



**Università degli Studi  
di Bergamo**

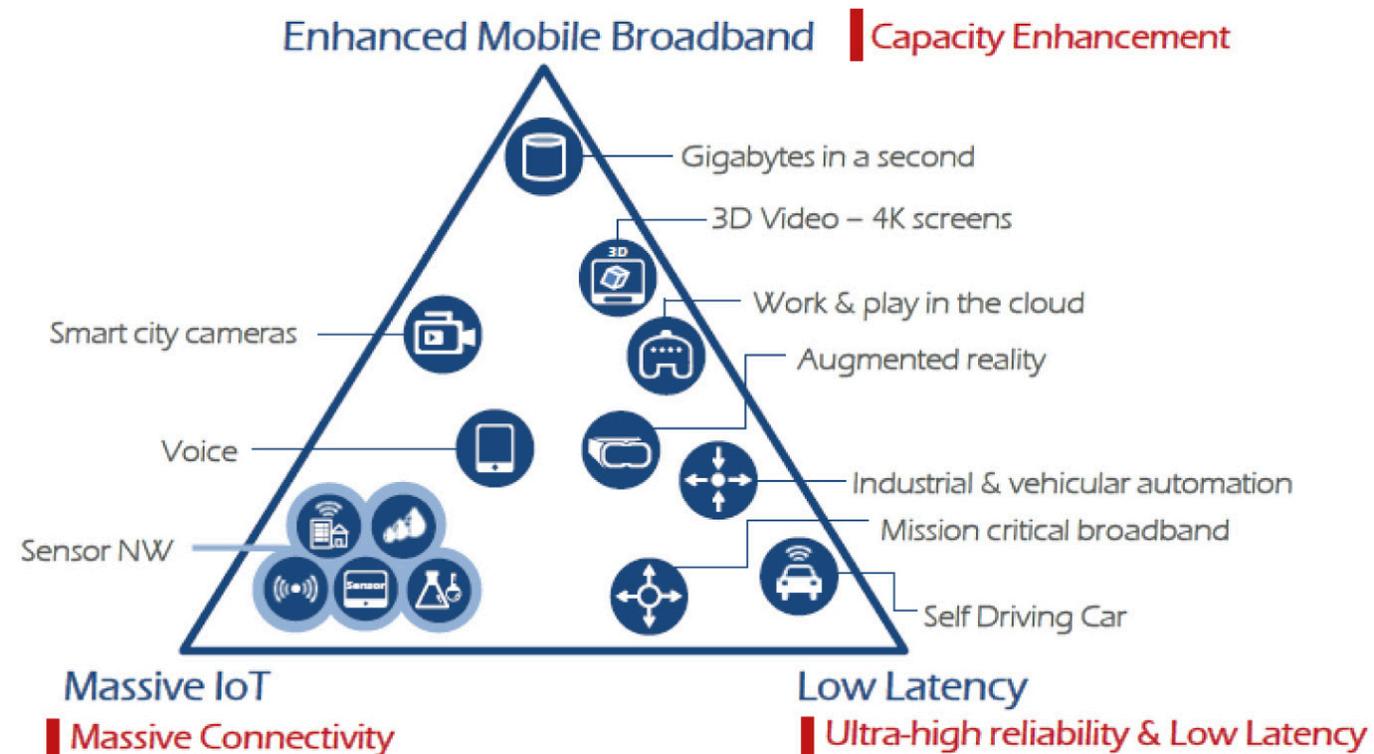
Dipartimento di Ingegneria  
Gestionale, dell'Informazione e  
della Produzione

# 5G – Tecnologie e Prospettive

Fabio Martignon

# 5G - Introduzione

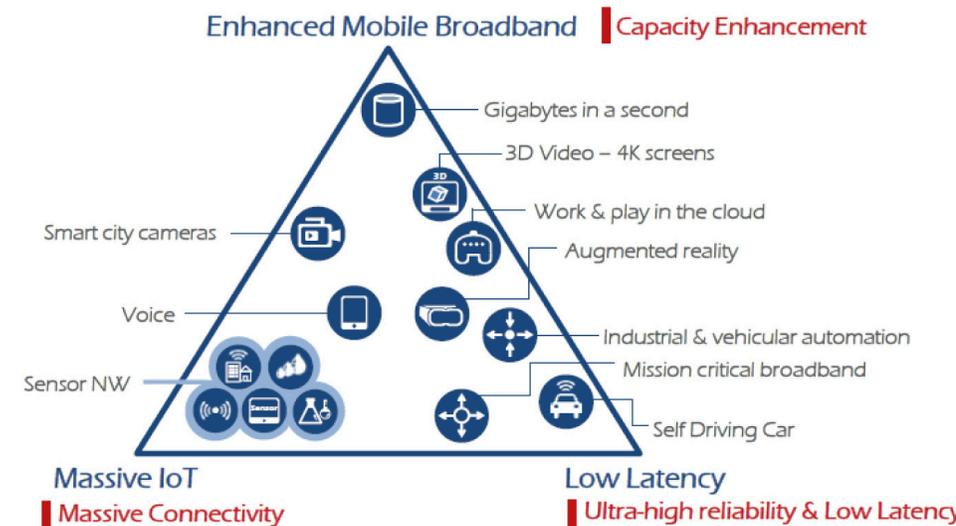
- 5<sup>a</sup> generazione di reti radiomobili (cellulari)
- Notevole evoluzione rispetto agli standard precedenti (4G e predecessori)
- Triangolo ITU



# 5G – Direzioni di sviluppo

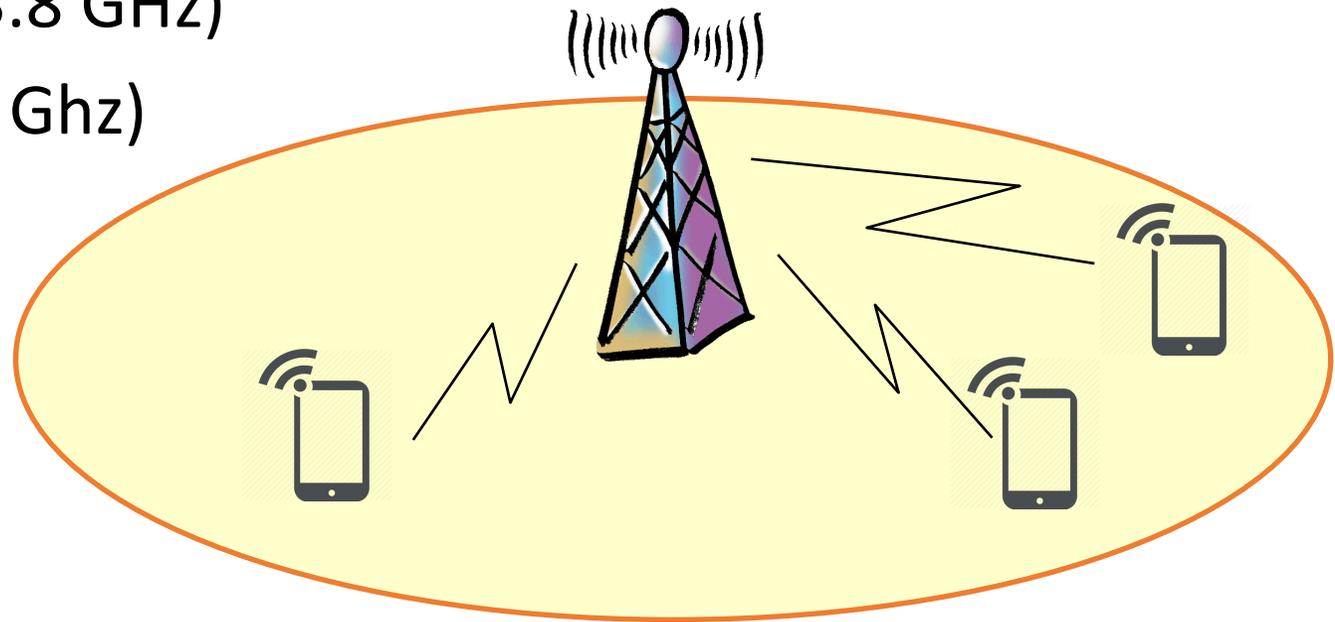
- Tre direzioni di sviluppo:

