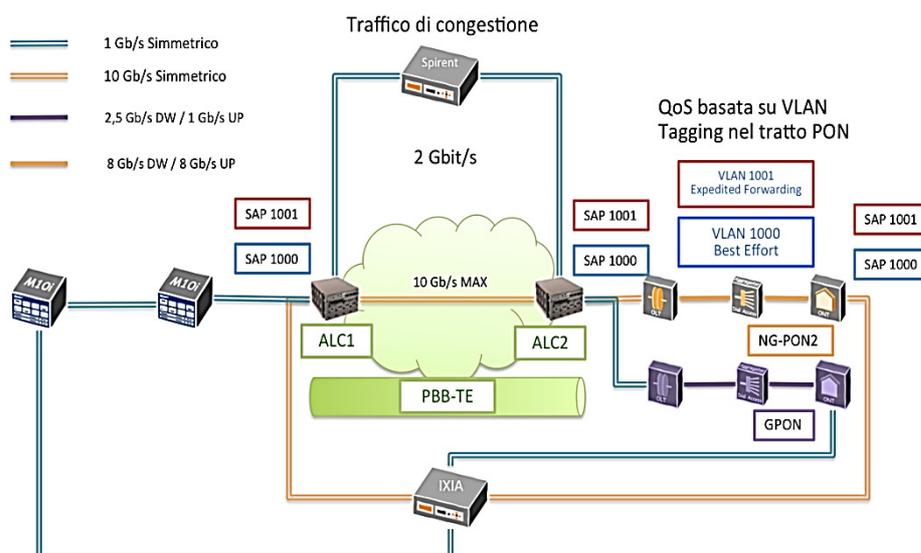


Figura 3. Configurazione rete di test (caratterizzazione NG-PON2)

In particolare per ricreare condizioni di carico reale della rete e per simulare situazioni di congestione critiche ci si è avvalsi di due generatori di traffico come lo Spirent e l'Ixia dotati di interfacce a 10 Gb/s, anche per valutare le tecniche di slicing per la differenziazione dei servizi.

4.1. Struttura dei Test Upstream e Downstream

Per poter dimostrare l'obiettivo preposto, inizialmente, affinché l'architettura di rete considerata sia compatibile con i parametri del 5G si sono scelti tre tipi di test da applicare sia in downstream che in upstream. Prima di analizzare la struttura di ciascuno si illustra nel prossimo paragrafo il tipo di Latenza scelta per tali test.

4.2. Algoritmo di calcolo della latenza

Il software IXIA mette a disposizione per l'ambiente di testing diversi algoritmi di calcolo della latenza, i principali sono:

- Store and Forward Latency: E' definito dallo standard RFC 1242 e considera l'intervallo di tempo che inizia quando l'ultimo bit del frame lascia la porta di invio e finisce quando il primo bit del frame è visto sulla porta di ricezione(LIFO).
- Cut Through Latency: E' definito dallo standard RFC 1242 e considera l'intervallo di tempo che inizia quando il primo bit del frame lascia la porta di invio e finisce quando il primo bit del frame è visto sulla porta di ricezione(FIFO).

Per l'esecuzione dei test si è scelto come algoritmo di calcolo della latenza, il Cut Through Latency, ampiamente diffuso e compatibile con le nostre scelte di Testing.

Di seguito si illustra la costruzione dei tre Test realizzati in downstream/upstream che si eseguono inizialmente a “router scarico” per poi portare a “stressare” la rete, testandola in condizioni peggiori.

Test 1

Il primo Test viene effettuato utilizzando il software del generatore di traffico IXIA e si articola nei seguenti passi:

1. Si attiva singolarmente il traffico residenziale (1Gb/s) e si testa la rete in uno scenario “ideale” per verificarne i parametri di latenza e di throughput a rete scarica.
2. Si esegue singolarmente il traffico mobile a 10Gb/s e si attendono risultati che esprimano sia parametri minimi di latenza e sia di throughput tali da poter dimostrare l’effettivo utilizzo dell’NG-PON2 come infrastruttura di backhauling per small cell anche in questo caso a rete scarica.

Entrambe le componenti di test si eseguono in upstream/downstream, in una rete dove i singoli dispositivi vengono “stressati” in maniera minima, cercando di ottenere così i primi parametri iniziali da cui partire per effettuare le successive considerazioni.

Il test è stato eseguito facendo partire i singoli traffici per una media di tempo di 20 s ciascuno e per ogni flusso considerato si è scelto opportunamente un line rate tale da comportare una packet Loss prossima allo 0%.

I parametri scelti per ciascun flusso sono stati quelli di seguito riportati sia per il primo test che per i successivi:

- Per il flusso a 10Gb/s sia in upstream che in downstream, si è impostato il line rate circa all’80% poiché fissando valori più alti si è notata una notevole perdita di pacchetti dovuta sia alla trama che all’overhead dell’NG-PON2 che ha determinato quindi un payload utile di circa 8Gb/s.
- Per il flusso a 1Gb/s sia in upstream che in downstream, si è configurato un line rate circa del 99.6% determinando un flusso nella rete di circa 1Gb/s.

Per il test 1 in analisi sono stati impostati i flussi sopra citati senza nessuna classe di servizio.

In seguito analizzando i risultati, si osserverà il comportamento delle due infrastrutture di rete di accesso quali la GPON e la NG-PON2 sia in downstream che in upstream, dove ci si aspetta una latenza più alta determinata dall’accesso TDMA.

Test 2

Per il secondo test, si decide di analizzare il comportamento dei traffici in una situazione di “carico” della rete. Il test è stato effettuato sul generatore di traffico IXIA facendo partire in background anche il traffico del generatore SPIRENT.

Tale Test è stato realizzato per analizzare i parametri di latenza e throughput dei traffici in una situazione di saturazione del canale.

Per ottenere il maggior carico nella rete, il test è stato articolato nel seguente modo:

1. Sono stati eseguiti insieme sia il traffico GPON (1Gb/s) sia il traffico mobile virtualizzato in 4 flussi da 2Gb/s e sia i due flussi generati da SPIRENT da 1Gb/s l'uno per un totale di 11 Gb/s sul ramo tra i due Alcatel 7750 connessi tramite interfaccia ethernet 10 Gb/s.

Il punto 1 è stato effettuato sia in downstream che in upstream, inserendo nella rete un totale di flussi di circa 10 Gb/s. Ci si aspettano quindi parametri elevati sia in downstream che in upstream, in ambito di latenza e throughput, che indichino la necessità di trattare in maniera distinta nella nostra architettura di rete il traffico mobile per il 5G.

Il secondo test è durato per una media di tempo di circa 20 s e i line rate per i flussi considerati sono:

- Flusso residenziale: 99.6 % line rate.
- 2 Flussi aggiuntivi dello SPIRENT: 100% line rate.
- 4 Flussi mobile da 2Gb/s: 80% line rate.
- Flussi eseguiti considerati in modalità Best Effort.

