

5G SOTTO LALENTE

Evoluzione delle tecniche di misura per un segnale dinamico

L'esposizione alle onde elettromagnetiche è un argomento che incute sempre un po' di timore nella popolazione, poiché si tratta di qualcosa che non vediamo, non sentiamo, ma della cui innegabile realtà abbiamo prova ogni giorno dalle continue e pervasive innovazioni tecnologiche. Ogni nuova generazione di tecnologie, insieme alla capacità di trasportare una sempre maggior quantità di dati in un sempre minor tempo, porta con sé anche la necessità di adeguare le metodiche di misura da parte degli organi di controllo per poter dare risposte efficaci, trasparenti, scientificamente corrette alle diverse istanze: degli enti da una parte, che devono regolare l'inserimento degli impianti sul proprio territorio, e dei cittadini dall'altra, spesso preoccupati da un continuo proliferare di antenne, viste come possibile minaccia alla propria salute e al valore del proprio immobile. Nel caso del 5G, come testimoniano i numerosi contributi specialistici delle pagine seguenti, non si ritiene eccessivo parlare di un vero

e proprio "cambio di paradigma". L'introduzione della capacità delle antenne 5G di formare dei fasci di traffico indirizzati verso singoli o gruppi di utenti (*beamforming*) ha messo in discussione il modo di operare consolidato del Sistema delle agenzie ambientali, che però ha reagito prontamente, dando dimostrazione di robuste competenze maturate nei precedenti 20 anni, uno spiccato spirito di iniziativa e grande passione degli operatori.

Le linee guida Snpa 54/2025 sono state il punto di raccolta di diverse esperienze sul campo, spesso sviluppate indipendentemente, di tante Agenzie regionali che hanno percepito l'esigenza di essere proattive nell'individuare nuove tecniche e procedure operative davanti a questo cambiamento strutturale: ne è la riprova l'altissima partecipazione all'interconfronto nazionale svoltosi a Roma nel mese di giugno 2025 e i numerosi gruppi di lavoro tutt'ora attivi a livello nazionale per l'approfondimento delle metodiche di misura legate alle nuove tecnologie.

(Matteo Tiberti e Barbara Notari)

LE LINEE GUIDA SNPA SULLE MISURE 5G

LA GUIDA SNPA 54/2025 AGGIORNA LE METODOLOGIE DI MISURA DEI CAMPI ELETTROMAGNETICI PER IL 5G. IL DOCUMENTO AFFRONTA SFIDE COME IL BEAMFORMING E LE ANTENNE ATTIVE, INTRODUCENDO TECNICHE DI FORZATURA DEL TRAFFICO E ANALISI A BANDA STRETTA PER VALUTARE L'ESPOSIZIONE UMANA.

L'avvento della quinta generazione tecnologica della telefonia mobile – il sistema 5G New Radio – ha rivoluzionato radicalmente l'attività di valutazione dell'esposizione umana ai campi elettromagnetici. È da subito apparso chiaro che le novità introdotte dalla transizione tecnologica avrebbero impattato in maniera critica le metodologie di misura e di simulazione previsionale dei livelli di campo elettromagnetico generati nell'ambiente. Questo ha obbligato gli esperti del settore a intraprendere un articolato processo di revisione delle normative tecniche di riferimento. Sulla base di questa esigenza comune, l'*International electrotechnical commission (Iec)* ha preso in carico il gravoso compito di aggiornare gli standard internazionali, su tutti il Technical standard Iec 62232:2022 *Determination of Rf field strength, power density and Sar in the vicinity of base stations for the purpose of evaluating human exposure*, che a oggi rappresenta il testo di riferimento per la valutazione dell'esposizione umana. Lo slancio internazionale è stato ovviamente declinato anche su scala nazionale, con il Comitato elettrotecnico italiano (Cei) impegnato nella revisione della Guida Cei 211-10 (aggiornata a giugno 2024) e della Guida Cei 211-7, il cui aggiornamento è tuttora in corso.

La linea guida Snpa

In questo contesto complesso e sfidante nasce in seno al Sistema nazionale per la protezione ambientale (Snpa), l'idea di produrre un documento tecnico autoconsistente che racchiudesse l'enorme mole di esperienza diretta di misura dei sistemi 5G accumulata dai tecnici di Ispra e delle varie Agenzie regionali e che, al tempo stesso, potesse rappresentare uno standard a cui riferirsi per la corretta esecuzione di misure di segnali di ultimissima generazione. La

storia della linea guida Snpa 54/2025 nasce a marzo del 2024, quando vengono designati i componenti del gruppo di lavoro incaricato della preparazione del documento. Un compito complesso e impegnativo, reso ancora più difficile dalla tempistica certamente non favorevole: il 30 dicembre 2023 era infatti entrata in vigore la legge n. 214/2023 che aveva adeguato i valori limite di campo elettromagnetico consentiti nel nostro Paese. Il gruppo di lavoro si accingeva a lavorare a un documento di importanza cruciale proprio nel bel mezzo di un processo di adeguamento delle potenze di tutti gli impianti di telefonia mobile

presenti su scala nazionale, che avrebbe impegnato il personale tecnico delle Agenzie ambientali con un carico di lavoro istituzionale enorme da evadere in tempi estremamente compressi. Nonostante ciò, la consapevolezza dell'importanza di una linea guida specificatamente dedicata alle misure su segnali 5G è stata motivante per tutti i partecipanti che sono riusciti a rispettare la scadenza imposta dal Consiglio Snpa, che ha potuto infine adottare il testo finale delle *Linee guida per la misura dei campi elettromagnetici generati da sistemi di telecomunicazione in tecnologia 5G* con la delibera n. 262 del 26 novembre 2024.

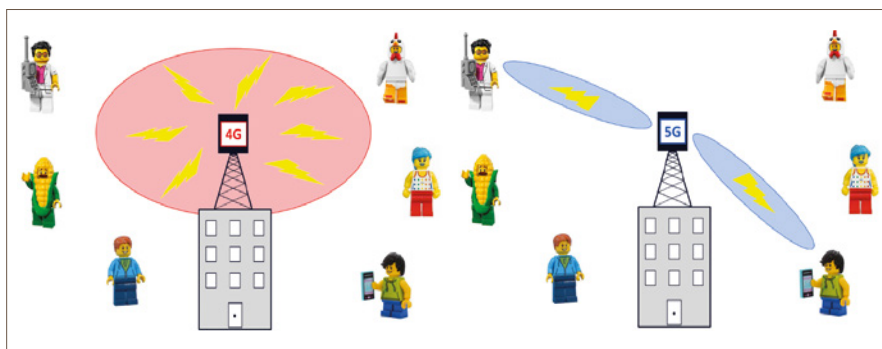


FIG. 1 ESPOSIZIONE
Confronto tra le modalità di esposizione dovuta a tecnologie 4G e 5G.

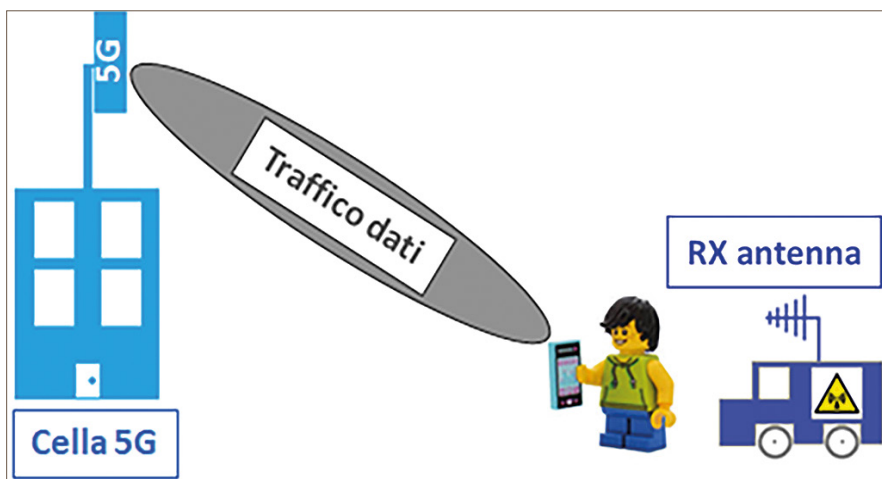


FIG. 2 TRAFFICO FORZATO
Misura di campo in condizioni di traffico forzato.