- 1) Incremento **capacità** della rete (fino a 10 Gbit/s) (*enhanced Mobile Broad Band – eMBB*),
- 2) Incremento **affidabilità** e riduzione **delay (latency)** – dell'ordine di 1-2 ms (*Ultra Reliable Low Latency Communications – URLLC*)
- 3) Incremento notevole **numero/densità** oggetti connessi e connessioni (smart sensors etc, fino a – 1 mln di dispositivi per km<sup>2</sup> – (*massive Machine Type Communications – mMTC*).



# 5G – Spettro di frequenze

- Tipologie di celle caratterizzate da:
  - 1) *Low frequency* – 700 MHz
  - 2) *High-frequency* (3.4 – 3.8 GHz)
  - 3) *Onde millimetriche* (26 Ghz)



# Onde millimetriche

- + Enorme quantità di banda poco o non utilizzata in questa porzione dello spettro elettromagnetico
- + Grandi vantaggi in termini di riuso frequenziale e banda disponibile. Molto utile per il servizio eMBB (10 Gbit/s o 10 Mbps/m<sup>2</sup>).
- + Utilizzo in particolare nella rete di *accesso* (tra Utenti e Base Stations)
- + Antenne di dimensioni molto compatte (vantaggioso per densificare le celle in ambito urbano)
- Tuttavia: non penetrano all'interno di edifici (o ostacoli). Sono molto disturbate da pioggia e foglie.

# 5G – Applicazioni



# 5G – Applicazioni

- 1) Realtà aumentata (augmented reality)
- 2) Comunicazioni tra veicoli e con l'infrastruttura di trasporto (V2V communications, supporto a *autonomous driving* etc.)
- 3) Monitoraggio ambientale e "Smart cities"
- 4) Eventi a larga scala (stadi etc.)
- 5) Connessioni residenziale, smart energy
- 6) ...

# 5G - Scenari di utilizzo

- **Enhanced Mobile Broadband (eMBB):** per coprire centri urbani densamente abitati con velocità in *downlink* vicine a 1 Gbps *indoor*, e 300 Mbps *outdoor*.
- **Ultra-Reliable and Low Latency Communications (URLLC):** per comunicazioni critiche dove la banda non è così importante rispetto all'*affidabilità* e al *ritardo* – in particolare, applicazioni con latenza end-to-end (E2E) di 1 ms o inferiore
- **Massive Machine Type Communications (mMTC):** 5G permette un incremento di 1000X degli oggetti/devices connessi alla Rete.
  - Si passa da 1k device per km<sup>2</sup> nel 4G ---> 1M device in 5G

# 5G – Tecnologia abilitanti (esempi)

- Mobile Edge Computing
- Network Slicing
- Multi Connectivity

Necessaria la loro integrazione

# 5G – Necessità dell'Edge Computing

- eMBB: aumentare la velocità dell'interfaccia radio non basta. I **contenuti** devono essere **vicini** agli utenti per permettere download rate elevati e evitare congestione.
- URLLC: ridurre la latenza non basta. Bisogna eseguire i **servizi** vicino agli utenti per *garantire* una latenza E2E *ridotta*.
- mMTC: al crescere del numero di device connessi, è necessario **processare** il traffico di segnalazione e dati ai *bordi* (edge) della rete per ridurre il volume di informazione generata dell'enorme numero di oggetti connessi.

# Edge Computing – esempi installazioni



- **On Premise:** Aziende che utilizzano reti 4G/5G private per avere un Network Core all'interno della loro infrastruttura connesso a applicazioni business
- **RAN/Base station:** alcuni operatori stanno installando infrastrutture co-locate con le RAN nelle strade, usando Cabinets/Mini Datacenters (si veda Figure sopra, 5GCity/Vapor.io )
- **Central Offices (COs):** COs sono all'edge della rete del Cloud Service Provider (CSP), che serve come punto di aggregazione per traffico fisso e mobile da e per gli end-user. Tutto il traffico è aggregato al CO, creando un collo di bottiglia

# Network Slicing

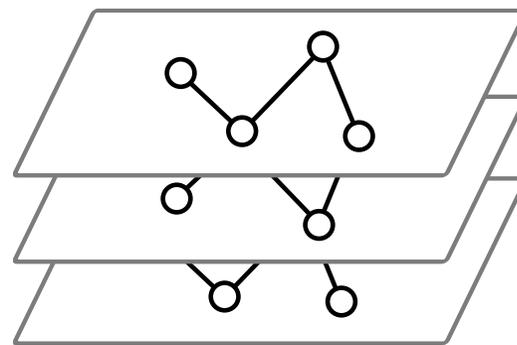
- Network Slicing: la rete *fisica* viene suddivisa in tante reti *logiche* (*slice*) tra loro *isolate*, che ospitano applicazioni con specifici requisiti (latenza etc.)

Smartphones (Mobile broadband slice)

Autonomous driving

Massive IoT

Altri slices

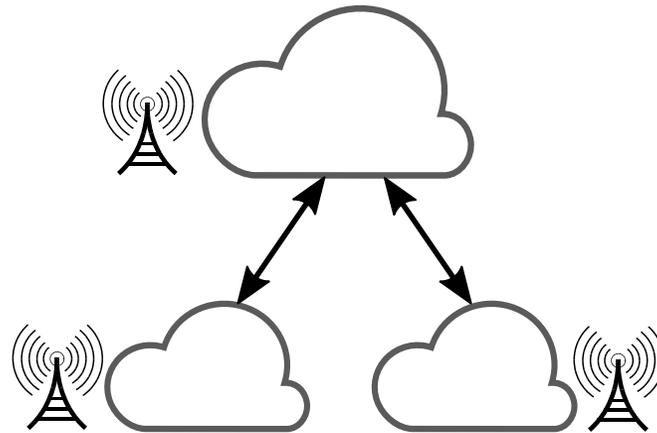


...