Test 3

L'ultimo test, effettuato sia in upstream che in downstream si pone l'obiettivo di dimostrare come il traffico mobile gestito con un'opportuna qualità del servizio può ottenere parametri di latenza e throughput inferiori.

Il test 3 si articola così in tal modo:

- Sono eseguiti come nel test 2 tutti i traffici compreso il residenziale a 1 Gb/s, i 4 traffici mobile a 2Gb/s e i due traffici SPIRENT per caricare la rete.
- Solo un traffico mobile a 2Gb/s considerato in un contesto 5G ad ultra-low-latency è stato modificato al fine di ottenere una qualità del servizio maggiore rispetto agli altri traffici mobile generici a 6 Gb/s. Tale cambiamento è stato effettuato scegliendo una priorità IP di tipo DiffServ con PHB di tipo EF in modo da ottenere una priorità maggiore rispetto agli altri traffici della rete.

Questo Test, vuole simulare una reale architettura 5G dove non tutto il traffico mobile ma solo quello per un determinato servizio viene gestito in un ambiente di rete “carico” in modalità differente. Il test è stato eseguito per una media di 20 s con gli stessi line rate applicati in precedenza.

4.3. Risultati del Testing

In questa sezione si analizzano i risultati di testing, confrontando l’evoluzione dei parametri di latenza e throughput in base alle diverse strutture di test eseguiti.

Test 1

Considerando il traffico mobile a 10 Gb/s in downstream si mostrano i risultati in Figura 4:

Figura 4. Latenza 10Gb/s downstream

Traffic Item	Cut-Through Avg Latency (ns)	Cut-Through Min Latency (ns)
10G	74.539	73.700

Dalla Figura 4 in esame si può notare come la latenza media ottenuta sia di 74.539 ns. Tale risultato ci mostra le potenzialità della rete di accesso NG-PON2, la quale dimostra di poter essere impiegata come rete di backhauling 5G, ottenendo parametri di latenza < 1 ms. L’esito sostenuto rientra pienamente nei requisiti di utente 5G.

Analizzando il test in termini di throughput:

Figura 5. Throughput 10Gb/s downstream

Name	Tx Rate (Mbps)	Rx Rate (Mbps)
10G	8.092.105	8.092.105

Si nota come la velocità di trasmissione e ricezione sia circa di 8 Mbps considerando come citato in precedenza un line rate del 80% sul flusso a 10Gb/s analizzato.

Focalizzandosi invece sulla Figura 6, i risultati ci mostrano una notevole differenza di latenza in ambito upstream per il traffico mobile a 10 Gb/s:

Figura 6. Latenza upstream 10Gb/s

Traffic Item	Cut-Through Avg Latency (ns)	Cut-Through Min Latency (ns)
10G – UPStream	150.598	96.560

Come previsto si nota una latenza media di 150.598 ns superiore rispetto alla latenza media in downstream. Tale incremento è dovuto

all'accesso TDMA della NG-PON2 dove le ONT possono trasmettere in un determinato intervallo di tempo.

Per quanto riguarda il throughput si rispecchia il valore ottenuto in downstream.

Entrambi i flussi in up/downstream a 10 Gb/s presentano packet loss allo 0% e ciò si evince dai risultati in Figura 4, Figura 5 e Figura 6.

Analizzando invece la rete di accesso GPON per il traffico residenziale si ottiene una latenza media di 244.506 ns in downstream, notando, come la NG-PON2, un notevole incremento nella direzione upstream.

Da questo primo test possiamo affermare come il traffico mobile generato da una "base band unit" nella rete di accesso in esame risponda in maniera ottima ai requisiti del 5G in una configurazione di rete NG-PON2 "ideale".

Test 2

Tale Test, secondo la struttura spiegata in precedenza ci mostra come i traffici a 2Gb/s per il mobile e il traffico residenziale subiscono un notevole aumento di perdita di pacchetti e una latenza spropositata dovuta alla congestione nella rete.

La Figura 7 ci mostra il test in upstream, e si può vedere come i diversi traffici mobile reagiscono alla saturazione del canale:

Traffic Item	Cut-Through Avg Latency (ns)	Cut-Through Min Latency (ns)
1G GPON UPStream	75.991.450	1.405.060
2 Gb/s BE3 UPStream	68.353.045	584.840
2 Gb/s BE2 UPStream	68.353.061	584.770
2 Gb/s BE1 UPStream	68.353.176	584.190
2 Gb/s EF UPStream	68.353.000	582.020

Figura 7. Latenza upstream flussi da 2Gb/s BE

Analizzando uno dei traffici a 2Gb/s si nota una latenza massima di 68.840.530 ns convertita in ms ad un valore di 68, che sfiora ampiamente i requisiti di utente 5G dove la massima latenza ammissibile è di 10 ms. Inoltre il packet loss si aggira intorno all'8 % **rendendo indispensabili** tecniche di qualità del servizio per tutelare i traffici mobile ad ultra latenza in caso di saturazione della rete.

Test 3

Il test 3 analizzato in Figura 8, ci evidenzia come l'intervento della qualità del servizio per il traffico a ultra-low-latency sia una tecnica fondamentale per preservare la priorità del traffico e garantire una certa banda.

Figura 8. Latenza con qualità del servizio 2Gb/s upstream

Traffic Item	Cut-Through Avg Latency (ns)	Cut-Through Min Latency (ns)
1G GPON UPStream	79.965.743	3.134.080
2 Gb/s BE3 UPStream	92.258.985	542.210
2 Gb/s BE2 UPStream	92.250.685	541840
2 Gb/s BE1 UPStream	92.306.040	541.020
2 Gb/s EF UPStream	126.763	106.990

Dalla Figura 8 in upstream, si nota come la latenza media per il traffico mobile destinato a servizi ultra-low-latency con classe di servizio EF, nonostante la saturazione della rete, mantenga una latenza media di 126.75 ns, rientrando interamente nei requisiti 5G.

Figura 9. Tabella con frame rate

Name	TX Frames	RX Frames	Loss %
2 Gb/s BE3 UPStream	15.384.616	13.187.354	14,282
2 Gb/s BE2 UPStream	15.384.616	12.966.931	15,715
2 Gb/s BE1 UPStream	15.384.616	14.690.002	4,515
2 Gb/s EF UPStream	15.384.616	15.384.616	0

Osservando la Figura 9 la packet loss mostrata per i traffici generici mobile a 2Gb/s sono intorno al 15% , mentre nel caso del traffico ad ultra low latency sono allo 0% . Tale risultato evidenzia come il traffico mobile, gestito attraverso una determinata priorità, possa raggiungere la core Network attraverso una rete di accesso soddisfacente, che gli permette di ottenere parametri richiesti per il 5G.

