

Verso il 6G: Architetture, Frequenze e Intelligenza Distribuita per la Rete del Futuro

ANALISI TECNICA DELLE TECNOLOGIE CHIAVE DEL 6G
MARCO CONTIN, ESAME DI COMPUTER NETWORKS

Conteggio parole:

Totale 4591

Corpo 2145

(Dal conteggio delle parole nel corpo sono state escluse: Copertina, Indice, Abstract, Titoli, Tabelle, Didascalie, Abbreviazioni, Bibliografia)

Sommario

Abstract.....	4
Introduzione	5
Frequenze, propagazione e modelli di canale	7
Schemi di modulazione, codifica ed efficienza spettrale.....	9
Interferenze, mitigazione e Massive MIMO	10
Architettura di rete, SBA e protocolli.....	11
Edge computing, AI/ML e Dynamic slicing	13
Applicazioni avanzate, visione futura e conclusioni	14
Abbreviazioni	15
Bibliografia.....	16

Abstract

Questo saggio esplora l'evoluzione del 6G come infrastruttura di comunicazione mobile di prossima generazione, andando oltre i limiti del 5G in termini di velocità, latenza e capacità. Dopo un breve raffronto tra 4G, 5G e 6G, si analizzano le nuove bande di frequenza (fino al THz), le tecniche di modulazione avanzate, il beamforming e l'impiego di MIMO massivo per mitigare le interferenze e superare le sfide della propagazione ad alte frequenze. Viene illustrata l'architettura basata sui servizi (SBA), arricchita dall'integrazione nativa di AI/ML, edge computing e Dynamic slicing per una riconfigurazione flessibile e real-time delle risorse. Si approfondiscono inoltre gli scenari applicativi futuri, come realtà estesa immersiva, telechirurgia, robotica collaborativa e telepresenza olografica. In definitiva, il 6G non rappresenta un mero incremento prestazionale, ma una piattaforma cognitiva distribuita, capace di integrare comunicazione e sensing, abilitando un'"Intelligenza di Tutto" con impatti profondi sulla società e l'economia.

KEYWORDS:

6G, SERVICE-BASED ARCHITECTURE (SBA), EDGE COMPUTING, ARTIFICIAL INTELLIGENCE (AI), MACHINE LEARNING (ML), RECONFIGURABLE INTELLIGENT SURFACE (RIS), TERAHERTZ (THz), MASSIVE MIMO, ULTRA-RELIABLE LOW LATENCY COMMUNICATIONS (URLLC), EXTENDED REALITY (XR), DYNAMIC SLICING, INTEGRATED SENSING AND COMMUNICATION (ISAC), HTTP/3, QUIC, TELEPRESENCE, HOLOGRAPHIC COMMUNICATIONS, SPECTRUM EFFICIENCY, EDGE INTELLIGENCE

Introduzione

Entro il 2030, il numero di dispositivi connessi e il volume del traffico dati globale aumenteranno di ordini di grandezza, alimentati dall'Internet of Things (IoT), da nuovi servizi immersivi e da applicazioni ad alta intensità di dati. [1] [2]

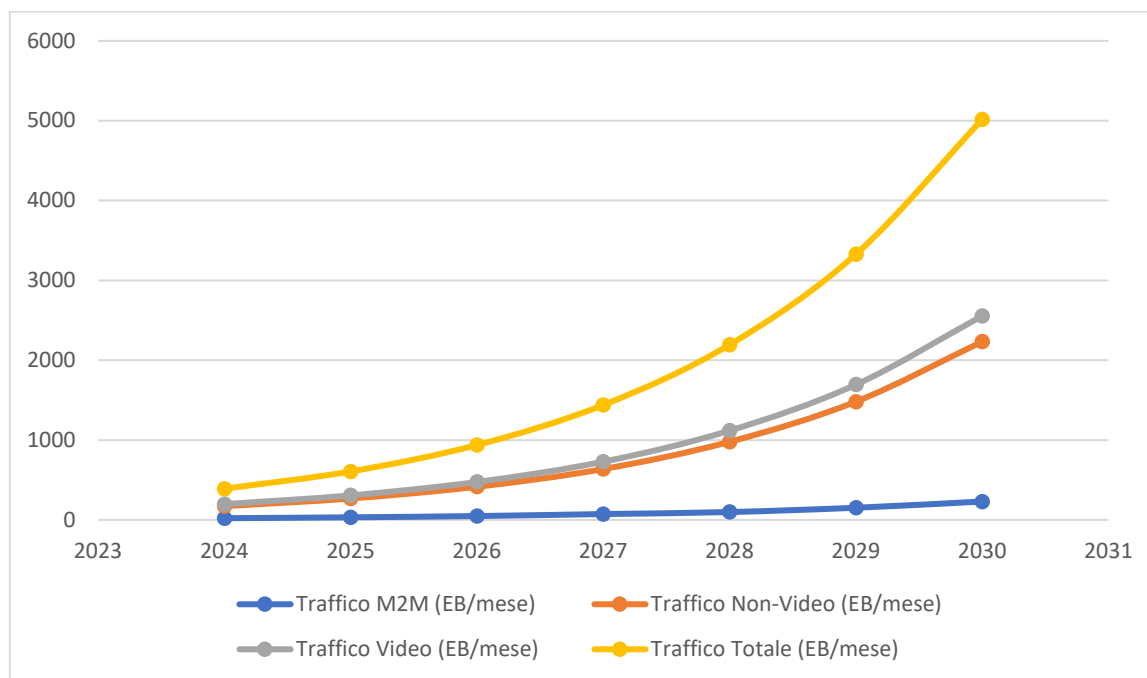


Figura 1: Grafico di crescita del traffico dati previsto al 2030 (Fonte: Report ITU.R M2730-0)

Questa crescita esponenziale evidenzia i limiti dei sistemi attuali e suggerisce la necessità di un'evoluzione tecnologica radicale. Le reti 5G, pur avendo introdotto miglioramenti significativi in termini di throughput, latenza e densità di connessioni rispetto al 4G, non saranno sufficienti a supportare appieno scenari come realtà estesa (XR) immersiva, comunicazioni olografiche, controllo industriale in tempo reale e veicoli autonomi ultra-affidabili. [3]

È in questo contesto che si colloca il 6G. Atteso per il 2030, il 6G non punta semplicemente ad incrementare le prestazioni rispetto al 5G, ma a ridefinire l'architettura di rete per integrarne ogni aspetto con intelligenza, flessibilità e sostenibilità [4] [5]. Per raggiungere velocità su scala del terabit per secondo, latenze inferiori al millisecondo, affidabilità estrema e capacità di supportare un numero massiccio di dispositivi, il 6G dovrà sfruttare nuove bande di frequenza (sub-THz e THz), tecniche di modulazione e codifica avanzate, architetture basate sui servizi (SBA) e radio access network aperte (Open RAN). [6] [7]

	4G	5G	6G
Velocità di picco per dispositivo	1 Gbps	10 Gbps	1 Tbps
Latenza end-to-end (E2E)	100 ms	10 ms	1 ms
Efficienza spettrale massima	15 bps/Hz	30 bps/Hz	100 bps/Hz
Supporto alla mobilità	Fino a 350 km/h	Fino a 500 km/h	Fino a 1000 km/h

Tabella 1: Confronto sintetico tra 4G, 5G, 6G in termini di throughput, latenza e frequenze supportate