# Mobile Edge Computing

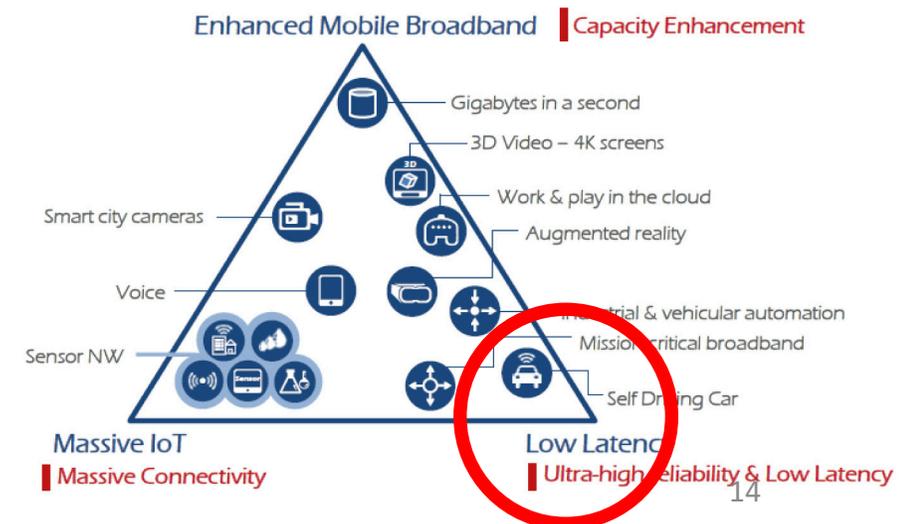
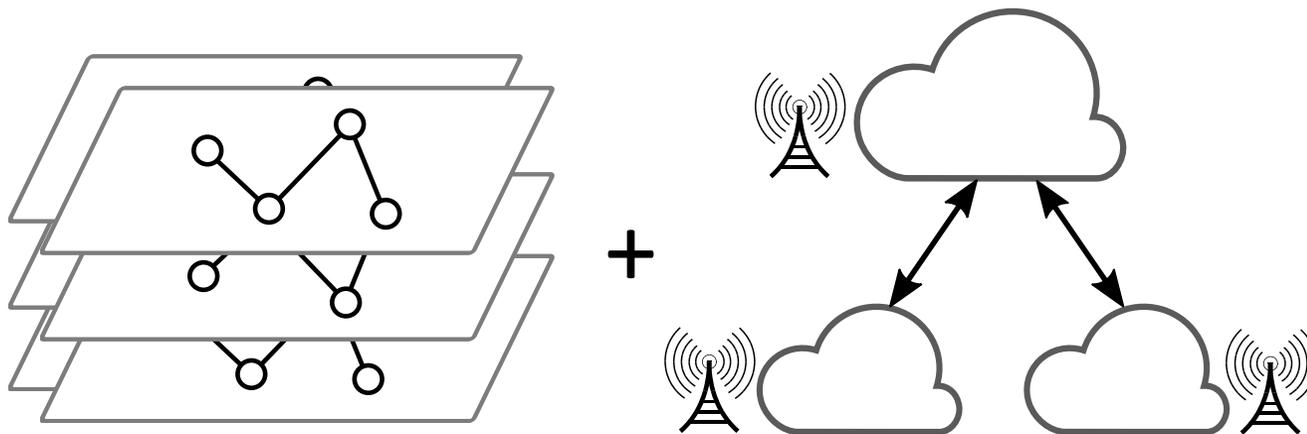
- Mobile (Multi-Access) Edge Computing (*MEC*): fornisce un'infrastruttura e servizi IT, oltre a capacità di cloud computing, al bordo (*edge*) della rete



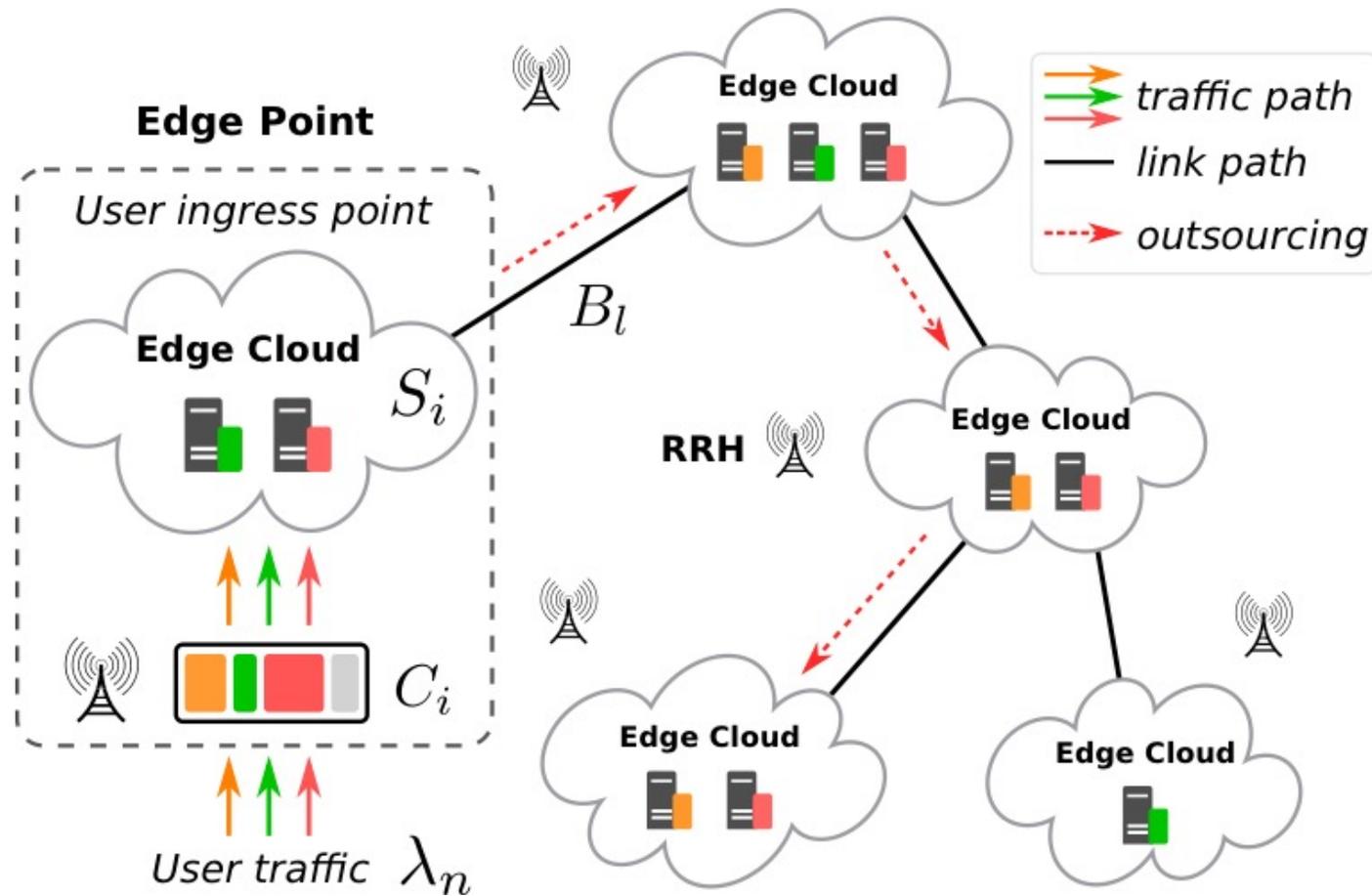
# Network Slicing + MEC

- Combinando MEC e Network Slicing, è possibile garantire I requisiti stringenti richiesti di latenza dei servizi critici
- E garantire allo stesso tempo un efficiente utilizzo della rete