4.4. Grafici

In tale paragrafo si mostrano i grafici ottenuti dalla fase di testing utilizzando il sistema di gestione ISAM5620 per i router Alcatel-Lucent.

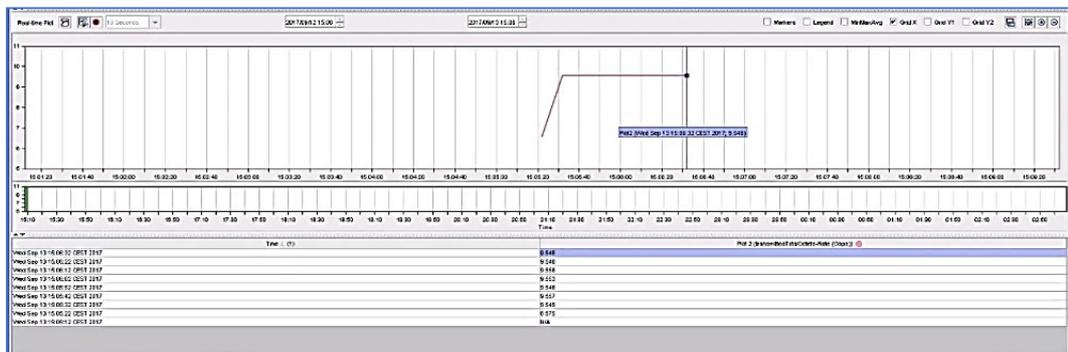


Figura 10. Grafico Saturazione del canale

La Figura 10 mostra il totale dei flussi trasmessi dalla porta due del router Alcatel-Lucent in fase di congestione. Si nota dalle statistiche un flusso totale di circa 10 Gbps che viene realizzato eseguendo sia il test 2 che il test 3.

Tale insieme di traffici porta quindi a saturare l'interfaccia a 10 Gb dei due router Alcatel-Lucent mostrando nei singoli test gli effetti di ciò che comporta.

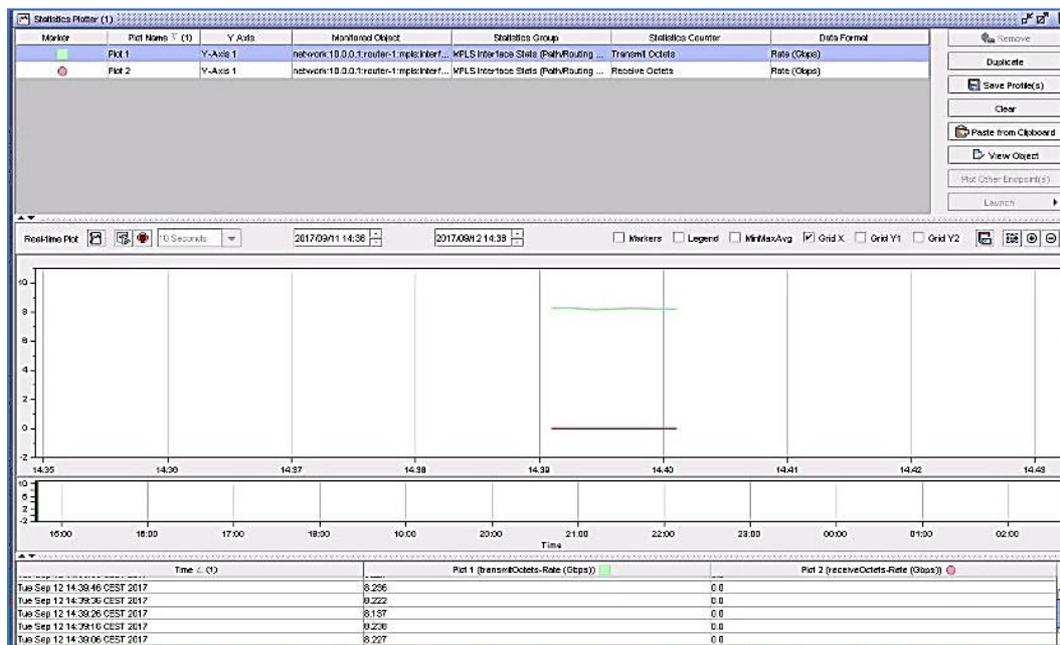


Figura 11. Grafico Tunnel MPLS

L'immagine in Figura 11 invece, è stata ottenuta mettendosi in ascolto sull'interfaccia dell'Alcatel-Lucent (router ingress MPLS) verso il successivo Alcatel in direzione downstream. Si può verificare come effettivamente nel Tunnel MPLS si trasmettano 8Gbps, che rappresentano quindi il traffico mobile presente nel tunnel che inizia sul Router Alcatel-Lucent e termina sulla OLT dell'NG-PON2. La medesima considerazione può essere effettuata in upstream.

4.5. Configurazione della qualità del servizio con Carrier Ethernet tipo PBB-TE

Per quanto riguarda la configurazione della qualità del servizio si è proceduto nella implementazione del PBB-TE (Provider Backbone Bridging – Traffic Engineer) nei 2 router Alcatel 7750. Il PBB-TE è un tipo di configurazione che permette di interconnettere due punti della rete come se facessero parte della stessa LAN ovvero come se fossero interconnessi attraverso un semplice switch di livello 2.

Il PBB-TE per funzionare correttamente ha bisogno dei seguenti protocolli implementati:

- OSPF (Open Shortest Path First), come IGP (Interior Gateway Protocol)
- RSVP (Reservation Protocol), come segnalazione (propedeutico all'MPLS)
- MPLS (Multi Protocol Label Switching), come protocollo di trasporto
- LDP (Label Distribution Protocol), come segnalazione per il tunnel SDP (Service Distribution Protocol)

Il PBB-TE è stato configurato implementando prima l'OSPF tra i due router Alcatel, successivamente l'RSVP, l'LDP e l'MPLS come base per poter creare il tunnel SDP su cui far convergere il traffico delle diverse VLAN d'ingresso (interfacce SAP).

Il tipo di convergenza del traffico può essere di due tipi:

- E-Line, servizio punto-punto
- E-LAN, servizio punto-multipunto

Per i nostri scopi è stato sufficiente configurare il servizio E-Line, in questo modo i due SAP in ingresso ai router seguono vie parallele tra i due endpoint.

La mappatura della qualità del servizio avviene a livello SAP, indicando le code assegnate a ciascun SAP. Nel caso in esame per il 1000 è Best Effort e per il 1001 è Assured Forwarding e 1002 è Expedited Forwarding.

Le tre code sono già presenti nei router poiché sono code di tipo Network.

I tre traffici così implementati seguono distintamente due percorsi logicamente separati, sebbene condividano la stessa infrastruttura. Seguono anche un trattamento relativamente alla priorità differente, caratterizzato dalle diverse code dello scheduler associate.