I contenuti

La linea guida si propone come una summa di tutta la conoscenza del segnale 5G fino a quel momento maturata all'interno di Snpa. Per questo motivo è stata progettata con finalità più ampie rispetto a quelle di un asettico documento tecnico. La linea guida inizia infatti con una vasta introduzione teorica sulle principali caratteristiche dei segnali 5G, ponendo un particolare risalto sugli aspetti che si traducono direttamente in modalità di esposizione della popolazione rispetto al passato. Tra questi, un'enfasi particolare viene posta su ciò che rappresenta la più grande discontinuità rispetto alle tecnologie del passato: l'implementazione di antenne attive intelligenti per la trasmissione del segnale.

Queste antenne avanzate sono caratterizzate da un elevato numero di elementi radianti indipendenti che abilitano il meccanismo di trasmissione chiamato *beamforming*: agendo in tempo reale sulla fase di ogni singolo elemento, il sistema è in grado di sintetizzare fasci di radiazione caratterizzati da direzioni di massimo puntamento che variano in maniera dinamica. Grazie al *beamforming*, il sistema 5G è in grado di "seguire" un utente connesso attraverso un fascio che si orienta dinamicamente seguendo la sua posizione.

Le implicazioni che un meccanismo di trasmissione come il *beamforming* si porta dietro dal punto di vista dell'esposizione umana sono enormi: per la prima volta la popolazione è esposta ai campi elettromagnetici generati dalle sorgenti di telefonia mobile diventa rilevante solo quando si instaura attivamente una connessione. La *figura 1* mostra il cambio di paradigma in maniera semplice: per le generazioni tecnologiche precedenti, il diagramma di irraggiamento rappresentava un'entità statica che non poteva modificare la sua forma indipendentemente dal numero (e posizione) degli utenti attivi. Con il *beamforming* delle antenne 5G, invece, l'irraggiamento è dinamico e ottimizzato solo nelle direzioni in cui sono presenti utenti attivi.

Come diretta conseguenza del *beamforming*, per valutare l'esposizione massima che una persona può ricevere in un determinato punto, la misura va effettuata in condizioni di forzatura



1

di traffico dati. In altre parole, bisogna essere sicuri che la misura avvenga mentre il sistema 5G sta puntando un fascio di traffico nella direzione dell'antenna ricevente (*figura 2*). Per venire incontro alle nuove esigenze di misura, il capitolo 2 della linea guida è interamente dedicato alla descrizione dei meccanismi di forzatura del traffico che si possono utilizzare in campo per effettuare una corretta valutazione della massima esposizione.

Il capitolo 3 affronta invece la tematica delle metodologie di misura in banda larga che, sebbene rappresenti una tecnica standard e ampiamente consolidata, può condurre a interpretazioni fuorvianti in presenza di segnali caratterizzati da modulazioni complesse come quelle del 5G. Il fulcro della linea guida è tuttavia rappresentato dal capitolo 4, che descrive nel dettaglio le tre principali tecniche di misura in banda stretta:

- *channel power*
- *zero span*
- demodulazione vettoriale.

È compresa anche una dettagliata descrizione delle tecniche di estrapolazione alla massima potenza che consentono di effettuare una stima attendibile del campo generato dalla sorgente 5G in condizione di massimo traffico a partire da una misura puntuale e istantanea.

Il capitolo 5 contiene le conclusioni insieme a una pratica tabella riepilogativa di tutte le procedure di misura trattate all'interno del documento. Queste procedure sono state oggetto di sperimentazione durante l'interconfronto nazionale sulle misure 5G, tenutosi dal

24 al 26 giugno 2025, organizzato da Università di Roma Tor Vergata, Ispra, Arpa Lazio e Arpa Piemonte, che ha visto la partecipazione di 34 laboratori provenienti da tutta Italia.

Il sistema agenziale ha fatto veramente tanta strada ma non è ancora tempo di fermarsi: il 2026 sarà infatti l'anno di una prima revisione ed estensione della linea guida per includere alcuni recentissimi temi che non è stato possibile includere nella versione precedente.

Daniele Franci, Giuseppe Marsico

Ispra

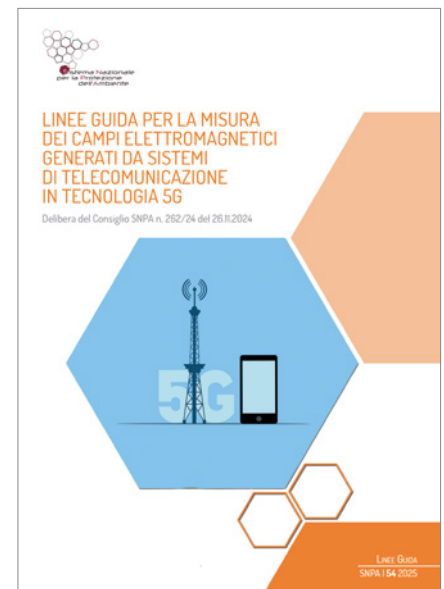


FIG. 3 COPERTINA E QR CODE PER SCARICARE GRATUITAMENTE LA LINEA GUIDA

1 I partecipanti dell'interconfronto Snpa (Roma, 24-26 giugno 2025) all'opera.

L'INTERCONFRONTO NAZIONALE SULLE MISURE 5G

PER VALUTARE LE LINEE GUIDA 5G PRODOTTE DA SNPA E CONSOLIDARE UNA BASE SPERIMENTALE CONDIVISA NEL MONITORAGGIO AMBIENTALE, SI È TENUTO A ROMA NEL GIUGNO 2025 IL PRIMO INTERCONFRONTO NAZIONALE SULLE MISURE DELL'ESPOSIZIONE A CAMPI ELETTROMAGNETICI GENERATI DA IMPIANTI 5G.

Agiugno 2025 si è tenuto a Roma il primo interconfronto nazionale sulle misure dell'esposizione a campi elettromagnetici generati da impianti 5G. L'iniziativa, organizzata dall'Università degli Studi di Roma Tor Vergata con il patrocinio di Arpa Lazio, Arpa Piemonte, Ispra, Airp, Cnit, e Fondazione Restart, ha coinvolto 34 laboratori provenienti dalle Arpa regionali, da istituti pubblici e da enti privati. L'obiettivo era duplice: valutare la coerenza tra diverse metodiche di misura definite nelle Linee guida 5G prodotte in ambito Snpa (Sistema nazionale di protezione ambientale) e consolidare una base sperimentale condivisa per affrontare le sfide introdotte dal 5G nel monitoraggio ambientale.

Obiettivi e contesto operativo

L'interconfronto è stato organizzato presso l'Università degli Studi di Roma



1

Tor Vergata, utilizzando una rete privata composta da una *Ran* e da una *Core 5G Standalone*, acquisita tramite i fondi del progetto del Pnrr Restart che ha supportato l'iniziativa. La rete è stata configurata per operare con traffico forzato tramite *Cpe* dedicata (con antenna *multi-user MIMO* a diagramma statico). Questa scelta ha garantito una condizione stabile, evitando la

variabilità tipica delle reti commerciali. L'attività si è articolata su due giornate: la prima dedicata ai metodi basati sulla *maximum power extrapolation (Mpe)*, utilizzando antenne e cavi identici per tutti i partecipanti; la seconda incentrata su misure *Chp* effettuate con le catene strumentali proprie di ogni laboratorio. Questa impostazione ha permesso di isolare le differenti sorgenti di variabilità:



2

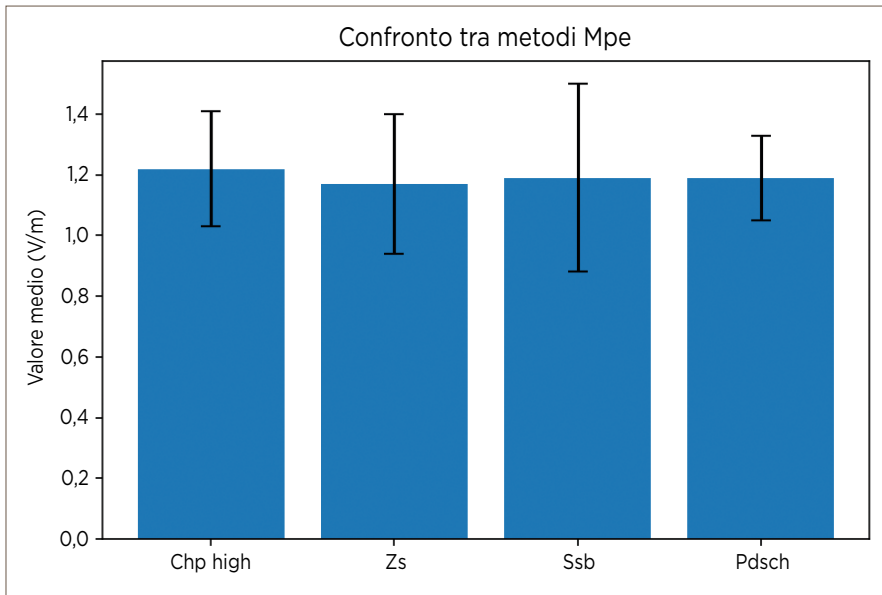


FIG. 1 CONFRONTO TRA METODI
Risultati di media robusta tra le misure dei partecipanti, ottenute con i diversi metodi testati. L'intervallo di variabilità associato è la deviazione standard robusta dei dati

nella prima giornata si testava la capacità tecnica del laboratorio di applicare correttamente i metodi; nella seconda si valutava anche la qualità complessiva delle catene di misura, incluse antenne, cavi e strumenti di analisi.

Metodiche di misura analizzate

Per affrontare la complessità del segnale 5G Nr, caratterizzato da Tdd, *beamforming* e allocazione dinamica delle risorse, sono state testate quattro metodiche principali:

- misura *channel power* (Chp): consiste nella misura diretta della potenza complessiva trasmessa. Si tratta del metodo più diffuso tra le Arpa, utilizzato nelle attività di vigilanza e controllo
- misure zero-span (Zs): permettono di analizzare porzioni temporali specifiche del segnale, misurando canali di controllo (Ssb) o di traffico (Pdsch) per estrapolare alla potenza massima
- demodulazione Ssb: tramite analizzatori vettoriali è possibile ricostruire la potenza per *resource element* (Re) del blocco di sincronizzazione, l'unico trasmesso costantemente
- demodulazione completa del frame 5G: rappresenta la tecnica più sofisticata, capace di analizzare la distribuzione della potenza nei canali dati Pdsch all'interno della trama.

Parametri testati e sfide tecniche

Durante l'interconfronto sono stati analizzati:

- i livelli di campo elettrico per Re del canale Ssb
- i livelli per Re del canale Pdsch
- i valori della potenza massima estrapolata tramite diversi metodi Mpe
- le incertezze dichiarate dalle singole strutture di misura.

L'interconfronto ha confermato una buona compatibilità generale tra le metodiche. Le stime della potenza massima ottenute dai laboratori risultano infatti molto vicine, con valori medi compresi tra 1,17 e 1,22 V/m. Il metodo più stabile è risultato essere la demodulazione completa del frame, mentre la maggiore variabilità è stata osservata nelle misure basate sul canale Ssb. Le misure Chp hanno mostrato la presenza di due gruppi (*low* e *high*), dovuti alla modulazione dinamica della potenza da parte del nodo 5G. In *figura 1*, sono visibili i risultati

di media robusta tra le misure dei partecipanti, ottenute con i diversi metodi testati. L'intervallo di variabilità associato è la deviazione standard robusta dei dati. Il dato di *channel power* utilizzato per questo confronto è quello ricavato dal gruppo di partecipanti individuato come *high*, in quanto rappresentativo della massima esposizione (in assenza di sistemi di controllo di potenza).

Oltre al valore tecnico, l'interconfronto ha svolto un ruolo cruciale nel consolidare le pratiche di misura condivise. Ha permesso ai laboratori di confrontarsi con la complessità del 5G, verificare la coerenza delle proprie procedure, individuare criticità e rafforzare le competenze interne.

Conclusioni

Il lavoro evidenzia che, nonostante la complessità del 5G, è possibile ottenere misure affidabili e riproducibili con una pluralità di metodiche, definite a partire dai lavori di approfondimento e ricerca effettuati negli ultimi anni in Italia dalle Agenzie insieme alle Università. La buona compatibilità tra i risultati dei laboratori rappresenta un importante passo avanti verso l'armonizzazione delle pratiche operative. Questi risultati, basati anche su metodiche innovative non descritte negli standard internazionali, possono anche costituire un interessante punto di discussione nei tavoli di stesura e adeguamenti degli standard stessi.

Sara Adda¹, Enrica Caputo¹, Luca Chiaraviglio², Daniele Franci³, Giuseppe Marsico³, Settimio Pavoncello⁴

1. Arpa Piemonte
2. Università Roma Tor Vergata
3. Ispra
4. Arpa Lazio

IL CONCETTO DI MPE

La *maximum power extrapolation* (Mpe) è un metodo codificato nelle norme tecniche per stimare la massima esposizione teorica generabile da una stazione radio, anche quando questa non trasmette al massimo della potenza. Il principio è semplice: alcuni canali, come l'Ssb, sono sempre presenti e vengono emessi a potenza costante. Misurandoli e applicando un fattore di estrapolazione è possibile stimare la potenza massima del sistema. Nel 5G Nr, il processo si complica a causa del *beamforming* e dell'allocazione dinamica delle risorse. Per questo motivo esistono metodiche diverse per stimare l'Mpe, basate in alcuni casi sulla misura dei canali di traffico in condizioni di forzatura, anziché sulla classica misura dei canali di controllo.

1 Seminario di apertura dell'interconfronto.
2 Zona delle misure con le squadre in attività.

PER MONITORARE I CEM SERVONO STRUMENTI AFFIDABILI

CONOSCERE PUNTI DI FORZA E LIMITI DEGLI STRUMENTI PERMETTE DI EVITARE INTERPRETAZIONI ERRATE E DI ATTRIBUIRE INVECE CORRETTAMENTE IL CONTRIBUTO DELLE DIVERSE SORGENTI ELETTROMAGNETICHE. ECCO PERCHÈ SERVONO STRUMENTI DI MISURA AFFIDABILI PER DESCRIVERE CON PRECISIONE IL CEM AMBIENTALE.

Negli ultimi anni il tema dell'inquinamento elettromagnetico ha assunto un ruolo sempre più centrale nel dibattito pubblico, complice la diffusione delle reti di nuova generazione, la moltiplicazione delle sorgenti emmissive e la crescente sensibilità dei cittadini verso le questioni ambientali. Le Agenzie per la protezione dell'ambiente sono chiamate ogni giorno a fornire valutazioni puntuali, sia attraverso controlli preventivi e monitoraggi sul territorio, sia tramite attività di ricerca e sperimentazione nei laboratori accreditati.

Per svolgere correttamente questi compiti è essenziale poter contare su strumenti di misura affidabili, capaci di descrivere con accuratezza il campo elettromagnetico realmente presente nell'ambiente. In quest'ottica Arpa Piemonte ha condotto uno studio approfondito sulle prestazioni delle antenne utilizzate per le misure in banda stretta. L'attenzione si è concentrata sulle due tipologie oggi più diffuse:

- antenne triassiali, progettate per misurare il campo su tre assi e restituire rapidamente il valore totale del campo elettrico
 - antenne omnidirezionali, più recenti, caratterizzate da una costruzione semplice e da un costo più contenuto. L'obiettivo non era stabilire quale delle due rispondesse meglio "in assoluto", ma comprendere in quali condizioni ogni tipologia garantisce misure affidabili e in quali situazioni possono comparire limiti o comportamenti non ideali.
- Per questo il lavoro è stato articolato in due parti: una serie di prove condotte in laboratorio e una fase di verifica in campo.