Ad esempio: per autonomous driving: < 1ms



# Network Slicing + MEC: Architettura di rete



# Network Slicing + MEC: Ottimizzazione

$\mathcal{P}0$ :

$$\min_{c_n, b_{n,i}, \alpha_{n,i}, \beta_{n,i}} \sum_{n \in \mathcal{N}} \left\{ T_n^{Network} + \max_{i \in \mathcal{E}} \left\{ T_{n,i}^{Processing} + T_{n,i}^{Link} \right\} \right\},$$

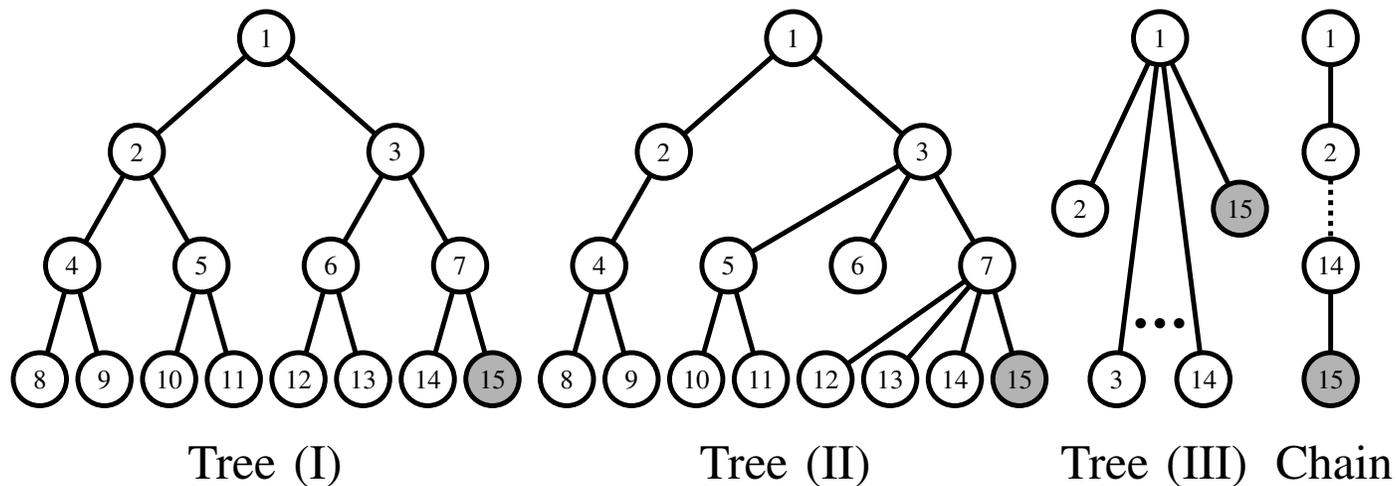
s.t. Tolerable latency for each traffic type ( $\tau_n, n \in \mathcal{N}$ ),  
Wireless network capacity ( $C_i, i = \text{ingress}$ ),  
Computation capacity of each node ( $S_i, i \in \mathcal{E}$ ),  
Link capacity ( $B_l, l \in \mathcal{L}$ ).

## Decision variables:

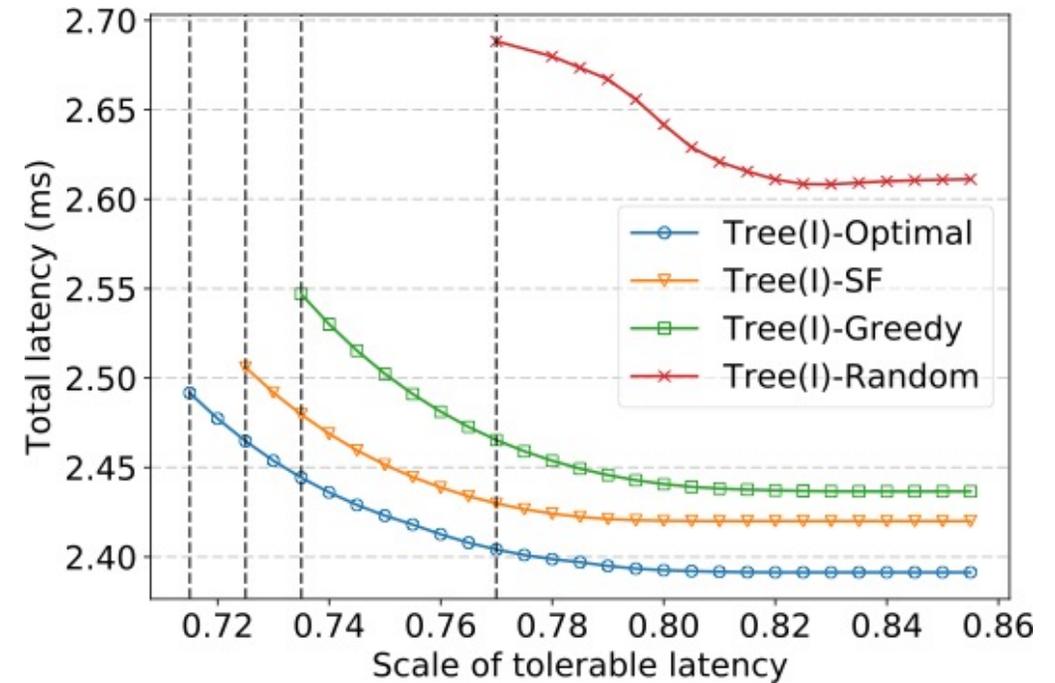
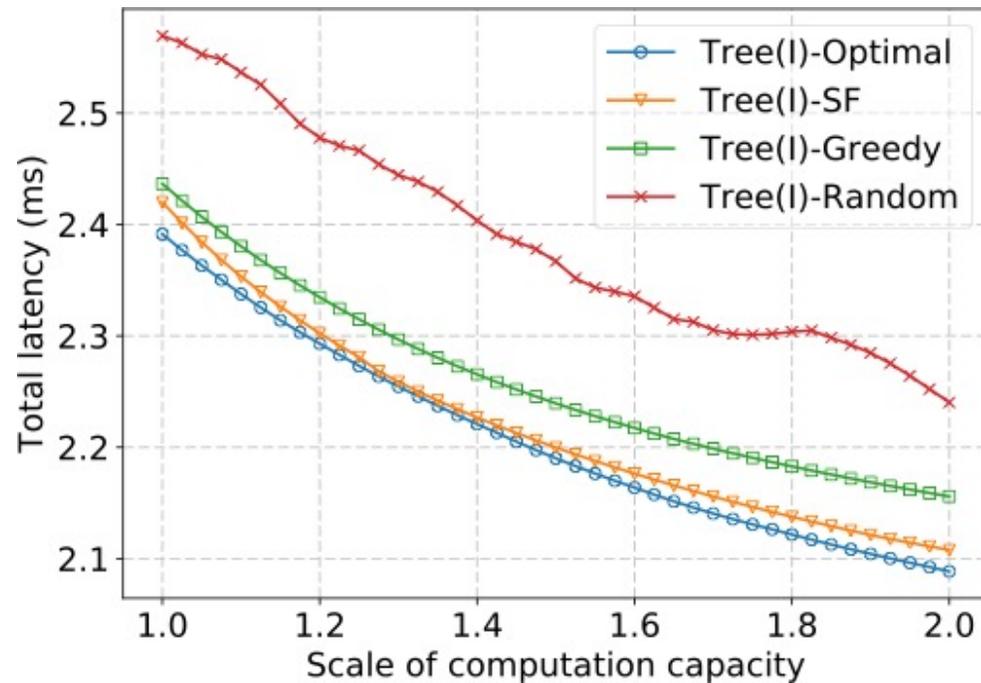
- $c_n$ : Slice of the network capacity  $C$  for traffic type  $n \in \mathcal{N}$
- $b_{n,i}$ : Indicator of whether traffic  $n \in \mathcal{N}$  is processed on node  $i \in \mathcal{E}$
- $\alpha_{n,i}$ : Percentage of traffic  $n \in \mathcal{N}$  processed on node  $i \in \mathcal{E}$
- $\beta_{n,i}$ : Percentage of computation capacity  $S_i, i \in \mathcal{E}$  sliced for traffic  $n \in \mathcal{N}$