Si noti inoltre che il tipo di configurazione permette lo slicing di rete, nella fattispecie gli indirizzi IP configurati nelle due interfacce del generatore di traffic IXIA sono appartenenti alla medesima sottorete per ciascuna VLAN. Contestualizzando meglio, nel caso di una rete di backhauling è come se BBU ed EPC fossero direttamente connesse con un semplice cavo di rete, a fronte invece di una architettura di rete molto più complessa.

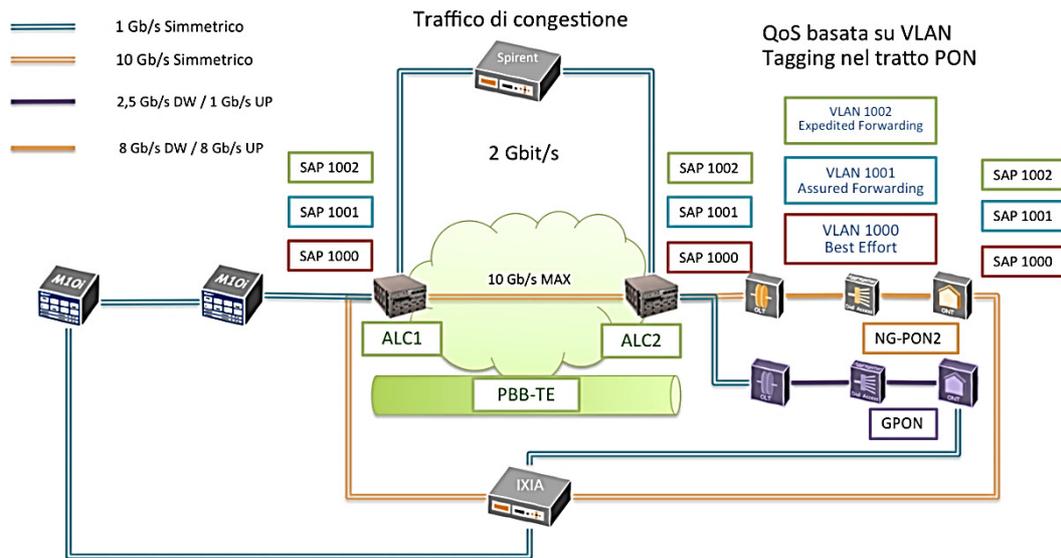


Figura 12 . Configurazione servizi per gestione qualità del servizio basata su VLAN tagging e PBB-TE

Ci siamo quindi messi nel caso peggiore di Uplink, con il traffico generato dall’interfaccia di IXIA collegata all’ONT verso quella collegata ad ALC1.

Il risultato ottenuto è quello mostrato in figura seguente.

Traffic Item	Tx Rate (Mbps)	Rx Rate (Mbps)	Loss %	Cut-Through Avg Latency (ns)
1 Gb/s BE UL- DL	1,973.688	1,824.420	12.658	61,101,091
2 Gb/s EF UL	1,973.688	1,973.664	0.000	140,969
2 Gb/s AF UL	1,973.688	1,970.610	0.179	791,274
4 Gb/s BE UL	3,947.364	2,596.788	31.683	143,038,658

Figura 13 . Statistiche di traffico generato in Uplink sull’architettura di rete in esame

In evidenza i tre traffici, due con gestione della qualità di tipo EF e AF da 2 Gb/s ed uno BE da 4 Gb/s. Le tre tipologie di traffico possono essere associate ai tre paradigmi del 5G:

- uRLLC – EF, nessuna perdita di pacchetti e latenza media di 0,140 ms;
- eMBB – AF, perdite minime e latenza media di 0,791 ms;
- mMTC – BE, perdite superiori al 10% e latenza di 143 ms.

Il quarto traffico in figura è solo di tipo BE per congestionare il percorso di rete.

4.6. Valutazioni finali

Dai Test effettuati in laboratorio è emerso sempre più l’affermarsi di tecnologie già esistenti impiegate in ambiti di sviluppo e innovazione come il 5G. La rete di accesso, nonché l’NG-PON2, hanno dimostrato di essere utilizzabili in uno scenario 5G, mostrando parametri di latenza soddisfacenti per coprire una vasta gamma di scenari di casi d’uso come

l'accesso broad-band in differenti modalità e come servizi di ultra-low latency. Simulando nel corso dei test l'effettivo carico della rete si è evidenziato, con le varie accortezze considerate, come i test mostrino esiti positivi e come la rete risponda correttamente nonostante l'effettivo "stress" sui parametri richiesti, avendo preventivamente configurato una QoS ad hoc.

5. Andamento dinamico della rete

Il tema delle SDN nei laboratori ISCOM è stato già affrontato in diverse sperimentazioni [16-22], e dopo una accurata analisi della letteratura scientifica e prendendo spunto da precedenti sperimentazioni nel LAB ISCOM sulle tecniche di gestione automatica delle risorse, intese come connessioni GbE e percorsi logici di tipo VPLS-MPLS, ma soprattutto considerando gli apparati attualmente disponibili in LAB, si è deciso di utilizzare uno schema con un Orchestrator che comandava direttamente i router con messaggi SNMP. La principale innovazione per il nostro schema SDN è nella gestione della QoS, infatti l'orchestrator è comandato con messaggi provenienti dalla rete di monitoraggio mPlane, che la FUB realizzò nell'ambito del progetto EU FP7 mPlane; tale rete permette di conoscere lo stato degli accessi utilizzando sonde attive e il traffico mediante un monitoraggio passivo. Mediante l'analisi tra la correlazione dei dati delle sonde passive e attive è possibile vedere se in un punto della rete è presente una congestione o una riduzione del rapporto SNR. Le informazioni circa le criticità della rete sono passate da mPlane all'Orchestrator che provvederà ad esempio ad aumentare la capacità di un collegamento tra due router. Tutto questo processo è stato testato sperimentato in LAB e i dettagli di tutta questa metodologia sono riportati nel lavoro [18] presentato alla conferenza FOAN 2017 tenutasi nel 2017 a Monaco di Baviera.

Per aiutare il lettore possiamo riassumere che lo schema della rete di monitoraggio mPlane è costituita da un'infrastruttura distribuita per eseguire misure attive, passive e ibride a diversi livelli OSI. Un repository raccoglie, memorizza e analizza i dati raccolti tramite una elaborazione parallela e un reasoner che cerca in modo iterativo la causa di una degradazione nella rete, anche determinando le condizioni che portano ad alcuni problemi. In particolare lo strato di misura utilizza una serie di sonde programmabili (software e hardware) sia realizzate nel progetto stesso sia già disponibili ma adattate però all'architettura mPlane.

