

Il contributo del Laboratorio di Comunicazioni Wireless alla Facoltà di Ingegneria: il ruolo della sperimentazione nelle Telecomunicazioni.

Oreste Andrisano

Sommario

Questo contributo vuole sintetizzare il ruolo della sperimentazione nella Facoltà di Ingegneria di Bologna a partire dalla installazione di una prima rete di telecomunicazioni in fibra ottica agli inizi degli anni 90, per arrivare ai recenti testbed progettati per nuove reti wireless eterogenee proiettate verso e oltre i sistemi radiomobili di quinta generazione, al servizio dei settori chiave di sviluppo del Paese, quali Industria 4.0, Smart mobility, Salute, Domotica, digitalizzazione della Pubblica Amministrazione, Smart Lighting, etc.

Il documento tocca i passi compiuti a livello sperimentale dal WiLab (Laboratorio di Comunicazioni Wireless) nella nostra Facoltà, nel campo delle Telecomunicazioni, sottolineando l'importanza della sperimentazione per l'evoluzione della didattica e della ricerca, nonché per la formazione di startup nel trasferimento tecnologico dell'attività svolta all'interno dei progetti di ricerca.

Andando indietro nel tempo giova ricordare quanto è stato realizzato soprattutto sulla base delle competenze integrate di Università, Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) e Consorzio Nazionale Interuniversitario per le Telecomunicazioni (CNIT), materializzate in ciò che oggi è chiamato Laboratorio di Comunicazioni Wireless, formalmente costituito sia in ambito CNIT sia CNR a metà degli anni 2000, ma sostanzialmente fondato agli inizi degli anni 90 con la direzione da parte del sottoscritto del Centro di studio per l'Interazione Operatore Calcolatore, CIOC-CNR, poi trasformato in Centro di Studio per l'Informatica e i Sistemi di Telecomunicazioni, CSITE CNR.

Ho voluto sottolineare questo aspetto, in quanto proprio l'integrazione dei vari enti di ricerca ha consentito negli ultimi decenni di acquisire fondi significativi per la ricerca, e conseguentemente

locali adeguati, personale ricercatore, computer e strumentazione per l'attività sperimentale. E' stato così possibile da un lato far evolvere la rete della Facoltà per quanto riguarda le sue componenti in tecnologia eterogenea (ottica, wireless, satellite) e dall'altro pervenire a dimostratori nei seguenti settori di volta in volta emergenti: telemisura, multimedialità, realtà immersiva, rete di laboratori, sistemi short range per il traffico intelligente, sistemi smart lighting, sistemi FPGA per applicazioni terrestri e satellitari, Internet delle cose, etc., in una cornice di sicura validità a livello internazionale, ad esempio nelle iniziative europee COST, nelle reti di eccellenza europee (NewCom), e nell'ambito di contatti con prestigiosi Istituti di ricerca internazionali (MIT).

Si rimanda per i dettagli al sito www.wilab.org [1].

1 La Facoltà di Ingegneria e i dimostratori del WiLab

Quando entrai nell'Istituto di Elettronica, verso la fine del 1975, l'atmosfera che si respirava era improntata all'attività sperimentale oltre che alla speculazione puramente teorica per via dei contatti che il Prof. Ercole De Castro aveva sempre instaurato con le aziende manifatturiere di sistemi di telecomunicazioni. Ricordo con piacere che De Castro mi invitò a visitare la Telettra fin da quando ero studente, credo del IV anno, e la narrazione che mi veniva fatta sugli sviluppi industriali delle Telecomunicazioni influenzò sempre il mio approccio allo studio prima e alla ricerca poi. Pur essendo affascinato dagli sviluppi analitici, appresi dai miei Maestri, Ercole De Castro e Leonardo Calandrino, ho sempre cercato di coltivare, quando possibile, anche le attività sperimentali: nel tempo riuscii ad organizzare, con l'aiuto insostituibile dei laureandi, il banco di misura sui sistemi di trasmissione digitali che allora (anni '80) disponeva di alcuni strumenti di pregio per la misura del tasso di errore e per l'analisi spettrale.

Questo sistema di misura, nel laboratorio Telecomunicazioni, rappresentò la base sperimentale in una serie di progetti anche in collaborazione con le aziende del settore e produsse un significativo numero di esperienze all'interno del mio corso di "Radiotecnica", rinominato successivamente "Sistemi di Telecomunicazioni".

Il banco di misura vedeva già negli anni '80 alcuni strumenti dotati di interfaccia GPIB (General Purpose Interface Bus) per l'interconnessione in rete e quindi fu possibile pilotare la misura a distanza attraverso personal computer (1986-1987). Era quello il primo passo verso una successiva evoluzione che portò negli anni successivi alla telemisura e alla rete di laboratori.

Il Laboratorio Telecomunicazioni era allora collocato a pian terreno della palazzina Scuderie e successivamente, con la ristrutturazione edilizia (siamo agli inizi degli anni '90), migrò al I piano nei locali adiacenti a quelli riservati al centro CNR (CIOC, ridefinito dopo breve tempo CSITE), di cui mi fu affidata la direzione nel 1992. La sistemazione logistica che si venne a creare era ottima, in quanto i docenti e i ricercatori vivevano a stretto contatto con studenti e strumentazione, impostazione sempre stimolata da Ercole De Castro che ho sempre cercato di mantenere anche nelle fasi di ampliamento del Centro: infatti, grazie alla disponibilità di fondi non irrilevanti acquisiti in progetti attuati con finanziamenti esterni all'Università, riuscii ad estendere il Laboratorio in locali in affitto nelle sedi di viale Aldini e di via Albergati, oltre che all'interno della Fondazione Alma Mater (in villa

Pallavicini), prima di ottenere nel 2014 l'attuale sistemazione all'interno dei locali dell'ex Istituto di Elettronica.

I paragrafi seguenti mostreranno dunque i passi principali di questa evoluzione, con enfasi sull'attività sperimentale, e tratteranno dei contenuti di ricerca di vari progetti che hanno condotto ai seguenti dimostratori (si veda per i dettagli e per le figure a colori il sito web www.wilab.org):

1. Rete di Facoltà in tecnologia eterogenea FDDI-ATM-WIFI-SATELLITE.
2. Piattaforma per la caratterizzazione di reti wireless eterogenee e interveicolo (simulatore di reti radiomobili in scenari realistici SHINE).
3. Piattaforma di infomobilità (simulatore integrato traffico su strada e reti wireless per infomobilità – progetto Pegasus).
4. Comunicazioni immersive (reti di sensori e sistemi di localizzazione per la guida immersiva – progetto VICOM).
5. Rete di laboratori per telemisura ed e-learning (Progetti Labnet e Teledoc2) - Premio ElfEL (European Institute for E-Learning) e SEEL (Supporting Excellence in E-Learning) – per il miglior progetto nel campo dell'e-learning), 2004
6. Smart City (rete riconfigurabile di pali intelligenti per la smart city presso Fondazione Alma Mater, 2011 – progetto Pegasus).
7. Sistema di controllo delle reti di sensori, per smart lighting e infomobilità (operativo presso Fondazione Alma Mater, 2012).
8. DVB-T: Sistema video digitale con cancellatore d'eco in tecnica FPGA (PROGETTO METASYSTEM 2006 - 2009, operante su banco di telemisura presso UNIBO).
9. Sistema UWB-RFID testato in un'applicazione di ordinamento dei bagagli su nastro trasportatore operante con una precisione di 20 cm a 3 m/s di velocità (progetto SELECT).

Questi dimostratori, opportunamente trasferiti nelle reti COST e nelle reti di eccellenza europee (Network of Excellence – NoE), hanno fornito negli anni passati un'idea delle potenzialità delle telecomunicazioni attraverso le seguenti applicazioni, che oggi sono realtà: Sistemi di telecomunicazioni per il trasporto intelligente (ITS), Sistemi di telemisura, Reti wireless multimediali, Sistemi di trasmissioni digitali ad alta velocità, Sistemi radiomobili per applicazioni video, Rete di laboratori, Sistemi di localizzazione indoor per applicazioni civili e industriali, Teledidattica, Smart lighting e infomobilità.

Voglio rimarcare che l'attività sperimentale, sostenuta da una robusta ricerca di base, riesce a dare corpo al ciclo virtuoso ricerca – sperimentazione – applicazioni – nuova ricerca, con la conseguente proiezione, in alcuni casi, verso il trasferimento tecnologico e la fondazione di start up.

È ciò che si è avverato, ad esempio, nel progetto di ricerca Infomobilità, con la dimostrazione effettuata nei locali della Fondazione Alma Mater negli anni 2010-2012, basata su una rete mesh di lampioni intelligenti, totalmente controllata, per la generazione di servizi smart, in primis smart lighting e servizi di infomobilità per il cittadino.

Oltre all'importanza della sperimentazione come momento di validazione degli approcci teorici, e delle misure in campo per la ricerca di nuovi spunti di indagine, va ricordata l'importanza che ha rivestito la sperimentazione nella nostra Facoltà anche per quanto concerne la didattica nell'area

Telecomunicazioni, testimoniata dall'attivazione di Corsi di Laboratorio offerti agli studenti di laurea triennale e magistrale sin dall'inizio degli anni 2000, che hanno tratto il loro fondamento nella robusta attività sperimentale sviluppata nei progetti di ricerca del WiLab.

2 Le comunicazioni wireless: spinta per l'economia del paese

È ben nota la correlazione, riscontrabile da un esame comparativo delle condizioni economiche di vari paesi nel mondo, tra il PIL e lo sviluppo dei sistemi di comunicazioni e di trasporto, in una cornice di crescente integrazione verso il trasporto multimodale (una sempre maggiore integrazione dei vari mezzi di trasporto) favorito soprattutto dallo sviluppo delle comunicazioni mobili [2].

In particolare, dal Mobility Report sullo sviluppo delle reti mobili, presentato da Ericsson durante i lavori della Commissione Broadband [3] per lo sviluppo sostenibile, si evince che “un aumento del 10% nella diffusione delle TLC produce un balzo del Pil fino al 2,8%. Nel 2016 è stato generato nel mondo un controvalore tra 500 e 2.000 mld”.

Il Mobility Report Ericsson fornisce un'analisi del traffico dati con calcoli e misurazioni approfondite ricavate dalle reti commerciali di tutto il mondo. Il Report fa leva su queste misurazioni, su analisi del settore, su modelli previsionali e altri studi rilevanti, per delineare i trend attuali del traffico e del mercato all'interno della Networked Society.

Venendo al nostro Paese, è importante ricordare molto sinteticamente che l'accesso di massa ad Internet si è sviluppato proprio attraverso la diffusione delle comunicazioni mobili; queste hanno stimolato un crescente sviluppo di applicazioni in rete secondo un trend ormai consolidato in molte parti del mondo.