# Risultati numerici – Parametri e Topologie

Parameter	Initial value	
$B_l$ (Gb/s)	72( $\times 14$ )	( $l = 1, 2, \dots, 14$ )
$C_i$ (Gb/s)	75	( $i = 15$ )
$S_i$ (Gb/s)	30( $\times 1$ ), 25( $\times 2$ ), 20( $\times 4$ ), 15( $\times 8$ )	( $i = 1, 2, \dots, 15$ )
$\lambda_n$ (Gb/s)	15, 20, 35	( $n = 1, 2, 3$ )



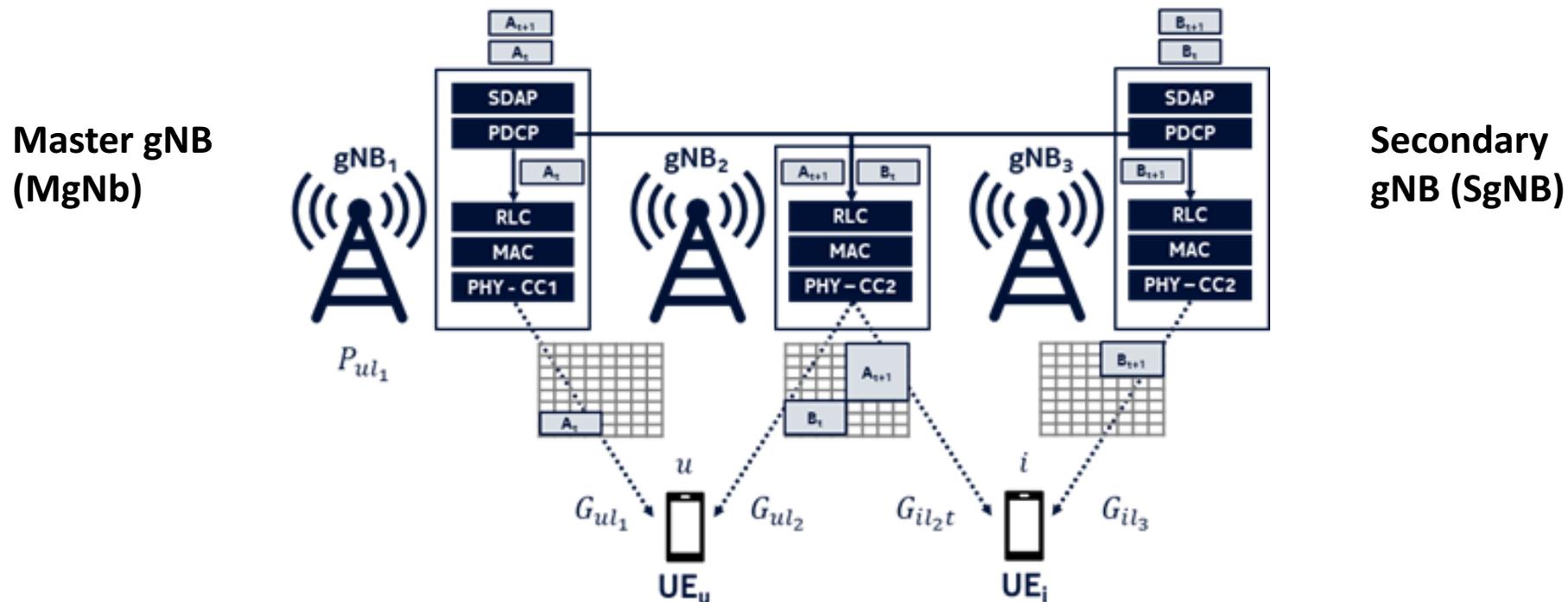
# Risultati numerici



- Algoritmi euristici, Sequential Fixing (SF) e Greedy, riescono ad ottenere soluzioni quasi ottime con un tempo di computazione molto contenuto

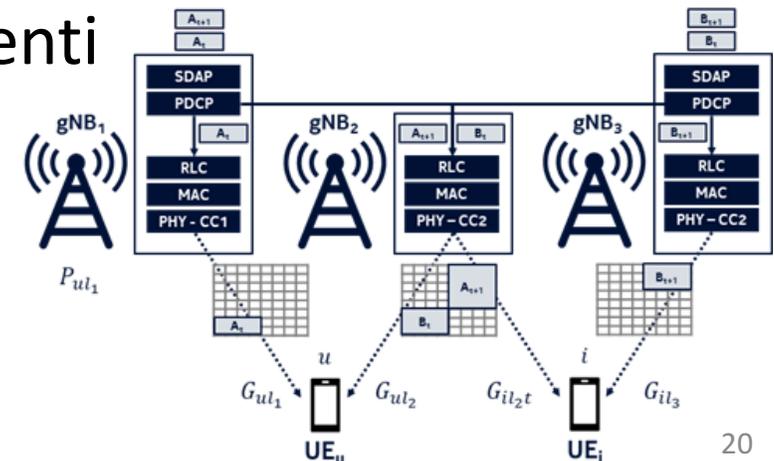
# 5G - Multi Connectivity

- Tecnologia ideata per migliorare velocità, affidabilità e latenza
- Ogni UE (User Equipment) puo' essere connesso a 2 (o più) Next-generation NodeBs (gNBs)



# 5G – Multi Connectivity

- GPP ha introdotto la tecnica detta di **Multi Connectivity (MC)** come un'architettura più flessibile all'interno dell'architettura 5G NR (*New Radio*)
- **MC**: connessioni wireless multiple possono essere utilizzare simultaneamente per **suddividere** (split) o **duplicare** traffico dati
- Trade-off: per il singolo utente, performance migliorate.  
Ma: aumento dell'interferenza per gli altri utenti