Uno degli obiettivi principali di mPlane è quello di assistere l'utente in tutte le sue esigenze relative all'accesso alla rete, in particolare per quanto riguarda i test di qualità del servizio (QoS) e per la verifica e la certificazione della SLA tra utente e ISP. Quindi, lo strato di misura di mPlane risulta fondamentale per le SDN in quanto fornisce un quadro di monitoraggio della rete distribuito e onnipresente per raccogliere misure eterogenee da un variegato numero di punti di misura diversi.

Per testare l'efficienza della nostra modalità SDN abbiamo deciso di prendere in considerazione la tematica delle *Next Generation Emergency Networks*, che oggi ha molto importanza, e su cui il Governo sta puntando molto, anche con un apposito decreto dell'aprile 2017 riguardante la protezione delle *infrastrutture critiche* materiali e immateriali. Quindi abbiamo voluto considerare lo studio della rete per *disaster recovery*. Per questo si sono messe a punto delle metodologie che simulano una situazione di disastro (terremoto, tempesta,...) che crea rottura di cavi e congestione nella rete, cercando di testare come il nostro approccio SDN può permettere il ripristino di una situazione di buona qualità delle trasmissioni con misure di throughput, latenza e tempi di ripristino tipici di quelli richiesti dalle reti 5G.

Quindi si considera l'ambiente riportato nella Figura 14 dove si suppone sostanzialmente di avere due reti distinte, una grigia che non è sotto il nostro controllo, e una gialla con il controllo delle prestazioni ottenute tramite il piano di misura mPlane. Improvvisamente un evento disastroso distrugge dei cavi di trasmissione (sia nella rete grigia che gialla), provocando una interruzione delle trasmissioni che è direttamente osservata nella rete gialla, ma anche un aumento del traffico che dalla rete grigia ora transita nella rete gialla, per l'indisponibilità di connessioni nella rete grigia.

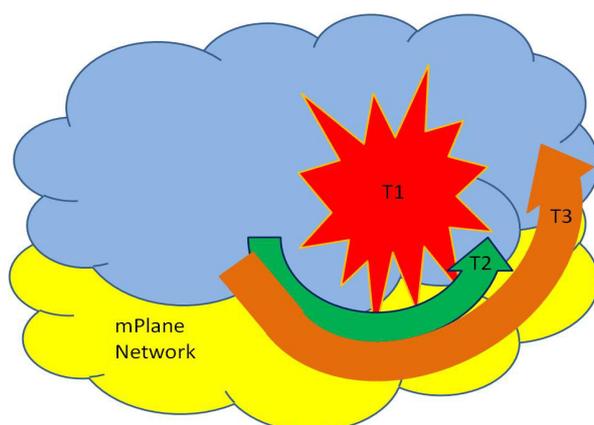


Figura 14 . Esempio di disaster recovery

L'ambiente sperimentale che abbiamo considerato è quello riportato nella figura sotto. Non descriviamo tutti i componenti che sono stati già illustrati in precedenti pubblicazioni [16-22]. Qui diciamo semplicemente che la restoration delle connessioni ottiche GbE è effettuata con la tecnica Standby Secondary Path technique (called VPLS SSP), dove noi implementiamo un link basato sullo Standby Secondary Path. Quando il collegamento primario si interrompe il router corrispondente instrada il traffico direttamente sul collegamento che era stato definito come secondario, senza calcolare nuove rotte. Nella Figura 15 il percorso primario riguarda i router J1-J2-J4, mentre il secondario J1-A1-A2-J4.

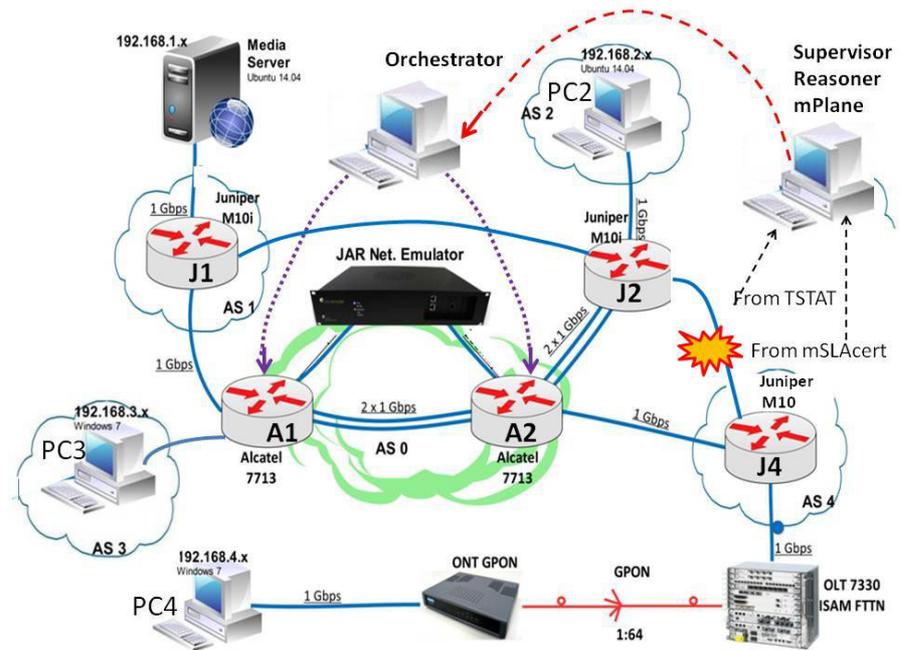


Figura 15. Schema del laboratorio configurato per il Disaster Recovery con trestoration basata su VPLS Standby Secondary Path

Per quanto riguarda invece il controllo della congestione dovuta all'incremento del traffico (dalla rete grigia alla gialla) è stato adottato l'approccio SDN basato sulla procedura Dynamic Upper Fixed Lower (DUFL).

Vediamo come si comportano gli eventi illustrati nella figura. Prima di tutto a T1 il percorso primario si rompe tra J2 e J4. Tale danno è quasi istantaneamente ripristinato dall'approccio VPLS SSP che attiva il collegamento GbE tra A1 e A2; successivamente, in T2, il JAR induce due diversi livelli di congestione introducendo traffico spurio nel collegamento A1-A2 che quasi satura la capacità del collegamento considerando il traffico tra Media Server e PC4, che è sotto test, e che era stato fissato a 92 Mb / s.

Al tempo T3 il JAR introduce un traffico spurio di 1 GbE in A1-A2 che causa una forte congestione. L'effetto di tale congestione viene rilevato sia dalla destinazione dell'utente (PC4) sia dal mezzo di mSLAcert, e analizzando il traffico mediante TSTAT con la sua sonda passiva situata sull'uscita A2. La correlazione tra i dati di TSTAT e mSLAcert, eseguita nel supervisore-mplane, allarmerà l'orchestrator che gestirà A1 e A2 per attivare l'altro collegamento GbE tra A1 e A2.

