



Ministero delle Imprese
e del Made in Italy

Dipartimento per il Digitale, la Connettività e le Nuove Tecnologie

LA COMUNICAZIONE

Note, Recensioni e Notizie

Pubblicazione del Dipartimento per il Digitale,
la Connettività e le Nuove Tecnologie

Anno 2025
Volume VXIX

Focus su
PROGETTO
POLIS

COMUNICAZIONI ELETTRONICHE - SERVIZI POSTALI - TELEVISIONE E TECNOLOGIE DELL'INFORMAZIONE
RADIO - SICUREZZA INFORMATICA - QUALITÀ DEI SERVIZI - COORDINAMENTO FREQUENZE
PIANIFICAZIONE E GESTIONE SPETTRO RADIO - SCUOLA SUPERIORE DI SPECIALIZZAZIONE TLC
SORVEGLIANZA MERCATO APPARECCHIATURE RADIO - INTEROPERABILITÀ NUMERAZIONE STANDARDIZZAZIONE
RICERCA IN TLC E ICT - AUTORITA' DI SETTORE NIS - POLITICHE NUOVE TECNOLOGIE ABILITANTI



In copertina

L'immagine usata per la copertina è del fotografo **Ryutaro Tsukata** pubblicata con licenza ad uso gratuito sul sito www.pexels.com



**Ministero delle Imprese
e del Made in Italy**

LA COMUNICAZIONE

Note Recensioni e Notizie

Anno 2025 Vol. LXIX

Pubblicazione del
**Dipartimento per il digitale, la connettività
e le nuove tecnologie**

Capo Dipartimento

Dott.ssa Eva Spina

Hanno collaborato in questo numero:

Redazione e Pubblicazione sul web

Corrado Pisano

*Organizzazione, coordinamento, supporto tecnico e
grafica:*

Ing. Fabrizio Zanuccoli

Si ringraziano gli Autori degli articoli e i componenti del Comitato di Revisione della rivista che hanno contribuito alla realizzazione di questo numero.

La Comunicazione - Note, Recensioni & Notizie è la rivista "storica" dal 1952 di informazione e divulgazione scientifica edita dal **Dipartimento per il digitale, la connettività e le nuove tecnologie**, e ha lo scopo di documentare lo sviluppo del settore della Comunicazione Elettronica, attraverso le sue rubriche di "Note" (contenenti esperienze, studi, ricerche e tutte quelle informazioni di taglio prettamente tecnico-scientifico), di "Recensioni" (di libri, testi, trattati, ecc.) ed infine di "Notizie" (brevi resoconti d'attualità relativi ad incontri, conferenze, seminari, attività di ricerca, ecc.).

Sommario

Dott.ssa Eva Spina **Introduzione del Capo Dipartimento** **5**

Dipartimento per il digitale, la connettività e le Nuove Tecnologie

Roberto Marani ♦
Anna Gina Perri □ **Progettazione di circuiti logici ternari basati su CNTFET per applicazioni nel campo dell'elettronica portatile** **7**
Design of CNTFET-based Ternary Logic Circuits for Portable Electronics Applications

□ Dipartimento di Ingegneria Elettrica e dell'Informazione (DEI), Politecnico di Bari, Italia
♦ Istituto di Sistemi e Tecnologie Industriali Intelligenti per il Manifatturiero Avanzato (STIIMA), Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), Bari, Italia

Gianpaolo Susanna ♦□,
Chiara Lodovisi ♦,
Andrea Reale ♦,
Silvello Betti ♦ **U-OWC (Underwater Optical Wireless Communication): trasmissioni ottiche subacquee** **28**
U-OWC (Underwater Optical Wireless Communication)

♦ Dipartimento di Ingegneria Elettronica, Università degli studi di Roma "Tor Vergata"
□ DGTCIS – ISCTI Ministero delle Imprese e del Made in Italy

Giancarlo Butti ♦ **Resilienza operativa digitale: Regolamento 2022/2554 (DORA)** **41**
Digital operational resilience: Regulation 2022/2554 (DORA)

♦ Isaca Milano

Stefano Barbieri □,
Fernando Consalvi ♦,
Marianna Biscarini □,
Gianmarco Fusco ♦,
Stefano Luvini ♦,
Nazzareno Pierdicca □ **Stazione ricevente Alphasat di Roma (i): scintillazioni e attenuazione da pioggia in banda ka** **59**
Alphasat ka-band receiving station in Rome (i): scintillations and rain attenuation

♦ Fondazione Ugo Bordoni
□ DIET, Università di Roma La Sapienza
• Direzione generale DGTEL-ISCTI, Ministero delle Imprese e del Made in Italy, (MIMIT)

Sommario

Claudia Carciofi ♦,
Manuel Faccioli ♦,
Andrea Garzia ♦,
Valeria Petrini ♦,
Elena Mammi ♦,
Simona Valbonesi ♦

Metodologie di valutazione e analisi del fattore Building Entry Loss per scenari di coesistenza indoor

Methodologies for assessment and analysis of Building Entry Loss factor for indoor coexistence scenarios.

73

♦ Fondazione Ugo Bordoni

Stefano D'Elia ♦,
Andrea Garzia □,
Paolo Grazioso □,
Riccardo Suman ♦,
Simona Valbonesi □

Effetti dell'applicazione di un fattore di riduzione vettoriale α_{24} nella valutazione dell'impatto elettromagnetico di sistemi 5G Massive MIMO (AAS)

Effects of the application of a vectorial α_{24} reduction factor for electromagnetic impact assessment in 5G Massive MIMO (AAS) systems

101

♦ Vodafone Servizi e Tecnologie
□ Fondazione Ugo Bordoni

DGTEL

Polis: Un'iniziativa per avvicinare cittadini, territori e Pubblica Amministrazione

Polis: A strategic initiative to reconnect citizens, territories and Public Administration

127

Ministero delle Imprese e del Made in Italy

Introduzione del Capo Dipartimento

È con grande piacere che presento questo nuovo numero della rivista "La Comunicazione - Note, Recensioni e Notizie", uno strumento di aggiornamento tecnico e professionale dedicato agli operatori del Ministero delle Imprese e del Made in Italy (MIMIT) e a tutti coloro che lavorano nei settori delle comunicazioni, delle tecnologie innovative e della digitalizzazione. La nostra rivista si pone come una risorsa utile per affrontare le sfide in continuo evolversi del panorama tecnologico, permettendo ai professionisti di restare informati e aggiornati su temi cruciali e di grande rilevanza.

In questo numero, troverete articoli di approfondimento su tematiche di grande attualità, come la trasmissione ottica subacquea, le comunicazioni satellitari, le reti 5G e le nuove frontiere della progettazione nel campo dell'elettronica portatile. Inoltre, verranno trattati temi di attualità come la valutazione dell'impatto elettromagnetico dei sistemi 5G, la resilienza digitale delle entità finanziarie e la digitalizzazione dei servizi pubblici tramite il progetto Polis. Ogni articolo, frutto del lavoro di esperti del settore, è pensato per offrire non solo una panoramica tecnica, ma anche spunti di riflessione sulle implicazioni pratiche e strategiche di queste innovazioni.

La rivista si propone, con questo numero, di stimolare la riflessione, promuovere l'aggiornamento continuo e facilitare il dialogo tra professionisti, ricercatori e istituzioni. In un contesto caratterizzato da una rapida evoluzione tecnologica, la sfida della trasformazione digitale, della sostenibilità e della competitività globale non può essere affrontata senza una solida preparazione tecnica e una visione strategica. Per questo motivo, "La Comunicazione" si impegna a fornire ai suoi lettori gli strumenti necessari per navigare in questo panorama complesso e in continua evoluzione, contribuendo a una maggiore comprensione delle opportunità offerte dalle nuove tecnologie, dalle politiche pubbliche e dalle normative in corso di sviluppo.

Siamo convinti che una corretta informazione e una preparazione continua siano la chiave per cogliere le sfide e trasformarle in opportunità di crescita e innovazione. Per questo motivo, la nostra rivista si configura come un valido supporto non solo per i professionisti del MIMIT, ma per tutti coloro che desiderano contribuire allo sviluppo e all'evoluzione del settore tecnologico e delle comunicazioni.

Concludiamo il nostro editoriale con un sentito ringraziamento ai nostri autori, ai ricercatori e a tutti coloro che, con il loro impegno e la loro passione, contribuiscono a rendere la rivista uno strumento utile, aggiornato e di qualità per la nostra comunità professionale. Il loro lavoro è fondamentale per mantenere alta la qualità dei contenuti che offriamo ai nostri lettori e per garantire che la rivista continui a essere un punto di riferimento nel panorama dell'aggiornamento tecnico e professionale.

Dott.ssa Eva Spina

Capo Dipartimento per il digitale,

la connettività e le nuove tecnologie

Progettazione di circuiti logici ternari basati su CNTFET per applicazioni nel campo dell'elettronica portatile

Design of CNTFET-based Ternary Logic Circuits for Portable Electronics Applications

Roberto Marani[♦], Anna Gina Perri[□]

♦ Istituto di Sistemi e Tecnologie Industriali Intelligenti per il Manifatturiero Avanzato (STIIMA), Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), Bari, Italia

□ Dipartimento di Ingegneria Elettrica e dell'Informazione (DEI), Politecnico di Bari, Italia

Sommario

Il campo dell'elettronica portatile e dei dispositivi intelligenti ha assistito ad un significativo spostamento verso la logica multi valore (Multi-Valued Logic, MVL), in particolare la logica ternaria, grazie al suo potenziale di ridurre la complessità dei circuiti e il consumo energetico. In questo articolo mostriamo come i transistori ad effetto di campo su nanotubi di carbonio (CNTFET) possono essere utilizzati nella progettazione di porte logiche ternarie. I risultati ottenuti sono incoraggianti e dimostrano che le porta logiche ternarie con CNTFET possono rappresentare un approccio valido per la progettazione di circuiti a bassa potenza e alta velocità.

Abstract

The field of portable electronics and smart devices has seen a significant shift towards multi-valued logic (MVL), especially ternary logic, due to its potential to reduce circuit complexity and power consumption. In this paper we show how carbon nanotube field-effect transistors (CNTFETs) can be used in the design of ternary logic gates. The obtained results are encouraging and demonstrate that CNTFET-based ternary logic gates can be a viable approach for the design of low-power, high-speed circuits.

Keyword

Ternary Logic Circuits, CNTFET, Portable Electronics, Smart Devices, Advanced Design System (ADS).

1 - Introduzione

I nanotubi di carbonio, indicati con l'acronimo CNT (Carbon NanoTubes) sono un materiale molto promettente, che può essere utilizzato per realizzare il canale dei transistori ad effetto di campo (CNTFET), un nuovo tipo di dispositivo molecolare in grado di funzionare meglio su scala nanometrica, che è il limite massimo della miniaturizzazione [1-6].

Inoltre, alcune delle caratteristiche degne di nota dei CNTFET sono l'elevata mobilità dei portatori e la conduzione balistica [1].

In particolare, il CNTFET di tipo MOSFET (indicato spesso come C-CNTFET) è utilizzato per progetti di memoria ad alte prestazioni e basso consumo, anche perché questo dispositivo ha una corrente di spegnimento significativamente inferiore, che riduce notevolmente la potenza consumata nello stato di spegnimento del CNTFET [7-8].

Per questo dispositivo abbiamo già proposto un modello compatto, semi-empirico [2-8], in cui abbiamo introdotto alcuni miglioramenti per consentire una facile implementazione sia in SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) che in Verilog-A.

Quindi il nostro modello è stato implementato per eseguire analisi statiche e dinamiche di circuiti analogici e digitali [9-11].

In questo articolo vogliamo mostrare la potenzialità dei CNTFET nella progettazione di porte logiche ternarie, che sono un'alternativa promettente alla tecnica di progettazione logica binaria convenzionale, poiché è possibile ottenere semplicità ed efficienza energetica nella moderna progettazione digitale grazie alle ridotte dimensioni del circuito come interconnessioni e area del chip, ottenendo quindi dispositivi e circuiti da utilizzare nel campo dell'elettronica portatile.

Inoltre l'uso di nanotubi di carbonio per MVL sta attualmente ricevendo molta attenzione poiché la logica ternaria permette di ottenere circuiti logici con un ritardo inferiore e un consumo energetico ridotto, rispetto alla logica binaria.

Tuttavia ci sono ancora delle sfide nel raggiungere l'ottimizzazione dell'area-energia in questi circuiti ed è ancora un ostacolo l'adozione di tecniche di polarizzazione del corpo (bulk) per regolare la tensione di soglia per lo sviluppo di circuiti basati sulla logica ternaria.

In questo articolo proponiamo una tecnica di progettazione di porte NOR e NAND ternarie utilizzando la struttura del modello completo e la progettazione di porte complesse dinamiche [12].

Tutte le simulazioni vengono eseguite utilizzando il software Advanced Design System (ADS), compatibile con il linguaggio di programmazione Verilog-A [13], evitando così i problemi presentati in SPICE utilizzato in progetti precedenti, proposti in letteratura [12] [14].

I risultati ottenuti mostrano che le porte logiche ternarie con CNTFET possono rappresentare un approccio valido per la progettazione di circuiti a bassa potenza e alta velocità.

La presentazione dell'articolo è organizzata come segue. In primo luogo, dopo un breve richiamo sulle proprietà dei CNT, presentiamo il modello CNTFET utilizzato nei progetti mostrati, e già proposto da noi in [15-17]. Quindi viene descritta la procedura per progettare porte logiche ternarie basate sui CNTFET. I risultati della simulazione sono mostrati e discussi, insieme alle conclusioni ed agli sviluppi futuri.

2 – Proprietà elettroniche dei CNT [1]

Il carbonio può esistere in natura sotto varie forme, dette *forme allotropiche*, tra cui le più famose sono il diamante e la grafite.

Come è noto, un atomo di carbonio ha 4 elettroni di valenza sugli orbitali 2s e 2p, che possono facilmente interagire fra di loro a causa della piccola differenza di energia fra questi orbitali. Un elettrone dell'orbitale 2s può, cioè, combinarsi con uno, due, tre elettroni dell'orbitale 2p dando origine alle cosiddette ibridazioni sp , sp^2 ed sp^3 .

Nel caso del diamante, tutti e 4 gli elettroni sono regolarmente accoppiati con gli elettroni di altri atomi di carbonio, formando così una struttura tetraedrica (ibridazione sp^3). Questo tipo di legame è molto forte, ed è per questo che il diamante è così duro.

La grafite, invece, riesce ad accoppiare stabilmente solo tre elettroni su quattro (ibridazione sp^2), e lascia il quarto elettrone libero. Ogni atomo di carbonio è legato ai tre atomi di carbonio adiacenti mediante legami covalenti di tipo σ (cioè localizzati lungo la direzione interatomica), che sono sullo stesso piano, con angoli tra loro di 120° . Tanti atomi tutti insieme danno origine pertanto ad una struttura planare, denominata *grafene*, riempita da esagoni i cui vertici sono, appunto, gli atomi di carbonio. Il quarto elettrone si trova nell'orbitale di tipo π (legame metallico tra i piani), che presenta lobi ortogonali al piano del foglio di grafene.

Le proprietà elettroniche dei nanotubi possono essere studiate tenendo conto della relazione di dispersione dell'energia per gli elettroni degli orbitali π .

La grafite è formata da un'infinità di questi strati sovrapposti. Poiché tutti gli elettroni, che non si sono accoppiati, stanno tra uno strato e l'altro, i vari strati di grafite scivolano molto facilmente l'uno sull'altro, rendendo la grafite morbida e friabile. Fino al 1985 erano note solamente le due suddette forme di carbonio cristallino.

Gli studi dello scienziato americano Richard Smalley hanno portato alla scoperta di una terza forma di arrangemento regolare degli atomi di carbonio: quella dei fullereni, chiamati così in onore dell'architetto R. Buckminster-Fuller, le cui creazioni, chiamate "cupole geodetiche" ricordano la struttura dei fullereni. Difatti i fullereni sono delle "gabbie" approssimativamente sferiche formate da un arrangemento ordinato di strutture esagonali e pentagonali di atomi di carbonio.

La storia dei nanotubi di carbonio ha origine nel 1991, con la scoperta del giapponese Iijima del laboratorio NEC di Tsunuba, della possibilità di legare dei fullereni per formare strutture a forma di tubi chiusi alle estremità, del diametro di pochi nanometri. Egli infatti osservò

casualmente dei filamenti di dimensioni nanometriche in un residuo di fuliggine originato dalla vaporizzazione di grafite usata per la produzione di fullereni.

Queste strutture lunghe e sottili furono chiamate *nanotubi*.

I nanotubi di carbonio possono essere pensati come fogli di grafite arrotolati in forma cilindrica.

La maggior parte dei nanotubi consiste di diversi cilindri concentrici indicati come nanotubi a parete multipla (*Multi Wall NanoTubes*, MWNT), ma esistono anche nanotubi formati da un singolo strato (*Single Wall NanoTubes*, SWNT), chiusi alle due estremità da due calotte emisferiche.

La figura 1 mostra la costruzione di un foglio di grafene, in cui gli atomi di carbonio si trovano a ogni incrocio e le linee indicano i legami chimici, che derivano dagli orbitali sp^2 .

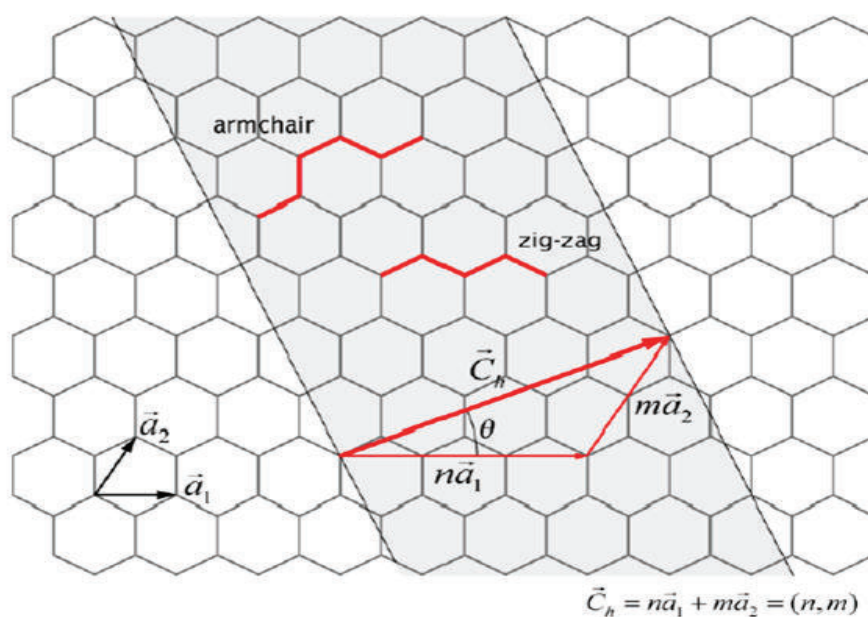


Figura 1 – Foglio di grafene con indicazione del vettore chirale.

Si sono scelti, come vettori del reticolo primitivo, $\bar{a}_1$ e $\bar{a}_2$, che definiscono un parallelogramma costituente la cella unitaria primitiva.

Un nanotubo di carbonio può essere costruito avvolgendo il foglio in modo tale che l'origine coincida con uno dei siti equivalenti del reticolo.

Il *vettore chirale* o di avvolgimento C_h è definito dalla seguente relazione [1]:

Equazione 1. Definizione del vettore chirale.

$$C_h = n \bar{a}_1 + m \bar{a}_2$$

ed è specificato dalla coppia di interi (n, m) .

L'angolo θ , mostrato in figura 1, è chiamato *angolo chirale*.

L'avvolgimento lungo le linee tratteggiate dà origine a due particolari categorie di nanotubi:

quelli di tipo *armchair* ($n = m$, $\theta = 0^\circ$)

quelli del tipo *zig-zag* ($m = 0$, $\theta = 30^\circ$)

Per angoli chirali $0^\circ < \theta < 30^\circ$, il nanotubo è indicato generalmente come di tipo *chirale*.

Le proprietà elettroniche dei nanotubi dipendono fortemente dalla chiralità del nanotubo, cioè dagli indici n ed m , con $0 \leq m \leq n$ per ragioni di simmetria legate al reticolo ad alveare: valori di m al di fuori di questo range forniscono valori già ottenuti [1].

Un SWNT è considerato *metallico* se il valore $n-m$ è divisibile per tre. Altrimenti il nanotubo è considerato *semiconduttore*.

Di conseguenza, quando i nanotubi sono caratterizzati da valori casuali di n ed m dovremmo aspettarci che due terzi del nanotubo saranno semiconduttori e l'altro terzo metallico.

Per studiare le proprietà elettroniche dei nanotubi, si rimanda al testo proposto in bibliografia [1]. In particolare le proprietà di conducibilità della maggior parte dei solidi periodici possono essere espresse in base all'approssimazione dell'elettrone fortemente legato (*tight binding approximation*), in cui si parte dalla funzione d'onda per un elettrone in un atomo libero e si

costruisce poi una funzione orbitale del cristallo, ossia una funzione di Bloch che descrive l'elettrone nel campo periodico dell'intero cristallo [1].

In questo articolo ci limitiamo a riportare i risultati finali attraverso la figura 2a, che mostra la rappresentazione tridimensionale della cosiddetta *equazione di dispersione* relativa al foglio di grafene [1].

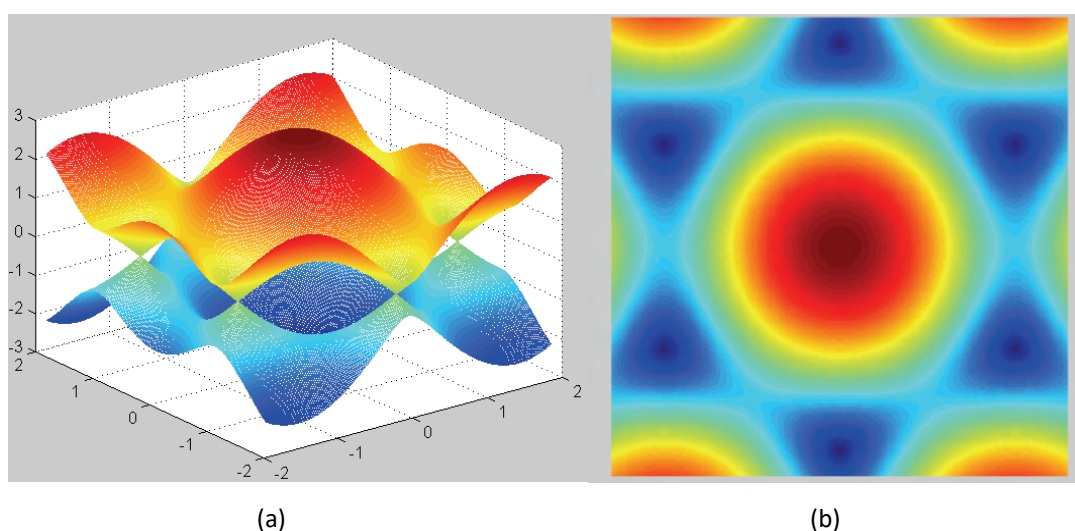


Figura 2 – a) Diagramma della relazione di dispersione per il grafene; b) punti K.

Come si può osservare, il suddetto grafico è formato da due grandi “tende”: la “tenda” superiore è un’immagine della banda di conduzione, quella inferiore rappresenta la banda di valenza. Inoltre si rileva come, in corrispondenza dei vertici dell’esagono, le due bande si tocchino: tali punti sono noti con il nome di *punti K* e sono responsabili delle proprietà elettroniche del grafene (cfr. figura 2b). L’energia di Fermi E_F è così ridotta a questi sei punti. Se le linee di quantizzazione relative al foglio di grafene avvolto a cilindro attraversano i punti K, il nanotubo presenterà un comportamento metallico, perché avrà bandgap nullo, altrimenti si comporterà come un semiconduttore [1].

3 – Modello del CNTFET utilizzato

Una descrizione esaustiva del nostro modello CNTFET è in [15-18]. Pertanto suggeriamo al lettore di consultare questi riferimenti.

Si tratta di un modello compatto, semi-empirico, direttamente e facilmente implementabile in software di simulazione per progettare circuiti analogici e digitali: infatti la parte più complessa del modello è contenuta in Verilog A [13].

In particolare il software utilizzato è Advanced Design System (ADS), che è compatibile con il linguaggio di programmazione Verilog A.

Abbiamo considerato un n-CNTFET a parete singola nell'ipotesi di trasporto balistico. Questa ipotesi ha permesso di definire una formula analitica per la corrente CNT. Quando viene applicata una tensione positiva V_{GS} tra gate-source, la banda di conduzione all'inizio del canale diminuisce di qV_{CNT} , dove q è la carica dell'elettrone e V_{CNT} è il potenziale di superficie, la cui espressione è riportata nei nostri riferimenti [15-18].

Con l'ipotesi che ogni sottobanda diminuisca della stessa quantità lungo l'intera lunghezza del canale, la corrente totale di drain può essere espressa come [19]:

Equazione 2. Equazione della corrente totale di drain.

$$I_{DS} = \frac{4qkT}{h} \sum_p \left[\ln(1 + \exp \xi_{Sp}) - \ln(1 + \exp \xi_{Dp}) \right]$$

dove k è la costante di Boltzmann, T è la temperatura assoluta, h è la costante di Planck, p è il numero di sottobande.

ξ_{Sp} e ξ_{Dp} hanno le seguenti espressioni [2-3]:

Equazione 3. Espressioni di ξ_{Sp} e ξ_{Dp} .

$$\xi_{Sp} = \frac{qV_{CNT} - E_{Cp}}{kT} \quad \text{e} \quad \xi_{Dp} = \frac{qV_{CNT} - E_{Cp} - qV_{DS}}{kT}$$

essendo E_C il minimo delle sottobande di conduzione, V_{DS} la tensione drain-source e V_{CNT} il potenziale di superficie.

In [2] abbiamo proposto, per valutare V_{CNT} , la seguente approssimazione:

Equazione 4. Espressione per valutare V_{CNT} .

$$V_{CNT} = \begin{cases} V_{GS} & \text{per } V_{GS} < \frac{E_C}{q} \\ V_{GS} - \alpha \left(V_{GS} - \frac{E_C}{q} \right) & \text{per } V_{GS} \geq \frac{E_C}{q} \end{cases}$$

dove E_C è la banda di conduzione minima per la prima sottobanda e α è un parametro, che dipende dalla tensione V_{DS} , dal diametro del CNTFET e dalla capacità dell'ossido di gate [2-3]. Per simulare correttamente il comportamento del CNTFET, abbiamo dovuto stimare le capacità e le induttanze parassite, nonché le resistenze di contatto di drain e source. Abbiamo raggiunto questo obiettivo utilizzando un metodo empirico [2-3], più adatto per simulazioni in ambiente CAD (Computer Aided Design).

Questo metodo richiede l'estrazione degli elementi parassiti precedenti confrontando le caratteristiche del dispositivo con quelle misurate. In questo modo è possibile determinare tutti gli elementi del circuito equivalente [2-3].

Vogliamo sottolineare che si è fatto riferimento al modello da noi proposto perché in precedenti lavori [2-4] [9-10], attraverso il confronto con altri modelli proposti in letteratura, quale il modello numerico FETToy [20-21] e quello analitico della Stanford University [22-23], abbiamo dimostrato come i risultati ottenuti, anche a diverse temperature, siano coerenti con i modelli considerati, perché le caratteristiche I-V ottenute sono comparabili. Tuttavia, il nostro modello ha presentato un tempo di esecuzione più breve, senza perdere in accuratezza.

Questo risultato ci ha permesso di dire che il nostro modello sembra essere particolarmente adatto per applicazioni CAD.

In figura 3 mostriamo il modello circuitale ottenuto del CNTFET, mentre in figura 4 le relative caratteristiche I-V d'uscita.

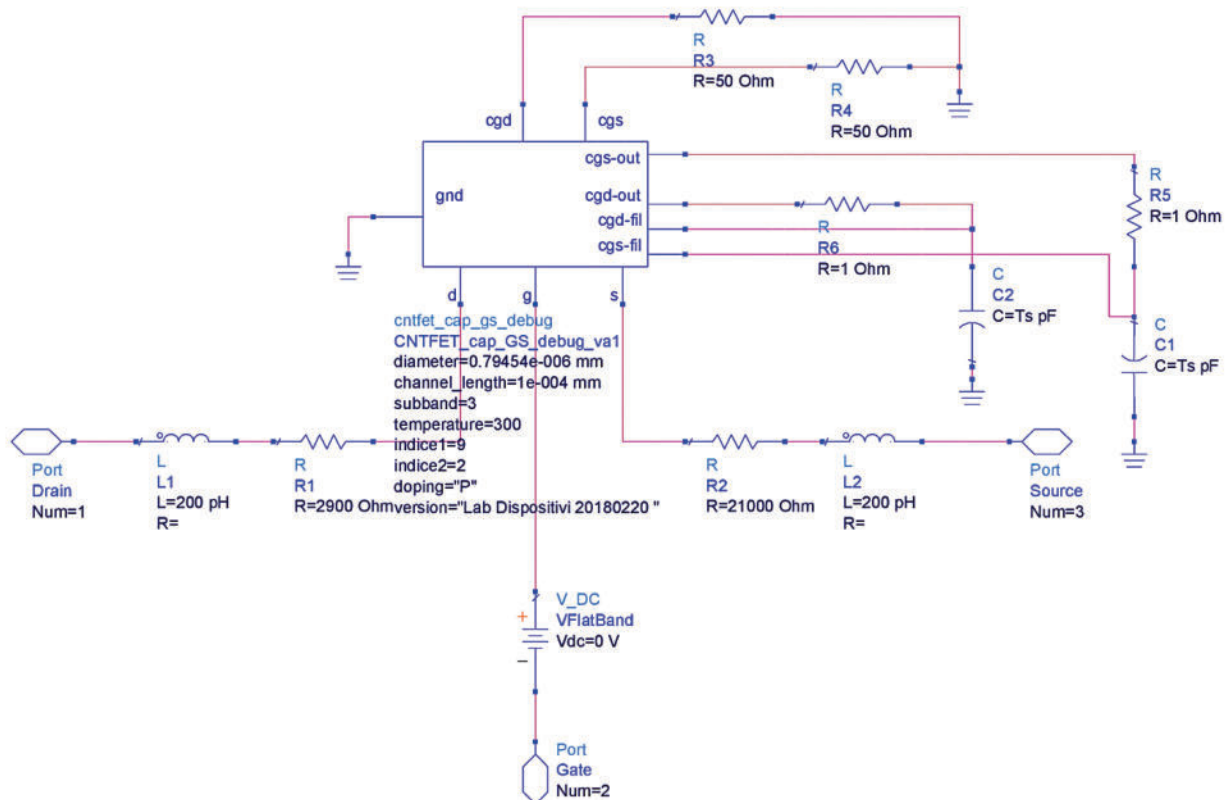


Figura 3 – Modello Verilog-A di CNTFET in ADS (Advanced Design System)..

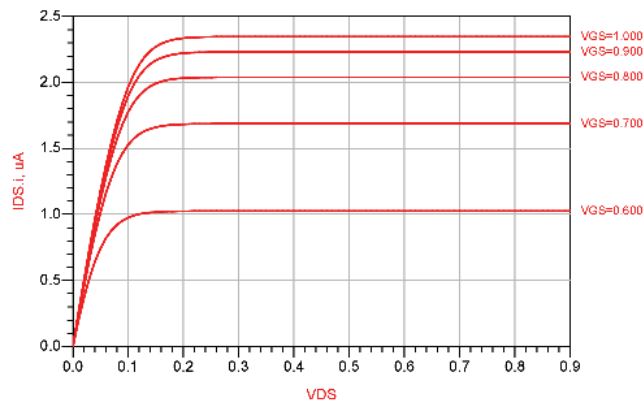


Figura 4 – Caratteristiche I-V d'uscita del CNTFET usato.

4 – Richiami sulla logica ternaria

Una funzione ternaria $f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ è definita come una funzione che mappa $\{0, 1, 2\}^n \rightarrow \{0, 1, 2\}$.

Le tre operazioni base sono:

Equazione 5. Operazioni base nella logica ternaria.

$$X_a + X_b = \max\{X_a, X_b\}$$

$$X_a \bullet X_b = \min\{X_a, X_b\}$$

$$\overline{X}_i = 2 - X_i$$

dove + indica l'operatore OR, $\bullet$ l'operatore AND e $\overline{}$ il NOT.

La logica ternaria NOT è una porta con un ingresso e tre uscite come descritto nella Tabella 1, dove NTI è l'inverter ternario negativo, STI l'inverter ternario standard e PTI è l'inverter ternario positivo [14].

Tabella 1. Tabella della verità di NTI, STI, PTI.

IN	NTI	STI	PTI
0	2	2	2
1	0	1	2
2	0	0	0

Le logiche ternarie NOR e NAND possono così facilmente descritte attraverso la seguente equazione:

Equazione 6. Logiche ternarie NOR e NAND.

$$\text{NOR}(X_a, X_b) = \max\{X_a, X_b\}$$

$$\text{NAND}(X_a, X_b) = \min\{X_a, X_b\}$$

La relativa tabella della verità per il NOR e per il NAND è mostrata in Tabella 2.

Tabella 2. Tabella della verità di NOR e NAND.

X_a	X_b	NOR	NAND
0	0	2	2
0	1	1	2
0	2	0	2
1	0	1	2
1	1	1	1
1	2	0	1
2	0	0	2
2	1	0	1
2	2	0	0

5 – Progetto di porte NOR e NAND in logica ternaria

Come mostrato in [12], un segnale di PRE-carica (PRE) è necessario come interfaccia binaria-ternaria per consentire la progettazione di porte logiche ternarie senza diverse tensioni di soglia dei CNTFET.

La porta NOR funziona con due alimentatori: $VDD = 0,9\text{ V}$ e $VDDL = VDD/2 = 0,45\text{ V}$, come riportato nella figura 5.

Quando PRE è alto il nodo di uscita è precaricato a VDDL da CNT11 e i transistor CNT7 e CNT8 sono accesi. Quindi CNT4 e CNT8 sono entrambi spenti.

Quando PRE è basso CNT11 è spento mentre CNT4 e CNT8 sono accesi lasciando passare gli input attraverso di loro a CNT1 e CNT2 rispettivamente. Il segnale di uscita effettivo deve essere letto quando il segnale di precarica è basso ($PRE = 0\text{ V}$). Il blocco finale agisce come un inverter (cfr. figura 6).

