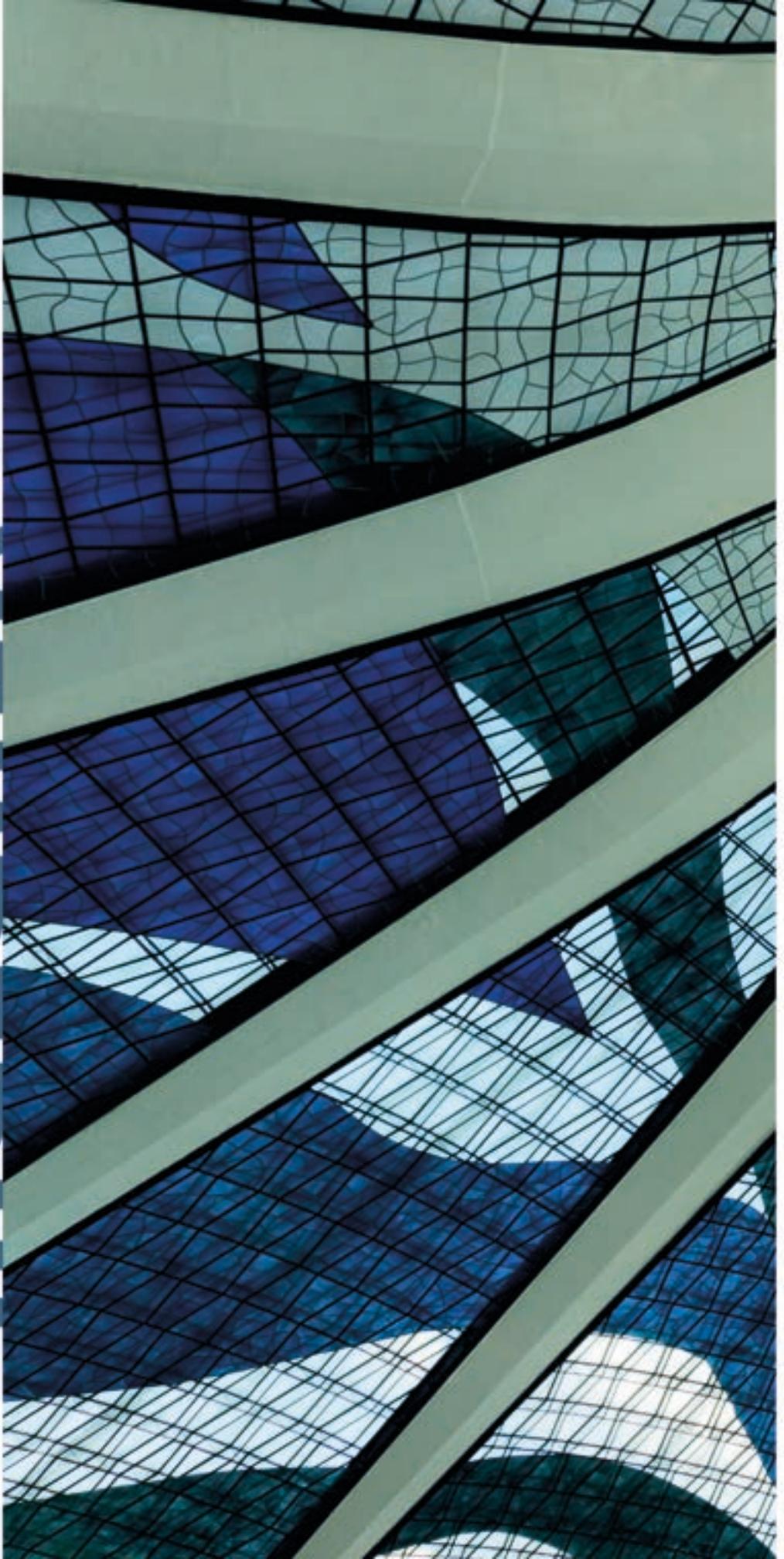


INGEGNER



IN COPERTINA
IMMAGINE DI REPERTORIO

RIVISTA
DELL'ORDINE
DEGLI INGEGNERI
DELLA PROVINCIA
DI ROMA



TRIMESTRALE
ANNO XII - N. 3/2025





Ing. Massimo Cerri

Connettere il mondo con le reti NTN: la nuova frontiera del 5G

Viviamo in un'epoca in cui la connettività non è più un servizio accessorio, ma una vera e propria infrastruttura critica, al pari delle reti energetiche e di trasporto. La trasformazione digitale in corso si fonda sulla capacità di garantire accesso ai dati ovunque, in ogni momento, senza interruzioni. In questo scenario emergono le reti non terrestri (Non-Terrestrial Networks, NTN), che rappresentano una delle evoluzioni più promettenti del 5G.

Si tratta di sistemi di comunicazione wireless che operano al di sopra della superficie terrestre, integrando satelliti in orbita bassa (LEO), media (MEO) e geostazionaria (GEO), piattaforme ad alta quota (HAPS) e droni. Questi elementi consentono di estendere la copertura delle reti cellulari anche nelle zone più remote, dove le infrastrutture tradizionali non arrivano.

Con l'introduzione delle NTN, smartphone e dispositivi connessi non avranno più bisogno di soluzioni dedicate per collegarsi ai satelliti: le stazioni orbitali diventeranno a tutti gli effetti parte integrante della rete cellulare, ampliando l'ecosistema 3GPP e abbattendo le barriere tra terrestre e non terrestre.

Le applicazioni NTN possono essere suddivise in due grandi categorie:

NTN-IoT: reti pensate per ampliare i casi d'uso dell'Internet of Things, garantendo copertura globale a sensori, tracker e dispositivi in settori come agricoltura, logistica, monitoraggio ambientale, ricerca e soccorso, trasporti marittimi e aerei.

NTN-NR: reti che collegano direttamente gli smartphone e i device 5G, consentendo la trasmissione dati, voce e messaggistica in modo ubiquo, sfruttando in particolare i satelliti LEO.

Questa evoluzione non è futuristica: è già in corso. Nei prossimi anni vedremo crescere le applicazioni IoT satellitari e, parallelamente,

L'integrazione dei servizi NTN-NR nei telefoni di nuova generazione. Le reti NTN aprono scenari rivoluzionari: continuità dei servizi di base 5G con accesso a dati, voce e messaggistica ovunque nel mondo; agricoltura di precisione e monitoraggio ambientale anche in aree rurali e remote; tracciabilità globale di container, veicoli e merci di valore; ricerca e soccorso con comunicazioni affidabili in emergenze o disastri naturali; connettività marittima e aerea con navigazione più sicura e comunicazioni in tempo reale; automotive e mobilità del futuro con supporto ai veicoli connessi e alle applicazioni V2X; Backhaul e FWA con estensione delle reti 5G terrestri con connessioni veloci e stabili anche dove la fibra non arriva.

Le reti NTN non sono soltanto un'evoluzione tecnologica: sono una sfida sistemica che riguarda ingegneria delle telecomunicazioni, infrastrutture, sicurezza, normativa e sostenibilità. Esse pongono interrogativi sulla gestione dei dati, sull'integrazione tra reti diverse, sulla resilienza dei sistemi in contesti di emergenza.

Per gli ingegneri rappresentano una frontiera di ricerca e progettazione, che richiede nuove competenze e una visione interdisciplinare: dall'aerospazio alla logistica, dalla sicurezza informatica alle smart cities.

L'Italia – e Roma in particolare – devono guardare con attenzione a queste evoluzioni, cogliendone il potenziale strategico. Le NTN possono colmare il divario digitale, supportare la transizione ecologica e trasformare settori cruciali della nostra economia.

Come Ordine degli Ingegneri, crediamo che la formazione e l'aggiornamento professionale su queste tecnologie siano fondamentali. Perché il futuro della connettività non si giocherà più solo sulla terra, ma anche – e sempre di più – nello spazio.



Ing. Massimo Cerri
Presidente
Ordine degli Ingegneri
della Provincia di Roma



Ing. Maria Elena D'Effremo

Care Colleghe e cari Colleghi,
l'ingegneria sta vivendo una vera e propria rivoluzione nel corso della quale, oltre a essere la protagonista principale per la creazione di nuove tecnologie è la principale utilizzatrice delle stesse. Si pensi al settore dell'ingegneria civile: le nuove tecnologie stanno trasformando radicalmente il modo in cui vengono analizzate, monitorate e gestite le infrastrutture esistenti, con particolare attenzione a opere complesse come gallerie e viadotti.

Dalle fasi ispettive tradizionalmente condotte sulla base di rilievi visivi e metodi naturali, all'utilizzo di strumenti innovativi come i droni, i sensori IoT, il laser scanner 3D e l'intelligenza artificiale che permettono di effettuare diagnosi più accurate e tempestive, riducendo tempi, costi e margini d'errore.

I droni, ad esempio, permettono di raggiungere aree difficilmente accessibili, eseguendo rilievi fotogrammetrici dettagliati senza interrompere il traffico o esporre tecnici a situazioni pericolose. Ho avuto la fortuna di prendere parte a ispezioni coadiuvate dall'utilizzo di droni che hanno permesso di rendere visibili ad aree diversamente non accessibili: è innegabile il supporto che tale strumentazione può fornire alla fase di indagine. Per il monitoraggio delle strutture, ormai i sensori installati direttamente sulle stesse consentono il monitoraggio continuo di parametri critici come deformazioni, vibrazioni, umidità o variazioni termiche. I dati raccolti vengono poi analizzati da algoritmi di machine learning, capaci di individuare anomalie pri-

ma ancora che diventino criticità strutturali.

Questi strumenti, combinati con modelli BIM (Building Information Modeling) e gemelli digitali, aprono scenari finora impensabili: manutenzione predittiva, gestione proattiva del rischio e interventi mirati basati su dati oggettivi e aggiornati in tempo reale.

Tuttavia, affinché queste innovazioni producano un impatto concreto, è necessario un cambio di paradigma culturale. Anche in alcune amministrazioni pubbliche la fase di cambiamento è iniziata, ma è ora più che mai necessario che i gestori delle infrastrutture investano nella formazione del personale al fine di adottare standard digitali condivisi e promuovere una visione sistemica e integrata della manutenzione.

All'interno di questo numero si parlerà di tali temi ma non solo, come ogni uscita gli argomenti sono diversificati e affrontano diversi settori dell'ingegneria. L'Ordine degli Ingegneri di Roma si impegna a dar voce a ciascuno di questi settori.

Non mi resta che augurarvi buona lettura e invitarvi a consultare la pagina della Rivista IO Roma <https://ioroma.info/>.

Purtroppo ad agosto 2025 la pagina linkedin della rivista è stata hackerata e dopo vari tentativi di ripristino non è stato possibile riattivarla. Tuttavia d'ora in poi tutti i post relativi alle pubblicazioni e alla rivista IO Roma verranno direttamente pubblicati sulla pagina linkedin dell'Ordine degli ingegneri di Roma <https://www.linkedin.com/company/ordine-degli-ingegneri-della-provincia-di-roma/>.



Ing. Maria Elena D'Effremo
Direttrice Editoriale

IO ROMA

RIVISTA - ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROVINCIA DI ROMA

N. 3/2025 Trimestrale N. 45 Anno XII

Direttrice Responsabile

Marialisa Nigro

Direttrice Editoriale

Maria Elena D'Effremo

Comitato di Redazione

Sezione A

Massimo Cerri
Silvia Torrani
Micaela Nozzi
Stefania Arangio
Fabrizio Averardi Ripari
Michele Colletta
Alessandro Fuschiotto
Marco Ghimenti
Giorgio Martino
Giovanni Nicolai
Paolo Reale
Mauro Villarini

Sezione B

Alfredo Simonetti

Amministrazione e redazione

Piazza della Repubblica, 59 - 00185 Roma
Tel. 06 4879311 - Fax 06 487931223

Direttore Artistico e Project Manager

Tiziana Primavera

Assistenza Editoriale

Leonardo Lavalle
Emanuela Cariani
Antonio Di Sabatino

Referente FOIR

Francesco Marinuzzi

Stampa

PressUp

Iscritto al Registro della Stampa del Tribunale
di Roma
Il 22/11/2013, n. 262/2013

Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma

Piazza della Repubblica, 59 - 00185 Roma
www.ording.roma.it
segreteria@ording.roma.it
editoriale@ording.roma.it

Finito di stampare: Ottobre 2025



MISTO
Carta da fonti gestite
in maniera responsabile
FSC® C109382



La redazione rende noto che i contenuti, i pareri e le opinioni espresse negli articoli pubblicati rappresentano l'esclusivo pensiero degli autori, senza per questo aderire ad esse. La Direzione declina qualsiasi responsabilità derivante dalle affermazioni o dai contenuti forniti dagli autori, presenti nei suddetti articoli.

CONTENUTI



08

Batterie nucleari per missioni aerospaziali

Ing. Mario Caporale



20

Evoluzione delle reti NTN interoperabili con le reti terrestri

*Ing. Roberto Capua, Ing. Giovanni Nicolai,
Ing. Marco Brancati, Ing. Giovanni Gasbarrone,
Ing. Giampaolo Panariello*



32

Intelligenza Artificiale e Modelli Linguistici di Grandi Dimensioni: Dalla Teoria all'Applicazione

Ing. Patrizio Tardiolo Bonifazi



56

Applicazione di strumenti innovativi per la progettazione e la realizzazione di interventi di manutenzione: le gallerie della linea ferroviaria Attigliano-Viterbo

*Ing. Federico Foria, Ing. Mario Calicchio,
Ing. Gabriele Miceli*



64

Relazione tecnica di valutazione dei rischi di rumore: parte prima

Ing. Claudio Beggato



a cura di:
ING. M. CAPORALE

Revisionato da:
ING. M. SEPIELLI

Commissione:
RICERCA E REATTORI INNOVATIVI



BATTERIE NUCLEARI PER MISSIONI AEROSPAZIALI

1. Introduzione

Le batterie nucleari sono dispositivi in grado di fornire una potenza elettrica costante per molti anni senza bisogno di essere ricaricati o sostituiti, essendo stabili in condizioni ambientali estreme (alte/basse temperature) convertendo in elettricità l'energia dei decadimenti radioattivi di isotopi naturali o prodotti artificialmente.

Le batterie nucleari hanno permesso di portare avanti le attività di svariate missioni spaziali, dal Pioneer 10 (lanciato nel 1972, che ha trasmesso informazioni fino al 2003) al Curiosity (lanciato nel 2011, e che è ancora attivo) all'attuale Perseverance che raccoglie e trasmette dati da Marte.

Le ricerche in questa area tecnologica stanno incrementando, grazie alle interessanti prestazioni delle batterie nucleari, al sempre maggiore impegno in missioni spaziali da parte di NASA, ESA e dei nuovi players nel settore spazio (Cina, India, Corea...). I brevetti depositati e le pubblicazioni scientifiche prodotte dal 2010 ad oggi indicano una dinamica espansione del campo ed evidenziano un crescente interesse verso la diversificazione dei sistemi per produzione di elettricità da fonti nucleari.

I pannelli solari sono la scelta più popolare per i veicoli spaziali che viaggiano all'interno del sistema solare. Purtroppo, l'intensità solare diminuisce secondo la legge dell'inverso del quadrato. Un veicolo due volte più lontano dal Sole riceverà solo un quarto dell'energia solare. Intorno alla Terra, sono disponibili dalla luce solare circa 1374 Watt/m², vicino a Giove, 50 Watt/m², vicino a Plutone, 1 Watt/m². Più un veicolo spaziale è lontano dal sole, più grandi sono i pannelli solari che deve trasportare. Gli aumenti richiesti nelle dimensioni e nella massa dell'intera sonda vanno ad aumentare di conseguenza il costo del lancio. Ecco, quindi, la necessità di ricorrere ad altre fonti di energia come le batterie nucleari.

2. Cronistoria dell'uso delle batterie nucleari

Il primo generatore termico a radioisotopi (RTG) è stato inventato nel 1954 dagli scienziati K. C. Jordan e J. Birden del Mound Laboratories in Ohio (USA). Il primo RTG lanciato nello spazio dagli Stati Uniti fu SNAP 3B nel 1961 alimentato da 96 grammi di plutonio-238 metallico, a bordo della navicella spaziale Navy Transit 4A. Già nel 1961 la NASA ha iniziato a utilizzare batterie nucleari nei satelliti per fornire energia a lungo termine.

Nel 1965 c'è stato un tentativo di usare un reattore nucleare a bordo di un satellite. La USAF sperimentò il primo e unico reattore a fissione su di un satellite sperimentale, lo SNAP-10A (Systems for Nuclear Auxiliary Power) che ha funzionato solo per 43 giorni a causa di un guasto a un componente elettrico non nucleare. Lo SNAP-10A aveva sostanzialmente tre componenti principali: un reattore a fissione compatto per la generazione del calore, un convertitore di energia per trasformare parte del calore in elettricità e un radiatore per irradiare il calore che non poteva essere utilizzato. Il reattore, della forma cilindrica e misura di circa 40x22 cm di diametro, conteneva 37 barre di combustibile contenenti ²³⁵U nella forma di idruro di uranio-zirconio. Aveva una potenza termica di 30 kW e un peso, non schermato, di 290 kg. Il reattore aveva come refrigerante una lega eutettica sodio-potassio. I convertitori termoelettrici erano costituiti da silicio e germanio accoppiati termicamente.

Nel 1972 la missione Pioneer 10 utilizzò una batteria nucleare al plutonio-238 (Pu-238) per alimentare i suoi strumenti. La batteria aveva una potenza iniziale di circa 155 watt e ha permesso alla sonda di trasmettere dati fino al 2003. Nel 1989 la missione della sonda Galileo utilizzò batterie nucleari al plutonio-238 per esplorare Giove e le sue lune. La missione è durata fino al 2003.

Nel 2006 la missione New Horizons utilizzò una batteria nucleare al plutonio-238 per esplorare Plutone e la fascia di Kuiper. La sonda è ancora operativa. Nel 2011 la missione Curiosity, un rover della NASA, ha utilizzato una batteria nucleare al plutonio-238 per esplorare Marte. Il rover è ancora attivo e continua a trasmettere dati. Nel 2020 la missione Perseverance, un altro rover della NASA, utilizza una batteria nucleare al plutonio-238 per esplorare Marte. Il rover è attualmente operativo e raccoglie dati dal pianeta rosso.

Nel 2024 viene sviluppata da ricercatori dell'Autorità per l'Energia Atomica del Regno Unito (UKAEA) e dell'Università di Bristol la prima batteria nucleare al diamante, che sfrutta il decadimento del carbonio-14 per generare energia per migliaia di anni. Questa batteria genera energia sfruttando il decadimento radioattivo del carbonio-14, che ha un'emivita di 5.700 anni. Questa nuova tecnologia ha il potenziale per diventare una fonte di energia estremamente duratura, particolarmente utile nei casi in cui la sostituzione delle batterie risulta complicata o comporta disagio.

3. Potenze e autonomie nelle batterie nucleari

Le batterie nucleari utilizzate nelle missioni spaziali hanno generato potenze variabili a seconda del tipo di missione e del dispositivo utilizzato.

Le missioni Pioneer 10 e 11 hanno utilizzato RTG al plutonio-238 con una potenza iniziale di circa 155 watt. Le missioni Voyager 1 e 2 hanno utilizzato RTG al plutonio-238 con una potenza iniziale di circa 470 watt. La sonda Galileo ha utilizzato RTG al plutonio-238 con una potenza iniziale di circa 570 watt. La sonda Cassini ha utilizzato RTG al plutonio-238 con una potenza iniziale di circa 870 watt. I Rover Curiosity e Perseverance utilizzano MMRTG (Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator) al plutonio-238 con una

potenza iniziale di circa 110 watt.

Le Batterie Betavoltaiche Betavolt BB100 utilizzano l'isotopo nichel-63 che genera circa 100 microwatt di potenza per 50 anni.

Le batterie nucleari RTG hanno un'autonomia che può durare decenni.

Le sonde Voyager, lanciate nel 1977, stanno ancora trasmettendo dati grazie ai loro RTG, anche se la potenza è diminuita nel tempo. I generatori utilizzati su Curiosity e Perseverance hanno un'autonomia prevista di circa 14 anni, con una riduzione graduale della potenza nel tempo.

Le batterie al diamante con carbonio-14 possono durare migliaia di anni, generando energia a bassa potenza per periodi estremamente lunghi.

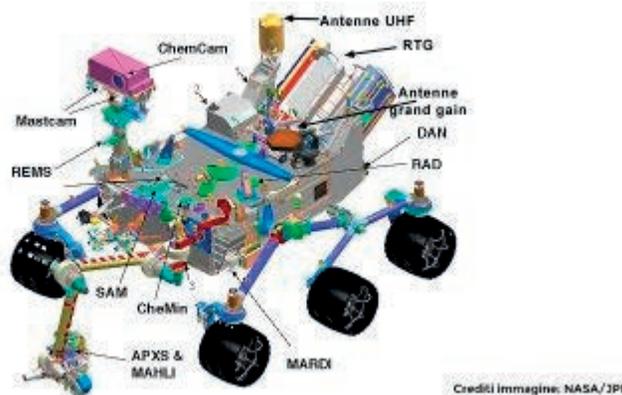


Figura 3 - Il rover Curiosity, NASA/JPL.

Crediti immagine: NASA/JPL

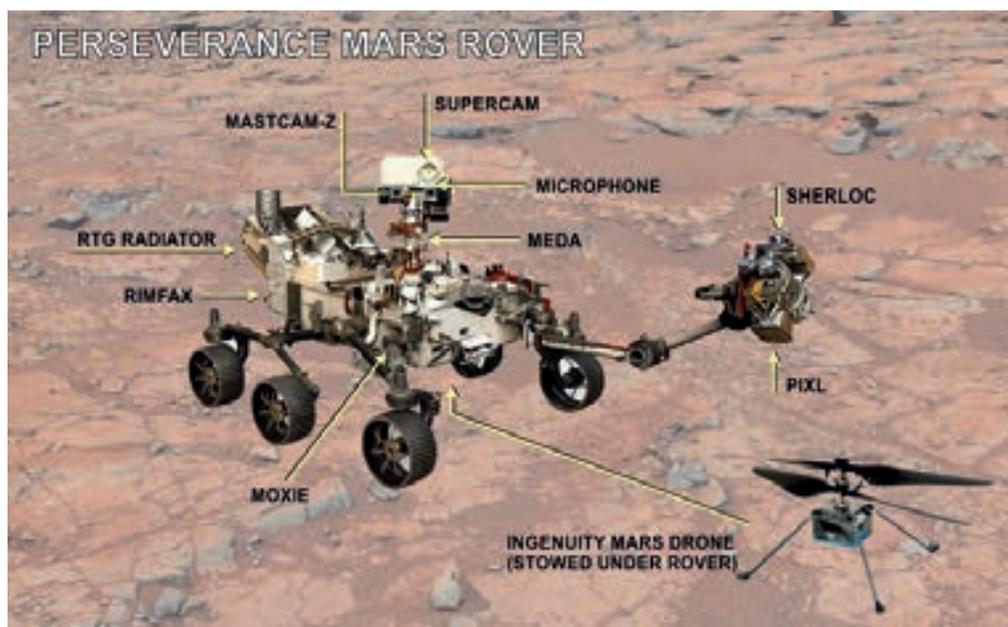


Figura 4
Perseverance Rover,
<https://sky-lights.org/>.

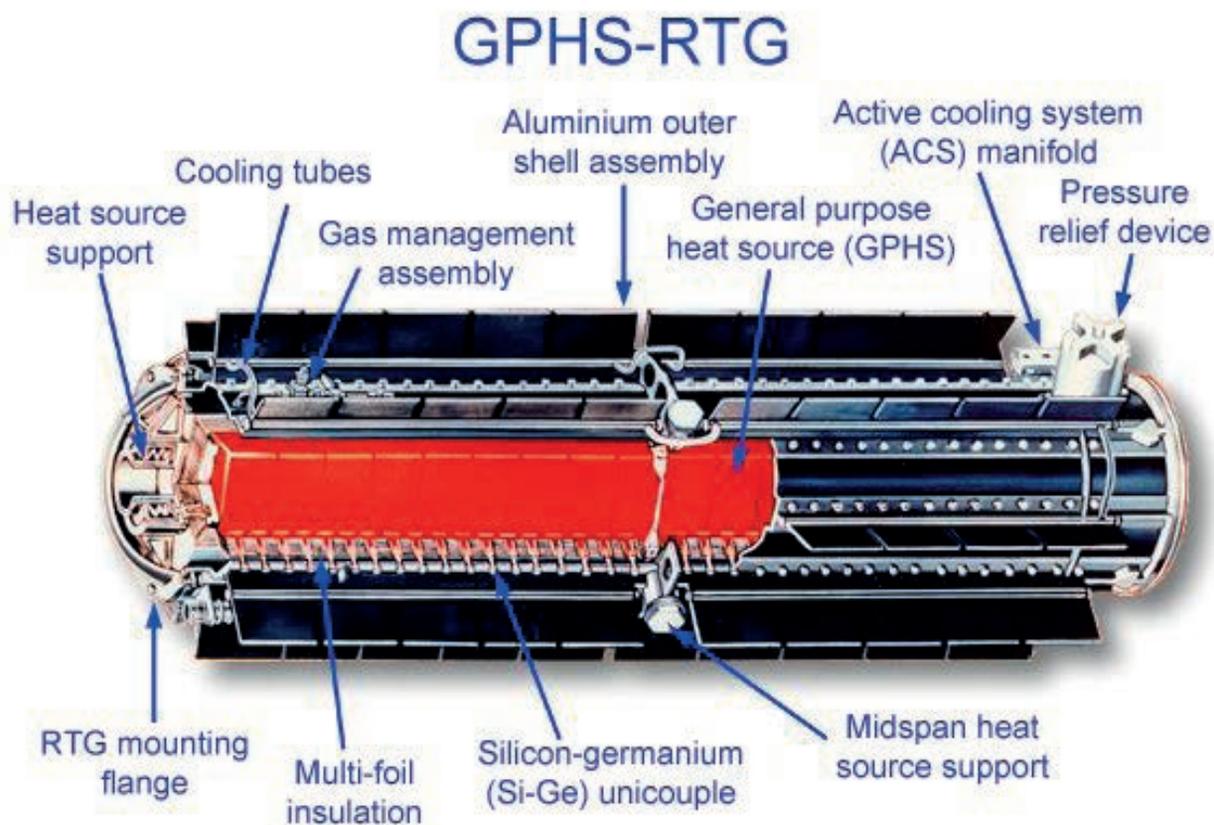


Figura 5 - Diagramma del RTG usato sulla sonda Cassini, <https://en.wikipedia.org/wiki/GPHS-RTG>.

4. Caratteristiche del materiale radioattivo utilizzato negli RTG

La emivita o «tempo di dimezzamento» del materiale radioattivo per applicazioni spaziali deve essere sufficientemente lunga da rilasciare energia a un ritmo relativamente costante per un periodo di tempo ragionevole.