Allo stesso tempo, il 6G si propone di abbracciare una visione olistica della connettività, puntando su inclusività digitale, sostenibilità ambientale, adattabilità dinamica della rete alle esigenze dell'utente, sicurezza olistica e intelligenza artificiale distribuita [6] [5] [8]. Attraverso l'Edge computing e l'integrazione nativa di AI/ML, sarà possibile riconfigurare le slice di rete in tempo reale, ottimizzare le risorse radio, ridurre il consumo energetico e garantire una Quality of Service (QoS) elevata per una pluralità di casi d'uso diversi. [6] [5] [9]

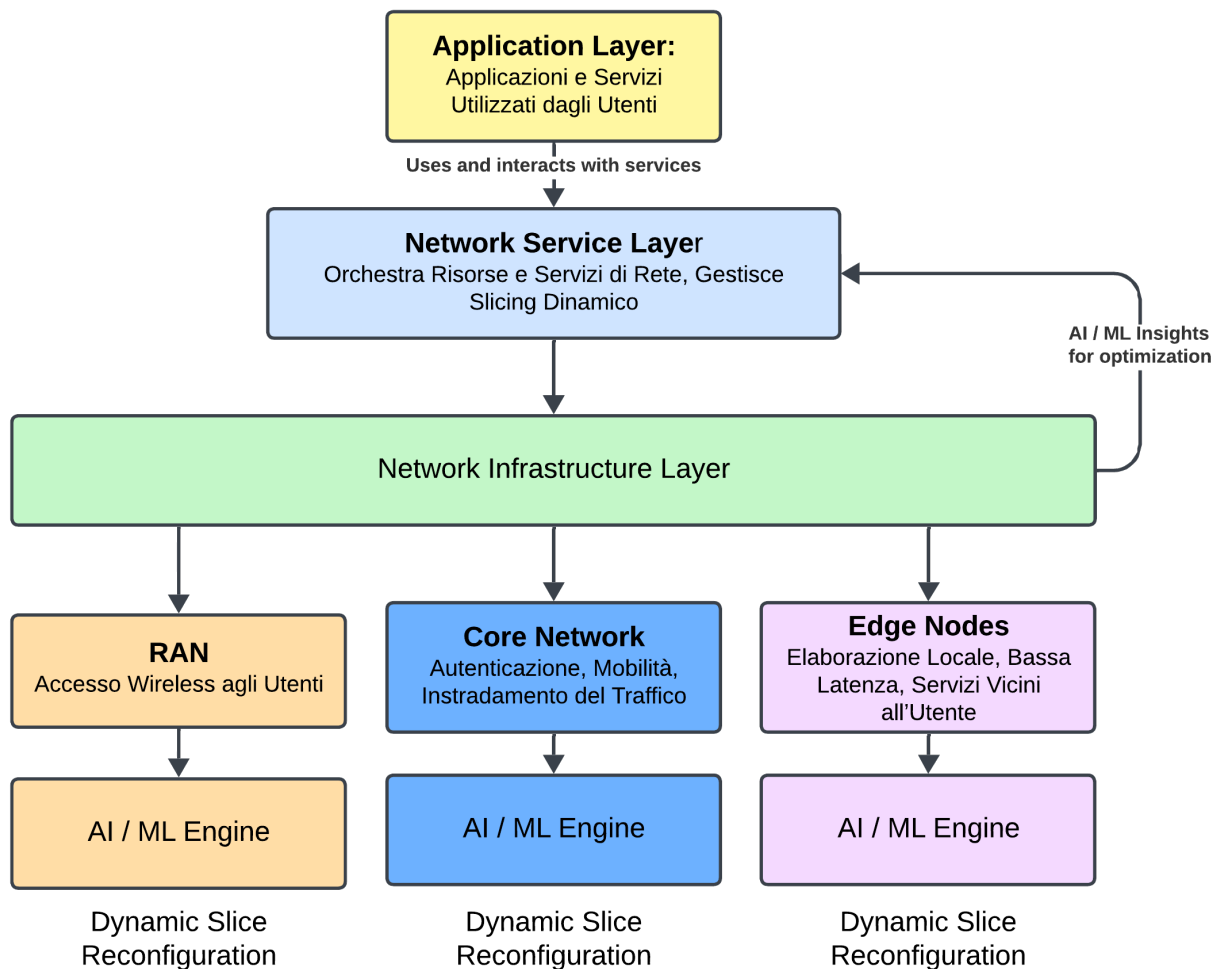


Figura 2: Diagramma a blocchi del funzionamento di una SBA con AI integrata. [2] [10]
(Elaborazione originale ispirata da fonti tecniche sul 6G)

Nei paragrafi successivi, dopo un breve richiamo alle differenze chiave tra 4G, 5G e 6G, analizzeremo gli aspetti tecnici che caratterizzano la futura infrastruttura: dall'utilizzo di frequenze estreme alle soluzioni di beamforming e massive MIMO per mitigare l'interferenza, dalle nuove forme d'onda e codici di correzione degli errori a bassa latenza, fino alla gestione intelligente e dinamica delle risorse di rete. Questo percorso ci porterà a delineare i principi cardine dell'architettura 6G, evidenziando come le sfide tecniche saranno affrontate attraverso l'innovazione ingegneristica e la convergenza tra comunicazione, elaborazione e intelligenza artificiale. [6] [5] [9] [10]

Frequenze, propagazione e modelli di canale

Nelle reti 6G, le bande sub-6 GHz (ad esempio, tra 700 MHz e 5 GHz) continueranno a fornire un'ampia copertura e un buon supporto alla mobilità, grazie alle loro favorevoli caratteristiche di propagazione su ampie distanze [9] [11] [12]. Tuttavia, per soddisfare l'enorme domanda di capacità, il 6G esplorerà frequenze molto più alte. [13]

Le bande cmWave e mmWave (fino a centinaia di GHz) offrono larghezze di banda maggiori rispetto alle frequenze più basse, incrementando notevolmente la velocità di trasmissione. Il 5G utilizza già porzioni di mmWave e il 6G si spingerà ancora più avanti, verso le bande sub-THz (92-300 GHz) e THz (0,1-10 THz) [14] [11] [15]. Queste ultime consentiranno throughput nell'ordine dei terabit al secondo, abilitando applicazioni come telepresenza olografica e comunicazioni sensoriali avanzate [16] [17] [5].