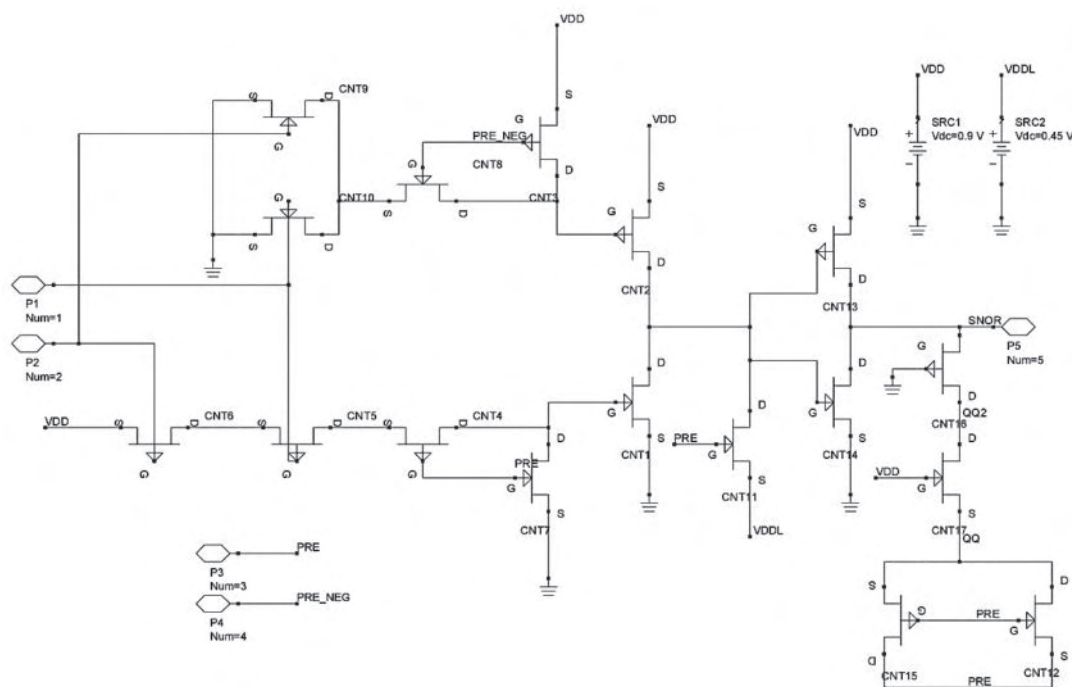


Figure 5 - Schema completo della logica ternaria NOR.

Quando PRE è alto, CNT12 è acceso lasciando passare VDDL attraverso CNT17 e CNT16, che sono sempre accesi. Quindi il nodo di uscita è precaricato a VDDL.

Quando PRE è basso CNT12 è spento e CNT15 è acceso. Vs del transistor CNT17 rimane sempre a VDDL, garantendo un livello logico costante 1 quando PRE è alto.

I parametri utilizzati nelle simulazioni hanno i seguenti valori:

- Tensione di alimentazione = 0,9 V;
- Chiralità del tubo del CNTFET = (15, 2);
- Tensione di soglia del CNTFET $V_{TH} = 0,3461$ V;
- Diametro del tubo del CNTFET $d = 1,26$ nm;
- Lunghezza del canale $l = 100$ nm;
- Numero di sottobande = 3.

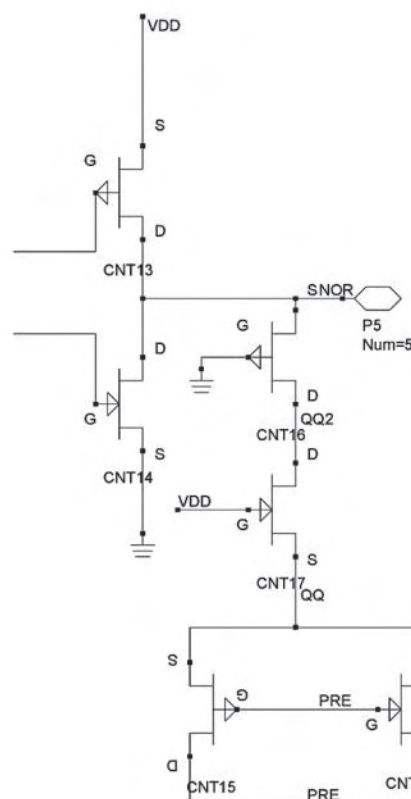


Figure 6 – Blocco finale della logica ternaria NOR.

Nella figura 7 abbiamo riportato la simulazione della porta dinamica utilizzata come NOR ternario (ingressi) in Verilog-A, mentre nella figura 8 lo stesso vale per i segnali PRE e d'uscita.

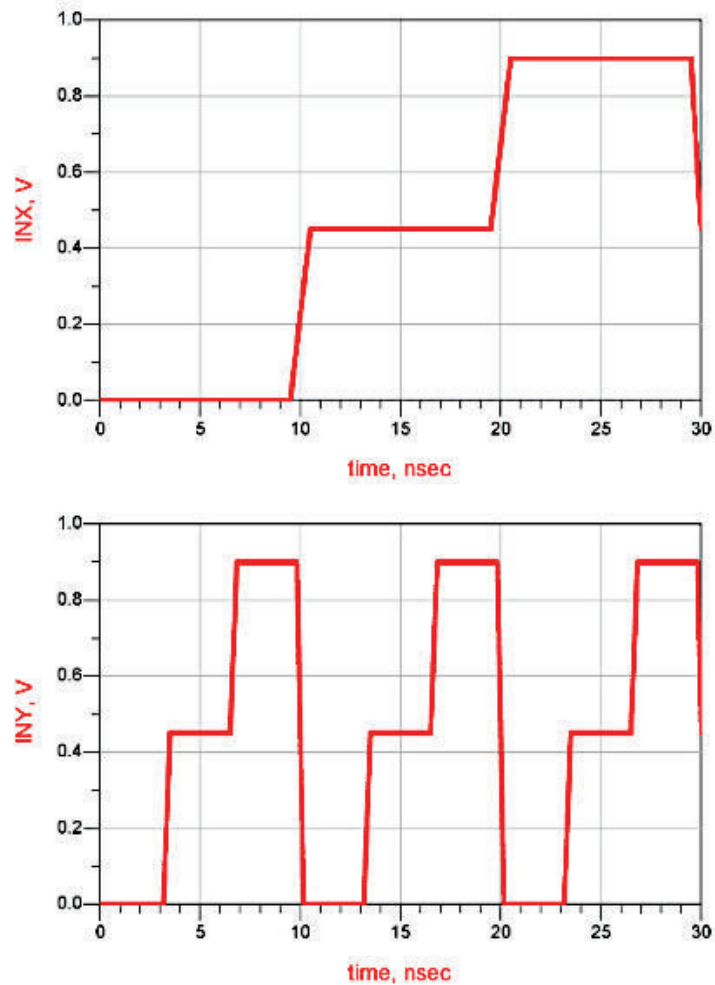


Figure 7 – Simulazione del gate dinamico utilizzato come NOR ternario (ingresso)

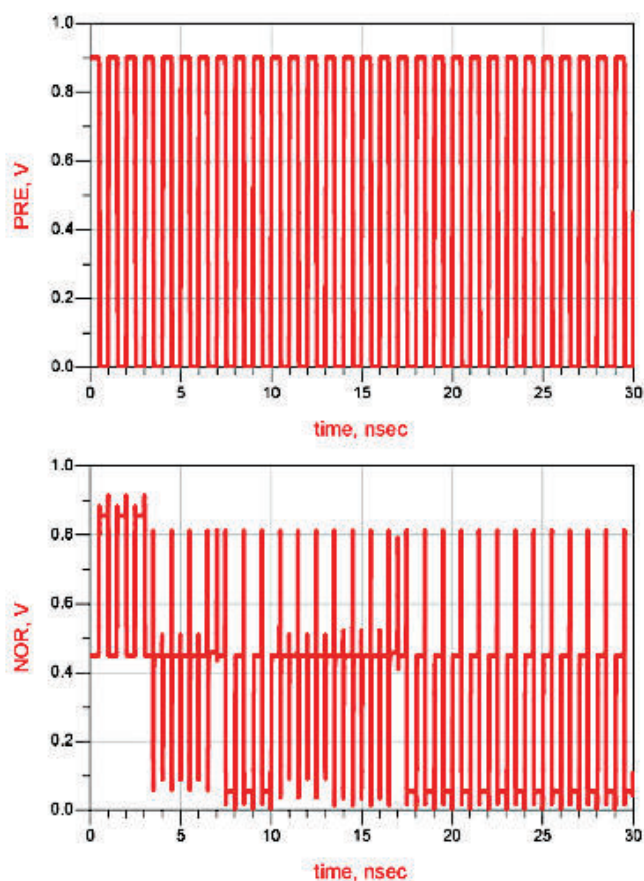


Figure 8 – Lo stesso della figura 7 (segnali PRE e d'uscita).

I picchi sono dovuti al ritardo dei diversi percorsi del circuito nell'intervallo di tempo dal segnale di precarica al ciclo di valutazione (PRE = 0 V) [12].

Per quanto riguarda la porta NAND ternaria, abbiamo in [23] applicato la medesima tecnica di progetto. Per non appesantire la trattazione, si consiglia di vedere i risultati ottenuti, esaustivamente illustrati e discussi in [23].

Per verificare il guadagno della porta NOR, abbiamo scritto un codice Matlab per elaborare i dati dalla simulazione ADS NOR.

È stata simulata l'uscita di questa porta logica con un segnale di rampa in ingresso da 0 V a 0,9 V, e quindi derivandolo rispetto a quello in ingresso.

Come possiamo vedere dalla figura 9, la porta NOR ha un guadagno superiore a 5 da 347,5 mV a 369 mV e da 536,5 mV a 558 mV.

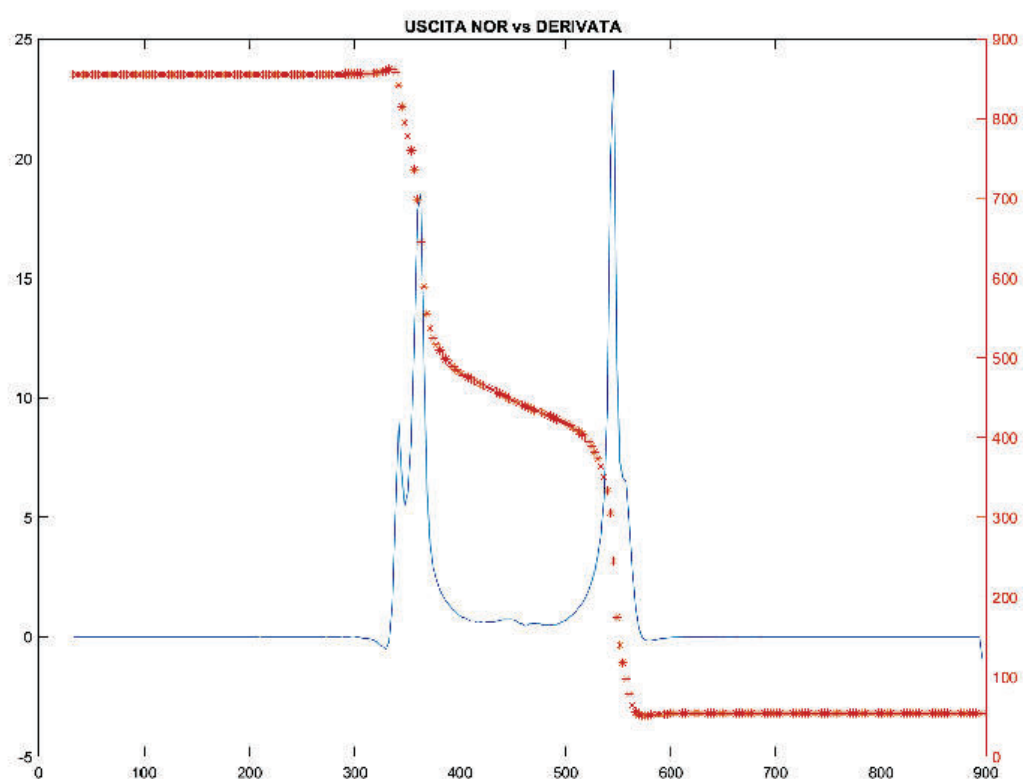


Figure 9 - Simulazione in Matlab che mostra gli intervalli di guadagno della porta NOR ternario.

Con riferimento alla figura 10, possiamo calcolare il tempo di propagazione t_p prendendo il tempo di salita (1->2 e 0->1) e quello di discesa (2->1 e 1->0) (rispettivamente indicati con t_{HL} e t_{LH}) dell'uscita NOR, utilizzando la seguente equazione:

Equazione 7. Definizione del tempo di propagazione [24].

$$t_p = \frac{t_{HL} + t_{LH}}{2}$$

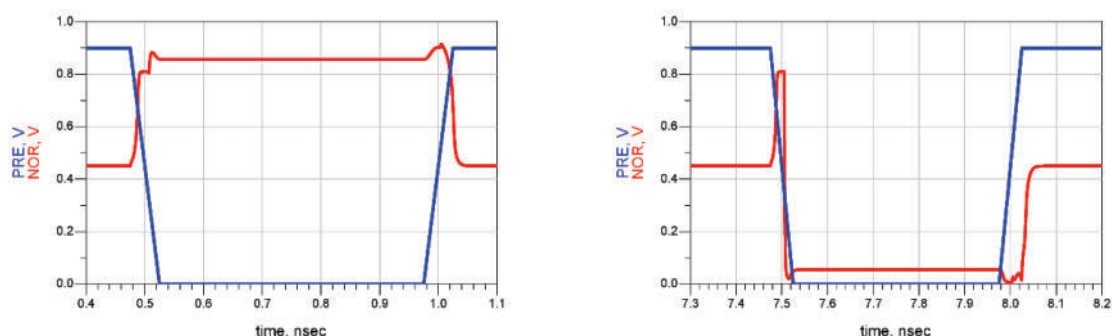


Figure 10 - Simulazione in Verilog-A che mostra il tempo di salita e quello di discesa.

I risultati ottenuti sono riassunti nella Tabella 3.

Tabella 3. Tempi di propagazione.

Delay (ps)	t_R	t_F	t_p
1.2	12.59	25.33	18.96
1.0	45.95	15	30.48

Pertanto resta dimostrata la potenzialità dei CNTFET nella progettazione di porte logiche ternarie, che rappresentano un approccio valido per la progettazione di circuiti a bassa potenza e alta velocità.

6 – Conclusioni e sviluppi futuri

In questo articolo abbiamo mostrato la potenzialità dei CNTFET nella progettazione di porte logiche ternarie, in quanto è possibile ottenere semplicità ed efficienza energetica nella moderna progettazione digitale grazie alle ridotte dimensioni del circuito come

interconnessioni e area del chip, ottenendo quindi dispositivi e circuiti da utilizzare nel campo dell'elettronica portatile.

In particolare abbiamo proposto una tecnica di progettazione di porte NOR e NAND ternarie utilizzando la struttura del modello completo e la progettazione di porte complesse dinamiche. I risultati ottenuti hanno mostrato che le porte logiche ternarie con CNTFET possono rappresentare un approccio valido per la progettazione di circuiti a bassa potenza e alta velocità.

Tuttavia ci sono ancora delle sfide nel raggiungimento dell'ottimizzazione area-energia in questi circuiti. Inoltre l'adozione di tecniche per regolare la tensione di soglia per lo sviluppo di circuiti basati sulla logica ternaria è ancora un ostacolo.

L'obiettivo della ricerca futura sarà quello di progettare circuiti che non solo riducano il consumo di energia e il ritardo, ma migliorino anche la stabilità e l'affidabilità.

7 - Bibliografia

- [1] Perri, A. G., Marani, R., "CNTFET Electronics: Design Principles", Ed. Progedit, Bari, ISBN 978-88-6194-307-0, 2017.
- [2] Gelao, G., Marani, R. , Diana, R., Perri, A. G., "A Semi-Empirical SPICE Model for n-type Conventional CNTFETs", *IEEE Transactions on Nanotechnology*, vol. 10, pp. 506-512, 2011.
- [3] Marani, R., Perri, A.G., "A Compact, Semi-empirical Model of Carbon Nanotube Field Effect Transistors oriented to Simulation Software", *Current Nanoscience*, vol. 7, pp. 245-253, 2011.
- [4] Marani, R., Perri, A.G., "A DC Model of Carbon Nanotube Field Effect Transistor for CAD Applications", *International Journal of Electronics*, vol. 99, pp. 427- 444, 2012.
- [5] Marani, R., Gelao, G., Perri, A.G., "Comparison of ABM SPICE library with Verilog-A for Compact CNTFET model implementation", *Current Nanoscience*, vol. 8, pp. 556-565, 2012.
- [6] Marani, R., Gelao, G., Perri, A.G., "Modelling of Carbon Nanotube Field Effect Transistors oriented to SPICE software for A/D circuit design", *Microelectronics Journal*, vol. 44, pp. 33-39, 2013.

- [7] Marani, R., Perri, A.G., "Analysis of CNTFETs Operating in SubThreshold Region for Low Power Digital Applications", *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, vol. 5, pp. M1-M4, 2016.
- [8] Marani, R., Perri, A.G., "A De-Embedding Procedure to Determine the Equivalent Circuit Parameters of RF CNTFETs", *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, vol. 5, pp. M31-M34, 2016.
- [9] Gelao, G., Marani, R., Pizzulli, L., Perri, A.G., "A Model to Improve Analysis of CNTFET Logic Gates in Verilog-A-Part I: Static Analysis", *Current Nanoscience*, vol. 11, pp. 515-526, 2015.
- [10] Gelao, G., Marani, R., Pizzulli, L., Perri, A.G., "A Model to Improve Analysis of CNTFET Logic Gates in Verilog-A-Part II: Dynamic Analysis", *Current Nanoscience*, vol. 11, pp. 770-783, 2015.
- [11] Marani, R., Perri, A.G., "A Simulation Study of Analogue and Logic Circuits with CNTFETs", *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, vol. 5, pp. M38-M43, 2016.
- [12] Nepal, K., "Dynamic circuits for ternary computation in carbon nanotube based field effect transistors", *Proceedings of the 8th IEEE International NEWCAS Conference 2010*, pp. 53 - 56, Montreal, QC, Canada, 2010.
- [13] Verilog-AMS language reference manual, Version 2.2., 2014.
- [14] Lin, S., Kim, Y.-B., Lombardi, F., "CNTFET-Based Design of Ternary Logic Gates and Arithmetic Circuits", *IEEE Transactions on Nanotechnology*, vol. 10, pp. 217-225, 2011.
- [15] Gelao, G., Marani, R., Perri, A.G., "Effects of Temperature in CNTFET-based Design of Analog Circuits", *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, vol. 7, pp. M16-M21, 2018.
- [16] Gelao, G., Marani, R., Perri, A.G., "Effects of Temperature in CNTFET-based Design of Digital Circuits", *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, vol. 7, pp. M41-M48, 2018.

- [17] Gelao, G., Marani, R., Perri, A.G., "Effects of Temperature on switching time and power dissipation of CNTFET-based Digital Circuits", *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, vol. 7, pp. M63-M68, 2018.
- [18] Gelao, G., Marani, R., Perri, A.G., "A Formula to Determine Energy Band Gap in Semiconducting Carbon Nanotubes", *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, vol. 8, pp. M19-M21, 2019.
- [19] Datta, S., "Electronic Transport in Mesoscopic Systems", Cambridge Studies in Semiconductor Physics and Microelectronic Engineering, Series number 3), Cambridge University Press, ISBN 978-0521599436, 1997.
- [20] <https://nanohub.org/tools/fettoy>, 2013.
- [21] Sinha, S.K., Chaudhury, S., "A comparative analysis of FETToy simulation of CNTFET characteristics," *2013 1st International Conference on Emerging Trends and Applications in Computer Science*, Shillong, India, pp. 62-64, 2013.
- [21] Lee, C-S., Pop, E., Franklin, A.D., Haensch, W., Wong, H.-S. P., "A Compact Virtual-Source Model for CarbonNanotube FETs in the Sub-10-nmRegime—Part I: Intrinsic Elements", *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 62, pp. 3061-3069, 2015.
- [22] Lee, C-S., Pop, E., Franklin, A.D., Haensch, W., Wong, H.-S. P., "A Compact Virtual-Source Model for CarbonNanotube FETs in the Sub-10-nm Regime—Part II:Extrinsic Elements, Performance Assessment,and Design Optimization", *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 62, pp. 3070-3078, 2015.
- [23] Marani, R., Perri, A.G., "A Design Technique of CNTFET-Based Ternary Logic Gates in Verilog-A", *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, vol. 8, pp. M45-M52, 2019.
- [24] Perri, A.G., "Fondamenti di Elettronica", Edizioni Progedit, Bari, ISBN 978-88-6194-045-1, 2009.

U-OWC (*Underwater Optical Wireless Communication*): trasmissioni ottiche subacquee

U-OWC (Underwater Optical Wireless Communication)

Gianpaolo Susanna^{♦□}, Chiara Lodovisi[♦], Andrea Reale[♦], Silvello Betti[♦]

♦ Dipartimento di Ingegneria Elettronica, Università degli studi di Roma "Tor Vergata"

□ DGTCISI – ISCTI Ministero delle Imprese e del Made in Italy

Sommario

L'impiego delle frequenze ottiche in ambito subacqueo è un aspetto interessante dello sviluppo dei sistemi di comunicazioni, che risulta essere di rilevante importanza in quanto l'ambiente sottomarino è ostico e povero in termini di tecnologie trasmissive applicabili. L'analisi della propagazione del segnale luminoso in acque torbide riveste quindi un ruolo chiave per la riuscita a tal scopo. In questo articolo viene investigato il confronto delle prestazioni tra due diverse lunghezze d'onda ottiche (450 nm e 520 nm), che si propagano in acque con diversi livelli di torbidità. Le misurazioni in laboratorio del rapporto segnale/rumore (SNR) hanno portato alla stima teorica del Bit-Error-Rate (BER). Inoltre, le prestazioni delle trasmissioni sono state valutate attraverso i valori di potenza ottica ricevuta. I risultati mostrano prestazioni simili per entrambe le lunghezze d'onda testate nel caso di acqua limpida, mentre in presenza di sostanze inquinanti (Clorofilla e alga Spirulina), sono stati ottenuti risultati migliori utilizzando la lunghezza d'onda più alta (520 nm).

Abstract

The application of optical frequencies in underwater environments is an interesting aspect of the development of communication systems, which is of significant importance because of the underwater environment is hostile and poor in terms of applicable transmission technologies. The analysis of the propagation of the light signal in turbid waters therefore plays a key role in

the success of this purpose. In this paper, the comparison of the performances between two different optical wavelengths (450 nm and 520 nm), which propagate in waters with different levels of turbidity, is investigated. The laboratory measurements of the signal-to-noise ratio (SNR) led to the theoretical estimation of the Bit-Error-Rate (BER). Furthermore, the transmission performances were evaluated through the values of received optical power. The results show similar performances in clear water for both tested wavelengths, while in the presence of pollutants (Chlorophyll and Spirulina algae), better results were obtained using the higher wavelength (520 nm).

Keyword

OWC, Optical Wireless Communication, U-OWC, Underwater Optical Communication, turbid water

1 - Introduzione

Le comunicazioni ottiche si stanno sviluppando ormai anche in ambienti non-terrestri, acquisendo più rilevanza in ambito tecnologico. Un ambiente particolarmente ostile per la trasmissione ottica è quello subacqueo e/o sottomarino [1]. Le reti ottiche sottomarine possono essere la soluzione per comunicazioni ad alta velocità (elevato bit-rate) in diversi scenari operativi marini, come il monitoraggio di porti, piattaforme petrolifere o allevamenti ittici in mare aperto. Stabilire un canale ottico sottomarino è complesso e difficile da sviluppare, a causa delle sue caratteristiche intrinseche, come l'assorbimento e la dispersione del fascio luminoso, ma ad oggi risulta essere l'unico modo per ottenere comunicazioni ad alta velocità dell'ordine di Gbit/s.

Sono stati fatti in letteratura diversi esperimenti per dimostrare la trasmissione ad alta velocità, tramite diversi formati di modulazione e spesso utilizzando sorgenti laser a semiconduttore [1-2-3]; per via delle caratteristiche di assorbimento dell'acqua, le sorgenti laser utilizzate di preferenza nelle trasmissioni ottiche sottomarine, risultano essere a lunghezze d'onda del blu e del verde, ovvero rispettivamente tra i 450 ei 550 nm.

La torbidità dell'acqua è sicuramente un fattore che limita la trasmissione ottica ed è molto presente in ambienti critici, come i fondali dei porti dove il rilascio di materiali inquinanti è più presente; di conseguenza per progettare sistemi operanti in tali ambienti, è fondamentale studiarne i limiti.

In questo articolo presentiamo i risultati di misure di potenza laser trasmessa sott'acqua effettuate; tali misure in acqua pulita, vengono confrontate tra loro in presenza di contaminanti e a diverse lunghezze d'onda. Insieme a tali misure, vengono qui studiati diversi formati di modulazione del segnale riguardante la fase stessa; dai risultati ottenuti in letteratura [2-4], il formato di modulazione 16-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) sembra fornire prestazioni migliori rispetto al QPSK (*4-Phase Shift Keying*). Il 16-QAM individua la tecnica di modulazione che utilizza due portanti in quadratura come il PSK secondo la formula:

$$x_{QAM}(t) = x_c(t) \cos \omega_0 t - x_s(t) \sin \omega_0 t$$

ma a differenza del 4-PSK, le componenti di banda base x_c ed x_s non dipendono da una stessa sequenza di fasi, ma sono originate da due flussi di dati distinti.

Il lavoro qui presente, mira a contribuire all'analisi del canale sottomarino torbido utilizzando la modulazione OOK (*On-Off-Keying*) per la trasmissione dei dati, confrontandola a due diverse lunghezze d'onda prestabilite, ovvero 450 nm e 520 nm. La torbidità dell'acqua è stata realizzata con diverse sostanze (Clorofilla e Alga Spirulina) variandone le concentrazioni per ottenere acqua con diversi coefficienti di attenuazione.

I risultati ottenuti possono aiutare a progettare e sviluppare dei modem ottici da installare su veicoli sottomarini autonomi AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*) e/o nodi sottomarini mobili in configurazione detta "a sciame", ovvero distribuita. Un AUV di esempio è quello realizzato dall'ENEA e denominato VENUS [5] che per garantire un bit-rate nell'ordine dei Gbit/s, necessita l'utilizzo di un sistema di trasmissione ottica basato su tecnologia laser oltre all'attuale sistema basato su tecnologia LED. Una rete a sciame di AUV consentirebbe un

monitoraggio più semplice ed esteso di piattaforme petrolifere, allevamenti ittici in mare aperto, fondali di porti, relitti e scavi archeologici sommersi.

Un esempio di possibile utilizzo di uno sciame di Venus è mostrato in Figura 1. Essendo dotato di più modem basati su tecnologie diverse, la trasmissione sarebbe comunque garantita in base alle condizioni del canale di comunicazione.

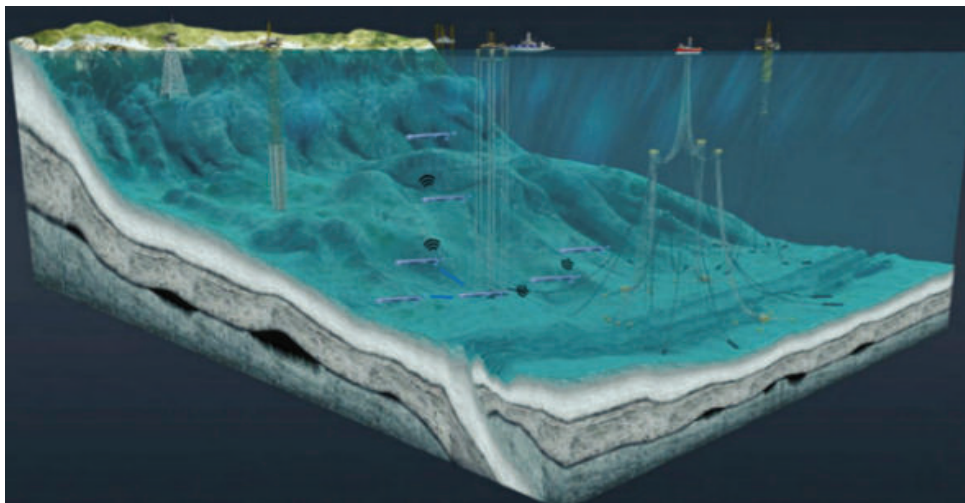


Figura 1: esempio di applicazione “a sciame” di Venus.

2 – Set-up sperimentale

In figura 2 viene mostrato il set-up sperimentale utilizzato per le misure.

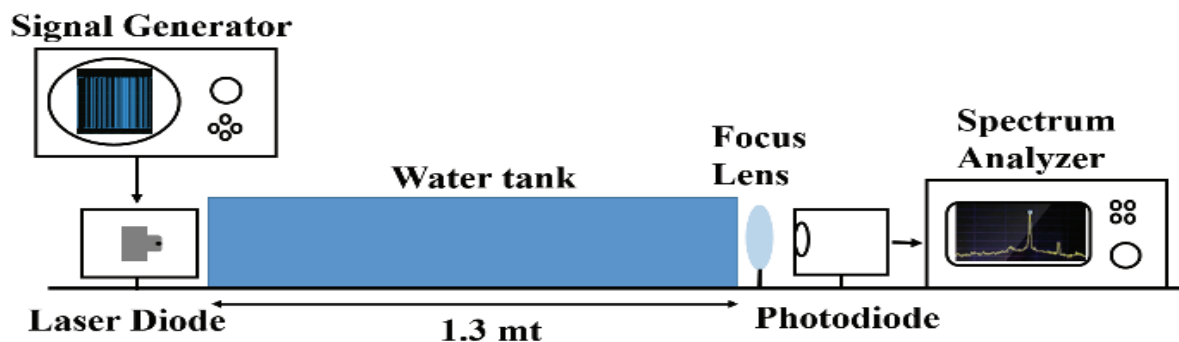


Figura 2: rappresentazione schematica del set-up utilizzato.

È costituito da un generatore che fornisce un segnale elettrico a onda quadra a una frequenza di 1 GHz con un livello picco-picco di 500 mVpp; questo va a pilotare due diversi laser a semiconduttore inorganico, che in questo caso, come anticipatamente detto, abbiamo scelto essere a 450 e 520 nm ovvero le lunghezze d'onda nel visibile (blu e verde) propaganti anche in acqua.

Il segnale ottico modulato viene lanciato attraverso un serbatoio in *plexiglass* riempito d'acqua con una capacità di circa 40 litri, su una lunghezza totale di circa 150 cm, da sorgente a ricevitore. All'estremità del ricevitore, il segnale ottico viene rilevato da un fotodiodo ed infine elaborato in frequenza da un analizzatore di spettro. Ciò consente di valutare il rapporto segnale/rumore elettrico (SNR) da cui viene quindi derivato analiticamente il *Bit-Error-Rate* (BER). Nella Figura 3 è mostrata un'immagine dell'impostazione con il serbatoio pieno di acqua pulita.

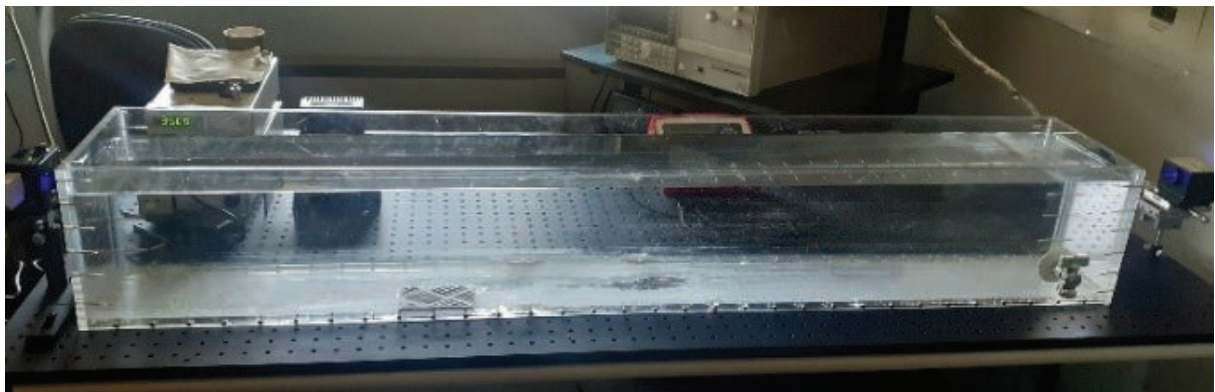


Figura 3: serbatoio utilizzato per la sperimentazione con acqua pulita; ai lati sorgente laser e ricevitore.

Lo schema in Figura 4 mostra invece la procedura concettuale di come vengono prese le misure dell'SNR nel dominio della frequenza; i due laser a semiconduttore, che emettono rispettivamente a 450 nm e 520 nm, sono stati modulati direttamente da un segnale elettrico OOK-RZ (Return-to-Zero) a 1 Gbit/s.



Figura 4: Rappresentazione schematica della procedura utilizzata per eseguire le misure sperimentali

A partire dai valori SNR ottenuti, i valori di BER verranno quindi determinati analiticamente dall'espressione seguente, come riportato in letteratura [7]:

$$BER_{OOK_{RZ}} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{1}{2} \sqrt{\{SNR\}} \right)$$

3 – Discussione

La potenza ottica è stata misurata in diverse condizioni (serbatoio vuoto, acqua limpida e con diverse concentrazioni di sostanze inquinanti) e punti della configurazione (interfacce ed attraversamenti); ciò ha permesso di fissare il punto di polarizzazione e di lavoro ottimale per le due sorgenti laser. Sono stati quindi misurati i valori della corrente di pilotaggio in assenza di segnale modulante e in condizioni di limpidezza (sia aria che acqua), in modo da ottenere la stessa potenza ottica emessa così da avere un riferimento per la comparazione con i contaminanti.

Dopo aver impostato la potenza ottica ricevuta con acqua limpida, è stata misurata la potenza ottica ricevuta per concentrazioni via via crescenti delle sostanze inquinanti; nello specifico sono state utilizzate Clorofilla e Alga Spirulina, le quali peggiorano la trasparenza dell'acqua, andando ad incrementare il livello di torbidità del canale di comunicazione (fig. 5, 6).