La quantità di energia rilasciata per unità di tempo (potenza) di una data quantità è inversamente proporzionale al tempo di dimezzamento. Un isotopo con il doppio dell'emivita e la stessa energia per decadimento rilascerà energia a metà della velocità per mole. Le emivite tipiche per i radioisotopi utilizzati negli RTG sono quindi di diverse decadi, sebbene gli isotopi con emivite più brevi possano essere utilizzati per applicazioni specializzate.

Per l'uso nei voli spaziali, il carburante deve produrre una grande quantità di energia per massa e volume (densità). L'energia di decadimento può essere calcolata se si conosce l'energia della

radiazione radioattiva o la perdita di massa prima e dopo il decadimento radioattivo. Il rilascio di energia per decadimento è proporzionale alla produzione di energia per mole.

La radiazione deve essere di un tipo facilmente assorbibile e trasformato in radiazione termica, preferibilmente radiazione α .

La radiazione β può emettere una notevole radiazione γ /raggi X attraverso la produzione di radiazioni secondarie bremsstrahlung e quindi richiede una forte schermatura. Gli isotopi non devono produrre quantità significative di radiazioni gamma, neutroniche o radiazioni penetranti in generale attraverso altri modi di decadimento o prodotti a catena di decadimento.

I criteri sopra menzionati limitano il numero di possibili materiali nucleari a meno di trenta isotopi atomici all'interno dell'intera tabella dei nuclidi.

Il plutonio-238, il curio-244 (^{244}Cm), lo stronzio-90 (^{90}Sr) e più recentemente l'americio-241 sono gli isotopi candidati più spesso citati, ma altri 43 isotopi su circa 1.300 sono stati considerati

Radio-isotope	Half Life (year)	Yield (%)	Energy (keV)	Decay
Technetium: ⁹⁹ Tc	0.211 MY	6.1385	294	β
Tin: ¹²⁶ Sn	0.230 MY	0.1084	4050	β, γ
Selenium: ⁷⁵ Se	0.327 MY	0.0447	151	β
Zirconium: ⁹³ Zr	1.530 MY	5.4575	91	β, γ
Palladium: ¹⁰⁷ Pd	6.500 MY	1.2499	33	β
Iodine: ¹²⁹ I	15.70 MY	0.8410	194	β, γ
Europium: ¹⁵⁵ Eu	4.76 Y	0.0803	252	β, γ
Krypton: ⁸⁵ Kr	10.76 Y	0.2180	687	β, γ
Cadmium: ^{113m} Cd	14.1 Y	0.0008	316	β
Strontium: ⁹⁰ Sr	28.9 Y	4.5050	2826	β
Cesium: ¹³⁷ Cs	30.23 Y	6.3370	1176	β, γ
Samarium: ¹⁵¹ Sm	96.60 Y	0.5314	77	β
Cobalt: ⁶⁰ Co	5.27 Y	artificial	2506	β, γ
Sodium: ²² Na	2.61 Y	artificial	1786	β, γ

Tabella 1 - Tavola di alcuni radioisotopi, da documento NASA/TM-20220019348 del 2023.

all'inizio degli anni '50.

5. Rischi per i veicoli spaziali

Per i veicoli spaziali, la preoccupazione principale è che se dovesse verificarsi un incidente durante il lancio o un successivo passaggio di un veicolo spaziale vicino alla Terra, il materiale dannoso potrebbe essere rilasciato nell'atmosfera. Gli RTG presentano un rischio di contaminazione radioattiva: se il contenitore che contiene il carburante perde, il materiale radioattivo può contaminare l'ambiente. Per ridurre al minimo il rischio di rilascio del materiale radioattivo, il combustibile viene immagazzinato in singole unità modulari con una propria schermatura termica. Sono circondati da uno strato di metallo iridio e racchiusi in blocchi di grafite ad alta resistenza.

Intorno ai blocchi di grafite c'è un guscio aerodinamico, progettato per proteggere l'intero gruppo dal calore del rientro nell'atmosfera terrestre.

Il combustibile al plutonio è inoltre immagazzinato in una forma ceramica resistente al calore, riducendo al minimo il rischio di vaporizzazione e aerosolizzazione. La ceramica è anche altamente insolubile. Ci sono stati diversi incidenti noti che hanno coinvolto veicoli spaziali alimentati da RTG: un lancio

fallito il 21 aprile 1964 in cui il satellite di navigazione statunitense Transit-5BN-3 non riuscì a raggiungere l'orbita e bruciò al rientro a nord del Madagascar. Il combustibile metallico al plutonio da 17.000 Curies (630 TBq) nel suo RTG SNAP-9a è stato espulso nell'atmosfera sopra l'emisfero australe, dove è bruciato, e tracce di plutonio-238 sono state rilevate nell'area pochi mesi dopo. Questo incidente ha portato il Comitato di Sicurezza della NASA a richiedere il rientro intatto nei futuri lanci di RTG, il che a sua volta ha avuto un impatto sulla progettazione degli RTG in cantiere. Il satellite meteorologico Nimbus B-1: il lanciatore fu deliberatamente distrutto poco dopo il lancio il 21 maggio 1968 a causa della traiettoria irregolare. Il suo SNAP-19 RTG contenente biossido di plutonio relativamente inerte è stato recuperato intatto dal fondale marino nel Canale di Santa Barbara cinque mesi dopo e non è stata rilevata alcuna contaminazione ambientale.

Nel 1969 il lancio della prima missione del rover lunare Lunokhod fallì, diffondendo il polonio-210 su una vasta area della Russia.

Il fallimento della missione Apollo 13 nell'aprile 1970 significò che il modulo lunare rientrò nell'atmosfera trasportando un RTG e bruciò sopra le Figi. Trasportava uno SNAP-27 RTG contenente 44.500

Curies (1.650 TBq Tera-Becquerel) di biossido di plutonio in un barile di grafite sulla gamba del lander che sopravvisse intatto al rientro nell'atmosfera terrestre, come era stato progettato per fare, la traiettoria fu organizzata in modo da immergersi in 6-9 chilometri d'acqua nella fossa di Tonga nell'Oceano Pacifico. L'assenza di contaminazione da plutonio-238 nei campionamenti atmosferici e di acqua di mare ha confermato l'ipotesi che il barile sia intatto sul fondo marino. Questo incidente è servito a convalidare il design degli RTG di ultima generazione come altamente sicuri.

Mars 96 è stato lanciato dalla Russia nel 1996, ma non è riuscito a lasciare l'orbita terrestre ed è rientrato nell'atmosfera poche ore dopo. I due RTG a bordo trasportavano in totale 200 g di plutonio e si presume che siano sopravvissuti al rientro come erano stati progettati. Si pensa che ora si trovino da qualche parte in una zona che corre da nord-est a sud-ovest lungo 320 km e largo 80 km, centrato a 32 km a est di Iquique, in Cile.

6. Schemi tipo di batterie nucleari

Di seguito vengono forniti alcuni schemi tipici delle batterie nucleari per applicazioni spaziali:

- **Generatori termoelettrici a radioisotopi (RTG).** Gli RTG sono il tipo più comune di batterie nucleari utilizzate nelle missioni spaziali. Convertono il calore derivante dal decadimento radioattivo degli isotopi in elettricità utilizzando termocoppie. Una struttura tipica è la seguente:
 1. isotopo radioattivo: il plutonio-238 ($Pu-238$) è comunemente usato a causa della sua lunga emivita e dell'elevata densità di potenza;
 2. pellet di combustibile: l'isotopo viene formato in pellet ceramici di biossido di plutonio (PuO_2);
 3. fonte di calore per uso generale (GPHS). I pellet di combustibile sono incapsulati in una serie di strati protettivi, tra cui:
 - rivestimento del carburante: fornisce il contenimento iniziale;

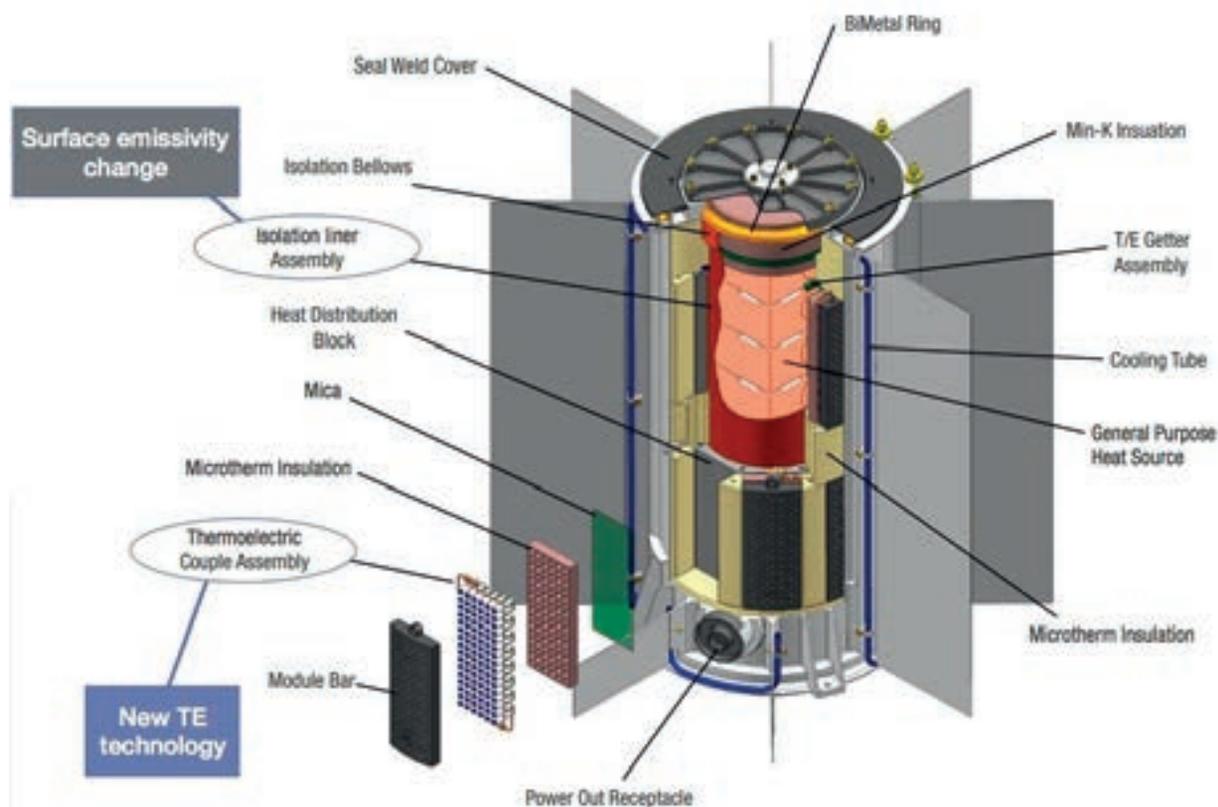


Figura 6 - Schema tipico di un Generatore RTG.

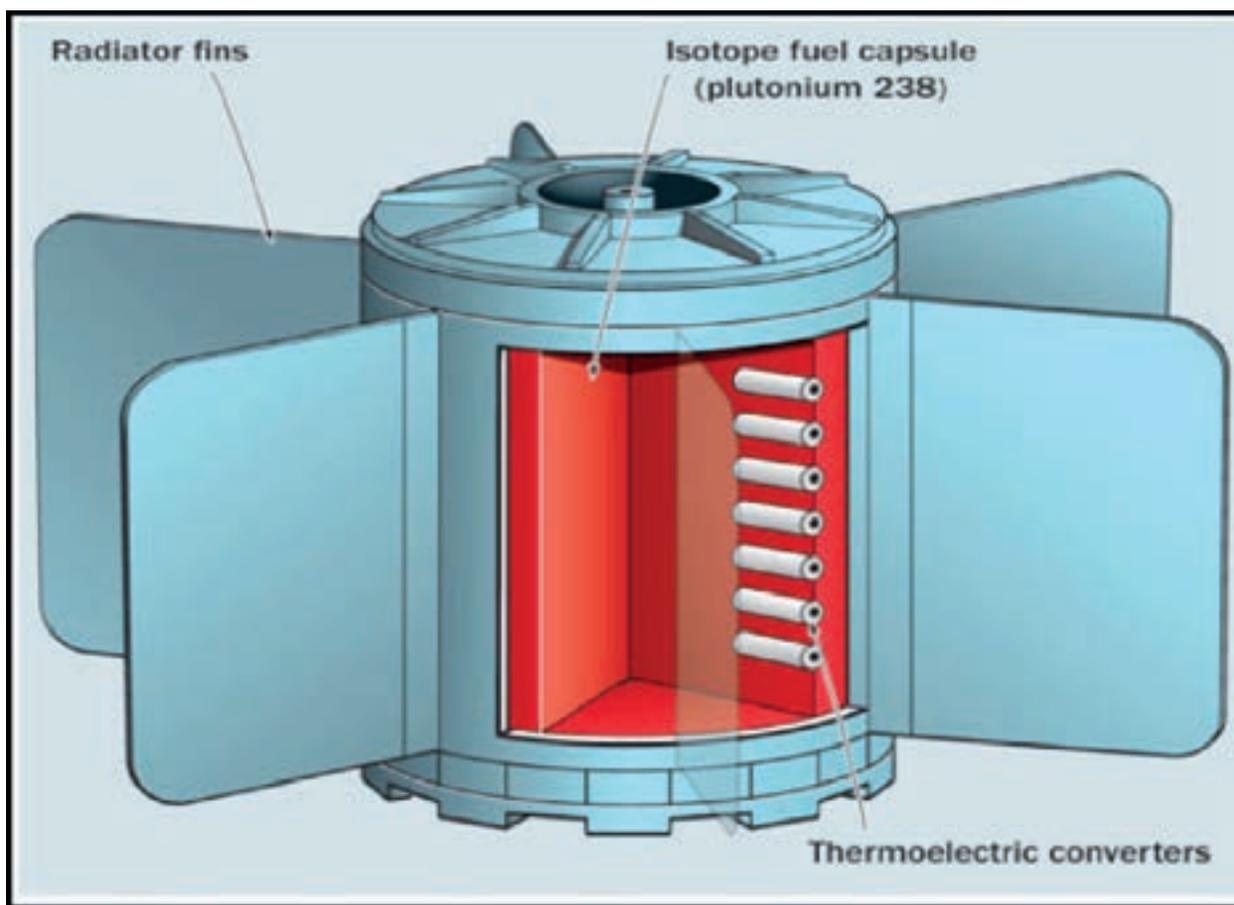


Figura 7 - Componenti principali di un TRG - (Credits: US Department of Energy).



Figura 8 - MMRTG su Mars Rovers, <https://buymarsrovers.com/>.

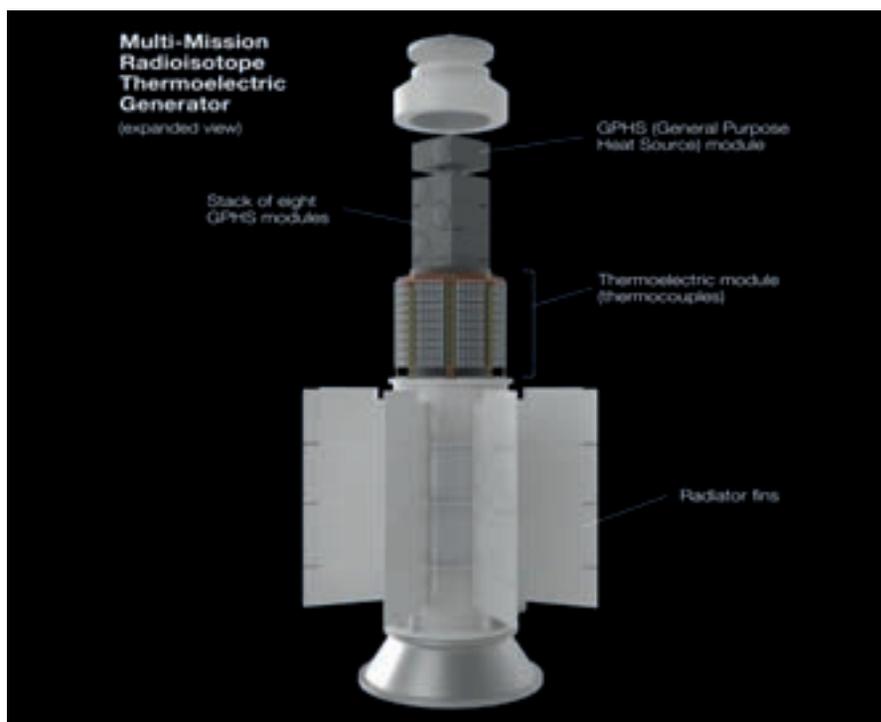


Figura 9 – MMRTG: Multi Mission Radioisotope Thermoelectric Generator.

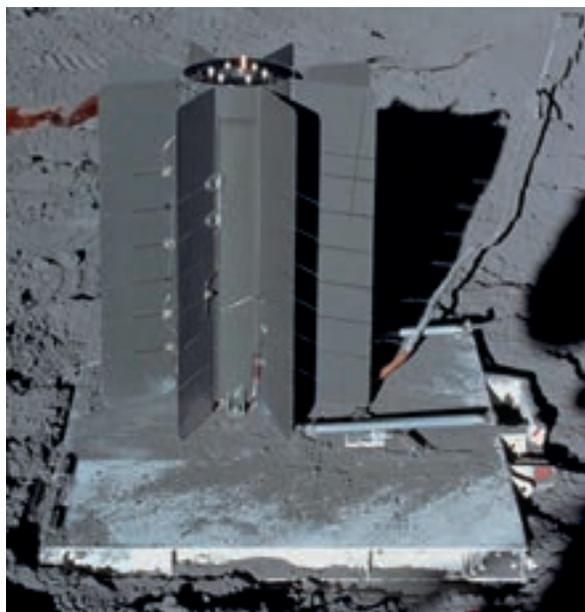


Figura 10 - SNAP-27 sulla Luna, Fonte NASA

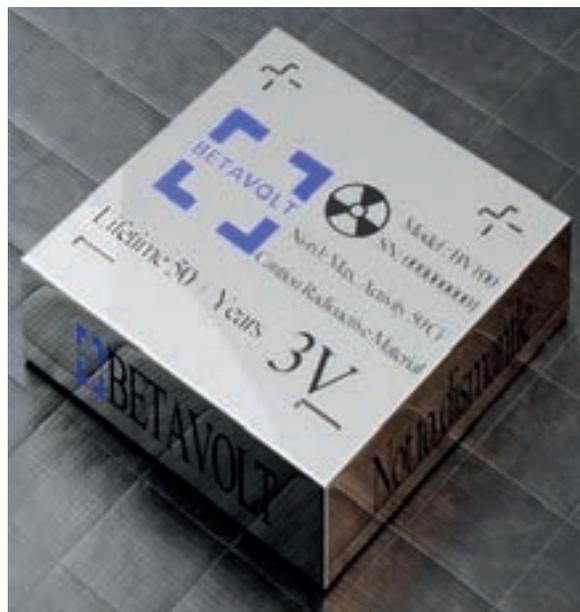


Figura 11 - Fonte: Betavolt.

- Impact Shell in grafite: protegge dagli impatti fisici;
- isolamento in fibra di carbonio legata al carbonio: fornisce isolamento termico;
- Aershell in tessuto traforato a trama

- fine: offre una protezione aggiuntiva.
4. termocoppie: si tratta di dispositivi costituiti da due metalli diversi che generano elettricità quando esposti a un gradiente di temperatura;

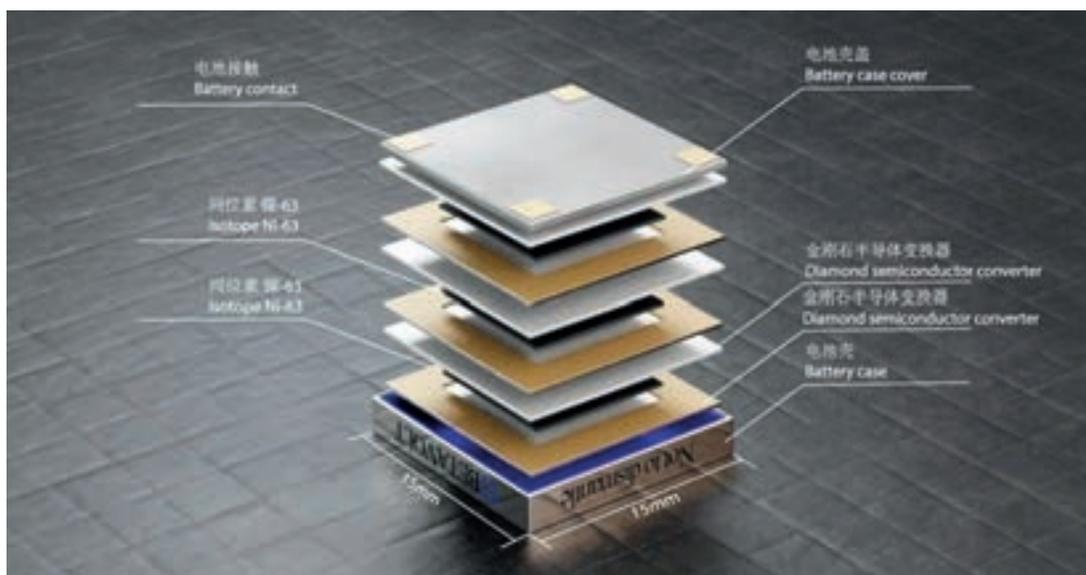


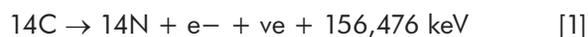
Figura 12 - Fonte: Betavolt.

5. dissipatore di calore: dissipa il calore in eccesso per mantenere il gradiente di temperatura attraverso le termocoppie.
- **Generatore termoelettrico a radioisotopi multimissione (MMRTG):** l'MMRTG è una versione avanzata dell'RTG, utilizzata in missioni come i rover Mars Curiosity e Perseverance. Ha una struttura simile ma con caratteristiche di efficienza e sicurezza migliorate.
 - **Batterie betavoltaiche.** Le batterie betavoltaiche utilizzano particelle beta emesse da una fonte radioattiva per generare elettricità. Ecco una struttura tipica:
 1. isotopo radioattivo: trizio o nichel-63;
 2. giunzione a semiconduttore: converte le particelle beta in corrente elettrica;
 3. incapsulamento: protegge il materiale radioattivo e garantisce la sicurezza.
 - **Schema costruttivo di una batteria nucleare al diamante:**
 1. isotopo Radioattivo: Il cuore della batteria è costituito da un isotopo radioattivo, come il carbonio-14. Questo isotopo è scelto per la sua lunga emivita e la capacità di emettere particelle beta durante il decadimento;
 2. diamante sintetico: L'isotopo radioattivo è incapsulato all'interno di un diamante sintetico. Il diamante è scelto per la sua durezza, resistenza e capacità di condurre

calore. Inoltre, il diamante è biocompatibile, il che lo rende sicuro per applicazioni mediche;

3. strato di conversione: Le particelle beta emesse dall'isotopo radioattivo interagiscono con il diamante, generando elettroni ad alta velocità. Questi elettroni sono catturati all'interno della struttura del diamante, convertendo l'energia del decadimento radioattivo in elettricità;
4. elettrodi: la batteria è dotata di elettrodi che raccolgono l'energia elettrica generata e la trasferiscono ai dispositivi esterni. Gli elettrodi sono collegati al diamante sintetico per garantire un flusso continuo di elettricità;
5. involucreo protettivo: l'intera struttura è racchiusa in un involucreo protettivo che isola la batteria dall'ambiente esterno e protegge l'isotopo radioattivo. Questo involucreo è progettato per essere resistente e sicuro, prevenendo qualsiasi fuoriuscita di radiazioni.

La batteria al diamante con carbonio-14 genera energia sfruttando il decadimento radioattivo del carbonio-14, che ha un'emivita di 5.700 anni.



Questa nuova tecnologia ha il potenziale per diventare una fonte di energia estremamente duratura,

particolarmente utile nei casi in cui la sostituzione delle batterie risulta complicata o comporta disagio.

1g ^{14}C \rightarrow 15 Joules /day circa 0,00018 W [2]

7. Isotopi alternativi

Un'altra opzione per migliorare gli RTG è cambiare la fonte di combustibile. Il ^{238}Pu è stata storicamente la scelta più popolare, ma esistono radioisotopi alternativi. Per essere efficaci negli RTG, queste alternative devono presentare le seguenti qualità:

1. buona densità di potenza, per tenere conto delle basse efficienze di conversione dell'energia;
2. lunga emivita, per fornire una potenza utile per una lunga durata;
3. bassi requisiti di schermatura, per la sicurezza e per ridurre le interferenze con gli strumenti scientifici;
4. elevato rapporto potenza/massa, per ridurre la massa totale della missione.

Il ^{238}Pu soddisfa tutti e quattro questi requisiti, mentre alternative come lo stronzio-90, il polonio-210 (utilizzato nei vecchi RTG russi) e il curio-242/244 non li soddisfano in una o più aree.

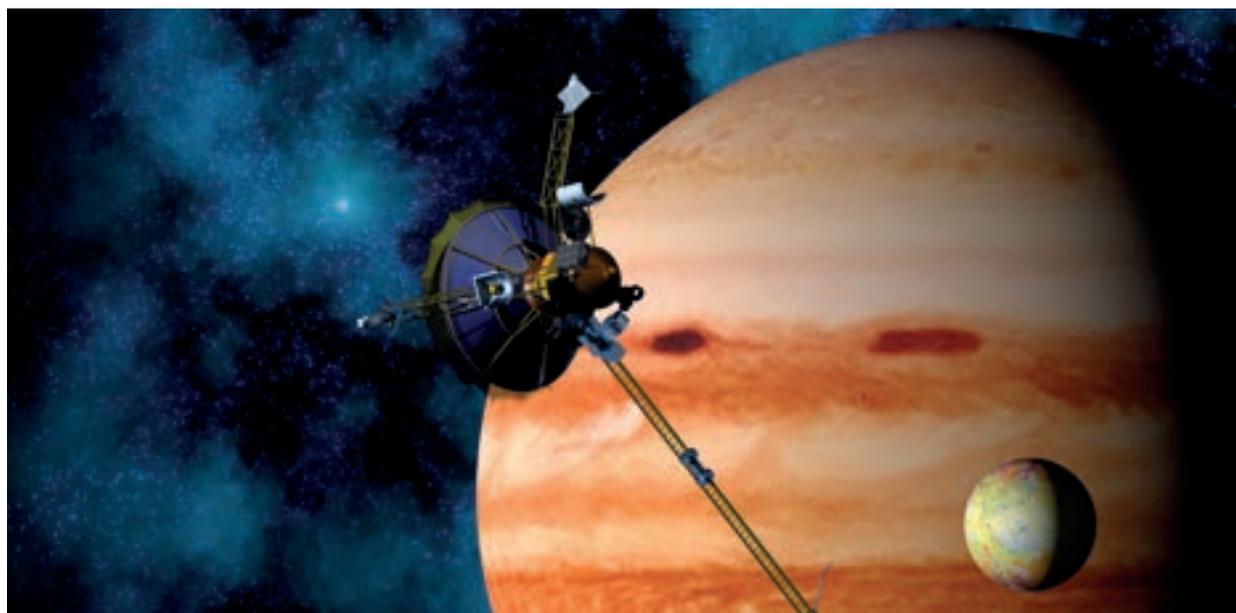
L'alternativa più promettente è l'americio-241 (^{241}Am). Favorito dall'Agenzia Spaziale Europea e attualmente utilizzato nei rilevatori di fumo e nei misuratori di umidità, il ^{241}Am è molto più abbondante perché è un sottoprodotto dei normali

reattori nucleari. Ha un'emivita di 432 anni rispetto agli 88 del ^{238}Pu , il che lo rende superiore nella categoria 2 di cui sopra. D'altra parte, soffre nelle categorie 1 e 3: ha circa un quarto della densità di potenza di ^{238}Pu (0,15 Watt per grammo contro 0,56) ed emette alti livelli di radiazioni gamma, una forma di radiazioni ionizzanti più pericolosa di quella prodotta da ^{238}Pu . Se i futuri RTG riusciranno a migliorare l'efficienza compensando la ridotta densità di potenza del ^{241}Am , l'americio potrebbe diventare una fonte di combustibile più usata.