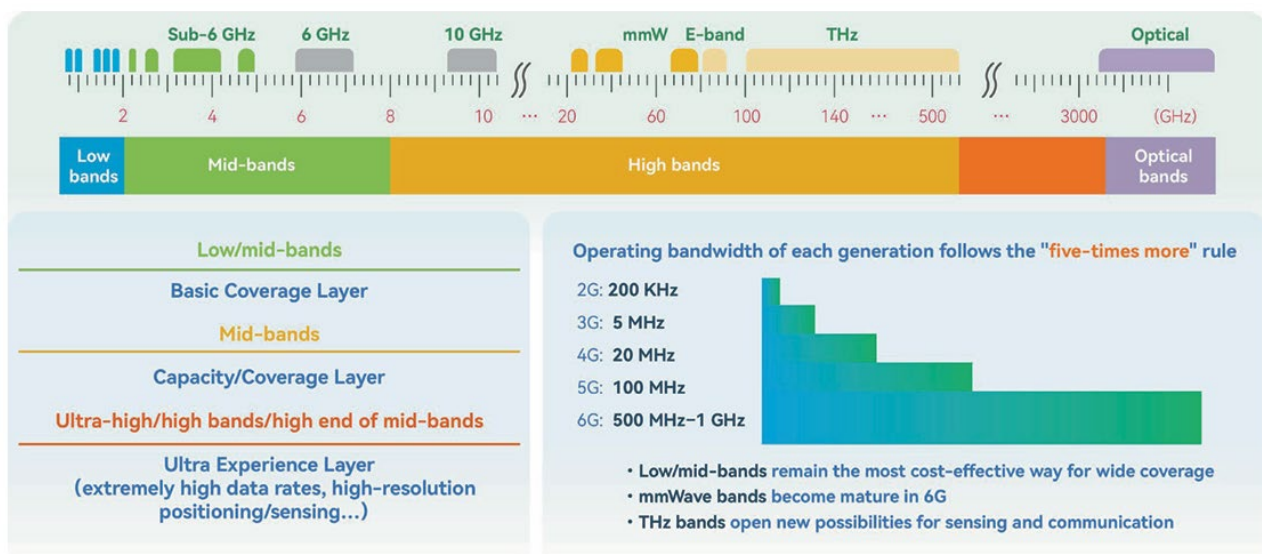


Figura 3: Panoramica multilayer dello spettro di frequenze per il 6G, dalle bande sub-6 GHz fino al THz. Le diverse bande forniscono strati di copertura, capacità e servizi, con le frequenze più elevate (mmWave, THz) che aprono la strada a scenari di sensing, posizionamento ad alta risoluzione e servizi ultra-immersivi. (Fonte: Fig. 12 "6G: The Next Horizon", Huawei, 2021)

La sfida principale alle frequenze più elevate risiede nella propagazione del segnale. L'elevato path loss, l'attenuazione atmosferica (dovuta in particolare all'assorbimento da parte di vapore acqueo e ossigeno) e la forte dipendenza dalla linea di vista (LOS) limitano la portata del segnale [17] [18] [19]. Ostacoli come muri o vegetazione possono interrompere bruscamente la connessione [19] [17], rendendo indispensabile l'impiego di tecniche avanzate per garantire copertura e affidabilità. [17] [20]

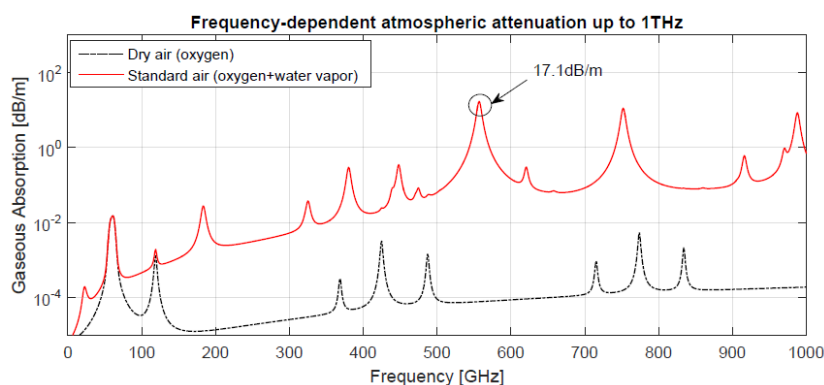


Figura 4: Assorbimento atmosferico in funzione della frequenza (1 GHz - 1 THz) nelle condizioni di aria secca (ossigeno) e aria standard (ossigeno + vapore acqueo). Si evidenziano i picchi di attenuazione, come quello massimo a 560 GHz causato dal vapore acqueo. (Fonte: Fig. 4 "Terahertz Communications and Sensing for 6G and Beyond: A Comprehensive Review", IEEE, 2024).

Banda	Gamma di frequenza	Caratteristiche	Vantaggi	Svantaggi	Applicazioni tipiche
Sub-6 GHz	700 MHz-5GHz	Ampia copertura, buona penetrazione degli ostacoli	Supporto alla mobilità, connessioni stabili	Capacità limitata rispetto a bande superiori	Comunicazioni mobili tradizionali, aree rurali
cmWave e mmWave	Fino a centinaia di GHz	Larghezza di banda maggiore, velocità elevate	Ideale per migliorare la capacità di rete	Suscettibile all'attenuazione e necessita di LOS	Scenari urbani ad alta densità, hotspot
Sub-THz	92GHz-300GHz	Elevata capacità di throughput nell'ordine dei terabit/s	Perfetto per applicazioni avanzate	Portata limitata, elevato assorbimento atmosferico	Sensori di prossimità, comunicazioni ad alta velocità
THz	0,1-10THz	Supporta velocità superiori al terabit/s	Abilita applicazioni futuristiche	Elevate sfide di propagazione, dispersione	Applicazioni industriali critiche, comunicazioni sensoriali

Per mitigare questi problemi, le reti 6G sfrutteranno intensamente beamforming direzionale e massive MIMO, ossia l'uso di array di numerose antenne per focalizzare l'energia del segnale e massimizzare il guadagno di antenna. Come illustrato in figura 5, le superfici intelligenti riconfigurabili (RIS) aiuteranno inoltre a deviare il segnale attorno agli ostacoli, creando percorsi alternativi virtuali e migliorando la copertura [5] [10] [18].

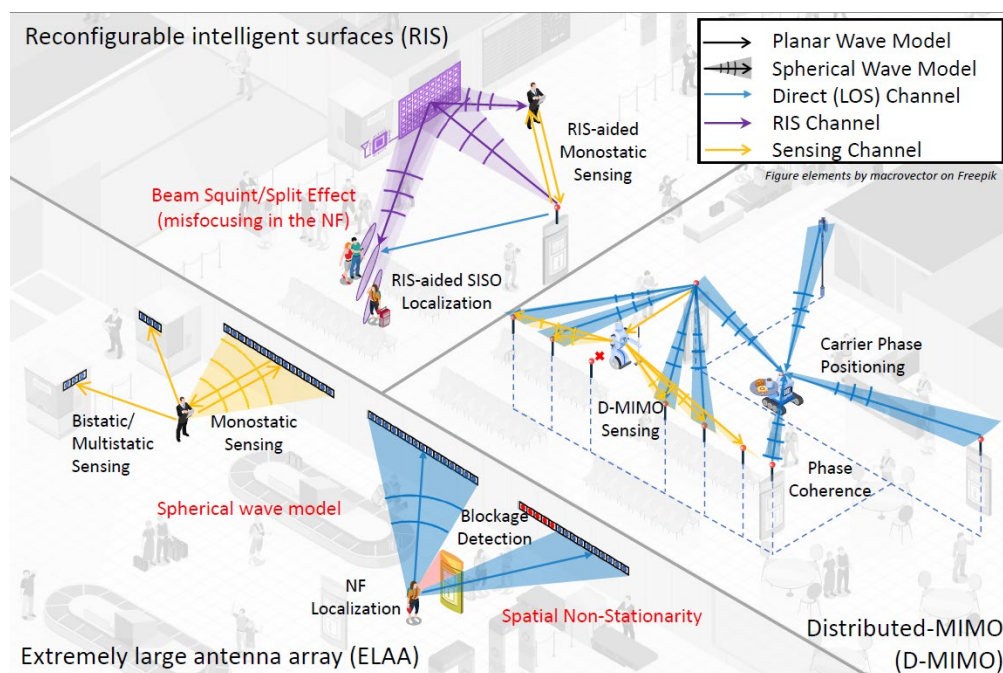


Figura 5: Utilizzo di superfici intelligenti riconfigurabili (RIS) e architetture antennali avanzate per migliorare la propagazione del segnale, superare blocchi e ostacoli, e fornire funzionalità di sensing e localizzazione in ambienti complessi. (Fonte: Fig.1 “6G Localization and Sensing in the Near Field: Features, Opportunities, and Challenges” IEEE Wireless Communications, 2023)