Per sottolineare il ruolo delle comunicazioni wireless, vengono riportati i seguenti dati [3]

- Il traffico dati mobile globale è pari a 27 exabyte/mese nel 2018, con tasso di crescita annuo del 79% (15 exabyte/mese nel 2017). Il traffico dati mobile globale aumenterà di cinque volte tra il 2018 e il 2024, con un tasso di crescita annuo composto (CAGR) del 31%, raggiungendo 136,0 exabyte/ mese entro il 2024.
- Il traffico medio per smartphone nel 2018 è pari a 5.6 gigabyte/mese, con una previsione di 21 gigabyte/mese nel 2024.
- Il numero di sottoscrizioni cellulari nel mondo nel 2018 è pari a 8 miliardi, di cui 5.9 miliardi a larga banda.
- Il numero di connessioni IoT nel 2018 è pari a 8.6 miliardi e in previsione raggiungerà 22.3 miliardi nel 2024, con un CAGR del 17%
- Nel 2018 gli smartphone rappresentano il 40% dei dispositivi collegati, il 44.7% sono dispositivi IoT, l'8.2% è costituito da PC/laptop/tablet, il 7.1% da telefoni fissi.

Sostanzialmente si conferma il trend secondo il quale l'accesso a Internet vedrà sempre più protagonista la rete mobile e di qui l'importanza di diffondere ad ogni livello la cultura delle comunicazioni mobili.

Infatti, la rete mobile (per persone, macchine, oggetti e processi di automazione), con il suo carattere pervasivo:

- ha favorito lo sviluppo delle reti eterogenee per applicazioni diversificate (smart applications). Oggi diventa più che mai realistica l'ipotesi di affiancare alla rete in fibra verso l'utente/cabinet una rete che abbia l'ultimo collegamento wireless anche nella prospettiva della larga banda,
- ha raggiunto elevati livelli di flessibilità e capacità in quanto può beneficiare dei risultati di decenni di ricerche orientate all'incremento dell'efficienza spettrale dei collegamenti radio (modulazioni ad elevato numero di livelli, sistemi di codifica, sistemi multi-antenna, ...) e quindi può garantire velocità sempre maggiori offerte da ciascuna stazione radiobase. Il panorama del futuro è quello di un cloud di radiobasi disseminate capillarmente nelle zone di altro traffico, all'interno di edifici (distributed antenna system - DAS) o anche outdoor, sempre attraverso la sinergia fra fibra ottica e sistemi wireless,
- presenta come elemento caratterizzante un'estrema flessibilità di impiego e di adattamento alle dinamiche di traffico che si possono verificare attraverso l'uso efficiente delle risorse radio disponibili,
- stimolerà l'impiego di risorse spettrali crescenti (sino alla gamma dei THz) per lo sviluppo delle reti ad alta velocità,
- ha fatto sì che anche paesi come gli USA, tradizionalmente legati ad uno sviluppo massiccio di sistemi via cavo, vedano recentemente l'abbandono da parte di molti utenti delle connessioni fisse a favore dell'uso dello smartphone,
- produrrà, con l'introduzione dei sistemi 5G, grandi benefici a vari settori quali automotive, salute, trasporti, energia, industria 4.0, agricoltura. Stime recenti (Huawei) prevedono in oltre 100 miliardi di euro l'anno i benefici per l'Europa derivanti dall'introduzione del 5G, con importanti impatti sull'occupazione,
- genererà revenues su scala mondiale di oltre 200 miliardi di dollari nel 2025 (stima Huawei).

Le telecomunicazioni mobili costituiscono, in conclusione, il sistema nervoso su cui innestare lo sviluppo tecnologico del Paese, che può progredire e vedere crescere il PIL attraverso un ammodernamento di settori quali trasporti, energia, salute, agricoltura, industria 4.0, etc. È quindi auspicabile un maggior impegno del Governo nel finanziamento della ricerca nelle aree strategiche dei sistemi di telecomunicazioni a larga banda, per l'incremento della conoscenza, quindi della tecnologia e dei servizi disponibili, e per un indubbio impulso allo sviluppo e all'economia del Paese.

3 Le Telecomunicazioni presso la Facoltà di Ingegneria. Alcuni passi significativi nella sperimentazione

3.1 Evoluzione della rete di Telecomunicazioni nella Facoltà di Ingegneria – inizio anni '90

La rete di Facoltà ha rappresentato e rappresenta una risorsa preziosa per la ricerca: si è arricchita mediante i progetti, come sarà chiaro dal seguito, e ha rappresentato un supporto utilissimo ai fini delle sperimentazioni pianificate durante gli ultimi decenni.

All'inizio degli anni '90 la rete di Facoltà fu completamente ristrutturata attraverso l'installazione di una rete ottica FDDI (Fiber Distributed Data Interface) a 100 Mb/sec. Tale rete, denominata Promet, fu acquisita nel 1991 dal Centro CNR CIOC, poi divenuto CSITE (Centro Studi per l'Informatica ed i Sistemi di Telecomunicazioni), tramite un finanziamento erogato dal "Piano Finalizzato Trasporti 2" nell'ambito del progetto Procom (Prometheus-Eureka) [4] e fu messa a disposizione - da chi scrive - della Facoltà di Ingegneria, che allora vedeva attivo un unico bus Ethernet. Con questo finanziamento fu anche possibile installare una rete Ethernet nei locali della Fondazione Marconi, e provvedere alla sua connessione alla sede di Viale Risorgimento [5]. La rete FDDI presentava inizialmente un'architettura ad anello (Figura 1) a cui erano collegate tre isole: la palazzina Ex-Scuderie (che ospitava il Centro CNR CIOC, e alcuni laboratori del DEIS come il Laboratorio Telecomunicazioni, il Laboratorio di Automatica e Robotica - LAR - ed il laboratorio di Bioingegneria), i locali dell'ex Istituto di Elettronica (DEIS, edificio storico) ed il resto della Facoltà, incluso il Centro di Calcolo. Per aumentare l'affidabilità, la rete FDDI prevedeva un secondo anello ottico, in grado di subentrare in caso di malfunzionamento dell'anello principale. La rete Promet ha rappresentato quindi un passo fondamentale nell'evoluzione della Facoltà, consentendo l'accesso remoto alle molteplici risorse di calcolo che andavano diffondendosi e facilitando lo scambio dei dati

La nuova rete era costituita da otto work stations, di ottima qualità per quell'epoca (DEC 5000/240), di cui una collocata a Pontecchio Marconi, e le altre sette direttamente collegate alla rete FDDI e date in uso a diversi gruppi di ricerca, fra i quali il gruppo Telecomunicazioni e quello di Campi Elettromagnetici.

La gestione della rete nel suo complesso era affidata al personale del CIOC (in seguito, CSITE).

La Figura 1 illustra schematicamente la struttura della rete Promet. Sulla rete, che servì a riorganizzare tutto il traffico dati della facoltà e a generare nuovi servizi [5], quali ad esempio la posta elettronica DEIS, vennero anche effettuate interessanti misure di prestazioni e sperimentate le nuove tecniche che si stavano affermando, quali la nuova modalità di trasporto ATM. Queste sperimentazioni furono molto utili ad esempio per la caratterizzazione del traffico dati e in generale nel processo di evoluzione della rete, in riferimento alla connessione in rete pubblica.

La rete di TLC, unitamente ai servizi ad essa associati, ebbe uno sviluppo regolare nel corso degli anni, tramite un'espansione programmata ed un continuo miglioramento tecnologico. In particolare, a partire dal settembre 1996, grazie ad un accordo con Telecom Italia, i collegamenti punto-punto che costituivano le interconnessioni tra le varie Facoltà furono sostituiti da un sistema ad alta velocità denominato SMDS (Switched Multi-megabit Data Service) e tutte le procedure di routing per il collegamento tra le varie sedi furono così affidate a Telecom Italia. Per Ingegneria fu previsto un collegamento a 34 Megabit/s di cui 25 utilizzabili, mentre alla sede di Pontecchio, inizialmente collegata con un circuito diretto numerico di bassa velocità, fu riservato un collegamento a 2 Megabit/s.

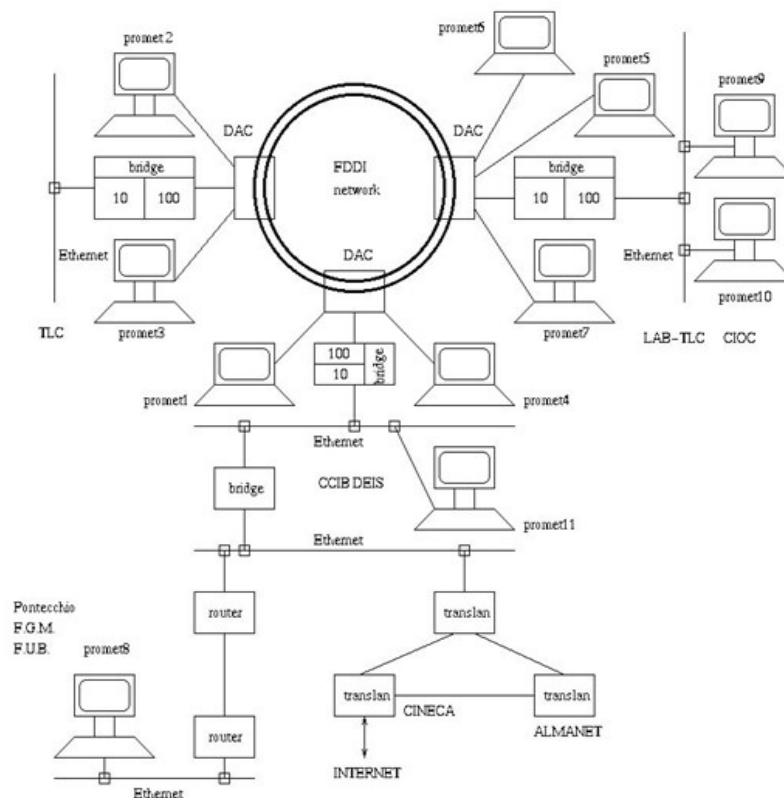


FIGURA 1 ARCHITETTURA DELLE RETE PROMET

3.1.1 Sperimentazione su WLAN 802.11

Agli inizi degli anni '90, in una cornice scientifica che allora guardava alle onde millimetriche (60 GHz) oggetto di studio nell'ambito dei progetti europei, quali Prometheus e Drive per lo studio dell'ITS (Intelligent Transportation System), si stava pianificando nel Centro CNR CSITE di acquisire apparecchiature e strumentazione di misura per la progettazione, l'installazione e la verifica delle funzionalità di una rete a onde millimetriche (60 GHz), da interfacciare adeguatamente e integrare con le reti ottiche, con l'indubbio vantaggio dovuto alla tecnologia wireless, che superava la necessità di cablare l'ambiente da servire con alta capacità.