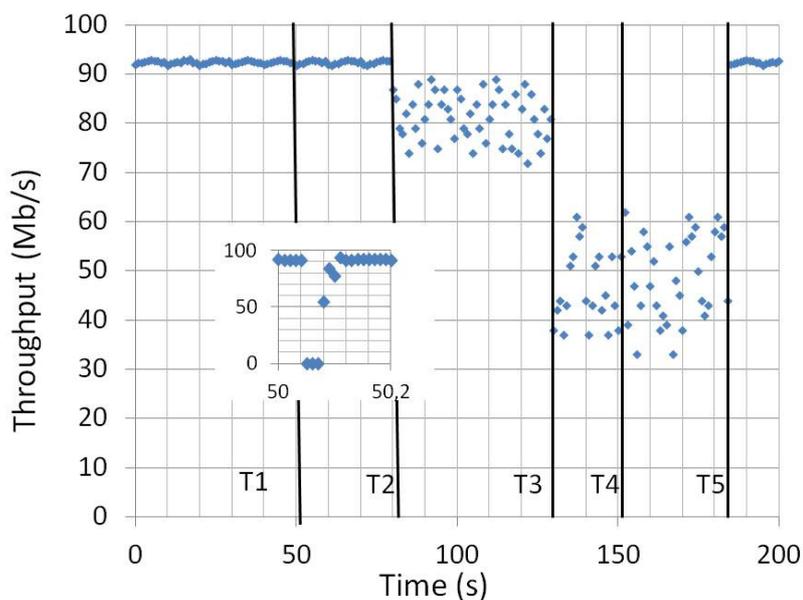
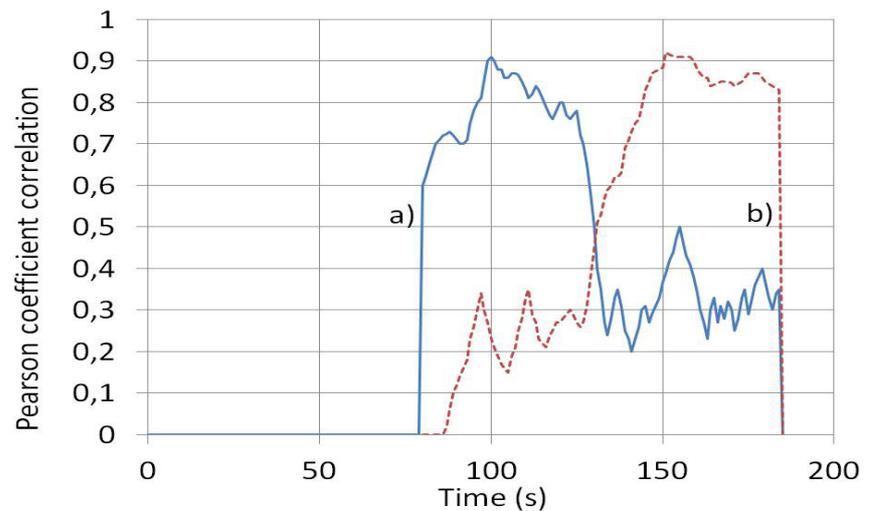


Figura 16 . Throughput vs time during the damages effects

Le conseguenze di tutti questi eventi sono chiaramente indicate in Figura 16 dove riportiamo il throughput misurato su PC4 tramite mSLAcert. In T1 il guasto del collegamento viene ripristinato immediatamente dalla procedura VPLS SSP in circa 40 ms. Nel riquadro della figura mostriamo i dettagli della procedura di restoration in una scala temporale più dettagliata. A T2 la prima congestione induce una piccola diminuzione del throughput, mentre a T3 l'effetto è rilevante. mPlane verifica sia il throughput del PC4 che il traffico che viaggia verso PC4, rilevando la presenza di anomalie nella trasmissione dei pacchetti che vengono analizzate secondo un approccio basato sulla correlazione di Pearson descritto in [17]. In particolare abbiamo preso in considerazione come parametri principali il Throughput medio (punti blu in Figura 16), il numero di segmenti ritrasmessi del flusso a causa di ritrasmissione veloce (Fast_retry) e quelli dovuti a timeout (Timeout_retry). Qui possiamo sintetizzare che il coefficiente di correlazione di Pearson esprime il grado di relazione tra due variabili, x e y , e varia da -1 a 1.

Figura 17 . Pearson correlation between Throughput and Fast_retry (a) and between Throughput and Timeout_retry (b)



Nella Figura 17 riportiamo le correlazioni di Pearson relativa ai valori tra Throughput e Fast_retry (a) e tra Throughput e Timeout_retry (b).

Come previsto, in assenza di congestione entrambe le correlazioni sono pari a zero. Finché abbiamo una leggera congestione, è presente solo la ritrasmissione rapida dei pacchetti, e questo è il motivo per cui, per un po', la linea tratteggiata rimane zero mentre la linea continua cresce. Più aumenta la congestione, maggiore è il numero di segmenti prodotti dalla ritrasmissione rapida e dal timeout, e quando si verifica una pesante congestione i segmenti ritrasmessi a causa del timeout, saranno più numerosi di quelli provenienti dalla ritrasmissione veloce.

I valori di correlazione mostrano che, in caso di leggera congestione, abbiamo una prevalenza della correlazione tra throughput e ritrasmissione rapida e, viceversa, in caso di forte congestione abbiamo una correlazione più alta tra throughput e timeout del pacchetto.

La Figura 17 ci suggerisce di implementare algoritmi specifici che ci permettono di generare allarmi quando si presentano questi tipi di anomalie. Tali allarmi potrebbero essere importanti per la gestione della rete, e in particolare tali rilevamenti di anomalie potrebbero essere utilizzati per apportare modifiche adeguate alla configurazione di rete, in modo che parte del traffico possa essere instradata in alcuni collegamenti meno congestionati.

Nel nostro caso abbiamo definito una soglia pari a 0.8 riguardante solo la linea tratteggiata di Figura 17 per decidere quando il percorso tra A1 e A2 doveva raddoppiare la capacità, attivando un altro collegamento GbE.

I risultati mostrano quindi l'affidabilità del metodo proposto e sperimentato, che a nostro avviso potrà essere utilizzato anche in reti con terminazioni LTE.

6. Sperimentazioni e2e con WiFi.

Per studiare le prestazioni su rete wireless dal lato terminale è stata realizzata una apposita APP per Android sviluppata con IDE Android Studio 2.2.3. Tale App effettua un ciclo di test costituito dai seguenti KPI relativi alla qualità della rete ed alla qualità dei servizi (web browsing e video on-demand):

1. Ping delay tra end-point e server
2. Throughput in Download tra server e end-point
3. Throughput in Upload tra end-point e server
4. Web Page Download Speed: download di una pagina web di riferimento (ETSI Kepler)
5. First Frame Download Speed: velocità di download del primo frame di un video on-demand
6. Full Video Download Speed: campionamento valore del buffer ogni secondo per un servizio video-on demand.