8. Conclusioni

È stato fornito un panorama, certamente non esaustivo, dell'uso di batterie nucleari in ambito spaziale, con la descrizione dell'architettura tipo e dei principali radioisotopi utilizzati, puntualizzando anche i rischi associati con una descrizione di alcuni incidenti noti avvenuti. Le batterie nucleari hanno consentito e consentono missioni spaziali che altrimenti avrebbero seri problemi energetici per operare. L'esperienza ha consentito nel tempo di trovare soluzioni sempre più sicure nel gestire i rischi associati a potenziali contaminazioni radioattive, progettando generatori termoelettrici a radioisotopi sempre più resistenti a potenziali incidenti.

In molti casi, i radioisotopi sono sottoprodotti di altri esercizi nucleari e quindi consentono il riutilizzo del combustibile irraggiato, precedentemente considerato solo una scoria.





a cura di:

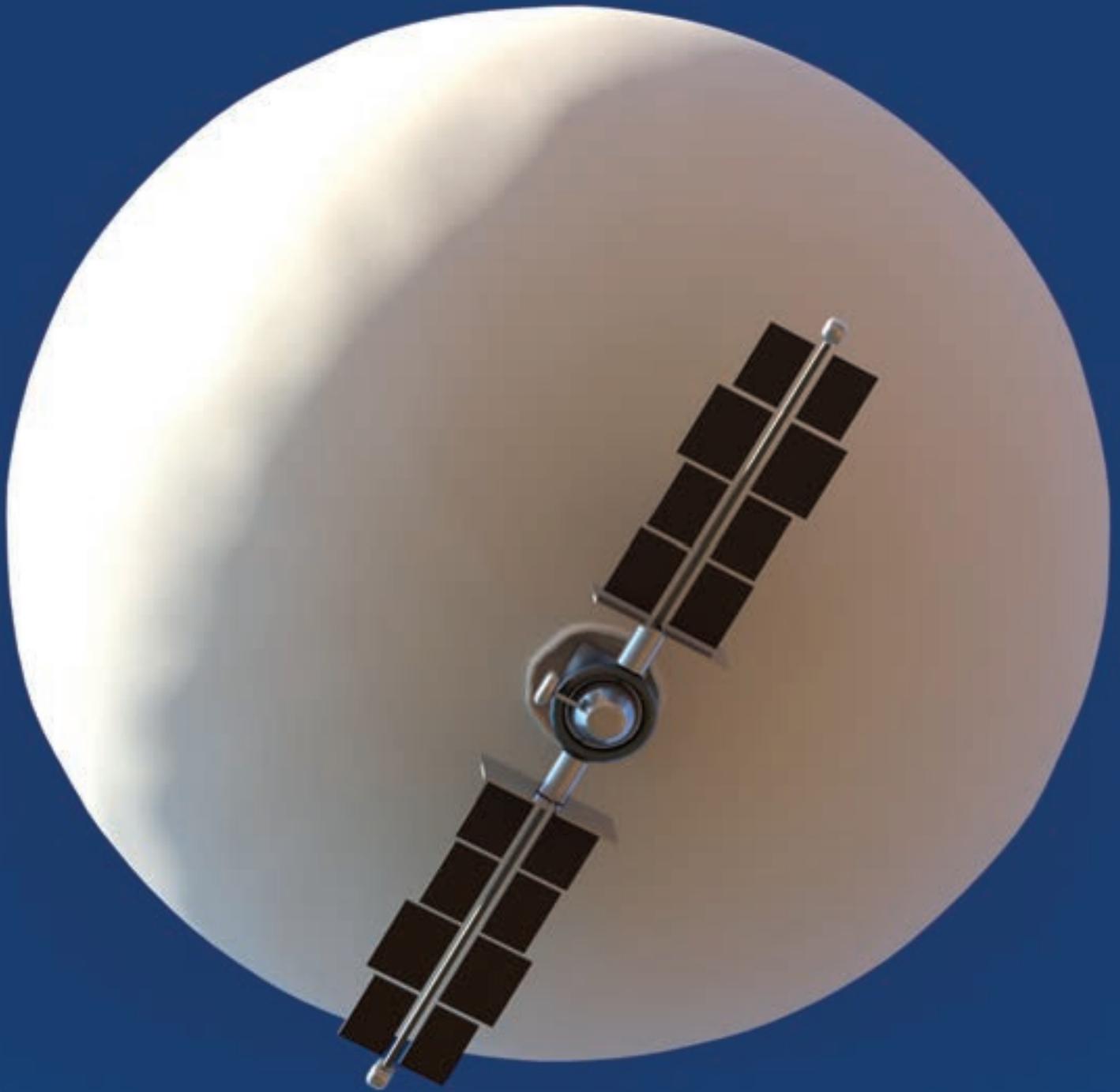
ING. R. CAPUA, ING. G. NICOLAI, ING. M. BRANCATI, ING. G. GASBARRONE, ING. G. PANARIELLO

Revisionato da:

ING. G. NICOLAI

Commissione:

NAVIGAZIONE SATELLITARE (GNSS) ED ESPLOAZIONE DELLO SPAZIO E TELECOMUNICAZIONI E TRANSIZIONE DIGITALE



**EVOLUZIONE DELLE RETI NTN
INTEROPERABILI CON LE RETI TERRESTRI**

Introduzione al Concetto NTN: le reti non terrestri, Non-Terrestrial

I Networks (NTN), sono reti o segmenti di rete che utilizzano infrastrutture aerospaziali per la trasmissione dei segnali.

Tali infrastrutture includono UAS (Uncrewed Aircraft Systems) operanti fra 8 e 50 Km, HAPS (High Altitude Platform Station, come i palloni stratosferici) e satelliti a differenti orbite: LEO (Low Earth Orbit), MEO (Medium Earth Orbit), GEO (Geostationary Earth Orbit) e HEO (High Elliptical Orbits).

Una rappresentazione dei componenti di una rete NTN è riportata in Figura 1.

Le reti NTN si stanno evolvendo nell'ambito dello standard ETSI 3GPP. Lo scopo è di supportare il 5G New Radio (NR-NTN) e le comunicazioni a basso data rate per sistemi IoT (IoT-NTN).

I casi d'uso più frequenti per le Reti NTN sono:

- ottimizzazione del traffico, hotspot on demand in zone remote, resilienza di rete ed emergenza, accesso wireless fisso;
- gestione dei disastri;
- resilienza di rete ed emergenza, accesso

wireless fisso, connettività WAN, Public Protection and DisasterRelief (PPDR);

- backhaul per PPDR ed emergenza, connettività WAN;
- applicazioni Aeronautiche, marittime, hotspot remoti.

1. Migrazione Reti NTN verso lo standard ETSI 3GPP

La migrazione riguarda gli aspetti del livello fisico, i protocolli e l'architettura, nonché la gestione delle risorse radio, i requisiti RF e le bande di frequenza da utilizzare.

L'attenzione principale è rivolta all'architettura del payload trasparente, con aree di tracciamento fisse sulla terra e sistemi di duplexing a divisione di frequenza (FDD) in cui si presume che tutte le UE abbiano capacità di navigazione satellitare GNSS (Global Navigation Satellite System).

In termini di servizio, la visione del 3GPP si articola in due scenari di distribuzione e servizio:

- supporto di 5G NR per NTN (NR-NTN), principalmente per servizi di banda larga mobile;
- supporto per bassa velocità di trasmissione

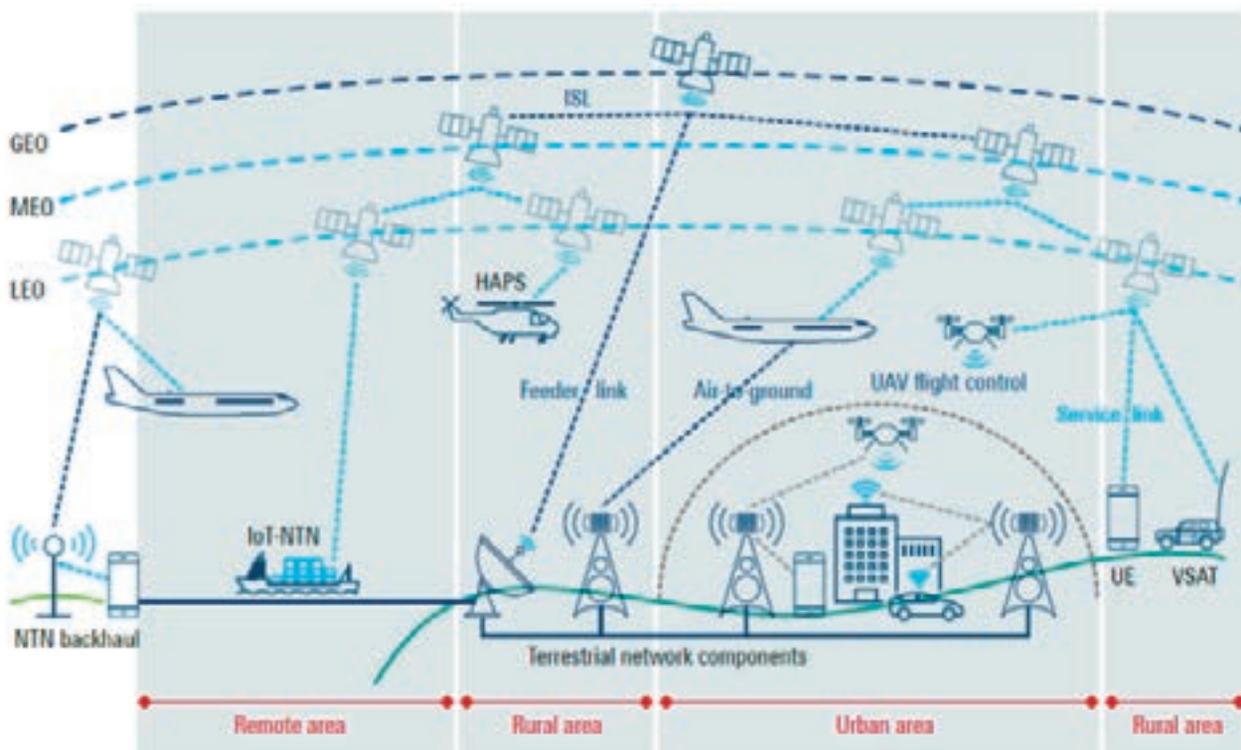


Figura 1 – I componenti delle reti NTN

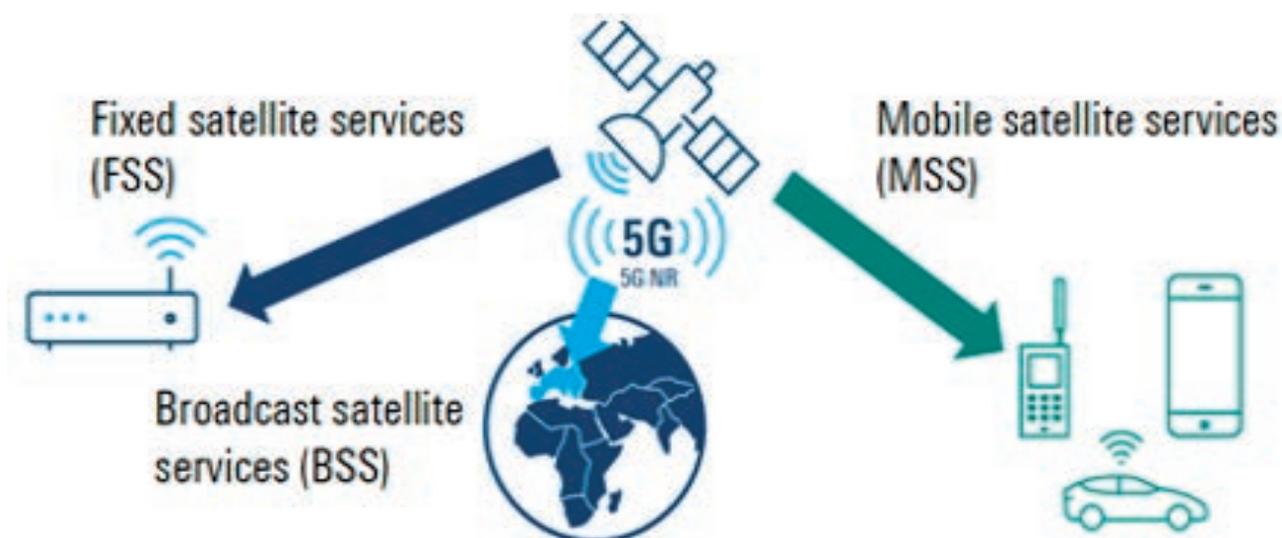


Figura 2 – Casi d'uso per le Reti NTN

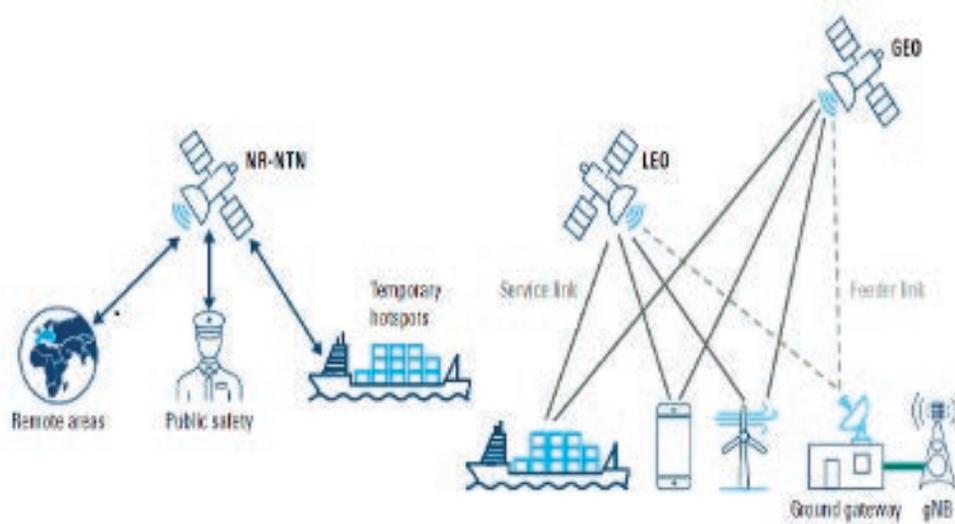


Figura 3 – Primo Scenario di Servizio New Radio - Non-Terrestrial Networks

dati, principalmente Internet of Things (IoT) via satellite (IoT - NTN).

2. La standardizzazione NTN in ETSI 3GPP

Lo scopo del 3GPP nello studio di integrazione delle reti NTN nel sistema 5G è di creare uno standard aperto per una Radio Access Technology che consenta agli operatori mobili, ai realizzatori di sistemi e dai produttori di terminali di incorporare tale infrastruttura nei loro servizi. Il 3GPP ha cominciato tali analisi all'interno della

Release 15, focalizzandosi sui modelli di canale e sugli scenari di sviluppo futuro. Nella release 16 sono cominciati gli studi per l'integrazione del 5G NR (New Radio) a supporto delle reti NTN. L'obiettivo principale è identificare le funzionalità da implementare nel Physical Layer.

La release 17 si è concentrata sull'analisi delle estensioni necessarie per l'introduzione di costellazioni LEO e GEO all'interno dell'NTN, traguardando un supporto specifico per piattaforme HAPS ed ha introdotto l'approccio per la determinazione dell'integrità nel posizionamento GNSS.

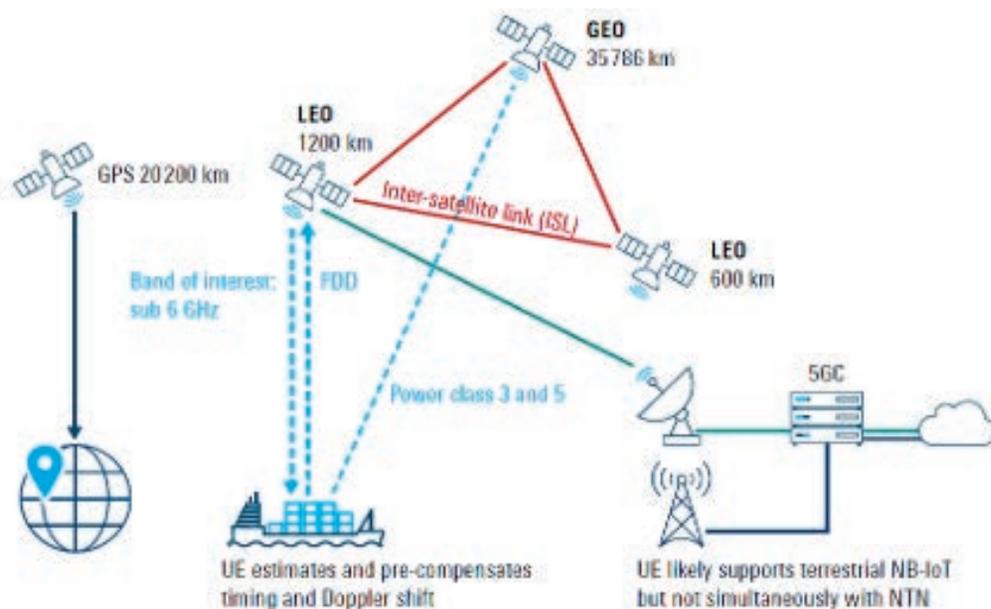


Figura 4 – Secondo Scenario di Servizio Internet of Thing - Non-Terrestrial Networks

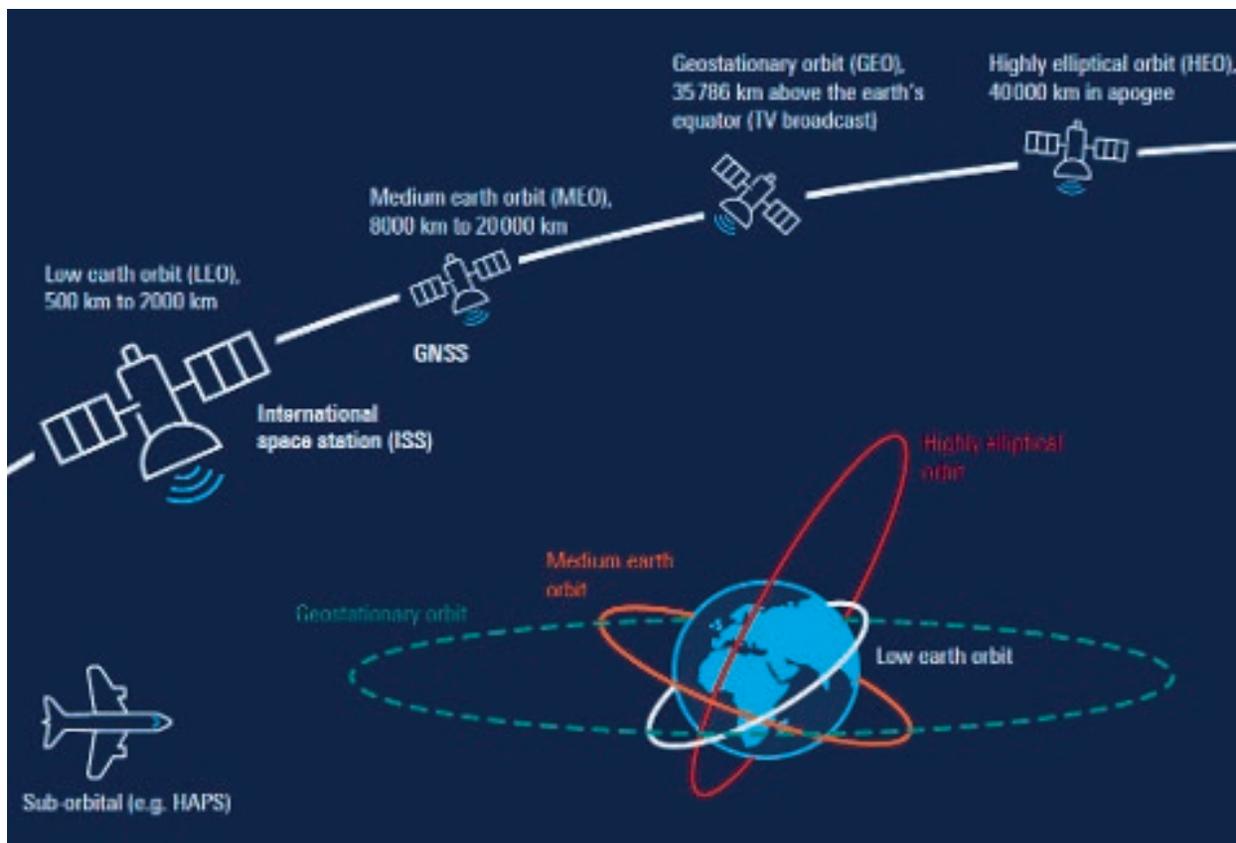


Figura 5 – Costellazioni Satellitari considerate per le Reti NTN 5G

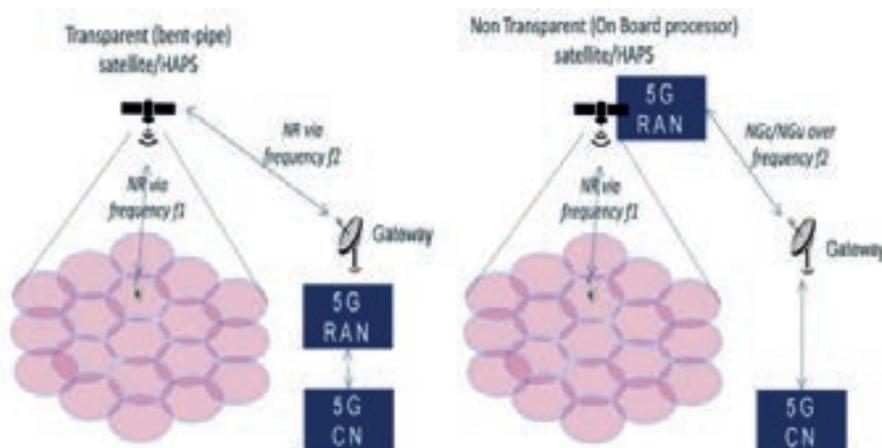


Figura 6 – Payload Trasparenti e Rigenerativi per le Reti NTN 5G

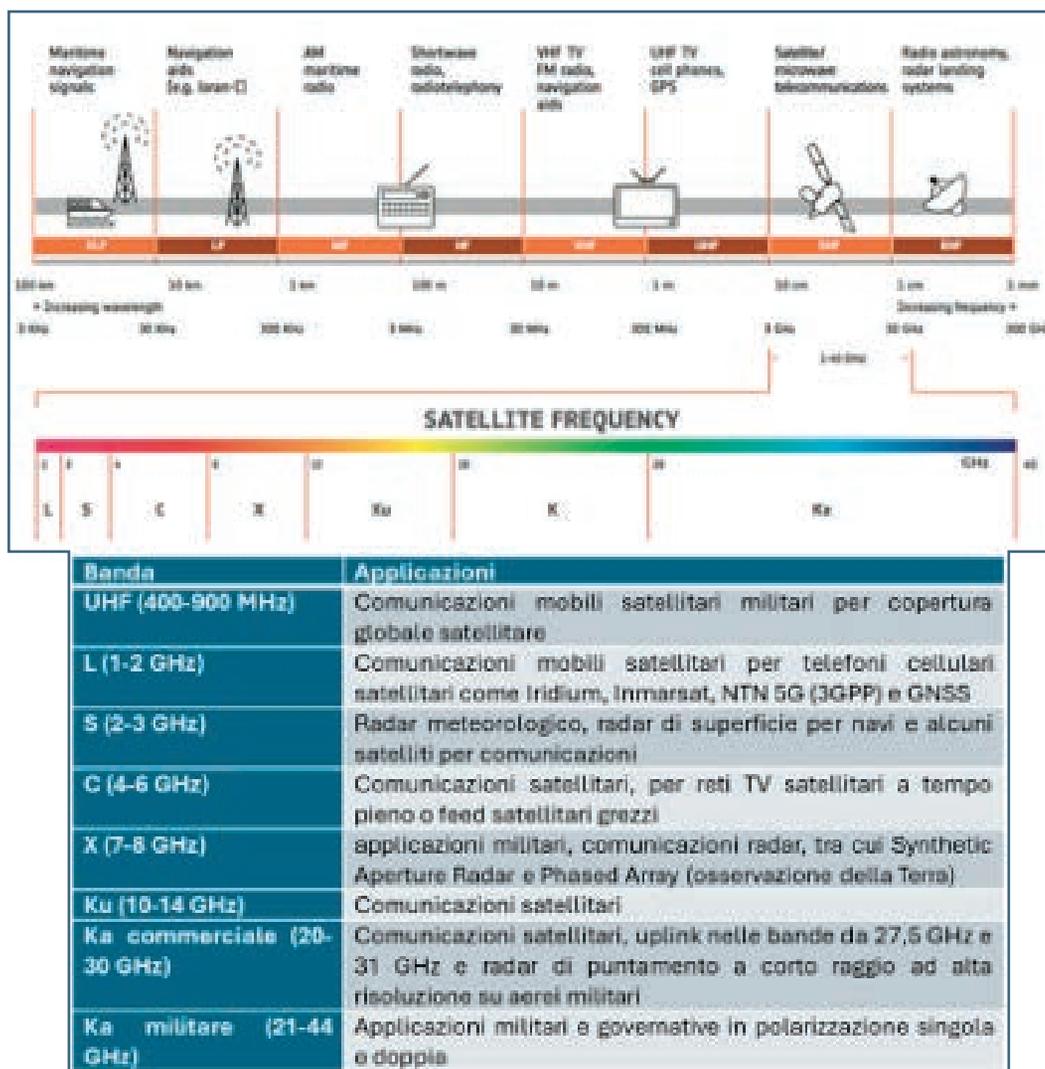


Figura 7 – Frequenze considerate nello Standard 3GPP

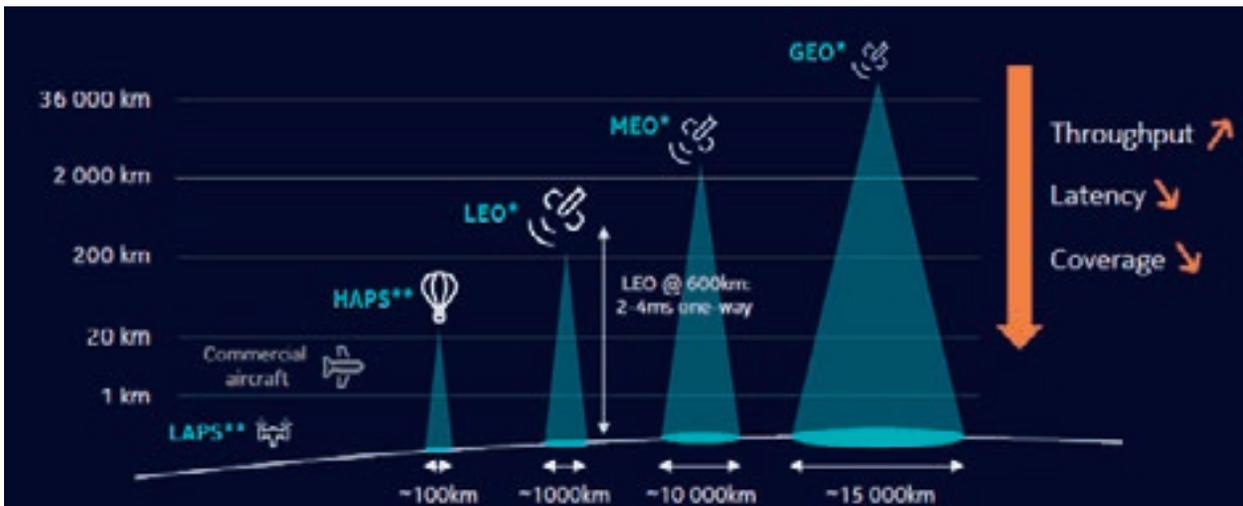


Figura 8 – Copertura delle reti NTN

La release 18 ha infine finalizzato l'estensione dell'NTN al 5G via satellite, con ulteriori specifiche in termini di utilizzo dei sistemi GNSS e delle relative misure di fase.