Nella seconda metà degli anni 90, all'interno di un progetto di ricerca sulle Wireless LAN, come preambolo alla eventuale sperimentazione su rete a 60 GHz, nel WiLab fu impostato uno studio basato su rete WLAN (Wireless Local Area Network) a 2.4 GHz conforme con il protocollo IEEE 802.11: la sperimentazione aveva l'obiettivo di arrivare alla copertura della Facoltà. I risultati di questa sperimentazione, in termini di copertura di alcune aree strategiche della Facoltà e di capacità della rete, hanno aperto la strada alla capillare diffusione di questa tecnologia nei locali di Ingegneria dei giorni nostri [6].

3.1.2 Interconnessione via satellite con le sedi CNIT

La rete di Facoltà ebbe un successivo sviluppo agli inizi degli anni 2000 grazie alla partecipazione dell'Unità CNIT di Bologna ai progetti finanziati dall'Agenzia Spaziale Italiana, al progetto relativo ai Laboratori in rete e a quello sulla teledidattica (progetto Teledoc2) [7, 8]. La sede fu inizialmente

dotata di una stazione satellitare in banda Ka (20-30 GHz) per il collegamento in rete mediante il satellite ITALSAT F2, con stazioni analoghe presso altre sedi universitarie sul territorio nazionale (Genova, Firenze, Pisa, Parma e Napoli).

Successivamente, nell'ambito della rete multimediale legata al progetto Teledoc2, fu installata una nuova stazione satellitare in banda Ka per collegamenti verso il satellite Eutelsat HotBird 6 in modalità Skyplex.

La disponibilità di una rete satellitare, al servizio di diversi gruppi di ricerca CNIT in Italia, è stata non soltanto uno strumento prezioso per la ricerca avanzata nelle telecomunicazioni via satellite, ma anche il cuore di una rete che ha fornito numerosi servizi, quali la videoconferenza, il video on demand e diversi corsi del progetto Teledottorato2 (finanziato da MIUR).

La rete via satellite ha inoltre permesso di sperimentare l'integrazione di reti satellitari, WLAN e cablate permettendo di usufruire contemporaneamente di un ampio spettro di tecnologie per garantire nel contempo affidabilità, velocità e, non meno importante, mobilità. Fu installata in Facoltà un'antenna parabolica operante in banda Ka, collegata agli apparati nel Laboratorio Telecomunicazioni e furono effettuate alcune misure, a titolo di esempio, relative agli spettri dei segnali modulati a media frequenza. Mediante la strumentazione del laboratorio fu anche possibile misurare la qualità della trasmissione nella tratta downlink, con conseguente confronto con l'andamento teorico.

A valle del progetto Teledoc2 la rete Wilab era dunque molto evoluta e prevedeva anche la connessione dei vari siti decentrati in cui si era articolato il laboratorio con l'acquisizione delle sedi in viale Aldini e in via Albergati. Si stava così attuando un allargamento della rete di Facoltà e fu questa l'occasione per sperimentare in campo nuove tecnologie, per allora, come un ponte ottico wireless per il collegamento del Laboratorio di via Albergati verso la Torre della Facoltà e di un collegamento radio punto-punto con tecniche WiFi/Hiperlan per il collegamento della sede di Viale Aldini con la palazzina CSITE (con traiettoria parzialmente intercettata dal fogliame dei viali di circonvallazione).

In conclusione, il WiLab ha visto man mano estendere le proprie dorsali di rete, qui di seguito riportate:

- rete CNIT terrestre (collegamento ATM 34Mbit/s e due nodi a 512 Kbps con supporto del Multicast e IPv6) e satellitare (2 Mbps; sistema di trasmissione in banda Ka; tecnologia Skyplex; Space Operator Partner Eutelsat; satellite HotBird6)
- 2 reti ADSL 20Mb/s gestite in load balancing opportunamente collegate a:
 - rete GARR attraverso Università degli Studi di Bologna con link diretto verso router GARR 100MB/s,
 - rete europea GEANT attraverso Rete di Eccellenza NEWCOM sulle comunicazioni wireless,
 - rete della Regione Emilia Romagna a larga banda.

3.2 L'attività sperimentale nelle ricerche sui sistemi radiomobili – analisi, simulazione e misura

Nella seconda metà degli anni '90, le collaborazioni industriali con Siemens Telecomunicazioni (ricordo con piacere gli amici Guido Vulpetti e Giacomo Premoli) nonché gli stretti contatti con i dirigenti TIM (ricordo con altrettanto piacere Vito Gamberale, Renzo Failli e Pietro Porzio Giusto) rappresentarono per il WiLab uno stimolo per la messa a punto di simulatori di rete radiomobile.

Iniziò così un'intensissima attività mirata alla costruzione di una complessa macchina di simulazione, denominata SACRA, orientata inizialmente al sistema GSM, che allora stava diffondendosi in tutte le parti del mondo. Nella fattispecie, l'azienda Siemens Mobile aveva l'esigenza di monitorare la qualità del sistema e di comprendere il comportamento della rete e l'effetto di vari parametri di sistema sulle prestazioni espresse in termini di: tasso di blocco, congestione sul canale di traffico, tasso di terminazione forzata a causa di radio failure, tasso di handover falliti e di handover riusciti, etc., al fine di mettere a punto strategie di variazione dinamica della rete in funzione delle condizioni operative.

La messa a punto del simulatore SACRA avvenne mettendo a confronto le uscite della macchina di simulazione con i risultati sperimentali ottenuti sul campo, e questa era una ricchezza dovuta al contatto industriale: disporre appunto delle misure del campo. Il traguardo era ambizioso e doveva servire anche in ambiente industriale per comprendere la natura dei risultati sperimentali e la dipendenza dai numerosi parametri che potevano influenzare il funzionamento della rete.

Alla costruzione della macchina lavorarono diversi ricercatori in collaborazione con gli ingegneri dell'industria e fu seguito un approccio a me molto caro, definito *"approccio integrato"*, che aveva l'ambizione di considerare, congiuntamente, tutti i livelli della comunicazione, dalle fondamenta (propagazione e trasmissione) sino al livello dell'applicazione.

Si trattava dunque di mettere insieme vari layer della comunicazione a partire da un layout di stazioni base dispiegate su un territorio urbano preso dalla realtà e tenendo conto della caratterizzazione della propagazione in ambiente realistico, del funzionamento della trasmissione sul link radio in presenza di fading, shadowing e interferenze, della gestione delle risorse radio, dei modelli di traffico, del controllo degli handover, etc. All'epoca non fu affatto semplice, ma lo sforzo compiuto in stretta sinergia con l'ambiente industriale consentì di mettere a punto la macchina e di ottenere una sorprendente corrispondenza tra i dati simulati e quelli ottenuti dalle verifiche sperimentali. Infatti, con grande soddisfazione dei ricercatori impegnati nel progetto, si riscontrarono notevolissimi accordi tra le previsioni di servizio in ambiente realistico e le misure di prestazione misurate in campo: i risultati furono anche presentati in ambito europeo (Azione COST).

Parallelamente, sempre in collaborazione con Siemens Mobile, prese avvio il progetto TUTSY, il cui obiettivo era lo sviluppo di simulatori software dei sistemi di accesso UMTS (3G) con interfaccia radio FDD (WCDMA) e TDD (nella versione UTRA e TD-SCDMA), per l'analisi delle differenti modalità implementative dei servizi voce e dati.

Questo confronto tra ambiente scientifico e mondo industriale sviluppò nel gruppo di ricerca la capacità di individuare le giuste approssimazioni per raggiungere il miglior compromesso tra velocità

di simulazione e precisione dei risultati, e fu molto istruttivo concepire alcune parti della macchina ricorrendo ad un approccio semi-analitico, in cui si riusciva a sfruttare la teoria dei collegamenti radio su canale affetto da interferenze e da evanescenza aleatoria per alleggerire il processo di simulazione.

Da queste attività partirono vari filoni di ricerca, sia con riferimento ai metodi di trasmissione con tecniche di frequency hopping, sia altre iniziative verso simulatori più complessi che prefiguravano una sinergia tra reti radiomobili e reti radio locali. Nacque così il simulatore evoluto per reti integrate denominato SHINE, in grado di riprodurre le dinamiche di cooperazione di reti radio diverse, quali UMTS, WiMAX, WiFi, MC-CDMA, IEEE802.11p.

La sensibilità acquisita con il mondo radiomobile in scenari realistici e l'affinamento della capacità di trattare reti sempre più complesse ha successivamente consentito di effettuare in Facoltà, in accordo con TIM, alcuni test molto significativi sulle installazioni delle cosiddette femtocelle 3G all'interno degli edifici. Per offrire servizi a larga banda all'utente è infatti necessario ridurre quanto più possibile la distanza fra il terminale radio (il cellulare) e l'antenna della rete radiomobile. Spingendo questa esigenza alle estreme conseguenze furono concepite le femtocelle, ovvero celle con un'area di copertura di ridottissime dimensioni (un'unità abitativa o un ufficio), riservate a pochissimi utenti. La femtocella è perciò realizzata con un apparato wireless installato all'interno di edifici e gestito a distanza dall'operatore della rete radiomobile.

La stretta collaborazione fra Wilab e TIM portò alla realizzazione, nel 2010, di un test-bed basato su questa tecnologia, che fu allestito nei locali della Facoltà di Ingegneria al fine di verificare non solo l'effettiva copertura elettromagnetica, ma anche le prestazioni percepite dall'utente. In Figura 2 è mostrata l'architettura della rete del Wilab con l'inserimento degli apparati per le femtocelle.

Riassumendo, lo sviluppo della rete di Facoltà nella direzione di una architettura eterogenea, da un lato, e lo sviluppo delle ricerche sui sistemi wireless, dall'altro, consentirono di concepire, nei vari progetti di ricerca in cui fu impegnato il Laboratorio, una serie di dimostratori che verranno sintetizzati di seguito.