Al fine di collaudare l'affidabilità dell'applicazione, sono stati svolti dei test di network performance su rete mobile pubblica 3G. Su tale rete è stata rilevata un'oscillazione del throughput in download pari a 2.5 - 6.1 Mbps in busy hour e un'oscillazione pari a 7.5 - 12.1 Mbps in off-peak hour.

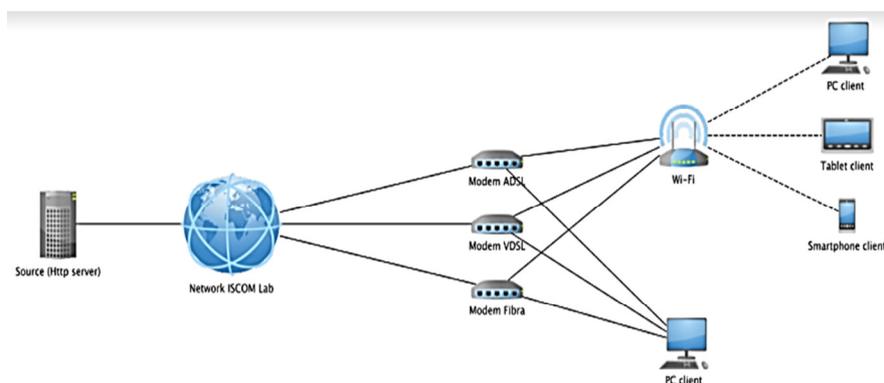


Figura 18 . Configurazione del LAB per misure su Wi-Fi con dispositivo Android

Al fine di effettuare dei test comparativi è stato configurato, quindi un test-bed opportuno riportato in Figura 18. Per il collegamento wi-fi del test-bed è stato utilizzato un protocollo di connessione Wi-Fi 802.11 e, con frequenza trasferimento dati a 2,4 GHz, e come end-point è stato utilizzato un dispositivo Samsung Galaxy S3, con sistema Operativo Android 4.3 Jelly Bean (API level 18).

Nelle figure che seguono riportiamo i KPI elencati precedentemente misurati sul dispositivo connesso alla rete Wi-Fi con access point connesso successivamente a modem appartenenti a diverse architetture di rete: ADSL (profilo download a 7 e 20 Mb/s), VDSL (profilo a 30 e 100 Mb/s) e fibra (100 Mb/s).

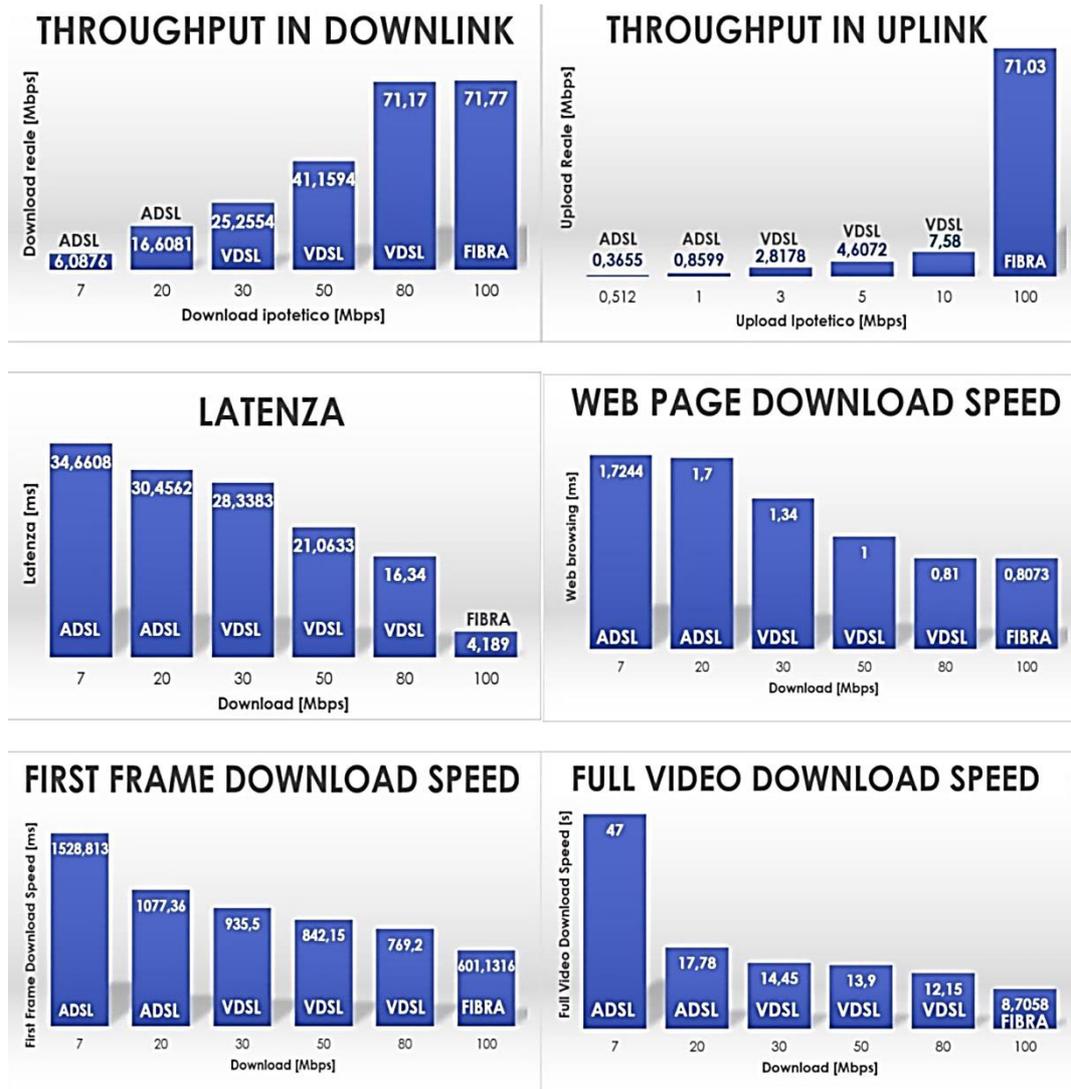


Figura 19 . Prestazioni del dispositivo Android in diverse architetture di connessione per la rete Wi-Fi

I risultati di Figura 19 mostrano la validità del prototipo software per la misura di KPI volti a caratterizzare le prestazione della rete e dei servizi come quelli presi in esame.

Inoltre questi risultati mostrano le potenzialità delle architetture delle reti di accesso anche ai fini della capillarità dei trasmettitori radio previsti nelle reti di prossima generazione (5G). Le architetture FTTC e FTTH presuppongono la presenza di fibra ottica almeno fino agli armadi stradali; la stessa fibra può essere efficientemente sfruttata per l'illuminazione delle BTS di nuova generazione (femtocelle), la cui capillarità è compatibile con quella degli armadi stradali.