Comportamento delle antenne in condizioni controllate

Le prove sperimentali sono state svolte a Ivrea, presso il laboratorio accreditato LAT00067 di Arpa Piemonte, utilizzando:

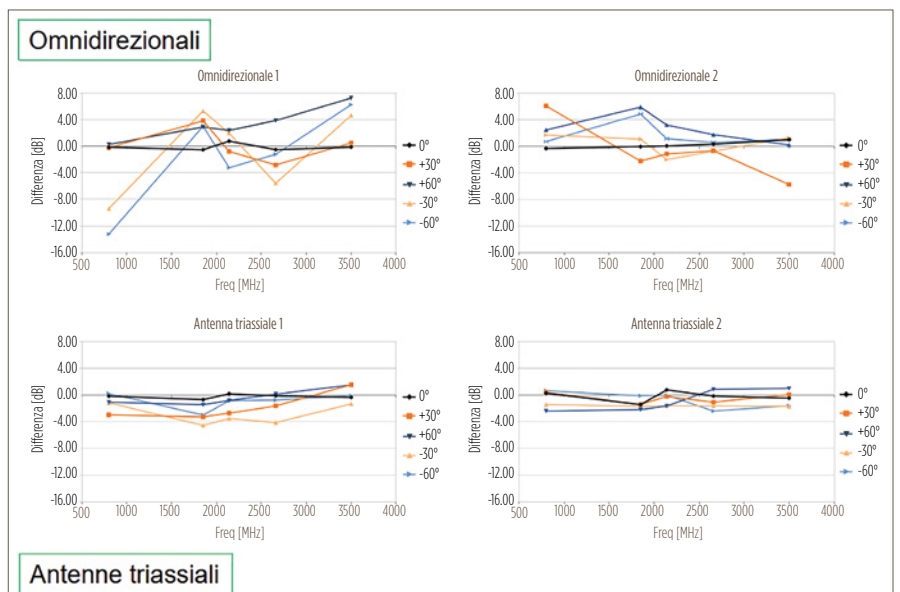


FIG. 1 RISPOSTA DELLE ANTENNE AL VARIARE DELL'ANGOLO DI INCIDENZA
In nero si identifica la posizione di taratura, riferimento rispetto alle diverse angolazioni.

TAB. 1
INDICI DI
COMPATIBILITÀ

Confronto tra antenna triassiale e omnidirezionale in campo aperto, per diverse frequenze e diversi angoli di incidenza.

Ambiente aperto						
Angolo	5°		40°		50°	
Frequenza (MHz)	Indice di compatibilità	Intervallo valori CE (V/m)	Indice di compatibilità	Intervallo valori CE (V/m)	Indice di compatibilità	Intervallo valori CE (V/m)
800	0,10	2,2-2,5	0,83	0,2	0,45	0,5-0,6
1800	0,72	0,5-0,6	0,90	1,7-2,3	2,25	0,4-0,9
2100	0,41	0,7-0,8	1,40	1,8-2,7	1,64	0,2-0,4

- una cella Tem, impiegata per le frequenze da 100 kHz a 200 MHz, ideale per generare campi uniformi e controllati
- una camera anecoica, che permette di operare da 400 MHz fino a 4 GHz eliminando le riflessioni e isolando la risposta dell'antenna.

In questo contesto sono stati analizzati due aspetti fondamentali: linearità della risposta (indica la capacità dell'antenna di rispondere in modo proporzionale all'aumento del campo incidente a frequenza fissa) e influenza dell'angolo di incidenza (fattore cruciale, perché nella realtà il segnale non è quasi mai in piena polarizzazione con l'antenna).

Le antenne omnidirezionali hanno mostrato una buona linearità, a eccezione delle misure effettuate per livelli di campo inferiori a 3 V/m.

Le antenne triassiali, invece, hanno evidenziato criticità di linearità per campi inferiori a 3 V/m per frequenze al di sotto i 200 MHz, risultando più sensibili alle condizioni di misura.

Per quanto riguarda l'angolo di incidenza, in *figura 1* si riportano i risultati.

Le antenne triassiali hanno presentato una risposta stabile, con variazioni contenute entro ± 4 dB rispetto al campo generato, comportamento considerato coerente e prevedibile.

Le antenne omnidirezionali hanno invece mostrato una maggiore variabilità: in alcuni casi il campo misurato è risultato superiore a quello generato, suggerendo la presenza di effetti interni o risonanze responsabili di comportamenti anomali.

Confronto tra antenna triassiale e antenna omnidirezionale in campo

Il lavoro svolto dal laboratorio rappresenta la parte "a monte" del processo di misura: definisce le prestazioni degli strumenti, individua i parametri critici e fornisce un riferimento certo su cui poggiano le attività operative.

Al fine di valutare la risposta delle antenne in condizioni di utilizzo reale, in ambiente non controllato, è stata condotta una campagna sperimentale finalizzata a confrontare le prestazioni di due tipologie di antenne, comunemente utilizzate da Arpa Piemonte nelle misure di campo elettromagnetico:

- antenna triassiale (420 MHz - 6 GHz)
- antenna omnidirezionale (20 MHz - 6 GHz).

L'obiettivo è stato quello di approfondire la risposta delle antenne in funzione di alcune variabili ambientali riscontrabili in campo: il contesto urbano, l'intensità di campo e l'angolo di incidenza tra la sorgente e l'antenna.

Queste le tipologie di contesto analizzate:

- ambiente urbano (area con edificato, sorgenti multiple e possibile presenza di riflessioni)
- ambiente semi-urbano (zone aperte come aree sportive o giardini, con minore densità edilizia)
- ambiente aperto (presenza di un'unica sorgente dominante).

Le misure sono state eseguite su segnali a diversa frequenza (700, 800, 1.800, 2.100, 2.600, 3.700 MHz), utilizzando lo strumento Srm3006.

Ogni serie di misure è stata effettuata tramite l'acquisizione di *channel power* e analizzando i segnali di un unico operatore. Nella fase di analisi, si è lavorato sui valori di media di ogni set di dati. Le misure di confronto tra le due antenne, al fine di riprodurre uniformità del segnale, sono state effettuate in condizioni di forzatura di traffico, mediante *speed test*. Gli strumenti sono stati impostati in acquisizione automatica al fine di registrare più misure possibili nell'unità di tempo.

Il confronto tra le risposte delle antenne è stato valutato mediante la stima dell'indice di compatibilità che, tenendo conto dello scarto tra le misure rapportato all'incertezza a esse associata, permette di dare un'indicazione sintetica e immediata di tale compatibilità: se il valore dell'indice è inferiore a 1, allora le misure sono compatibili.

Si riportano in *tabella 1* alcuni risultati significativi, in particolar modo quelli relativi all'ambiente aperto, nel quale è stato possibile variare l'angolo di incidenza.

Ciò che si nota è che vi sono due parametri principali che danno luogo ai casi di non compatibilità: il valore di campo elettrico e l'angolo di incidenza tra la sorgente e il punto di misura. Risulta infatti che i casi non compatibili (evidenziati nella tabella) corrispondono o a condizioni con valori di campo minori di 0,5 V/m oppure a condizioni con angoli maggiori di circa 40°. La sperimentazione ha evidenziato che la risposta delle due antenne in condizioni di misura reali è indipendente dalla tipologia di ambiente e che negli scenari operativi più comuni la risposta risulta compatibile.

Conclusioni

Nel complesso, lo studio ha messo in evidenza che entrambe le tipologie di antenna possono essere utilizzate per il monitoraggio ambientale, viste le normali condizioni operative di misura (valori di campo elettrico maggiori di 0,5 V/m e angolo di incidenza inferiore a 40°).

I test di laboratorio hanno evidenziato che:
- le antenne triassiali risultano più stabili in diverse condizioni di orientamento del segnale o quando il campo è debole
- le antenne omnidirezionali possono introdurre una maggiore incertezza, in particolare per la loro sensibilità all'angolo di incidenza.

Queste informazioni sono fondamentali per una lettura consapevole dei dati raccolti sul territorio: conoscere punti di forza e limiti degli strumenti permette di evitare interpretazioni errate e di attribuire correttamente il contributo delle diverse sorgenti elettromagnetiche.