Infine, la progettazione di sistemi 6G richiede modelli di canale accurati per le bande THz. Questi modelli devono tenere conto di elevata perdita di percorso, assorbimento molecolare, fenomeni di dispersione e ambienti dinamici. Una caratterizzazione realistica del canale è essenziale per definire approcci operativi ottimali di codifica, modulazione, beamforming e per quantificare l'efficacia complessiva delle prestazioni delle reti 6G a frequenze estreme. [21] [17] [5]

Schemi di modulazione, codifica ed efficienza spettrale

Per raggiungere le ambiziose prestazioni del 6G, sarà necessario adottare schemi di modulazione e codifica più evoluti rispetto al 5G, in grado di incrementare significativamente l'efficienza spettrale e garantire una trasmissione dati più affidabile e robusta [5] [22] [2] [10].

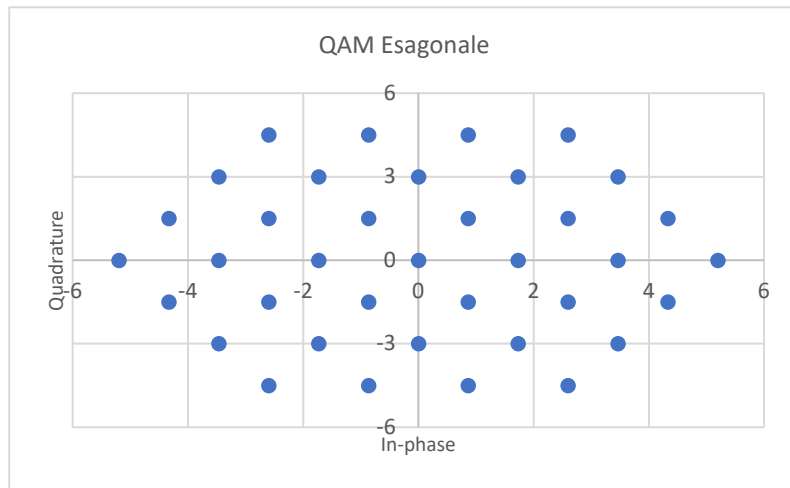


Figura 6 :Esemplificazione QAM Esagonale
(Elaborazione originale ispirata da fonti tecniche sul 6G)

Sul fronte della modulazione, l'uso di **QAM ad alto ordine** (fino a 4096-QAM) consentirà di trasmettere un numero maggiore di bit per simbolo, incrementando la capacità del canale [5]. Mentre il 5G già impiega costellazioni fino a 1024-QAM, il 6G spingerà oltre questa soglia, a patto di disporre di condizioni di canale adeguate e hardware sufficientemente lineare [3] [5]. Inoltre, si stanno esplorando costellazioni a geometrie differenti, come la QAM esagonale, che promette un impacchettamento più efficiente dei punti della costellazione, migliorando il rapporto

segnale/rumore [5]. Un altro approccio è la Probabilistic Shaping, che modula la probabilità di trasmissione dei punti della costellazione per ottimizzare l'efficienza energetica, trasmettendo i punti più lontani dal centro meno frequentemente [5].

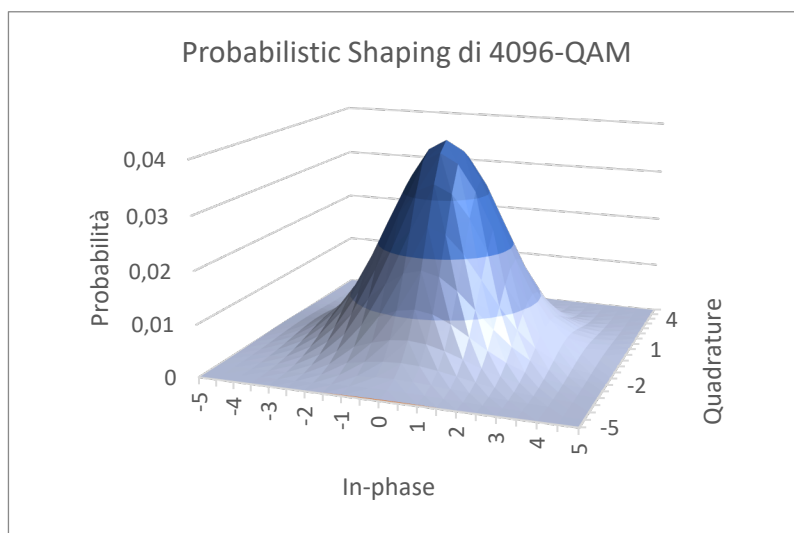


Figura 7: Rappresentazione tridimensionale della Probabilistic Shaping in una costellazione 4096-QAM. Il grafico illustra come la probabilità di trasmettere i punti più esterni sia ridotta, ottimizzando l'efficienza energetica e migliorando il rapporto segnale/rumore complessivo. (Elaborazione originale ispirata da fonti tecniche sul 6G)

Per quanto riguarda la codifica di canale, tecniche come i **codici LDPC** e i **codici polari** saranno fondamentali per ridurre gli errori e avvicinarsi ai limiti teorici della capacità del canale [6] [10] [5]. I codici LDPC, già utilizzati per canali dati nel 5G, offrono eccellenti prestazioni in scenari ad alta velocità, mentre i codici polari, noti per la loro bassa complessità, sono adatti anche per blocchi di lunghezza ridotta e scenari URLLC, dove affidabilità e latenza ultra Bassa sono essenziali [10] [5].

L'obiettivo chiave è migliorare l'efficienza spettrale, passando dai circa 30 bps/Hz tipici del 5G a potenzialmente 90 bps/Hz nel 6G [10]

[5]. Questa triplicazione dell'efficienza spettrale richiede di combinare modulazioni ad alta densità, codifiche avanzate e ottimizzazioni basate su AI/ML [6] [5] [2]. Tali progressi permetteranno di ridurre gli errori, limitare le ritrasmissioni, abbassare la latenza e massimizzare la capacità, supportando così un'ampia gamma di servizi e applicazioni future [6] [10] [23] [5].

Interferenze, mitigazione e Massive MIMO

Alle frequenze elevate del 6G, come le bande mmWave e THz, diversi tipi di interferenza possono compromettere l'affidabilità e il throughput della rete [18] [5] [24]. L'interferenza inter-blocco (IBI) si manifesta quando la potenza si disperde in bande di frequenza adiacenti, scenario comune nei sistemi multibanda [19] [5]. Inoltre, in contesti multiutente, segnali destinati a dispositivi differenti possono interferire tra loro, mentre l'auto-interferenza è particolarmente rilevante nei sistemi full-duplex, dove trasmissione e ricezione avvengono simultaneamente nella stessa banda [5] [3] [10].

Per superare tali ostacoli, il 6G impiegherà una serie di tecniche avanzate. Il massive MIMO utilizzerà array di numerose antenne per creare fasci altamente direzionali, focalizzando l'energia del segnale verso i destinatari previsti [5] [14] [19] [3]. Ciò riduce l'interferenza tra gli utenti e migliora la sicurezza fisica sfruttando il beamforming selettivo [24] [3]. L'orientamento dinamico dei fasci (beam steering) si adatterà all'ambiente e alle condizioni del canale, garantendo che l'energia non venga dispersa verso aree non desiderate [12] [24].