U-OWC (Underwater Optical Wireless Communication): trasmissioni ottiche subacquee

U-OWC (Underwater Optical Wireless Communication)

G. Susanna, C. Lodovisi, A. Reale, S. Betti

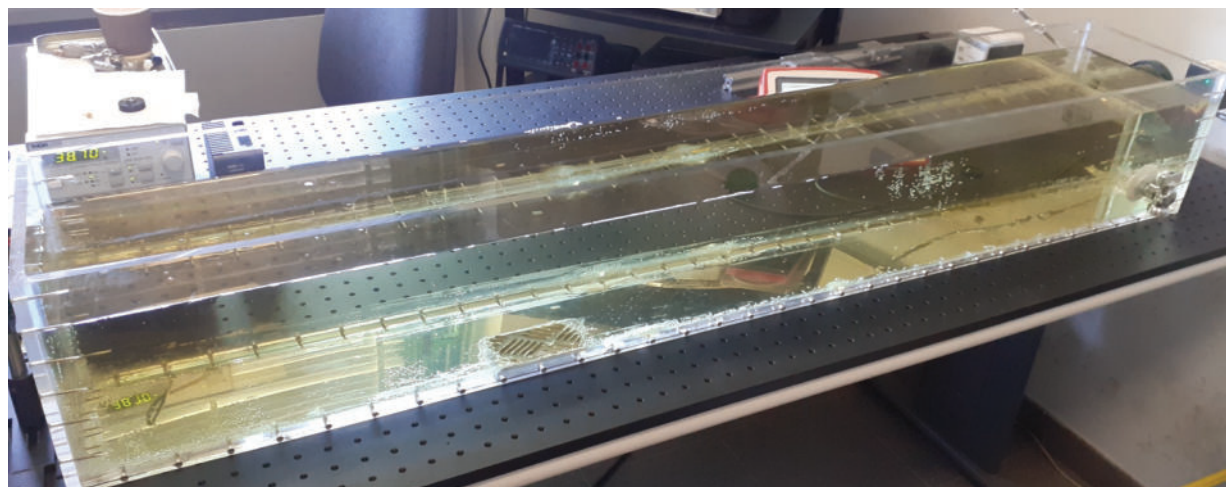


Figura 5: livello di torbidità in presenza di alta concentrazione di Clorofilla.



Figura 6: livello di torbidità in presenza di alta concentrazione di Alga Spirulina.

Si può apprezzare dalle immagini come questi contaminanti inducano una colorazione verdastra che, con concentrazioni, sono simili a quelle delle acque portuali in termini di trasparenza.

4 – Risultati

Per il laser a 450 nm, la corrente di pilotaggio ottimale è stata impostata a 30 mA, con una potenza ottica emessa corrispondente pari a 10,86 dBm e, dopo il rilevamento, un valore di potenza elettrica misurato dall'analizzatore di spettro pari a -24 dBm.

Per la sorgente laser a 520 nm, la corrente di pilotaggio è stata impostata a 38,7 mA, corrispondente a una potenza ottica emessa pari a 11,75 dBm. Dopo il rilevamento, la potenza elettrica di picco misurata dall'analizzatore di spettro era pari a -20 dBm.

Queste misure di impostazione sono state eseguite con il serbatoio dell'acqua vuoto; inoltre prima di aggiungere acqua pulita, è stata misurata l'attenuazione dovuta alle pareti in *plexiglass* stesse del serbatoio: l'attenuazione è risultata di 3,2 dB a 450 nm e 2,3 dB a 520 nm.

Prima del rilevamento, sono state ottimizzate anche le lenti ottiche, in trasmissione e ricezione, che forniscono un guadagno ottico di 1,2 dB a 450 nm e 0,7 dB a 520 nm.

La Tabella 1 mostra i valori di concentrazione dei contaminanti utilizzati:

Contaminanti	Quantità	Concentrazione
Clorofilla	2 ml	0.052 ml/l
"	3 ml	0.079 ml/l
"	5 ml	0.131 ml/l
Alga Spirulina	0.6 mg	0.016 mg/l
"	1.2 mg	0.032 mg/l
"	2.5 mg	0.066 mg/l

TABELLA 1: quantità totali e concentrazioni di inquinanti che modificano la torbidità dell'acqua.

Le seguenti tabelle riportano i diversi valori di SNR calcolati e misurati alle lunghezze d'onda di 450 nm e 520 nm, rispettivamente; vengono anche riportati i picchi di potenza massimi raggiunti sul ricevitore:

Riempitivo	Potenza ottica ricevuta media [dBm]	Picchi massimi [dBm]	SNR [dB]
Acqua limpida	8.44	-24	51
Clorofilla	-1.87	-43	32
"	-5.91	-50	25
"	-11.80	-64	11
Alga Spirulina	-4.25	-45	30
"	-8.71	-56	19
"	-10.78	-65	10

TABELLA 2: misure di potenza e SNR nel blu a 450 nm.

Riempitivo	Potenza ottica ricevuta media [dBm]	Picchi massimi [dBm]	SNR [dB]
Acqua limpida	8.7	-20	55
Clorofilla	1.4	-20	55
"	-2.3	-25	50
"	-8.34	-37	38
Alga Spirulina	5.44	-34	51
"	-0.23	-31	44
"	-7.26	-42	33

TABELLA 3: misure di potenza e SNR nel verde a 520 nm.

Le figure 7 e 8 mostrano gli andamenti della potenza ottica che colpisce il fotodiodo con la variazione delle concentrazioni di clorofilla e alga spirulina, rispettivamente; vengono riportati anche i livelli della potenza ottica ricevuta per il caso di acqua limpida.

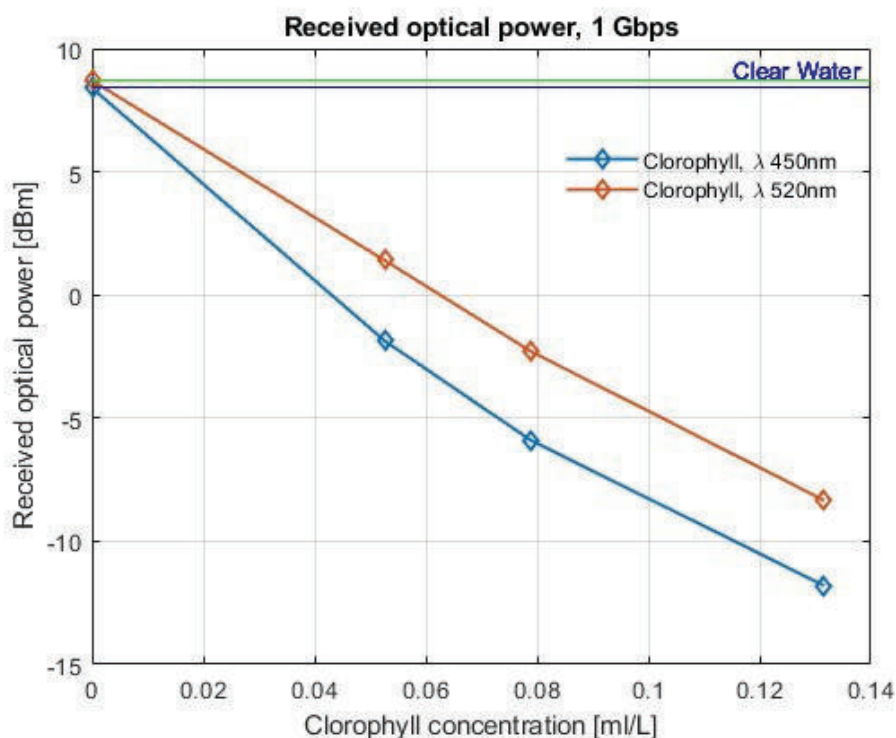


Figura 7: Potenza ottica ricevuta per diverse concentrazioni di clorofilla.

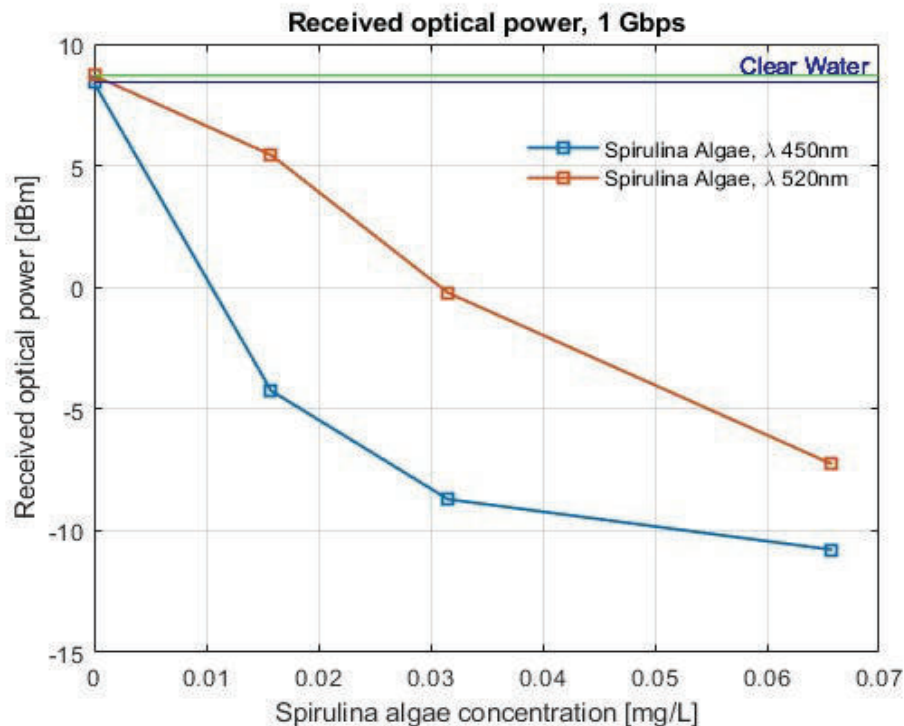


Figura 8: Potenza ottica ricevuta per diverse concentrazioni di alghe spirulina.

Risulta quindi facile notare a colpo d'occhio come le concentrazioni vadano ad influire sulla potenza ottica ricevuta; nonostante le similarità, si può osservare come entrambi i colori laserati abbiano penetrazioni lievemente diverse alle diverse concentrazioni. In particolare la clorofilla tende a mantenere un andamento più omogeneo al variare delle concentrazioni, mentre l'alga spirulina presenta un andamento discontinuo; in entrambi i casi però i risultati mostrano che a 520 nm si ha maggiore penetrazione rispetto ai 450.

Per analizzare le prestazioni, il BER è stato calcolato a partire dalla precedente formula, rispetto al rapporto SNR misurato dall'analizzatore di spettro; le figure 9 e 10 riportano il comportamento del BER per le due lunghezze d'onda in considerazione.

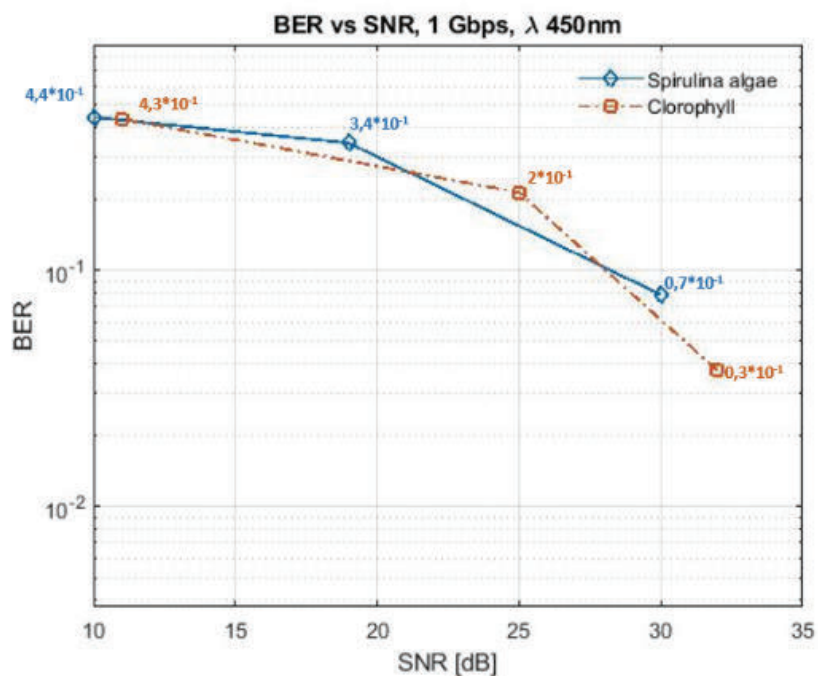


Figura 9: BER a confronto con SNR a 450 nm.

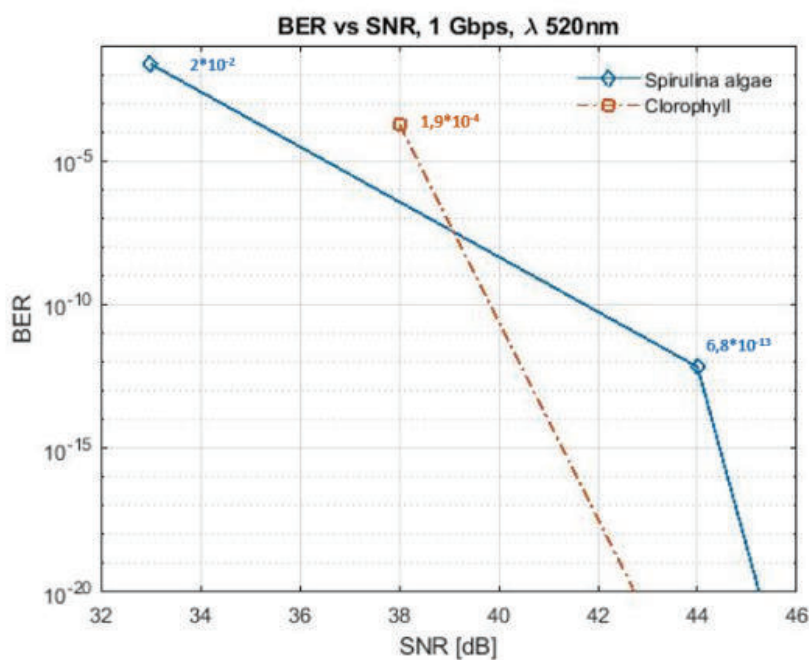


Figura 10: BER a confronto con SNR a 520 nm.

In accordo con le tendenze BER, va notato che la lunghezza d'onda di 520 nm viene assorbita meno dei 450 nm; considerando la Clorofilla come un inquinante, in media, a 520 nm, la potenza ottica ricevuta è di 3 dBm più alta rispetto ai 450 nm. Questa differenza diventa più marcata nel caso dell'Alga Spirulina. Per i livelli di concentrazione più bassi, c'è una differenza nella potenza ottica ricevuta di quasi 8 dB tra 520 nm e 450 nm; man mano che l'acqua si satura con l'inquinante, questa differenza diminuisce. Le prestazioni nel caso di acqua limpida sono comunque comparabili.

5 – Conclusioni

Questo articolo presenta alcuni risultati sperimentali riferiti all'analisi delle prestazioni di un sistema di comunicazione ottica sottomarina che funziona a due diverse lunghezze d'onda, per livelli crescenti di torbidità dell'acqua, derivanti da una crescente concentrazione di Clorofilla e Alga Spirulina. Le misure sperimentali sono state ottenute tramite modulazione diretta di sorgenti laser che emettono a 520 nm e 450 nm. La potenza ottica ricevuta è stata misurata nei diversi casi e l'SNR elettrico è stato valutato nel dominio della frequenza da un analizzatore di spettro. Inoltre, il BER è stato calcolato analiticamente. I risultati mostrano che l'uso della lunghezza d'onda a 520 nm è vantaggioso quando le sostanze inquinanti inducono una colorazione verdastra ovvero con concentrazioni che in termini di visibilità sono simili alle acque portuali, è possibile ottenere un BER teorico di 10⁻¹⁴.

Come detto in precedenza, i risultati di questo lavoro mirano a creare una connessione ottica laser (a semiconduttore inorganico) per trasmissioni ad alto bit-rate, da installare su veicoli e/o nodi sottomarini mobili in configurazione detta “a sciame” (*swarm configuration*).

6 - Bibliografia

- [1] Yıldız, Samet, et al. "An experimental study of underwater visible light communication." 2022 30th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU). IEEE, 2022
- [2] Al-Halafi, Abdullah, et al. "Real-time video transmission over different underwater wireless optical channels using a directly modulated 520 nm laser diode." *Journal of Optical Communications and Networking* 9.10 (2017): 826-832.

- [3] Ishibashi, Shojiro, and Ken-Ichi Susuki. "1gbps x 100m underwater optical wireless communication using laser module in deep sea." OCEANS 2022, Hampton Roads. IEEE, 2022.
- [4] Al-Halafi, Abdullah, and Basem Shihada. "UHD video transmission over bidirectional underwater wireless optical communication." IEEE Photonics Journal 10.2 (2018): 1-14.
- [5] Moriconi, C., Cupertino, G., Betti, S., & Tabacchiera, M. (2015, May). "Hybrid acoustic/optic communications in underwater swarms." In OCEANS 2015-Genova (pp. 1-9). IEEE, 2015.
- [6] Lodovisi, C., Loreti, P., Bracciale, L., & Betti, S. (2018). "Performance analysis of hybrid optical–acoustic AUV swarms for marine monitoring." Future Internet, 10(7), 65.
- [7] Rasied, Thaahirah Shireen Mohamed, et al. "Performance Evaluation of Free Space Optical Link Using OOK Modulation Schemes Under Dust-Storm Turbulence." 2021 8th International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE). IEEE, 2021

Resilienza operativa digitale: Regolamento 2022/2554 (DORA)

Digital operational resilience: Regulation 2022/2554 (DORA)

Giancarlo Butti ♦

♦ ISACA – Milano

Sommario

Il Regolamento DORA (Digital Operational Resilience Act), entrato in vigore nel gennaio 2023 e pienamente operativo dal gennaio 2025, rappresenta un'importante iniziativa dell'UE per rafforzare la resilienza operativa digitale delle entità finanziarie contro i rischi cyber. Sebbene rivolto principalmente al settore finanziario, coinvolge direttamente anche i fornitori ICT delle entità finanziarie e la loro catena di subfornitura.

Il concetto chiave della resilienza operativa digitale si riferisce alla capacità di garantire la resilienza in presenza di perturbazioni, attraverso un'efficace gestione dei rischi legati all'ICT. Il Regolamento 2022/2554 si colloca in un contesto normativo che include altre iniziative come la NIS2 e il Cybersecurity Act.

Il Regolamento introduce obblighi per le entità finanziarie su cinque pilastri principali: gestione del rischio ICT, segnalazione degli incidenti, test di resilienza digitale, gestione dei rischi legati ai fornitori e condivisione delle informazioni. Le istituzioni finanziarie devono adottare framework di gestione robusti, testare regolarmente la resilienza e stabilire contratti con i fornitori ICT che rispettino i requisiti normativi. Tuttavia, i fornitori sono impattati solo contrattualmente, non normativamente, salvo siano designati come fornitori critici.

Il Regolamento 2022/2554 non è esente da difetti, a cominciare dall'iter normativo scelto per l'emissione della normativa integrativa, o la presenza di errori sia di natura formale che sostanziale nel testo del Regolamento.

Abstract

The Dora Regulation (Digital Operational Resilience Act), which came into force in 2023 and fully operational since 2025, represents an important EU initiative to strengthen the digital operational resilience of financial entities against cyber risks. Although aimed primarily at the financial sector, it also involves ICT suppliers and their subcontracting chain.

The key concept of digital operational resilience refers to the ability to guarantee resilience in the presence of perturbations, through effective management of the risks related to ICTs (information and communication technologies). DORA is part of a regulatory framework that includes other initiatives such as NIS2 and the Cybersecurity Act.

The regulation introduces obligations for financial entities on five main pillars: ICT risk management, accident reporting, digital resilience test, risk management related to suppliers and information sharing. Financial institutions must adopt robust management framework, regularly test resilience and establish contracts with ICT suppliers that comply with regulatory requirements. However, suppliers are only contractually impactful, not normally, unless they are designated as criticals.

Dora is not exempt from defects, starting with the regulatory process chosen for the issue of the supplementary legislation, or the presence of both formal and substantial errors in the text of the regulation.

Keyword

Resilience, cybersecurity, supply chain, risk, business continuity

1 - Introduzione

Entrato in vigore nel gennaio del 2023 e pienamente operativo dal gennaio 2025, il **REGOLAMENTO (UE) 2022/2554 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 14 dicembre 2022 relativo alla resilienza operativa digitale per il settore finanziario e che modifica i regolamenti (CE) n. 1060/2009, (UE) n. 648/2012, (UE) n. 600/2014, (UE) n.**

909/2014 e (UE) 2016/1011, meglio noto come Regolamento DORA , costituisce una importante iniziativa normativa a livello comunitario, tesa ad aumentare la resilienza delle entità finanziarie rispetto ai crescenti rischi del mondo cyber.

In realtà, al di là della apparente applicazione al settore finanziario, il Regolamento 2022/2554 si applica direttamente o indirettamente ad una platea veramente molto vasta di soggetti, la maggior parte dei quali non è tutt'oggi cosciente di essere fra i destinatari della normativa.

Ma cosa si intende per resilienza?

Le definizioni sono molteplici, come ci ricorda il dizionario Treccani, fra le quali quella che più si avvicina a Regolamento 2022/2554 è la seguente:

3. In psicologia, la capacità di reagire di fronte a traumi, difficoltà, ecc.

Infatti la definizione che l'articolo 3 del Regolamento 2022/2554 dà della resilienza è la seguente:

«resilienza operativa digitale»: la capacità dell'entità finanziaria di costruire, assicurare e riesaminare la propria integrità e affidabilità operativa, garantendo, direttamente o indirettamente tramite il ricorso ai servizi offerti da fornitori terzi di servizi TIC, l'intera gamma delle capacità connesse alle TIC necessarie per garantire la sicurezza dei sistemi informatici e di rete utilizzati dall'entità finanziaria, su cui si fondano la costante offerta dei servizi finanziari e la loro qualità, anche in occasione di perturbazioni;

Tale definizione si ritrova presente, con poche differenze, anche in normative non comunitarie, quali ad esempio:

UK Prudential Regulation Authority

...the ability of firms and the financial sector as a whole to prevent, adapt, respond to, recover, and learn from operational disruptions.

US: Sound Practices to Strengthen Operational Resilience

...the ability to deliver operations, including critical operations and core business lines, through a disruption from any hazard.

o all'interno di standard ISO quali l'**ISO 22316:2017 - Security and resilience — Organizational resilience — Principles and attributes**

Organizational resilience is the ability of an organization to absorb and adapt in a changing environment to enable it to deliver its objectives and to survive and prosper

L'esistenza di normative che trattano lo stesso tema al di fuori dell'UE non è da sottovalutare, in quanto tali normative, precedenti alla pubblicazione del Regolamento 2022/2554, possono essere utilizzate proficuamente come guida alla sua corretta implementazione, in quanto generalmente accompagnate da documenti tecnici che traducono, nella pratica operativa, i principi espressi nella loro definizione.

2 - Il contesto normativo

Il Regolamento 2022/2554 nasce nell'ambito di un contesto che ha visto, negli ultimi anni, il tentativo da parte dell'UE, di regolamentare il mondo digitale e le nuove tecnologie, attraverso il rilascio di numerose normative, quali: il **Digital Services Act**, il **Digital Markets Act**, il **Markets in Crypto-Assets Regulation**, l'**Artificial Intelligence Act**, il **Data Governance Act**, il **Data Act**...

Più specificatamente nel mondo della sicurezza digitale, contestualmente al Regolamento 2022/2554, è stata rilasciata, ad esempio, la **Direttiva 2022/2555 (NIS2)**, ed in precedenza il **Cybersecurity Act**...

Facendo riferimento alla specifica normativa del settore finanziario, il Regolamento 2022/2554 (e le normative ad esso collegate) è molto simile a normative pre esistenti emesse in particolare da **EBA** (European Banking Authority), quali gli *Orientamenti in materia di esternalizzazione* o gli *Orientamenti dell'ABE sulla gestione dei rischi relativi alle tecnologie dell'informazione e della comunicazione (Information and Communication Technology - ICT) e di sicurezza* ...

Di fatto i Regolamenti delegati che costituiscono una integrazione del Regolamento 2022/2554 fanno ampio riferimento in particolare ai documenti prodotti da EBA.

3 – Le motivazioni di DORA

Il Regolamento 2022/2554 nasce per risolvere una serie di problematiche individuate dalla Commissione europea, che comprendono:

- la regolamentazione normativa relativa alla gestione dei rischi ICT risulta frammentata, priva di requisiti specifici e caratterizzata da disomogeneità tra i diversi settori finanziari
- non esiste una visione chiara e completa sulla frequenza e la gravità degli incidenti, principalmente a causa dell'inefficacia del loro monitoraggio
- gli obblighi di segnalazione risultano spesso complessi, incoerenti e duplicati, creando difficoltà operative
- la condivisione delle informazioni sulle minacce rimane limitata e poco efficace
- i risultati dei test di sicurezza non sono riconosciuti a livello transfrontaliero, ostacolando un approccio unitario
- esistono carenze significative nella valutazione della capacità di resilienza
- le istituzioni finanziarie incontrano difficoltà nel garantire la conformità alle normative vigenti
- i rischi legati alla catena di fornitura ICT sono in aumento, soprattutto in relazione alla crescente dipendenza dai fornitori di servizi cloud.

4 - Architettura della normativa

Il Regolamento 2022/2554 ha un'architettura complessa in quanto, ad integrazione del documento principale del Regolamento, organizzato in 106 considerando e 64 articoli, è prevista l'emissione, a vario titolo, di altri 16 documenti.

La maggior parte di questi, dieci per la precisione, sono direttamente indirizzati alle entità finanziarie, e comprendono otto **RTS** (Regulatory Technical Standards) e due **ITS** (Implementing Technical Standards).

Alla redazione di questi documenti hanno partecipato le tre **ESA** (European Supervisory Authorities), costituite da **EBA**, **EIOPA** (European Insurance and Occupational Pensions Authority) ed **ESMA** (European Securities and Markets Authority) congiuntamente a **ENISA** (European Union Agency for cybersecurity), ed hanno la finalità di specificare, in una forma molto più analitica, i requisiti normativi necessari a garantire una adeguata resilienza operativa digitale.

Gli altri documenti sono costituiti da Linee guida ed altre tipologie di documenti.

Nella loro forma consolidata, questi documenti sono stati emessi sotto forma di Regolamenti delegati (al momento della prima stesura di questo articolo non tutti i documenti sono stati rilasciati nella loro forma definitiva).

Non è la prima volta che il legislatore europeo emette una normativa di alto livello, accompagnata da documenti tecnici di maggior dettaglio, con la finalità di realizzare un atto legislativo neutro rispetto alla evoluzione tecnologica e quindi valido sia oggi, sia in un prossimo futuro.

Anche l'architettura adottata per il GDPR è la medesima, ma la scelta del legislatore in quel caso è stata diversa e, probabilmente, molto più efficace.

Con il GDPR la normazione di secondo livello non è stata mantenuta a livello centralizzato, ma è stata in qualche modo delegata all'**EDPB** (European Data Protection Board), il quale ha una sorta di potere legislativo ed in effetti pubblica, con una frequenza rilevante, linee guida ed altri documenti che traducono in pratica operativa (aggiornata e contestuale alle tecnologie emergenti) i requisiti del GDPR.

La scelta del legislatore sul Regolamento 2022/2554, basata su un iter legislativo tradizionale, che porta alla emissione di Regolamenti delegati che a tutti gli effetti costituiscono una integrazione del Regolamento 2022/2554, si sta rilevando da subito poco efficace e poco flessibile, e caratterizzata da lunghi tempi di emissione.

Ne è una prova il fatto che al momento della prima stesura di questo articolo, meno di 15 giorni dalla piena efficacia del Regolamento 2022/2554, non è stato ancora rilasciato un Regolamento delegato fondamentale, quello sui subfornitori.

RTS ed ITS, sono stati realizzati con un lungo processo che ha comportato l'emissione di una prima bozza da parte delle ESA, finalizzata ad una consultazione pubblica circa il loro contenuto.

L'analisi dei commenti ricevuti ha portato le ESA ad una revisione delle prime bozze ed alla emissione di una seconda bozza finale la quale, successivamente, è stata emessa (non senza ulteriori modifiche) come atto legislativo finale da parte della Commissione europea.

Un processo durato circa 18 mesi, che mal si concilia con i tempi dell'evoluzione tecnologica. Per tale motivo, a differenza delle linee guida emesse dall'EDPB, anche questa normativa integrativa si mantiene ad un livello alto, di neutralità tecnologica, e quindi lascia spazio (e responsabilità) alle singole entità finanziarie, circa la sua corretta implementazione.

Il livello di dettaglio del Regolamento 2022/2554 è comunque enormemente maggiore di quello proposto dalla NIS2, la quale fornisce limitatissime informazioni in merito a come implementare i vari requisiti normativi.

Considerando che dal punto di vista normativo, il Regolamento 2022/2554 costituisce un atto giuridico settoriale rispetto alla NIS2, è possibile utilizzare il Regolamento 2022/2554 ed i relativi RTS ed ITS come buone pratiche a cui fare riferimento per implementare la NIS2.

5 - Ambito di applicazione

Il Regolamento 2022/2554 è probabilmente la prima normativa che ricomprende fra i soggetti destinatari della stessa, non soltanto i diretti interessati (le entità finanziarie), ma anche i loro fornitori ICT, a qualunque livello della catena di fornitura questi si trovino.

È per tale motivo che, come si accennava nei paragrafi precedenti, il perimetro di applicazione del Regolamento 2022/2554 è particolarmente ampio ed è quindi molto probabile che, una qualunque azienda di servizi ICT, possa essere coinvolta nel rispetto dei requisiti del Regolamento, anche se non ha fra i suoi clienti diretti una entità finanziaria.

Prima di continuare chiariamo cosa il Regolamento 2022/2554 intenda per entità finanziaria e per fornitore ICT.

Per quanto attiene il primo termine, l'articolo 2 del Regolamento 2022/2554 identifica una ventina di tipologie diverse di soggetti (dagli enti creditizi alle imprese di assicurazione e di riassicurazione, dai gestori di fondi di investimento alternativi agli enti pensionistici aziendali o professionali ..., definendoli collettivamente entità finanziarie).

È a loro che si applica principalmente la normativa, senza alcuna distinzione fra le varie tipologie di soggetti, ma limitandosi a introdurre delle semplificazioni solo per quei soggetti le cui "dimensioni" soddisfano determinati parametri.

Per fornitore terzo di servizi ICT (TIC è il termine usato dal Regolamento 2022/2554), si intende un'impresa che fornisce servizi ICT.

Il **Final Report On Draft Implementing Technical Standards on the standard templates for the purposes of the register of information in relation to all contractual arrangements on the use of ICT services provided by ICT third-party service providers under Article 28(9) of Regulation (EU) 2022/2554**, identifica i servizi ICT riportati nella Tabella 1.

Tabella 1. Tipologia di servizi ICT

Type of ICT services
1. ICT project management
2. ICT Development
3. ICT help desk and first level support
4. ICT security management services
5. Provision of data
6. Data analysis
7. ICT, facilities and hosting services (excluding Cloud services)
8. Computation
9. Non-Cloud Data storage
10. Telecom carrier
11. Network infrastructure
12. Hardware and physical devices
13. Software licencing(excluding SaaS)
14. ICT operation management (including maintenance)
15. ICT Consulting
16. ICT Risk management
17. Cloud services: IaaS
18. Cloud services: PaaS
19. Cloud services: SaaS

Entrambe le categorie di soggetti devono sottostare al Regolamento 2022/2554, ma in modo molto differente.

Infatti, secondo l'articolo 1 del Regolamento 2022/2554, alle entità finanziarie si applicano obblighi in materia di:

- *gestione dei rischi delle tecnologie dell'informazione e della comunicazione (TIC);*
- *segnalazione alle autorità competenti degli incidenti gravi connessi alle TIC e notifica, su base volontaria, delle minacce informatiche significative;*
- *segnalazione alle autorità competenti, da parte delle entità finanziarie di cui all'articolo 2, paragrafo 1, lettere da a) a d), di gravi incidenti operativi o relativi alla sicurezza dei pagamenti;*
- *test di resilienza operativa digitale;*
- *condivisione di dati e di informazioni in relazione alle vulnerabilità e alle minacce informatiche;*
- *misure relative alla solida gestione dei rischi informatici derivanti da terzi.*

Per contro ai fornitori ICT, ed alle entità finanziarie sono prescritti, congiuntamente:

- *obblighi relativi agli accordi contrattuali stipulati tra fornitori terzi di servizi TIC ed entità finanziarie.*

In altre parole, dal punto di vista strettamente normativo, l'unico obbligo dei fornitori ICT è quello di formalizzare mediante un contratto scritto il loro rapporto con le entità finanziarie.

Di fatto non sono previste sanzioni per i fornitori, salvo che non si tratti di fornitori critici.

La definizione di fornitore critico riportata nell'articolo 3 del Regolamento 2022/2554 è la seguente *"fornitore terzo critico di servizi TIC»: un fornitore terzo di servizi TIC designato come critico in conformità dell'articolo 31"*, e non va confuso con il fatto che un fornitore possa risultare particolarmente significativo per una specifica entità finanziaria.

I fornitori critici sono soggetti che hanno caratteristiche tali da essere considerati rilevanti a livello sistemico, e per i quali il Regolamento 2022/2554 introduce un controllo diretto da parte delle Autorità di Vigilanza.

Per tali soggetti sono previste sanzioni relativamente a violazioni in merito ai loro obblighi nei confronti delle Autorità di Vigilanza.

6 –I pillar di DORA

Sintetizzando i contenuti dell'articolo 1 prima citato, i pillar del Regolamento 2022/2554 a cui devono sottostare le entità finanziarie sono i seguenti:

- gestione del rischio ICT
- segnalazione degli incidenti connessi all'ICT
- test di resilienza operativa digitale
- rischi relativi all'ICT derivanti da terzi
- condivisione delle informazioni.

Più dettagliatamente, per quanto attiene la gestione del rischio ICT, le entità finanziarie devono prevedere:

- la creazione di un sistema di governance interna: sviluppo di strutture e controlli che garantiscano una gestione efficace e prudente dei rischi associati all'ICT
- ruoli e responsabilità dell'organo direttivo: assegnazione di compiti specifici per la supervisione e gestione dei rischi ICT
- adozione di un framework strutturato: implementazione di un modello completo e robusto per affrontare i rischi legati all'ICT
- utilizzo di soluzioni resilienti: impiego di strumenti e sistemi progettati per minimizzare gli impatti derivanti dai rischi ICT
- monitoraggio e analisi dei rischi: identificazione continua delle principali fonti di vulnerabilità nell'ambito ICT
- pianificazione della continuità operativa: definizione di politiche e sistemi di recovery per gestire eventi critici legati all'ICT
- implementazione di misure preventive: adozione di strategie di protezione e prevenzione efficaci
- rilevamento di attività sospette: capacità di individuare tempestivamente comportamenti o azioni anomale

- risorse dedicate e personale specializzato: disponibilità di strumenti e competenze per analizzare vulnerabilità, minacce, attacchi informatici e incidenti, valutando i loro effetti sulla resilienza digitale
- revisione degli incidenti e miglioramento continuo: analisi delle esperienze passate, condivisione delle lezioni apprese, aggiornamento delle tecnologie, formazione e sensibilizzazione del personale
- piani di comunicazione efficaci: sviluppo di strategie chiare e mirate per mantenere informati tutti gli stakeholder.