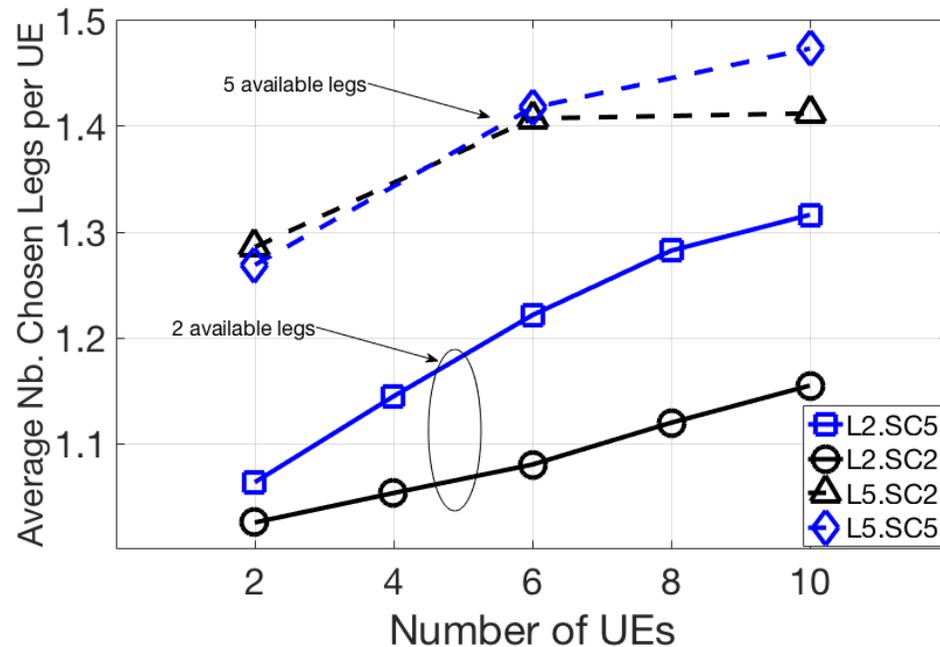
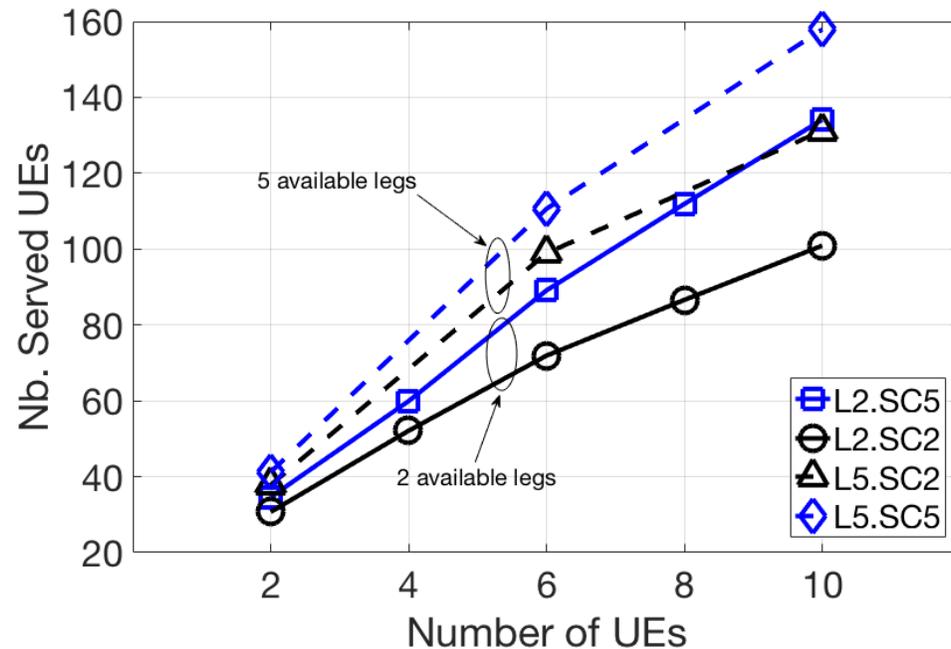
# 5G – Multi Connectivity

- Due problemi (e tecniche) distinti:
  - 1) **PDCP Split-Bearer Decision**, specifico per il servizio eMBB (enhanced Mobile Broadband)
  - 2) **PDCP Duplication Decision**, per aumentare l'affidabilità (*reliability*) delle trasmissioni dati con condizioni di canale non ottimali, come richiesto dal servizio Ultra Reliable Low Latency Communications (uRLLC)

# 5G – PDCP Split-Bearer Decision

- Problema di ottimizzazione:
  - 1) decidere quali utenti servire
  - 2) decidere se e come suddividere il traffico degli utenti ammessi su celle multiple (si parla anche di *legs*) per rispettare i requisiti di capacità richiesti

# 5G – PDCP Split-Bearer Decision (PSD)



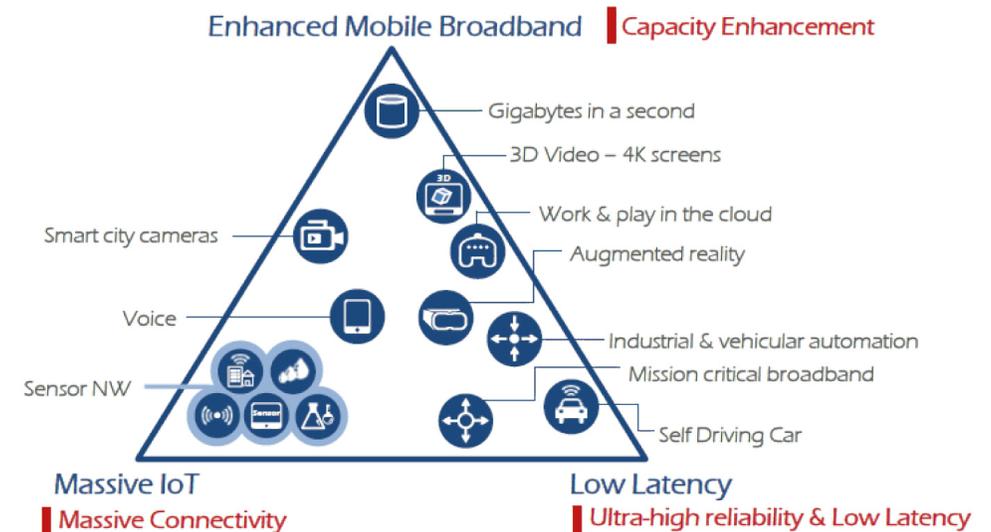
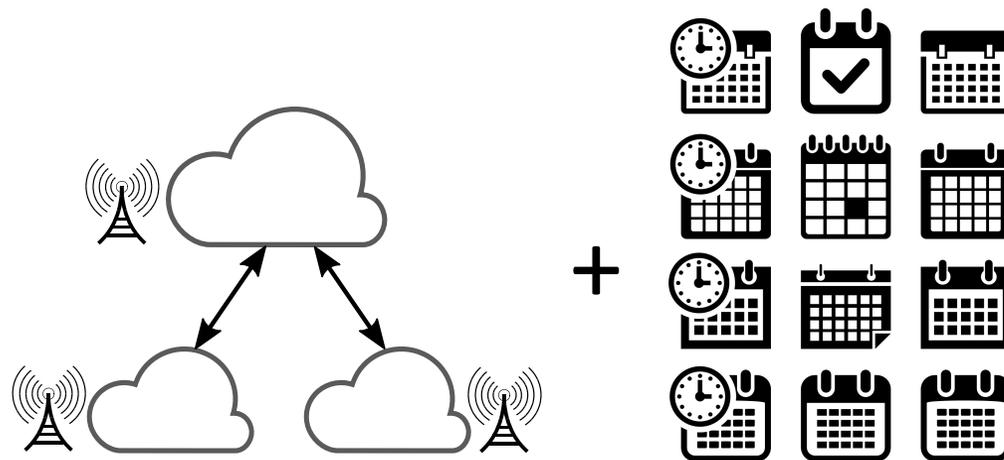
- 1) L'operatore mobile puo' ottenere risultati simili o aumentando la copertura di rete (da 2 a 5 small cell per settore) o attivando più leg (da 2 a 5)
- 2) In scenari "densi", è cruciale installare più small cells