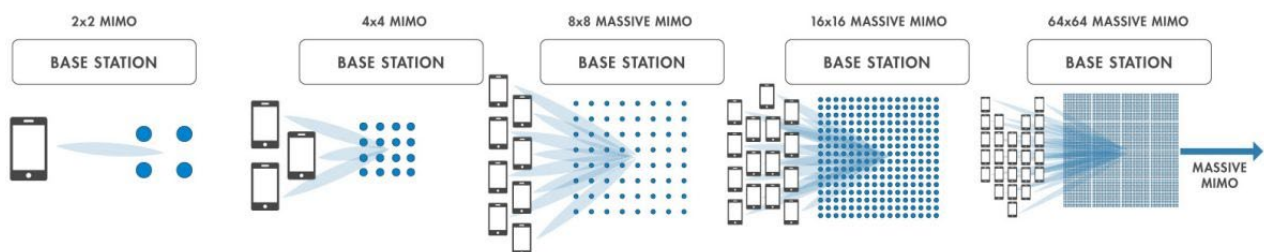
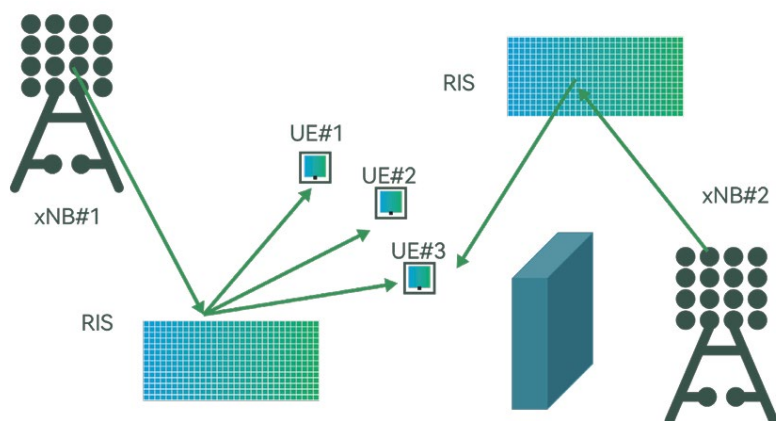


Figura 8: Evoluzione delle tecnologie MIMO (Multiple Input Multiple Output): da configurazioni di base come 2x2 e 4x4 MIMO, fino a soluzioni Massive MIMO con array di antenne 8x8, 16x16 e 64x64. Queste configurazioni consentono di migliorare significativamente l'efficienza spettrale, la capacità e l'affidabilità delle comunicazioni, rendendo possibile la gestione simultanea di un numero crescente di dispositivi e flussi di dati.

Ulteriori soluzioni includono la cancellazione delle interferenze tramite sistemi di analisi spettrale e adattamento del segnale, come filtraggi nel dominio del tempo, ponderazione delle sottoportanti e precodifica ortogonale, riducendo il contributo dei segnali indesiderati [25] [10]. L'integrazione di algoritmi di intelligenza artificiale (AI) consentirà una selezione dinamica del beamforming ottimale, prevedendo in tempo reale le variazioni del canale e adeguando la configurazione delle antenne per massimizzare l'affidabilità del collegamento, specialmente in scenari di alta mobilità [10] [5] [6].

Un ulteriore strumento chiave sono le superfici intelligenti riconfigurabili (RIS), che manipolano l'ambiente di propagazione riflettendo e reindirizzando i segnali [3] [5] [19]. I RIS possono ridurre gli effetti del multipath, migliorare la copertura e incrementare la potenza del segnale nelle aree desiderate, mitigando così l'interferenza [19] [18].



In sintesi, la combinazione di massive MIMO, beam steering, cancellazione interferenze, AI per l'ottimizzazione del beamforming e l'uso strategico dei RIS permetterà al 6G di superare le sfide legate all'interferenza alle alte frequenze, assicurando elevata affidabilità e prestazioni [10] [5] [18].

Figura 9: Schema di utilizzo di superfici intelligenti riconfigurabili (RIS) in un ambiente 6G.

Architettura di rete, SBA e protocolli

L'architettura 6G rappresenta un'evoluzione significativa rispetto al 5G, integrando i principi dell'architettura basata sui servizi (SBA) end-to-end [10] [2] [8]. Questa impostazione consente di scomporre e ricomporre dinamicamente le funzioni di rete in modo modulare, adattandole alle necessità di servizi e applicazioni specifiche [7] [10] [8] [26]. La modularità è un elemento fondamentale, poiché permette l'evoluzione indipendente delle funzioni di controllo, elaborazione e trasporto. Ciò non solo favorisce l'innovazione, ma consente anche l'introduzione di nuove capacità senza richiedere aggiornamenti invasivi e costosi [10] [8] [27].

Sul piano dei protocolli, il 6G introduce soluzioni di nuova generazione come HTTP/3 basato su QUIC, che rappresenta un miglioramento significativo rispetto a TCP/TLS [22]. QUIC integra crittografia e trasporto in un unico livello, eliminando overhead e migliorando l'efficienza complessiva [22]. Il multiplexing senza blocchi consente di trasmettere più flussi di dati simultaneamente senza interferenze, evitando che un pacchetto perso blocchi l'intera connessione [22]. L'handshake rapido riduce il tempo necessario per stabilire una connessione sicura, poiché combina la crittografia e l'avvio del trasporto in un unico passaggio [22] [28]. Questo approccio riduce la latenza, accelera i tempi di connessione e garantisce maggiore resilienza alle perdite di pacchetti [22] [29]. Tali caratteristiche rendono HTTP/3 su QUIC ideale per applicazioni che richiedono bassa latenza, come streaming in tempo reale, gaming, IoT e comunicazioni AR/VR [22] [15].

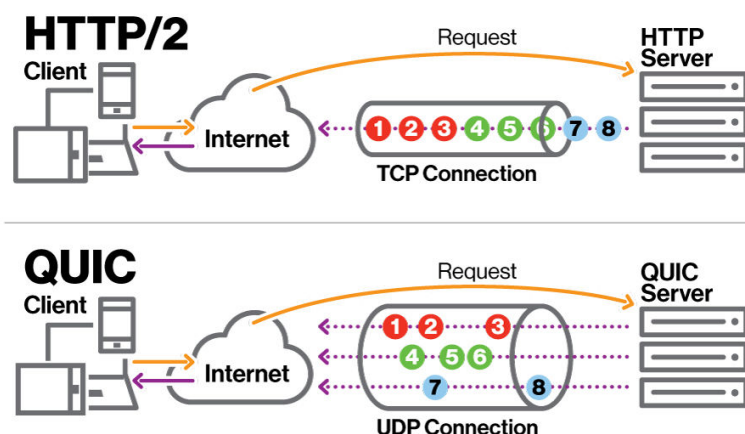


Figura 10: Confronto tra HTTP/2 e QUIC: HTTP/2 utilizza connessioni TCP, garantendo la sequenza ordinata dei dati ma introducendo ritardi in caso di perdita di pacchetti, poiché tutti devono essere rielaborati in ordine. Al contrario, QUIC sfrutta connessioni UDP per offrire un trasferimento più rapido e indipendente dei pacchetti, riducendo la latenza grazie alla possibilità di elaborare i pacchetti non sequenziali senza ritardi. (Fonte: [A Comprehensive Guide To HTTP/3 And QUIC | DebugBear](#))