Federica Bogo, Chiara Pedrolì, Pierre Blasotta, Alex Zanotto

Dipartimento Rischi fisici e tecnologici, Arpa Piemonte

UN SISTEMA INNOVATIVO IN ARPA PIEMONTE

ARMS (AUTOMATIC REMOTE MEASUREMENT SYSTEM) È UN PROGETTO DI SVILUPPO E SPERIMENTAZIONE DI UNA CENTRALINA DI MONITORAGGIO CEM PER IL MONITORAGGIO AUTOMATICO IN BANDA STRETTA DEI LIVELLI DI CAMPO ELETTROMAGNETICO PRODOTTI DAI SEGNALI DI TELECOMUNICAZIONI.

Il progetto Arms (*Automatic remote measurement system*) nasce con l'obiettivo di sviluppare una centralina autonoma per il monitoraggio in banda stretta dei segnali di telecomunicazioni, in accordo con la guida tecnica Cei 211-7. Le Agenzie ambientali devono infatti poter controllare nel tempo i livelli di campo elettromagnetico e, quando necessario, individuare il contributo delle singole sorgenti radio. Gli strumenti commerciali disponibili, pur essendo di alta gamma, non sempre si adattano alle esigenze operative di un monitoraggio continuo, distribuito sul territorio e a basso costo. Da qui la scelta di progettare una soluzione proprietaria, aperta e facilmente scalabile. Il cuore del sistema è un analizzatore di spettro remoto integrato con un *single-board computer* (Raspberry Pi) e alimentato da una batteria ricaricata tramite pannelli fotovoltaici. Attualmente la centralina utilizza un'antenna omnidirezionale, che consente di ricevere i segnali da tutte le direzioni, rendendo il sistema adatto ai posizionamenti tipici delle misure ambientali. Le misure vengono eseguite in modalità *channel power*, che fornisce la potenza misurata su un intervallo di frequenza corrispondente alla banda di uno specifico servizio (ad esempio LTE o 5G). Una caratteristica innovativa del progetto è l'integrazione dell'acquisizione di dati

I/Q. Questi sono campioni grezzi del segnale radio e permettono di analizzare la modulazione, identificare gli elementi di sincronizzazione e ricavare il Cell-Id. Finora tali informazioni erano ottenibili solo con strumenti dedicati; l'uso di software *open source* rende invece la soluzione più accessibile e flessibile. Al fine di validare il sistema di monitoraggio, sono state condotte prime sperimentazioni in campo. Una prima serie di prove ha confrontato l'antenna omnidirezionale con una classica antenna triassiale, utilizzata come riferimento per le misure in banda stretta. Successivamente è stato confrontato l'intero sistema con una catena strumentale commerciale. Le misure sono state effettuate in tre ambienti molto differenti (urbano, semi-urbano e aperto), variando anche l'angolo di incidenza rispetto alla sorgente per valutare la risposta in condizioni reali. Le analisi si sono basate sull'indice di compatibilità, che valuta se due misure sono coerenti considerando le rispettive incertezze.

I risultati indicano che la centralina fornisce misure compatibili con gli strumenti professionali, salvo alcune situazioni critiche: valori di campo molto bassi (inferiori a 0,5 V/m) o angoli di incidenza elevati (oltre 40°), condizioni comunque rare nei contesti di monitoraggio dove l'Agenzia sospetta superamenti dei limiti. A seguito dei primi risultati si è effettuato un monitoraggio di test per un periodo di più giorni, svolto in un'area urbana con livelli di campo elevati; in due giorni sono state registrate oltre 12.000 misure senza interruzioni. Oltre a validare l'affidabilità del sistema, questi dati serviranno per affinare gli algoritmi di post-analisi. Nel complesso, il prototipo si è dimostrato uno strumento efficace per il monitoraggio automatico in banda stretta e per l'identificazione delle sorgenti radio. I risultati hanno consentito di definire un protocollo d'uso e confermare



1

la possibilità di impiegare antenne omnidirezionali in modo coerente con le esigenze dell'Agenzia. I passaggi futuri comprendono la standardizzazione del sistema, la certificazione presso enti accreditati e lo sviluppo di software di analisi avanzata, con l'obiettivo finale di rendere Arms una piattaforma condivisa e diffusa a livello nazionale, capace di alimentare un archivio *open data* sul campo elettromagnetico.

Pierre Blasotta, Chiara Pedroli

Dipartimento Rischi fisici e tecnologici, Arpa Piemonte

1 Sistema di monitoraggio in banda stretta nella configurazione operativa.

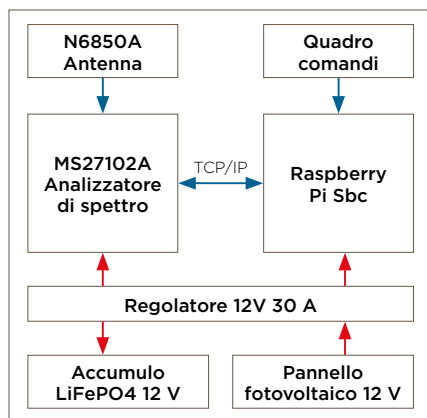


FIG. 1 SCHEMA A BLOCCHI DELLA CENTRALINA

5G BROADCAST, LA SPERIMENTAZIONE A ROMA

UNO STUDIO DI ARPA LAZIO HA PERMESSO DI CARATTERIZZARE IL SEGNALE TRASMESSO DALLA RAI NELL'AMBITO DELLE ATTIVITÀ DI TEST DEL 5G BROADCAST, UN SISTEMA CHE CONSENTE LA DIFFUSIONE MASSIVA DI CONTENUTI MULTIMEDIALI VERSO NUMEROSI UTENTI E CHE SI DISTINGUE PER L'EFFICIENZA ENERGETICA.

L'evoluzione delle reti mobili di quinta generazione (5G) sta introducendo nuovi modelli di utilizzo dello spettro radio, non solo per i servizi di comunicazione tradizionali, ma anche per la distribuzione massiva di contenuti multimediali e di informazioni di pubblica utilità. In questo scenario, la modalità di diffusione *one-to-many* riveste un ruolo strategico, in particolare per lo streaming di eventi di massa e per i sistemi di allerta e informazione alla popolazione.

Nelle reti cellulari tradizionali, la trasmissione di contenuti identici a un elevato numero di utenti avviene prevalentemente in modalità *unicast*, con un significativo impatto sulla capacità di rete e sui consumi energetici, soprattutto in contesti ad alta densità di traffico. Il 5G broadcast nasce per superare tali criticità, introducendo una modalità di trasmissione efficiente e dedicata, concettualmente più vicina alla radiodiffusione che alla comunicazione punto-punto tipica delle reti mobili. L'introduzione di questa tecnologia pone tuttavia nuove esigenze in termini di controllo, vigilanza e conoscenza del segnale, rendendo necessarie sperimentazioni mirate e metodologie di misura adeguate per valutare correttamente il contributo ai campi elettromagnetici e supportare le attività istituzionali delle Agenzie ambientali.

La tecnologia 5G broadcast

Il 5G broadcast è una tecnologia standardizzata dal 3Gpp per la distribuzione di contenuti in modalità broadcast e multicast all'interno dell'ecosistema delle reti mobili.

Deriva dall'evoluzione del servizio eMbms (*enhanced multimedia broadcast multicast service*) introdotto nel 4G e si propone come soluzione efficiente per la trasmissione simultanea di uno stesso flusso informativo a un numero elevato di dispositivi, senza che il carico di rete cresca con il numero di utenti serviti.

A differenza delle reti cellulari convenzionali, il 5G broadcast opera in modalità *one-to-many*, utilizzando risorse radio dedicate e consentendo una qualità del servizio indipendente dal numero di utenti presenti nell'area di copertura.

Una caratteristica distintiva è la possibilità di ricezione dei contenuti in modalità *receive only mode*, che non richiede l'uso di una Sim né l'accesso a un piano dati, rendendo la fruizione dei contenuti assimilabile a quella dei servizi televisivi *free-to-air*.