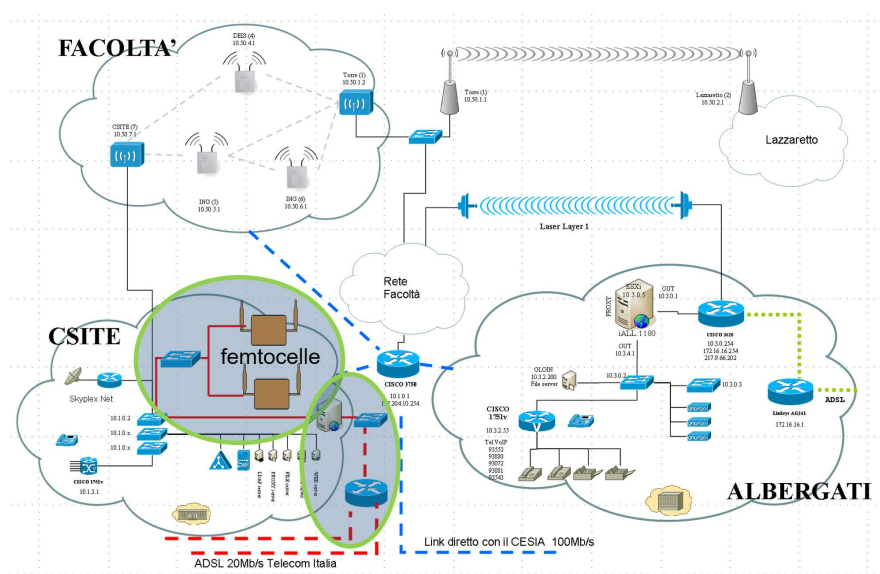


FIGURA 2 ARCHITETTURA DELLA RETE DEL WILAB CON L'ESTENSIONE ALLA TECNOLOGIA DELLE FEMTOCELLE

3.3 La rete fissa e la rete mobile al servizio dei progetti di ricerca: la multimedialità, la telemisura e le prime sperimentazioni di accesso remoto CUP 2000.

3.3.1 Le comunicazioni multimediali e le sperimentazioni in Facoltà

Alla fine degli anni '90 iniziarono nel Laboratorio varie attività e progetti di ricerca sulla Multimedialità [9], sviluppati anche a livello sperimentale, sia in ambito CNR, sia in ambito CNIT. A tale proposito ricordo il contributo del WiLab anche per la creazione del Laboratorio di Comunicazioni Multimediali CNIT presso l'Unità di Ricerca di Napoli.

Riporto di seguito, per brevità, quanto ebbi modo di scrivere in occasione della Exhibition Bologna 2000:

Gli anni recenti sono stati caratterizzati da un vertiginoso sviluppo delle Telecomunicazioni che, attraverso l'evoluzione dei sistemi e la loro integrazione, mettono a disposizione dell'utente servizi sempre più sofisticati, secondo una tendenza che pone l'enfasi sull'aspetto del "put technology to work". Va sottolineata, a questo riguardo, la convergenza che si sta delineando tra il mondo delle comunicazioni mobili e internet, secondo la quale l'utente mobile, supportato da una tecnologia sempre più efficiente e veloce, potrà usufruire di servizi multimediali avanzati, indipendentemente dalla propria posizione su aree sempre più estese. I sistemi multimediali interattivi pongono l'utente, fisso o mobile, in condizioni di gestire a distanza il proprio rapporto con un fornitore di servizi o prodotti, consentono di svolgere il lavoro da casa o in viaggio, permettono allo studente di beneficiare a distanza dell'azione didattica di un docente nel modo più completo o di accedere ad un banco di misura per la verifica delle prestazioni di sistemi e circuiti da programmare opportunamente. Tutto ciò con un livello crescente di rapidità e di efficienza.

La moderna concezione della speculazione scientifica, che vede la Ricerca di base orientata al servizio della collettività, ha costituito il filo conduttore dell'attività condotta nel corso dell'intero triennio 1999-2002 del progetto "Multimedialità", secondo un percorso che prende le mosse dai servizi, individua le tecnologie adeguate e mira alle realizzazioni, dando peraltro impulso alla Ricerca di base per la messa a punto di modelli e metodologie di studio che costituiscono la linfa vitale del progresso tecnologico.

Tale percorso ha trovato naturale finalizzazione nella realizzazione e caratterizzazione sperimentale di prototipi di sistemi innovativi e nell'allestimento di dimostratori relativi alle tecnologie ed ai servizi sperimentati, fra i quali è il caso di menzionare la comunicazione video su terminali GPRS, la telemisura wireless, la prenotazione di servizi socio-sanitari mediante terminali mobili - che rappresentò di fatto l'inizio dell'attività in rete di CUP 2000 - la teledidattica su rete fotonica, le comunicazioni satellitari di futura generazione, l'accesso alle informazioni riguardanti i beni culturali e alla rappresentazione fotorealistica di reperti archeologici.

Il Progetto Multimedialità svolse un ruolo di primaria importanza anche a livello internazionale, attraverso pubblicazioni significative sulle riviste scientifiche più qualificate, ed ebbe un impatto

importante anche in ambito europeo: molti dei risultati e delle esperienze maturate infatti, furono travasate in azioni COST che, come noto, rappresentano i più rilevanti contesti Europei per il confronto delle metodologie e dei risultati ottenuti nei vari settori di interesse.

I docenti e i ricercatori operanti all'interno del progetto diedero inoltre impulso alla proposta europea di due nuove reti scientifiche nei settori dei sistemi radiomobili e via satellite, collocandosi anche in ruoli di primissimo piano nel coordinamento della rete stessa.

3.3.2 La telemisura: esempio di accesso remoto multimediale

Un'interessante dimostrazione multimediale riguardò le telemisure, che rappresentarono un'interessante applicazione in quanto permisero il controllo a distanza di pregiati strumenti e l'acquisizione dei risultati ovunque l'utente si trovasse. Fu quindi possibile utilizzare come ambiente di test il Laboratorio Telecomunicazioni: l'intero sistema, mostrato in Figura 3, era composto da una serie di strumenti di misura connessi al Bus GPIB - General Purpose Interface Bus -, a sua volta interfacciato con la rete del laboratorio mediante un apparato convertitore GPIB-ENET della National Instruments. Questa integrazione tra Bus e rete LAN offriva la possibilità a tutti i PC connessi in rete di poter interagire, mediante driver opportuni, con gli strumenti del banco.

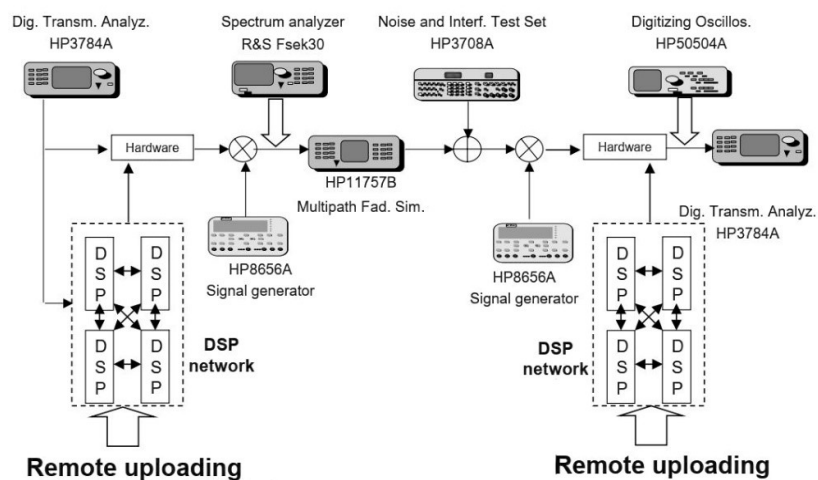


FIGURA 3 UN ESEMPIO DI ALLESTIMENTO DEL BANCO DI TELEMISURA

Fra le prove realizzate vi furono misure del tasso di errore, di spettri e di costellazioni su circuiti per telecomunicazioni realizzati in laboratorio e/o da aziende esterne. A tale proposito, lo schema illustrato ha permesso la realizzazione di una esperienza didattica di telemisura effettuata in aula 8.1 (la copertura dell'aula fu adeguatamente studiata), che permise agli studenti del corso di Sistemi di Telecomunicazione di vedere sul monitor di un PC portatile con interfaccia di rete wireless gli strumenti di misura, remotizzati, e di poter interagire con essi.

Per evidenziare l'avvenuto accesso fisico al pannello di comando degli strumenti remoti, si decise, quando la capacità della rete lo permetteva, di implementare simultaneamente alla misura una

videoconferenza che permettesse la visualizzazione del banco di misura e la possibilità di interloquire con un operatore preposto al banco.

3.3.3 Sperimentazione video su rete eterogenea

Un altro esempio di applicazione multimediale su rete eterogenea è riconducibile, metà degli anni 2000, alla trasmissione di una sequenza Video On Demand tra un host remoto, situato a Prato, ed un terminale mobile del Laboratorio di Telecomunicazioni. Uno scenario di questo tipo era rappresentativo di applicazioni quali l'accesso a database multimediali e la teledidattica. La comunicazione venne resa possibile attraverso una rete eterogenea comprensiva della rete satellitare del CNIT a 2 Mbit/s, che era nella disponibilità del Laboratorio Telecomunicazioni della Facoltà di Ingegneria, di una LAN cablata e della rete WiFi, che costituiva una estensione wireless della rete interna del laboratorio (vedi Figura 4). La rete così composta permise la connessione di un terminale mobile (un PC portatile dotato di scheda WiFi a 11Mbit/s) ad un server remoto e la trasmissione real time di una sequenza video in formato MPEG-2.

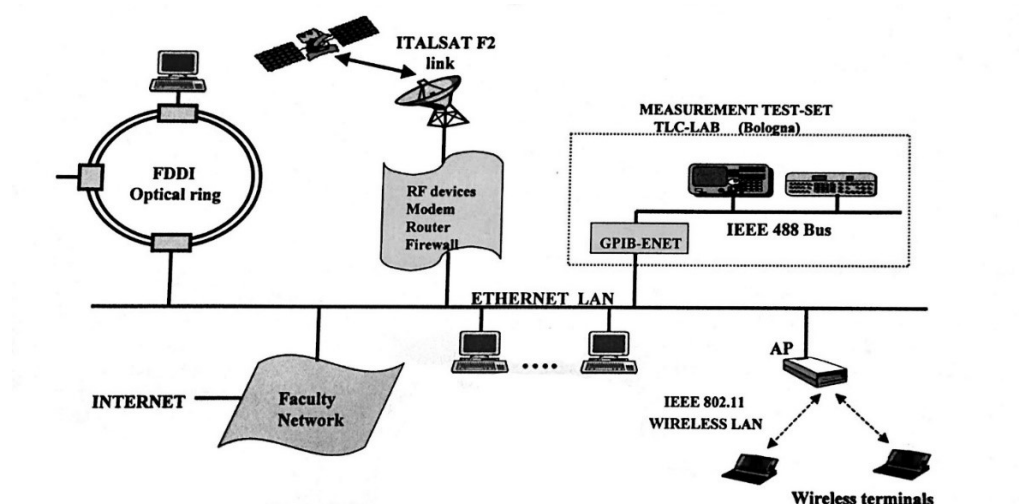


FIGURA 4 LA RETE ETEROGENEA PRESSO IL WILAB

La sequenza audio-video richiesta era costituita da un filmato a 1.5 Mbit/s, ed il confronto della qualità video venne sviluppato tra la sequenza riprodotta da un PC (Pentium II 350 MHz, 128 Mbyte di RAM) e un terminale portatile di analoga potenza. Sia sul PC connesso alla rete fissa che sul terminale mobile la sequenza video non mostrò segni di degrado della qualità, evidenziando così la possibilità di utilizzare correttamente la rete wireless rispetto alla connessione Ethernet.