3. Le Costellazioni Satellitari NTN 5G

Le Costellazioni considerate nelle reti NTN 5G sono le seguenti:

- LEO: orbite circolari ad un'altezza fra 500 e 2000 km, con ritardo di trasmissione ridotto ed un elevato numero di satelliti per l'erogazione del servizio;
- MEO: orbite circolari ad un'altezza fra 8.000 e 20.000km;
- GEO: orbite circolari ad un'altezza di 35.786 km;
- HEO: orbita ellittica intorno alla terra.

Si possono distinguere due tipi di payload:

- Payload Non-Rigenerativi (modalità trasparente): piattaforma satellitare senza capacità di elaborazione del segnale a bordo, con ricezione della portante dall'uplink, filtraggio, amplificazione e ritrasmissione in downlink;
- Payload rigenerativi (modalità non-trasparente): piattaforma satellitare che, oltre a filtraggio e conversione di frequenza, possiede anche capacità di elaborazione a bordo (demodulazione e modulazione, routing), potendo funzionare come una base station.

Le frequenze considerate nello standard 3GPP sono mostrate in Figura 7.

4. Stato dell'Arte delle Reti NTN

Esistono diverse costellazioni LEO operative od in via di sviluppo. Si riporta un elenco non esaustivo con le relative caratteristiche tecniche:

- SpaceX Starlink: Starlink è un sistema dell'azienda americana Space X, con attualmente circa 7000 satelliti in orbita e una pianificazione di lungo termine fino a 40000 satelliti ed un'altezza di circa 1300 km. Il terminale utente Starlink è dotato di un'antenna Phased Array. Starlink è in grado di fornire un collegamento con throughput fino a 93 Mbps, 16 GBps per satellite ed un ritardo di trasmissione dell'ordine di 31 ms. Operativo;
- OneWeb: OneWeb era originariamente un'azienda inglese, con l'obiettivo di lanciare 660 satelliti LEO ed un'altezza di 1207 km con copertura anche delle zone polari, contrariamente a Starlink e Kuiper. Dal 2023 è diventata parte di EUTELSAT. 534 satelliti sono stati resi disponibili prima dell'acquisizione. A regime sono previsti circa 2000 satelliti. Mercato di destinazione: principalmente clienti aziendali e governativi. Bande di frequenza: antenne in banda Ku. Velocità: paragonabile alla banda larga DSL. A seconda dell'ODU fino a 120 Mbps/40 Mbps MIR, CIR disponibile su richiesta. Operativo;
- Amazon Kuiper: Kuiper è un'azienda americana, che ha come obiettivo il lancio di 3236 satelliti LEO, con un'altezza fra 590 km e 630 km. IL data rate può raggiungere 400 Mbps.

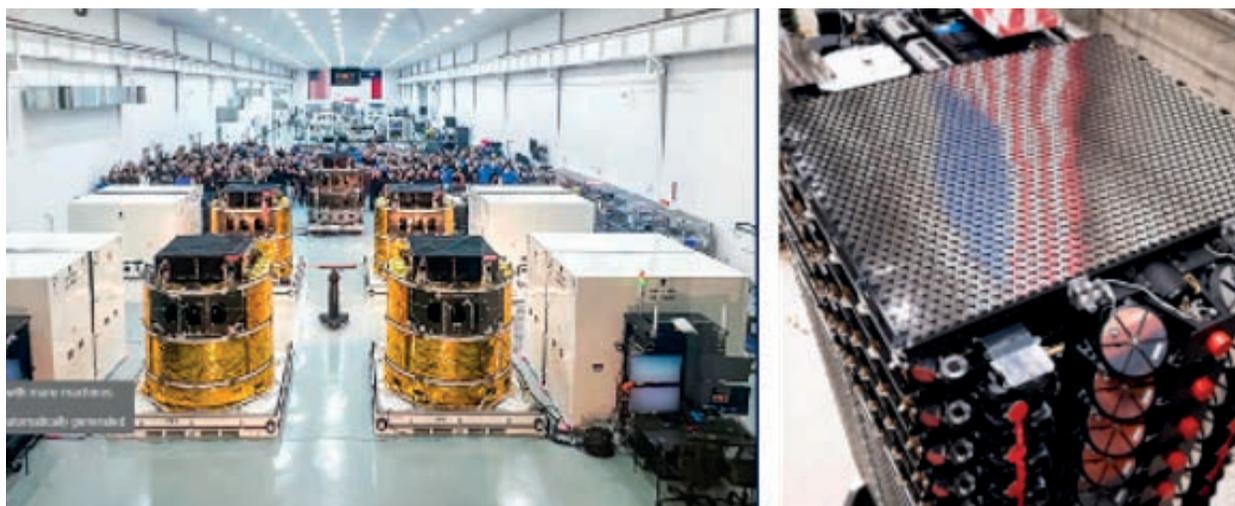


Figura 9 – I Satelliti Bluebird AST in catena di montaggio (sinistra) ed antenne Phased Array di Starlink (destra)

Il terminale utente è dotato di un'antenna phased-array. Pianificato;

- Telesat Lightspeed: Telesat è un'azienda canadese ed attualmente la quarta più grande costellazione, con l'obiettivo di fornire collegamenti Internet tramite 298 satelliti LEO, con altezze a 1015 e 1325 km. La configurazione satellitare garantisce copertura globale. Pianificato.

5. Copertura 5G con reti NTN

Le reti NTN consentono l'implementazione di una pletera di servizi, con la copertura riportata in Figura 8.

La copertura delle costellazioni LEO con orbite a 600 km di altezza è mediamente di 1000 km, con latenze di 2-4 ms e maggior throughput delle costellazioni MEO e GEO, che garantiscono di converso una migliore copertura a Terra.

Si prevede che le reti NTN saranno un fattore abilitante per una pletera di casi d'uso, che includono:

- ubiquitous connectivity per diverse classi di utenza e scenari operativi;
- comunicazioni per IoT (es. asset tracking, agricoltura);
- gestione delle emergenze;
- comunicazioni per la difesa;
- cloud e WAN supportate dalle comunicazioni spaziali;
- distribuzione da satellite su scala globale delle chiavi quantistiche.

L'utilizzo delle comunicazioni satellitari su smartphone implica vincoli tecnologici legati a shift in

frequenza e temporali, maggiori latenze e necessità di gestire gli handover per utenti in mobilità.

Nelle release prima della 17ETSI non prevedeva una differenziazione dei terminali utente e la gestione NTN era effettuata totalmente dalla rete. Parte della gestione del segnale NTN è stata spostata sul terminale utente. Il dato di posizionamento dell'utente, necessario per la gestione del servizio, ha reso obbligatoria l'integrazione del GNSS nei terminali.

Dalla release 17 in poi è iniziata l'integrazione fra TN ed NTN a livello di rete, aumentando la copertura totale dei sistemi con l'utilizzo di bande ad alta frequenza (es. in banda Ku, oltre i 10 GHz).

I servizi per i terminali utente che i singoli produttori stanno per implementare vanno da messaggistica vocale, al Narrow Band IoT e comunicazioni a larga banda supportate dal backhaul satellitare. Nel segmento spaziale, l'utilizzo di antenne Phased Array per costellazioni LEO sta permettendo l'implementazione di sistemi evoluti di gestione della copertura del servizio. Oltre Starlink, anche AST ha lanciato 5 satelliti Bluebird a Settembre 2024, con Phased Array di 64 m² (Figura 9).

L'utilizzo di antenne Phased Array a bordo dei satelliti ha consentito un aumento del guadagno e, tramite la maggior selettività delle celle di copertura a terra, l'erogazione di servizi con una più alta densità. Le sfide tecnologiche riguardano le complessità nell'inseguimento dei satelliti ed il degradamento di affidabilità dovuto all'attraversamento del segnale per turbolenze atmosferiche.

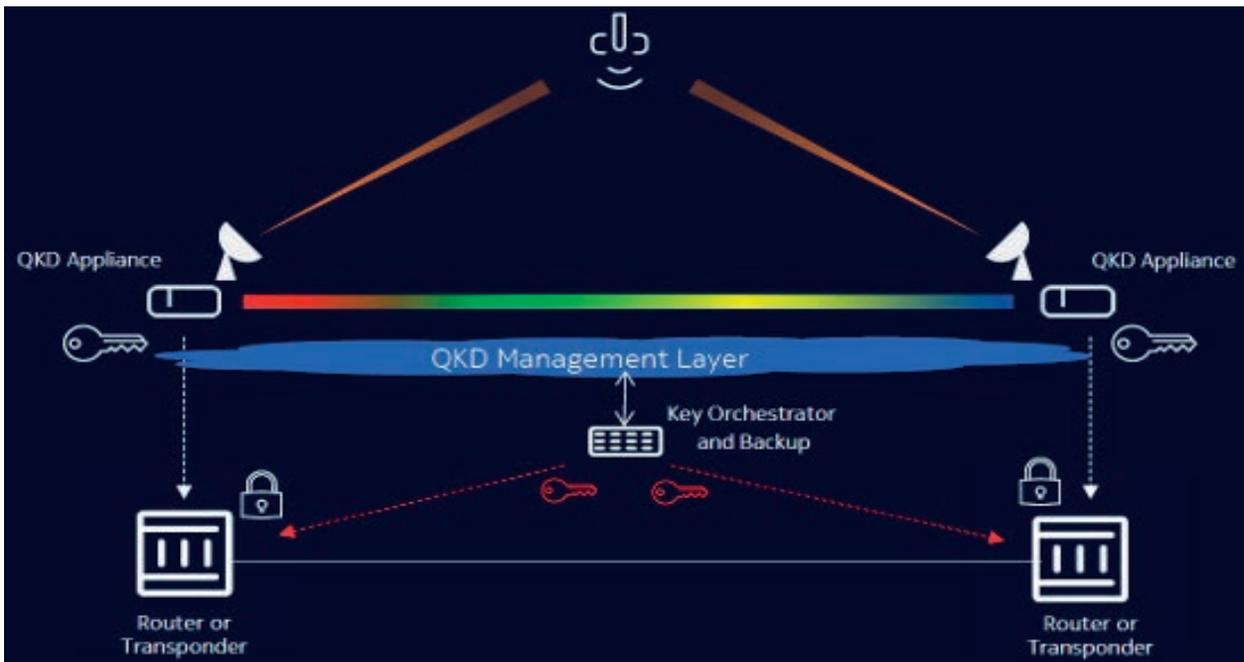


Figura 10 – Quantum Key Distribution

Table 1: 3GPP Summary of Positioning Methods (TS38.305)

Method	UE based	UE-assisted, LMF-based	NG-RAN node assisted	SUPL ^{#8}
A-GNSS	Yes	Yes	No	Yes
OTDOA ^{#1, #2}	No	Yes	No	Yes
E-CID ^{#3, #7}	No	Yes	Yes	Yes for E-UTRA
Sensor	Yes	Yes	No	No
WLAN	Yes	Yes	No	Yes
Bluetooth	No	Yes	No	No
TBS ^{#4}	Yes	Yes	No	Yes (MBS)
DL-TDOA	Yes	Yes	No	Yes
DL-AoD	Yes	Yes	No	Yes
Multis RTT	No	Yes	Yes	Yes
NR E-CID	No	Yes	Yes	Yes (DL NR E-CID)
UL-TDOA	No	No	Yes	Yes
UL-AoA	No	No	Yes	Yes

#1: This includes TBS positioning based on PRS signals.
 #2: In this version of the specification only OTDOA based on LTE signals is supported.
 #3: Void
 #4: This includes Cell-ID for NR method when UE is served by gNB.
 #5: In this version of the specification only for TBS positioning based on MBS signals.
 #6: Void
 #7: Enhanced Cell-ID based on LTE signals.
 #8: This shows whether the positioning method is supported by SUPL/ULP.

Figura 11

I sistemi satellitari consentiranno, inoltre, la distribuzione di chiavi per criptaggio quantistico delle comunicazioni QKD (Quantum Key Distribution) (Figura 10).

6. Sistemi di Navigazione Satellitare assistiti dalle reti NTN

I sistemi di posizionamento satellitare GNSS non consentono una copertura globale in zone a

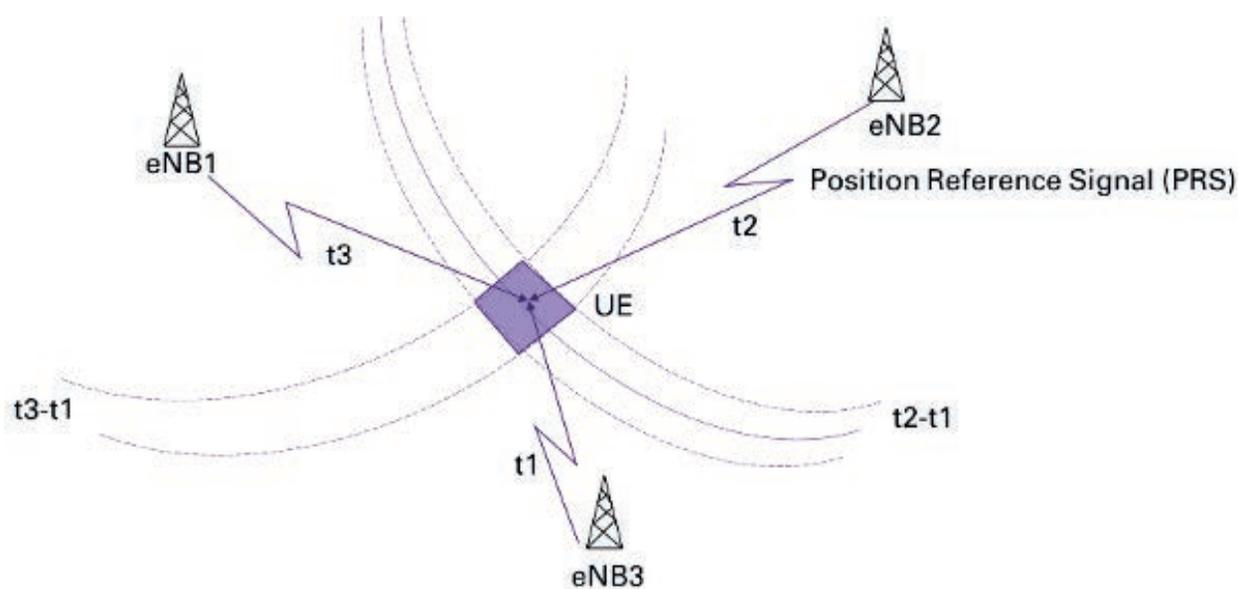


Figura 12 – Il concetto di posizionamento Terrestre OTDOA

visibilità ridotta (es. urbane) ed in presenza di interferenze occasionali od intenzionali (jamming o spoofing).

È, dunque, necessario pensare all'integrazione di diversi sistemi di posizionamento terrestri e satellitari, che consentano di ottenere il dato di posizionamento in ogni situazione ambientale (indoor, outdoor, zone coperte da vegetazione, zone a scarsa visibilità di satelliti). Tale concetto esteso di posizionamento è denominato PNT (Positioning Navigation and Timing).

6.1 Il posizionamento GNSS nello Standard ETSI

Le versioni precedenti dello standard ETSI 3GPP hanno sostanzialmente definito le funzioni di assistenza AGNSS (trasmissione effemeridi, errori di clock e messaggi di *augmentation*), per aiutare gli utenti GNSS a ridurre il tempo necessario per il posizionamento ed aumentare la precisione della posizione.

La release 16 ha introdotto il posizionamento tramite celle singole o multiple. È stato introdotto il segnale PRS (Positioning Reference Signal), da utilizzare con diverse tecniche di posizionamento 5G, tra cui Roundtrip Time (RTT), Angle of Arrival/Departure (AoA/AoD) e Time Difference of Arrival (TDOA). I sistemi di posizionamento terrestri tramite sono riassunti in Figura 11.

L'OTDOA (Observed Time Difference Of Arrival) è una tecnica di posizionamento tramite multilaterazione, introdotta nella Rel9 E-UTRA (radio LTE) rappresentata in Figura 12, in cui l'utente (UE) misura la differenza di tempo tra segnali dedicati (e.g. Position Reference Signal nel 5G) trasmessi da diversi eNodeB ed invia tali misure al componente architetturale della rete ESMC (vedi Figura 13). L'ESMC, tramite tali misure e la conoscenza delle posizioni degli eNodeB, calcola la posizione degli UE.

La release 17 ha introdotto:

- il posizionamento indoor di precisione per IoT industriale;
- messaggi di assistenza per il posizionamento in tempo reale ad alta di integrità.

La release 18 prevede che i componenti architetturali GMLC ed LMC (Location Management Function) siano dedicati al supporto dei servizi di localizzazione in un'area locale con le seguenti funzionalità:

- raccolta e fornitura di dati per AGNSS;
- continuità di localizzazione per servizi di mobilità;
- posizionamento a bassa potenza e alta precisione;
- sidelink (posizionamento cooperativo tramite

scambio di informazioni tra utenti, richiesto dall'automotive);

- New Radio Carrier Phase;
- RedCap (Reduced Capability), richiesto dall'IoT.

Le componenti funzionali incaricate del posizionamento ed i loro ruoli sono descritte in Figura 13.

6.2 Vantaggi e Svantaggi dei sistemi LEO-PNT per il Posizionamento Satellitare

I maggiori vantaggi di un sistema di posizionamento basato su satelliti LEO sono:

- crescente interesse commerciale nei servizi di comunicazione LEO;
- maggiore larghezza di banda, migliore accuratezza e tempo di acquisizione ridotto;
- maggior SNR;
- geometria satellitare migliore e più dinamica rispetto al GNSS MEO;
- effetti ionosferici ridotti;
- frequenti cambiamenti satellitari e decorrelazione del multipath.

Di converso, le limitazioni del LEO-PNT sono:

- maggior effetto Doppler;

- frequenti handover tra satelliti;
- dati per sistemi AGNSS, da inviare tramite LMF, configurabili dinamicamente.

I sistemi LEO-PNT prevedono diverse tendenze, tra i quali l'utilizzo dei LEO come ripetitori dei segnali GNSS MEO e l'aumento della resilienza del GNSS tramite LEO-PNT, come sistema secondario di posizionamento.

7. L'interoperabilità dei sistemi satellitari con le reti Terrestri

Le comunicazioni satellitari possono giocare un ruolo significativo nello sviluppo del 5G ed aumentare la copertura e capacità in zone urbane ed aree remote, con un sistema di connettività sicuro e resiliente.

Il mercato delle comunicazioni satellitari è cresciuto negli ultimi due anni, grazie all'integrazione delle NTN nella release 17 di ETSI 3GPP.

Si stima che 91 operatori di comunicazioni, per un totale di circa 5 miliardi di connessioni, abbiano stretto partnership con operatori satellitari.

Con l'avvento dell'IoT, la fusione dei sistemi di comunicazione terrestri e satellitari dovrà implementare sistemi a banda larga e bassa latenza, per consentire lo sviluppo di nuove applicazioni per Smart

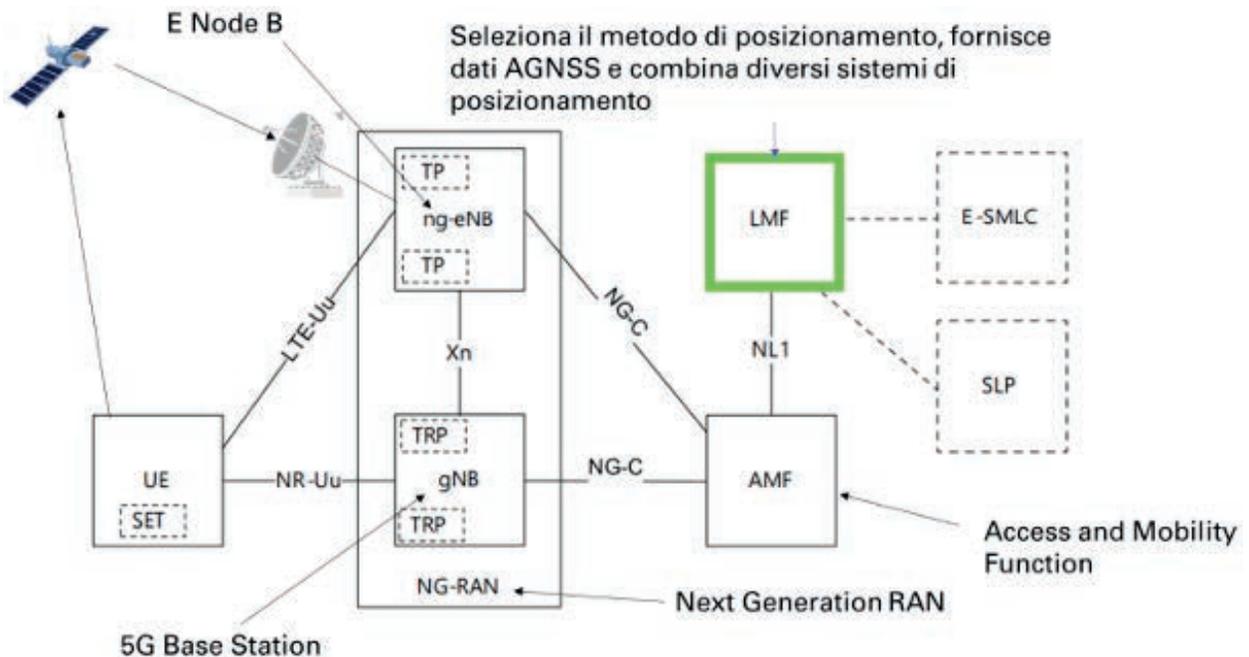


Figura 13 – il PNT nell'architettura ETSI 3GPP

5G: the fusion of evolutionary radio technologies for three types of applications

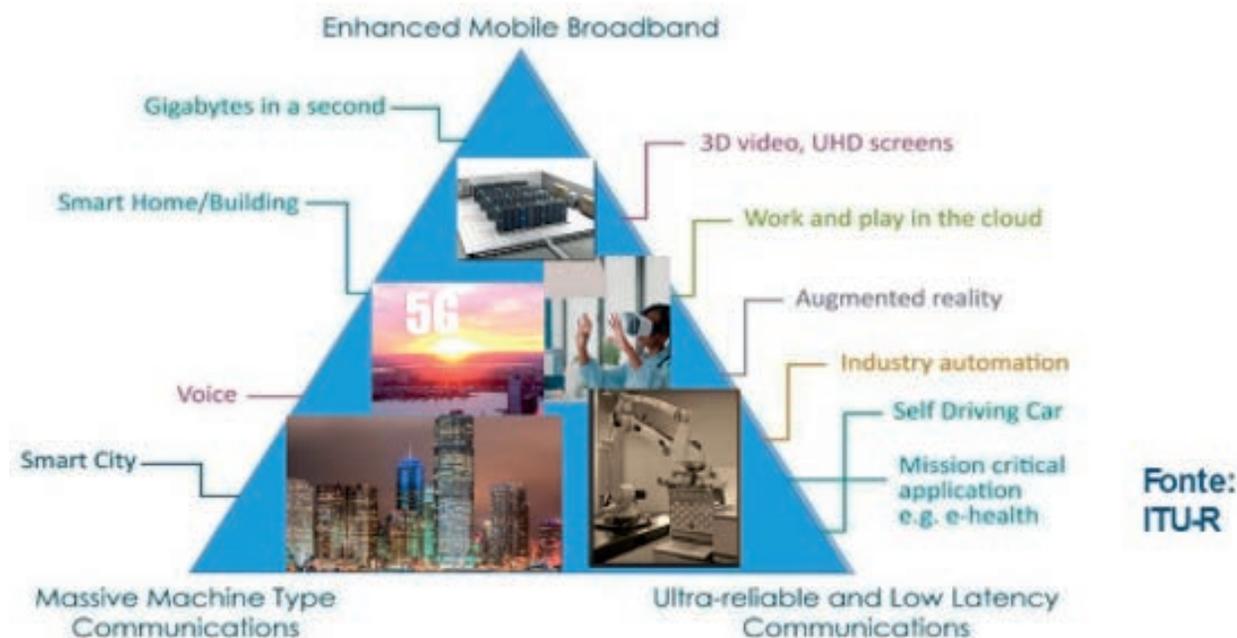


Figura 14 – Prospettive dell'International Mobile Telecommunication (Fonte: ITU-R)

City, Guida autonoma, realtà aumentata e applicazioni a rischio vita e di telemedicina (vedi Figura 14). Per soddisfare le esigenze industriali e di mercato, l'Unione internazionale delle telecomunicazioni (ITU) ha classificato il 5G in comunicazioni ultra-affidabili a bassa latenza (URLLC-Ultra Reliable Low Latency Communications), banda larga mobile "enhanced" (eMBB) e comunicazioni massive IOT di tipo M2M (mMTC).

Inoltre, lo slicing 5G è in grado di integrare reti indipendenti in un'unica rete, soddisfacendo i requisiti di latenza e larghezza di banda, e supportare architetture Cloud.

Tradizionalmente, le reti mobili sono costituite da una rete di trasporto cablata e wireless, che veicola il traffico da e verso la RAN (Radio Access Network). Lo slicing, applicando i concetti di Software-Defined Networking, consente di realizzare reti virtuali sulla stessa infrastruttura fisica di accesso e trasporto.