In Europa, il 5G broadcast è destinato a operare principalmente nella banda Uhf, storicamente utilizzata per la

televisione digitale terrestre. L'impiego di configurazioni a rete a frequenza singola (*single frequency network, Sfn*) consente inoltre di estendere l'area di copertura e migliorare l'efficienza spettrale. Queste caratteristiche rendono il 5G



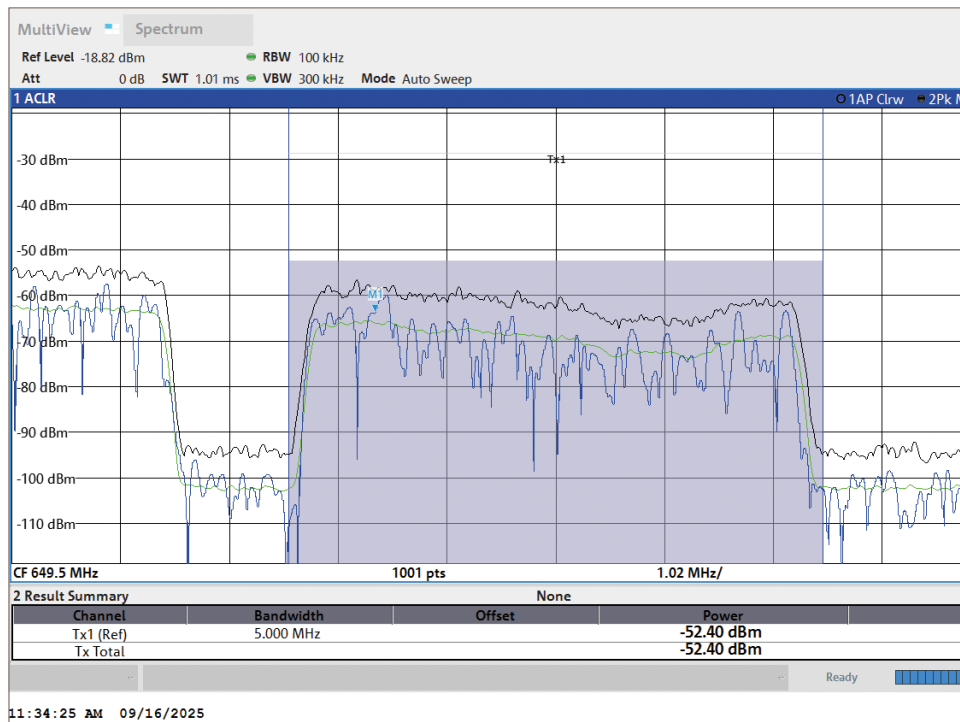
1



2

1 Luogo di misura della campagna di Arpa Lazio (traliccio Rai Monte Mario a Roma).

2 Strumentazione di misura.



Parametri	Valori impostati
Center frequency	649,5 MHz
Integration bandwidth	5 MHz
Rbw	100 kHz
Vbw	300 kHz
Sweep Time	1,01 ms
Trace/Detection	Clear write/Auto, Max Hold/Peak, Average/Rms
Average N°	200

FIG. 1 ACQUISIZIONE IN CHANNEL POWER E IMPOSTAZIONI DI MISURA

broadcast profondamente diverso dalle reti mobili tradizionali anche dal punto di vista dell'analisi del segnale e della valutazione dell'esposizione elettromagnetica.

La campagna di misura a Roma

La campagna di misura è stata condotta nell'area metropolitana di Roma, in prossimità del sito trasmissivo di Monte Mario, uno dei principali poli radiotelevisivi della città e nodo centrale della sperimentazione sul 5G broadcast avviata dalla Rai. Le attività si sono concentrate sulla caratterizzazione di un segnale broadcast sperimentale basato sulla tecnologia 4G eMbms, irradiato in banda Uhf su frequenze dedicate.

Le misure sono state eseguite in condizioni di elevato rapporto segnale-rumore, condizione necessaria per distinguere con affidabilità le diverse componenti del segnale trasmesso, al fine di consentire una corretta analisi sia dei livelli di campo elettromagnetico sia delle caratteristiche tecniche del segnale oggetto di indagine. I punti di misura sono stati selezionati nell'intorno del sito trasmissivo, con l'obiettivo di valutare il contributo della trasmissione broadcast all'esposizione ambientale e di acquisire informazioni utili alla validazione dei modelli previsionali.

Le attività sono state svolte mediante l'impiego del laboratorio mobile

recentemente acquisito da Arpa Lazio nell'ambito di progetti ministeriali finanziati con fondi Pnrr (v. foto alla pagina precedente) e hanno integrato misure quantitative del campo elettrico con analisi avanzate del segnale, necessarie per interpretare correttamente una tecnologia che, pur operando in una banda di frequenza consolidata, presenta modalità di trasmissione profondamente diverse rispetto ai sistemi radiotelevisivi tradizionali.

Strumentazione e risultati

Per la corretta caratterizzazione del segnale 4G eMbms non è sufficiente una misura convenzionale di campo elettromagnetico, ma sono richieste analisi in grado di decodificare i parametri di rete, ricostruire la struttura del segnale e quantificare il contributo energetico radiato. Gli strumenti utilizzati sono stati gli analizzatori di spettro vettoriali Rohde & Schwarz Fsva 3044 e Keysight FieldFox N9960A, lo scanner vettoriale di rete Rohde & Schwarz Tsm6 e le antenne omnidirezionali Electrometrics Em6857 ed Em6856.

La decodifica dei messaggi del *master information block* (Mib) e dei *system information block* (Sib), ovvero dei messaggi di segnalazione che descrivono l'identità e le modalità operative della rete, ha confermato la natura sperimentale della rete di test. Il segnale utilizza un identificativo di rete non standard (Mcc

901/Mnc 56) che secondo le specifiche 3Gpp è associato a servizi erogati in modalità *receive only mode* (Rom).

Questo risultato è particolarmente rilevante, poiché conferma sperimentalmente che il segnale è configurato per la ricezione da parte di dispositivi mobili senza Sim né abbonamento attivo, riproponendo la logica *free-to-air* tipica della televisione tradizionale.

La decodifica delle Sib 2 e delle Sib 13 ha confermato che il segnale è irradiato in modo conforme alla Release 14 3Gpp. Si tratta di un segnale 4G all'interno della cui trama trasmissiva alcuni subframe indicati con l'acronimo Mbsfn (*multicast broadcast single frequency network*) sono dedicati ai servizi broadcast. Le misure dell'intensità di campo elettromagnetico sono state eseguite in modalità *channel power*, modalità particolarmente adatta a stimare il contributo energetico complessivo di una trasmissione a banda definita, con entrambi gli analizzatori di spettro in dotazione. Le misure non hanno evidenziato criticità ambientali, con valori molto contenuti in tutta l'area di indagine.

In figura 1 una delle schermate relative alle acquisizioni in *channel power* eseguite nell'intorno del traliccio Rai. Nella tabella riportata accanto al grafico sono indicate le impostazioni di misura utilizzate durante l'acquisizione. L'utilizzo degli analizzatori di spettro

vettoriali ha consentito inoltre l'analisi I/Q della *resource grid*. In figura 2 è mostrata la griglia tempo/frequenza del segnale 4G eMbms, rappresentazione che descrive come il segnale occupa nel tempo e nella frequenza le risorse radio disponibili, corrispondente a un radioframe composto da 10 subframe di durata 1 ms.

L'analisi ha evidenziato l'esclusione dei subframe di sincronizzazione #0 e #5 tra quelli utilizzabili per traffico Mbsfn, al fine di evitare collisioni, e l'utilizzo del prefisso ciclico esteso, soluzione tecnica necessaria per garantire la copertura uniforme nelle reti broadcast a frequenza singola.

Conclusioni e sviluppi futuri

La campagna di misura condotta presso il sito di Monte Mario ha permesso di caratterizzare con dettaglio il segnale sperimentale 4G eMbms trasmesso da Rai nell'ambito delle attività di test del 5G broadcast. L'integrazione tra misure di campo, analisi vettoriale e decodifica dei messaggi di sistema ha fornito una conferma oggettiva della configurazione Mbsfn in Sfn, dell'impiego del prefisso ciclico esteso e dell'abilitazione della modalità *receive only mode*, elementi che attestano la piena coerenza con le specifiche 3Gpp release 14.