Relativamente ai rischi ICT ulteriori specificazioni sono contenute nel relativo Regolamento delegato, il quale sviluppa numerosi aspetti legati alla gestione della sicurezza quali, ad esempio:

- sviluppo di politiche e strumenti per la sicurezza ICT: creazione di linee guida, procedure, protocolli e strumenti per garantire la protezione delle risorse informatiche
- protezione delle risorse IT aziendali: monitoraggio continuo e difesa dei sistemi contro minacce interne ed esterne
- sicurezza e crittografia dei dati: implementazione di tecniche per proteggere l'integrità, la riservatezza, la disponibilità e l'autenticità delle informazioni
- ottimizzazione delle prestazioni dei sistemi: gestione della capacità e monitoraggio delle performance per garantire efficienza e affidabilità
- gestione delle vulnerabilità: identificazione, valutazione e aggiornamento dei sistemi per mitigare i rischi
- monitoraggio delle attività IT: registrazione e analisi dei log per rilevare anomalie e garantire la conformità
- protezione delle infrastrutture di rete: prevenzione di accessi non autorizzati e difesa contro le minacce esterne
- gestione dei progetti ICT: supervisione dei progetti e dei cambiamenti per garantire la coerenza con gli obiettivi aziendali

- acquisizione e manutenzione dei sistemi ICT: gestione del ciclo di vita dei sistemi, dall'acquisto allo sviluppo fino alla manutenzione
- gestione delle modifiche ai sistemi: controllo delle variazioni nei sistemi ICT per garantire continuità e sicurezza
- sicurezza fisica e ambientale: protezione delle infrastrutture da rischi ambientali e accessi non autorizzati
- politiche per le risorse umane e gestione degli accessi: definizione di regole per controllare l'accesso alle risorse aziendali in base ai ruoli
- pianificazione della continuità operativa ICT: sviluppo e gestione di strategie per assicurare la disponibilità dei sistemi in caso di emergenza
- esecuzione di test sui piani di continuità: verifica regolare dell'efficacia dei piani per garantire la loro adeguatezza.

Nella stesura del Regolamento delegato, come chiaramente indicato nel Final Draft che ne ha anticipato la pubblicazione, le ESA si sono basate sugli standard europei e internazionali più rilevanti per la gestione dei rischi ICT. Tra questi si annoverano: le Linee guida dell'EBA sui rischi ICT e la sicurezza, quelle dell'EIOPA sulla sicurezza e governance ICT, la Direttiva NIS2, il framework NIST per la cybersecurity, la serie di standard ISO-IEC 27000, il toolkit CIRR del FSB, i Principi Fondamentali di Cybersecurity sviluppati dai Paesi del G7 per il settore finanziario, le raccomandazioni del CPMI-IOSCO sulla resilienza cibernetica delle infrastrutture di mercato finanziario e i principi del BCBS relativi alla resilienza operativa, alla gestione del rischio operativo, all'aggregazione dei dati sui rischi e alla loro rendicontazione.

Per quanto concerne gli altri aspetti del Regolamento 2022/2554, in particolare la gestione delle segnalazioni degli incidenti ICT, trattata al Capo III del Regolamento, le istituzioni finanziarie dovranno adottare un sistema strutturato per identificare e registrare gli incidenti legati all'ICT, inclusi quelli operativi e di sicurezza relativi ai pagamenti. Tali incidenti saranno classificati e valutati in base a criteri predefiniti. Gli eventi di maggiore rilevanza dovranno essere formalmente segnalati alle autorità competenti.

Le notifiche saranno standardizzate attraverso un formato unificato e dovranno comprendere rapporti preliminari, intermedi e finali. A questo proposito, nel settore bancario, la Banca d'Italia ha già pubblicato linee guida e istruzioni per l'inoltro delle segnalazioni. Inoltre, le istituzioni dovranno informare utenti e clienti ogniqualvolta un incidente abbia, o possa avere, ripercussioni negative sui loro interessi economici.

Per quanto riguarda i test di resilienza operativa digitale, le entità finanziarie saranno tenute a effettuare verifiche periodiche volte a identificare vulnerabilità, carenze o punti deboli, oltre a valutare la loro capacità di implementare rapidamente misure correttive. Questi test saranno progettati in base alla dimensione dell'entità, al profilo di rischio e al modello di business adottato.

Solo le entità più rilevanti, caratterizzate da un alto livello di maturità tecnologica, saranno obbligate a svolgere test avanzati, come penetration test basati su scenari specifici di minacce. Gli operatori che condurranno tali test dovranno rispettare i requisiti stabiliti dall'articolo 27. Infine, in tema di condivisione delle informazioni, sarà possibile stipulare accordi tra le entità finanziarie per lo scambio di dati e dettagli relativi alle minacce informatiche.

7 – Il coinvolgimento e gli impatti sui fornitori ICT

Se l'unica obbligazione normativa per i fornitori ICT riguarda la stesura di un contratto scritto con l'entità finanziaria cliente, perché gli stessi risulterebbero fortemente impattati dal Regolamento 2022/2554?

La risposta a questa domanda è molto semplice.

Le entità finanziarie nella stesura dei loro contratti con un fornitore ICT devono necessariamente imporre una serie di condizioni, dettate principalmente dall'articolo 30 del Regolamento 2022/2554 e dal Regolamento delegato sui fornitori (alla data di prima stesura di questo articolo l'analogo regolamento sui sub fornitori, previsto dalla normativa, è disponibile solo sotto forma di final draft).

Accanto a queste clausole espressamente previste dalle normative, che vincolano i fornitori ICT, la singola entità finanziaria deve imporre una serie di clausole, senza le quali non sarebbe garantito il rispetto della normativa da parte della entità finanziaria stessa.

Ad esempio, se l'entità finanziaria deve cifrare i propri dati ed una parte di tali dati sono trattati da un fornitore ICT, ne consegue che anche il fornitore ICT dovrà cifrare questi dati.

Complessivamente il numero di clausole esplicitamente o implicitamente previste dal Regolamento 2022/2554 e dalle normative che integrano il Regolamento possono essere diverse decine.

Il fornitore ICT, se vuole continuare ad operare per l'entità finanziaria cliente, deve necessariamente sottostare a tali clausole e quindi, indirettamente, deve necessariamente rispettare i requisiti del Regolamento 2022/2554.

Per il fornitore, tale obbligo quindi non è di tipo normativo (non viene sanzionato se non rispetta tali clausole), ma di tipo contrattuale.

Nei paragrafi precedenti si è inoltre accennato che il Regolamento 2022/2554 ha impatto su un numero veramente elevato di fornitori ICT.

Questa affermazione trova la sua ragione di essere in una particolarità del Regolamento 2022/2554, a dire il vero già presente nella precedente normativa di EBA, ma ulteriormente rafforzata nel nuovo Regolamento.

Il Regolamento 2022/2554 richiede che non solo il fornitore ICT diretto dell'entità finanziaria sia soggetto al completo presidio da parte di quest'ultima, ma tale controllo deve estendersi all'intera catena di fornitura e comprendere quindi tutti i sub fornitori, a qualunque livello della catena questi si posizionino, come meglio specificato nei documenti integrativi al Regolamento dedicati ai fornitori e subfornitori.

Per tale motivo, come rappresentato per i diretti fornitori ICT delle entità finanziarie, che devono adeguarsi ad una serie di requisiti del Regolamento 2022/2554 per obblighi contrattuali, anche i subfornitori subiscono la stessa sorte.

Ne consegue che una qualunque azienda che venda un prodotto ICT o svolga un servizio ICT rientra, potenzialmente, nell'ambito di applicazione del Regolamento 2022/2554.

È infatti sufficiente che un suo cliente faccia parte della catena di fornitura di un'entità finanziaria perché ciò accada e, quindi, anche se non si è fornitori diretti di una entità finanziaria, la probabilità che un'azienda che operi in ambito ICT sia coinvolta dal rispetto del Regolamento è molto alta.

Peraltro, vi è al momento una scarsa consapevolezza da parte delle aziende del settore ICT del loro potenziale coinvolgimento nel rispetto dei requisiti del Regolamento 2022/2554.

Inoltre le entità finanziarie difficilmente riusciranno a formalizzare i contratti in essere con i loro diretti fornitori ICT per adeguarli ai requisiti del Regolamento 2022/2554 nei tempi previsti dalla normativa.

Solo dopo questo passaggio i diretti fornitori ICT delle entità finanziarie potranno a loro volta formalizzare i contratti con i loro fornitori ICT e così a scendere, lungo tutta la catena di fornitura.

Passeranno quindi mesi, se non anni, affinché si raggiunga una piena conformità che, nel momento della stesura di questo articolo, è anche impossibile da implementare, non essendo ancora disponibile, come già ricordato lato subfornitori, un importante tassello del quadro normativo che regola la gestione della catena di fornitura.

8 – Gli errori ed i limiti di DORA

Il Regolamento 2022/2554 non è esente da limiti ed errori.

Un primo limite è stato più volte evidenziato e riguarda il tipo di approccio che il legislatore ha adottato nella costruzione della normativa che integra il Regolamento 2022/2554.

Ma anche la normativa consolidata non è esente da limiti ed errori.

Analizziamo un caso specifico, quello relativo al rischio di concentrazione.

Con tale termine, come indicato dall'articolo 2 del Regolamento, si intende *l'esposizione a fornitori terzi critici di servizi TIC, singoli o molteplici e correlati tra loro, che crea un grado di dipendenza tale da detti fornitori che l'indisponibilità, i guasti o altri tipi di carenze che si verificassero presso di essi potrebbero mettere a repentaglio la capacità di un'entità*

finanziaria di assolvere funzioni essenziali o importanti oppure di assorbire altri tipi di effetti avversi, comprese perdite cospicue, o potrebbero mettere a repentaglio la stabilità finanziaria dell'intera Unione.

Da tale definizione sembrerebbe che il rischio di concentrazione sia da valutare unicamente per i fornitori critici, ma in tal senso non si esprime l'articolo 29, dal quale appare evidente tale rischio debba essere valutato per tutti i fornitori:

Articolo 29 Valutazione preliminare del rischio di concentrazione delle TIC a livello di entità

1. All'atto dell'identificazione e della valutazione dei rischi di cui all'articolo 28, paragrafo 4, lettera c), le entità finanziarie tengono conto altresì dell'eventualità che la prevista conclusione di un accordo contrattuale relativo a servizi TIC a supporto di funzioni essenziali o importanti possa avere una delle seguenti conseguenze:

...

b) la presenza di molteplici accordi contrattuali relativi alla prestazione di servizi TIC a supporto di funzioni essenziali o importanti con lo stesso fornitore terzo oppure con fornitori terzi strettamente connessi.

Le entità finanziarie vagliano i benefici e i costi di soluzioni alternative, quali il ricorso a diversi fornitori terzi di servizi TIC, verificando se e come le soluzioni previste soddisfino le esigenze commerciali e consentano di conseguire gli obiettivi fissati nella propria strategia di resilienza digitale.

Nell'articolo 29 non vi è infatti il minimo cenno al fatto che i fornitori citati siano solo fornitori critici.

Vi è quindi una discrepanza ed incoerenza fra il contenuto di 2 articoli della normativa in merito allo stesso requisito.

Ma anche la logica di determinazione del rischio di concentrazione non raggiunge lo scopo che il legislatore si era prefissato.

La normativa prevede infatti che debba essere valutato il rischio di concentrazione collegato ad un fornitore ICT, ma tale termine viene utilizzato dal Regolamento 2022/2554 indistintamente sia per i fornitori ICT diretti della entità finanziaria, sia per i subfornitori (si veda al riguardo l'articolo 3 del Regolamento).

In particolare, per quanto attiene i subfornitori, viene valutato il rischio di concentrazione considerando quanti fornitori diretti della entità finanziaria (o sub fornitori) insistano su di essi.

Ed è proprio qui il problema.

Si consideri il fatto che quattro fornitori ICT di applicazioni in cloud utilizzino lo stesso fornitore di piattaforme cloud.

Questo subfornitore avrebbe un certo livello di criticità determinato dal fatto che, in sua assenza, i quattro fornitori ICT diretti non potrebbero erogare il loro servizio.

Si consideri ora la presenza di altri dieci fornitori di servizi non ICT che utilizzino lo stesso subfornitore.

Il rischio di concentrazione su quello specifico subfornitore dovrebbe a questo punto sommare quattro (numero di fornitori ICT che utilizzano quel subfornitore), a dieci (numero di fornitori non ICT che utilizzano quel subfornitore), ottenendo un rischio di concentrazione di quattordici.

Ed è qui che la normativa evidenzia il suo grosso limite, in quanto per il Regolamento 2022/2554 il rischio rimane quattro, (si veda al riguardo il **Final Report On Draft Implementing Technical Standards on the standard templates for the purposes of the register of information in relation to all contractual arrangements on the use of ICT services provided by ICT third-party service providers under Article 28(9) of Regulation (EU) 2022/2554**), in quanto vengono considerate solo le catene di fornitura che hanno come primo fornitore, un fornitore ICT.

Appare evidente come il rischio reale di concentrazione, in particolare con riferimento all'ambiente cloud, possa essere largamente sottovalutato dal Regolamento 2022/2554, che manca così uno dei suoi obiettivi principale, e cioè il presidio della catena di fornitura.

9 – Conclusioni

Il Regolamento 2022/2554 costituisce sicuramente un importante tappa nel percorso teso ad aumentare il livello di sicurezza e resilienza delle infrastrutture critiche dell'UE, ma necessità ancora di qualche affinamento per poter risultare pienamente efficace e, probabilmente è poco flessibile per potersi adattare in tempi ragionevoli alla evoluzione tecnologica.

Una impostazione della normativa più simile a quella sperimentata con successo per il GDPR sarebbe stata una scelta più appropriata.

10 - Bibliografia

- [1] “Regolamento 2022/2554”, Parlamento europeo, 2022
- [2] “Regolamento (UE) 2022/2554 del Parlamento europeo e del Consiglio del 14 dicembre 2022”, Banca d'Italia, 2024
- [3] “Adeguamento della normativa nazionale alle disposizioni del regolamento (UE) 2022/2554 relativo alla resilienza operativa digitale per il settore finanziario”, Senato della Repubblica, 2025
- [4] “NIST Cybersecurity Framework 2.0”, NIST, 2024
- [5] Ross, R. e altri, “Developing Cyber-Resilient Systems”, NIST, 2021
- [6] Butti, G., “Manuale di resilienza”, ITER, 2023
- [7] Butti, G., “La gestione dei rischi nella supply chain”, ITER, 2025 (in fase di pubblicazione)

Stazione ricevente Alphasat di Roma (I): scintillazioni e attenuazione da pioggia in banda ka

Alphasat ka-band receiving station in Rome (I): scintillations and rain attenuation

Stefano Barbieri[□], Fernando Consalvi[♦], Marianna Biscarini[□], Gianmarco Fusco[•], Stefano Luvini[•], Nazzareno Pierdicca[□]

♦ Fondazione Ugo Bordoni

□ DIET, Università di Roma La Sapienza

• Direzione generale DGTEL-ISCTI, Ministero delle Imprese e del Made in Italy, (MIMIT)

Sommario

La turbolenza troposferica può causare interferenze significative ai sistemi di comunicazione satellitare, in particolare durante le precipitazioni. Inoltre, le rapide variazioni di ampiezza del segnale dovute alla scintillazione sono ancora più pronunciate in presenza di pioggia nel percorso di propagazione. Pochi studi sono stati condotti sulla scintillazione durante le precipitazioni. In questo contesto, una migliore caratterizzazione di questi fenomeni è importante per una corretta ottimizzazione del *budget* dei collegamenti satellitari. Il presente lavoro raccoglie e analizza un anno di misure di precipitazioni ottenute rilevando il segnale emesso dal *payload* Aldo Paraboni montato a bordo del satellite *Alphasat* come esperimento per studiare il canale di propagazione radio in banda Ka. Lo studio si concentra sulla relazione istantanea tra l'attenuazione della pioggia e la scintillazione simultanea. Abbiamo scoperto che il valore medio dell'attenuazione della pioggia e il corrispondente valore medio della deviazione standard della scintillazione sono correlati da una legge di potenza. Vengono inoltre presentate le caratteristiche dell'esperimento, i dettagli su come rilevare gli eventi di pioggia e come elaborare i dati.

Abstract

Tropospheric turbulence can cause significant interference to satellite communications systems, particularly during precipitation events. In addition, the rapid amplitude variations of the signal due to scintillation are even more pronounced when there is rain in the propagation path. Few studies have been reported on scintillation during precipitations. In this context, a better characterization of these phenomena is important for a correct optimization of the satellite link budget. This paper collects and analyses one year of rainfall measurements obtained by detecting the signal emitted by the Aldo Paraboni payload mounted on board the *Alphasat* satellite as an experiment to investigate the Ka-band radio propagation channel. The study focuses on the instantaneous relationship between rain attenuation and simultaneous scintillation. We found that the mean value of the rain attenuation and the corresponding mean value of the standard deviation of the scintillation are related by a power law. The characteristics of the experiment, details of how to detect rainfall events and how to process the data are also presented.

Keyword

satellite communication system, wet scintillation, attenuation, Ka-band,

1 – Introduzione

Ancora oggi, la stima degli effetti di attenuazione sul segnale trasmesso, in termini di variazioni di fase e ampiezza, dovuti alla turbolenza troposferica, rimane una delle principali sfide per la progettazione dei collegamenti nelle comunicazioni a microonde e a onde millimetriche [1], [2]. A queste alte frequenze, i segnali elettromagnetici sono fortemente influenzati dalle condizioni atmosferiche, tra cui pioggia, nuvole, gas e turbolenze. In particolare quando la pioggia è presente sul percorso di propagazione, il segnale è soggetto sia fenomeni di attenuazione sia, a causa delle rapide variazioni dell'indice di rifrazione dovute alle turbolenze in atmosfera, a casuali fluttuazioni di ampiezza note come scintillazioni.

In questo contesto, una migliore caratterizzazione di questi fenomeni può essere vantaggiosa per ricavare modelli di propagazione accurati, in grado di descrivere la degradazione del segnale causata dall'interazione con l'atmosfera, e per una corretta ottimizzazione della capacità del canale nei collegamenti satellitari.

Il programma *Alphasat* dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA), avviato nel 2006, mira proprio alla caratterizzazione del canale atmosferico in banda Ka (19,701 GHz) tramite un esperimento scientifico di propagazione SCIEX (Scientific Experiment Payload), supportato dall'ASI (Agenzia Spaziale Italiana) e ospitato a bordo del satellite nel carico dimostrativo tecnologico dedicato ad Aldo Paraboni (TDP#5).

La scintillazione in condizioni di tempo sereno, o scintillazione secca, è stata ampiamente caratterizzata e modellata. Esistono numerosi studi, sia teorici che empirici, dei suoi effetti sui collegamenti satellitari [3], [4]. D'altra parte, pochi studi sono stati condotti sulla scintillazione da pioggia, o scintillazione umida [5]-[7].

In questo articolo presentiamo i risultati di un'analisi della relazione istantanea tra l'attenuazione della pioggia e la scintillazione simultanea ottenuta da serie temporali sperimentali di pioggia raccolte nel 2021.

La Sezione 2 descrive la stazione e il set di dati, mentre la Sezione 3 tratta le fasi di pre-elaborazione, tra cui la valutazione della qualità dei dati, la rimozione dei dati non validi, la ricostruzione del cielo sereno di riferimento e un algoritmo di rilevamento delle precipitazioni. Si parla inoltre dello spettro di potenza delle serie temporali di Roma, della stima dell'attenuazione troposferica e del rilevamento della scintillazione mediante filtri di frequenza. La Sezione 4 analizza l'attenuazione simultanea di scintillazione e pioggia, stabilendo una relazione sperimentale tra le loro deviazioni standard. Infine, la Sezione 5 presenta le conclusioni.

2 – Stazione di ricezione e data set

La stazione ricevente di Roma (lat. 41.83°N, lon. 12.47°E) riceve il segnale in banda Ka a 19.701 GHz trasmesso dal payload Aldo Paraboni a bordo del satellite *Alphasat* utilizzando un sistema dedicato costituito da un'antenna parabolica a singolo riflettore con diametro di 1,5 metri orientata verso il satellite geosincrono con un angolo di elevazione medio di 41° (figura 1) [8].



Figura 1 – Stazione ricevente Alphasat in banda Ka, dislocata presso la sede Roma EUR del MIMIT.

L'antenna ricevente deve essere puntata con grande precisione per garantire la massima potenza stabile del segnale, poiché la posizione apparente del satellite non è fissa nel cielo ma è soggetta a movimenti spaziali ondulatori [9]. Il sistema di ricezione in banda Ka è dotato di un sistema di localizzazione satellitare ad anello aperto che utilizza informazioni sull'orbita del satellite fornite sotto forma di file OEM (Orbital Ephemeris Message). Questi file contengono coordinate aggiornate sia per l'elevazione che per l'azimut ogni 5 minuti. Il sistema può ruotare continuamente sia in azimut che in elevazione, di 200° e 180° rispettivamente, garantendo un'elevata precisione di posizionamento [10]. L'intera stazione ricevente è stata progettata e realizzata su misura dal DIET&DGTEL-ISCTI&FUB [8].

Questo studio analizza un anno di misure di precipitazione, da gennaio a dicembre 2021, per evidenziare le variazioni dell'attenuazione della pioggia e le statistiche di scintillazione.

I dati sono stati acquisiti in alta risoluzione, a una velocità di oltre 60 campioni al secondo, visualizzati in tempo reale e archiviati su base giornaliera, consentendo un'analisi completa della potenza ricevuta dalla stazione di terra. L'acquisizione è ancora in corso insieme all'elaborazione dei dati disponibili.

3 – Elaborazione dati

I dati misurati giornalmente sono sottoposti alla seguente procedura di pre-elaborazione:

- controllo di qualità per identificare e rimuovere i dati non validi (dovuti al disallineamento satellite-ricevitore o al superamento del margine del ricevitore, cioè quando il segnale è così attenuato da diventare indistinguibile dal rumore) e le mancate misurazioni (cioè tutti i casi di fuori servizio o di servizio parziale dovuti allo spegnimento della stazione per manutenzione e alla ripetuta attivazione per i test);
- identificazione delle condizioni di pioggia e di aria chiara. Quest'ultima viene effettuata tramite una procedura automatica (descritta di seguito) o, quando necessario, incrociando manualmente il registro della stazione aggiornato quotidianamente con il segnale di beacon del satellite.

L'algoritmo di rilevamento della pioggia inizia mediando i dati originali acquisiti a 60 Hz su intervalli di un secondo, ottenendo una serie temporale di 1 campione al secondo. Quindi i dati vengono filtrati con un filtro passa-basso a risposta impulsiva finita FIR (Finite Impulse Response) con una finestra di 5 minuti per estrarre le variazioni lente. L'identificazione degli eventi di precipitazione si basa sulla pendenza del segnale filtrato calcolata su un intervallo di tempo Δ :

$$Y(n) = [X(n + \Delta/2) - X(n - \Delta/2)]/\Delta \quad (1)$$

dove X è la potenza del segnale ricevuto (mW), con una risoluzione temporale di 1 secondo, n indica l' n -esimo campione temporale, Δ è la finestra temporale utilizzata (300 s nel nostro caso) ed Y è la derivata di X . La media $\langle Y(n) \rangle$ e la deviazione standard σ_Y della derivata Y sono utilizzate per definire la soglia Y_{th} utilizzata per rilevare gli eventi di precipitazione.

$$Y_{th} = \langle Y(n) \rangle \pm 2\sigma_Y \quad (2)$$

I valori della derivata Y del segnale maggiori di Y_{th} identificano le parti del segnale associate agli eventi di precipitazione. Abbiamo quindi estratto i dati dalle serie temporali originali (con almeno 60 campioni/s) all'interno di una finestra di un'ora centrata sugli istanti identificati.

Le porzioni selezionate della serie temporale originale vengono quindi ricampionate su un asse temporale regolare per produrre serie temporali della stessa dimensione.

Occorre poi separare l'attenuazione dovuta alla pioggia (cioè all'assorbimento e allo scattering da parte delle idrometeore) e alla scintillazione (cioè ai rapidi cambiamenti del segnale causati dalla turbolenza dell'aria [11]). L'attenuazione in eccesso, dovuta a pioggia e nuvole, si calcola utilizzando un segnale di riferimento. Quest'ultimo si ottiene prima filtrando con un passa-basso due/tre distinti segnali di potenza registrati in giorni precedenti di cielo sereno (dipende dalla disponibilità) per eliminare le fluttuazioni rapide e quindi mediandoli.

La Figura 2 mostra un esempio della potenza del segnale ricevuto e del corrispondente livello di riferimento (in giallo) con l'evento di pioggia verificato dai dati dei pluviometri raccolti vicino al sito.

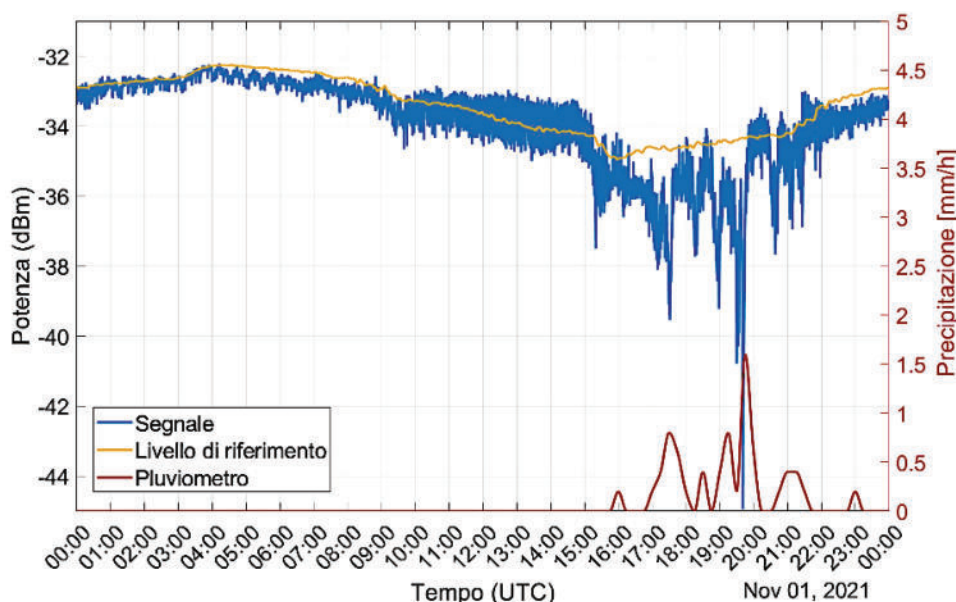


Figura 2 – Serie temporale del segnale del beacon ricevuto in banda Ka (blu), del livello di riferimento (giallo), registrato e processato nei precedenti giorni di aria chiara, e dei livelli di pioggia misurati dal pluviometro (rosso) durante il giorno 1 novembre 2021.

Per separare i due eccessi di attenuazione e scintillazione, abbiamo analizzato le caratteristiche spettrali delle serie temporali durante gli eventi di precipitazione.

Sia $S_i(f)$ lo spettro di potenza di un singolo evento di pioggia (dB^2/Hz), allora lo spettro di potenza medio di N eventi si ottiene calcolando

$$\langle S(f) \rangle = 10^{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log_{10} S_i(f)} \quad (3)$$

La Figura 3 mostra lo spettro di potenza medio delle $N=158$ serie temporali relative agli eventi di precipitazione raccolti nel 2021.

Si può notare, al di sotto di 0,02-0,03 Hz, la pendenza di -20 dB/decade tipicamente associata all'attenuazione della pioggia [12]. Al di sopra di tale frequenza si può osservare il plateau della scintillazione e poi, al di sopra di circa 1 Hz, la tipica pendenza di -80/3 dB/decade della scintillazione [11]. Infine, il rumore del ricevitore è evidente al di sopra di circa 3 Hz.

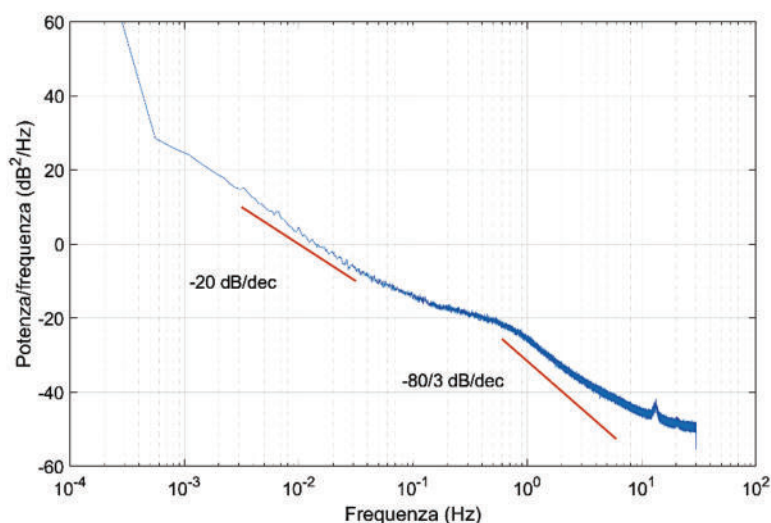


Figura 3 – spettro mediato di potenza degli eventi di precipitazione osservati dalla stazione di Roma nel 2021.

L'attenuazione della pioggia è ottenuta filtrando in passa-basso le serie temporali originali (con frequenza di taglio di 0,025 Hz) mentre la scintillazione è ottenuta filtrando in passa-banda (con larghezza di banda di 0,025-0,5 Hz). Il limite superiore di 0,5 Hz del filtro passa-banda è scelto per escludere il rumore del ricevitore. Entrambi i filtri sono filtri “Butterworth” del 6° ordine.

Le frequenze di taglio sono identificate dalla variazione di pendenza dello spettro medio [13]. L'attenuazione media in eccesso e la deviazione standard della scintillazione vengono quindi calcolate ogni minuto, ottenendo serie temporali contemporanee con una frequenza di campionamento di 1 campione/min.

4 – Relazione sperimentale tra scintillazione e attenuazione da pioggia

Considerando il modello a strato sottile della turbolenza troposferica [13]-[15], è possibile mettere in relazione la deviazione standard dell'ampiezza di scintillazione σ con l'attenuazione della pioggia A . La Figura 4 mostra il diagramma di dispersione di A e σ per il sito di Roma.

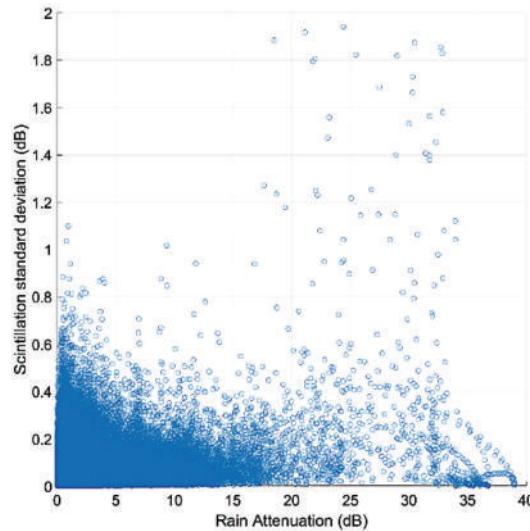


Figura 4 – Grafico di dispersione della deviazione standard σ (dB) e dell'attenuazione media simultanea A (dB) per tutti i dati raccolti a Roma durante gli eventi di pioggia del 2021.

Secondo [7], possiamo misurare la deviazione standard σ (dB) della scintillazione con un rapporto segnale/rumore (dB) dato da

$$\rho_s = \rho_0 - N_i - 10 \log_{10} B - A + 20 \log_{10} \left(10^{\frac{\sigma_m}{20}} - 1 \right) \quad (4)$$

dove ρ_0 (dB) è il rapporto segnale/rumore misurato in condizioni di cielo sereno in una larghezza di banda di 1 Hz, N_i è l'aumento della potenza di rumore dovuto al rumore dell'antenna durante la pioggia, prudentemente aumentato del 10% a 2 dB per tener conto della aleatorietà della temperatura di antenna durante il periodo di osservazione, A (dB) è

l'attenuazione simultanea della pioggia, σ (dB) è la deviazione standard della scintillazione e B (Hz) è la larghezza di banda post-rilevazione, assunta pari a 0,5 Hz. Nominalmente, si può assumere $\rho_0 = 59,2$ dB per il ricevitore di Roma.

La Figura 5 mostra i valori di ρ_s per il ricevitore calcolati dalla (4), per valori di attenuazione da pioggia compresi tra 1 e 40 dB.

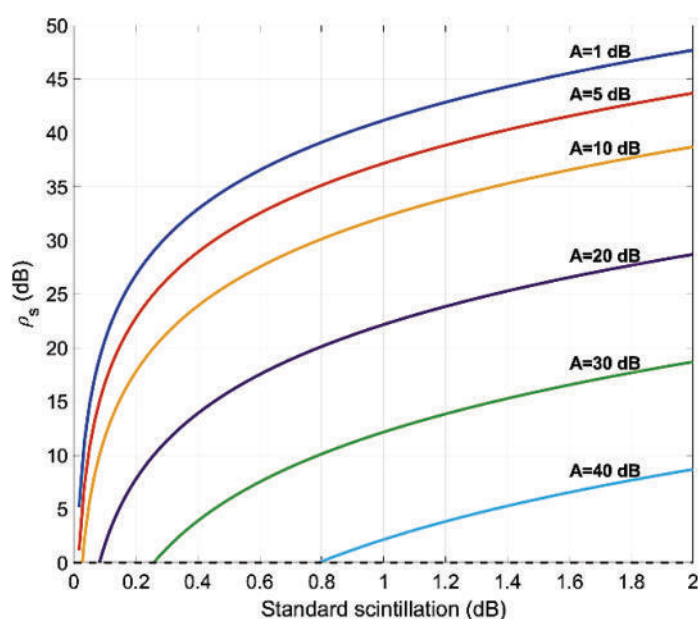


Figura 5 – Valori del rapporto segnale/rumore ρ_s (dB) per il sito di Roma, calcolati dalla (4), in funzione della deviazione standard della scintillazione σ (dB), per valori di attenuazione da pioggia compresi tra 1 e 40 dB.