# 5G – PDCP Duplication Decision (PDD)

- Altro problema di ottimizzazione:
  - 1) decidere, per gli utenti accettati, se duplicare il traffico su più connessioni wireless (legs)
  - 2) e, se sì, su quale sottoinsieme di *leg*
- Questo aumenta *l'affidabilità*: i canali/leg hanno diverse caratteristiche di fading temporale.
- Tuttavia: incrementare/duplicare il traffico porta a aumentare *l'interferenza* verso altri utenti. C'è quindi un trade-off tra beneficio per il singolo e performance del sistema. E' quindi necessario *ottimizzare*

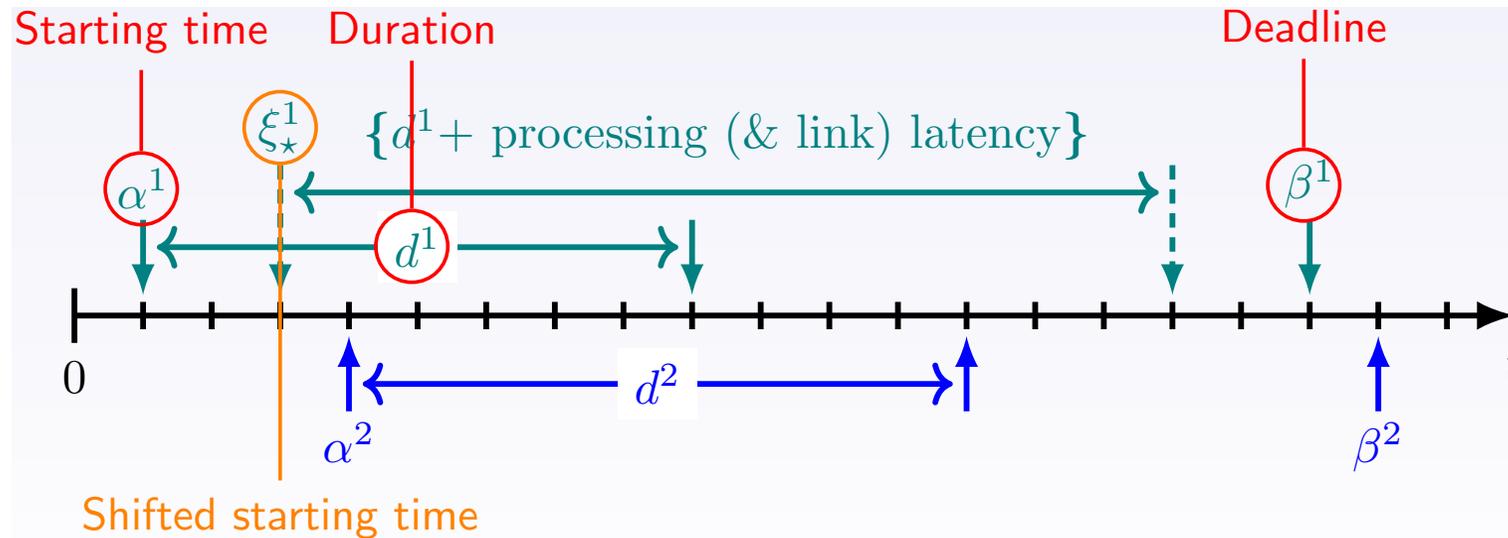
# Scheduling e Calendaring

- Fondamentali per rispettare I requisiti di qualità richiesti dalle applicazioni degli utenti.



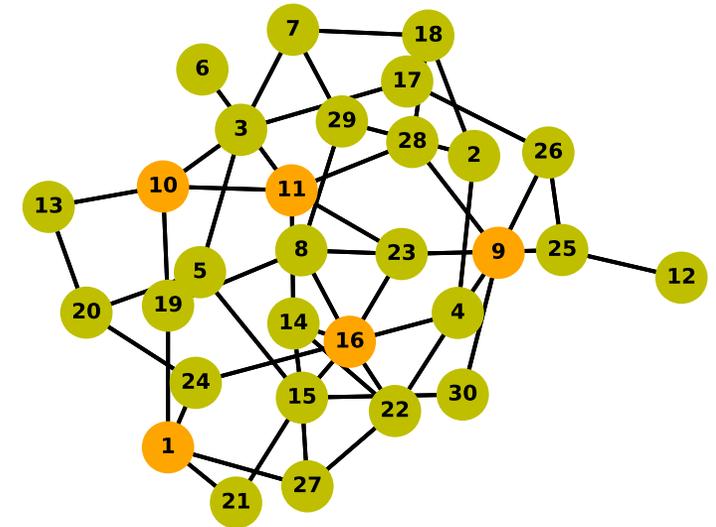
# Scheduling e Calendaring

- Si sfrutta: flessibilità delle richieste utenti in termini di istante di inizio e termine