Dal punto di vista dell'impatto ambientale, le misure di intensità di campo hanno evidenziato valori ampiamente inferiori ai limiti normativi, confermando che la trasmissione in modalità broadcast non introduce criticità ambientali, pur garantendo un'efficiente copertura radio.

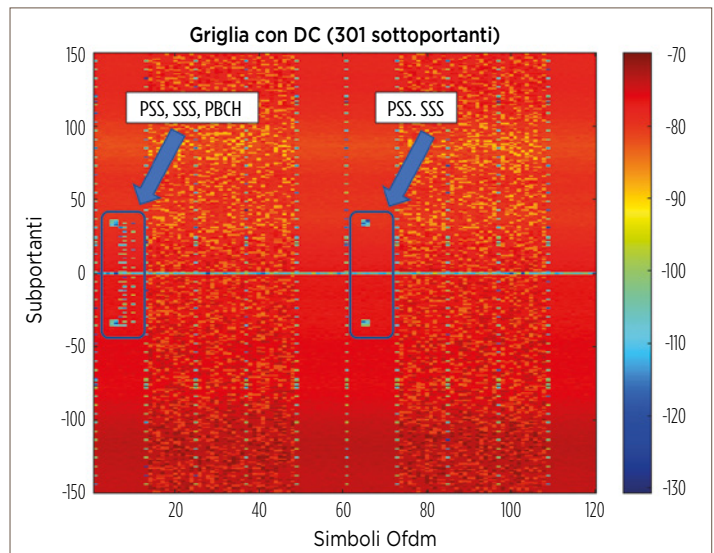
I risultati ottenuti costituiscono un riferimento utile sia per la comunità scientifica sia per le autorità di controllo, offrendo dati sperimentali per la validazione dei modelli previsionali e per la futura valutazione di impatto in scenari di diffusione commerciale. Tali attività contribuiscono a costruire un quadro tecnico-regolatorio più solido in vista del possibile *deployment* commerciale del 5G broadcast in Italia ed Europa a partire dal 2027, supportando la comunità radioprotezionistica e i broadcaster nello sviluppo di servizi innovativi *free-to-air*.

Settimio Pavoncello, Maila Strappini, Alessandro Di Nezza, Stefano Coltellacci, Enrico Grillo, Tommaso Aureli

Sezione provinciale di Roma, Arpa Lazio

FIG. 2
4G MBMS

Time/frequency grid
del segnale 4G Mbms.



RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Etsi TS 103 720 V1.1.1 (2020-12), *5G broadcast system for linear Tv and radio services: Lte-based 5G terrestrial broadcast system*.

3Gpp TR 36.976 V19.0.0 (2025-09), *3rd generation partnership project technical specification group radio access network overall description of Lte-based 5G broadcast (Release 19)*.

Rai Crits, *Elettronica e telecomunicazioni*, n. 1/2019 monografico dedicato al 5G.

David Gomez-Barquero, Jordi Joan Gimenez, Roland Beutler, 2020, *3Gpp Enhancements for Television Services: Lte-based 5G terrestrial broadcast*, January 2020.

LA CAMPAGNA DI MISURA SUL 5G IN BANDA MILLIMETRICA

LO STUDIO CONDOTTO A NAPOLI È FINALIZZATO A DEFINIRE PROTOCOLLI DI MISURA E STANDARD CONDIVISI PER LE ATTIVITÀ DI CONTROLLO. LA MISURA DELL'ESPOSIZIONE ELETTROMAGNETICA DEL 5G MMWAVE È STATA ESEGUITA CONFRONTANDO DIVERSE TECNICHE DI ESTRAPOLAZIONE IN SCENARI REALI, DI TRAFFICO E CONFIGURAZIONI.

L'impiego del 5G in banda millimetrica (mmWave) è attualmente ancora limitato e caratterizzato da una ridotta disponibilità di esperienze sperimentali, in particolare per quanto riguarda campagne di misura finalizzate alla valutazione dell'esposizione elettromagnetica. Si tratta infatti di una tecnologia innovativa, che presenta caratteristiche di propagazione e di utilizzo delle risorse radio profondamente diverse rispetto alle bande di frequenza tradizionalmente impiegate dalle reti mobili. In questo contesto risultano di particolare interesse studi sperimentali su larga scala condotti in scenari reali. Questo lavoro presenta i risultati di un'ampia campagna di misure condotta su segnali 5G in banda millimetrica presso il polo universitario di San Giovanni a Teduccio dell'Università degli studi di Napoli Federico II. Nell'ambito delle attività della 5G Academy è stato costituito un articolato gruppo di lavoro, comprendente Ispra, Arpa Lazio, Arpa Piemonte e l'Università stessa, con l'obiettivo di definire standard condivisi per le procedure di misura e di estrapolazione applicabili ai segnali 5G. I risultati ottenuti sono di particolare rilievo, poiché hanno beneficiato di un proficuo e continuo interscambio con il gestore di rete (Fastweb) e con il vendor tecnologico (Huawei), condizione che ha permesso di operare su una rete reale e di testare le procedure di misura in condizioni operative controllate e riproducibili, conducendo alla definizione di protocolli di misura condivisi da tutti gli attori coinvolti.

La campagna di misura

La campagna di misura è stata realizzata presso il campus universitario di San Giovanni a Teduccio dell'Università degli studi di Napoli Federico II. Le attività sperimentali sono state condotte sotto differenti condizioni di carico

di traffico, definite in base a specifici scenari operativi, al fine di analizzare il comportamento del segnale in situazioni rappresentative di diversi livelli di utilizzo della rete. La possibilità di impiegare simultaneamente più terminali durante le sessioni di misura ha permesso di riprodurre configurazioni multi-fascio, risultate particolarmente efficaci per valutare l'affidabilità delle procedure di misura in scenari rappresentativi di un utilizzo reale della rete. La *figura 1* mostra una rappresentazione schematica del sito di misura, dalla quale è possibile identificare le posizioni dell'impianto 5G (Point S), della catena di misura (Point A) e di un secondo utente connesso alla rete, collocato a distanza dal punto A (Point B). Questa configurazione ha consentito di analizzare l'impatto della generazione simultanea di fasci radio su più utenti. Nel corso della campagna di misura sono state analizzate e messe a confronto tre differenti modalità di estrapolazione del campo elettromagnetico, applicate nei vari scenari operativi considerati. Tali modalità, descritte in modo esaustivo nel

documento *Linee guida per la misura dei campi elettromagnetici generati da sistemi di telecomunicazione in tecnologia 5G¹*, al quale si rimanda per una trattazione approfondita, sono la *zero-span (Zs)*, la *vector channel power (Vcp)* e la *Pd sch power (Pp)*. Il confronto tra queste metodologie rappresenta un elemento centrale ai fini delle attività di controllo ambientale.