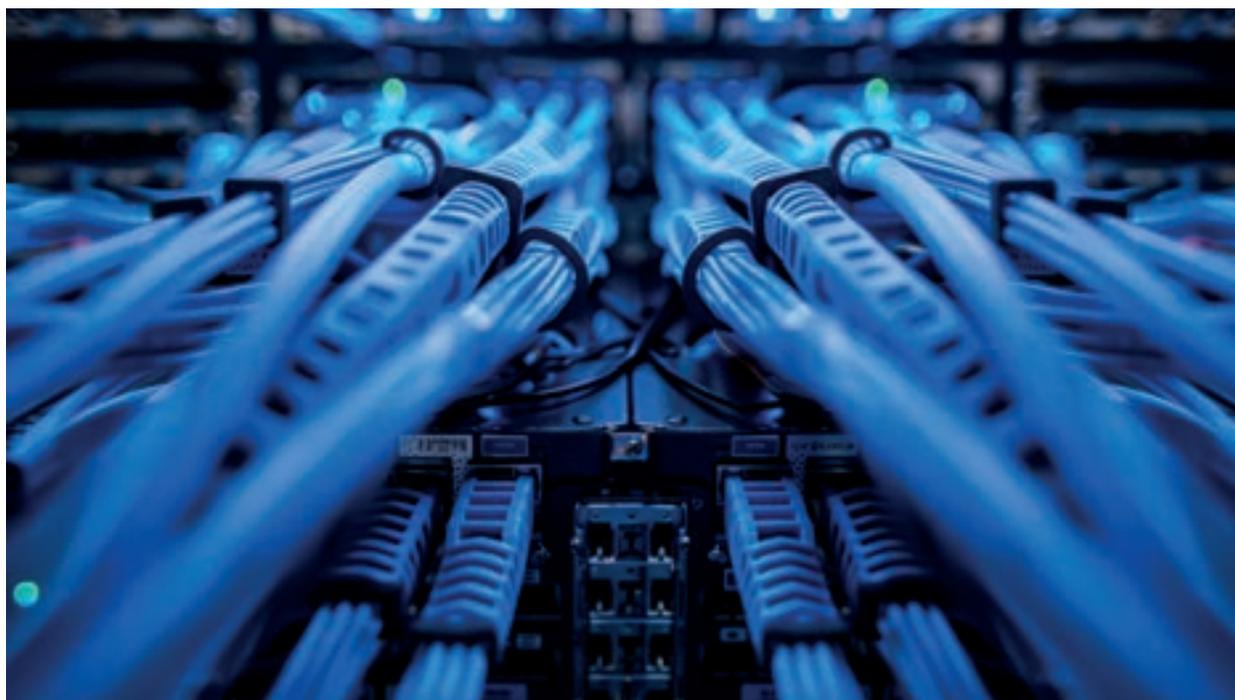
Il network slicing, nella parte di trasporto, è effettuato tramite la virtualizzazione delle funzioni di rete (NFV, Network Function Virtualization), che vengono eseguite in cloud.

Lo slicing associa ad ogni singola fetta alcune specifiche regole di gestione del traffico nella parte radio. Tramite il concetto di Cloud-RAN è possibile fornire connessioni massive con diversi standard e implementazioni di RAN on-demand.

I vantaggi della rete 5G sono molteplici per lo sviluppo di applicazioni verticali. In ambito IOT (es.e-health, smart factory e smart city) il 5G è in grado di supportare una densità fino a 100 volte più dispositivi connessi per unità di area rispetto alle precedenti tecnologie mobili e un migliore utilizzo dell'energia della rete in termini di consumi, con innegabili vantaggi nella durata dei dispositivi connessi alla rete¹.

L'industria moderna necessita di infrastrutture ICT dedicate con reti private 5G e IOT industriale "next generation", grazie alle comunicazioni "5G ultra-reliable and low-latency systems"².

L'interconnessione dei sistemi di smart logistics e smart mobility, nonché delle smart grid energetiche, sono al centro dei nuovi scenari di investimento. Le opportunità per l'economia nazionale sono legate allo sviluppo delle tecnologie 5G nel mobile e della infrastruttura in fibra ottica nazionale.



Tutto il processo di trasformazione digitale dipende dall'industria delle TLC che abilita i cambiamenti anche nell'organizzazione del lavoro e nei processi industriali (e.g. Industria 4.0). La crescita esponenziale di dispositivi IoT collegati alle reti degli operatori di telecomunicazioni e alle infrastrutture Cloud, procedono di pari passo con lo sviluppo delle reti 5G necessarie per la loro diffusione. Questo scenario sta creando un ambiente ricco di insidie di cybersecurity. Il panorama di minacce richiede di modificare l'approccio alla sicurezza della rete, non solo tesa a garantire quella interna legata alla resilienza delle infrastrutture agli attacchi informatici, ma anche quella esterna legata alla nuova superficie di attacco DDOS generato dalla crescita incontrollata dei dispositivi IOT non tutti conformi agli standard minimi di sicurezza. Su questo aspetto sono di primaria importanza gli standard progettati negli organismi internazionali. La gestione di reti private 5G e l'utilizzo di IOT industriale "next generation", in continuità con le reti 5G NTN, deve considerare un approccio di "cybersecurity by design", con la progettazione che tenga conto di una superficie di attacco estesa dalle reti terrestri a quelle satellitari. Con l'architettura 5G network slicing è possibile separare e proteggere la componente di rete a maggior rischio cyber, ad esempio per infrastrutture critiche

o classi d'utenti che utilizzano QoS (Quality of Service) mission critical. Le linee guida di ENISA per la cybersecurity IoT nelle reti di distribuzione elettrica sono un valido supporto, ma le strategie delineate non coprono i grossi rischi legati alle attuali installazioni. Il vero problema è la componente legacy dei dispositivi IoT, i cui firmware sono spesso non aggiornabili, con meccanismi di sicurezza sono di basso livello.

L'integrazione delle tecnologie di rete intelligente con le infrastrutture TLC e Smart Grid, si sta affermando come l'architettura ideale per soddisfare i requisiti di resilienza e gestione del moderno sistema elettrico. Per questi motivi, avere lo sviluppo di soluzioni 5G NTN, in continuità con le reti terrestri e marittime 5G, è fondamentale per garantire la sicurezza delle comunicazioni.

Le minacce informatiche tipiche dei sistemi IoT non standard e non connessi a reti sicure "by design" (e.g. 5G) sono gli attuali punti critici. Sono in corso studi ed iniziative industriali per soluzioni avanzate che utilizzano machine learning per l'apprendimento automatico nella riconfigurazione e analisi dei comportamenti degli elementi di rete, l'integrazione nella tecnologia 5G di network slicing e Ultra-Reliable Low-Latency Communication e l'utilizzo della blockchain per applicazioni abbinata alle piattaforme IoT.

5G Use Cases and Application requirements

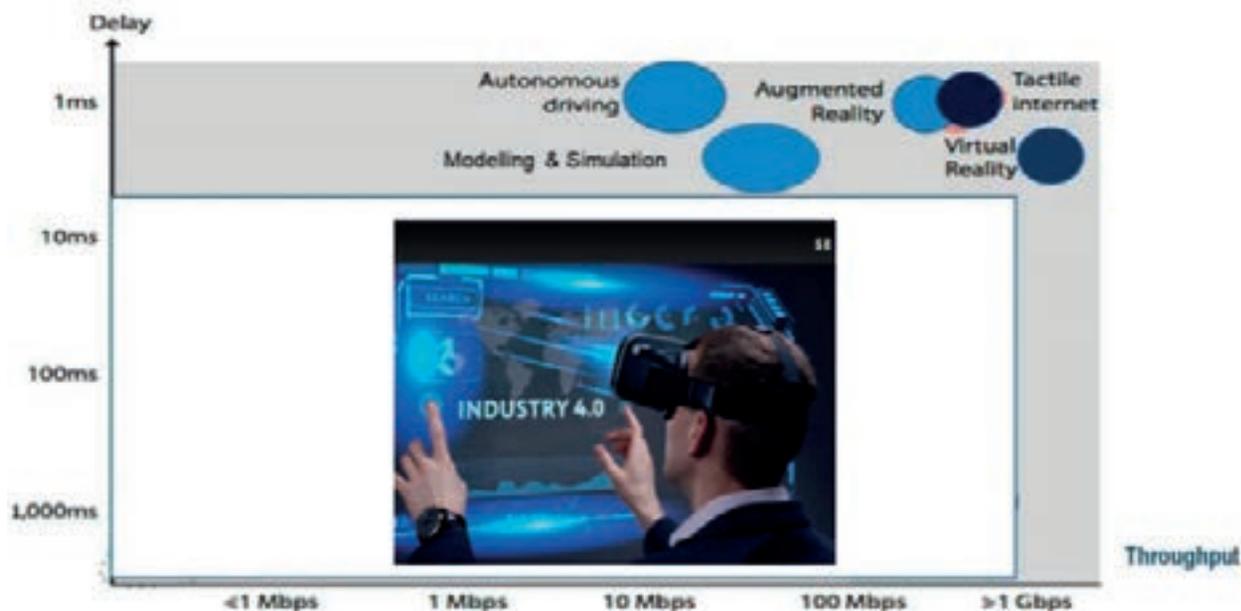


Figura 15

Un migliore utilizzo dell'energia della rete si riflette in innegabili vantaggi nella durata dei dispositivi connessi alla rete e nella riduzione dei potenziali rischi per la cybersecurity. Lo standard 5G prevede una riduzione del 90% del consumo di energia, che si traduce in dispositivi IoT a bassa potenza in ambienti industriali con una durata stimata della batteria di 10 anni. La dimensione del mercato delle comunicazioni 5G "Ultra-Reliable Low-Latency Communications" a bassa latenza è stata stimata in oltre 25 miliardi di € a livello mondiale entro il 2030. In ambito EU si lavora da tempo ad una strategia di potenziamento delle aree ICT, impattanti sulla transizione digitale.

I mercati verticali abilitati dalle reti 5G terrestri e marittime vedono nelle reti 5G NTN una naturale estensione, sia per l'industria che per la PA.

8. Evoluzioni, Sfide ed Opportunità delle reti Satellitari ed NTN

8.1 Peculiarità dei Sistemi Satellitari Attuali

L'evoluzione dei sistemi di comunicazione satellitare è caratterizzata dai seguenti passaggi storici:

- anni '60: il satellite è essenziale per le telecomunicazioni transoceaniche in competizione e integrazione con i cavi sottomarini;
- anni '80: il satellite è dedicato ai collegamenti

rurali e suburbani, alle comunicazioni marittime e aeree e in generale alle comunicazioni mobili su grandi spazi;

- anni '90: la diffusione della televisione digitale ha trovato nel satellite una soluzione ottimale per la crescita del business.

Nei primi anni 2000, le comunicazioni via satellite si sono evolute verso il protocollo IP, con la diffusione di sistemi ad alta capacità e multi-spot (e.g. Eutelsat, ViaSat e recentemente Eutelsat Konnect VHTS), in grado di coprire larghe regioni della terra con migliaia di spot e capacità di poche centinaia di Gbps.

In seguito all'enorme sviluppo della telefonia cellulare a partire dagli anni 90, cominciò lo sviluppo dell'era delle costellazioni satellitari per le comunicazioni ad orbita bassa (eg. Iridium e Globalstar). Ultimamente, i sistemi satellitari hanno effettuato un notevole balzo tecnologico in termini di banda larga e di estensione del paradigma Full IP. Tale capacità di banda può essere integrata con le reti terrestri per trapiantare la virtualizzazione, riduzione della latenza, resilienza, sicurezza e garanzia della QoS.

Inoltre, le nuove generazioni di costellazioni GEO e LEO sono basate sul dispiegamento a Terra di un grande numero di stazioni Hub.

Le stazioni sono connesse tra loro tramite reti a

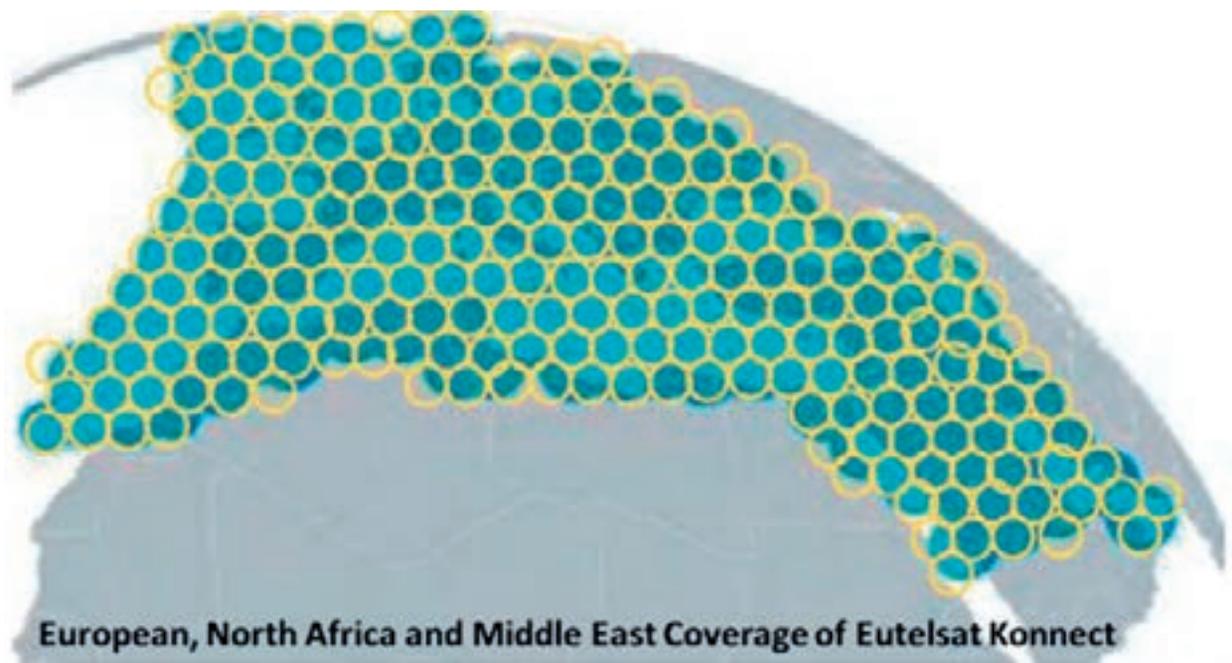


Figura 16 - Copertura del servizio Eutelsat Konnect

fibra ottica e, a livello logico, non esiste un singolo punto di accesso alla rete satellitare. Esse costituiscono il punto di accesso per nuovi servizi di telecomunicazioni essendo basati su collegamento IP. Un esempio del sistema Eutelsat Konnect system è mostrato in Figura 16.

In parallelo allo sviluppo enorme della telefonia cellulare digitale, partita all'inizio degli anni '90, si ricorda la stagione delle prime costellazioni in orbita bassa, in particolare Globalstar ed Iridium. Tali costellazioni erano basate sulla telefonia (come le prime generazioni di telefonia cellulare GSM/PCS e UMTS), con poca attenzione ai dati (il servizio SMS era dato gratuitamente agli utenti del servizio telefonico).

Globalstar, tramite un accordo con il GSM, si proponeva come completamento dell'infrastruttura terrestre e, all'inizio degli anni '90, contava 48 satelliti (più 24 della seconda generazione) a circa 1400 Km di quota. Iridium, che si poneva come un sistema indipendente, contava su una costellazione con ISL (Inter-Satellite link) di 66 satelliti a circa 780 Km di quota.

Le Mega costellazioni LEO sono il risultato dello sviluppo di nuove tecnologie ed hanno permesso una generazione di lanciatori più economici, l'utilizzo di tecnologie aeronautiche per i satelliti, con conseguente riduzione dei costi di sviluppo e

produzione, l'introduzione massiccia di SW e FW nel payload dei satelliti, l'utilizzo di tecnologie MIMO e di IA (filtraggio di immagini satellitari, reti semantiche) spinti dall'espansione dei sistemi radiomobili a terra.

OneWeb necessita di oltre 300 stazioni per circa 60 centri (con circa 5 antenne per centro). La capacità disponibile per OneWeb è dell'ordine di 15 Tbps. D'altro canto, la costellazione Starlink, con circa 12000 satelliti, necessita di circa 4000 stazioni per circa 600 centri (con circa 6/7 antenne per centro). La capacità globale disponibile Starlink è di circa 150 Tbps³.

La seconda costellazione Starlink conterrà circa 29988 satelliti. Per ridurre l'impatto sull'osservazione astronomica e prevenire rischi di collisione, l'FCCC ha previsto l'autorizzazione per soli 7500 satelliti, da posizionare sul guscio orbitale fra 335 e 345 km di altezza.

Alcune peculiarità di Starlink sono:

- antenne: ogni satellite Starlink utilizza 4 antenne Phased Array e 2 antenne paraboliche;
- sistema autonomo di anticollisione: evita la collisione con detriti orbitali e altri veicoli spaziali, riducendo l'errore umano, fornendo un'alta affidabilità e superando di un ordine di grandezza lo standard di settore;



Figura 17 – La costellazione Starlink

- star tracker: i sensori di navigazione Starlink utilizzano le stelle in visibilità per determinare la posizione e l'assetto del satellite;
- laser spaziali ottici: i collegamenti con laser spaziali ottici sul satellite per fornire capacità ISL, consentono al veicolo spaziale di trasmettere dati senza stazioni di terra locali, con copertura globale;
- sistema di propulsione ionica: efficienti propulsori ionici, alimentati con Krypton, consentono ai satelliti di posizionarsi in orbita, effettuare manovre e uscire dall'orbita al termine della loro vita utile;
- singolo pannello solare: i satelliti Starlink sono dotati di un solo pannello solare, semplificando notevolmente il sistema. Le celle solari sono standardizzate e facili da integrare nel processo di produzione.

I terminali utente Starlink sono i primi commercialmente disponibili con antenne Phased Array. Essi hanno capacità di auto-orientamento, con una procedura di installazione ed autocalibrazione. Le antenne variano da 51.3 cm (Standard ed High Performance) a 57.5 cm (Full Performance, progettate per applicazioni di mobilità) di diametro.

La flessibilità delle reti basate su LEO aumenta il livello di protezione Cyber, poiché gli attaccanti dovrebbero conoscere le caratteristiche del segnale

utilizzato dall'utente (e.g. posizione, Doppler, range dell'handover fra satelliti, uso di ISL, frequenza di cambio dei parametri di comunicazione, finestre di visibilità dei satelliti, etc..).

Le caratteristiche orbitali delle nuove costellazioni sono riportate in Tabella 1.

L'evoluzione delle costellazioni satellitari verso la connessione diretta su Smartphone è abilitata dagli avanzamenti del 3GPP su NTN e da nuove tecnologie a bordo.

La tecnologia nMIMO ad antenne multi-beam phased array, con diametri di pochi metri, utilizzate nel progetto AST e nuove stazioni RAN, sono capaci di lavorare a bordo ed a terra, suddividendo funzionalità fra segmento spaziale e terrestre.

In seguito alle release 3GPP, nuove costellazioni hanno definito piani di sviluppo con integrazione stretta fra TN e NTN.

8.2 Gli Edge Point della rete ibrida: la chiave per l'integrazione

Il modello di integrazione tra reti satellitari e reti terrestri prima dell'introduzione dei satelliti VHTS e delle costellazioni LEO era essenzialmente basato sul satellite come rete di accesso della rete terrestre e su una sola Hub per gestire l'intera rete satellitare, senza un'integrazione ai livelli più alti del protocollo ISO-OSI.

	Orbit Inclination	Orbit Altitude (Km)	Satellites per shell	Total
O3B mPower	0°	8062	10	34
	90°	8052	24	
Telesat LEO	98.98°	1015	78	298
	50.88°	1325	220	
Telesat VLEO	37.4°	1284	45	117
	99.5°	1000	72	
Kupier	33°	590	784	3236
	42°	610	1296	
	51.9°	630	1156	
Starlink LEO	53°	550	1584	4409
	53.8°	1110	1600	
	74°	1130	400	
	81°	1275	375	
	70°	1325	450	
Starlink VLEO	53°	345,6	2550	7500
	48°	340,8	2450	
	42°	335,9	2500	
OneWeb	87.9°	1207	660	1980
	87.9°	1207	1320	

Tabella 1 - Le caratteristiche orbitali delle nuove costellazioni

Tale architettura ha l'evidente svantaggio che la rete satellitare è un elemento di ritardo per le prestazioni complessive del sistema.

Con l'introduzione delle nuove architetture dei nuovi satelliti a grandissima capacità, la presenza di una rete in fibra ottica come parte integrante dell'architettura permette di:

- 1) posizionare gli elementi intelligenti per gestire la capacità satellitare in accordo con le risorse della rete terrestre (Orchestration);
- 2) configurare le risorse di rete integrando le risorse in accordo con le prestazioni richieste (Slicing);
- 3) strutturare una rete virtuale nella quale la capacità satellitare e terrestri siano gestite in modo agnostico rispetto alla tecnologia.

La capacità satellitare (inferiore a quella della rete terrestre) è caratterizzata da grande flessibilità e copertura del territorio e può supportare una

migliore qualità, la copertura di zone più scarsamente popolate, costose da coprire con tecnologie terrestri, costruire reti resilienti e fornire in modo più efficiente servizi specifici quali:

- servizi IoT;
- servizi di distribuzione di chiavi crittografiche;
- servizi di broadcasting per streaming;
- servizi di configurazione di rete e di gestione dei protocolli di comunicazione.

I punti chiave dell'integrazione intelligente delle reti TN ed NTN sono:

- ottimizzazione della latenza, che dipende principalmente dalla vicinanza degli Edge Point ai punti di accesso della rete e dai ritardi di trasmissione dovuti ai satelliti (circa 250 ms per i GEO e 10-20 ms per i LEO). Nello streaming, il ritardo trasmissivo per i GEO è inessenziale mentre è fondamentale la presenza dell'Edge Point;

- disponibilità di banda larga per singolo utente tra 20 e 200 Mbps, massimizzata dalla vicinanza dell'elemento intelligente;
- ottimizzazione del numero e del posizionamento delle stazioni Hub;
- miglioramento delle prestazioni ed aumento della competitività della rete ibrida.

La maggiore densità geografica degli Hub per i sistemi LEO può essere integrata per comunicazioni Punto-Punto interattive, mentre la comunicazione dati fra aree geograficamente separate trae vantaggio dai satelliti GEO e dal relativo segmento di terra.

9. Conclusioni

La disponibilità di nuove costellazioni di comunicazione satellitari ed i nuovi paradigmi tecnologici introdotti negli ultimi anni, nonché la disponibilità di un nuovo quadro di standardizzazione ETSI 3GPP, permettono di prefigurare il nuovo sviluppo delle reti NTN e la loro piena integrazione con le reti terrestri 5G e 6G.

Fra i vari vantaggi che si prefigurano, si possono

annoverare:

- copertura con migliore QoS di aree densamente popolate;
- ottimizzazione della latenza;
- disponibilità di Banda Larga;
- copertura di aree remote e sviluppo di tecniche di slicing;
- integrazione degli Hub satellitari LEO, GEO, IA ed interoperabilità (comunicazioni Punto-Punto o geograficamente separate);
- sviluppo di reti resilienti di sistemi IoT;
- sviluppo di sistemi di posizionamento di precisione terrestre/satellitare per copertura in ogni scenario e servizi AGNSS;
- sviluppo di sistemi di distribuzione di chiavi crittografiche e Quantum.

Lo sviluppo della Release 19 ETSI 3GPP prevede una completa integrazione dei sistemi satellitari TN ed NTN, consentendo di traguardare un futuro con connessioni globali e ad alta QoS per ogni applicazione.

Note

1. <https://rivista.ording.roma.it/industry-4-0-come-la-digital-transformation-incide-nella-rivoluzione-industriale/>;
2. <https://www.thenextfactory.it/2023/05/gasbarrone-lindustria-moderna-vuole-iot-e-digital-transformation/>;
3. La capacità approssimativa della rete in Italia è dell'ordine di 600 Tbps, mentre la massima capacità satellitare di Starlink sull'Italia è dell'ordine di 1 Tbps.





a cura di:
ING. P. TARDIOLO BONIFAZI

Revisionato da:
ING. F. MICILLO

Commissione:
INFORMATICA

INTELLIGENZA ARTIFICIALE E MODELLI LINGUISTICI DI GRANDI DIMENSIONI: DALLA TEORIA ALL'APPLICAZIONE

Introduzione

I **Modelli Linguistici di Grandi Dimensioni (LLM, Large Language Models)** rappresentano una delle rivoluzioni più significative nel campo dell'Intelligenza Artificiale (AI) e del Natural Language Processing (NLP). Questi modelli, basati su architetture avanzate come i **Transformer**, hanno dimostrato una capacità straordinaria di comprendere, generare e manipolare il linguaggio umano, aprendo nuove frontiere in applicazioni che spaziano dalla traduzione automatica alla generazione di contenuti, dal *question answering* al *summarization*. Ma cosa rende questi modelli così potenti? E come funziona il loro processo di apprendimento, che

permette loro di raggiungere prestazioni così impressionanti?

In questo articolo, esploreremo i dettagli tecnici degli LLM, analizzando le fasi chiave del loro apprendimento: il **pre-training**, il **fine-tuning**, e le tecniche avanzate come l'**apprendimento continuo**.

Con un focus particolare sull'architettura **Transformer** e sui meccanismi di embedding, illustriamo come questi modelli riescano a catturare il significato contestuale delle parole e a generare testo coerente e fluido. Inoltre, approfondiremo le sfide e le tecniche legate all'ottimizzazione e all'adattamento dei modelli a compiti specifici, fornendo esempi pratici e riferimenti a strumenti e framework ampiamente utilizzati nel settore.

Che tu sia un esperto di machine learning o un professionista tecnico interessato a comprendere meglio il funzionamento degli LLM, questo articolo ti guiderà attraverso i concetti fondamentali e le metodologie alla base di queste tecnologie all'avanguardia.

Preparati a scoprire come i modelli linguistici di grandi dimensioni stanno trasformando il modo in cui interagiamo con il linguaggio e l'informazione.

Modelli Linguistici di Grandi Dimensioni

I **Modelli Linguistici di Grandi Dimensioni (LLM, Large Language Models)** sono reti neurali avanzate addestrate tramite enormi quantità di dati testuali provenienti da molteplici sorgenti.

Tali modelli LLM sono in pratica dei sistemi di intelligenza artificiale progettati per comprendere e generare il linguaggio umano *naturale* in modo avanzato.

Essi trovano applicazione in numerosi ambiti, tra cui chatbot, assistenti virtuali, traduzione automatica e generazione di codice.

L'architettura alla base degli LLM si fonda su architetture neurali complesse come i **Transformers**, introdotti nel paper di Vaswani et al. (2017) "*Attention Is All You Need*", che hanno rivoluzionato l'elaborazione del linguaggio naturale (NLP).