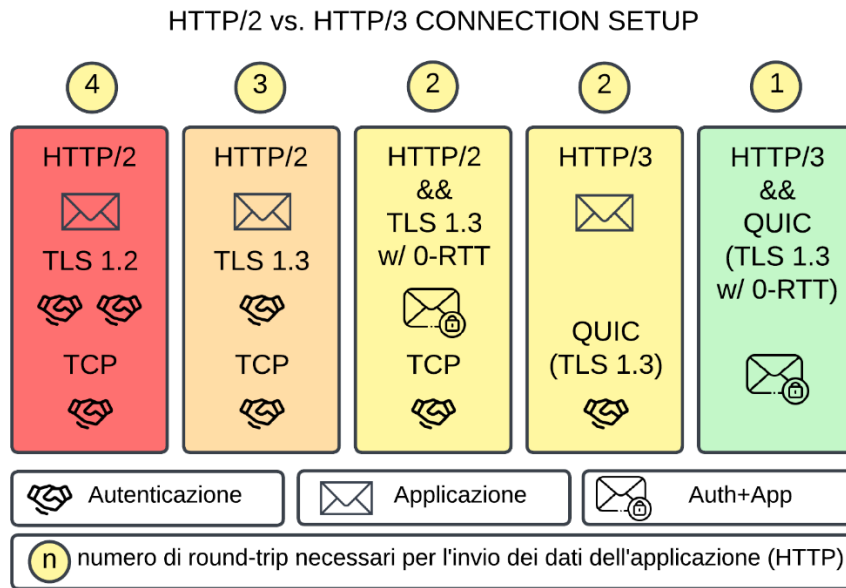


Figura 11: Confronto tra HTTP/2 e HTTP/3 nella configurazione della connessione.

Con HTTP/2 e TLS v1.2, l'invio della prima richiesta HTTP richiede fino a 4 round-trip. L'aggiornamento a TLS v1.3 riduce questo numero a 3 o 2 round-trip su connessioni esistenti.

Con HTTP/3 e QUIC, che integra nativamente TLS v1.3, la prima richiesta può essere inviata già al 2° round-trip o addirittura al 1° round-trip su connessioni precedenti, grazie alla funzione 0-RTT resumption. (Illustrazione ispirata da: [A Comprehensive Guide To HTTP/3 And QUIC | DebugBear](#))

Oltre a questi protocolli innovativi, il 6G utilizza framework RPC come gRPC, che garantisce maggiore flessibilità e prestazioni rispetto alle soluzioni tradizionali [8] [22] [2]. Nonostante l'adozione di tecnologie di ultima generazione, il mantenimento di protocolli consolidati come PFCP assicura continuità e coesistenza tra paradigmi diversi, agevolando una transizione graduale dal 5G [8] [30].

Elemento chiave dell'architettura SBA nel 6G è il framework unificato per la gestione del ciclo di vita della rete. Questo include orchestrazione, automazione delle funzioni, allocazione dinamica delle risorse e integrazione nativa di AI/ML [9] [8] [30] [4] [10] [22]. L'intelligenza artificiale, combinata con il machine learning, ottimizza le prestazioni, migliora la sicurezza e abilita funzionalità di autoconfigurazione e autoriparazione [9] [8] [22] [5] [4]. Questa visione supporta un ecosistema di servizi intelligenti e adattabili, garantendo flessibilità per i settori verticali, scalabilità per gestire miliardi di dispositivi ed efficienza nell'uso delle risorse [7] [22] [4].

L'evoluzione verso il 6G ridefinisce il paradigma architetturale delle reti mobili, superando i limiti tradizionali e abilitando funzionalità mai viste prima. Le sue caratteristiche non solo migliorano la qualità del servizio, ma rendono possibili nuovi scenari d'uso, dal controllo remoto in tempo reale alla gestione autonoma di infrastrutture critiche [10] [5] [9] [21].

Edge computing, AI/ML e Dynamic slicing

Nel 6G, edge computing, AI e ML consentono una gestione dinamica ed efficiente delle risorse di rete, supportando applicazioni con requisiti differenti [23] [10] [5] [31]. Grazie alla riconfigurazione delle slice in tempo reale, la rete si adatta costantemente alla domanda, massimizzando prestazioni e qualità del servizio [10] [32] [27].

L'Edge computing, elaborando i dati vicino alla fonte, riduce latenza e consumo di banda verso il cloud centrale [5] [31] [26]. Questo approccio è cruciale in scenari con reattività critica, come controllo industriale, automazione e realtà aumentata [10] [31]. AI/ML, analizzando dati di rete e comportamento degli utenti, ottimizzano l'uso delle risorse determinando cosa elaborare localmente o nel cloud [10] [31] [5].

La gestione dinamica delle slice è un esempio concreto: in una fabbrica intelligente, AI/ML riallocano risorse per garantire prestazioni costanti; in un concerto, privilegiano lo streaming video durante i picchi di traffico [10] [32]. Oltre alla gestione delle risorse, AI/ML migliorano sicurezza e sostenibilità, identificando anomalie e riducendo il consumo energetico [23] [10] [5].

In sintesi, la sinergia tra edge computing, AI/ML e Dynamic slicing è un pilastro del 6G, ottimizzando prestazioni, sicurezza ed efficienza energetica [22] [32] [10] [7].

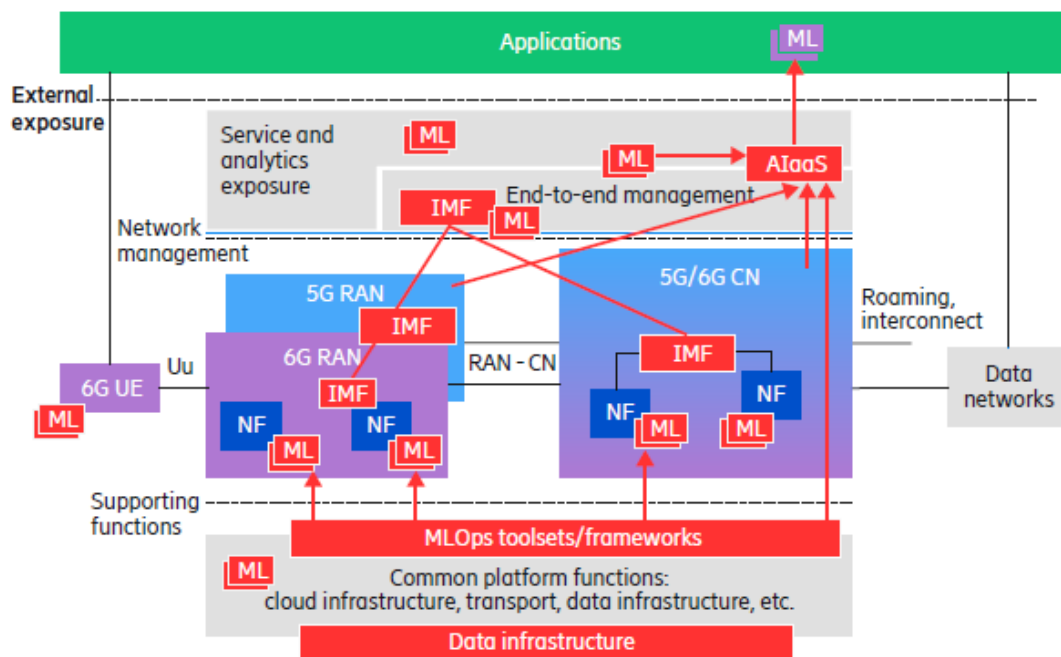


Figura 12: Integrazione di Machine Learning (ML) e framework MLOps nell'architettura 6G. Il diagramma mostra come l'intelligenza artificiale sia distribuita attraverso le diverse funzioni di rete, inclusi il Radio Access Network (RAN), il Core Network (CN) e l'infrastruttura dati. L'approccio AI-as-a-Service (AaaS) consente di esporre funzioni analitiche alle applicazioni, abilitando slicing dinamico, ottimizzazione delle risorse ed elaborazione distribuita tra edge e cloud.