3.3.4 Misure in galleria (per estensione di copertura della rete satellitare in scenari ferroviari)

Un altro momento che va ricordato è quello legato alle misure che furono organizzate in Facoltà nell'anno 2006. In questo caso, nell'ambito di un progetto sviluppato in collaborazione con Thales-Alenia, venne utilizzato il corridoio del piano terra, in un giorno festivo, come emulatore di una

galleria ferroviaria. Il WiLab era infatti impegnato nello studio di un sistema per l'estensione della copertura della rete all'interno delle gallerie, per treni ad alta velocità. Lo studio delle prestazioni dei sistemi di modulazione digitali (singola portante o multiportante) richiedeva una opportuna contromisura nei confronti della propagazione multipercorso in galleria e furono quindi messi a punto i metodi di analisi e progetto di sistemi trasmissivi alla frequenza di 12 GHz. Mancavano i rilievi sperimentali per la loro verifica, rilievi da effettuare in galleria ferroviaria, di non facile organizzazione e ripetibilità, e fu quindi allestito un banco di telemisura per la verifica delle prestazioni utilizzando come galleria equivalente il corridoio del piano terra della Facoltà (Figura 5). L'obiettivo di questa emulazione era la verifica a priori del funzionamento del banco in telemisura, per essere sicuri del suo funzionamento quando si fosse andati nella vera galleria ferroviaria (una tantum). Il risultato fu eccellente, ancora una volta con grande soddisfazione del sottoscritto e dei ricercatori impegnati nel progetto.

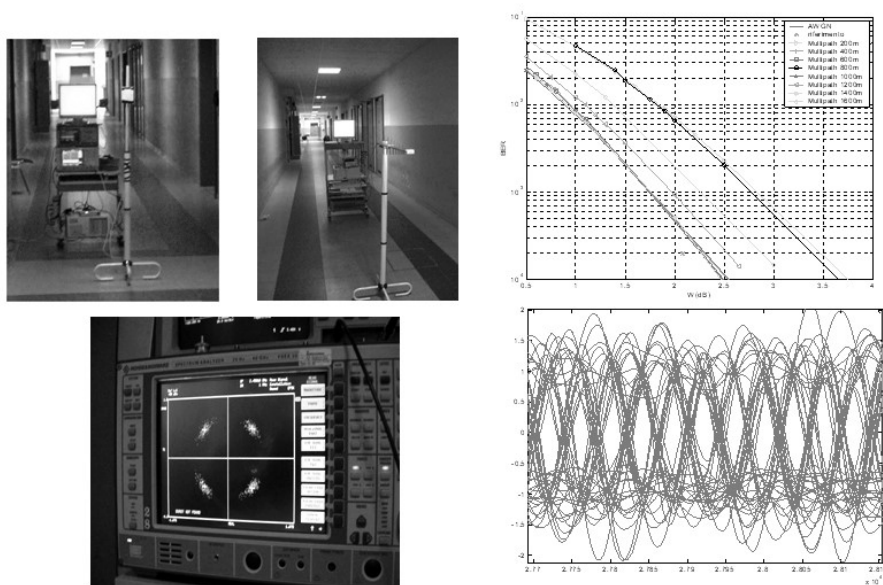


FIGURA 5 ALLESTIMENTO DELLE MISURE PRESSO LA FACOLTÀ – CORRIDOIO PIANO TERRA

4 Sistemi immersivi e smart mobility

Agli inizi degli anni 2000 furono intraprese presso il WiLab le prime ricerche sui sistemi immersivi, sulle comunicazioni cooperative e sulla localizzazione indoor basata su tecnologie radio eterogenee, che diedero origine anche ad un'intensa campagna sperimentale. Congiuntamente, vennero continuate e potenziate le ricerche e le sperimentazioni in campo per sistemi e servizi legati all'infomobilità e ai sistemi di trasporto intelligenti.

Con riferimento ai sistemi immersivi, va senz'altro citato il progetto Virtual Immersive Communications (VCom), con il coinvolgimento dell'Università di Roma Tor Vergata, CNR, CNIT, Telecom Italia Learning Services e Istituto Superiore delle Comunicazioni [10], che aveva l'obiettivo di individuare e sviluppare tecnologie abilitanti per una molteplicità di servizi di "virtual immersive telepresence" (VIT). Tali servizi trovarono concreta realizzazione in VCom grazie all'integrazione di reti di diversa natura (reti di sensori radio, reti ad-hoc e reti radiomobili 2.5G e 3G). Furono infatti

concepiti, progettati e messi in campo due dimostratori: il primo fu finalizzato alla Localizzazione Indoor e la Guida Immersiva (MIE), mentre il secondo, denominato Virtual Immersive Learning (VIL), fu orientato a scenari di teledidattica di tipo cooperativo, basati cioè sulla rete di laboratori e sul lavoro cooperativo.

Le attività relative alla guida immersiva videro i ricercatori del WiLab protagonisti di una collaborazione scientifica che coinvolse i colleghi del Wireless Information and Network Sciences Laboratory presso il prestigioso Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, MA, USA.

Nel testbed di guida immersiva venne dimostrato come un utente dotato di terminale con interfaccia radio (cellulare o WiFi) potesse entrare e agire in piena autonomia in un ambiente a lui ignoto (ad esempio una sede della Pubblica Amministrazione), adeguatamente equipaggiato con reti di sensori e reti ad-hoc per l'erogazione di servizi immersivi. Nel corso della dimostrazione l'utente veniva riconosciuto mediante una telecamera posta all'ingresso e successivamente localizzato mediante opportuna elaborazione dei segnali scambiati con i sensori radio. Conclusa la fase di identificazione, all'utente venivano fornite informazioni sui servizi disponibili nell'ambiente sulla base del suo profilo. L'utente poteva quindi accedere al servizio desiderato ed interagire con la rete preposta alla sua erogazione.

Tra le varie attività generate dal progetto VICOM, va ricordato quanto sviluppato nel progetto europeo FP7 "SELECT" (Smart and Efficient Location Identification and Cooperation Techniques), nel progetto ministeriale PRIN "Greta" e infine nel progetto finanziato dall'agenzia spaziale europea (ESA) denominato "LOST". In particolare, nei progetti SELECT e GRETA è stata concepita, studiata e validata una tecnologia di comunicazione e localizzazione a banda ultra-larga (UWB) di tipo passivo con l'obiettivo di identificare e localizzare tag senza batteria. Questo ha portato al primo sistema UWB-RFID mai implementato a livello mondiale, poi testato in un'applicazione di ordinamento dei bagagli su nastro trasportatore operante con una precisione di 20 cm a 3 m/s di velocità. Tale tecnologia è stata successivamente migliorata, con l'aggiunta di *funzionalità di trasferimento wireless della potenza*, all'interno del progetto ESA LOST, il cui scopo era di investigare la possibilità di localizzare tag senza batteria all'interno della stazione spaziale internazionale. I test e la demo finale ebbero luogo presso ESA utilizzando il prototipo del veicolo Mars Rover.

Rimanendo nell'ambito dei sistemi short range, che videro un'intensa attività di ricerca con riferimento ai sistemi a onde millimetriche (60 GHz) sin dalla fine degli anni '80, nella cornice di vari progetti europei (PROCOM e DRIVE), è opportuno segnalare la loro attuale prospettiva di integrazione con la futura rete radiomobile 5G e le sperimentazioni condotte dal WiLab presso la Facoltà di Ingegneria di Bologna sugli standard emergenti per le comunicazioni veicolo-veicolo e veicolo-infrastruttura (IEEE 802.11p). Questi rappresentano senza dubbio alcuno la principale linea di sviluppo dell'industria dell'automotive, con riferimento al settore della connettività veicolare. Infatti, anche prescindendo dalla possibilità di realizzare la guida autonoma, le comunicazioni fra veicoli e fra questi e l'infrastruttura stradale permetterebbero di ridurre il rischio di collisioni (il conducente sarebbe a conoscenza della presenza e delle intenzioni di altri veicoli), i tempi di percorrenza, il consumo di carburante e le emissioni inquinanti. Presso la Facoltà di Ingegneria di **Bologna** sono state testate, a partire dalla prima metà degli anni 2000, le tecnologie radio per comunicazioni short range in scenari veicolari, al fine di individuare la distanza di copertura,

l'impatto di ostacoli che ostruiscono la comunicazione e le tecniche per assicurare le comunicazioni anche in presenza di impedimenti alla propagazione radio diretta fra trasmettitore e ricevitore.

In particolare, sono state testate con successo tecniche di trasmissione multi-salto fra veicoli, che consentono di ovviare all'impossibilità di uno scambio di informazioni diretto fra un veicolo ed un altro o fra questi e la stazione di bordo strada, attraverso il coinvolgimento di veicoli intermedi come tramite. Un esempio di questo scenario è stato analizzato con una sperimentazione effettuata presso la Facoltà di Ingegneria di **Bologna** utilizzando la tecnologia IEEE802.11p, concepita per comunicazioni in scenari veicolari nella banda dei 5.9 GHz.

Tra le varie applicazioni potenziali si segnalano non solo la sicurezza ma anche la gestione e l'efficienza del traffico, in piena linea con la roadmap del 5G. Tra quelle più futuristiche va anche citata quella del semaforo virtuale, che fu studiato sin dal 2013 e prevedeva la gestione degli incroci privi di segnalazione semaforica tramite scambio diretto di informazioni tra veicoli in avvicinamento. Supportato dall'European EIC ICT Labs, presso il WiLab è stato implementato e testato un algoritmo per la gestione degli incroci basato su una continua comunicazione tra veicoli e una applicazione installata a bordo dell'auto, in grado di regolare autonomamente gli accessi all'incrocio.