I Transformers sono caratterizzati da un numero enorme di parametri, che possono variare da centinaia di milioni a centinaia di miliardi, permettendo loro di catturare una vasta gamma di conoscenze linguistiche e contestuali.

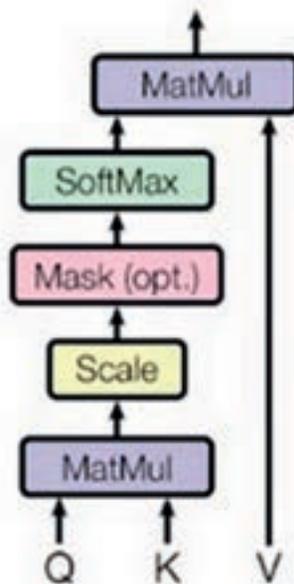
Grazie alla loro capacità di elaborare grandi quantità di dati testuali durante il **pre-training**, gli LLM sviluppano una comprensione generale del

linguaggio, che può poi essere affinata attraverso il **fine-tuning** per compiti specifici come la traduzione automatica, la generazione di testo o il **question answering**. La loro versatilità e potenza li rendono strumenti fondamentali in applicazioni che spaziano dall'assistenza virtuale alla creazione di contenuti, rivoluzionando il modo in cui interagiamo con la tecnologia e l'informazione.

Architettura dei Processi di Learning nei Modelli Linguistici di Grandi Dimensioni (LLM)

I Modelli Linguistici di Grandi Dimensioni (LLM) sono il risultato di un processo di apprendimento complesso e multifase che si basa, come detto, sull'architettura **Transformer** ben schematizzata in Figura 1.

In questa sezione, esploreremo in dettaglio l'architettura dei processi di learning, concentrandoci sulle fasi di **pre-training**, **fine-tuning**, e su come i modelli apprendono dai dati.



Scale Causal Attention

Pre-training: la Fase di Apprendimento Generale

Il **pre-training** è la fase iniziale e più critica del processo di apprendimento degli LLM. Durante questa fase, il modello viene addestrato su un vasto corpus di testo per imparare a prevedere la parola successiva in una sequenza. Questo processo, che richiede enormi risorse computazionali e dataset di grandi dimensioni, è essenziale per fornire al modello una comprensione generale del linguaggio.

Obiettivo del pre-training

L'obiettivo principale del **pre-training** è quello di apprendere una rappresentazione generale del linguaggio attraverso il task di **Language Modeling**, in cui il modello cerca di prevedere la parola successiva in una sequenza di parole.

Durante il **pre-training** dei Modelli Linguistici di Grandi Dimensioni (LLM), vengono adottate diver-

se strategie di **Language Modeling** per apprendere rappresentazioni efficaci del linguaggio naturale. Le principali tipologie utilizzate sono:

- **modello Masked Language Modeling (MLM):** In modelli come BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers), il pre-training avviene attraverso il Masked Language Modeling, dove alcune parole in una frase vengono mascherate e il modello deve prevederle basandosi sul contesto circostante. Esempio di input con mascheramento: "Il [MASK] salta sul tavolo". Output atteso: "Il **gatto** salta sul tavolo". È un modello **bidirezionale**, utilizzato per **classificazione**, **sentiment analysis** e **question answering**. Non è adatto alla generazione di testo (usa il contesto in entrambe le direzioni, ma non genera nuove parole sequenzialmente);

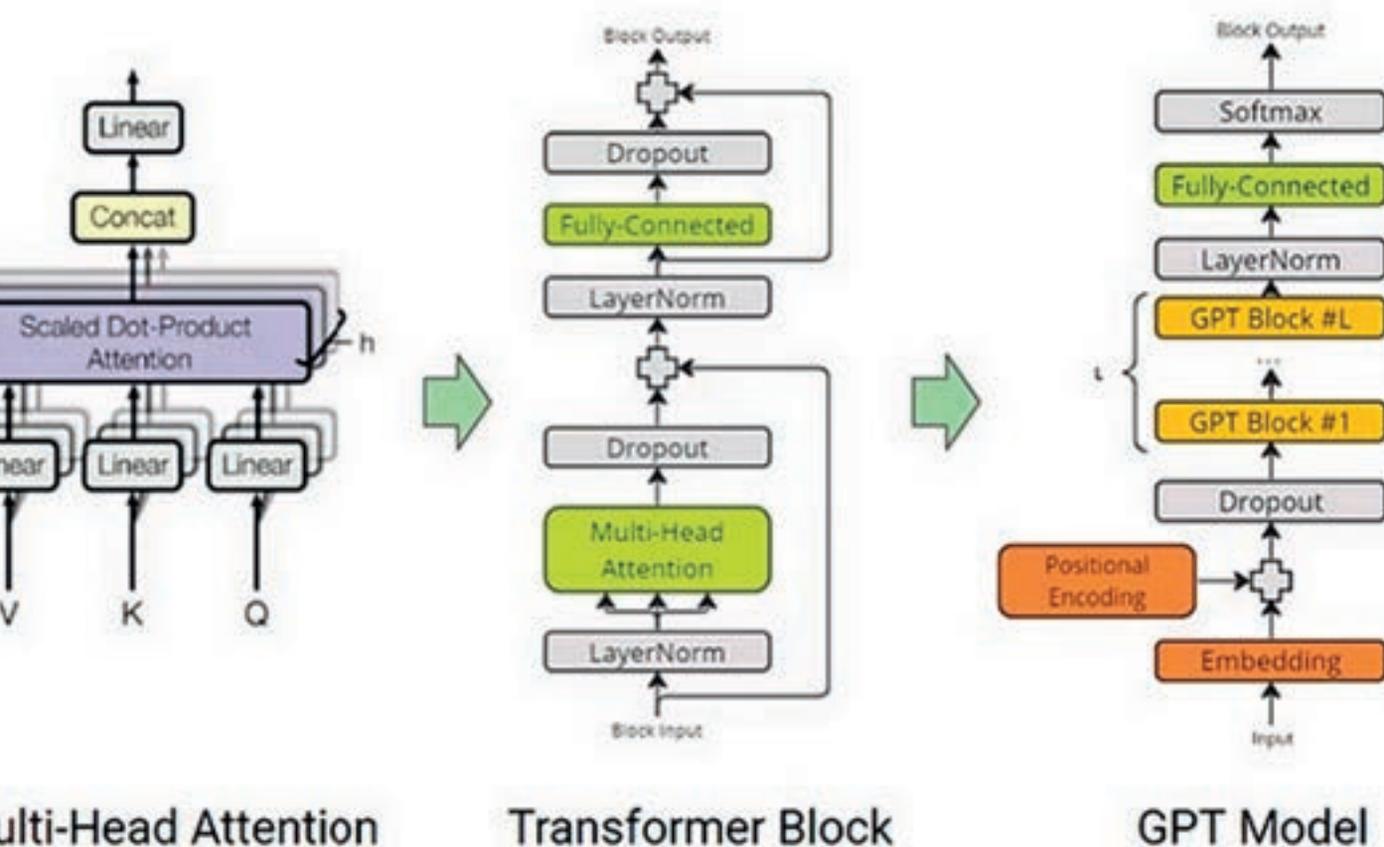


Figura 1 - Architettura LLM, Transformer

Tecnica	Direzionalità	Esempi di Modelli	Applicazioni
Masked Language Modeling (MLM)	Bidirezionale	BERT, RoBERTa, ALBERT	Classificazione del testo, NER, Question Answering
Auto-Regressive Modeling (AR)	Unidirezionale	GPT, XLNet	Generazione di testo, Chatbot
Permuted Language Modeling (PLM)	Unidirezionale con permutazioni	XLNet	Modelli ibridi per comprensione e generazione
Sequence-to-Sequence (Seq2Seq)	Encoder-Decoder	T5, BART, mBART	Traduzione, Summarization, Question Answering
Retrieval-Augmented Generation (RAG)	Dinamico con recupero dati	RAG, REALM	Risposte basate su conoscenza esterna

Tabella 1 - Confronto tra le Diverse Tecniche di Pre-training

- modello **Autoregressivo (AR)**: In modelli come GPT (Generative Pre-trained Transformer), GPT-2, GPT-3, GPT-4, XLNet (una variante avanzata autoregressiva con permutazioni delle parole), il pre-training avviene in modo autoregressivo, cioè il modello prevede una parola alla volta basandosi sulle parole precedenti. Esempio di input: "Il gatto salta sul tavolo e poi [MASK]". Output atteso: "Il gatto salta sul tavolo e poi **corre**". Questo modello è perfetto per la **generazione di testo** fluida e coerente, e viene usato principalmente in chatbot, copywriting e completamento automatico. È però un modello **unidirezionale** (considera solo il contesto passato, non quello futuro) e soffre di **accumulo di errori** (se una parola è errata, influenza tutta la sequenza successiva).

Di seguito viene proposta la Tabella 1 che confronta le diverse tecniche di pre-training.

In conclusione, nel **pre-training** di un LLM, il tipo di **language modeling** scelto dipende dallo **scopo finale del modello**:

- se vuoi un modello che capisca il testo e il contesto: MLM (BERT, RoBERTa);
- se vuoi generare testo o risposte fluide: AR (GPT, XLNet);
- se vuoi migliorare il contesto senza mascheramento: PLM (XLNet);
- se vuoi un modello per traduzione e summarization: Seq2Seq (T5, BART);

- se vuoi risposte basate su conoscenza aggiornata: RAG (RAG, REALM).

Oggi molti modelli combinano più tecniche per ottenere **prestazioni migliori**. Ad esempio, BART unisce MLM e AR, mentre XLNet migliora AR con una strategia di permutazione.

Il futuro del pre-training degli LLM vedrà sempre più modelli ibridi, capaci di generare e comprendere il linguaggio in modi sempre più sofisticati.

Architettura del Modello durante il Pre-training

Durante il pre-training, il modello utilizza l'architettura Transformer, che, grazie alla sua capacità di gestire sequenze di testo in parallelo, ha superato le limitazioni delle reti neurali ricorrenti (RNN) e delle reti convoluzionali (CNN).

Il **Transformer** è alla base di modelli avanzati come BERT, GPT, T5 e molti altri. Il suo punto di forza è il **meccanismo di attenzione**, che permette di elaborare relazioni tra parole a lunga distanza in modo efficiente.

Prima però analizzeremo le sue due componenti principali: l'**Encoder** e il **Decoder** ricordando che ogni **blocco encoder e decoder** è composto da più **layer (strati)** identici:

- **Encoder (comprensione del testo)**, utilizzato in modelli come BERT. Trasforma l'input (una sequenza di parole) in una sequenza di vettori (embedding contestuali) e arricchito con **positional encoding** (per mantenere l'ordine delle parole). Ogni vettore rappresenta una parola

nel contesto dell'intera frase.

L'**encoder** è costituito da una serie di strati impilati (tipicamente da 6 a 24) e ogni strato contiene:

- **Self-Attention Layer:** permette al modello di pesare l'importanza delle parole rispetto alle altre nella stessa sequenza;
- **Feed-Forward Layer:** una rete neurale completamente connessa che applica trasformazioni non lineari per migliorare la rappresentazione;
- **Add&Norm:** meccanismi di normalizzazione e connessioni residue che stabilizzano il flusso di informazioni;
- **Decoder (generazione del testo),** prende la rappresentazione dell'encoder e genera in output una parola alla volta, utilizzando un meccanismo autoregressivo che si basa sulle parole precedenti.
Il decoder ha una struttura simile all'encoder, con due differenze:
 - **Masked Self-Attention Layer:** impedisce al modello di vedere parole future durante la generazione;
 - **Encoder-Decoder Attention Layer:** consente al decoder di concentrarsi sulle parti rilevanti dell'input elaborato dall'encoder.

Meccanismo di attenzione

Il meccanismo di attenzione è cruciale durante il pre-training. Infatti, è il cuore dell'architettura Transformer ed è ciò che ha permesso ai modelli moderni di superare le limitazioni delle Reti Neurali Ricorrenti (RNN) e delle LSTM (Long Short-Term Memory).

L'attenzione, durante l'elaborazione del linguaggio naturale, consente al modello di focalizzarsi sulle parti più importanti dell'input, e gli permette di pesare l'importanza di diverse parole in una sequenza, in base alla loro rilevanza per il contesto, catturando relazioni a lungo raggio e dipendenze contestuali, migliorando così la comprensione del linguaggio.

Come funziona l'attenzione nel Transformer?

- Ogni parola della sequenza viene trasformata in tre rappresentazioni:
 - **Query (Q):** la parola in esame;
 - **Key (K):** le altre parole con cui deve interagire;
 - **Value (V):** Il contenuto informativo delle parole;

- il modello calcola la similarità tra la parola in esame e tutte le altre parole nel testo: questo avviene attraverso il prodotto scalare tra $Q \cdot K^T$ e $K \cdot K^T$, che assegna pesi di **attenzione** in base alla rilevanza del contesto.
- **Softmax normalizza i pesi e il modello genera un output ponderato:** le parole più rilevanti riceveranno un peso maggiore, mentre quelle meno importanti avranno un'influenza minore.

Esempio pratico:

"Il gatto salta sul tavolo e poi beve il latte".

Se il modello deve comprendere il significato di "latte", assegnerà **pesi di attenzione** più alti a "beve" rispetto a parole come "tavolo", perché sono più strettamente correlate semanticamente.

Grazie a questo meccanismo, modelli come BERT, GPT e T5 possono comprendere e generare testo con una precisione incredibile.

Esistono diversi tipi di attenzione, ma nel Transformer vengono utilizzati due principali:

- **Self-Attention:** ogni parola in una sequenza viene confrontata con tutte le altre parole per determinare quanto "attenzione" dovrebbe ricevere;
- **Multi-Head Attention:** l'attenzione viene calcolata in parallelo su più sottospazi, per intercettare diversi tipi di relazioni tra le parole migliorando la comprensione del contesto. Il **Multi-Head Attention** migliora il meccanismo di attenzione applicando il self-attention più volte in parallelo, con diverse prospettive. Infatti, mentre una singola attenzione può catturare solo un tipo di relazione tra parole, la **Multi-Head Attention** permette al modello di **catturare più tipi di relazioni contemporaneamente.**

Ottimizzazione

Il **pre-training** è un processo fondamentale nell'addestramento dei **Modelli Linguistici di Grandi Dimensioni (LLM)**, che utilizza tecniche avanzate di **ottimizzazione** su larga scala per migliorare la capacità del modello di comprendere e generare il linguaggio naturale.

L'obiettivo del **pre-training** è far sì che il modello apprenda rappresentazioni del linguaggio attraverso la **minimizzazione di una funzione di perdita (loss function)**, che misura la differenza tra le previsioni del modello e il testo reale.

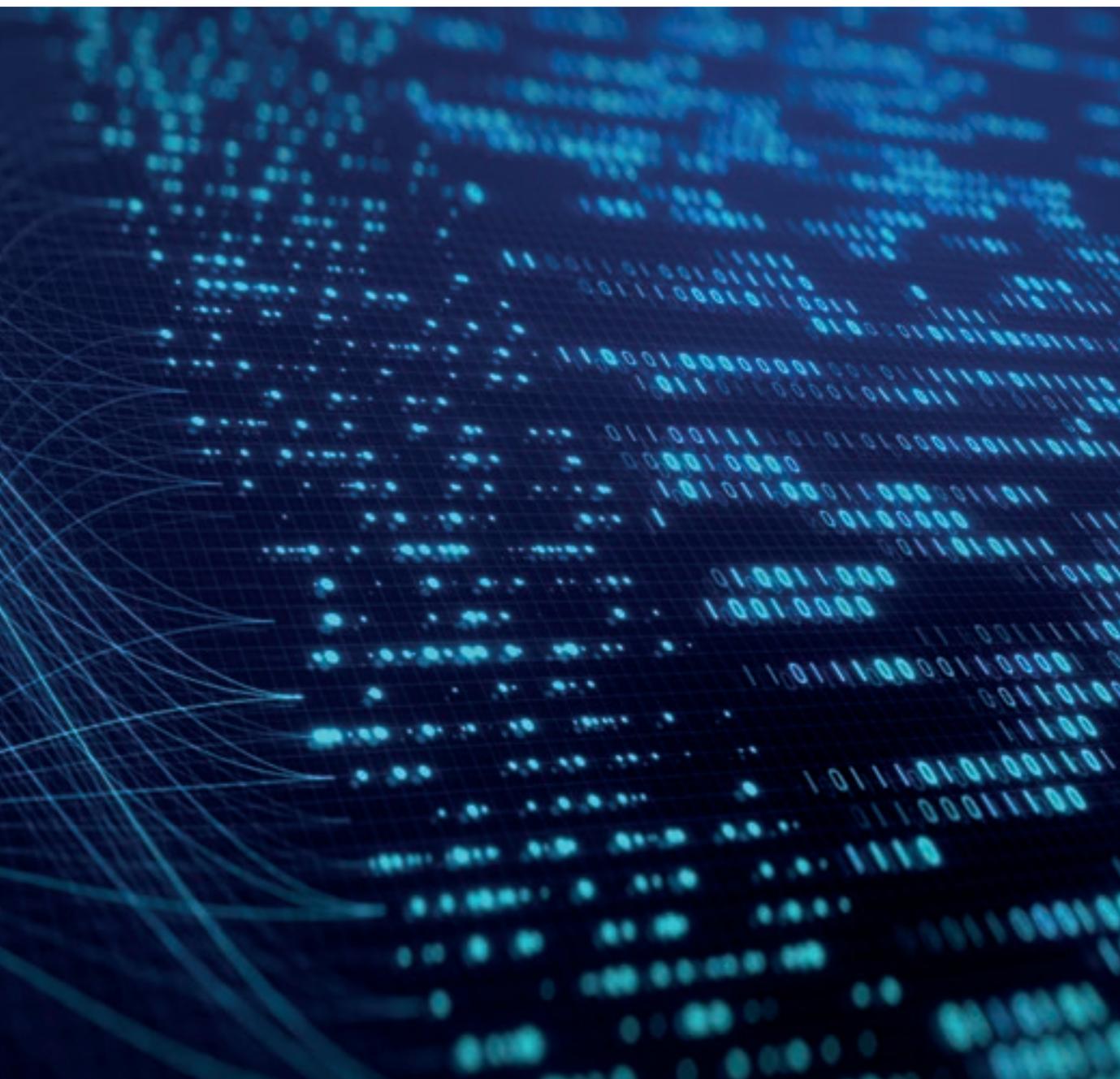
Tipicamente si utilizza la Cross-Entropy Loss, che penalizza le previsioni errate e guida il modello a



generare output più accurati, misurando la differenza tra le previsioni del modello e le parole effettive nel testo.

Le tecniche chiave usate nell'ottimizzazione sono:

- **backpropagation:** l'errore viene propagato all'indietro attraverso la rete per aggiornare i pesi del modello:
 - il modello confronta la sua previsione con la parola reale e calcola l'errore (*loss*);
 - l'errore viene **propagato all'indietro** attraverso la rete per aggiornare i pesi;
 - utilizza la **regola della catena del calcolo differenziale** per aggiornare i parametri in modo efficiente;



- **optimizer**: algoritmi come **AdamW** sono comunemente usati per aggiornare i pesi in modo iterativo per ridurre la funzione di perdita. **AdamW (Adaptive Moment Estimation with Weight Decay)** è uno degli ottimizzatori più usati nei Transformer, perché:
 - combina il metodo di discesa del gradiente con momenti adattivi;
 - include la regolarizzazione "Weight Decay", per evitare che i pesi crescano troppo e causino overfitting;
 - gestisce dinamicamente il learning rate per ogni parametro, accelerando l'ottimizzazione.

Lo schema del processo di ottimizzazione prevede questi 5 task:

1. **input di addestramento:** il modello prevede la parola successiva;
2. calcolo della perdita (Cross-Entropy Loss);
3. **backpropagation:** l'errore viene distribuito ai layer precedenti;
4. **ottimizzazione con AdamW:** aggiornamento dei pesi per ridurre l'errore;
5. ripetizione del processo per milioni/miliardi di iterazioni.

Fine-tuning: adattamento a compiti specifici

Dopo il **pre-training**, il modello ha una comprensione generale del linguaggio, ma per compiti specifici (come la **traduzione** o il **question answering**), è necessario un ulteriore addestramento chiamato **fine-tuning**.

Obiettivo del fine-tuning

L'obiettivo del **fine-tuning** è adattare il modello pre-addestrato a un compito specifico, utilizzando un dataset più piccolo e specifico.

- **Task-Specific Heads:** durante il **fine-tuning**, spesso si aggiungono strati aggiuntivi (detti "heads") al modello pre-addestrato per adattarlo al compito specifico. Ad esempio, per il compito di classificazione, si potrebbe aggiungere un **layer fully connected** seguito da una **softmax**.
- **Transfer Learning:** il **fine-tuning** è un esempio di **transfer learning**, dove la conoscenza appresa durante il **pre-training** viene trasferita e adattata a un nuovo compito.

Dataset per il fine-tuning

Il dataset utilizzato per il **fine-tuning** è tipicamente più piccolo e specifico rispetto al corpus utilizzato per il pre-training. Ad esempio:

- **Question Answering:** dataset come **SQuAD** (Stanford Question Answering Dataset);
- **Text Classification:** dataset come **IMDb** per la classificazione di sentimenti.

Ottimizzazione durante il Fine-tuning

Durante il fine-tuning, il modello continua a mini-



mizzare una funzione di perdita, ma questa volta specifica per il compito in questione.

- **Learning Rate:** Il tasso di apprendimento durante il fine-tuning è tipicamente più basso rispetto al pre-training, per evitare di "dimenticare" la conoscenza generale appresa durante il pre-training.
- **Early Stopping:** Spesso si utilizza l'**early stopping** per prevenire l'**overfitting**, fermando l'addestramento quando la performance sul **validation set** smette di migliorare.

Apprendimento Continuo e Adattamento

In alcuni casi, i modelli possono essere ulteriormente adattati in modo continuativo, apprendendo da nuovi dati senza dimenticare le conoscenze precedenti. Questo è noto come **apprendimento continuo** o **lifelong learning**.

L'apprendimento continuo (o **lifelong learning**) è un paradigma in cui i modelli di **Intelligenza Artificiale (AI)** vengono **adattati** continuamente per apprendere nuove informazioni senza dimenticare le conoscenze precedenti. Questo è particolarmente importante per i **Modelli Linguistici di Grandi Dimensioni (LLM)**, che possono essere aggiornati con nuovi dati per migliorare le loro prestazioni in contesti specifici o con nuove conoscenze.

L'apprendimento continuo comunque presenta diverse sfide, tra cui il **catastrophic forgetting**, dove il modello "dimentica" le conoscenze precedenti mentre impara nuove informazioni.

Questo problema si verifica perché l'ottimizzazione dei pesi per un nuovo compito può sovrascrivere i pesi importanti per compiti precedenti.

Per affrontare il problema del catastrophic forgetting, esistono diverse tecniche di apprendimento continuo. Due delle più importanti sono:

- **Elastic Weight Consolidation (EWC):** è una tecnica che penalizza i cambiamenti nei pesi che sono importanti per i compiti precedenti, permettendo al modello di adattarsi ai nuovi dati senza perdere le conoscenze precedenti.

Come funziona EWC:

- dopo aver appreso un compito, il modello calcola l'importanza dei pesi per quel compito;
- durante l'apprendimento di un nuovo compito, la funzione di perdita viene modificata per includere una penalizzazione

(λ) che limita i cambiamenti nei pesi importanti:

$$Loss_{EWC} = Loss_{new} + \lambda \sum_i F_i (\theta_i - \theta_i^*)^2 \quad [1]$$

dove:

- F_i : Stima dell'importanza del peso θ_i per il compito precedente;
- θ_i^* : Valore del peso dopo l'apprendimento del compito precedente;
- λ : Iperparametro che controlla la forza della penalizzazione.

Vantaggi di EWC:

- permette al modello di adattarsi ai nuovi
- è efficace per una sequenza di compiti simili o correlati.
- **Replay Methods:** affrontano il problema del forgetting utilizzando dati storici durante l'addestramento su nuovi dati. Il modello "ricorda" le conoscenze precedenti ripassando esempi dei compiti già appresi.

Tipologie di Replay Methods:

- **Experience Replay:** il modello salva un sottoinsieme di esempi passati e li riutilizza durante l'addestramento su nuovi compiti.
- **Generative Replay:** Invece di memorizzare dati reali, il modello utilizza una rete generativa (come una GAN) per generare dati simili a quelli passati.

Vantaggi dei Replay Methods:

- consente al modello di mantenere la conoscenza passata in modo efficace;
- riduce il problema del catastrophic forgetting, specialmente quando i compiti sono molto diversi tra loro.

Esempio di Experience Replay:

Supponiamo che un modello sia stato addestrato per riconoscere frutta (es. mele e banane) e successivamente venga addestrato per riconoscere verdura (es. carote e pomodori).

Con Experience Replay:

- il modello ripasserà esempi di mele e banane durante l'addestramento per le verdure;
- questo aiuta a mantenere la capacità di riconoscere la frutta mentre impara a classificare nuove categorie.

L'apprendimento continuo è cruciale per adattare i modelli a nuovi contesti e compiti, senza perdere le conoscenze acquisite in precedenza. Tecniche come **Elastic Weight Consolidation (EWC)** e i





Replay Methods sono strumenti fondamentali per consentire ai **Modelli Linguistici di Grandi Dimensioni** di evolversi in modo dinamico, migliorando la loro capacità di apprendimento nel tempo.

Embedding: La Base della Rappresentazione del Linguaggio nei LLM

Gli **embedding** sono una delle componenti fondamentali dei **Modelli Linguistici di Grandi Dimensioni (LLM)**. Essi trasformano parole, frasi o documenti in rappresentazioni numeriche (**vettori**) in uno spazio multidimensionale, catturando relazioni semantiche e sintattiche tra i termini.

Gli **embedding** svolgono un ruolo fondamentale in quanto i computer non comprendono le parole come gli esseri umani, ma possono manipolare i numeri. Gli **embedding** permettono ai modelli di **rappresentare** il significato delle parole in uno spazio matematico, dove parole con significati simili avranno vettori vicini.

Le **dimensioni degli embedding**, a loro volta, determinano quanto dettagliata è la rappresentazione vettoriale di ogni parola o token.

Abbiamo due tipologie di rappresentazione degli embedding: i **word embedding statici** e i **contextual embedding** che andremo a dettagliare.

- **Word Embedding:** rappresentazioni vettoriali di parole singole. I word embedding statici sono vettori che rappresentano ogni parola in modo unico e fisso, indipendentemente dal contesto in cui appare. Questo significa che la stessa parola avrà sempre la stessa rappresentazione, anche se utilizzata in frasi diverse. Modelli come **Word2Vec** (Mikolov et al., 2013), **GloVe** (Global Vectors for Word Representation), e **FastText** (Facebook AI) sono implementazioni di questo concetto.
- **Contextual Embedding:** nei modelli Transformer come BERT e GPT, gli embedding sono contestuali, cioè il vettore di una parola cambia in base al contesto in cui appare. Que-

sto è reso possibile grazie al meccanismo di attenzione. Pertanto, i contextual embedding migliorano i word embedding statici rendendo la rappresentazione **dipendente dal contesto in cui appare la parola**.