Applicazioni avanzate, visione futura e conclusioni

La convergenza tra comunicazione e rilevamento nel 6G abiliterà l'“Intelligenza di Tutto”, consentendo alle reti di percepire e interagire con l'ambiente fisico. Questo abiliterà applicazioni trasformative in vari ambiti.

Le esperienze di Extended Reality (XR) saranno più immersive e reattive grazie a latenze minime, localizzazione precisa e larghezze di banda elevate, sostenendo telepresenza olografica e applicazioni multisensoriali. La comunicazione olografica, supportata da AI/ML, offrirà interazioni remote avanzate.

Nel settore industriale, il 6G ottimizzerà il controllo remoto di robot e cobot grazie a localizzazioni ultra precise e URLLC. La telechirurgia sarà più sicura e affidabile, mentre la telemedicina avanzerà con monitoraggi continui e sensori indossabili in tempo reale.

L'approccio Integrated Sensing and Communication (ISAC) permetterà alle stazioni base di trasmettere dati e percepire l'ambiente circostante, rilevando oggetti e creando mappe 3D integrate con AI/ML per sistemi autonomi.

In sintesi, il 6G sarà una piattaforma sensoriale distribuita, arricchendo l'interazione tra mondo fisico, digitale e biologico, trasformando il modo in cui comunichiamo e collaboriamo.

Abbreviazioni

6G: Sixth Generation (sesta generazione di reti mobili)
5G: Fifth Generation (quinta generazione di reti mobili)
4G: Fourth Generation (quarta generazione di reti mobili)
AI: Artificial Intelligence (Intelligenza Artificiale)
AR: Augmented Reality (Realtà Aumentata)
SBA: Service-Based Architecture (Architettura Basata sui Servizi)
DFT-s-OFDM: Discrete Fourier Transform-spread Orthogonal Frequency Division Multiplexing
eMBB: Enhanced Mobile Broadband (banda larga mobile potenziata)
EI: Edge Intelligence (Intelligenza distribuita all'edge)
FDD: Frequency Division Duplex
FDMA: Frequency Division Multiple Access
gRPC: gRPC Remote Procedure Calls
HARQ: Hybrid Automatic Repeat Request (richiesta di ritrasmissione ibrida)
HTTP/3: Hypertext Transfer Protocol version 3
IoT: Internet of Things
ISAC: Integrated Sensing and Communication (Integrazione di Comunicazione e Rilevamento)
LDPC: Low-Density Parity-Check (codici a bassa densità di parità)
MIMO: Multiple-Input Multiple-Output
ML: Machine Learning (Apprendimento Automatico)
mmWave: Millimeter Wave (onde millimetriche)
MR: Mixed Reality (Realtà Mista)
NOMA: Non-Orthogonal Multiple Access
OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PFCP: Packet Forwarding Control Protocol
QAM: Quadrature Amplitude Modulation
QUIC: Quick UDP Internet Connections
RAN: Radio Access Network (Rete di Accesso Radio)
RIS: Reconfigurable Intelligent Surface (Superficie Intelligente Riconfigurabile)
SNR: Signal-to-Noise Ratio (Rapporto Segnale-Rumore)
TDMA: Time Division Multiple Access
THz: Terahertz
URLLC: Ultra-Reliable Low Latency Communications (Comunicazioni ultra-affidabili a bassa latenza)
VR: Virtual Reality (Realtà Virtuale)
XR: Extended Reality (Realtà Estesa)
TLS: Transport Layer Security
UDP: User Datagram Protocol
TCP: Transmission Control Protocol
M2M: Machine-to-Machine
QoS: Quality of Service

Bibliografia

- [1] N. H. Mahmood, O. López, O.-S. Park, I. Moerman, K. Mikhaylov, E. Mercier, A. Munari, F. Clazzer, S. Böcker e H. Bartz, «White Paper on Critical and Massive Machine Type Communication Towards 6G,» *6G Research Visions*, No. 11, n. 11, 2020.
- [2] The 5G Infrastructure Association, «European Vision for the 6G Network Ecosystem,» *Zenodo*, n. Versione 1.0, 2021.
- [3] N., I. Atzeni, E. Björnson, A. Bourdoux, S. Buzzi, J.-B. Doré, S. Erkucuk, M. Fuentes, K. Guan, Y. Hu, X. Huang, J. Hultkonen, J. M. Jornet, M. Katz, R. Nilsson, E. Panayirci, K. Rabie, N. Rajapaksha, M. Salehi e W. Xu, «White Paper on Broadband Connectivity in 6G,» *6G Research Visions*, No. 10, 2020.
- [4] C. Christophorou, I. Ioannou, V. Vassiliou, L. Christofi, J. S. Vardakas, E. E. Seeder, C. F. Chiasserini, M. Iordache, C. Ben Issaid, I. Markopoulos, G. Franzese, T. Järvet e C. Verikoukis, «ADROIT6G DAI-driven Open and Programmable Architecture for 6G Networks,» *arXiv*, n. arXiv:2403.05277v1, 2024.
- [5] H., T. Hänninen, O. Tervo, A. Tölli e M. Latva-aho, «6G: The Intelligent Network of Everything – A Comprehensive Vision, Survey, and Tutorial,» *arXiv*, n. arXiv:2407.09388v2, 2024.
- [6] S. Ali, W. Saad, N. Rajatheva, K. Chang, D. Steinbach, B. Sliwa, C. Wietfeld, K. Mei, H. Shiri, H.-J. Zepernick, T. M. C. Chu, I. Ahmad, J. Huusko, J. Suutala, S. Bhadauria, V. Bhatia, R. Mitra, S. Amuru, R. Abbas, B. Shao e Capobianco, «6G White Paper on Machine Learning in Wireless Communication Networks,» *arXiv*, n. arXiv:2004.13875, 2020.
- [7] X. You, Y. Huang, S. Liu, D. Wang, J. Mai, C. Zhang, H. Zhan, C. Zhang, J. Zhang, Z. Li, J. Li, M. Zhu, J. You, D. Liu, Y. Cao, S. He, G. Hei, F. Yang, Y. Li, J. Wu, J. Lul, L. Ge, X. Chen, W. Chen e W. Gao, «Toward 6G TKμ Extreme Connectivity: Architecture, Key Technologies and Experiments,» *arXiv*, n. arXiv:2208.11092v2, 2022.
- [8] Nokia, «Transforming the 6G Vision to Action,» *White paper*, 2024.
- [9] Huawei, «6G: The Next Horizon White Paper,» *Future Technologies*, n. Jan 2022, 2022.
- [10] C.-X. Wang, X. You, X. Gao, X. Li, H. Wang, Y. Huang, Y. Chen, H. Haas, J. S. Thompson, E. G. Larsson, M. Di Renzo, W. Tong, P. Zhu, X. Shen, H. V. Poor e L. Hanzo, «On the Road to 6G: Visions, Requirements, Key Technologies and Testbeds,» *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. XX, n. February 2023, 2023.
- [11] Ericsson, «6G Spectrum - Enabling the Future Mobile Life Beyond 2030,» *Ericsson White Paper*, Vol. %1 di %2GFTL-23:000243 Uen, n. May 2024, 2024.
- [12] H., S. Dixit, M.-S. Alouini, A. Chaoub, M. Giordani, A. Kliks, M. Matinmikko-Blue e N. Zhang, «6G White Paper on Connectivity for Remote Areas,» *6G Research Visions*, No. 5, n. 5, 2020.
- [13] C. B. D. B. R. B. A. D. A. G. M. I. M. L. E.-S. M. Y. B. A. N. A. M. R. K. S. J. S. T. S. H. S.-G. G. S. J. S. T. V. M. e Lima, «6G White Paper on Localization and Sensing,» *6G Research Visions*, University of Oulu, n. 12, 2020.