Per osservare la scintillazione a Roma con una deviazione standard di 0,1 dB, secondo l'equazione (4) o la Figura 5, è necessario un rapporto segnale/rumore di 11,8 dB se $A = 10$ dB. Mentre il grafico a dispersione della Figura 4 mostra una notevole casualità e nessuna relazione evidente tra σ e A , la deviazione standard media condizionata all'eccesso di attenuazione rivela una tendenza più chiara.

La Figura 6 mostra la deviazione standard media condizionata della scintillazione, in funzione dell'attenuazione in eccesso A .

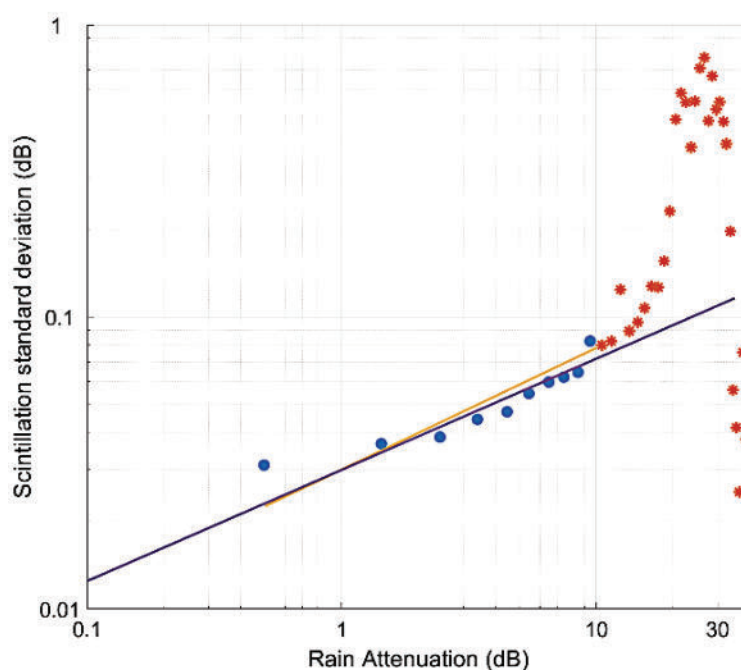


Figura 6 – Deviazione standard media σ_m (cerchi) in funzione dell'attenuazione da pioggia, calcolata dalla Fig. 5. La linea gialla mostra il miglior adattamento nell'intervallo 0,5-10 dB, mentre la linea viola mostra il modello teorico a strato sottile. I punti arancioni corrispondono a valori non inclusi nella regressione.

Viene calcolata una retta di regressione nell'intervallo di attenuazione da 0,5 a 10 dB, come si vede nella Figura 6, dopo aver confermato che il rapporto segnale/rumore è sufficientemente all'interno dell'intervallo accettabile per una misura accurata (si veda la Figura 5). La variazione della pendenza al di sopra dei 10-12 dB di attenuazione indica l'effetto crescente del rumore del sistema sulle misure [13] e quindi i valori corrispondenti di non sono inclusi nella regressione.

Un'espressione basata su legge di potenza è stata proposta in [13] per descrivere la relazione tra σ_m e A .

$$\sigma_m = 0.039 \cdot A^{5/12} \quad (5)$$

Adattando i dati sperimentali, la relazione tra A , fino a 10 dB, e σ_m è la seguente

$$\sigma_m = 0.030 \cdot A^{5/12} \quad (6)$$

in accordo con la pendenza considerata in precedenza in (5) e mostrata in Figura 6. Dalla stessa figura è evidente che a livelli di attenuazione superiori a 10, il rumore del ricevitore assume un ruolo predominante nel determinare le caratteristiche del segnale.

Finora, la discussione si è concentrata sulla relazione media vista dall'espressione della legge di potenza. Tuttavia, per una progettazione conservativa del sistema, come mostra il grafico di dispersione della Figura 4, è necessario considerare le ampie variazioni che possono verificarsi nella relazione istantanea $\sigma(A)$.

In particolare, nell'intervallo di attenuazione più stabile mostrato in Figura 6, abbiamo calcolato le distribuzioni della deviazione standard di σ in funzione di A . Queste distribuzioni condizionali sono mostrate in Figura 7 per diversi valori di attenuazione.

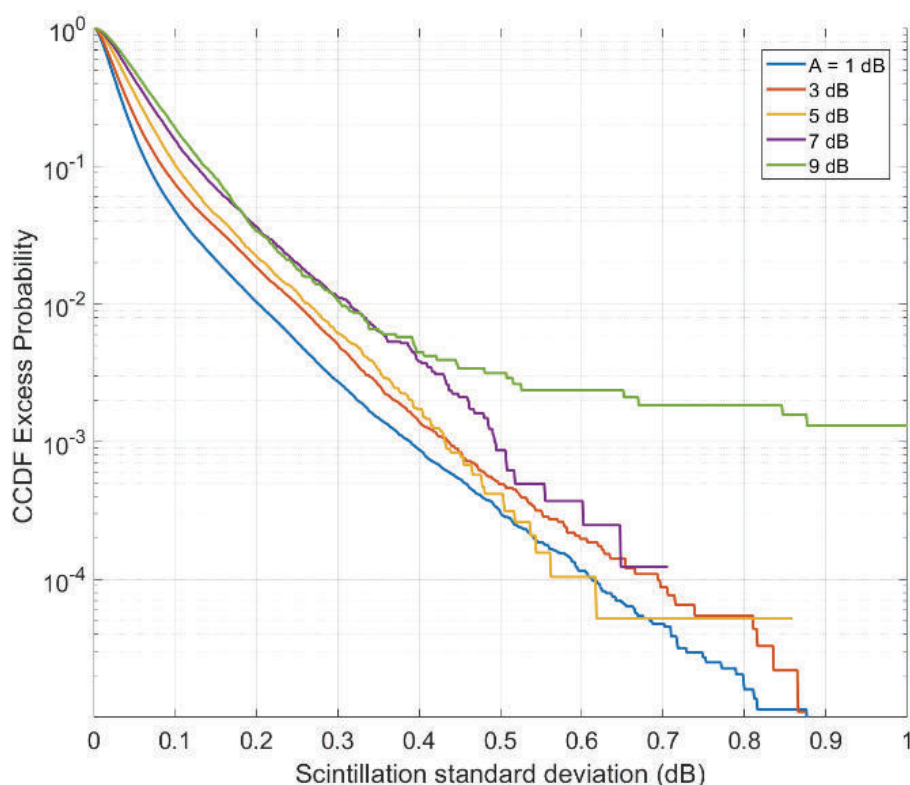


Figura 7 – Distribuzioni condizionate della deviazione standard della scintillazione σ (dB) in funzione dell'attenuazione da pioggia, in intervalli di 2 dB di larghezza, da 0-2 dB a 8-10 dB, con il valore centrale dell'attenuazione indicato nella legenda.

Il grafico rappresenta la CCDF (Complementary Cumulative Distribution Function) ovvero la funzione di distribuzione cumulativa complementare e mostra la frazione di probabilità nella quale la deviazione standard della scintillazione, indicata in ascissa in [dB], è superata.

Dalla figura si può osservare come la probabilità della media dei valori delle deviazioni standard delle scintillazioni aumenti al crescere dell'attenuazione da pioggia A , nell'intervallo di attenuazione più stabile fino a 10 dB.

5 – Conclusioni

Lo scopo di questo studio è quello di caratterizzare, in condizioni di pioggia, l'eccesso di attenuazione e la scintillazione in banda Ka nel collegamento spazio-terra di Roma, concentrandosi sulla loro relazione istantanea e simultanea.

Grazie al sistema di tracciamento satellitare di cui è dotata la stazione ricevente, le fluttuazioni indesiderate nei dati acquisiti sono state significativamente smussate ed elaborate per garantire la qualità.

È stata presentata una procedura automatica per l'identificazione e la selezione degli eventi di pioggia, nonché un metodo per calcolare il livello di riferimento del segnale di cielo sereno basato sulla media dei giorni precedenti l'evento di precipitazione.

L'analisi di 158 serie temporali di attenuazione della pioggia e di eventi di scintillazione a 19,7 GHz ha rivelato una relazione diretta tra i due fenomeni, che può essere modellata utilizzando una legge di potenza per rappresentare lo strato sottile turbolento in quota. Saranno necessarie ulteriori analisi con una serie di dati più ampia per migliorare l'indagine dei fenomeni che caratterizzano il canale di trasmissione.

Ringraziamenti

Ringraziamo DGTEL-ISCTI MIMIT e Sapienza Università di Roma che hanno cofinanziato questo lavoro. Siamo grati alla Direttrice ed ai colleghi del DGTEL-ISCTI MIMIT che hanno consentito l'uso del laboratorio di Microonde.

Riferimenti bibliografici

- [1] C. Han, Y. Bi, S. Duan and G. Lu, "Rain Rate Retrieval Test From 25-GHz, 28-GHz, and 38-GHz Millimeter-Wave Link Measurement in Beijing," in IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 12, no. 8, pp. 2835-2847, Aug. 2019.
- [2] M. Biscarini and F. S. Marzano, "Generalized Parametric Prediction Model of the Mean Radiative Temperature for Microwave Slant Paths in All-Weather Condition," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 68, no. 2, pp. 1031-1043, Feb. 2020, doi: 10.1109/TAP.2019.2943415.
- [3] T. J. Mouldsley and E. Vilar, "Experimental and theoretical statistics of microwave amplitude scintillations on satellite down-links," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. AP-30, no. 6, pp. 1099-1106, 1982.
- [4] Y. Karasawa, M. Yamada, and J. E. Allnutt, "A new prediction method for tropospheric scintillation on Earth-space paths," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 36, no. 11, pp. 1608-1614, 1988.
- [5] D. Mertens and D. Vanhoenacker-Janvier, "Rain fade dependence model of long-term scintillation amplitude distribution at 12.5 GHz," Electron. Lett., vol. 37, no. 10, pp. 657-658, 2001.
- [6] M. van de Kamp, "Climatic radiowave propagation models for the design of satellite communication systems" Ph.D. dissertation, Eindhoven Univ. of Technol., Eindhoven, The Netherlands, 1999 [Online]. Available: <http://alexandria.tue.nl/extra2/9903235.pdf>
- [7] Matricciani, E., and C. Riva (2008), 18.7 GHz tropospheric scintillation and simultaneous rain attenuation measured at Spino d'Adda and Darmstadt with Italsat, Radio Sci., 43, RS1013.
- [8] A. Marziani, F. Consalvi, S. Chicarella, E. Restuccia, L. Amaduzzi and F. S. Marzano, "AlphaSat Ka-band and Q-band Receiving Station in Rome: Development, status and measurements," 2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Lisbon, Portugal, 2015, pp. 1-5.

- [9] V. Pek, V. Brazda, O. Fiser. "Description of Alphasat satellite space motion and its consequences for signal reception." Conference Radioelektronika, 2016.
- [10] A. M. Marziani, F. Consalvi, G. Fusco, F. S. Marzano, C. Riva and A. Martellucci, "Alphasat dual-frequency receiving station in Rome, Italy: upgrade of the Ka-band front-end and case study analysis," 2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Krakow, Poland, 2019, pp. 1-5.
- [11] Tatarski, V.I., "Wave propagation in a turbulent Medium", McGraw-Hill, New York, 1961.
- [12] Matricciani, E., Physical-mathematical model of dynamics of rain attenuation with application to power spectrum, IEEE Electronics Letters., vol. 30, no. 6, pp. 522-524, 1994.
- [13] Matricciani, E., M. Mauri and C. Riva, "Relationship between scintillation and rain attenuation at 19.77 GHz," Radio Science, vol. 31, no. 2, pp. 273-279, March-April 1996
- [14] Matricciani, E., M. Mauri, and C. Riva (1995), Scintillation and simultaneous rain attenuation at 49.5 GHz, paper presented at ICAP 95, IEE Conf. Publ. 407, Eindhoven, Netherlands.
- [15] Matricciani, E., M. Mauri, and C. Riva (1997), Scintillation and simultaneous rain attenuation at 12.5 GHz to satellite Olympus, Radio Sci., 32, 1861–1866.

Metodologie di valutazione e analisi del fattore Building Entry Loss per scenari di coesistenza indoor

Methodologies for assessment and analysis of Building Entry Loss factor for indoor coexistence scenarios.

Claudia Carciofi♦, Manuel Faccioli♦, Andrea Garzia♦, Valeria Petrini♦, Elena Mammi ♦, Simona Valbonesi ♦

♦ Fondazione Ugo Bordoni

Sommario

La valutazione del fattore Building Entry Loss (BEL) è fondamentale nell'ambito della progettazione ed ottimizzazione delle reti 5G in ambienti indoor e per le analisi di coesistenza tra sistemi 5G e servizi incumbent che comprendono anche scenari indoor. Questo fattore permette di determinare l'attenuazione del segnale radio quando questo attraversa ostacoli come, ad esempio, le pareti di un edificio, la vegetazione, oppure la struttura di un veicolo. Dagli studi scientifici effettuati a livello europeo (CEPT) e internazionale (ITU-R) è emerso che il fattore BEL dipende da molteplici variabili, tra cui i materiali di costruzione, la frequenza e le geometrie specifiche degli oggetti che si vengono a trovare lungo il percorso del segnale radio incidente. Per la valutazione della BEL sono state messe a punto varie metodologie numeriche di semplice applicazione senza però disporre della flessibilità necessaria per caratterizzare anche scenari specifici. Diversamente, le valutazioni effettuate tramite misurazioni sul campo mostrano risultati molto variabili ed è estremamente complesso arrivare ad una univoca valutazione della BEL che non sia affetta da un'ampia variabilità statistica. La questione si complica ulteriormente quando si va ad effettuare la valutazione della BEL per scenari indoor complessi quali ad esempio l'interno delle autovetture o le carrozze dei treni. In questo lavoro, partendo dai dati di BEL sperimentali disponibili in letteratura, attraverso l'analisi e il confronto di diversi modelli di valutazione (ITU-R, CEPT, 3GPP) e tramite opportune analisi statistiche in diversi contesti indoor e a diverse frequenze, si propongono valori di BEL che possono essere applicati per scenari indoor tenendo conto della presenza sia di edifici standard sia di edifici termicamente efficienti in diverse percentuali (scenari ibridi), e anche

all'interno delle vetture e delle carrozze ferroviarie. Tali valori possono essere poi considerati nei modelli di coesistenza per meglio caratterizzare il segnale radio, nel caso in cui il sistema interferente o interferito siano localizzati nelle pertinenze indoor. La presente analisi riguarda principalmente le frequenze comprese nel range 700 – 3700 MHz e si inquadra nelle attività di valutazione di coesistenza tra sistemi 5G e servizi incumbent FS e FSS condotti in supporto al MIMIT.

Abstract

The Building Entry Loss (BEL) factor assessment is crucial for the design and optimization of 5G networks and for coexistence analyses between 5G systems and incumbent services in indoor scenarios. This factor allows us to calculate the attenuation of radio signal transmission through obstacles such as, for example, building walls or a vehicle cockpit (e.g. car, train).

Scientific studies carried out at European (CEPT) and international (ITU-R) level have shown that the BEL factor depends on multiple variables, including building materials, incident radio signal frequency and building geometry. Several numerical methods have been developed to assess BEL that are easy to apply but lack the flexibility to characterize specific scenarios. On the other hand, assessments carried out through direct field (or power) measurements are characterized by high variability and standard deviation; therefore, it is extremely complex to derive at a univocal assessment of the BEL that is not affected by a highly variable average value. The issue becomes even more complex in case of Penetration Loss assessment related to indoor scenarios such as the interior of a car or of a train carriage.

In this work, starting from the experimental data available in literature, through the analysis, the application and the comparison of different numerical models (ITU-R, CEPT, 3GPP) and through appropriate statistical analyses of the values in different indoor contexts and at different frequencies, BEL values are proposed that can be applied for indoor scenarios taking into account the presence of both standard buildings and thermally efficient buildings in different percentages (hybrid scenarios), and also inside cars and train carriages. These values can then be applied in the coexistence models to better characterize the radio signals in cases

where the interfering or the interfered systems are indoor. The presented analysis mainly concerns the frequencies included in the range 700 – 3700 MHz and is part of the studies related to coexistence between 5G systems and incumbent FS and FSS service carried out in support of MIMIT.

Keyword

Building Entry Loss (BEL), radiofrequency, attenuation, coexistence, indoor, in-car penetration loss, Wagon Penetration Loss (WPL)

1 – Introduzione

Le valutazioni di coesistenza e compatibilità tra sistemi 5G e servizi incumbent (FS,FSS) nella stessa banda o in bande adiacenti richiedono di tener conto anche della eventuale presenza di siti 5G trasmettenti in ambienti indoor. Le coperture 5G indoor si stanno sviluppando in diverse bande di frequenza sia per aumentare la capacità in zone affollate (es. stazioni ferroviarie, aeroporti, centri commerciali, ...), sia per migliorare la copertura in ambienti deep indoor (es. sottopassaggi stazioni).

Per poter caratterizzare il segnale interferente di un sito indoor occorre includere nel modello di propagazione per le valutazioni di coesistenza anche il fattore aggiuntivo “Building Entry Loss (BEL)”. Tale parametro consente di valutare la perdita di penetrazione del segnale interferente per effetto delle pareti degli edifici.

Per determinare il valore appropriato di BEL da utilizzare nelle valutazioni di coesistenza, in questo articolo sono stati effettuati approfondimenti scientifici su diversi modelli per il calcolo disponibili in letteratura, confrontando approcci di tipo statistico e sperimentale. Vengono esaminate e confrontate diverse tipologie di modelli di valutazione del parametro BEL che si basano su raccomandazioni ITU-R e CEPT riconosciute a livello internazionale. I modelli di calcolo sono ottenuti da numerose valutazioni sperimentali che mostrano l’ampia variabilità del valore della BEL a seconda della frequenza, dell’ambiente e della tipologia di materiali. L’obiettivo del presente articolo è di individuare in diversi scenari di coesistenza reali di

interesse a livello nazionale ed europeo quali sono i modelli da utilizzare per il calcolo del parametro BEL. Vengono inoltre forniti per ogni diverso scenario di coesistenza i valori appropriati da applicare nel modello di propagazione per caratterizzare il segnale interferente di siti 5G indoor. I valori di BEL proposti sono stati implementati nel tool proprietario FUB per le valutazioni simulative di coesistenza e compatibilità in diverse bande di frequenza.

2 – Scenari di applicazione della BEL

2.1 – Casistica di applicazione

Le perdite di penetrazione rappresentano un fattore di estrema rilevanza negli studi di compatibilità e coesistenza di sistemi wireless, in particolare per quanto riguarda gli scenari indoor-to-outdoor (I2O) e outdoor-to-indoor (O2I). Il fattore di Penetration Loss (o Entry Loss) permette di quantificare l'attenuazione del segnale radio quando questo attraversa ostacoli come, ad esempio, le pareti di un edificio, la vegetazione, oppure la struttura di un veicolo e se applicato nei modelli di compatibilità e coesistenza permette in alcuni casi di evitare l'errata valutazione di situazioni di interferenza in caso di passaggio da scenari outdoor a scenari indoor e viceversa. L'entità delle perdite dipende da vari fattori, tra i quali: il materiale di cui è costituito l'ostacolo, la distanza che il segnale deve percorrere attraverso l'ostacolo, la frequenza e l'angolo di elevazione del cammino. Le casistiche di applicazione delle perdite di penetrazione sono sintetizzate nel seguente elenco:

1. Studi di interferenza in ambienti complessi: la conoscenza delle perdite di penetrazione consente di determinare la probabilità che un segnale proveniente da una sorgente possa penetrare ostacoli fisici e causare interferenza con dispositivi che operano in ambienti chiusi.
2. Studi di coesistenza: in questo caso le perdite di penetrazione possono essere utilizzate per costruire modelli in grado di predire le modalità di interazione tra diversi sistemi e tecnologie in caso di attraversamento di pareti, strutture o ostacoli naturali.
3. Progettazione di reti resilienti in ambienti complessi: nella progettazione di reti indoor è fondamentale considerare le perdite di penetrazione in quanto la presenza di

strutture fisiche può influire sulla qualità della comunicazione o portare alla presenza di aree caratterizzate da un segnale debole o addirittura assente.

4. Valutazione dell'impatto della tecnologia 5G e successive: con la tendenza della tecnologia 5G ad operare a frequenze anche elevate, la penetrazione dei segnali radio attraverso strutture può diventare un problema dal momento che le alte frequenze tendono a penetrare meno facilmente gli ostacoli. Questo aspetto, in fase di progettazione di impianti 5G deve essere tenuto in considerazione, sia per quanto riguarda gli aspetti di copertura, sia in relazione all'impatto elettromagnetico.

2.2 – Differenziazione di approccio alla valutazione della BEL

Gli studi di condivisione e compatibilità spesso coinvolgono scenari indoor-to-outdoor o outdoor-to-indoor o unicamente indoor, dove per contesti indoor non si intende soltanto l'interno di un fabbricato ma anche l'abitacolo di un'auto o la carrozza di un treno. In questa sezione si analizzano i fattori che concorrono al valore della BEL per differenti contesti indoor.

2.2.1 - Valutazione della BEL per edifici

Per conoscere (o prevedere) la Building Entry Loss (BEL) si possono utilizzare metodologie basate su calcolo numerico oppure misurazioni in situ. L'elevato numero di parametri dai quali viene a dipendere la BEL rende molto difficile ottenere un valore unico rappresentativo di tutti gli scenari possibili. Per quanto riguarda gli edifici, è noto a tutti che costruzioni in mattone, con finestre standard in vetro non riflettente permettono una maggiore penetrazione del segnale rispetto a quelle di modernissima concezione, termicamente efficienti, dotati di scheletri metallici e finestre in grado di bloccare il segnale radio. I modelli sviluppati in ambito ITU [1,2,3] distinguono due tipologie di edifici: standard e termicamente efficienti, altri modelli [4] invece si basano su un edificio misto.

Anche la valutazione della BEL a partire dal dato misurato è complessa, sia che si tratti di studi in ambiente controllato (camera anecoica), sia a maggior ragione, su scenari reali.

Il Report ITU-R P.2346 [2] riporta i risultati di 45 studi internazionali basati su misurazione dirette della BEL effettuate ricorrendo a diverse metodologie e protocolli. Dall'analisi statistica dei dati numerici disponibili in [2] emerge una grande variabilità della BEL, come evidente in figura 1, dove a sinistra vengono riportati i risultati relativi ai segnali a frequenza inferiore a 3 GHz e a destra i risultati relativi ai segnali sopra a 10 GHz (la linea rossa rappresenta il valore medio calcolato).

Dallo studio e dalla analisi statistica dei dati riportati in [2] sono emersi i seguenti fattori che incidono sul valore della BEL:

- 1) Materiale dal quale sono costruiti gli edifici e relativo spessore;
- 2) Efficienza energetica dell'edificio
- 3) Distanza TX-RX alla quale sono state effettuate le misure
- 4) Presenza di strutture murarie interne
- 5) Polarizzazione del segnale
- 6) Metodologia di misura
- 7) Angolo di incidenza del segnale rispetto al piano delle pareti.

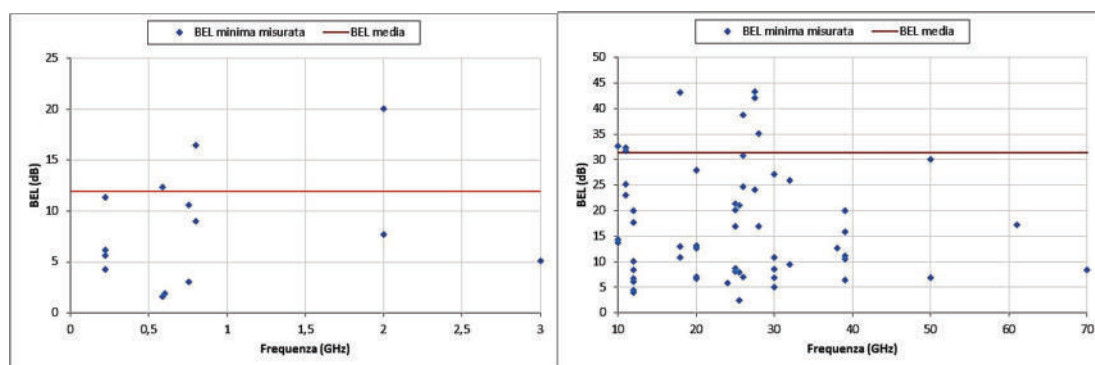


Figura 1 - Dispersione valori di BEL per $f < 3\text{GHz}$ (SX) e $f > 10\text{ GHz}$ (DX)

Il ricorso alle misurazioni dirette della BEL può essere effettuato nel caso in cui si voglia studiare e caratterizzare un ambiente specifico (es: stazione ferroviaria, aeroporto, porto) mentre si ricorre a modelli statistici, come il modello ITU-R P.2109 [1], negli studi generici di copertura, coesistenza e di impatto ambientale, in quanto questi modelli, pur non essendo

completamente flessibili, permettono di ottenere risultati immediati e comprensibili anche dal punto di vista teorico.

2.2.2 - Valutazione della BEL in-car

Per perdita di penetrazione in-car si intende una riduzione della potenza o della qualità del segnale radio quando questo penetra o attraversa la struttura dell'auto. Questa perdita si verifica in quanto i materiali che compongono l'auto (metallo, vetro, altre componenti) possono bloccare o attenuare i segnali radio. La valutazione della BEL in-car è più complessa rispetto agli edifici in quanto ci sono più fattori da tenere in considerazione; in particolare:

1. Materiali che compongono la carrozzeria dell'auto
2. Vetri: alcune auto sono dotate di vetri progettati per bloccare totalmente o parzialmente il segnale radio
3. Dimensioni e forma del veicolo
4. Frequenza del segnale incidente
5. Posizionamento dei dispositivi di ricezione all'interno dell'auto [6]
6. Componenti o rivestimenti metallici all'interno dell'abitacolo che possono creare riflessioni interne che comportano interferenze distruttive
7. Elettronica dell'auto: dispositivi come airbag, sensori e sistemi di infotainment possono causare interferenze o riflessioni del segnale
8. Direzione di provenienza del segnale radio rispetto alla posizione dell'auto.

2.2.3 Valutazione della BEL in-train (WPL – Wagon Penetration Loss)

I fattori che influenzano le perdite di penetrazione BEL nell'ecosistema treno sono legati alle caratteristiche specifiche del convoglio ed alla presenza di folla al suo interno. Studi scientifici [7] hanno evidenziato che l'attenuazione del segnale radio dovuta alla presenza di un singolo passeggero sul percorso Tx-Rx può variare tra 2 e 20 dB, mentre l'attenuazione dovuta ad una vera e propria folla lungo il percorso Tx-Rx può arrivare fino a 60 dB.

Se si esclude la presenza di folla e si analizza soltanto l'ambiente treno occorre tenere in considerazione che il segnale RF penetra all'interno del treno dalle aperture (finestrini e porte) e si propaga nella carrozza andando incontro a fenomeni di assorbimento, riflessione e dispersione che non possono essere ignorati. La BEL viene quindi a dipendere da:

1. Angolo di arrivo del segnale, continuamente variabile a causa dei movimenti basculanti del treno
2. Caratteristiche della carrozzeria del treno e delle sue parti esterne
3. Caratteristiche dei finestrini laterali (in particolare forma e dimensione)
4. Materiali che compongono i vetri
5. Materiale utilizzato per l'isolamento termico delle carrozze

Nelle sezioni a seguire si riportano una serie di metodologie per il calcolo della BEL in diversi contesti (edifici, auto, treni) ed i risultati ottenuti.

3 Approcci alla valutazione della BEL per edifici

Gli approcci per la valutazione della BEL per edifici sono fondamentalmente due: empirico, ossia basato su misurazioni e dati raccolti in loco, e computazionale, consistente nella applicazione di modelli basati sulle teorie di propagazione dei segnali radio e delle probabilità. Attualmente non esiste a livello ITU o CEPT un valore di BEL concordato da applicare negli studi di compatibilità e condivisione; l'unico valore di riferimento è 12 dB da utilizzarsi nel range 3.8 – 4.2 GHz [8]. Scopo di questa sezione è verificare se è possibile determinare un valore di riferimento di BEL da applicarsi a tutti gli scenari urbani in Italia.

3.1 - Il modello ITU-R P.2109

La Raccomandazione ITU-R P.2109 [1] fornisce un modello, descritto attraverso un set di formule, per calcolare le perdite in ingresso agli edifici. L'output del modello [1] consiste in una distribuzione cumulativa della probabilità che un determinato valore di BEL non venga superato. Il modello [28] accetta in input i seguenti parametri:

- Frequenza (compresa tra 700 MHz e 100 GHz);
- Probabilità che il valore di perdita definito non venga superato;
- Caratteristiche dell'edificio (tradizionale o termicamente efficiente);

Il modello di base presuppone che l'antenna all'interno dell'edificio sia omnidirezionale e che le perdite di penetrazione tengano conto di tutta l'energia radiante che arriva nella posizione del terminale.

Di seguito si presenta una applicazione del modello ITU-R P.2109 [1] per edifici tradizionali nel range di frequenza 700 – 5200 MHz (passo 100 MHz) con calcolo delle rette di regressione relative a probabilità variabili tra 20 e 50%. I risultati relativi agli edifici tradizionali, comprensivi di equazione della retta di interpolazione, sono rappresentati in figura 2.

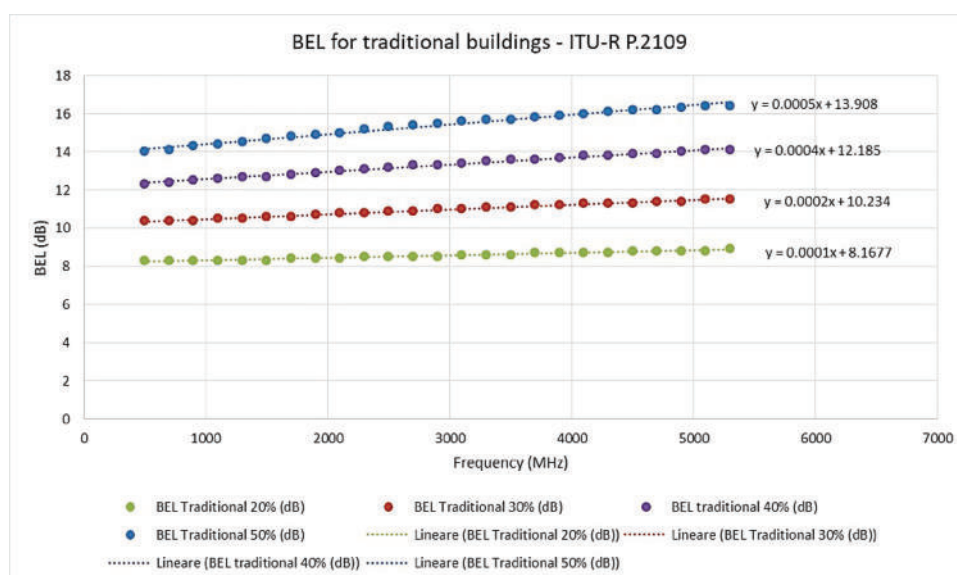


Figura 2 - BEL calcolata con ITU-R P.2109 per edifici tradizionali

Come si può facilmente evincere dal grafico sopra il valore della BEL aumenta all'aumentare della frequenza e della probabilità. La bassa inclinazione delle rette di regressione mostra che la variabilità della BEL nel range frequenziale non è molto elevata (almeno per gli edifici tradizionali); questo giustifica un approccio in grado di fornire un valore unico di BEL all'interno di un range specifico di frequenza.

Tabella 1. Valori medi per carrier aggregation - 700 – 3800 MHz

Metodo	BEL media (dB)	Dev (dB)
ITU-R P.2109 (20%) – Tradizionale	8.4	0.1
ITU-R P.2109 (30%) – Tradizionale	10.7	0.2
ITU-R P.2109 (40%) – Tradizionale	13.0	0.4
ITU-R P.2109 (50%) – Tradizionale	15.0	0.5
ITU-R P.2109 (20%) – Efficiente	21.2	0.3
ITU-R P.2109 (30%) – Efficiente	24.7	0.3
ITU-R P.2109 (40%) – Efficiente	28.0	0.3
ITU-R P.2109 (50%) – Efficiente	30.8	0.3

Dal momento che le frequenze attualmente in uso per telefonia mobile rientrano principalmente nel range 700 MHz – 3800 MHz, è stata effettuata una valutazione considerando una “carrier aggregation” su questo range ed includendo anche gli edifici termicamente efficienti. I risultati sono presentati in Tabella 1, dalla quale emerge in modo evidente la differenza in termini di BEL tra edificato standard e termicamente efficiente che presenta valori molto più elevati.

3.2 - Il modello 3GPP 38.901

Il Technical Report 3GPP 38.901 [11] è focalizzato sui modelli di canale nell'intervallo di frequenza 0,5 – 100 GHz. La sezione 7.4 di [11] tratta la questione delle perdite di cammino sia per scenari outdoor sia per scenari outdoor to indoor (O2I). In questa sezione vengono forniti le equazioni ed i parametri da utilizzare nella simulazione di una serie di scenari (Urban Macro LOS/NLOS, Urban micro – Street canyon LOS/NLOS, Office indoor LOS/NLOS, factory indoor LOS/NLOS) nonché la metodologia per calcolare la LOS probability (tabella 7.4.2). La sezione 7.4.3 è dedicata allo studio dei segnali indoor: sono descritte le modalità per il calcolo

delle perdite di cammino in un percorso O2I per effetto della presenza delle pareti. Il modello prevede che alle perdite di cammino calcolate sulla base delle formule classiche vengano aggiunti due termini per tenere in considerazione le perdite dovute alla penetrazione del segnale attraverso le pareti esterne dell'edificio alla distanza ricevitore-pareti esterne. Viene anche fornito un set di equazioni per il calcolo delle perdite di penetrazione in funzione del materiale costituente l'edificio o parti di esso (Vedere Tabella 2).

Tabella 2. Perdite di penetrazione per diversi materiali

Materiale	Perdita [dB]
Vetro standard	$L_{\text{glass}} = 2 + 0.2f$
Vetro riflettente	$L_{\text{IRglass}} = 23 + 0.3f$
Cemento	$L_{\text{concrete}} = 5 + 4f$
Legno	$L_{\text{wood}} = 4.85 + 0.12f$
Nota: la frequenza è espressa in GHz	

3.3 - Approccio CEPT/OFCOM

In ambito CEPT [8] viene indicato l'utilizzo di un valore di BEL pari a 12 dB negli studi di compatibilità e condivisione nella banda 3.8 – 4.2 GHz. Questo valore numerico è frutto di un approccio coordinato discusso in ambito CEPT a partire da considerazioni sviluppate da OFCOM [4] e rappresenta una perdita media applicabile sia a edifici comuni sia a costruzioni efficienti dal punto di vista energetico. Da parte di OFCOM tale valore è stato calcolato partendo dalla distribuzione cumulativa della BEL ottenuta tramite applicazione del modello ITU-R P.2109 [1] (con probabilità al 20%) per edifici tradizionali e termicamente efficienti ed effettuando una integrazione sulle curve che permette di ottenere un singolo valore di attenuazione per ciascuna tipologia di edificio. I due valori ottenuti vengono combinati attraverso un fattore di peso basato su una distribuzione degli edifici che prevede il 70% di tipo tradizionale ed il 30% efficiente dal punto di vista energetico.