I word embedding e i contextual embedding vengono utilizzati in diversi compiti NLP:

- **Analisi del Sentiment:** classificazione di opinioni nei social media.
- **Question Answering (QA):** sistemi come **ChatGPT** rispondono alle domande grazie agli embedding contestuali;
- **Machine Translation:** traduzione automatica più precisa con embedding contestuali;
- **Summarization:** creazione di riassunti più coerenti e precisi.

Come Utilizzare i Modelli Linguistici di Grandi Dimensioni

Abbiamo precedentemente descritto come gli **LLM** sono tipicamente addestrati in due fasi:

- **Pre-training:** il modello viene addestrato su un vasto corpus di testo per imparare a prevedere la parola successiva in una sequenza. Questo processo richiede enormi risorse computazionali e dati.
- **Fine-tuning:** dopo il pre-training, il modello viene ulteriormente addestrato su un dataset specifico per svolgere compiti particolari, come la traduzione automatica, la generazione di testo o question answering ed altri.

Dopo l'addestramento, i LLM possono essere utilizzati e ottimizzati grazie a librerie e framework specifici. Vediamo quali sono i principali strumenti per lavorare con questi modelli.

Hugging Face Transformers

- **Hugging Face Transformers:** è una delle librerie più potenti e utilizzate per lavorare con

Parola	Embedding (rappresentazione vettoriale)
Re	[0.21, -0.34, 0.67, ...]
Regina	[0.19, -0.30, 0.72, ...]
Gatto	[-0.87, 0.45, 0.12, ...]

Tabella 2 - Esempio di Word Embedding Statico

modelli Transformer pre-addestrati.

Offre:

- **modelli pre-addestrati** come BERT, GPT-3, T5, RoBERTa, e molti altri;
- **interfacce semplici per il fine-tuning** dei modelli su specifici dataset;
- **pipeline pronte all'uso** per task di NLP come generazione di testo, traduzione, sentiment analysis, summarization, e question answering.

Esempio di utilizzo con Hugging Face (codice Python):

```
# =====
from transformers import pipeline

# Carica un modello pre-addestrato per la generazione di testo
generator = pipeline("text-generation", model="gpt2")

# Genera testo a partire da un prompt
# prompt: È il testo di partenza (input) che fornisci al modello. Il modello genererà del testo che segue logicamente il prompt.
prompt = "L'intelligenza artificiale sta rivoluzionando il mondo perché"
output = generator(prompt, max_length=50, num_return_sequences=1)
# max_length=50: Specifica la lunghezza massima del testo generato (in token). In questo caso, il modello genererà un testo di massimo 50 token.
# num_return_sequences=1: Indica quante se-
```

quenze di testo vuoi generare. Qui stai chiedendo una sola sequenza.

```
print(output[0]['generated_text'])
```

```
# =====
=====
```

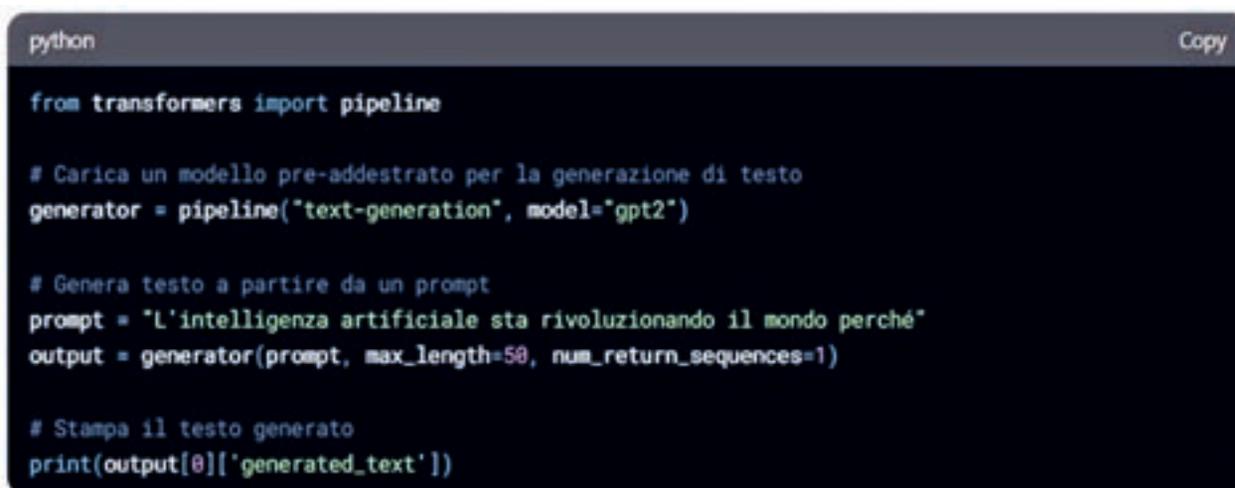
Output atteso: il modello genererà una continuazione del testo fornito. Per esempio una frase del tipo:

“L'intelligenza artificiale sta rivoluzionando il mondo perché permette di automatizzare processi complessi, migliorare l'efficienza e creare soluzioni innovative in settori come la medicina, l'educazione e l'industria. Grazie alla sua capacità di analizzare grandi quantità di dati, l'AI sta aprendo nuove frontiere nella ricerca e nello sviluppo.”

Si può personalizzare ulteriormente la generazione del testo utilizzando altri parametri:

- **temperature:** controlla la casualità del testo generato. Valori più bassi (es. 0.7) producono testo più deterministico, mentre valori più alti (es. 1.2) rendono il testo più creativo;
- **top_k:** Limita la scelta delle parole alle prime k più probabili;
- **top_p:** Utilizza il campionamento nucleare (nucleus sampling), selezionando solo le parole la cui probabilità cumulativa supera p.

Hugging Face è molto popolare perché **facilita l'uso degli LLM** senza doverli addestrare da zero ed ha una Community attiva e migliaia di modelli disponibili gratuitamente.



```
python                                                                    Copy

from transformers import pipeline

# Carica un modello pre-addestrato per la generazione di testo
generator = pipeline("text-generation", model="gpt2")

# Genera testo a partire da un prompt
prompt = "L'intelligenza artificiale sta rivoluzionando il mondo perché"
output = generator(prompt, max_length=50, num_return_sequences=1)

# Stampa il testo generato
print(output[0]['generated_text'])
```

Figura 2

Framework Principali per il Deep Learning

Per implementare e addestrare LLM su larga scala, si utilizzano framework di **Deep Learning** che forniscono strumenti avanzati per la creazione e ottimizzazione delle reti neurali.

Vediamo ora alcuni dei principali framework che facilitano l'uso degli LLM: **TensorFlow** e **PyTorch**, frameworks di deep learning che supportano l'implementazione e l'addestramento di LLM.

Si consiglia di usare **TensorFlow** quando:

- si ha bisogno di modelli AI su larga scala in **produzione**;
- se vuoi sfruttare **TPU (Tensor Processing Unit)** per accelerare il training.

Si consiglia di usare **PyTorch** quando:

- si ha bisogno di un framework più **flessibile e semplice** per la ricerca AI;
- se vuoi lavorare facilmente con **modelli Transformer su Hugging Face**.

Grazie a questi strumenti, oggi è più facile che mai lavorare con i **Modelli Linguistici di Grandi Dimensioni (LLM)**.

Applicazioni

Gli LLM hanno una vasta gamma di applicazioni, tra cui:

- **generazione di testo**: Creazione di contenuti, risposte automatiche, ecc;
- **traduzione automatica**: Traduzione di testo da una lingua all'altra;



- **summarization:** Creazione di riassunti di documenti lunghi;
- **question answering:** Risposte a domande basate su un contesto dato.

Conclusioni

I **Modelli Linguistici di Grandi Dimensioni** rappresentano una pietra miliare nel campo del NLP. Grazie all'architettura Transformer e agli embedding contestuali, questi modelli sono in grado di comprendere e generare testo con una precisione e una fluidità mai viste prima. Per i professionisti tecnici, comprendere i concetti core degli LLM e sapere come utilizzarli è essenziale per sfruttare appieno il potenziale di queste tecnologie. Con strumenti come **Hugging Face** e framework come

TensorFlow e **PyTorch**, l'implementazione e l'uso degli LLM sono diventati estremamente accessibili. Che si tratti di generazione di testo, traduzione automatica con modelli come mBART o M2M-100, summarization con modelli come BART e T5, question answering con modelli tipo BERT e RoBERTa o chatbot e assistenti virtuali, gli LLM offrono opportunità illimitate per innovare e migliorare le applicazioni di linguaggio naturale.



Bibliografia

- Documentazione:
 - TensorFlow, documentazione ufficiale: <https://www.tensorflow.org/>;
 - PyTorch, documentazione ufficiale: <https://pytorch.org/>;
 - Hugging Face Transformers, guida e API: <https://huggingface.co/transformers/>;
 - OpenAI, documentazione dell'API: <https://platform.openai.com/docs/>;
 - LangChain, risorse per integrare modelli linguistici: <https://www.langchain.com/>;
- API:
 - OpenAI GPT, accesso ai modelli GPT: <https://platform.openai.com/>;
 - Google Cloud AI, servizi di machine learning: <https://cloud.google.com/ai/>;
 - Microsoft Azure Cognitive Services, API per NLP e visione artificiale: <https://azure.microsoft.com/en-us/services/cognitive-services/>;
 - IBM Watson, soluzioni AI per NLP: <https://www.ibm.com/watson/>;
 - AWS Machine Learning, integrazione di modelli AI: <https://aws.amazon.com/machine-learning/>;
- libri per approfondire il deep learning e l'elaborazione del linguaggio naturale con i Transformer:
 - Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). Deep Learning. MIT Press.
Link: <https://mitpress.mit.edu/9780262035613/deep-learning/>;
 - Tunstall, L., von Werra, L., & Wolf, T. (2022). Natural Language Processing with Transformers. O'Reilly Media.
Link: <https://www.oreilly.com/library/view/natural-language-processing/9781098136796/>;
 - Jurafsky, D., & Martin, J. H. (2023). Speech and Language Processing (3a ed.). Pearson.
Link: <https://www.pearson.com/store/p/speech-and-language-processing/P100000168363>;
 - Rothman, D. (2021). Transformers for Natural Language Processing. Packt Publishing.
Link: <https://www.packtpub.com/product/transformers-for-natural-language-processing/9781800207650>;
 - Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., ... & Polosukhin, I. (2017). Attention is All You Need.
ArXiv: <https://arxiv.org/abs/1706.03762>.
PDF: <https://arxiv.org/pdf/1706.03762>;
 - Mittal, A. (2023). Comprendere la messa a punto di LLM: adattare modelli linguistici di grandi dimensioni ai propri requisiti specifici.
Unite.AI: <https://www.unite.ai/it/comprendere-l%27ottimizzazione-di-llm-adattare-modelli-linguistici-di-grandi-dimensioni-alle-vostre-esigenze-specifiche/>;
 - Alammari, J. (n.d.). The Illustrated Transformer.
Link: <https://jalammar.github.io/illustrated-transformer/>;
 - Alammari, J. (n.d.). The Illustrated GPT-2 (Visualizing Transformer Language Models).
Link: <https://jalammar.github.io/illustrated-gpt2/>;
- libri per comprendere e implementare gli embeddings nel contesto del deep learning:
 - Rao, D., & McMahan, B. (2019). Natural Language Processing with PyTorch (1a ed.). O'Reilly Media.
Link: <https://www.oreilly.com/library/view/natural-language-processing/9781491978221/>;
 - Goyal, P., Pandey, S., & Jain, K. (2018). Deep Learning for Natural Language Processing. Apress.
Link: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4842-3581-0>;
 - NLPlanet (n.d.). Two Minutes NLP — 20 Learning Resources for Word Embeddings.
Link: <https://medium.com/nlplanet/two-minutes-nlp-20-learning-resources-for-word-embeddings-64414dabf81f>;
 - Boykis, V. (n.d.). What Are Embeddings?
Link: https://vickiboykis.com/what_are_embeddings/next.html;
- conferenze:
 - NeurIPS (Conference on Neural Information Processing Systems)
Una delle conferenze più importanti nel campo del machine learning e dell'intelligenza artificiale, con sessioni dedicate ai modelli linguistici e ai Transformer.
ACL (Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics)
La principale conferenza internazionale sul NLP, con presentazioni all'avanguardia su modelli linguistici e tecniche avanzate.
Link: <https://www.aclweb.org/portal/>;

- EMNLP (Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing)
Una conferenza di rilievo nel campo del NLP, con focus su applicazioni pratiche e modelli linguistici.
Link: <https://2023.emnlp.org/>;
- ICLR (International Conference on Learning Representations)
Una conferenza che copre temi avanzati di deep learning, inclusi i modelli linguistici e le architetture Transformer.
Link: <https://iclr.cc/>;
- risorse aggiuntive:
 - Hugging Face Model Hub e Transformers: una piattaforma per esplorare, scaricare e utilizzare modelli linguistici pre-addestrati, con esempi di codice e documentazione.
Model Hub: <https://huggingface.co/models>.
Documentazione: <https://huggingface.co/docs/transformers/index>;
 - Papers with Code: un sito che raccoglie articoli scientifici su AI e NLP, con link a implementazioni di codice open source.
Link: <https://paperswithcode.com/>;
 - OpenAI Blog: il blog di OpenAI offre approfondimenti tecnici sui modelli linguistici come GPT-3 e GPT-4, e sulle loro applicazioni.
Link: <https://openai.com/news/>;
 - Google AI Blog: un blog che copre le ultime ricerche e sviluppi nel campo dell'intelligenza artificiale, inclusi i modelli linguistici e i Transformer.
Link: <https://research.google/blog/>.







a cura di:

ING. F. FORIA, ING. M. CALICCHIO, ING. G. MICELI

Revisionato da:

ING. G. DE BENEDETTI, ING. M. BISTI

Commissione:

ANALISI E VALUTAZIONE DEL DEGRADO SU OPERE ESISTENTI

APPLICAZIONE DI STRUMENTI INNOVATIVI PER LA PROGETTAZIONE E LA REALIZZAZIONE DI INTERVENTI DI MANUTENZIONE: LE GALLERIE DELLA LINEA FERROVIARIA ATTIGLIANO-VITERBO

Introduzione

La manutenzione delle linee ferroviarie esistenti è argomento strategico per il Paese affinché sia garantito lo spostamento di persone e merci in sicurezza ed efficienza.

Mantenere funzionanti e operative le linee secondarie, oltre a quelle con maggiore affluenza, permette capillarità e resilienza in caso di interruzioni di operazione.

Con questo scopo ETS nel 2017 condusse, per conto di RFI una serie di ispezioni sulle gallerie della linea Attigliano-Viterbo, per pianificare e prioritizzare gli interventi di manutenzione, e secondo le indicazioni di RFI, tali ispezioni sono state condotte in regime di Interruzione Programmata in Orario, utilizzando dati oggettivi, per accelerare le decisioni del tavolo tecnico e gestionale, focalizzate sui problemi idraulici, già precedentemente riscontrati.

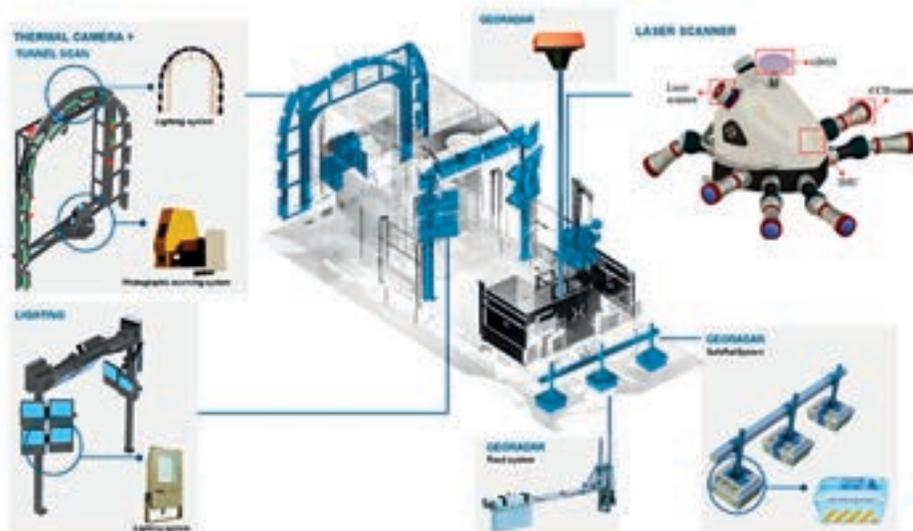


Figura 1 – ARCHITA: Set-Up assetto Ferroviario.



Figura 2 – Foto imbocco Galleria.

ETS introdusse la strumentazione denominata ARCHITA, uno strumento di mobile mapping dotato di un sistema di laser scanner, termocamera, rilevazione di immagini digitale, e GPS per la geolocalizzazione. Grazie a questo tipo di set-up e alla velocità di rilevazione compresa tra 15 e 30 km/h, fu possibile rispettare una parte consistente delle richieste iniziali: rispetto dei tempi di interruzione del servizio, rilievo delle problematiche idrauliche secondo dati oggettivi e resi immediatamente disponibili al tavolo dei decisori.

Tra le gallerie indagate, quella di Sipicciano I costituisce il caso studio più interessante, in quanto fu possibile applicare una serie di innovazioni e strategie di intervento rilevanti dal punto di vista ingegneristico.

Interventi 2017 - 2019

La galleria Sipicciano I, costruita nel 1886, è lunga 153 m, e indagini geognostiche e strutturali interne consentirono la ricostruzione delle geometrie, del suo rivestimento, il riconoscimento dei terreni, confermando le modalità esecutive *cut and cover*.

L'ispezione effettuata con ARCHITA nella galleria ha permesso agli operatori di predisporre una visualizzazione digitalizzata dei dati, resa ancora più efficace grazie al contributo della Realtà Virtuale che consente una gestione ancora più oggettiva e simultanea delle condizioni reali della galleria, e la loro condivisione sui tavoli di lavoro.

Sempre per migliorare la visualizzazione e la gestione dei dati ottenuti dall'ispezione ETS ha

sfruttato anche le competenze in ambito BIM e ha generato il digital twin della galleria, grazie al quale i dati sono stati registrati e aggiornati all'occorrenza, sempre con lo scopo di tenere una visione condivisa, estesa, aggiornata e realistica dell'infrastruttura.

Per la gestione delle priorità degli interventi basata sull'analisi dei difetti nella galleria ETS utilizza l'approccio MIRET (Management and Identification of Risks for Existing Tunnels) che, lavorando in sinergia con ARCHITA permette di utilizzare i dati provenienti dall'ispezione in campo, immediatamente digitalizzati, e rielaborarli in back-office dagli ingegneri specialisti nel settore attraverso un processo sistematico e consolidato.

La Galleria Sipicciano è stata quindi divisa in sette settori di uguale dimensione, e i difetti rilevati

hanno trovato collocazione nel relativo settore grazie alla geolocalizzazione. La mappa finale ha quindi restituito una panoramica completa del posizionamento dei difetti, della loro caratterizzazione (origine del difetto, se infiltrazione acquosa o deterioramento della muratura), e della loro estensione per ogni settore della galleria.

Questa analisi permise agli operatori di individuare una forte componente di difetti legata all'infiltrazione di acqua, soprattutto per i settori più vicini alle zone all'aperto, cioè in entrata e in uscita dalla galleria, dovute a basse coperture, condizioni topografiche sfavorevoli, ammaloramento del rivestimento e alla permeabilità di tipo medio-alto dei terreni.

Per una maggiore e ancora più chiara visione della situazione e della gestione delle priorità nel

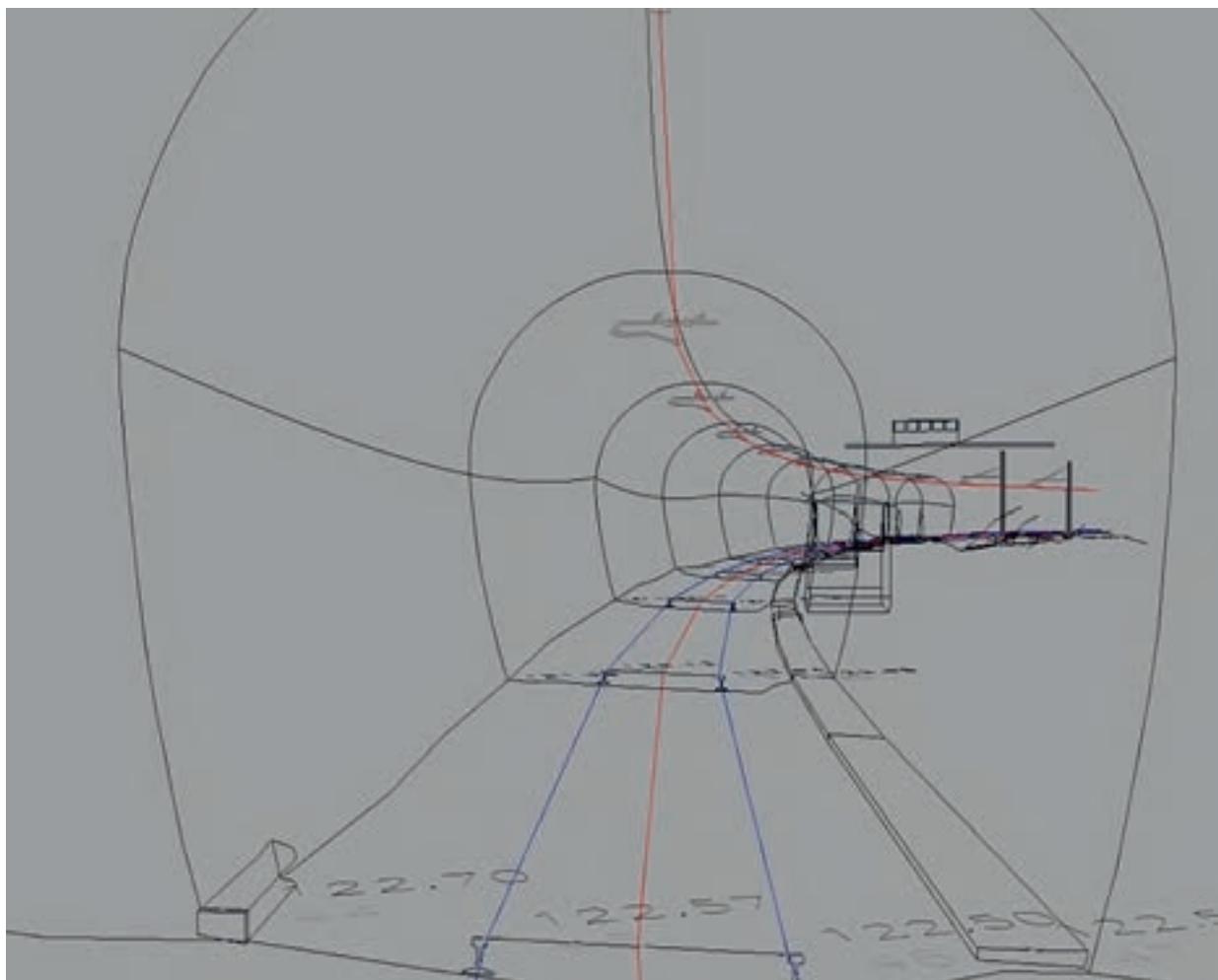


Figura 3 – Immagine del Digital Twin della galleria (Stato di fatto).

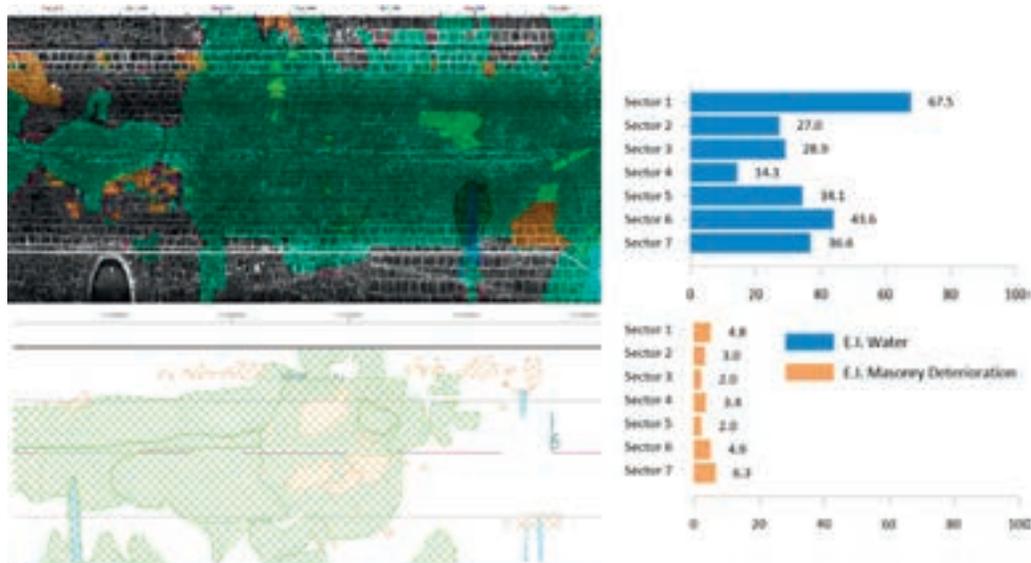


Figura 4 – Mappa dei difetti e Indici di Estensione relativi alla presenza di acqua e al deterioramento della muratura.

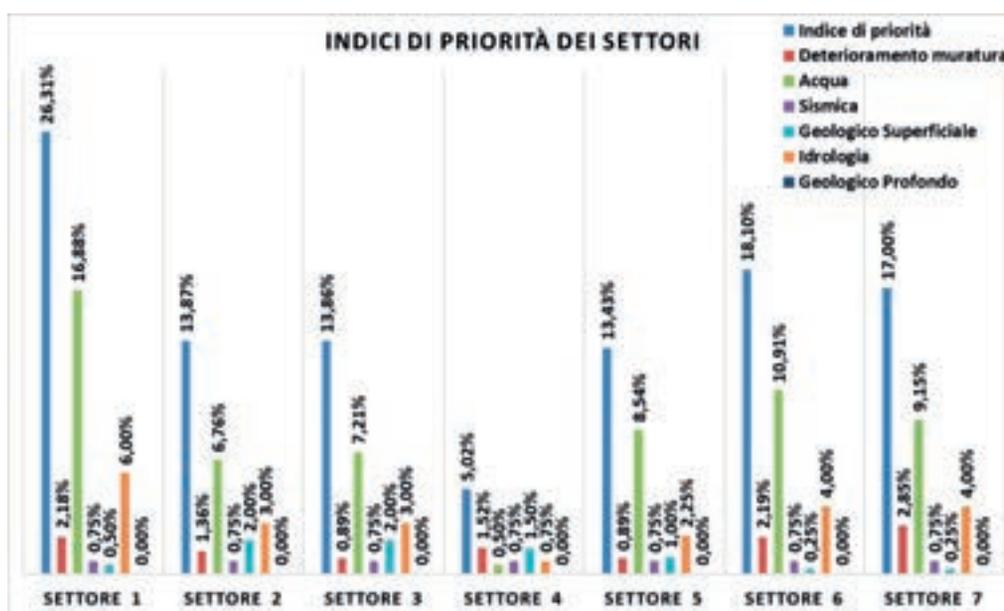


Figura 5 – Indici di Priorità.