- [14] Z. Xiao e Y. Zeng, «An Overview on Integrated Localization and Communication Towards 6G,» *arXiv*, n. arXiv:2006.01535v1, 2020.
- [15] C. G. Brinton, M. Chiang, K. T. Kim, D. J. Love, M. Beesley, M. Repeta, J. Roese, P. Ebeling, E. Ekudden, C. Li, G. Wu, N. Batra, A. Ghosh, V. Ziegler, T. Ji, R. Prakash e J. Smee, «Key Focus Areas and Enabling Technologies for 6G,» *arXiv*, n. arXiv:2412.07029v1, 2024.
- [16] S. Elmeadawy e R. Shubair, «6G Wireless Communications: Future Technologies and Research Challenges,» *IEEE Conference Paper*, n. November 2019, 2019.
- [17] W. Jiang, Q. Zhou, J. He, M. A. Habibi, S. Melnyk, M. Al-Absi, B. Han, M. Di Renzo, H. D. Schotten, F. Long, T. S. El-Bawab, M. Juntti, M. Debbah e V. C. M. Leung, «Terahertz Communications and Sensing for 6G and Beyond: A Comprehensive Review,» *arXiv*, n. arXiv:2307.10321v2, 2024.
- [18] S. E. Trevklakis, A.-A. Boulogeorgos, D. Pliatsios, K. Ntontin, P. Sarigiannidis, S. Chatzinotas e M. Di Renzo, «Localization as a Key Enabler of 6G Wireless Systems: A Comprehensive Survey and an Outlook,» *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. XX, n. First Quarter 2023, 2023.
- [19] A. Shafie, N. Yang, C. Han, J. M. Jornet, M. Juntti e T. Kürner, «Terahertz Communications for 6G and Beyond Wireless Networks: Challenges, Key Advancements, and Opportunities,» *arXiv*, n. arXiv:2207.11021v1, 2022.
- [20] A. Singh, V. Petrov, H. Guerbouhka, I. V. A. K. Reddy, E. W. Knightly, D. M. Mittleman e J. M. Jornet, «Wavefront Engineering: Realizing Efficient Terahertz Band Communications in 6G and Beyond,» *arXiv*, n. arXiv:2305.12365v1, 2023.
- [21] C. De Lima, D. Belot, R. Berkvens, A. Bourdoux, D. Dardari, M. Guillaud, M. Isomursu, E.-S. Lohan, Y. Miao, A. N. Barreto, M. R. K. Aziz, J. Saloranta, T. Sanguanpuak, H. Sariahmedeen, G. Seco-Granados, J. Suutala, T. Svensson e M. Valkama, «Convergent Communication, Sensing and Localization in 6G Systems: An Overview of Technologies, Opportunities and Challenges,» *IEEE Access*, n. February 17, 2021, 2021.
- [22] V.-L. Nguyen, P.-C. Lin, B.-C. Cheng, R.-H. Hwang e Y.-D. Lin, «Security and Privacy for 6G: A Survey on Prospective Technologies and Challenges,» *arXiv*, n. arXiv:2108.11861v2, 2021.
- [23] S. Ali, W. Saad e D. (. Steinbach, «White Paper on Machine Learning in 6G Wireless Communication Networks,» *6G Research Visions*, No. 7, n. No. 7, 2020.
- [24] C. De Lima, D. Belot, R. Berkvens, A. Bourdoux, D. Dardari, M. Guillaud, M. Isomursu, E.-S. Lohan, Y. Miao, A. N. Barreto, M. R. K. Aziz, J. Saloranta, T. Sanguanpuak, H. Sariahmedeen, G. Seco-Granados, J. Suutala, T. Svensson e M. Valkama, «6G White Paper on Localization and Sensing,» *6G Research Visions*, No. 12, n. 12, 2020.
- [25] N. H., O. López, O.-S. Park, I. Moerman, K. Mikhaylov, E. Mercier, A. Munari, F. Clazzer, S. Böcker e H. (. Bartz, «White Paper on Critical and Massive Machine Type Communication Towards 6G,» *6G Research Visions*, No. 11, n. 11, 2020.
- [26] 5G PPP Architecture Working Group, «The 6G Architecture Landscape: European Perspective,» *5G Architecture White Paper*, vol. 1.0, n. Dec 2022, 2022.

- [27] M. D. F. D. M. E.-K. R. J. R. K. T. M. Michele Polese, «Empowering the 6G Cellular Architecture with Open RAN,» *IEEE JSAC Special Issue on Open RAN*, n. 5 Dec 2023, 2023.
- [28] J. P. W. Y. X. R. X. S. Lin Cai, «Self-Evolving and Transformative Protocol Architecture for 6G,» *IEEE Wireless Communications*, Vol. %1 di %21536-1284/23/\$25.00, n. August 2023, 2023.
- [29] M. C. K. T. K. D. J. L. M. B. M. R. J. R. P. B. E. E. C. L. G. W. N. B. A. G. V. Z. T. J. R. P. J. S. Christopher G. Brinton, «Key Focus Areas and Enabling Technologies for 6G,» n. 2412.07029v1 [cs.NI], 2024.
- [30] Ericsson, «Co-creating a cyber-physical world,» *Ericsson White Paper GFTL-24:008856 Uen*, 2024.
- [31] E. B. M. C. M. D. M. D. A. G.-C. F. J. M. K. T. K. M. K. A. L. T. L. L. M. T. R. A. S. S. S. K. S. P. T. S. & Y. T. Peltonen, «6G White Paper on Edge Intelligence,» *6G Research Visions*, No. 8, 2020.
- [32] G. Ioannis P. Chochliouros (Hellenic Telecommunications Organization S.A. - OTE, «Dynamic Network Slicing: Challenges and Opportunities,» *Capitolo in IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 2020.

Le informazioni e le analisi contenute in questo saggio si basano sulle ricerche e le prospettive più recenti disponibili al momento della stesura. Tuttavia, il 6G è ancora in fase di sviluppo e molte delle tecnologie, architetture e protocolli descritti potrebbero subire modifiche o evoluzioni in futuro. Quanto presentato rappresenta quindi una visione preliminare, soggetta a variazioni in base ai progressi tecnologici e alle decisioni normative che verranno prese nei prossimi anni.