



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI
INGEGNERIA DELL'ENERGIA ELETTRICA
E DELL'INFORMAZIONE "GUGLIELMO MARCONI"

Machine Learning, Control and Optimization Techniques for Self-Organizing Networks

Activity plan and research project

The current advent of 5G and the progress of its evolution toward 6G have evidenced, besides advances in the wireless segment, a growing integration between the latter and the fixed network (access and backhaul), in an unprecedented effort to provide true end-to-end services to a diverse set of vertical applications, many of which based on the Internet of Things (IoT) concept. In line with this vision, communications and computation have become more entangled and computing power more distributed, from remote cloud datacenters down to micro-datacenters in the edge. Cloud-native applications based on micro-services, Mobile Edge Computing (MEC), Network Functions Virtualization (NFV) and Software Defined Networking (SDN) are the architectural and technological elements that support this evolution.

Both the Data Plane and the Management and Control Plane of the network are profoundly affected by this integration. As pointed out in very recent overviews, automated service decomposition and orchestration, along with “self-driving” networks, possibly empowered by analytics and Artificial Intelligence / Machine Learning (AI/ML) techniques, will play an increasingly relevant role. Actually, it may be envisaged that the traditional vision of separate and interacting Network Management and Control Planes is bound to converge toward a more integrated architectural paradigm, where multiple control loops acting on multiple time scales should foster a self-organizing operational behaviour in the dynamic allocation of network resources.

In this framework, the research program will aim at investigating the mutual roles and interaction of both model-based and model-free (ML) control and optimization techniques. Pure ML approaches are based on the parametric optimization of Fixed Structure Parametrized (FSP) functions that basically attempt to solve Markov Decision Processes by approximating control policies (i.e., functions mapping observation spaces to decision spaces) uniquely through the observation of data from the real system. On the other hand, model-based control techniques assume some knowledge of system dynamics and attempt to synthesize control policies that exploit such structural knowledge. The two approaches are not mutually exclusive, as ML techniques can anyway be used in the second case in the functional approximation of the control policies and in the adaptation of system model parameters. Particular attention will be put in devising techniques that not only act on phenomena occurring within the Data Plane (as flow and packet processing, packet routing, load balancing and the like) at sub-millisecond time scales, but that can also enable fast scaling of network functions implementing the controls to follow the dynamic evolution of the network traffic and of the availability of resources in a multi-tenant environment.



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI
INGEGNERIA DELL'ENERGIA ELETTRICA
E DELL'INFORMAZIONE "GUGLIELMO MARCONI"

Machine Learning, Tecniche di Controllo e Ottimizzazione per Reti Auto-Organizzanti

Piano delle attività e progetto di ricerca

L'avvento della quinta generazione radiomobile (5G) e il progredire della sua evoluzione verso il 6G hanno evidenziato, oltre ai progressi nel segmento *wireless*, una crescente integrazione tra quest'ultimo e la rete fissa (sia nell'accesso che nel *backhaul*), in uno sforzo senza precedenti per fornire reali servizi *end-to-end* ad un insieme differenziato di applicazioni verticali, molte delle quali basate sul concetto di Internet delle Cose (*Internet of Things* – IoT).

In linea con questa visione, comunicazione e calcolo sono più frequentemente interallacciati e la potenza di calcolo è maggiormente distribuita, da *datacenter* remoti nel *cloud* fino a *micro-datacenter* ai bordi della rete. Applicazioni *cloud-native* basate su microservizi, *Mobile Edge Computing* (MEC), *Network Functions Virtualization* (NFV) e *Software Defined Networking* (SDN) sono gli elementi architetturali e tecnologici a supporto di questa evoluzione.

Sia il Piano Dati che i Piani di Controllo e Gestione della rete sono profondamente influenzati da questa integrazione. Come evidenziato in visioni di scenario molto recenti, la composizione e l'orchestrazione automatizzate di servizi, unitamente a reti "auto-organizzanti" – eventualmente arricchite con meccanismi di analisi dei dati e tecniche di Intelligenza Artificiale / *Machine Learning* (AI/ML) – giocheranno un ruolo sempre crescente. Si può in effetti prevedere che la visione tradizionale di Piano di Gestione e di Controllo interagenti ma separati sia destinata a convergere verso un paradigma architetturale maggiormente integrato, dove molteplici cicli di controllo a scale temporali diverse dovrebbero favorire un comportamento operativo auto-organizzante nella allocazione dinamica delle risorse di rete.

In questo contesto, il programma di ricerca avrà lo scopo di investigare i ruoli reciproci e l'interazione di meccanismi di controllo e ottimizzazione con tecniche ML, sia basati su modelli che *model-free*. Gli approcci ML "puri" usano l'ottimizzazione parametrica di funzioni parametrizzate a struttura fissata (*Fixed Structure Parametrized* – FSP) per cercare di risolvere problemi di decisione su processi di Markov attraverso l'approssimazione di politiche di controllo (ovvero, funzioni che fanno corrispondere osservazioni a decisioni) unicamente attraverso l'osservazione di dati generati dal sistema reale. D'altro canto, tecniche di controllo basate su modelli del sistema assumono una qualche conoscenza della dinamica del sistema stesso e cercano di sintetizzare leggi di controllo che sfruttino tale conoscenza strutturale. I due approcci non sono mutuamente esclusivi, e tecniche ML possono sempre essere usate nel secondo caso per l'approssimazione funzionale delle politiche di controllo e per l'adattamento dei parametri del modello. Particolare attenzione verrà posta nel ricercare politiche in grado non solo di agire su fenomeni appartenenti al Piano Dati (quali elaborazione di flussi e pacchetti, instradamento, bilanciamento del carico e simili) su scale temporali inferiori al millisecondo, ma che siano anche in grado di gestire con analogia rapidità di risposta la scalabilità di funzioni di rete che realizzano i controlli in grado di seguire l'evoluzione dinamica del traffico e la disponibilità delle risorse in un ambiente con diversi attori (*multi-tenant*).