7. Conclusioni

In questo articolo abbiamo descritto l'ambiente che è stato realizzato dalla FUB e dall'ISCOM per gli studi sul 5G, con particolare rilevanza per gli aspetti che riguardano la rete XHaul, cioè la rete di trasporto (core-access) che connette le BS. In particolare è stata descritta la configurazione completa della rete ISCOM per uno scenario di tipo *Slicing* e cioè di una partizione logica della rete in tanti segmenti End-to-End (server-client), dove in ciascun segmento poteva esser definita una specifica classe di servizio (throughput, latenza, jitter). La sperimentazione ha riguardato tutti i principali dispositivi connessi alla rete e cioè i router Juniper e Alcatel e gli accessi GPON. Oltre ai test di QoS su PC connessi alle ONU GPON, sono stati considerati anche accessi di tipo Wi-Fi. Con questa configurazione, il laboratorio si presta come base per una rete completa di tipo 5G per la gestione di tante reti radio di tipo eterogeneo. Inoltre la suddivisione della rete in tanti segmenti logici è uno degli approcci fondamentali per la gestione di servizi *multi-verticals* con importanti sviluppi verso i programmi di Industria 4.0.

Nella stessa rete sono state anche sperimentate tecniche di tipo SDN basate, comunque, su una semplice comunicazione tra i router di tipo SNMP. Inoltre è stato proposto un nuovo modello di *Orchestrator* per reti SDN basato sull'utilizzo delle informazioni fornite dalla piattaforma mPlane e questa funzionalità è stata anche testata in laboratorio mostrando come la rete NGN si riconfiguri automaticamente durante le situazioni di congestione, aumentando il numero di connessioni tra i router per aumentare la capacità di trasporto.

Bibliografia

- [1] Andrews, J., Buzzi, S. Choi, W., Hanly S. V., Lozano, A., Soon, A., Zhang, J. C., 2014 "What will 5G be?", IEEE Journal of Selected Area in Telecommunications, vol. 32, n.6, pp. 1065-82.
- [2] Sun, S., Gong, L., Rong, B., Lu, K., "An Intelligent Framework for 5G Heterogeneous Networks" IEEE Comm. Magazine, Nov. 2015
- [3] Settembre, M., "Towards a Hyperconnected world" Networks 2012, Rome, October 16-18, 2012.
- [4] Fan, C., Zhang, C. F., Yuan, X., June 2016, "Advances and Challenges towards a Scalable Cloud Radio Access Network" IEEE Comm. Magazine, pp. 29-35.
- [5] Zhou, Li, X., Chen, R., Zhang, H., May 2016" Network slicing as a Service: Enabling Enterprises' Own Software-Defined Cellular Networks" IEEE Communication Magazine, pp. 146-154.
- [6] Mitchel, J. E., 2014 "Integrated Wireless Backhaul Over Optical Access Networks", J. of Lightwave Technology Vol. 32, n. 20, pp. 3373-3382.
- [7] M. R. Sanna, S. Beker, W. Kiess, S. Thakolsri, "Service-based Slice Selection Function for 5G" GLOBECOM 2016, December 4-8, Washington DC. USA.
- [8] "5G white paper" by NGMN Alliance, https://www.ngmn.org/uploads/media/NGMN_5G_White_Paper_V1_0.pdf.

- [9] T. Yoo, "Network slicing Architecture for 5G Networks" ICTC 2016, October 19-21, Jeju Island, Korea
- [10] A. Nakao, P. Du, "Application-Specific Slicing for MVNO and Traffic Characterization" J. Opt. Comm. Networking, vol. 9, n. 2, 2017, pp. A256-A262.
- [11] S. Pompei, L. Rea, Luca; F. Matera, A. Valenti, Experimental investigation on optical gigabit Ethernet network reliability for high-definition IPTV services Journal of Optical Networking, Vol. 7, n. 5, pp. 426-435, 2008
- [12] A. Valenti, S. Pompei, L. Rea, F. Matera, G. Tosi-Beleffi, F. Curti, S. Di Bartolo, G. Incerti, and D. Forin "Experimental Investigation of Quality of Service in an IP All-Optical Network Adopting Wavelength Conversion" IEEE/OSA J. of Optical Communications and Networking, Vol. 1, Issue 2, pp. A170-A179, July 2009.
- [13] A. Valenti, S. Pompei, N. Avallone, F. Matera, G. Tosi Beleffi, "Experimental implementation of efficient multicast processes: towards Carrier Ethernet networks and all-optical multicast IEEE ICTON 2011, Stoccolma June 26-30, 2011.
- [14] Pulcini, L., Grazioso, P., Valenti, A., Matera, F., Del Buono, D., Attanasio, V., 2016 "Software Defined Networks over Carrier Ethernet for 5G: Tests from a GMPLS test bed" proceedings of Fotonica 2016, Rome June 6-8 2016
- [15] De la Oliva, F. Cavaliere, P. Iovanna et al. "Xhaul: toward an integrated fronthaul/backhaul architecture in 5G networks". IEEE Wireless Communications, 22(5), pp. 32- 40, October 2015
- [16] Tego, E., Matera, F., Del Buono, D., Attanasio, V., 2014 "Quality of Service Management based on Software Defined Networking Approach in wide GbE Networks" EuMed Telco 2014 Napoli, November 12-14 2014
- [17] Tego, E., Rufini, A., Valenti, A., Matera, F., Mellia, M., Traverso, S., "Software Defined Network approach driven by the mPlane Measurement Plane" AEIT International Conference, Capri (NA) October 5-7 2016
- [18] E. Tego et al. "A Measurement Plane to Monitor and Manage QoS in Optical Access Networks" Proc. of FOAN 2017, Munich (GE) (2017).
- [19] M. Giuntini, P. Grazioso, F. Matera, A. Valenti, V. Attanasio, S. Di Bartolo, and E. Nistri: "Enabling Optical Network Test Bed for 5G Tests", Fiber and Integrated Optics, published online Dec. 14th, 2016, Taylor & Francis, <http://dx.doi.org/10.1080/01468030.2016.1262481>
- [20] Tego E., Idzikowski F., Chiaraviglio L., Coiro A., and Matera F., "Facing the reality: validation of energy saving mechanisms on a testbed", Journal of Electrical and Computer Engineering, Hindawi, 27 March 2014
- [21] E. Tego, C. Carciofi, P. Grazioso, V. Petrini, S. Pompei, F. Matera, V. Attanasio, E. Nistri E. Restuccia "A Measurement Plane for Optical Networks to Manage Emergency Events" Fiber and Integrated Optics, On-line December 2017.
- [22] S. Pompei, E. Mammi, D. Valeriani, F. Marini, E. Restuccia, E. Manca, V. Attanasio "GPON Architectures for 5 G services" Fotonica 2018, Lecce May 2018.