Per maggiore completezza di trattazione si è preliminarmente cercato di verificare, attraverso i dati ENEA sulle classificazioni energetiche [12], se il rapporto percentuale 70/30 indicato da CEPT e da OFCOM fosse rappresentativo anche dello scenario italiano.

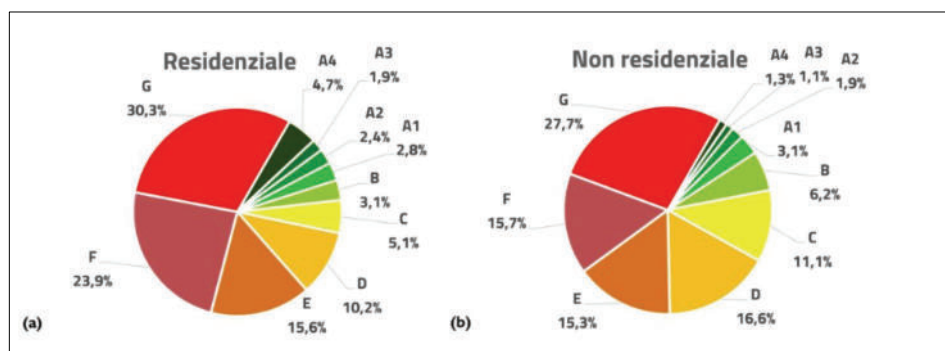


Figura 3 - Classi energetiche in Italia (Dato ENEA 2023)

In figura 2 sono rappresentate le classi energetiche degli edifici italiani residenziali e no; considerando come energeticamente efficienti le classi A1-A4, B, C si ottiene per i contesti non residenziali una percentuale di edifici termicamente efficienti attorno al 25%, che scende al 20% se si considerano contesti non residenziali. Il calcolo della BEL secondo il modello OFCOM/CEPT [4,8] è stato quindi ripetuto considerando i seguenti tre rapporti 70/30 (a fini di verifica), 75/25 e 80/20 ed ha portato a valori di BEL, riportati in Tabella 3 ed in Tabella 4.

Come si può evincere dai dati riportati in Tabella 3, i valori della BEL per singola banda (range 2600 – 3800 MHz) variano da 11.08 a 12.36 dB; la quarta colonna, evidenziata in grigio scuro riferisce al rapporto 80/20 scelto come maggiormente rappresentativo dello scenario italiano. Dai valori numerici riportati in Tabella 4 emerge la conferma del fatto che la composizione percentuale dell'edificio incide sui valori della BEL che tende ad aumentare al crescere della percentuale di edifici termicamente efficienti.

Tabella 3. Contesti misti (Approccio CEPT Report 358)

Freq. (GHz)	Edificato misto 70%/30% (dB)	Edificato misto 75%/25% (dB)	Edificato misto 80%/20% (dB)
2600	12.24	11.61	10.99
3400	12.31	11.70	11.08
3600	12.33	11.72	11.10
3700	12.35	11.73	11.11
3800	12.36	11.74	11.13

Tabella 4. Valori medi per carrier aggregation - 700 – 3800 MHz

Metodo	BEL media (dB)	Dev (dB)
CEPT (70/30)	12.21	0.06
CEPT (75/25)	11.61	0.06
CEPT (80/20)	10.98	0.06

3.4 - Valutazione della BEL a partire dal dato empirico

È stata eseguita una analisi statistica su un set selezionato di dati di misura riportati in [2]. Dal numeroso database di misure sono stati esclusi gli studi riguardanti unicamente edifici termicamente efficienti; tale scelta è dettata dal fatto che in Italia, la maggioranza dell'edificato, soprattutto per quanto riguarda contesti come stazioni ferroviarie, porti ed aeroporti, si basa su materiali tradizionali, quindi non è termicamente efficiente. I valori presi in considerazione sono stati elaborati e presentati in un grafico dal quale si è proceduto al calcolo della retta di regressione con l'intento di metterla a confronto con le rette di regressione calcolate tramite il modello ITU-R P.2109 [1] riportate nella Sezione 3.1.

Dal grafico di figura 4 emerge che i dati presentano una elevata dispersione dovuta per lo più alle diverse condizioni e scenari di misura con un valore della BEL variabile da un minimo di 7 dB ad un massimo di 23 dB.

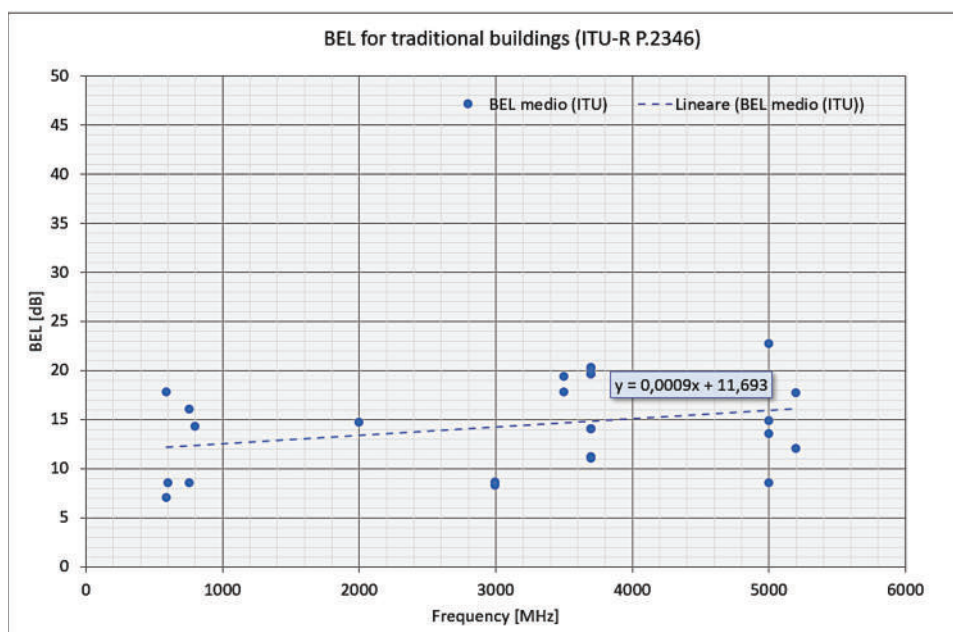


Figura 4 - BEL ottenuta dai dati di misura per edifici tradizionali

3.5 - Confronto tra misure e simulazioni

La seconda fase dello studio si è incentrata su un confronto diretto tra rette di regressione, con lo scopo di verificare l'eventuale sussistenza di un accordo tra il dato misurato che risente di variabilità elevata e di condizioni al contorno spesso non quantificabili e il dato calcolato tramite modelli statistici.

In figura 5 sono riportati gli andamenti delle rette di regressione ottenute dalla applicazione del modello ITU-R P.2109 (probabilità 20%, 30%, 40% e 50%) [1] e dai dati di misura. Dalla analisi emerge che la retta di regressione relativa al dato misurato (retta in verde) è contenuta entro le rette di regressione del modello ITU-R P.2109 (probabilità 20% e 50%) [1] almeno fino alla frequenza di 5.2 GHz. I grafici mostrano anche che la retta di regressione relativa al dato misurato e la retta di regressione calcolata a partire dal modello ITU-R P.2109 [1] fissando la probabilità al 40%, sono molto vicine. Si è pertanto effettuato un approfondimento analizzando i valori relativi a frequenze specifiche: i risultati hanno messo in evidenza che, considerando una probabilità del 40%, fino alla frequenza di 2 GHz lo scostamento dato

misurato/dato calcolato è variabile tra 0.15 ed 1.9 dB; superati i 2 GHz la retta di regressione calcolata a partire dal modello [1] tende ad essere una sottostima del dato misurato, con scostamenti che possono arrivare anche a 11.4 dB.

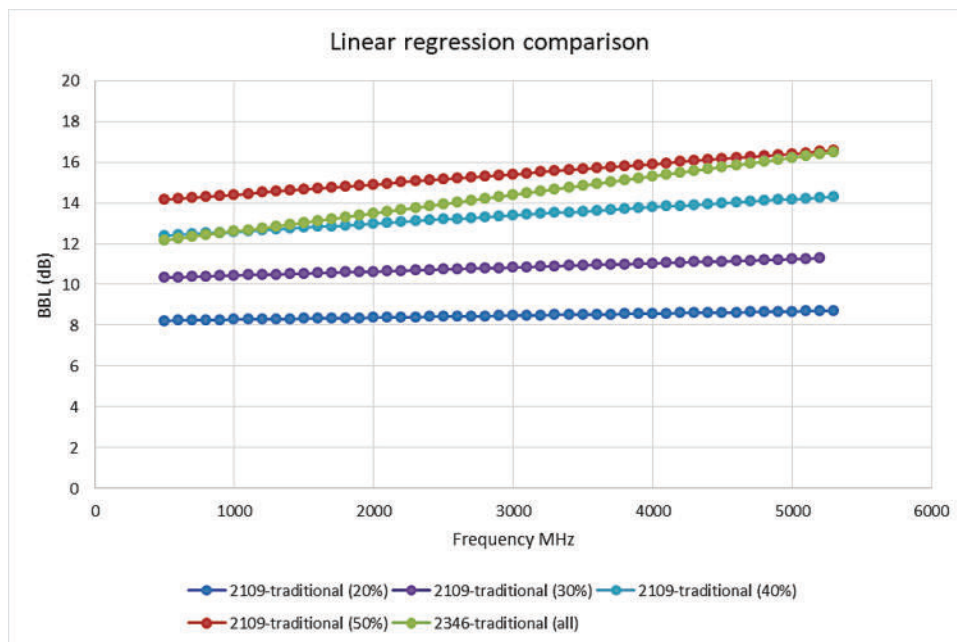


Figura 5 - confronto tra rette di regressione.

3.6 – Conclusioni su BEL per edifici

Dal primo set di analisi effettuato unicamente su edifici standard sono emerse le seguenti considerazioni:

1. I valori misurati risentono delle condizioni al contorno e della loro variabilità.
2. La retta di regressione dei valori misurati è contenuta entro le rette di regressione relative all'applicazione del modello ITU-R P.2109 (20% e 50%) [1] fino almeno alla frequenza di 5.2 GHz.
3. I valori medi della BEL calcolati per edifici tradizionali tramite modello ITU-R P.2109 con location probability variabili tra 20 e 50% per la banda 700 – 3000 MHz variano tra 8.4 e 15 dB ed aumentano al crescere della location probability.

4. Il modello ITU-R P.2109 [1] presenta un buon accordo con il dato empirico, ne consegue che può essere utilizzato per la definizione di una BEL universale.
5. Se si considera un edificio costituito per il 100% da edifici di tipo tradizionale l'accordo migliore lo si ha ponendo la probabilità al 40% nel calcolo con il modello ITU-R P.2109 [1]

Il secondo set di analisi ha incluso anche gli edifici termicamente efficienti ed ha portato alle seguenti considerazioni:

1. I valori della BEL calcolati tramite modello ITU-R P.2109 [1] per edifici termicamente efficienti sono non lineari nel range 700 – 3800 MHz.
2. I valori medi della BEL calcolati per edifici termicamente efficienti tramite modello ITU-R P.2109 con location probability variabili tra 20 e 50% per la banda 700 – 3800 MHz variano tra 21.2 e 30.8 dB e aumentano al crescere della probability.
3. I valori della BEL calcolati per edificio misto considerando il rapporto 70/30, 75/25 e 80/20 variano tra 10 e 12 dB
4. Il rapporto edifici standard/edifici termicamente efficienti che meglio rappresenta lo stato dell'edificio italiano è 80/20

Sempre per completezza di trattazione è stato effettuato il calcolo della BEL attraverso il modello ITU-R M.2412 [13] per frequenze sub 6 GHz e scenari rurali macro; tale valore è risultato essere pari a 10 dB.

In conclusione, sulla base delle analisi effettuate considerando modelli di riferimento ITU-R (ITU-R P. 2109 [1] e ITU-R M. 2412 [13]) è possibile affermare che, per lo scenario italiano, è ragionevole applicare un valore di BEL pari a 10 dB da assumere come unico valore nell'intervallo frequenziale 700 MHz-3800 MHz. Le assunzioni da applicare sono le seguenti:

- Carrier aggregation sul range 700 – 3800 MHz
- Rapporto edificio tradizionale/edificio termicamente efficiente pari a 80/20
- Location probability pari al 20%

4 - Approcci alla valutazione della PL in-car

La valutazione della PL in-car è più complessa rispetto agli edifici a causa dell'elevato numero di fattori da tenere in considerazione e della presenza di scheletri metallici che riflettono il segnale radio impedendogli in parte di penetrare nell'abitacolo. A livello di modellistica i riferimenti riconosciuti sono due: il modello ITU-R M.2412 [13] il modello 3GPP 38.901 [11], che parte dalle medesime considerazioni sviluppate in ambito ITU. In questa sezione vengono analizzati tramite diversi approcci i dati disponibili in letteratura, con l'obiettivo di trovare un valore unico di PL da applicarsi negli studi di coesistenza.

4.1 - Modello 3GPP 38.901

La conoscenza della PL in-car è fondamentale negli studi riguardanti scenari di copertura in cui lo User Equipment (UE) si trova all'interno di un veicolo, oppure nelle indagini riguardanti la mobilità dei terminali in ambiente urbano. Il modello 3GPP 38.901 [11] definisce le perdite di cammino in-car attraverso la seguente equazione:

$$PL = PL_b + N(\mu, \sigma_P^2)$$

dove PL_b rappresenta le perdite di cammino outdoor calcolate secondo il modello ITU-R M.2412[13]. Per le auto, si considera $\mu = 9$ e $\sigma_P = 5$, oppure $\mu = 20$ in caso di vetture con vetri metallizzati.

4.2 - Modello ITU-R M.2412

Un possibile modello di riferimento semplificato che prevede un unico valore di BEL per frequenze fino a 6 GHz è descritto nel Report ITU-R M.2412 (Tabella A1-7) [13]. In scenari rurali di copertura macro-cellulari il valore di BEL suggerito è pari a 10 dB (≤ 6 GHz) mentre per coperture urbane macro e micro si indica un valore di BEL pari a 20 dB (≤ 6 GHz). Nel Report ITU-R M.2412 [13] vengono descritti anche modelli più dettagliati di calcolo del parametro BEL che tengono conto delle caratteristiche dei materiali degli edifici (cemento, legno, vetro), e viene fornito un modello semplificato di valutazione di BEL all'interno di autoveicoli.

4.3 - Analisi empirica OFCOM

La letteratura disponibile riguardante la valutazione della Penetration Loss in-car è abbastanza limitata e fa riferimento principalmente ad una campagna di misura drive test condotta da LS Telcom per conto di OFCOM [6]. I dati di questa campagna sono stati resi pubblici e da parte nostra sono stati analizzati, anche attraverso l'applicazione del modello 3GPP 38.901 [11], che ha dato origine a una serie di considerazioni presentate nelle sezioni a seguire. I dati disponibili hanno reso possibile definire un valore unico della PL da applicarsi negli studi di coesistenza. Tali dati si riferiscono ad analisi effettuate su 8 differenti tipologie di auto che spaziano dalla berlina di piccole dimensioni con interni in plastica e sedili in stoffa, all'auto diplomatica con interno in pelle, al SUV con tetto a vetro e riguardano un range frequenziale compreso tra 800 e 2600 MHz.

4.3.1 - Effetto della tipologia di finestrino sul valore della in-car PL

La tipologia di vetratura che costituisce i finestrini delle auto può avere effetto sui valori calcolati della in-car PL. Studi riguardanti questo aspetto, basati su campagne di misura, sono stati effettuati in ambito CEPT nelle attività di studio a supporto della pubblicazione del Report CEPT 17 [14]. Queste analisi, che riguardano i range 3 – 6 GHz e 9 – 12 GHz, prendono in considerazione tre tipologie di vettura: auto con tutti i finestrini in vetro metallizzato, auto con soltanto il vetro anteriore metallizzato, auto con vetratura standard.

I range di valori risultanti sono riportati in tabella 5 dalla quale emerge come la presenza di vetri metallizzati impatti sostanzialmente sulla capacità del segnale radio di penetrare nell'abitacolo.

Tabella 5. In-car PL in funzione della tipologia di finestrino (fonte 0)

Range (GHz)	Tutti metallizzati	Solo davanti	Non metallizzato
3 - 6	13-16 dB	9-14 dB	7 – 8 dB
6 - 9	12 – 19 dB	9 – 14 dB	7 – 9 dB

Le successive due analisi presentate riguardano l'applicazione del modello 3GPP 38.901 [11] ai dati pubblicati da OFCOM per la banda 800 – 2600 MHz e da CEPT per le bande 3-6 GHz. Le curve di distribuzione ottenute sono presentate in figura 6.

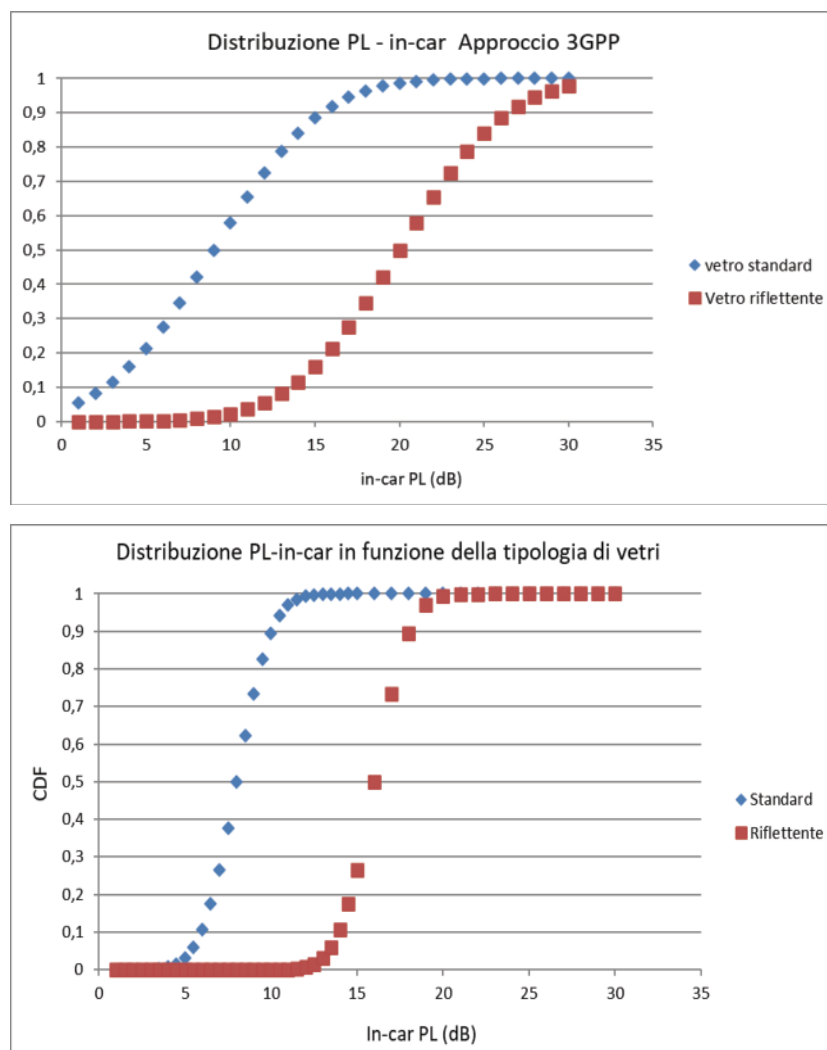


Figura 6 - Approccio 3GPP applicato a dati OFCOM (sopra) e a dati CEPT (sotto)

Da entrambi i grafici emerge la conferma della differenza sostanziale tra l'utilizzo di un vetro standard e di un vetro metallizzato riflettente, che presenta valori di PL più elevati in tutti i percentili.

4.3.2 – Invarianza della in-car PL per ampi range frequenziali

Al fine di verificare la dipendenza della in-car PL dalla frequenza del segnale incidente, i dati resi pubblici da OFCOM [6] sono stati elaborati per banda di frequenza.

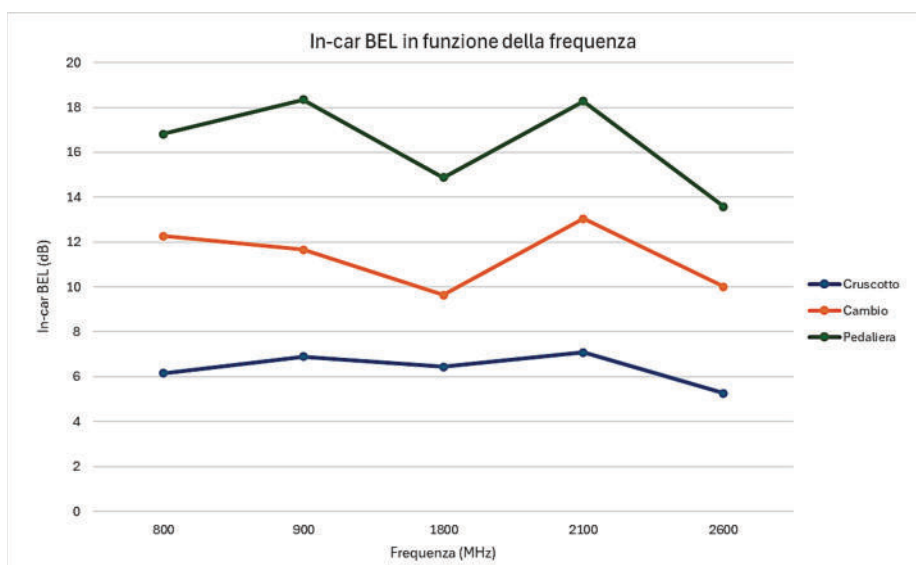


Figura 7 - In-car PL in funzione della frequenza

In figura 7 sono riportati i valori medi della in-car PL ottenuti per le varie frequenze e per diverse posizioni all'interno dell'abitacolo. Come si può facilmente evincere, il posizionare lo UE in corrispondenza della pedaliera comporta valori più elevati di PL. I grafici sembrano non presentare andamenti specifici in funzione della frequenza. In tutti e tre i casi si verifica questo andamento ad "M" con valori massimi relativi ottenuti sempre alla frequenza di 2100 MHz. Di fatto è possibile affermare che, nel range 700 – 2600 MHz, la PL è quasi invariante rispetto alla frequenza; avrebbe pertanto senso, su un range frequenziale così ristretto, considerare negli studi l'applicazione di un valore unico di PL.

Una seconda analisi è stata condotta considerando l'auto come un tutt'uno, ossia senza operare distinzioni riguardo alla posizione dello UE all'interno dell'abitacolo. Le valutazioni statistiche in questo caso sono state effettuate considerando unicamente i dati relativi alle zone cruscotto e cambio, ritenute come posizioni più probabili per lo UE. I risultati sono

riportati in Tabella 6. Come si può evincere dalla tabella, anche in questo caso viene confermato il valore massimo della PL a 2100 MHz già osservato in precedenza. L'elevata deviazione standard è dovuta alla variabilità che caratterizza il dato misurato.

Tabella 6. In-car PL per frequenza

Freq.	Tecn.	In-car PL	St.Dev.
800	LTE	9.2	4.1
900	UMTS	9.3	2.9
1800	LTE	8.0	2.4
2100	UMTS	10.1	3.5
2600	LTE	7.6	2.8

4.3.3 - Variazione della BEL in funzione della posizione nell'abitacolo

Questa analisi è finalizzata nello specifico allo studio della variazione della PL in funzione della posizione dello UE all'interno dell'abitacolo già emersa dal grafico di figura 7. Le analisi sono state effettuate in modo aggregato senza operare un distinguo tra le diverse tipologie di auto e le diverse bande di frequenza ed hanno portato i risultati riportati in tabella 7.

Tabella 7. PL per diverse posizioni all'interno dell'abitacolo

PL (dB)	Cruscotto	Zona cambio	Pedaliera
MAX	10.1 ± 1.6	19.5 ± 2.4	20.7 ± 2.5
MEDIA	6.37 ± 1.6	11.3 ± 2.4	16.4 ± 2.5
MINIMO	2.6 ± 1.6	8 ± 2.4	12 ± 2.5

I numeri riportati in Tabella 7 mostrano che i valori della PL in-car variano al variare della posizione considerata all'interno dell'abitacolo, risultando più elevati in corrispondenza della pedaliera e più bassi lato volante; la posizione freno a mano (zona cambio) si mantiene su valori intermedi.

4.3.4 - Confronto diretto tra i vari approcci

L'analisi finale consiste in un confronto diretto tra i vari approcci, finalizzato alla identificazione di un valore unico di BEL da utilizzare nel range 700 – 3800 MHz per gli studi di coesistenza. A tal fine, nel grafico di Figura 8 sono stati messi a confronto i valori massimo e

minimo della in-car PL ottenuti applicando differenti approcci: i valori per i quali sussiste una sovrapposizione vengono considerati come candidati a definire il valore unico da applicare negli studi di coesistenza. Le analisi condotte riguardano nello specifico le bande 800 – 2600 MHz e 3– 6 GHz.

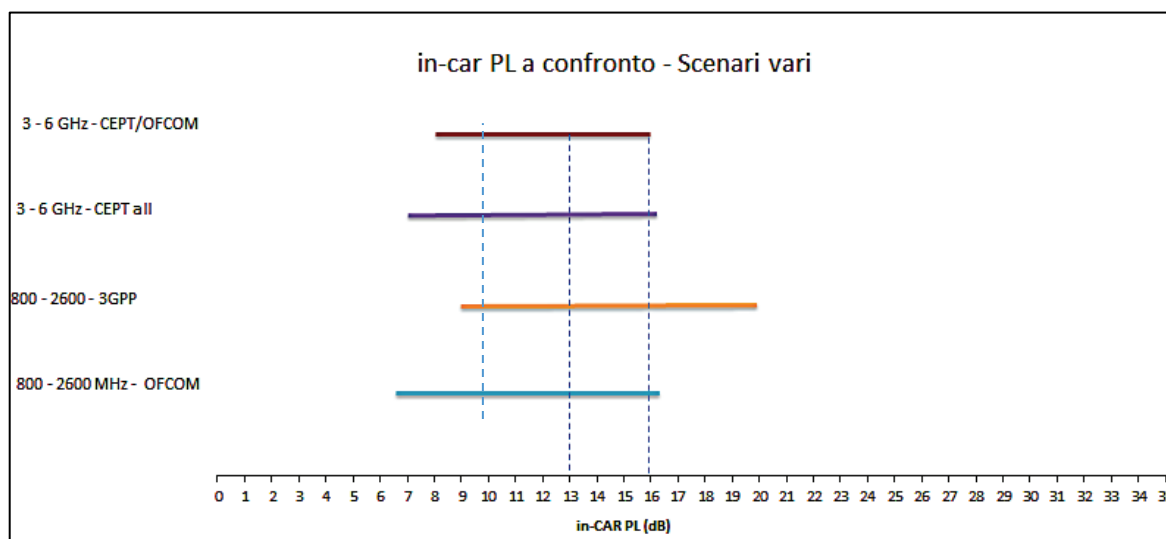


Figura 8 - Approcci a confronto per in-car PL

Dal momento che le analisi effettuate da LS Telcom/OFCOM [6] hanno mostrato che la in-car PL varia poco al variare della frequenza e che i valori concordati in ambito CEPT [14] per la banda 3 – 6 GHz hanno confermato questo aspetto, è stato possibile estendere il confronto e le conclusioni all'intera banda 700 – 3800 MHz, per la quale si evidenzia una sovrapposizione dei valori di PL calcolati con vari approcci nel range 9 – 16 dB.

4.4 – Conclusioni su in-car Penetration Loss

Dalle analisi comparative effettuate sui dati messi a disposizione da OFCOM [6] e CEPT [14] è emerso che per la banda 800 MHz – 6 GHz il range di valori di in-car PL nei quali c'è sovrapposizione indipendentemente dall'approccio statistico utilizzato è 9 – 16 dB.

La tipologia di vetro utilizzato per i finestrini e la posizione dello UE all'interno dell'abitacolo influiscono in modo sostanziale sui valori della PL in-car.

Per fornire un valore unico da utilizzare negli studi di coesistenza occorre considerare le seguenti assunzioni:

- Le vetture sono dotate di vetri standard oppure presentano unicamente il vetro anteriore metallizzato
- La PL non varia in modo sostanziale nel range frequenziale
- Gli UE sono situati nella zona volante o nella zona cambio, non nella pedaliera
- La direzione di provenienza del segnale radio rispetto alla vettura non viene presa in considerazione

Sulla base di tutto ciò è possibile identificare in 10 dB il valore unico da applicarsi per gli studi di coesistenza indoor.

5 - Approcci alla valutazione della PL in-train (WPL – Wagon Penetration Loss)

La valutazione della in-train Penetration Loss (WPL) è ancora più complicata rispetto allo scenario in-car, sia a causa della variabilità e molteplicità delle condizioni al contorno, sia a causa del fatto che non esistono attualmente modelli codificati e riconosciuti a livello europeo, oltre a una letteratura scarsa. In genere, gli approcci sono di tipo empirico (campagne di misura) oppure numerico. In questa sezione si analizzano i pochi dati scientifici disponibili con l'intento di caratterizzare la WPL e di determinarne un valore univoco da utilizzare negli studi.

5.1 - Analisi degli studi disponibili

Gli studi disponibili in letteratura sulla WPL sono limitati in numero e riguardano perlopiù analisi condotte nel range 800 – 3500 MHz. Si tratta di studi effettuati tramite test drive, oppure simulazioni numeriche o analisi in regressione lineare di dati di misura.

5.2 Confronti tra i vari approcci

Dalla analisi dei dati effettuata tramite differenti metodologie è emerso che gli studi, se analizzati complessivamente ed in modo non critico, forniscono valori di WPL molto variabili, come si può evincere dal grafico di figura 9. Per una valutazione coerente con gli obiettivi della presente trattazione si è reso necessario escludere alcuni scenari focalizzati su tematiche

diverse dalla valutazione della WPL (es: effetti della polarizzazione del segnale, test di materiali, ottimizzazione del posizionamento di AP di supporto all'interno dei treni). Come primo step i dati sono stati aggregati per range frequenziali per studio di provenienza e ne è stato calcolato il valore medio, con i risultati riportati in Tabella 8.

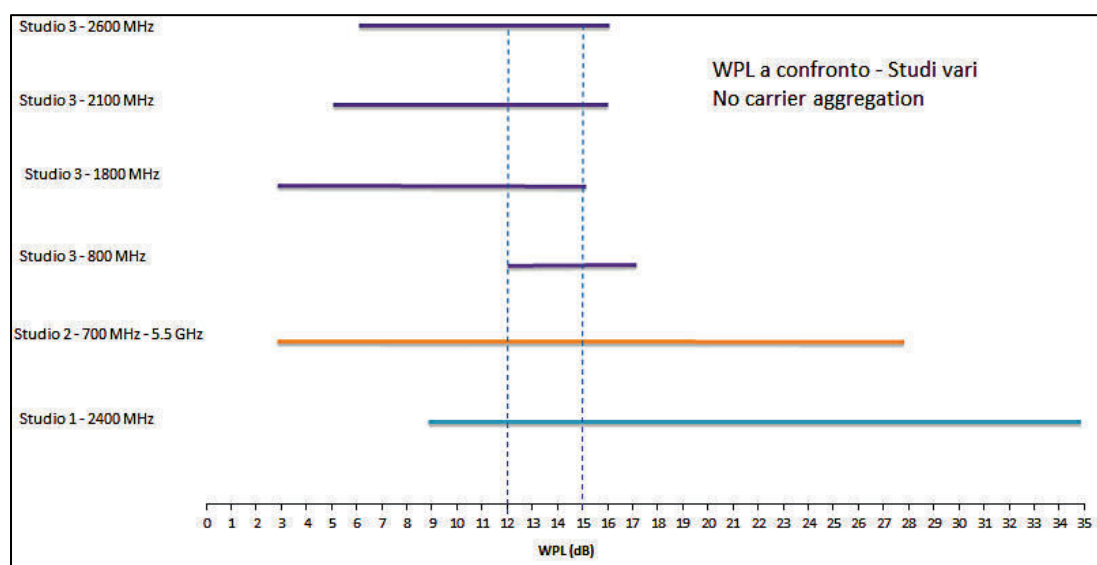


Figura 9 - Approcci a confronto per in-car PL

Successivamente sono stati aggregati per banda di frequenza ed è stato effettuato il calcolo della WPL media. I risultati di questa ulteriore analisi sono riportati in Tabella 9 dalla quale emergono valori compresi tra 9.3 e 9.9 dB e variazioni contenute della WPL in funzione della frequenza nel range 800 – 2600 MHz.

Tabella 8. WPL per studio

Studio	Range	WPL media
Studio 1	1.7 – 2.7 GHz	12.5 dB
Studio 2	800 MHz	9 dB
Studio 2-	1800 – 2600 MHz	10.2 dB
Studio 3	700 – 2700 MHz	9 dB
Studio 4	465 – 820 MHz	9.73 dB

La media su tutta la banda 800 MHz – 2600 MHz è pari a 9.6 dB; questo porta alla conclusione che in un approccio conservativo, imposto anche dalla scarsità di dati disponibili in letteratura, è possibile indicare 10 dB come valore unico della WPL da applicare negli studi.

Tabella 9. WPL per bande

Banda	WPL media
800 MHz	9.3 dB
1800 MHz	9.9 dB
2100 MHz	9.5 dB
2600 MHz	9.7 dB
Media su tutte le bande	9.6 dB

5.3 Conclusioni su WPL

La letteratura scientifica ed i dati disponibili sono estremamente limitati e spesso non utilizzabili in quanto relativi a studi non finalizzati alla valutazione della WPL. Quanto emerge dalla analisi condotta è una estrema complessità dell'ecosistema treno in cui si riscontrano un elevato numero di fattori che influenzano la WPL. Tra questi, solo per citarne alcuni: l'angolo di arrivo del segnale che cambia continuamente a causa dei movimenti del treno, le caratteristiche della carrozzeria, delle parti esterne del vagone e del materiale utilizzato per l'isolamento termico delle carrozze, le caratteristiche dei finestrini laterali, in particolare la loro forma e la composizione del vetro.