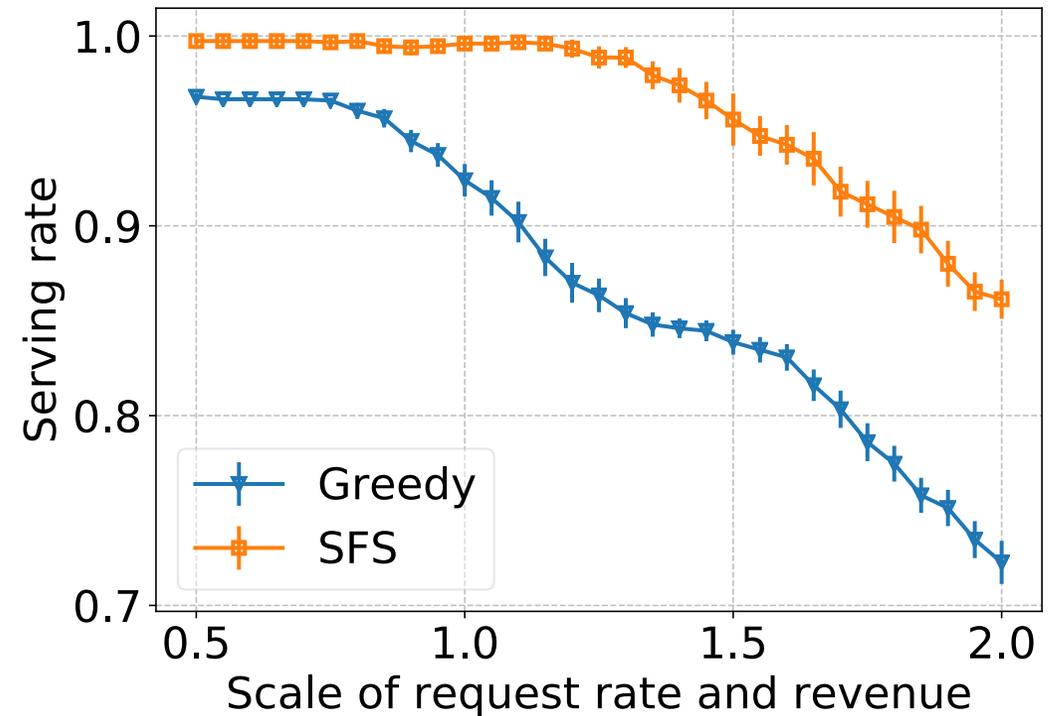
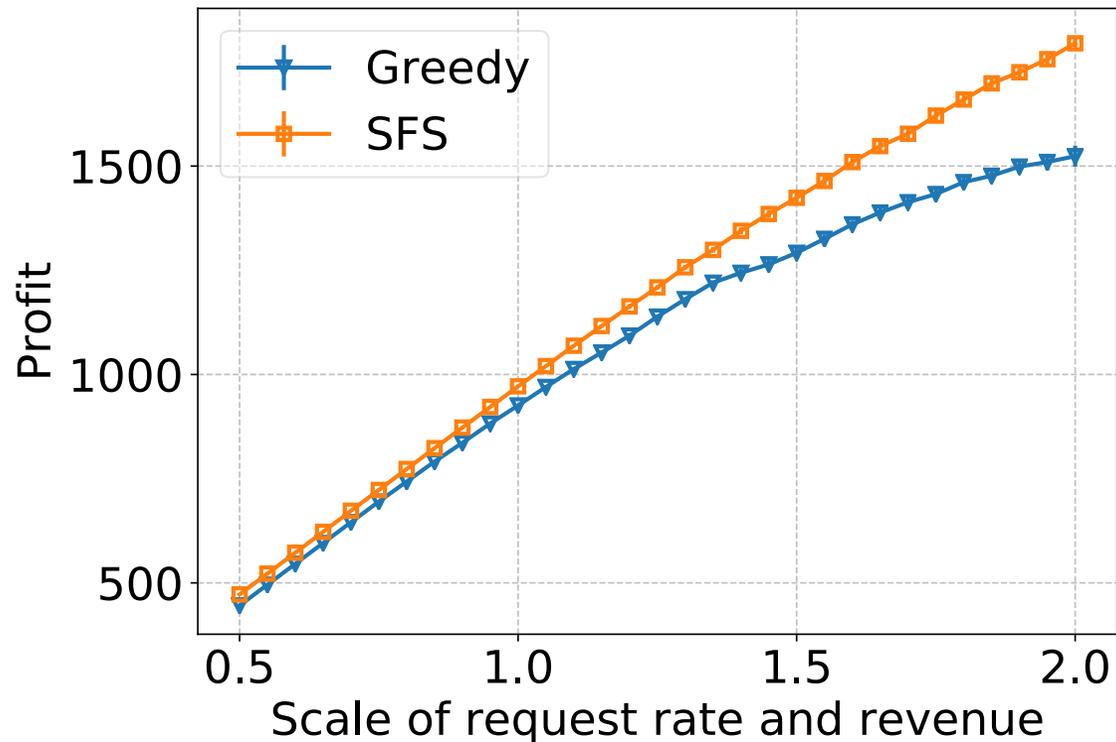


# Risorse da ottimizzare

- Problema di ottimizzazione:
  - 1) ammissione delle richieste/utenti
  - 2) scheduling/calendaring delle richieste ammesse
  - 3) decision su quali nodi servire tali richieste
  - 4) routing
  - 5) capacità di processing e storage capacity attivata su ogni nodo



# Risultati numerici



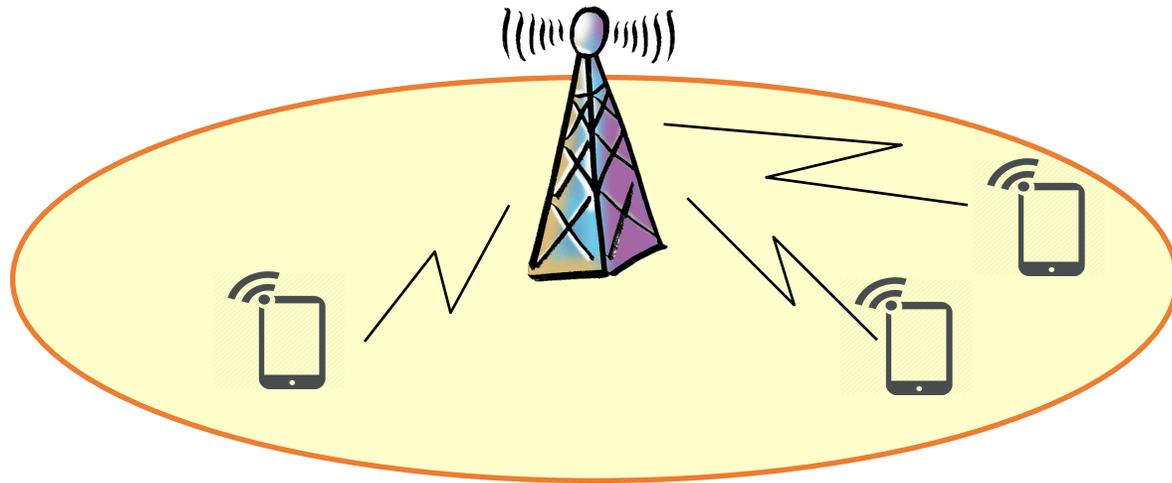
- Il *calendar*ing permette di ottenere un utilizzo più efficace/elevato delle risorse, sfruttando la flessibilità dei servizi che possono tollerare “shift” temporali senza degrado dell’utilità percepita dall’utente

# NFV e SDN

- Network Functions Virtualization (NFV)
  - Funzioni di rete eseguite in un ambiente virtualizzato, su un'infrastruttura fisica condivisa (“industry standard high volume servers, storage and switches”)
- Software Defined Networking (SDN)
  - Nuovo approccio alla programmabilità delle reti, ovvero la capacità di inizializzare, controllare, modificare e gestire dinamicamente il comportamento della rete attraverso *interfacce aperte*.
  - Esempio: per gestire il Backhaul delle reti 5G and Beyond

# Ulteriori estensioni: Beyond 5G (B5G) e 6G

- Per queste reti “Beyond-5G” e 6G, il trend di utilizzo di alte frequenze
- si estenderà (oltre alle Onde *millimetriche* - 26 Ghz) :
  - alla banda THz (252–322 GHz)
  - e fino a frequenze nell’infrarosso/visibile (*optical wireless communications*)



# NFV e SDN

- Network Functions Virtualization
- Software Defined Networking
- Esempi di (innumerevoli) applicazioni: gestione connessioni nel backhaul
- Management di backhaul per reti radio (ultra-wideband) THz. SDN consente di gestire il management ottimale di slice di rete *end-to-end*.
- *OpenFlow*.