5 Le reti eterogenee per le smart cities

Nella scia delle ricerche sulle reti a onde millimetriche e sulla copertura WiFi dell'intera Facoltà, nell'anno 2004 fu progettato e realizzato un dimostratore di rete mesh a microonde, per la verifica in campo delle prestazioni di sistemi con connettività a breve raggio eterogenea, che ha rappresentato la base per i successivi sviluppi verso i lampioni intelligenti. La rete wireless installata dal personale del WiLab presso la Facoltà di Ingegneria di Bologna aveva come obiettivo la sperimentazione di nuovi apparati e protocolli per le comunicazioni wireless a larga banda in vari contesti. Lo scenario prevedeva diversi nodi rete wireless in connessione mesh, il più alto dei quali collocato sulla torre della Facoltà, operanti secondo le seguenti tecnologie: 802.11an (HyperLan 5GHz con tecnica MIMO), IEEE 802.11s per reti auto configuranti MESH, IEEE 802.11p per comunicazioni Vehicle-to-Vehicle e Vehicle-to-Infrastructure, IEEE 802.11b/g come hotspot WiFi per l'utente finale.

5.1 L'Infomobilità e il Progetto Pegasus

La sicurezza stradale e la gestione del traffico su strada rappresentano importanti problematiche per le società moderne. Il "Global status report on road safety, 2017" riporta un numero di morti per incidenti stradali nel mondo pari a 1.25 milioni all'anno, gran parte dei quali avviene in corrispondenza degli incroci. Oltre a questo, la gestione degli incroci ha un impatto rilevante anche sulla creazione di code ed ingorghi nelle città e gli incroci controllati da semafori presentano spesso inefficienze a causa della mancanza di dinamicità e adattatività.

I progetti sul trasporto intelligente, iniziati a livello europeo sin dalla fine degli anni 80, hanno consentito nel tempo di sperimentare tecnologie per telecomunicazioni in scenari veicolari con prestazioni sempre migliori, nonché di concepire nuove applicazioni e di affinare gli strumenti di

simulazione, come verrà illustrato attraverso le specifiche attività descritte di seguito. Stavano allora nascendo le prime idee su nuove architetture di rete, inclusa la connessione cooperativa e dinamica dei veicoli per nuove applicazioni orientate all'efficienza, alla sicurezza e alla riduzione dell'inquinamento. Si iniziavano anche a studiare nuovi sensori, quali il radar anticollisione, e nuovi algoritmi per l'elaborazione dei segnali video acquisiti attraverso telecamere a bordo. Oggi, dopo circa trenta anni e una lunga serie di esperimenti e di verifiche, queste idee stanno divenendo realtà commerciale. Con l'avvento del sistema cellulare di quinta generazione questi concetti troveranno con ogni probabilità piena attuazione.

Le attività di studio e simulazione dei sistemi radiomobili portate avanti nel WiLab si rivelarono fondamentali anche per lo sviluppo di un progetto orientato al trasporto intelligente e all'infomobilità, PEGASUS (2009-2012), all'interno del quale, in collaborazione con l'azienda Octotelematics, si valutò l'impatto del traffico dati generato dai veicoli verso la rete radiomobile e i benefici per la circolazione stradale derivanti dall'attivazione di servizi di "mobilità intelligente", basati appunto anche sui sistemi di comunicazione vehicle-to-vehicle V2V e vehicle to infrastructure V2I. Le prove su strada, effettuate utilizzando la tecnologia IEEE 802.11p, fornirono ottimi risultati e rafforzarono la consapevolezza che il sistema complesso di gestione del traffico urbano andasse e vada tuttora affrontato in maniera integrata, aggregando in modo intelligente vari sottosistemi che implementino le applicazioni più significative.

La gestione dinamica del traffico richiede di valutare con opportuni strumenti di simulazione di rete mobile eterogenea il contributo che il breve raggio può fornire per ridurre il carico della rete mobile (tradizionalmente a risorse non infinite), qualora questa sia caricata con una mole crescente di dati, trasmessi dai veicoli. L'idea fu quella di accorpare veicoli vicini in opportuni cluster, in modo da aggregare i dati con l'ausilio della rete short range veicolo-veicolo e minimizzare il numero di trasmissioni effettuate tramite rete cellulare verso il centro di controllo della rete stradale.

Per studiare l'effettivo impatto che i veicoli connessi possono avere sull'efficienza del traffico, fu quindi sviluppata una piattaforma di simulazione per la valutazione integrata del traffico veicolare e del traffico dati in rete cellulare. In particolare, la piattaforma di simulazione fu costruita integrando il simulatore di traffico veicolare VISSIM, in grado di generare traffico stradale realistico su scenari urbani, extraurbani ed autostradali, con il simulatore di reti di telecomunicazioni SHINE, sviluppato presso i laboratori del Wilab, che consente la stima di prestazioni di diverse tecnologie di accesso radio, sia considerate singolarmente che in modo congiunto. Dall'uso congiunto di VISSIM e SHINE è stato possibile valutare i benefici della trasmissione di messaggi periodici dai veicoli ad un centro di controllo remoto per applicazioni di mappatura e gestione del traffico, nonché la trasmissione dal centro di controllo remoto ai veicoli del percorso ottimo da seguire in base alle effettive condizioni di traffico, dimostrando fino ad un 50% di risparmio di tempo in scenari urbani.

Va sottolineato che i progetti sull'Infomobilità hanno anche generato nuove idee in relazione all'acquisizione di dati stocastici di natura bidimensionale, aprendo la strada alla ricerca di base sull'acquisizione e sulla elaborazione di grandi moli di dati provenienti da sensori sparsi sul territorio, con opportuni algoritmi di processamento per la definizione di un dato servizio. È questo il campo dei BIG DATA, che sarà possibile approfondire attraverso opportune tecniche di Intelligenza artificiale, in particolare con reti neurali, capaci di analizzare in modo rapido ed efficiente tali moli di dati.

Queste tecniche sono e saranno senz'altro di grande impatto nella progettazione di reti e servizi alla base di scenari Internet of Things (IoT) e smart, in cui la continua produzione di grandi moli di informazione richiede un'opportuna gestione ed analisi.

5.2 Smart cities e Internet of Things: il testbed sui lampioni intelligenti

Come è noto, il termine Smart City è piuttosto ampio e include una molteplicità di servizi offerti ai cittadini, oltre che soluzioni innovative inserite nel territorio urbano al fine di migliorare, grazie all'inserimento di piattaforme tecnologiche, alcuni settori strategici come la mobilità, il consumo energetico, l'ambiente. Appare evidente come l'armonizzazione di servizi e piattaforme diverse passi da una razionalizzazione delle risorse di TLC, al fine di censire e creare un "sistema nervoso" capace di acquisire informazioni dal territorio, elaborarle in tempi rapidissimi, e restituirle nella forma di servizi ai cittadini. A tal fine è necessario progettare l'architettura di rete in modo adeguato, per evitare cioè che la presenza di reti di sensori non integrate, la diffusione sempre più massiccia sul territorio di sensori di diverso tipo, per diversi scopi, e di diversa competenza, porti ad una frammentazione dei servizi con la perdita dei benefici dovuti alla visione integrata dei dati.

È dunque importante creare le condizioni affinché tutte le informazioni disponibili siano raccolte, integrate, elaborate e messe in relazione per contribuire a creare un modello dell'ambiente il più reale e affidabile possibile, partecipato e controllato dai diversi enti, ciascuno secondo le proprie competenze ed i propri ambiti. Il potenziamento, l'integrazione, e la corretta gestione delle tecnologie di telecomunicazioni wireless sono il punto di partenza necessario per attivare i nuovi servizi che si vogliono abilitare. In questa cornice di riferimento, nell'ambito del progetto Pegasus è stato concepito, negli anni 2009-2011, un testbed "Smart City" presso la Fondazione Alma Mater, anch'essa coinvolta nel progetto, orientato ai sistemi di illuminazione pubblica intelligenti. Allora la Fondazione Alma Mater era ospitata in Villa Pallavicini, dove alcuni locali erano stati acquisiti in affitto per ospitare una parte del personale e della strumentazione del WiLab. Il testbed prevedeva la prima rete operativa di 8 lampioni intelligenti che, con struttura mesh basata sullo standard IEEE 802.15.4, implementava di fatto, *in nuce*, un primo esempio di smart city.

Furono dunque sperimentati, con tecniche di trasmissione di varia capacità (low and high rate) vari servizi, quali ad esempio smart lighting, video sorveglianza wireless, informazioni al cittadino, infomobilità, etc. Fu in particolare affinata la verifica sperimentale dei sistemi di trasporto intelligente sopra descritti.

Il Comune di Bologna, informato tempestivamente delle enormi possibilità di questi studi, non diede reazioni degne di nota.

5.2.1 Smart lighting

Un'attenzione particolare fu poi dedicata al risparmio energetico nei sistemi di illuminazione pubblica, attraverso il telecontrollo dei lampioni basato su un'architettura di rete wireless di tipo

mesh, completamente interfacciata con la rete mobile. Questa applicazione, particolarmente significativa per i costi di progetto e di installazione relativamente bassi, consente di controllare ogni lampione dotandolo della capacità di comunicare via radio con il sistema di gestione centrale, in rete, e permette di raggiungere risparmi dell'ordine del 35-40% annuo, come verificato sperimentalmente in un comune dell'Emilia Romagna.

Al di là degli sviluppi imprenditoriali che ha determinato, testimoniati dalla nascita di una start-up, questa attività rappresenta un esempio significativo di quanto si possa fare per rendere intelligente la rete elettrica e le smart grids, che richiedono il monitoraggio del sistema elettrico con una spiccata capillarità al fine di controllare il servizio di erogazione dell'energia.

Appare chiaro che un sistema di telecomunicazioni wireless capace di controllare ogni singolo lampione e di acquisire dati sul suo funzionamento, consente al gestore della rete di illuminazione pubblica non solo l'ottimizzazione del suo funzionamento, con conseguente risparmio energetico, ma anche il monitoraggio puntuale delle condizioni operative della propria infrastruttura e la prevenzione dei guasti.

Inoltre la rete di telecomunicazioni wireless consente di raggiungere agevolmente, con costi contenuti, i seguenti obiettivi:

- definire servizi innovativi attraverso tecnologie intelligenti di monitoraggio, controllo, comunicazione,
- distribuire energia in modo efficiente, sostenibile, economicamente vantaggioso, e sicuro.
- facilitare la connessione e l'operatività di generatori elettrici eterogenei di qualunque dimensione e tecnologia,
- fornire ai consumatori strumenti per contribuire ad ottimizzare il funzionamento del sistema globale,
- dare ai consumatori maggior informazione e potere di scelta,
- ridurre significativamente l'impatto ambientale dell'intero sistema elettrico e aumentarne il grado di affidabilità e sicurezza.