La composizione metallica della parte esterna delle carrozze tende a bloccare il segnale radio; ciò che riesce a penetrare attraverso porte e finestre si propaga all'interno della carrozza andando incontro a fenomeni di assorbimento, riflessione, dispersione. A causa di questa molteplicità di fattori che influenzano la WPL, i range misurati sono molto ampi. Le analisi effettuate hanno mostrato che, sulla base dei pochi dati attualmente disponibili, può essere ragionevole applicare negli studi un valore di WPL pari a 10 dB come riferimento unico per

tutto il range. L'utilizzo di tale valore sia per scenari in-car che per scenari in-train rappresenta un buon compromesso nella simulazione di contesti che richiedono copertura solo per il tempo di passaggio del mezzo di trasporto.

6 - Conclusioni e sviluppi futuri

Le perdite di penetrazione rappresentano un fattore di estrema importanza negli studi di compatibilità e coesistenza di sistemi wireless, in particolare per quanto riguarda gli scenari indoor-to-outdoor (I2O) e outdoor-to-indoor (O2I). Il fattore "Building Entry Loss" applicato ad un modello di propagazione consente di valutare la perdita di penetrazione del segnale radio per effetto della presenza di ostacoli di varia natura. La comprensione della attenuazione da parte di ostacoli costituiti da materiali diversi è fondamentale per la pianificazione delle coperture e per lo studio delle interferenze. La valutazione di tali attenuazioni è estremamente complessa a causa di una ampia variabilità di condizioni al contorno. Questo lavoro, partendo dai dati sperimentali disponibili in letteratura ed attraverso l'analisi statistica ed il confronto tra diversi modelli di valutazione della BEL, ha permesso di ottenere un set di valori di BEL che possono essere applicati per caratterizzare scenari diversificati, quali i contesti urbani ad edificio misto, le automobili e le carrozze dei treni. I valori di BEL così definiti possono essere presi in considerazione nei modelli di coesistenza per meglio descrivere il comportamento del segnale radio nel caso in cui il sistema interferente o il sistema interferito siano localizzati in pertinenze indoor. La presente analisi riguarda principalmente le frequenze comprese nel range 700 – 3700 MHz e si inquadra nelle attività di valutazione di coesistenza tra sistemi 5G e servizi incumbent FS e FSS condotti in supporto al MIMIT.

L'attività di ricerca sulla BEL proseguirà nel corso del 2025 con una campagna di misura riguardante scenari in-car nelle bande 700 MHz, 3.7 e 26 GHz e con attività di simulazione, tramite tecniche di ray-tracing, della propagazione del segnale a frequenza sub 6 GHz all'interno del vagone di un treno.

9 - Bibliografia

- [1] Recommendation ITU-R P.2109-2 – *“Prediction of building entry loss”* – 2023
- [2] Report ITU-R P.2346-5 – *“Compilation of measurements data relating to building entry loss”* – 2023
- [3] Recommendation ITU-R P.2040-3 – *“Effects of building materials and structures on radiowave propagation above about 100 MHz”* – 2023
- [4] OFCOM - *“Enabling opportunities for innovation - Shared access to spectrum supporting mobile technology”* – 2019
- [5] Wireless Innovation Forum – Document WINNF-TR 1011 ver 1.0.0 – *“The determination of the Cumulative Distribution Function and the Probability Density Function of Building Entry Loss based on ITU-R P.2109”* – 2021
- [6] LSTelcom/OFCOM – Final Report – *“In-car Mobile Signal Attenuation Measurements”* – 2017
- [7] M. Lerch, P. Svoboda, S. Ojak, M. Rupp and C. Mecklenbraeuer, *“Distributed Measurements of the Penetration Loss of Railroad Cars,”* - IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), Toronto, ON, Canada, 2017, pp. 1-5, 2017, doi: 10.1109/VTCFall.2017.8287899.
- [8] ECC Report 358 – *“In-band and adjacent bands sharing studies to assess the feasibility of the shared use of the 3.8-4.2 GHz frequency band by terrestrial wireless broadband low/medium power (WBB LMP) systems providing local-area network connectivity”* – 2024
- [9] ECC Report XX – Draft – *“Feasibility of a potential shared use of the 6425-7125 MHz frequency band by MFCN and WAS/RLAN”* – 2025
- [10] Recommendation ITU-R P.2108 – *“Prediction of clutter loss”* – 2021
- [11] 3GPP Specification 38.901 V.18.0.0 – *“Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz”* – 2024
- [12] ENEA – *“Portale Nazionale sulla Prestazione Energetica degli Edifici (PnPE2)”* - <https://pnpe2.enea.it/statistiche>

[13] Report ITU-R M.2412-0 – *“Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020”* - 2017

[14] CEPT Report 17 - *“Report from CEPT to the European Commission in response to the Mandate to: identify the conditions relating to the harmonised introduction in the European Union of radio applications based on ultra-wideband (UWB) technology. Complementary report”* – 2017

[15] N. Jamaly, D. Scanferla, C. Genoud and H. Lehmann, "Analysis and measurement of penetration loss for train wagons with coated vs uncoated windows", 12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018), London, UK, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1049/cp.2018.0969

[16] M. Lerch, P. Svoboda, S. Ojak, M. Rupp and C. Mecklenbraeuer, "Distributed Measurements of the Penetration Loss of Railroad Cars" 2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), Toronto, ON, Canada, 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/VTCFall.2017.8287899

[17] S.Tripkovic, P.Svoboda, M.Rupp, *“Enhancing Mobile Communication on Railways: Impact of Train Window Size and Coating”*, ISWCS, 2024

[18] Zhang, Y. P., Jiang, Z. R., Ng, T. S., & Sheng, J. H., *“Measurements of the propagation of UHF radio waves on an underground railway train.”*, IEEE Transactions on Vehicular Technology. 49(4), 1342-1347.

Effetti dell'applicazione di un fattore di riduzione vettoriale α_{24} nella valutazione dell'impatto elettromagnetico di sistemi 5G Massive MIMO (AAS)

Effects of the application of a vectorial α_{24} reduction factor for electromagnetic impact assessment in 5G Massive MIMO (AAS) systems

Stefano D'Elia [♦], Andrea Garzia [□], Paolo Grazioso [□], Riccardo Suman [♦], Simona Valbonesi [□]

[♦] Vodafone Servizi e Tecnologie

[□] Fondazione Ugo Bordoni

Sommario

La corretta valutazione del fattore di riduzione α_{24} , definito per tenere in conto la media della potenza trasmessa sulle 24 ore, per un sistema 5G Massive MIMO (AAS) è fondamentale per comprendere come la potenza trasmessa possa essere gestita in modo efficiente per adattarsi alle mutevoli condizioni di traffico senza compromettere l'efficienza energetica e l'impatto elettromagnetico. La normativa italiana attuale riguardante l'impatto elettromagnetico prevede il ricorso all'utilizzo di un singolo fattore α_{24} "scalare" definito sulle 24 ore; tale fattore viene applicato ai fini della valutazione dei livelli di campo elettromagnetico/densità di potenza presenti in aria.

Il quadro normativo prevede per gli operatori l'obbligo di fornire il valore del fattore α_{24} ; in assenza di comunicazione specifica tale parametro viene assunto pari ad 1. Questo approccio potrebbe comportare errori di sovrastima nella valutazione a priori dei livelli di campo elettromagnetico presenti in aria. L'utilizzo di un valore unico del fattore α_{24} relativo alle 24 ore basato sul monitoraggio della potenza totale irradiata potrebbe a sua volta portare ad una sovrastima dei livelli di campo elettromagnetico/densità di potenza se applicato ai sistemi 5G Massive MIMO (AAS) caratterizzati da variazioni temporali, ma anche spaziali, della potenza irradiata. Questa attività di analisi portata avanti attraverso simulazione numerica su scenari reali parte da uno studio di caso peggiore in cui il valore di α_{24} viene posto uguale ad 1; successivamente allo stesso scenario viene applicato il fattore α_{24} scalare giornaliero calcolato

sulla base dei contatori di potenza reali. Il primo confronto viene effettuato tra scenario di caso peggiore ed applicazione del fattore α_{24} calcolato sulle 24 ore. Successivamente, sempre sulla base dei valori di potenza rilevati dai contatori vengono calcolati i fattori α_{24} “vettoriali” per singolo settore che permettono di tenere in considerazione le variazioni spaziali del segnale 5G. L'applicazione del fattore α_{24} vettoriale potrebbe portare a livelli di campo elettrico/densità di potenza inferiori e più realistici rispetto all'applicazione del fattore α_{24} scalare; scopo di questa analisi è quantificare la differenza tra la applicazione del fattore α_{24} vettoriale e scalare in alcune situazioni tipiche, e verificare se l' α_{24} vettoriale potrebbe rappresentare una soluzione per il calcolo corretto dell'impatto elettromagnetico dei sistemi 5G Massive MIMO.

Abstract

A correct evaluation of the reduction factor introduced to take into account the average transmitted power over 24 hours, usually abbreviated as α_{24} , for a 5G Massive MIMO (AAS) system is key to determine how the transmitted power can be efficiently managed to adapt to variable traffic conditions and requirements without undermining energy efficiency and increasing electromagnetic impact. Utilising a single and constant value of the α_{24} factor as computed over 24 hours, as requested by current regulatory frameworks of some countries (such as Italy) computed taking into account the total transmitted power, might lead to a (possibly remarkable) overestimation of exposure levels, in terms of electromagnetic field and/or power density, if applied to 5G Massive MIMO (AAS) systems which are characterized by substantial temporal and also spatial fluctuations of transmitted power. In this paper we present preliminary results obtained by ray-tracing simulation on real scenarios, based on the actual values of power counters provided by the operator. We show a comparison of exposure levels estimates obtained by assuming the constant scalar value of α_{24} with the values computed by taking into account the “sectorial” values of α_{24} evaluated for each beam of the

antenna. As expected, this comparison shows that using the sectorial α_{24} factors leads to lower evaluated exposure levels, which can be considered more realistic considering the characteristic of the 5G systems with Massive MIMO (AAS). These considerations might also pave the way for a revision of regulatory frameworks to take into account the different operation of Massive MIMO with respect to previous, traditional antenna systems.

Keyword

5G, esposizione, α_{24} , mMIMO, AAS, impatto elettromagnetico, simulazione numerica, aree di esclusione.

1 - Introduzione

L'introduzione della tecnologia 5G è stata accompagnata da approcci tecnici avanzati come le AAS ed il Massive MIMO (mMIMO) che permettono di migliorare le prestazioni della rete adattando loro pattern di radiazione sulla base della posizione degli utenti. Tali sistemi permettono di minimizzare l'impatto elettromagnetico distribuendo potenza solo laddove è necessario e garantiscono la massima efficienza sia nell'uso delle risorse radio sia dal punto di vista del risparmio energetico.

Tradizionalmente, il monitoraggio delle esposizioni si basava sulla potenza totale irradiata, ma con l'avvento del 5G è diventato estremamente importante considerare nella valutazione la variazione della distribuzione spaziale della potenza. Questa novità che rappresenta un vero e proprio nuovo paradigma ha richiesto un aggiornamento delle tecniche di stima dei livelli di campo elettromagnetico/densità di potenza generato da una BTS 5G. Le nuove metodologie di stima per le antenne mMIMO sono state definite dalla norma IEC 62232 [1] e la parte operativa è descritta nel Report Tecnico IEC TR 62669 [2]. In Italia la normativa sulla esposizione umana ai campi elettromagnetici a radiofrequenza prevede valori di attenzione ed obiettivi di qualità mediati sulle 24 ore e non su intervalli di 6 minuti [5]. Per tenere conto della variabilità temporale delle emissioni degli impianti nel corso delle 24 ore è stato

introdotto il fattore di riduzione α_{24} , inteso come rapporto tra il valore tra la potenza media del segnale nell'intervallo i-esimo (tipicamente un'ora) e la potenza massima erogabile ai morsetti di antenna. L'introduzione del fattore α_{24} permette di utilizzare nelle stime previsionali il valore più alto della potenza media trasmessa nel settore angolare, portando a valori della esposizione più vicini a quelli reali. La definizione di fattore di riduzione attualmente in uso risale a oltre 10 anni fa ed è basata su sistemi tradizionali 2G, 3G e 4G; il suo valore deve essere comunicato dai gestori come unico coefficiente per ogni cella. Applicando il fattore α_{24} come definito (d'ora in poi chiamato α_{24} scalare) non viene considerata la variazione spaziale del campo, elemento che può introdurre sovrastime nei sistemi mMIMO. Una possibilità offerta dagli attuali contatori spaziali è quella di consentire in fase di verifica previsionale l'utilizzo di un fattore di riduzione α_{24} per ciascun settore angolare (α_{24} vettoriale) che permetterebbe di avere una valutazione della esposizione ancora più aderente alla realtà per i sistemi 5G mMIMO.

In questo lavoro viene analizzato uno scenario reale del quale sono noti i valori dei contatori di potenza spaziale di rete, per verificare se l'approccio basato sull' α_{24} vettoriale rappresenta una soluzione avanzata di calcolo previsionale. Lo studio consiste in un'analisi effettuata sullo stesso scenario 5G mMIMO considerando le condizioni di caso peggiore, l'applicazione dell' α_{24} scalare e vettoriale; verranno identificate ed analizzate le differenze in termini di fattori chiave specifici come i percentili della distribuzione cumulativa della densità di potenza e le aree di esclusione.

2 – Fattore α_{24} e sistemi 5G benefit e criticità specifiche

2.1 – Il Fattore α_{24}

La Legge 36 del 2001 [3] e il relativo Decreto applicativo del 2003 [4] avevano fissato un limite massimo di esposizione di 20 V/m, valido in tutte le circostanze, e valori di cautela ancora più stringenti (6 V/m recentemente aumentato a 15 V/m) nei luoghi con permanenza prolungata, per proteggere da eventuali effetti a lungo termine.

La Legge 221 del 2012 [5] ha introdotto una modifica alla normativa, definendo i valori di attenzione e gli obiettivi di qualità come medie sulle 24 ore, anziché su 6 minuti. A questo scopo, ha previsto che i calcoli previsionali per l'autorizzazione degli impianti considerino fattori di riduzione della potenza massima, denominati α_{24} , per tenere conto della variabilità delle emissioni nel corso della giornata. Infatti, il fattore di riduzione della potenza massima nelle 24 ore, previsto dalla Legge n. 221 [5] è definito [6] come il rapporto, tra la potenza media trasmessa dell'impianto nelle 24 ore, e la sua potenza massima:

$$\alpha_{24} = \frac{P_{24h}}{P_{max}} \quad (1)$$

2.2 – La tecnologia 5G

L'interfaccia radio della tecnologia 5G, nota come New Radio (NR), rappresenta un significativo avanzamento tecnologico rispetto alle generazioni precedenti e offre un'elevata flessibilità in diversi ambiti. Nel dominio del tempo si distingue con la variabilità dello schema TDD (Time Division Duplex); nel dominio della frequenza, grazie alla possibilità di operare senza vincoli di larghezza di banda specifica; e nel dominio dello spazio per la possibilità di indirizzare il fascio verso l'utente. Quest'ultimo aspetto è particolarmente rilevante sia per il calcolo che per la misura dei livelli di campo elettromagnetico.

Per la prima volta, infatti, nel calcolo del campo elettromagnetico è necessario considerare una tecnologia come il mMIMO, che consente di indirizzare il fascio verso l'utente

(beamforming). Questa tecnica ottimizza l'utilizzo delle risorse temporali e spaziali del canale di comunicazione, rappresentando un'innovazione cruciale nell'efficienza delle comunicazioni 5G. A differenza delle tecnologie legacy (2G, 3G) e del 4G, che si basavano su antenne passive "tradizionali", il 5G utilizza prevalentemente antenne mMIMO che sono in grado di indirizzare il fascio del segnale verso l'utente, evitando così la trasmissione del segnale nelle aree dove non è necessario.

In termini semplici, la differenza principale tra le antenne tradizionali e le antenne mMIMO risiede nel comportamento del diagramma di radiazione, come descritto graficamente in Figura 1. Le antenne tradizionali hanno un diagramma di radiazione statico, che rimane invariato nel tempo. Questo significa che illuminano il territorio circostante sempre nello stesso modo: una volta definito il punto nello spazio di interesse in base alla posizione dell'antenna (in termini di elevazione e azimuth), è possibile calcolare, conoscendo la potenza trasmessa, la frazione di energia irradiata che raggiunge un determinato punto. In altre parole, la direzione in cui l'energia viene trasmessa è fissa e non varia nel tempo.

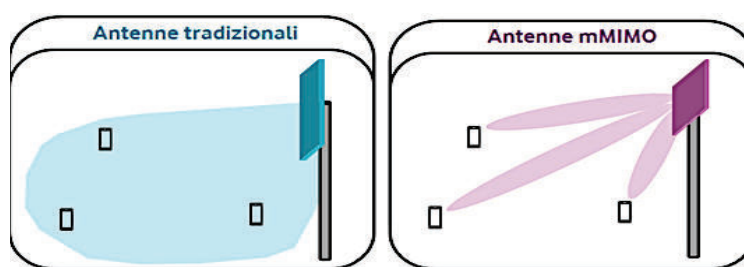


Figura 1 - Antenne tradizionali e antenne mMIMO

Al contrario, le antenne mMIMO sono in grado di adattare dinamicamente il loro diagramma di irradiazione in base alle esigenze operative. Queste antenne sono composte da un gran numero di micro-antenne elementari e/o array, da cui il termine "Massive". Questi elementi lavorano in modo coordinato e coerente per generare, tramite avanzate tecniche di

elaborazione del segnale, lobi di radiazione estremamente direttivi. Più sono gli elementi utilizzati, maggiore sarà la precisione nella focalizzazione spaziale.

Rispetto alle antenne tradizionali, i lobi di radiazione delle antenne Massive MIMO risultano significativamente più direttivi e possono essere orientati sia verso la posizione del terminale mobile sia lungo un cammino indiretto attraverso cui avviene la comunicazione.

A differenza delle antenne passive, che emettono un fascio di irradiazione costante nel tempo, le antenne mMIMO sono in grado di generare fasci che variano dinamicamente. Tuttavia, è importante ricordare che i limiti di esposizione al campo elettromagnetico sono sempre definiti come valori medi calcolati su un determinato intervallo temporale. Di conseguenza, l'uso della potenza media totale trasmessa da un'antenna mMIMO non offre una stima realistica, in quanto non tiene conto della diversità spaziale: durante l'intervallo temporale considerato, infatti, le direzioni di trasmissione del segnale nello spazio, così come la durata e l'intensità del segnale trasmesso, cambiano continuamente.

Per affrontare questa complessità, sono stati sviluppati nuovi strumenti di misura, introdotti nella norma IEC 62232 [1] e nella Guida CEI 211.10 del 2024 [7], denominati "*contatori per settori angolari*". Questi contatori misurano la potenza trasmessa nello spazio suddividendola in settori angolari. La Guida CEI 211.10 [7], inoltre, stabilisce come calcolare il coefficiente di riduzione α_{24} per ciascun settore angolare.

Nel quadro normativo italiano attuale, gli operatori sono tenuti a comunicare i dati di potenza per le celle in cui è stato applicato il coefficiente α_{24} . Tuttavia, poiché tale normativa, così come i sistemi di misura, è stata concepita circa dieci anni fa per tecnologie tradizionali come 2G, 3G e 4G, si basa sul principio di un unico valore di potenza da dichiarare per ogni cella, e quindi di un unico coefficiente α_{24} , senza considerare i contatori angolari, all'epoca non disponibili. In questo contesto, l'uso dei contatori spaziali consente già oggi di ridurre le sovrastime nel calcolo del coefficiente α_{24} giornaliero, utilizzando la potenza trasmessa nel settore angolare più sfavorevole anziché la potenza totale trasmessa dall'antenna. Questa

scelta, rappresentativa del caso peggiore, garantisce la conformità normativa e consente una stima del campo elettromagnetico più realistica, in linea con il principio di efficiente utilizzo dello spazio elettromagnetico introdotto dalle recenti modifiche al Codice delle Comunicazioni Elettroniche.

3 – Caratterizzazione delle esposizioni su scenario reale

La caratterizzazione delle esposizioni su scenari reali è fondamentale ai fini della garanzia del rispetto dei limiti di esposizione. L'approccio da utilizzare è multidisciplinare a coinvolgere modellizzazioni teoriche, simulazioni, analisi dei dati, supportate da misure sul campo. Questa analisi si basa su simulazioni teoriche e dati provenienti da contatori di potenza reali. Lo scenario oggetto di indagine è aderente alla realtà, sia dal punto di vista geografico ed urbanistico, sia per quanto riguarda le specifiche dell'antenna, sia per il traffico che viene preso in considerazione attraverso il ricorso ai dati registrati dai contatori in un set selezionato di giornate.

3.1 – Descrizione dello scenario

Lo scenario oggetto di indagine consiste in un'area della periferia urbana di una grande città ad elevata densità antropica delle dimensioni di 650x400 m; all'interno della mappa si trovano quattro isolati, simulati come blocchi di edifici aventi le seguenti caratteristiche:

- Blocchi 1, 3 e 4 – altezza edifici 15 m – costruzione con pareti perimetrali di elevato spessore (40 cm)
- Blocco 2 – altezza 32 m – costruzione con pareti perimetrali di elevato spessore (40 cm) – area di aggregazione

La BTS (Base Transceiver Station) è installata su un edificio ad una altezza da terra di 65,4 m e consta di tre settori situati a 80°, 230°, 340° a garantire la copertura di tutta l'area circostante. Periodicamente presso il blocco 2 si tengono eventi sportivi o musicali che provocano drastici aumenti del numero di utenti collegati alla BTS.

3.2 – Specifiche dell'antenna

Le antenne utilizzate nei tre settori sono antenne mMIMO (64T64R) continuous beamforming che operano alla frequenza di 3.7 GHz: il fascio viene costruito in maniera adattativa, sintetizzando in tempo reale il fascio che offre la migliore copertura allo UE. I singoli fasci ottenibili sono in teoria infiniti in quanto realizzati variando in maniera continua gli array dei pesi applicati a ciascun singolo elemento radiante della AAS.

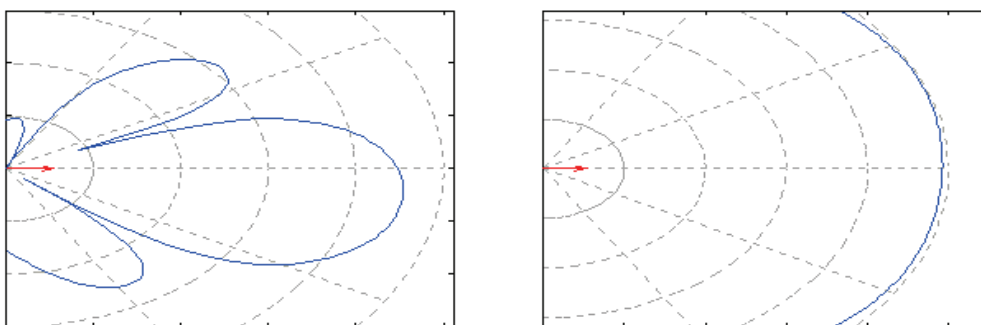


Figura 2 - Diagramma di antenna (Dx verticale – Sx orizzontale)

Il diagramma di involuppo viene costruito prendendo, per ciascuna direzione in azimuth e zenit (φ e θ), il diagramma di irradiazione massimo, normalizzato al picco, fra tutti i diagrammi dei fasci che la AAS può sintetizzare (traffico e controllo) ed è rappresentato in Figura 2.

3.3 - Parametri e tool di simulazione

Il tool utilizzato per le simulazioni numeriche (ARMONICA - Acronimo di ARPA Monitoraggio dei Campi Elettromagnetici nell'Ambiente) è stato sviluppato dalla Fondazione Bordoni e dall'Università di Bologna in collaborazione con l'ARPA Emilia-Romagna con lo scopo di fornire uno strumento rigoroso e di facile uso per la valutazione e la visualizzazione dei livelli di campo elettromagnetico in prossimità di impianti fissi radio (telefonia cellulare, TV, radio, ponti radio). Il calcolo del campo elettromagnetico può essere effettuato con una semplice formula di spazio libero o con un algoritmo di ray-tracing 3D utilizzando le regole dell'ottica geometrica (GO) [8] e la teoria della diffrazione (UTD) [9] e dello scattering per determinare la previsione

Effetti dell'applicazione di un fattore di riduzione vettoriale α_{24} nella valutazione dell'impatto elettromagnetico di sistemi 5G Massive MIMO (AAS)

Effects of the application of a vectorial α_{24} reduction factor for electromagnetic impact assessment in 5G Massive MIMO (AAS) systems

S.D'Elia, P.Grazioso, A.Garzia, R.Suman, S.Valbonesi

del campo ricevuto in punti specifici, tenendo conto dell'interazione con gli ostacoli che caratterizzano lo scenario ovvero tutto ciò che si trova lungo il percorso tra trasmettitore e ricevitore. I moduli di ray-tracing consentono valutazioni precise sia in condizioni di campo vicino (fino ad 1 m dalla sorgente) che di campo lontano. Il tool è stato validato per diversi sistemi (2G, 3G e link fissi) attraverso confronti con altri tool e con campagne di misurazione [10] e più di recente anche per sistemi 5G fino alla frequenza di 26 GHz [11]. ARMONICA è in grado di eseguire analisi su scenari outdoor ed indoor e valutare i contributi indoor-to-outdoor e outdoor-to-indoor. Gli edifici sono rappresentati come parallelepipedi; è possibile simulare diversi materiali da costruzione (anche nello stesso scenario).

Le simulazioni sono state eseguite ad altezze variabili da terra a partire da 65.4 m (altezza del centro elettrico) fino ad arrivare a 1,5 m che corrisponde, secondo le attuali indicazioni normative [5] all'altezza alla quale viene a trovarsi uno UE utilizzato da una persona che si trova a livello del piano di calpestio.

I parametri implementati per l'analisi numerica sono i seguenti:

Tabella 1. Parametri di simulazione

Parametro	Settore 1	Settore 2	Settore 3
Frequenza	3,7 GHz	3,7 GHz	3,7 GHz
Sistema	Macrocella	Macrocella	Macrocella
Antenna	5G AAS – inviluppo	5G AAS – inviluppo	5G AAS – inviluppo
Altezza BTS	65,4 m	65,4 m	65,4 m
Puntamento	80°	230°	340°
Potenza max	200 W	200 W	200 W
FTDC ¹	0,743	0,743	0,743
Tilt meccanico	8°	8°	8°
Tilt elettrico	6° fisso	6° fisso	6° fisso
Piano di simulazione	Orizzontale	Orizzontale	Orizzontale
Altezza simulazione	variabile	variabile	variabile
Passo della griglia	1 m	1 m	1 m
Dimensione mappa	650x400 m	650x400 m	650x400 m

¹Con il termine FTDC si intende rapporto fra la durata ed il periodo di ripetizione di un evento; un fattore di utilizzazione pari all'unità corrisponde al funzionamento continuo.

3.4 - Fattori chiave per la caratterizzazione delle esposizioni

La tecnologia 5G prevede l'utilizzo di antenne attive, il che implica che vengono utilizzati più fasci sia sul piano verticale che su quello orizzontale; tali fasci trasmettono solo quando ci sono utenti che accedono a servizi entro le larghezze angolari del fascio dei lobi. La potenza di trasmissione dipende dal tipo di servizio utilizzato e la durata è costituita dal tempo durante il quale l'utente rimane attivo. Questa caratteristica del 5G cambia completamente il paradigma delle esposizioni utilizzato fino ad ora, che si basava su antenne che coprivano una specifica regione angolare e con il valore della potenza come unico parametro non deterministico da prendere in considerazione.

Per quanto riguarda le esposizioni i KPI (Key Performance Indicator) da prendere in considerazione sono quelli indicati da ICNIRP [12] sulla base di periodiche analisi critiche della letteratura scientifica specifica. Per le bande a radiofrequenza e ad onde millimetriche sono stati identificati i seguenti KPI:

- SAR - tasso di assorbimento specifico (SAR) [W/kg] – misurabile solo in condizioni di laboratorio, richiede conoscenza delle caratteristiche dei tessuti biologici
- Intensità del campo elettrico E [V/m]
- Intensità del campo magnetico H [A/m]
- Densità di potenza [W/m²]

La valutazione in termini di campo elettrico o densità di potenza può essere effettuata tramite misure sul campo oppure seguendo la via computazionale. Fino alla tecnologia 4G l'approccio era unicamente deterministico; nel caso dei sistemi 5G l'IEC ha introdotto un approccio di tipo statistico [1,2], consistente in una analisi delle distribuzioni cumulative del campo elettrico/densità di potenza simulati considerando il 50-esimo percentile che fornisce informazioni sui valori medi, ed i percentili tra il 90-esimo ed il massimo che permettono di identificare i valori più elevati di campo/densità di potenza riscontrabili nello scenario specifico. Un altro KPI che può essere utilizzato per la caratterizzazione delle esposizioni è la

forma e dimensione delle aree di esclusione intese come le zone in cui il campo o la densità di potenza assumono valori superiori ai limiti vigenti. La forma e dimensione delle aree di esclusione permette di caratterizzare l'esposizione in modo più efficace rispetto alle semplici mappe dei livelli di campo/densità di potenza.

Nella sezione a seguire vengono riportate, le applicazioni dei percentili della CDF (Cumulative Distribution Function) e della caratterizzazione delle aree di esclusione come KPI da utilizzare ai fini del confronto tra scenari.

4 – Impatto del fattore α_{24} sui livelli di densità di potenza

Il fattore α_{24} consente di utilizzare nella valutazione del campo elettromagnetico, la densità di potenza come media sulle 24 ore, anziché su intervalli brevi, rendendo la valutazione più realistica rispetto alle emissioni delle stazioni radio base.

4.1 – Utilizzo dei contatori di rete per il calcolo del fattore α_{24}

Per monitorare le prestazioni delle funzioni della rete radio mobile, ad esempio per risolvere problemi e ottimizzarne il funzionamento, vengono generati indicatori chiave di prestazione (KPI) legati a parametri come accessibilità, mantenimento della connessione e mobilità. Questi KPI, prodotti dagli elementi di rete come l'eNB, sono comunemente noti come contatori. Nelle tecnologie 2G, 3G e 4G alcuni contatori sono stati progettati per misurare la potenza trasmessa dall'apparato, registrando la potenza media in intervalli di tempo che solitamente variano tra 15, 30 minuti o 1 ora. Per rispondere alla necessità di misurare la potenza trasmessa su periodi più brevi, come ad esempio 6 o 30 minuti in conformità con i limiti di esposizione, e per considerare il valore peggiore tra tutte le misurazioni effettuate durante l'intervallo di osservazione, è stato necessario definire dei contatori specifici che riportano il massimo tra tutte le medie temporali in una finestra mobile (sliding window). L'avvento della tecnologia 5G e l'uso delle antenne mMIMO, che a differenza delle antenne passive

Effetti dell'applicazione di un fattore di riduzione vettoriale α_{24} nella valutazione dell'impatto elettromagnetico di sistemi 5G Massive MIMO (AAS)

Effects of the application of a vectorial α_{24} reduction factor for electromagnetic impact assessment in 5G Massive MIMO (AAS) systems

S.D'Elia, P.Grazioso, A.Garzia, R.Suman, S.Valbonesi

presentano la capacità di generare fasci che variano dinamicamente nello spazio, hanno portato allo sviluppo di contatori in grado di monitorare la potenza trasmessa nelle diverse direzioni angolari. Per gli esempi riportati di seguito, è stata considerata un'antenna mMIMO che monitora la potenza trasmessa nello spazio tramite 28 settori angolari, secondo lo standard introdotto dalla [13] (Figura 3). Si segnala inoltre che, per ciascuna antenna sono stati attivati i contatori orari in grado di misurare, per ciascuno dei 28 settori angolari, il campione peggiore della potenza media trasmessa su intervalli di 6 minuti.



Figura 3 – Rappresentazione grafica dei 28 settori angolari dell'antenna mMIMO

4.2 - Case study 1 – Scenario di caso peggiore

Il primo case study consiste in una analisi di caso peggiore per la quale si assume che il valore di α_{24} scalare sia posto uguale a 1 e che le tre antenne operino tutte alla massima potenza consentita. Le simulazioni sono state effettuate partendo da un piano posto a 65 m di altezza (in corrispondenza del centro elettrico della antenna) e via via scendendo, fino ad arrivare all'altezza in cui la densità di potenza risulta essere pari ai 0,59 W/m² attualmente vigenti in Italia come valore di attenzione [4, 14, 15]. In Tabella 2 sono riportati i valori massimi di campo elettrico e di densità di potenza e le dimensioni delle aree di esclusione, dove per aree di esclusione in questo caso si intende la zona all'interno della quale il campo elettrico supera i 15 V/m (0,59 W/m²).

Effetti dell'applicazione di un fattore di riduzione vettoriale α_{24} nella valutazione dell'impatto elettromagnetico di sistemi 5G Massive MIMO (AAS)

Effects of the application of a vectorial α_{24} reduction factor for electromagnetic impact assessment in 5G Massive MIMO (AAS) systems

S.D'Elia, P.Grazioso, A.Garzia, R.Suman, S.Valbonesi

Tabella 2. Caratterizzazione aree di esclusione

Altezza da terra (m)	Ea RT (m ²)	Max E RT (V/m)	Max PwD (W/ m ²)
65	224	106,1	29,9
64	328	106,5	30,1
63	432	106,7	30,2
62	488	95,8	24,3
61	592	67,3	12
60	640	55,4	8,14
55	800	29,3	2,28
50	592	19,6	1,02
45	-	14,7	0,57
1,5	-	8,38	0,19

La Figura 4 riporta a titolo esplicativo le aree di esclusione rilevabili a 60 e 55 m da terra.



Figura 4 - Aree di esclusione a 60 m (sx) e a 55 m (dx) da terra

Come si può vedere le aree di esclusione, rappresentate in rosso, sono limitate rispetto alle dimensioni della mappa. Dalla analisi dei dati riportati in Tabella 3 si evince facilmente che le aree di esclusione sono presenti per altezze da terra comprese tra 65 e 45 m. Poiché nello scenario analizzato non vi sono edifici superiori a 32 m, le pertinenze indoor non sono interessate dalle esposizioni della BTS e non saranno ulteriormente considerate.