2019 sulla galleria fu condotta anche un'analisi SMCA (Space Multi-Criteria Analysis): i dati provenienti dalla mappatura dei difetti sono elaborati statisticamente e combinati con altri parametri (ad esempio, il contesto geologico) che forniscono informazioni descrittive e analitiche sull'ambiente e le condizioni al contorno dell'infrastruttura. I risultati evidenziarono ulteriormente l'impatto

delle infiltrazioni di acqua nella galleria e la necessità quindi di dare priorità a questo tipo di interventi, secondo la divisione in settori. In base a tutte le informazioni ottenute dalle analisi, gli interventi di manutenzione svolti nel 2019 hanno avuto lo scopo di realizzare un adeguato sistema di drenaggi sui piedritti e alle reni della galleria, in connessione ad un sistema di smaltimento



Figura 6 – Analisi difettologica effettuata prima e dopo l'intervento: riduzione delle aree interessate da infiltrazioni di acqua.

acque di linea, impermeabilizzare i terreni circostanti la galleria, ed eliminare le infiltrazioni di acqua per ripristinare l'originale compattezza strutturale delle murature.

L'efficacia dell'intervento, valutata attraverso la ripetizione dell'analisi difettologica su tutta la superficie interna della galleria nel 2022, evidenziò un'importante riduzione delle infiltrazioni di acqua a seguito dei lavori di manutenzione del 2019.

Interventi 2020 - 2023

Durante la lavorazione stabilita per questi interventi gli addetti ai lavori riscontrarono la presenza

di un arco rovesciato non documentato, che necessitava di un'ulteriore manutenzione per garantire la sicurezza e la stabilità del binario durante il passaggio dei treni.

Nell'estate 2021, in occasione di un sopralluogo lungo tutta la galleria per alcuni interventi di armamento fu riscontrata al di sotto dei binari la presenza di diverse "costole" e della relativa muretta, evidenziando la presenza di un arco rovescio.

Nel 2022 fu quindi condotto un intervento dedicato alla rimozione della struttura di inversione esistente e alla costruzione di una soletta in calcestruzzo di 30 cm di spessore. Al fine di garantire la stabilità della galleria durante gli scavi per la



sostituzione della struttura d'inversione, è stato necessario installare ancoraggi passivi, costituiti da barre d'acciaio di 5 cm di diametro, prevedendo anche l'utilizzo di travi di distribuzione in acciaio (2 HEB140), collegate ad ancoraggi in acciaio. Dopo queste operazioni di sostegno, è stato possibile realizzare uno scavo di base di 1,20-1-50 m nella zona di inversione con la rimozione della struttura di inversione esistente. Per la fase finale dell'intervento, il progetto prevedeva la realizzazione di una soletta in calcestruzzo collegata alla struttura in muratura esistente, al fine di garantire l'integrità strutturale della parte inferiore della galleria, realizzando anche un valido puntone in calcestruzzo per prevenire gli spostamenti orizzontali, le possibili fessurazioni nel rivestimento finale della galleria e per aumentare la robustezza complessiva della galleria. Questa struttura di base funzionerà anche come superficie di drenaggio idraulico per raccogliere le acque della galleria e convogliarle

all'esterno della stessa galleria nel sistema di drenaggio principale esistente.

Per una migliore gestione della galleria e garantire il costante e continuo controllo delle sue condizioni, è stato predisposto un sistema di monitoraggio con soglie di allertamento per le misure registrate dalle mire ottiche, in corrispondenza delle quali è previsto il piano di intervento.

ETS ha ritenuto interessante questo caso studio poiché rappresenta un passo importante verso l'implementazione di tecniche di digitalizzazione e di analisi di diagnostica, integrate con l'utilizzo del BIM per la realizzazione di modelli 3D, per una gestione sempre più strutturata e organica della manutenzione e del monitoraggio di gallerie nel tempo. Il confronto di dati registrati prima e dopo un intervento, o la gestione dei difetti monitorati nel tempo, è un esempio rappresentativo di quanto sia possibile raggiungere con una gestione completamente digitale, gestita attraverso modelli di *digital twin*.

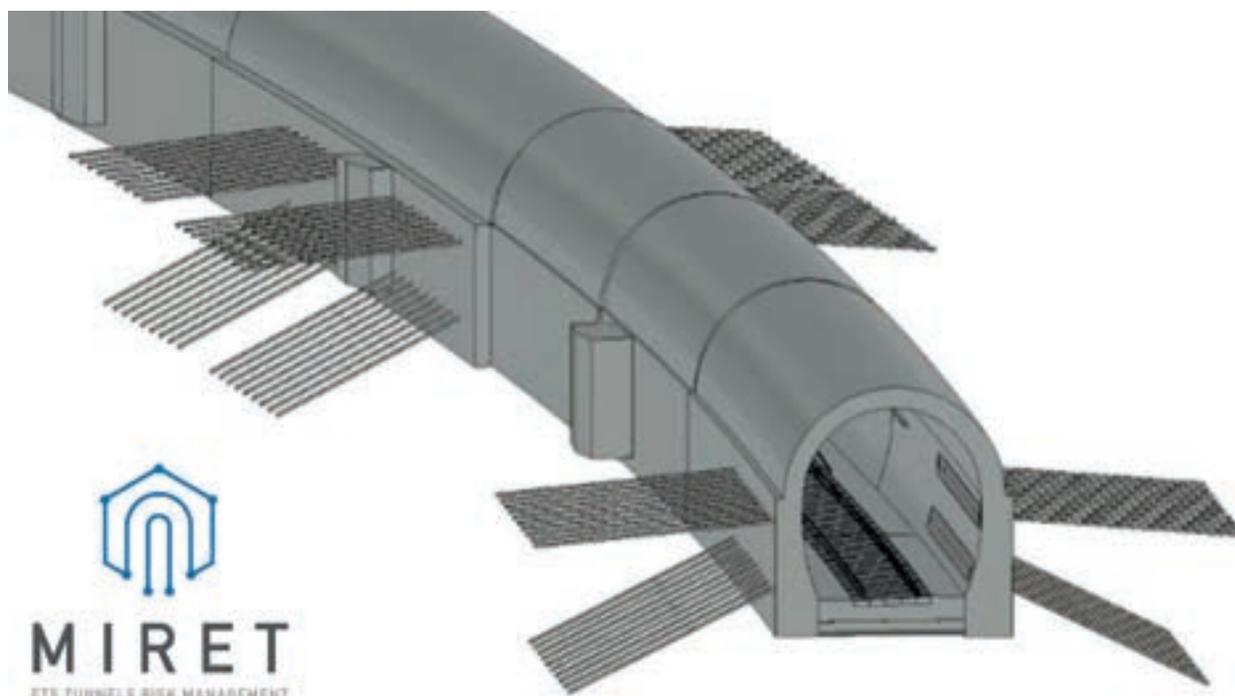


Figura 7 – Immagine del Digital Twin della galleria (Interventi).



a cura di:
ING. C. BEGGIATO

Revisionato da:
ING. G. FASCINELLI

Commissione:
ACUSTICA

RELAZIONE TECNICA DI VALUTAZIONE DEI RISCHI DI RUMORE: PARTE PRIMA

In questo articolo verrà presentato un esempio pratico di relazione redatta ai sensi del Titolo VIII - Capo II del D.Lgs. 81/2008 e s.m.i., riguardante la protezione dei lavoratori dai rischi di esposizione al rumore durante il lavoro. La relazione, elaborata da un Tecnico Competente in Acustica, mostrerà le fasi di valutazione e le misure di prevenzione proposte per garantire la tutela della salute dei lavoratori esposti a fonti sonore, in conformità con la normativa vigente, il caso di specie è una valutazione effettuata presso una infrastruttura di un Ente della Pubblica Amministrazione che, come





noto, non è esentato da tale vincolo.

Il citato decreto legislativo 9 aprile 2008, n. 81 determina, in attuazione delle disposizioni previste all'articolo 17, comma 1, lettera a), i requisiti minimi per la protezione dei lavoratori contro i rischi per la salute e la sicurezza derivanti dall'esposizione al rumore durante il lavoro ed in particolare per l'udito, tale decreto si applica a tutti i settori di attività, privati e pubblici, così come previsto all'art. 3, comma 1, fermo restando quanto previsto dai commi successivi del presente articolo. La valutazione dei rischi di esposizione al rumore e le conseguenti misure di prevenzione e protezione, costituiscono parte specifica del documento di cui all'art. 28, comma 2, del decreto legislativo n. 81/2008 e s.m.i.

Definizione di termini tecnici e simboli

- dBA: grandezza logaritmica che definisce la pressione, la potenza e l'intensità sonora; l'indicazione (A) riguarda l'utilizzo di un filtro che simula la curva di ponderazione della risposta in frequenza dell'orecchio umano;
- Te: durata quotidiana dell'esposizione personale di un lavoratore al rumore, ivi compresa la quota giornaliera di lavoro straordinario;
- Tm: tempo di misura;
- $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$;
- pA: pressione acustica istantanea ponderata A, in Pascal, cui è esposta, nell'aria a pressione atmosferica, una persona che potrebbe o meno spostarsi da un punto ad un altro del luogo di lavoro; tale pressione si determina basandosi su misurazioni eseguite all'altezza dell'orecchio della persona durante il lavoro, preferibilmente in sua assenza, mediante una tecnica che minimizzi l'effetto sul campo sonoro. Se il microfono deve essere situato molto vicino al corpo, occorre procedere ad opportuni adattamenti per consentire la determinazione di un campo di pressione non perturbato equivalente. L'esposizione quotidiana personale non tiene conto degli effetti di un qualsiasi mezzo individuale di protezione;
- LAeq,Te: il livello continuo equivalente è il livello costante che avrebbe un rumore stazionario con la stessa energia acustica totale e con uguale durata Te;
- LAeq,Tm: il livello continuo equivalente nel tempo di misura;
- pressione acustica di picco (ppeak): valore

massimo della pressione acustica istantanea ponderata in frequenza «C»;

- livello di esposizione giornaliera al rumore (LEX,8h): valore medio, ponderato in funzione del tempo, dei livelli di esposizione al rumore per una giornata lavorativa nominale di otto ore, definito dalla norma internazionale ISO 1999: 2015 punto 3.6. Si riferisce a tutti i rumori sul lavoro, incluso il rumore impulsivo;
- livello di esposizione settimanale al rumore (LEX,w): valore medio, ponderato in funzione del tempo, dei livelli di esposizione giornaliera al rumore per una settimana nominale di cinque giornate lavorative di otto ore, definito dalla norma internazionale ISO 1999: 2015 punto 3.6, nota 2.

Il decreto legislativo n. 81/2008 e s.m.i., all'articolo 189, comma 1, fissa i seguenti valori limite di esposizione e valori di azione, in relazione al livello di esposizione giornaliera al rumore e alla pressione acustica di picco:

- valori limite di esposizione rispettivamente $\text{LEX}_{8h} = 87 \text{ dB(A)}$ e $p_{\text{peak}} = 200 \text{ Pa}$ (140 dB(C) riferito a $20 \mu\text{Pa}$);
- valori superiori di azione: rispettivamente $\text{LEX}_{8h} = 85 \text{ dB(A)}$ e $p_{\text{peak}} = 140 \text{ Pa}$ (137 dB(C) riferito a $20 \mu\text{Pa}$);
- valori inferiori di azione: rispettivamente $\text{LEX}_{8h} = 80 \text{ dB(A)}$ e $p_{\text{peak}} = 112 \text{ Pa}$ (135 dB(C) riferito a $20 \mu\text{Pa}$).

Strumentazione di misura

La strumentazione di misura si compone di un analizzatore di classe 1, requisito obbligatorio per le misurazioni di impatto acustico in ambienti di lavoro, e da un calibratore, i relativi certificati di taratura è opportuno che siano allegati alla relazione. Nel caso di specie, i dati sono stati successivamente elaborati con i software EVALUATOR e RUMOURS.

Criteri per la misurazione del rumore

Per primo si esegue il controllo strumentale di massima e le misurazioni del rumore LAeq e ppeak(C), vengono eseguite con fonometro integratore secondo le Norme UNI e ISO.

Le misurazioni vengono effettuate nei posti di lavoro occupati dai lavoratori; la localizzazione e la durata delle misurazioni sono congrue ai fini della







rappresentatività dei valori ottenuti. Quando i valori sono suscettibili di superare i livelli di interesse vengono utilizzati cicli completi di lavorazione per azzerare l'errore associato.

La misurazione della pressione acustica in presenza della persona interessata deve tener conto delle perturbazioni causate dalla stessa al campo di pressione: si considera non perturbata la misura se eseguita a 0,1 metri di distanza dalla testa all'altezza dell'orecchio.

Le ponderazioni temporali "slow" e "fast" sono valide se l'intervallo di misurazione risulta grande rispetto alla costante di tempo di ponderazione prescelta ed il livello della pressione acustica non fluttua rapidamente.

La metodologia seguita è la seguente:

- controllo calibrazione fonometro con calibratore;
- assemblaggio fonometro;
- impostazione dei parametri fonometrici;
- individuazione della posizione di misura secondo la consueta posizione dei lavoratori;
- posizionamento del microfono all'altezza dell'orecchio del lavoratore maggiormente esposto al rumore, ad una distanza dall'ingresso del canale uditivo esterno compresa tra i 10 e i 40 cm;
- qualora la misura debba essere effettuata in assenza del lavoratore, lo strumento o il microfono dovrà essere sistemato al centro di quella che sarebbe la zona occupata dalla sua testa; se poi tale zona risultasse non ben definibile, la norma indica un'altezza convenzionale a cui posizionare il microfono nel caso di soggetti che operano in piedi, ovvero a 1,55 m rispetto il piano di calpestio, mentre nel caso di soggetti che operano seduti, l'altezza corrisponderà a 0,80 m rispetto al centro del piano di seduta;
- l'addetto alle misurazioni staziona sempre, nel corso dei rilievi, ad una distanza dallo strumento tale da evitare qualsiasi perturbazione, da parte del suo corpo, del campo sonoro intorno al microfono: indicativamente si può dire che tale distanza non dovrà, in ogni caso, essere inferiore a 0,5 m;
- misurazione per un determinato tempo del livello di rumore LAeq e del ppeak rimanendo ad una distanza sufficiente ad evitare interferenze e schermature.



Al termine delle misure deve essere effettuato il controllo della calibrazione del fonometro.

Scelta dei tempi di misura

Altro aspetto fondamentale del procedimento di prova, considerato dalla norma UNI 9432, è la durata dei tempi di misura del livello sonoro continuo equivalente LAeq, talvolta indicati anche come tempi di osservazione, da adottare relativamente a ciascuna lavorazione presa in esame. La definizione di tali tempi, di sensibile rilevanza sia per il pratico svolgimento delle misure, sia per la determinazione di quella parte dell'incertezza di misura definita incertezza da campionamento, è in definitiva strettamente correlata alle caratteristiche dell'andamento temporale del rumore prevalente nella postazione di lavoro considerata.

A tal fine la norma UNI 9432 assume come criterio generale di riferimento la possibilità di aggregare la quasi totalità dei rumori industriali, compresi quelli a carattere impulsivo, in tre distinte tipologie: rumori costanti, rumori ciclici e rumori

fluttuanti; si intende per:

- rumore costante (stazionario): rumore di durata maggiore di 1 s, caratterizzato da una differenza tra i livelli di pressione sonora massimo e minimo, in costante di tempo "slow", inferiore a 3 dB(A);
- rumore fluttuante (non stazionario): rumore di durata maggiore di 1 s, caratterizzato da una differenza tra i livelli di pressione sonora massimo e minimo, in costante di tempo "slow", maggiore di 3 dB(A);
- rumore ciclico: rumore di durata maggiore di 1 s che si ripete con le stesse caratteristiche ad intervalli di tempo eguali e maggiori di 1 s.

Compito del tecnico competente sarà quindi quello di stabilire, per ogni postazione di lavoro considerata, la categoria di appartenenza del rumore in esame e sulla base di essa predisporre la durata del tempo di misura del LAeq, al cui risultato dovrà essere associata l'incertezza di campionamento specifica.

I tre criteri di campionamento indicati dalla norma UNI 9432 sono così riassumibili:

1. nel caso di rumore costante per l'intero periodo di esposizione del lavoratore è ritenuta sufficiente l'esecuzione di una sola misura la cui durata potrà essere limitata al tempo necessario, che comunque non dovrà mai essere inferiore a 60 s, per ottenere la stabilizzazione entro $\pm 0,3$ dB del livello $L_{Aeq,Tm}$ che il fonointegratore sta rilevando. In questo caso l'incertezza da campionamento viene assunta come pari a zero;
2. nel caso di rumore ciclico, la durata di ciascuna misura dovrà essere tale da comprendere un numero intero di cicli, per ottenere la stabilizzazione entro $\pm 0,3$ dB del livello $L_{Aeq,Tm}$ che il fonointegratore sta rilevando. In questo caso l'incertezza da campionamento viene assunta come pari a zero. Qualora si effettuino più misure di singoli cicli dovrà essere calcolato il valor medio con relativa incertezza secondo quanto specificato più avanti;
3. nel caso di rumore fluttuante per l'intero tempo di esposizione la corretta rappresentatività del valore misurato, rispetto il livello sonoro equivalente dell'intero periodo, può essere ottenuta:
 - mediante un tempo di misura protratto per l'intero periodo di esposizione, e in questo caso l'incertezza di campionamento viene assunta come pari a zero;
 - mediante l'esecuzione di una sola misura riguardante la condizione operativa ritenuta dal tecnico competente più rumorosa, e in questo caso il valore di $L_{Aeq,Tm}$ misurato verrà assunto come $L_{Aeq,Te}$ e l'incertezza di campionamento verrà posta pari a zero;
 - mediante un adeguato campionamento temporale, basato sull'esecuzione di al meno tre misure ciascuna di durata sufficiente ad ottenere la stabilizzazione entro $\pm 0,3$ dB del livello $L_{Aeq,Te}$ che il fonointegratore sta rilevando. In ogni caso la durata di ognuno dei tre rilievi, che non possono essere consecutivi e devono essere selezionati in modo casuale rispetto l'intero periodo temporale che rappresentano, non può essere inferiore a 5 min. Se, sempre secondo la norma UNI 9432,

la differenza tra il minimo ed il massimo dei valori rilevati è inferiore a 5 dB(A) potrà essere assunto come $L_{Aeq,Te}$ il loro valore medio. Se al contrario tale differenza è superiore a 5 dB(A) occorrerà ricorrere ad uno dei due metodi specificati precedentemente.

Individuazione e misura di rumori a carattere impulsivo

Il D.Lgs. 81/2008 e s.m.i. prevede, per la valutazione del rischio di danno da rumore negli ambienti di lavoro, anche l'accertamento della presenza di eventuali rumori a caratteri impulsivo e la loro misurazione. È noto infatti che, a parità di contenuto energetico medio, un rumore con componenti impulsive può costituire un'aggravante, in termini di rischio di danno uditivo, rispetto ad un rumore privo di tali componenti. La segnalazione di tale aggravante può risultare di estrema utilità per il medico competente.

Per quanto concerne l'aspetto della misurazione, sia il Decreto che la norma UNI 9432 prescrivono che le misure dei livelli di picco vengano effettuate inserendo sul fonointegratore la curva di ponderazione C, mentre precedentemente tali misure venivano eseguite in lineare, ovvero senza alcuna pesatura in frequenza.

Il D.Lgs. 81/08 e s.m.i. prescrive che $p_{peak}(C)$ non superi mai i 140 dB, ponendo però, come è noto, anche due soglie d'azione rispettivamente a 137 dB(C) e 135 dB(C).

Per quanto concerne invece l'accertamento della presenza di componenti impulsive nel rumore in esame, occorre precisare che allo stato attuale tale questione non è ancora stata risolta in modo unanimemente condiviso. Mentre infatti il riconoscimento di impulsi sonori ben individuabili e relativamente isolati, ad esempio colpi di maglio, o di pressa o di martello, è un'operazione nel complesso agevole, nel caso di impulsi multipli rapidi, associati ad esempio a lavorazioni eseguite da presse veloci, o nel caso di situazioni ambientali con una molteplicità di sorgenti sonore impulsive, tale riconoscimento può risultare più complesso e controverso.

A questo proposito la nuova versione della norma UNI 9432 ha recepito il criterio finora adottato dalla normativa internazionale ISO, ed in particolare dalle norme ISO 9616, ISO 11201 e UNI

EN ISO 11204, secondo le quali un rumore può essere considerato impulsivo quando presenta un indice d'impulsività eguale o superiore a 3 dB, in base alla seguente relazione:

$$\Delta K1 = LA_{eq,l} - LA_{eq} \text{ dB(A)} \quad [1]$$

dove:

$LA_{eq,l}$ rappresenta il livello sonoro continuo equivalente, ponderato A, rilevato con la costante di tempo Impulse, LA_{eq} rappresenta il livello sonoro continuo equivalente, ponderato A.

Rumore impulsivo: rumore caratterizzato da una rapida crescita e da un rapido decadimento, avente durata minore o eguale ad 1 s, ed eventualmente ripetuto ad intervalli più o meno regolari. Secondo la norma UNI EN ISO 12001(2009) si possono considerare impulsi isolati quelli in cui l'intervallo di tempo tra l'uno e l'altro è superiore a 0,2 s; mentre è da considerarsi un rumore quasi impulsivo quello in cui si ha una serie di impulsi sonori di ampiezza comparabile con intervalli minori di 0,2 s tra singoli impulsi.

Valutazione e calcolo delle incertezze delle misurazioni

Ad ogni misurazione è sempre associata un'incertezza, cioè un parametro che caratterizza la dispersione dei valori che possono essere ragionevolmente attribuiti al misurando.

Il calcolo e l'indicazione di questo parametro, fondamentale ai fini di una corretta verifica della riproducibilità di una misura, sono specificatamente richiesti dal DLgs 81/08 e s.m.i. per quanto riguarda tutte le misure del livello sonoro continuo equivalente e del livello sonoro di picco eseguite per l'accertamento del rischio di danno da rumore negli ambienti di lavoro.

Come già indicato nell'Allegato II delle Linee Guida ISPESL per la Valutazione del Rischio (2005), ed ora più approfonditamente articolato e dettagliato nella revisione della norma UNI 9432, occorre tener conto dei fattori d'incertezza associati alla metodologia di misura adottata, oltre a quelli relativi alla classe di strumentazione usata, la cui

importanza complessiva può essere spesso nettamente superiore a quello dovuto all'incertezza strumentale.

Nella nuova versione della norma UNI 9432, l'insieme dei contributi più significativi che si raccomanda di considerare nella definizione e nel calcolo dell'incertezza sul livello di esposizione giornaliera è il seguente:

- incertezza strumentale;
- incertezza da campionamento;
- incertezza da posizionamento dello strumento;
- incertezza legata all'eventuale presenza di protettori auricolari;
- incertezza relativa ai tempi di esposizione.

Per la valutazione e la procedura di calcolo di ognuna di queste incertezze parziali e del conseguente valore complessivo da associare ai risultati delle misure eseguite, si ritiene opportuno rimandare direttamente alla consultazione di quanto prescritto dalla norma UNI 9432 sia nell'Appendice C che nel capitolo 5.11.

Effettuando tale consultazione si potrà constatare che, nonostante sia segnalata, l'incertezza relativa ai tempi di esposizione non viene considerata nel calcolo complessivo finale, pur riconoscendo che si tratta di un fattore d'incertezza tutt'altro che secondario. Il motivo di tale scelta sta sostanzialmente nel fatto che nella quasi totalità dei casi i tempi di esposizione sono dichiarati dal datore di lavoro, a cui spetta decidere se attribuire a tali valori un'incertezza, mentre il compito specifico del tecnico competente può, a stretto rigore, ritenersi circoscritto al calcolo e all'attribuzione delle incertezze relative alle misurazioni da lui direttamente effettuate.

Salvo alcune specificità, pressoché analoga a quella relativa alla misura del livello di esposizione giornaliero è la procedura indicata dalla norma UNI 9432 per la definizione e la valutazione dell'incertezza relativa alla misura dei livelli sonori di picco. Anche in questo caso si ritiene opportuno rimandare, per l'esecuzione dei calcoli, alla consultazione diretta di quanto prescritto dalla norma stessa nell'Appendice C.3.

Bibliografia

- Decreto Legislativo 81/2008 - Testo Unico sulla Salute e Sicurezza sul Lavoro.
- Legge 447/1995 - Legge quadro sull'inquinamento acustico.
- Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 14 novembre 1997 - Determinazione dei requisiti per la qualifica di tecnico competente in acustica.
- Decreto Legislativo 42/2017- Disposizioni in materia di armonizzazione della normativa nazionale in materia di inquinamento acustico.
- Direttiva 2003/10/CE - Protezione dei lavoratori dai rischi derivanti dall'esposizione al rumore durante il lavoro.
- Direttiva 2002/49/CE - Direttiva sul rumore ambientale. Regola la gestione e la valutazione dell'inquinamento acustico negli Stati membri dell'UE.
- Regolamento UE 765/2008 - Norme riguardanti la sorveglianza del mercato dei prodotti e la certificazione.
- Manuale di Acustica Ambientale e Architettonica, Maurizio Pompili e Gaetano Licitra, ed. Hoepli.
- Acustica Applicata, Luigi Maffei e Francesco Romano, ed. Tecniche Nuove.
- La valutazione del rischio rumore negli ambienti di lavoro, Raffaele Esposito, ed. EPC.
- Il Rumore negli Ambienti di Lavoro: Normativa, misure, valutazione, protezione, Giuseppe Pezzati, ed. ETS.
- L'Acustica nei Luoghi di Lavoro, Rivista Italiana di Acustica.
- La Figura del Tecnico Competente in Acustica nella Legislazione Italiana, Ambiente & Sicurezza.
- ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) (<https://www.isprambiente.gov.it>).
- INAIL (<https://www.inail.it>).





AREE DEL SITO WEB DELL'ORDINE



L'Homepage
<https://www.ording.roma.it>



L'Albo degli iscritti
<https://www.ording.roma.it/albo-iscritti>



L'Area degli iscritti
<https://area-iscritti.ording.roma.it/>



I seminari
<https://www.ording.roma.it/formazione/>



Sito della rivista
<https://ioroma.info>



Elenco delle Commissioni
<https://www.ording.roma.it/servizi-agli-iscritti/commissioni>



ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROVINCIA DI ROMA

Piazza della Repubblica, 59 - 00185 Roma

Tel.: 06.487.9311 - Fax: 06.487.931.223

Cod.fisc. 80201950583

Orari di apertura al pubblico degli uffici

Lun 09:30/12:30 14:30/17:30

Mar 09:30/12:30 14:30/17:30

Mer 09:30/12:30 14:30/17:30

Gio 09:30/12:30 14:30/17:30

Ven 09:30/12:30

io
roma