Ricordo in proposito che la tecnologia dei pali intelligenti per lo smart lighting, basata su reti eterogenee pienamente controllate, si sta sviluppando rapidamente in diversi paesi occidentali e orientali. Il risparmio energetico è significativo ed è basato appunto sul controllo del dimming dei lampioni pubblici in relazione alle esigenze di servizio. Le reti wireless mesh progettate allo scopo servono a dare piena connettività tra i pali e, mediante uno o più gateway sono connesse in rete utilizzando la copertura cellulare. Ad oggi, ogni palo, oltre alla funzione primaria di illuminazione è progettato per una copertura locale orientata all'Internet of Things (per servizi vari quali ad esempio infomobilità per pedoni o utenti in bicicletta/auto, sensori di movimento, sensori per il rilevamento della spazzatura, etc..).

Nella sua generazione iniziale la rete è quindi a bassa capacità, con bassa latenza, progettata per trasmettere informazioni a burst, da consegnare con il ritardo minimo per garantire il servizio richiesto, unitamente ad un'opportuna priorità di servizio in relazione alle applicazioni da soddisfare.

5.2.2 Sperimentazione di sistemi LoRa

Nell'ambito della sperimentazione di sistemi di telecomunicazioni per scenari IoT (Internet delle cose), nel 2015 i ricercatori del Wilab hanno installato sulla torre della Scuola di Ingegneria un apparato ricetrasmittente (gateway) conforme alla tecnologia LoRa (Long Range). La tecnologia LoRa è complementare rispetto a quella dei pali intelligenti appena descritta ed è stata concepita per comunicare efficacemente su lunghe distanze con dispositivi a basso costo e bassa potenza, quali sensori ed attuatori, dispiegati su un ampio territorio (tipicamente una città). LoRa rappresenta, pertanto, uno dei primi esempi di tecnologie espressamente concepite per scenari IoT e Smart Cities. La precisa collocazione del gateway presso la sede della Scuola di Ingegneria è mostrata nella Figura 6 che permette anche di apprezzare la felice condizione, in termini di propagazione elettromagnetica, sperimentata dall'apparato, che dominava la città di Bologna da un'altezza di 71 metri.

La sperimentazione ha permesso di individuare i limiti e i punti di forza di questa tecnologia e di identificare gli ambiti applicativi più indicati per il suo impiego.

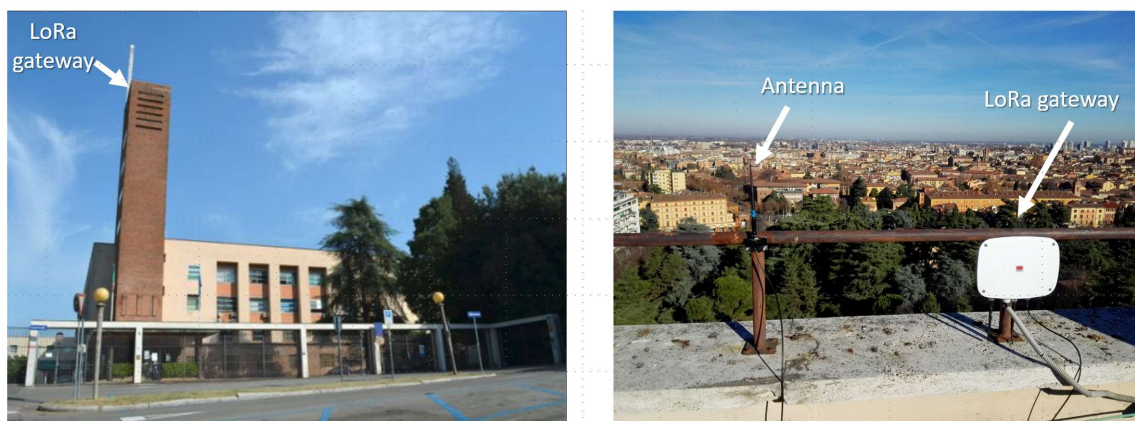


FIGURA 6 LA STAZIONE RICETRASMITTENTE LORA SULLA TORRE DELLA SCUOLA DI INGEGNERIA

5.2.3 I Sistemi di trasmissione digitali progettati con tecniche FPGA e il trasferimento tecnologico

Le esperienze effettuate presso il WiLab sui primi sistemi Digital Signal Processor - DSP - telecomandati e le prime sperimentazioni su sistemi maggiormente evoluti di tipo Field Programmable Gate Array - FPGA -, hanno portato allo sviluppo di un progetto di ricerca sperimentale molto significativo che ha riguardato il sistema di trasmissione digitale terrestre, DVB-T, richiesto e finanziato da Metasystem S.p.a. (2006). Il progetto in esame era finalizzato al conseguimento dei seguenti obiettivi: progettazione e realizzazione di un modulatore per la diffusione televisiva digitale DVB-T/H mediante tecnologie programmabili, ad elevata flessibilità e telecomandabile; progettazione e realizzazione di un transponder non rigenerativo con cancellatore d'eco digitale telecomandabile; progettazione e realizzazione di una piattaforma per il telecomando degli apparati di trasmissione, definizione dei criteri di pianificazione di copertura nel caso di sistemi di diffusione televisiva e radiofonica digitale. Il progetto fu interamente sviluppato dai collaboratori, ricercatori ed afferenti al Laboratorio di comunicazioni wireless WILAB, e la buona riuscita e l'eccellente implementazione del sistema va senza dubbio attribuita alla capacità di integrare e

creare le giuste sinergie tra tutti gli attori che hanno contribuito, ognuno con la propria esperienza, a studiare, sviluppare e validare l'intero progetto. I risultati, inclusi i testbed con telemisura, furono esposti a livello internazionale e in vari contesti industriali.

A mio avviso è importante ricordare che il Wilab è stato un interlocutore di riferimento per realtà industriali come Siemens, Philips, TIM, Inwit, Telesistemi Ferroviari, Almagora, Thales Alenia, Metasystem, Octotelematics, Cairo Networks, Mathworks, Sitael, etc. e le attività scientifiche - orientate anche alla sperimentazione - condotte nell'ambito di progetti nazionali e internazionali, in stretta collaborazione con importanti realtà industriali, hanno portato alla creazione di varie start up, tra le quali ricordiamo: Wi4B, Uniset, Neptune, Idesio.

6 Il testbed permanente nell'area di Ingegneria – smart lighting e 5G per nuovi servizi

Sulla base di quanto mostrato in relazione alla rete di pali intelligenti, nati presso la Fondazione Alma Mater sin dal 2011 nell'ambito del progetto Pegasus, è stato possibile immaginare una prosecuzione ed un potenziamento dell'attività sperimentale per la creazione presso l'area della Facoltà di Ingegneria di un test bed indoor e outdoor per lo sviluppo di nuove tecnologie e nuovi servizi nella direzione del 5G ed oltre.

In particolare, lo spunto nasce dalla possibile convergenza della rete di pali intelligenti e della rete radiomobile che presenta l'innovazione tecnologica dei sistemi DAS (Distributed Antenna Systems), già installati nel 2017 a livello sperimentale nei locali Wilab, al I piano dell'edificio storico e nei corridoi del I e II piano. I sistemi DAS rappresentano una rete di nodi che includono antenne separate, in grado di fornire una copertura capillare wireless di una certa area geografica, e collegate da un mezzo comune, tipicamente la fibra ottica, alla rete cellulare.

L'obiettivo centrato dalle reti DAS è quello di fornire adeguata copertura di servizio attraverso la remotizzazione del traffico verso celle lontane, e con adeguato controllo dei livelli di campo e.m., che risultano assai limitati date le basse distanze di copertura.

A questo proposito vanno ricordate le seguenti considerazioni:

- La tecnologia dei pali intelligenti per lo smart lighting è ormai una realtà consolidata, utilizzata in diversi paesi occidentali e orientali. Il risparmio energetico, basato sull'adattamento dell'intensità luminosa alle reali esigenze, è di assoluto rilievo. Le reti wireless mesh, integrate con la rete cellulare, oltre a garantire la connettività tra i pali sono in grado di offrire copertura radio locale per servizi orientati all'Internet of Things, vero fondamento dello sviluppo delle realtà urbane nella direzione delle smart cities.
- In prospettiva, la rete di pali intelligente potrà estendere la propria funzionalità nella direzione della rete densa, secondo il criterio che sta alla base dell'ingegneria cellulare, nell'ottica di garantire alta capacità agli utenti densamente distribuiti. Si prefigura quindi una possibile integrazione nelle reti 5G, e successive, basate sulla tecnologia in fibra alle radio basi, sia per scenari indoor, sia outdoor, configurando un assetto di accesso wireless fisso a larga banda con funzione di ripetizione del segnale 5G.

- Si tratta quindi di valutare una possibile architettura in cui i pali smart possano ospitare laddove conveniente le radiobasi 5G con accesso in fibra e gli altri pali facciano funzione di ripetitori 5G (OUTDOOR), mentre in scenari indoor la funzione dei pali verrebbe assunta dagli impianti di illuminazione INDOOR, garantendo la capacità richiesta).

La raccolta/trasmissione di informazioni su condizioni del traffico, consumi energetici, inquinamento atmosferico, disponibilità di parcheggi, disponibilità e posizione dei mezzi di trasporto pubblico, stato di riempimento dei cassonetti dei rifiuti, sono solo alcune delle innumerevoli applicazioni che una rete siffatta renderebbe possibili, divenendo essa stessa il sistema nervoso delle future città intelligenti.

E' questo lo scenario che giustifica, a mio avviso, un testbed permanente in Facoltà, che potrà essere sviluppato con la collaborazione di alcuni attori industriali, già individuati, ma che dovrà essere aperta a tutti i gruppi industriali e di ricerca che vedano in questo scenario la possibilità di intervenire ed inserire idee e tecnologie, da testare adeguatamente per nuove architetture e servizi, secondo un ciclo virtuoso che metta la tecnologia in grado di soddisfare servizi via via sempre più sofisticati e di adeguata affidabilità, nelle aree strategiche per il Paese quali infomobilità, pubblica sicurezza, turismo e cultura, efficienza energetica, agricoltura, industria 4.0, etc.

La ricerca potrà così spaziare dalle speculazioni teoriche per comprendere i limiti di certe tecnologie alle applicazioni verticali, come già realizzato in presso la Fondazione Alma Mater con riferimento alle smart cities.

La valenza del testbed sarebbe anche quella di creare visibilità sulle potenzialità del settore ICT e attrarre l'attenzione sull'area di Ingegneria con la creazione di una piattaforma multiservizio e multi tecnologia, in cui le nuove tecnologie si fondono con le richieste degli utenti per ottenere servizi e prodotti innovativi che aiutino a realizzare meglio i progetti di vita e di lavoro.