Effetti dell'applicazione di un fattore di riduzione vettoriale α_{24} nella valutazione dell'impatto elettromagnetico di sistemi 5G Massive MIMO (AAS)

Effects of the application of a vectorial α_{24} reduction factor for electromagnetic impact assessment in 5G Massive MIMO (AAS) systems

S.D'Elia, P.Grazioso, A.Garzia, R.Suman, S.Valbonesi

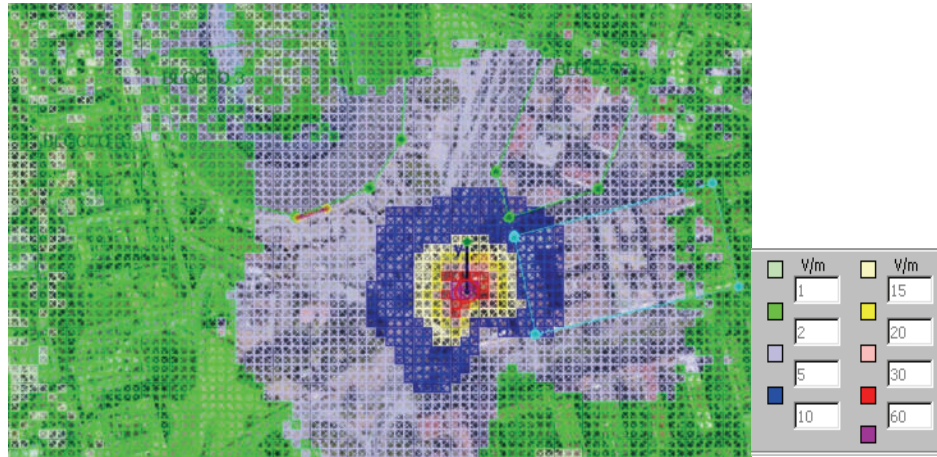


Figura 5 - Campo E a 63 m da terra

In Figura 5 e Figura 6 è riportata una visualizzazione su mappa dei livelli di campo elettrico simulati ad una altezza di 63 m e di 1,5 m; tale altezza è stata presa in considerazione in quanto lo studio riguarda principalmente gli utenti che si trovano sulla strada, quindi con UE posizionati a circa 1,5 m da terra come da indicazioni normative [5].

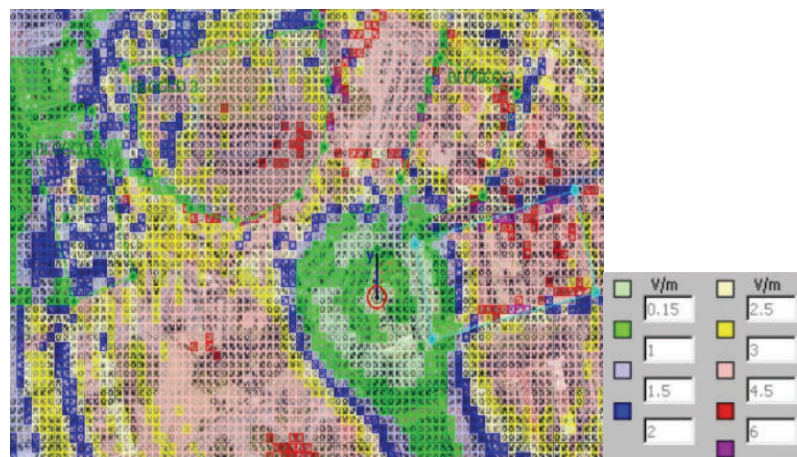


Figura 6 - Campo E a 1,5 m da terra (corrispondente all'altezza dello UE)

Effetti dell'applicazione di un fattore di riduzione vettoriale α_{24} nella valutazione dell'impatto elettromagnetico di sistemi 5G Massive MIMO (AAS)

Effects of the application of a vectorial α_{24} reduction factor for electromagnetic impact assessment in 5G Massive MIMO (AAS) systems

S.D'Elia, P.Grazioso, A.Garzia, R.Suman, S.Valbonesi

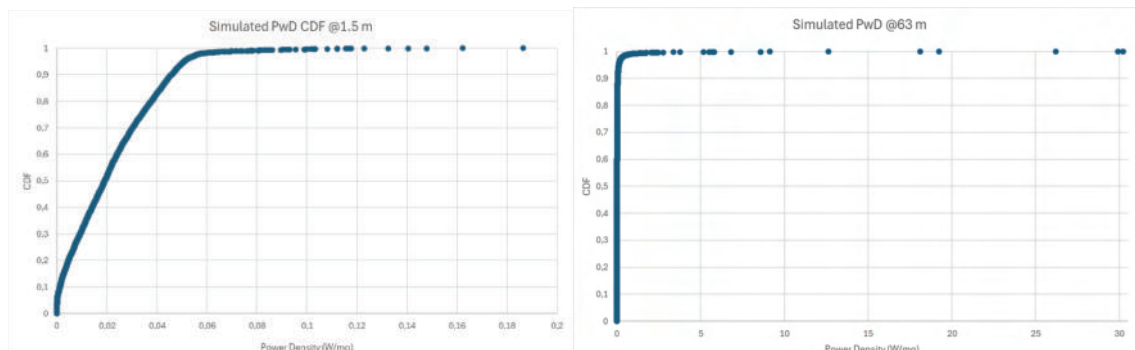


Figura 7 - CDF della densità di potenza a 1,5 m da terra (sx) e a 63 m da terra (dx)

Tabella 3. Percentili rilevanti della CDF per varie altezze

percentile	PwD (W/m²) @1,5 m	PwD (W/m²) @63 m
50-p	0,019	0,0097
90-p	0,046	0,053
99-p	0,076	0,78
Max	0,19	30,2

In Figura 7 vengono presentate e messe a confronto le distribuzioni cumulative della densità di potenza calcolate ad una altezza di 1,5 m da terra (sinistra) e a 63 m da terra (destra); i percentili rilevanti riportati in Tabella 4 mostrano a terra una situazione di non superamento del valore di attenzione di 0,59 W/m², mentre a 63 m si assiste a superamenti unicamente per i percentili più alti.

Le simulazioni sono state effettuate in uno scenario di caso peggiore quindi sotto l'assunzione che tutte e tre le antenne operino alla massima potenza possibile e che il fattore α_{24} scalare sia pari a 1. Le analisi hanno mostrato aree di esclusione riscontrabili fino a 45 m da terra. Le pertinenze indoor non sono interessate dalle esposizioni causate dai tre settori che costituiscono la BTS in quanto la stazione è dispiegata ad una altezza che supera di gran lunga l'altezza degli edifici. I dati ottenuti applicando un valore di statico pari ad 1 verranno messi a confronto, nelle sezioni a seguire, con le risultanze delle stesse analisi effettuate applicando prima l' α_{24} scalare (ricavato dai contatori vettoriali) e successivamente la matrice vettoriale calcolata sulla base dei contatori di potenza reali relativi ad una specifica giornata.

4.2 – Case study 2 – Applicazione di un fattore α_{24} scalare ricavato dai contatori vettoriali

4.2.1 – Scelta dell' α_{24} scalare

Il fattore di riduzione α_{24} scalare viene calcolato attraverso la formula (2) sotto riportata:

$$\alpha_{24}^{day} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{P_i}{P_{max}} \quad (2)$$

Dove P_{max} è il valore della potenza massima erogabile ai morsetti di antenna, P_i è la potenza media associata al segnale nell'intervallo temporale i -esimo ed m è pari al numero di intervalli temporali di durata pari a 60 m compresi in un giorno, cioè 24. Tale fattore viene utilizzato attualmente nelle valutazioni previsionali per determinare il livello medio di campo elettrico (o di densità di potenza) nelle 24 ore associato al singolo segnale radio.

I contatori di potenza registrano i peggiori 6 minuti di trasmissione per ciascuna ora, fornendo 24 valori orari al giorno per ogni settore angolare. I dati analizzati riguardano tre giornate di agosto (10, 25 e 31), in cui la zona era molto frequentata per eventi sportivi nello stadio vicino. Per ciascun settore angolare della antenna sono stati resi noti i 24 valori orari della potenza; il fattore di riduzione α_{24} è stato calcolato per ciascun settore angolare (per un totale di 28 valori distinti). Ai fini della caratterizzazione dell' α_{24} vettoriale verranno utilizzate le matrici relative ai tre settori, mentre per la definizione dell' α_{24} scalare gli approcci che possono essere seguiti sono due; il primo quello attualmente utilizzato e basato principalmente sulle caratteristiche delle tecnologie *legacy* consiste nell'applicare alla potenza totale erogata da tutti i settori la formula (2) che non tiene conto della variabilità spaziale, il secondo approccio, meno conservativo, applicabile ai sistemi mMIMO, consiste nell'utilizzare come valore di α_{24} scalare il valore peggiore sui 28 settori angolari. I valori di α_{24} scalare ottenuti per lo stesso scenario tramite i due approcci sono riportati in Tabella 4.

Tabella 4. Valori α_{24} scalare per settore della BTS e per giornata – 2 approcci

Approccio classico				
Antenna	Ubicazione	Alfa 10/08	Alfa 25/08	Alfa 31/08
Settore 1	Esterno	0,0798	0,0798	0,1074
Settore 2	Esterno	0,0742	0,0742	0,0861
Settore 3	Esterno	0,0977	0,0977	0,1039
Approccio basato su settori angolari				
Antenna	Ubicazione	Alfa 10/08	Alfa 25/08	Alfa 31/08
Settore 1	Esterno	0,00689	0,006597	0,008559
Settore 2	Esterno	0,004016	0,005467	0,005993
Settore 3	Esterno	0,004145	0,007775	0,0085

Come si può vedere dai numeri riportati in Tabella 4 i valori di α_{24} scalare variano tra un settore e l'altro dell'impianto ed in modo anche marcato tra una giornata e l'altra in funzione del numero di UE attivi e della loro ubicazione. Appare subito evidente che l'approccio fin qui utilizzato, dando luogo a valori di α_{24} più elevati porta ad una stima dell'esposizione più conservativa, rispetto all'approccio basato sui settori angolari. Ai fini dello studio è stato deciso di analizzare lo scenario di caso peggiore, corrispondente al giorno 31/08, data nella quale per tutti e tre i settori si sono ottenuti i valori più elevati di α_{24} scalare. Le simulazioni sono state pertanto effettuate applicando al valore massimo della potenza erogabile dalle antenne dei tre settori della BTS gli α_{24} calcolati per la giornata del 31/08 evidenziati in grigio in Tabella 4. Le sezioni successive presentano i risultati delle simulazioni, confrontandoli con quelli ottenuti assumendo un α_{24} pari a 1.

4.2.2 – Confronto tra i due approcci

Le simulazioni sono state effettuate a tre altezze da terra selezionate sulla base della rappresentatività ai fini dello studio, in dettaglio:

- 63 m – corrispondente all'altezza alla quale si verificano i valori massimi della densità di potenza
- 55 m – corrispondente all'altezza per la quale si registra la dimensione massima dell'area di esclusione

Effetti dell'applicazione di un fattore di riduzione vettoriale α_{24} nella valutazione dell'impatto elettromagnetico di sistemi 5G Massive MIMO (AAS)

Effects of the application of a vectorial α_{24} reduction factor for electromagnetic impact assessment in 5G Massive MIMO (AAS) systems

S.D'Elia, P.Grazioso, A.Garzia, R.Suman, S.Valbonesi

- 1,5 m – corrispondente alla posizione dello UE di un utente che cammina per strada

Il confronto si basa sui KPI descritti nella sezione 3.4. La Figura 8 mostra su mappa la distribuzione del campo elettrico simulato ad una altezza da terra di 1,5 m considerando α_{24} pari a 1, ed applicando i due approcci sopracitati. Già a livello visivo dalle mappe emerge che l'applicazione del fattore α_{24} scalare riduce drasticamente il valore del campo elettrico/densità di potenza. Per le aree di esclusione, si osserva una sola area di 208 m² a un'altezza di 63 m, con una densità di potenza massima di 6,7 W/m² quando si va ad effettuare la simulazione secondo l'approccio classico.

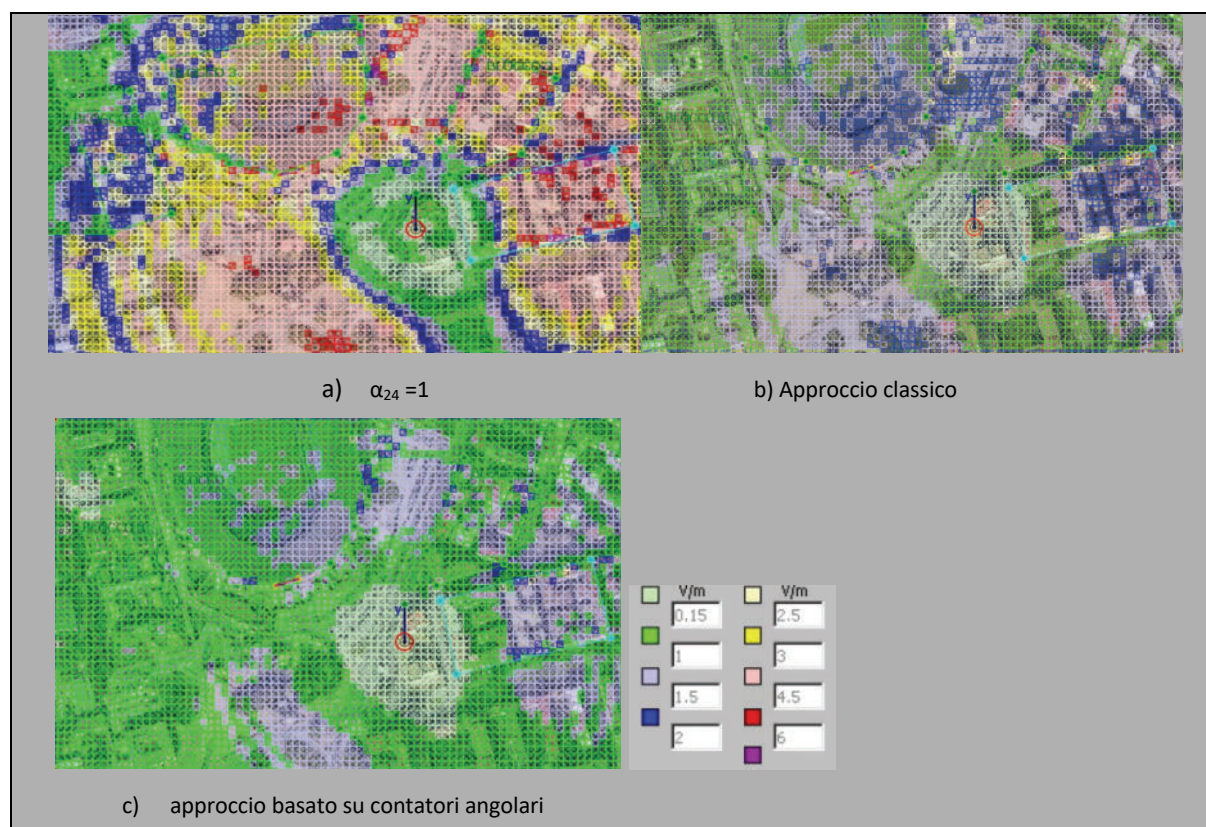


Figura 8 - Confronto tra tre approcci di analisi previsionale

Effetti dell'applicazione di un fattore di riduzione vettoriale α_{24} nella valutazione dell'impatto elettromagnetico di sistemi 5G Massive MIMO (AAS)

Effects of the application of a vectorial α_{24} reduction factor for electromagnetic impact assessment in 5G Massive MIMO (AAS) systems

S.D'Elia, P.Grazioso, A.Garzia, R.Suman, S.Valbonesi

La Figura 9 mostra a sinistra la CDF della densità di potenza a 1,5 m da terra ottenuta a partire dai dati effettuati applicando l' α_{24} scalare con approccio classico e a destra il confronto con la CDF relativa allo scenario peggiore ($\alpha_{24} = 1$). Il confronto conferma che i livelli di densità di potenza ottenuti applicando l' α_{24} scalare sono significativamente inferiori rispetto alla non applicazione del sopracitato fattore di riduzione. In Tabella 5 vengono messi a confronto i percentili più significativi (con e senza fattore di riduzione) per due diversi valori della altezza da terra.

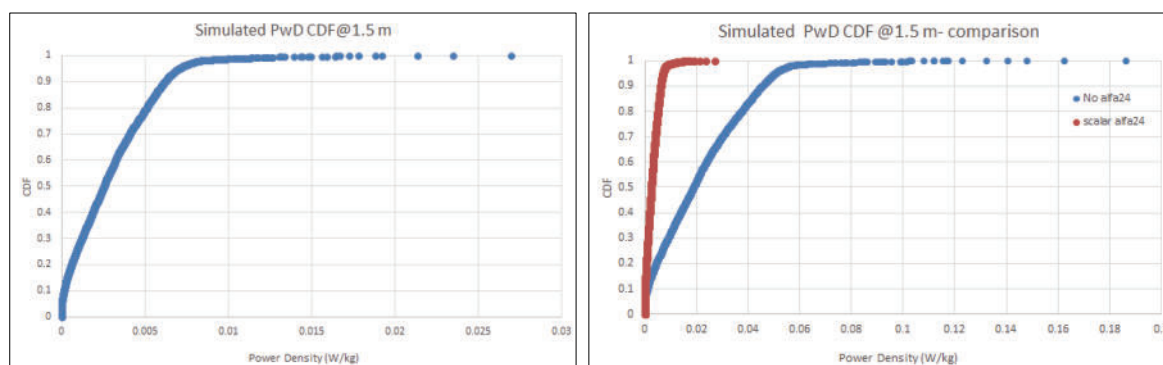


Figura 9 - CDF della densità di potenza a 1,5 m da terra con fattore α_{24} (sx) e confronto (dx)

Tabella 5. Percentili a confronto

Approccio classico				
percentile	PwD (W/m²) @1,5 m (no α)	PwD (W/m²) @1,5 m (α scalare)	PwD (W/m²) @63 m (no α)	PwD (W/m²) @63 m (α scalare)
50-p	0,019	0,0025	0,0097	0,0014
90-p	0,046	0,0062	0,053	0,0071
99-p	0,076	0,0109	0,78	0,109
Max	0,19	0,0269	30,2	6,756
Approccio basato su contatori angolari				
percentile	PwD (W/m²) @1,5 m (no α)	PwD (W/m²) @1,5 m (α scalare)	PwD (W/m²) @63 m (no α)	PwD (W/m²) @63 m (α scalare)
50-p	0,019	0,000195	0,0097	0,000107
90-p	0,046	0,000491	0,053	0,000544
99-p	0,076	0,000894	0,78	0,00873
Max	0,19	0,002147	30,2	0,552709

Il confronto diretto mostra che i livelli di densità di potenza calcolati, applicando il fattore di riduzione scalare, ad una altezza di 1,5 m dal piano di calpestio, sono molto inferiori rispetto ai medesimi calcolati senza ricorrere al fattore di riduzione scalare. Se si applica il fattore di riduzione ottenuto dall'approccio basato sui contatori angolari si osservano riduzioni ancora più consistenti.

4.2.3 – Criticità dell'approccio con α_{24} scalare e considerazioni di carattere generale

Le analisi fin qui riportate hanno evidenziato come l'applicazione dell' α_{24} scalare ricavato dai contatori vettoriali determini, in fase di calcolo previsionale, un sensibile abbassamento della densità di potenza valutata sullo scenario. Questo comporta che, laddove sussistevano superamenti, i livelli della densità di potenza rientrano a conformità. L'applicazione dell' α_{24} scalare, derivato dai contatori vettoriali, offre una rappresentazione più realistica rispetto al caso peggiore, anche per il 5G. Nel processo autorizzativo, l'uso di un valore scalare garantisce

la conformità normativa e una stima più accurata del campo elettromagnetico. Tuttavia, l'applicazione di un α_{24} scalare basato su un unico coefficiente per cella non riflette le caratteristiche del sistema 5G AAS, poiché la potenza trasmessa varia nello spazio, portando potenzialmente a una sovra stima della densità di potenza calcolata. Una soluzione più realistica sarebbe utilizzare un α_{24} vettoriale ricavato dai contatori vettoriali, una matrice di valori specifici per ciascun settore angolare. I risultati preliminari di uno studio sull' α_{24} vettoriale saranno presentati nella sezione seguente. Se emergessero differenze significative rispetto all' α_{24} scalare, si potrebbe considerare un aggiornamento della normativa tecnica che regola la media sulle 24 ore per adottare coefficienti angolari più precisi in fase autorizzativa.

4.3 – Case Study 3 – Applicazione del fattore α_{24} vettoriale

I contatori angolari, come già anticipato, permettono di ottenere un valore di potenza per ciascuna ora del giorno e per ciascun settore, fornendo una matrice rappresentativa delle potenze. L'approccio sul quale si basa questo studio, al momento ancora in fase preliminare, è seguente:

- Per ciascun settore viene calcolato il valore dell' α_{24} attraverso la formula
- Tale applicazione permette di ottenere 28 valori di α_{24} ciascuno dei quali è riferibile ad un settore (dal settore 0 al settore 27)
- Questi 28 valori di α_{24} verranno applicati in futuro per sagomare un diagramma di traffico reale che verrà utilizzato per simulazioni numeriche specifiche
- I risultati ottenuti tramite queste simulazioni verranno messi a confronto con i risultati relativi allo scenario di caso peggiore ed all'applicazione dell' α_{24} scalare.

La creazione della maschera per il diagramma di traffico è in fase "work in progress", pertanto non verranno presentati i risultati delle simulazioni con α_{24} vettoriale. In Tabella 6 vengono riportati il valore massimo, minimo e medio degli α_{24} vettoriali calcolati sui tre settori per la giornata del 31/08.

Tabella 6. α_{24} vettoriali e scalari a confronto

Antenna	α_{24} scalare	α_{24} vett. min	α_{24} vett. max	media α_{24}
Settore 1	0,1074	0,0014	0,008559	0,0038
Settore 2	0,0861	0,0011	0,005993	0,0031
Settore 3	0,1039	0,0016	0,0085	0,0037

Come si può facilmente evincere dalla tabella l'intervallo di variazione dell' α_{24} vettoriale è molto ampio. Il valore massimo per tutti e tre i settori della BTS riguarda unicamente un settore angolare (sette angolare 17) dove molto probabilmente si concentrava un elevato numero di utenti nella giornata scelta per le analisi.

Considerando gli intervalli di variazione degli α_{24} vettoriali, il valore calcolato dell' α_{24} scalare classico ed il fatto che l' α_{24} scalare ottenuto con approccio basato sui contatori angolari è pari al valore massimo degli α_{24} vettoriali, è possibile affermare che dalla applicazione degli α_{24} vettoriali al posto dell' α_{24} scalare unico (indipendentemente dall'approccio), ci si aspetta livelli di campo elettrico/densità di potenza riferiti allo scenario nettamente inferiori e sicuramente più aderenti alla realtà. Le simulazioni numeriche previste come attività futura permetteranno di ottenere una quantificazione della differenza in termini di KPI tra approccio scalare ed approccio vettoriale.

5 – Conclusioni e sviluppi futuri

L'andamento della potenza totale oraria (derivata dai contatori) evidenzia variazioni significative nel corso della giornata tra i tre settori, elemento indicativo di una differente distribuzione delle persone e degli UE all'interno di essi. L' α_{24} scalare giornaliero, calcolato secondo le indicazioni attuali risulta significativamente più elevato rispetto ai valori dei settori angolari. È possibile, pertanto, affermare che l'adozione di un unico valore di α_{24} scalare relativo a tutta la cella (o a tutto il settore) porta inevitabilmente a una sovrastima del livello effettivo di campo elettromagnetico/densità di potenza generato da una BTS 5G AAS. La soluzione normativa italiana, che prevede l'applicazione del fattore di riduzione α_{24} scalare, è

stata definita oltre 10 anni fa sulla base di sistemi legacy e della tecnologia 4G e prevede un valore unico di potenza caratterizzante tutta la cella. Al tempo, la tecnologia 5G ancora non era stata dispiegata e concetti come il mMIMO, AAS e beamforming non erano ancora stati definiti e standardizzati.

Le analisi effettuate su sistemi reali 5G AAS hanno confermato, l'applicazione di un α_{24} scalare derivato dai contatori vettoriali, consente di ottenere una rappresentazione dei livelli di esposizione più accurata e aderente alla realtà. Anche nel processo autorizzativo attuale, che prevede l'uso di un valore scalare, per le antenne AAS è possibile ottimizzare il calcolo selezionando il settore con la regione angolare peggiore. Questa scelta, infatti, garantisce la conformità normativa, rappresentando il caso peggiore, e permette di utilizzare un valore più realistico per il calcolo del campo elettromagnetico. Come sviluppo futuro si prevede di utilizzare tutti gli α_{24} di ciascun settore, creando delle antenne di traffico basate sui valori di α_{24} vettoriale, per effettuare una approfondita valutazione basata su calcoli numerici e sui KPI descritti nei paragrafi precedenti. Qualora dalle analisi e dai confronti emergessero, come atteso, valori di campo elettrico/densità di potenza molto inferiori e più realistici rispetto all'applicazione dell' α_{24} scalare, la disponibilità dei contatori spaziali potrebbe anche giustificare, in futuro, l'aggiornamento della normativa tecnica che regola la media sulle 24 ore. Ciò consentirebbe di utilizzare in fase autorizzativa valori differenti del coefficiente α_{24} per ciascun settore angolare. Questo permetterebbe di avere livelli previsionali più aderenti alla realtà e di gestire in modo più preciso le criticità puntuali.

6 – Ringraziamenti

Questo lavoro è parzialmente finanziato dall'Unione europea - Next Generation EU nell'ambito del Programma Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), Missione 4, Componente 2, Investimento 1.3, CUP B43D22000970004, Partenariato Esteso sulle "Telecomunicazioni del Futuro" (PE00000001 - programma "RESTART").

9 - Bibliografia

- [1] IEC 62232 – *“Determination of RF field strength, power density and SAR in the vicinity of base stations for the purpose of evaluating human exposure”* Edition 3 - 2022
- [2] Technical Report IEC 62229 – *“Case studies supporting IEC 62232 - Determination of RF field strength, power density and SAR in the vicinity of radiocommunication base stations for the purpose of evaluating human exposure”* Edition 3 – 2023
- [3] Legge 22 febbraio 2001, n. 36 – *“Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici.”* - Gazzetta Ufficiale Serie Generale n.55 del 07-03-2001
- [4] Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 8 luglio 2003 – *“Fissazione dei limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici generati a frequenze comprese tra 100 kHz e 300 GHz.”* - Gazzetta Ufficiale Serie Generale n.199 del 28-08-2003
- [5] Legge 17 dicembre 2012, n. 221 – *“Conversione in legge, con modificazioni, del decreto-legge 18 ottobre 2012, n. 179, recante ulteriori misure urgenti per la crescita del Paese.”* Gazzetta Ufficiale Serie Generale n.294 del 18-12-2012 - Suppl. Ordinario n. 208
- [6] Decreto 2 dicembre 2014 – *“Linee guida, relative alla definizione delle modalità con cui gli operatori forniscono all'ISPRA e alle ARPA/APPA i dati di potenza degli impianti e alla definizione dei fattori di riduzione della potenza da applicare nelle stime previsionali per tener conto della variabilità temporale dell'emissione degli impianti nell'arco delle 24 ore. “* – Gazzetta Ufficiale Serie Generale n.296 del 22-12-2014
- [7] Norma CEI 211-10 (06-2024)- *“Guida alla realizzazione di una Stazione radio Base per rispettare i limiti di esposizione ai campi in alta frequenza”* - 2024
- [8] G. Liang and H. Bertoni, *"A new approach to 3-D ray tracing for propagation prediction in cities"*, IEEE Trans.Antennas Propagat., vol 46, pp. 853-863, 1998.

- [9] R. G. Kouyoumjian and P. H. Pathak, "A Uniform Geometrical Theory of Diffraction for an Edge in a Perfectly Conducting Surface," Proc. IEEE, vol. 62, no.11, pp. 1448-1461, 1974
- [10] E. Damosso and L.M. Correia (eds.), "Digital mobile radio towards future generation systems", COST Action 231 Final Report, Office for official publications of the EC, Luxembourg, 1999.
- [11] Lodato et al., "Ray Tracing Tools Assessment for the Evaluation of EMF Levels generated by 5G NR Systems: An Overview" – Proceedings di 2024 IEEE International Symposium on Measurements and Networking – in press – 2024
- [12] ICNIRP – "ICNIRP Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz).", Health Phys 118(5):483-524 - 2020
- [13] Next Generation Mobile Networks - "Recommendation on Base Station Active Antenna System Standards [Online]". Available: Recommendation on Base Station Active Antenna System Standards - NGMN
- [14] Decreto-legge 18/10/2012 n.79 – aggiornato all'11/11/2024
- [15] Decreto-legge 29/12/2023 n.214 – "Legge annuale per il mercato e la concorrenza 2022 – Articolo 10" – Gazzetta Ufficiale Serie Generale n.303 del 30-12-2023

Polis: Un'iniziativa per avvicinare cittadini, territori e Pubblica Amministrazione

Polis: A strategic initiative to reconnect citizens, territories and Public Administration

Ministero delle Imprese e del Made in Italy - DGTEL

Sommario

Polis è un progetto promosso dal MIMIT e attuato da Poste Italiane, pensato per rilanciare i piccoli comuni italiani attraverso la digitalizzazione dei servizi pubblici e la creazione di nuove opportunità di lavoro e sviluppo locale. L'iniziativa punta a contrastare lo spopolamento e a migliorare la qualità della vita nei territori meno connessi. Tra gli interventi principali: lo Sportello Unico, per l'accesso facilitato ai servizi della PA; gli Spazi per l'Italia, una rete nazionale di spazi di co-working distribuiti sul territorio. Polis inoltre incentiva un modello di sviluppo sostenibile, grazie a interventi di efficientamento energetico e di infrastrutture per la mobilità elettrica. Polis rappresenta una spinta concreta verso l'innovazione e la modernizzazione della Pubblica Amministrazione, mettendo al centro i bisogni dei cittadini.

Keyword

Polis, Small municipalities, Service innovation, Digital inclusion, Co-working, Sustainability

Abstract

Polis is a project promoted by the Ministry of Enterprises and Made in Italy (MIMIT) and implemented by Poste Italiane, designed to revitalize small Italian municipalities through the digitalization of public services and the creation of new opportunities for employment and local development. The initiative aims to counter depopulation and improve the quality of life in less connected areas. Key measures include the a One-Stop Shop (Sportello Unico) which facilitates access to public administration services and a national co-working network (Spazi per l'Italia), distributed across the country. Polis also promotes a sustainable development model through energy efficiency and infrastructures for electric mobility. It represents a

Polis: Un’iniziativa per avvicinare cittadini, territori e pubblica amministrazione

Polis: A strategic initiative to reconnect citizens, territories and Public Administration

Ministero delle Imprese e del Made in Italy – DGTEL

concrete step toward innovation and modernization of Public Administration, with citizens’ needs at the center of the process.

1 - Introduzione

Il progetto Polis, promosso dal MIMIT e attuato da Poste Italiane, rappresenta un’iniziativa strategica per il rilancio dei piccoli comuni italiani. Polis porta servizi pubblici essenziali nei territori meno connessi, contrastando lo spopolamento e favorendo nuove opportunità di vita e lavoro con un investimento di 800 milioni di euro nell’ambito del Piano Nazionale Complementare al PNRR.

2 – Il ruolo strategico del MIMIT

Il MIMIT svolge un ruolo cruciale nella realizzazione di Polis: si occupa infatti di monitorare il numero di interventi avviati e conclusi, verificando il raggiungimento dei target prefissati. Inoltre, ha siglato accordi con Poste Italiane (soggetto attuatore), il Ministero dell’Interno, il Ministero della Giustizia e l’INPS per digitalizzare i servizi pubblici e renderli accessibili tramite la rete di uffici postali sul territorio.



Figura 1 – Esempio di banner per la comunicazione del progetto Polis sui canali digitali.

3 – Sportello Unico: la comodità delle grandi città, la semplicità dei piccoli centri

Uno degli interventi chiave di Polis è lo Sportello Unico, che trasforma gli uffici postali di 6.933 comuni sotto i 15.000 abitanti in un punto di accesso integrato ai servizi della Pubblica Amministrazione. Questo modello semplifica le procedure amministrative, riduce i tempi di attesa e offre un'esperienza più fluida ai cittadini.

Grazie allo Sportello Unico, i cittadini potranno accedere a servizi essenziali, come il rilascio di documenti o la richiesta di certificati, senza doversi spostare in altri centri urbani.

Un intervento di valore, non solo per i cittadini: lo Sportello Unico, infatti, rappresenta un passo importante per trainare l'innovazione e la digitalizzazione della PA italiana. Grazie all'integrazione di strumenti digitali avanzati negli Uffici Postali, i comuni hanno potuto offrire servizi più rapidi ed efficienti, riducendo la burocrazia e migliorando la gestione delle pratiche amministrative, beneficiando di una spinta decisiva alla digitalizzazione dei propri servizi. Un cambiamento che non solo migliora l'accesso ai servizi, ma accelera l'innovazione e la modernizzazione della Pubblica Amministrazione.

4 – Spazi per l'Italia: poli di opportunità per attrarre lavoratori e imprese

Il progetto Polis prevede anche la creazione di 250 spazi di co-working, di cui 80 situati in comuni sotto i 15.000 abitanti, oggi prevalentemente sprovvisti di luoghi dedicati al lavoro da remoto e al nomadismo digitale. L'intervento trasforma gli edifici in disuso di Poste Italiane in spazi modulari, che offrono postazioni per il lavoro, spazi di collaborazione e servizi di connettività e stampa.

Con questo intervento, il MIMIT si impegna a realizzare la più grande rete nazionale di co-working, contribuendo a rendere i piccoli comuni più attrattivi per nomadi digitali, professionisti locali e imprese.

5 – Sostenibilità e futuro dei piccoli comuni

Polis non si limita alla digitalizzazione, ma promuove un modello di sviluppo sostenibile per le aree interne. L'iniziativa punta a trasformare i piccoli comuni in centri dinamici, capaci di attrarre talenti, imprese e famiglie.

Con Polis, il MIMIT supporta borghi e piccoli centri, che hanno un'opportunità in più per diventare luoghi attrattivi, in cui vivere e lavorare con gli stessi servizi disponibili nei contesti urbani. L'iniziativa vuole favorire la crescita di un'economia territoriale sostenibile, promuovendo la valorizzazione delle peculiarità locali e incentivando nuove opportunità di sviluppo.

6 – Sviluppi futuri

Per rafforzare l'impatto del progetto e il suo ruolo centrale nell'effettiva realizzazione, il MIMIT lancerà una campagna di comunicazione istituzionale, raccontando le esperienze di chi ha già beneficiato di Polis e mostrando come la trasformazione digitale possa migliorare concretamente la vita delle persone.