Partendo dalle competenze maturate in passato e dalle recenti sperimentazioni sui pali intelligenti, la concezione di un testbed permanente nei locali della Facoltà (indoor e outdoor) avrebbe dunque l'importante funzione di stimolare la ricerca di nuove applicazioni, servizi, architetture e formati trasmissivi nelle nuove bande di frequenza guardando ai sistemi 5G e oltre, nonché di far cooperare sul campo i ricercatori universitari con gli ingegneri delle industrie disponibili ad investire in ricerca e sviluppo.

La diffusione delle reti mobili con celle sempre più piccole ad alta densità di oggetti, richiederà sempre maggiore velocità nella trasmissione dei dati e quindi esigenza di nuove risorse spettrali e di circuiti di altissima frequenza a basso consumo, nonché lo studio di nuovi formati di trasmissione e nuove architetture di accesso per una corretta gestione delle risorse disponibili. I sistemi di localizzazione, con precisione crescente, potranno poi generare nuove applicazioni anche per disabili e non vedenti, e nuovi filoni di ricerca potranno essere sviluppati in riferimento a scenari non usuali, quali quello delle comunicazioni molecolari, apparentemente avulsi dal mondo classico delle Telecomunicazioni, ma in grado di utilizzarne i principi per una nuova modellistica e per nuovi algoritmi.

Purtroppo, dopo circa un anno e mezzo dalla concezione di questa proposta, va rimarcato come la burocrazia di Ateneo e l'eccesso di regolamentazione stiano frenando ad oggi la partenza di questo testbed, e quindi producano un rallentamento nello sviluppo della ricerca teorica e sperimentale.

7 Conclusioni

Questo contributo ha mostrato lo sviluppo delle attività sperimentali nel settore delle Telecomunicazioni, all'interno del WiLab, molte delle quali realizzate a livello di testbed all'interno della Facoltà di Ingegneria.

Le attività sperimentali hanno anche rappresentato uno stimolo per la ricerca di base, nell'ambito di un ciclo virtuoso che dalla sperimentazione porta alla concezione di nuove idee e quindi a nuove applicazioni sempre più sfidanti. Alla luce dell'evoluzione della tecnologia negli ultimi anni, si può affermare che oggi esiste un larghissimo numero di nuove applicazioni ICT basate sulla sintesi di reti eterogenee, facilmente sperimentabile dato il basso costo dei sistemi di elaborazione e di trasmissione dell'informazione digitale, in diversi campi, quali ad esempio quello dei trasporti, dell'energia, della salute, dell'industria 4.0, dell'agricoltura, etc.

Questa visione integrata application-oriented stimola, dunque, da un lato la ricerca di base verso la valutazione di sistemi a frequenze sempre più elevate, per il collegamento di punti a brevissima distanza ed apre la strada, dall'altro, alle tecniche di machine learning per la definizione di sistemi sempre più evoluti, che si appoggino all'acquisizione, elaborazione e trasmissione di grandi moli di dati su cui ritagliare servizi a qualità differenziata.

In questo quadro di riferimento mi piace molto sottolineare l'importanza della valutazione numerica e della misura, come linea guida essenziale nella caratterizzazione delle prestazioni di sistemi complessi e per la validazione dei modelli teorici di tipo simulativo e/o analitico. Ciò si è sempre verificato nello studio dei sistemi wireless, sin dai primissimi anni '90 in ambito GSM.

Riassumendo e cercando di pervenire ad un punto di sintesi, mi pare di poter concludere, dopo la lunga esperienza vissuta nella nostra Facoltà, in stretto contatto con il mondo industriale, che

- la ricerca non può prescindere dalle verifiche sperimentali, visto il diffondersi di tecnologie anche a basso costo da cui trarre anche modelli matematici evoluti,
- la ricerca richiede sempre più la formazione di gruppi interdisciplinari, capaci di finalizzare lo studio a nuove applicazioni, e a tale riguardo, voglio rimarcare che la concezione di nuove applicazioni deve seguire un approccio fondato sul "know why", in modo che i sistemi a complessità crescente vengano progettati adeguatamente per il controllo delle prestazioni, secondo una logica ben collaudata dell'integrazione di sottosistemi di prestazioni note e misurabili, soprattutto nella visione dei sistemi auto riconfigurabili.

Venendo alla **valutazione** delle attività di ricerca:

- a mio avviso occorre valutare l'attività di gruppi di ricerca di dimensioni significative, che si formino spontaneamente, e si autoconfigurino seguendo all'interno le linee guida dei coordinatori che li rappresentano verso l'esterno,
- mi pare profondamente sbagliato, illusorio e fuorviante selezionare il singolo ricercatore e pretendere di valutare la sua competenza a prescindere dal gruppo di ricerca che lo ha formato,
- va ricordato, a rafforzamento delle idee precedentemente esposte, il ruolo dei consorzi di ricerca con ragguardevoli dimensioni, che hanno flessibilità e ricchezza di competenze per competere a livello internazionale,

- è auspicabile che anche le Scuole e/o i Dipartimenti di Ingegneria ritornino a coordinarsi a livello nazionale per condizionare l'erogazione dei miseri finanziamenti governativi, stimolando la rimozione dei finanziamenti a pioggia, a favore di un'ottica mirata allo sviluppo del Paese.

Per quanto concerne la didattica:

- l'attività va impostata con una opportuna enfasi ai laboratori, da iniziare anche nei corsi di base, specie se erogati ad una platea di studenti molto varia, come capita nei corsi di Laurea Magistrale a livello internazionale,
- I docenti e i ricercatori hanno l'opportunità, dati i costi contenuti di nuove tecnologie, di utilizzare circuiti e sistemi per favorire la formazione dello studente attraverso un opportuno contatto con la realtà sperimentale, o per ricerche su nuove applicazioni, che devono però partire dalla dimestichezza con il livello fisico,
- I contenuti teorici, indispensabili alla formazione dell'ingegnere ICT, devono essere a largo spettro, a parere di chi scrive, in quanto oggi le nuove applicazioni richiedono un'integrazione di componenti HW e SW, di algoritmi per l'acquisizione, l'elaborazione, la trasmissione e la gestione dell'informazione.

Tutto ciò considerato, occorre far pervenire a chi è alla guida del Paese il seguente messaggio:

- la Facoltà di Ingegneria ha bisogno di investimenti cospicui anche per laboratori sperimentali – uomini-spazi-strumentazione (nel passato tali finanziamenti sono stati spesso messi a disposizione della didattica attraverso un uso adeguato dei fondi di ricerca ottenuti dall'esterno) e soprattutto **flessibilità nella gestione dei fondi, esattamente al contrario di quanto succede oggi**,
- In un'epoca di scarse disponibilità economiche, si auspica, come già segnalato al Rettore, che l'area ICT venga adeguatamente finanziata, anche per potenziare gli ingressi a Ingegneria, e quindi la produzione del capitale umano indispensabile per lo sviluppo del Paese,
- una possibilità da seguire è quella dell'azzeramento delle tasse di iscrizione ai corsi di studio di Ingegneria a carattere tecnologico, nell'ottica di favorire lo sviluppo delle aziende con l'immissione nel mondo del lavoro di giovani ingegneri capaci a tal punto da essere spesso richiesti dalle aziende e università europee e internazionali.

Auspico infine che i docenti e i ricercatori acquisiscano maggiore consapevolezza del proprio ruolo centrale, di vero motore della ricerca scientifica e della didattica, e si possano così riposizionare al centro del sistema universitario, con adeguato ridimensionamento dell'eccessivo potere assunto dall'amministrazione.

Ringraziamenti

Al termine della mia permanenza in ruolo, voglio rivolgere un saluto ed un augurio a tutti gli Studenti, gli Allievi, i Colleghi, i Collaboratori che ho avuto la fortuna ed il piacere di incontrare durante la mia attività, e ricordare in particolare, all'interno del WiLab, gli Allievi Marco Chiani, Roberto Verdone, Velio Tralli, Gianluca Mazzini, Davide Dardari, Andrea Conti, Gianni Pasolini, Andrea Giorgetti, Cristina De Castro, Alberto Zanella, Barbara Masini, Alessandro Bazzi, Flavio Zabini, e tra i tanti collaboratori esterni, assunti per lo più con i fondi dei progetti di ricerca: Paolo

Toppan, Andrea Toppan, Alberto Barigazzi, Raffaele Siroli, Nicola Ladisa, Alberto Roversi, Raffaele Soloperto, Cesare Fontana, Gianluca Bruni, Claudio Donzelli, Fabio Mantovani, Filippo Marangoni, Giovanni Chiurco, Matteo Mazzotti, Rudi Bandiera, Andrea Ravaoli, Chiara Balzanelli, Laura Toni, Cristina La Palombara, Giacomo Leonardi, Thomas Pavani, Claudio Gambetti, Paolo Bernardi, Paolo Torregiani, Mirko Mirabella.

A tutti loro va il mio sincero ringraziamento per avere stimolato il mio impegno all'interno di questa Facoltà. A tutti loro, l'augurio di poter continuare con successo la propria carriera, nello spirito della tradizione scientifica e dell'insegnamento che i Maestri hanno saputo trasmettere.

Riferimenti

- [1] "WILAB", 10 Dicembre 2018. [Online]. Available: <http://www.wilab.org>.
- [2] Annuario Statistico Italiano 2013 – Cap. 19 Trasporti e telecomunicazioni.
- [3] Ericsson, "Ericsson Mobility Report November 2018".
- [4] Progetto PROCOM (finanziato dal Progetto Finalizzato Trasporti 2), 1987-1993
- [5] O. Andrisano, G. Vannini, C. Caini, G. Mazzini e C. Sartori, "La rete PROMETHEUS: Struttura e servizi", Università degli studi di Bologna, 1994.
- [6] O. Andrisano, M. Chiani, A. Conti, C. Fontana, A. Giorgetti, D. Dardari, G. Mazzini, G. Pasolini, R. Verdone, V. Tralli e A. Zanella, "Il contributo di CSITE e CNIT alla rete di Facoltà: dalla rete ottica FDDI alle reti wireless", Università degli Studi di Bologna, 2002.
- [7] Progetto LabNet, CNIT-MIUR, 1999-2002
- [8] Progetto TELEDON2 (progetto CNIT-2003-2006, coordinato dal Prof. O. Andrisano dell'unità CNIT di Bologna
- [9] Progetto Multimedialità, coordinato dal Prof. Oreste Andrisano, 1999, 2003
- [10] Progetto VICOM, coordinato dal Prof. Francesco Vatalaro, Università di Tor Vergata