Risultati

La catena strumentale utilizzata per le misure ha visto l'utilizzo di un analizzatore di spettro vettoriale Rohde & Schwarz Fsva 3044 collegato a un'antenna Horn double-ridged compower modello Ah-840, configurazione idonea a operare alle frequenze millimetriche e a garantire un'adeguata direttività di ricezione. Sono stati definiti differenti scenari di misura sfruttando la logistica mostrata in *figura 1*:
- scenario A: modalità *idle*, assenza di forzatura. L'assenza di traffico dati consente di concentrarsi sulla struttura e

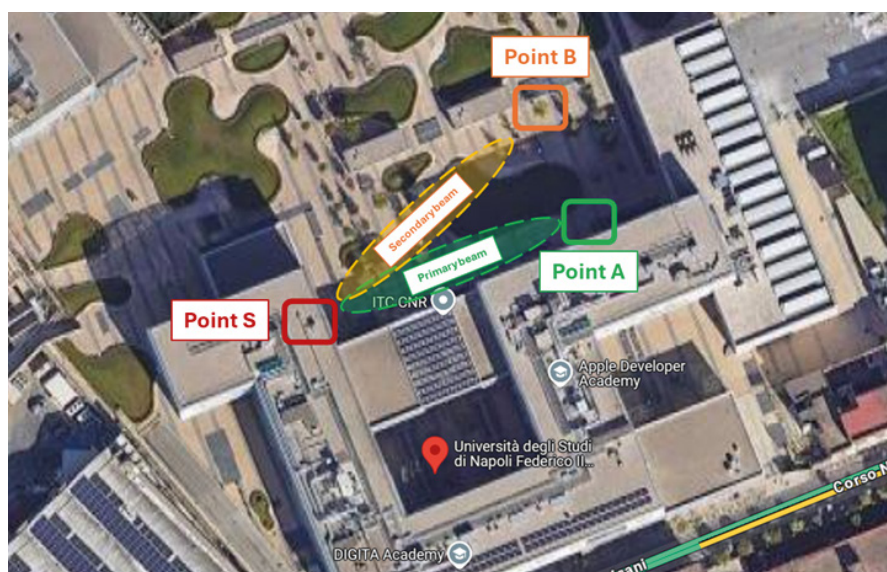


FIG. 1 SITO DI MISURA
Mappa satellitare del sito utilizzato per la campagna di misura

sulla modalità di trasmissione dei canali di controllo

- scenario B: forzatura *Mac padding* con un unico terminale in A questo scenario rappresenta il riferimento della condizione di massima esposizione
- scenario C: forzatura *Mac padding* con due terminali in A e in B lo scenario C consente di investigare l'eventuale impatto che la generazione di fasci di traffico multipli può avere in termini di valutazione della massima esposizione
- scenario D: forzatura Udp con due terminali in A e in B questo scenario è simile al precedente, con la differenza che la tecnica di forzatura del traffico utilizza il protocollo Udp che è lo standard di riferimento menzionato all'interno della normativa tecnica;
- scenario E (forzatura *speed test* con due terminali in A e in B): scenario del tutto analogo ai precedenti, in cui viene ulteriormente rilassata la condizione di forzatura di traffico affidata a un comune *speed test* commerciale.

La figura 2 mostra la rappresentazione della potenza ricevuta per *Resource element* per diversi frame ricostruiti a partire dai file Iq acquisiti in diversi scenari.

I risultati delle diverse procedure di estrapolazione sono stati confrontati con il valore di riferimento che è stato identificato con la misura Chp del segnale nello scenario B. I risultati sono condensati nel grafico in figura 3, che riporta il valore di P_{max} ottenuto dalle diverse metodologie per gli scenari considerati. La banda verde rappresenta il valore di riferimento del Chp misurato per lo scenario B al quale i risultati dell'applicazione delle diverse metodologie devono tendere.

La figura 3 evidenzia che la metodologia *Pdsch power* (P_p) garantisce dei risultati attendibili anche in condizioni estremamente differenti dallo scenario ideale, confermando la sua idoneità come metodologia di riferimento per la valutazione della massima esposizione nei sistemi 5G mmWave.

Conclusioni e futuri sviluppi

Le attività sperimentali presentate in questo lavoro confermano la rilevanza delle campagne di misura sui segnali 5G in banda millimetrica, un ambito che allo stato attuale risulta ancora caratterizzato da un numero limitato di studi e di evidenze sperimentali all'interno della comunità scientifica. In tale contesto, la disponibilità di misure condotte

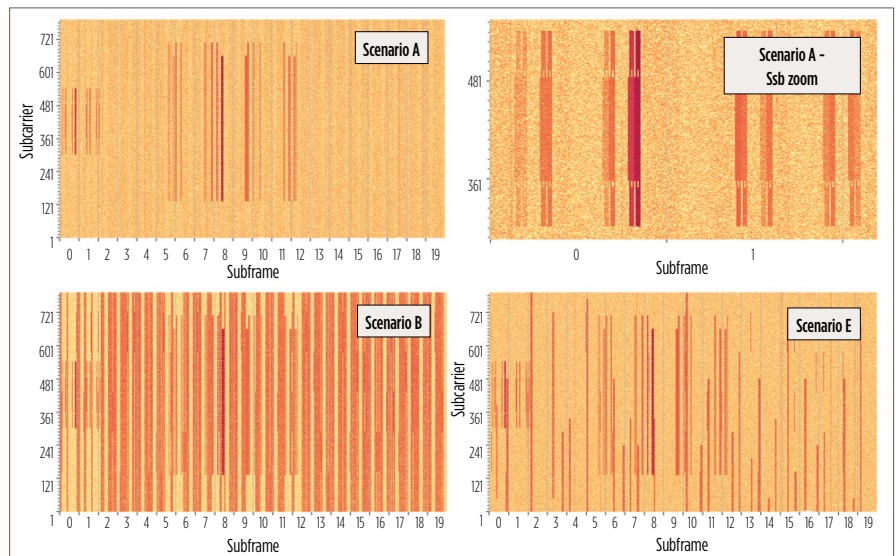


FIG. 2 SCENARI
Potenza ricevuta per resource element, per frame ricostruiti in diversi scenari di misura.

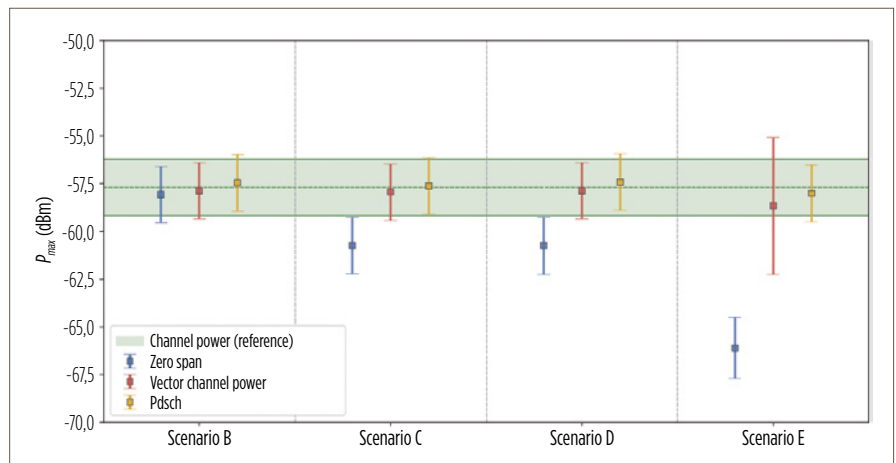


FIG. 3 CONFRONTO METODOLOGIE
Prestazioni delle diverse metodologie di estrapolazione

in scenari reali di rete rappresenta un contributo significativo sia per la validazione delle procedure di misura esistenti sia per il supporto allo sviluppo di future raccomandazioni tecniche e normative.

Un ulteriore elemento di rilievo è costituito dal confronto sistematico tra differenti metodologie di estrapolazione del campo elettromagnetico, applicate in condizioni operative eterogenee, caratterizzate da diverse tecniche e protocolli di forzatura del traffico. L'analisi comparativa ha evidenziato un complessivo e soddisfacente grado di accordo tra i risultati ottenuti, in particolare nelle configurazioni più rappresentative delle condizioni di utilizzo reale della rete, rafforzando l'affidabilità delle procedure di misura proposte per le attività di controllo ambientale.

Per quanto riguarda gli sviluppi futuri, saranno necessari studi ulteriori per

investigare in maniera sistematica gli effetti delle trasmissioni in modalità *multi-user MIMO* sulle procedure di misura e di estrapolazione, con riferimento alla generazione simultanea di fasci multipli e alle conseguenti implicazioni in termini di affidabilità e rappresentatività delle tecniche di valutazione dell'esposizione.

Settimio Pavoncello¹, Daniele Franci², Sara Adda³, Nicola Pasquino⁴, Maila Strappini¹, Stefano Coltellacci¹, Alessandro Di Nezza¹, Tommaso Aureli¹

1. Sezione provinciale di Roma, Arpa Lazio
2. Ispra
3. Arpa Piemonte
4. Università Federico II di Napoli

NOTE

¹ Linee guida Snpa 54-2025 "Linee guida per la misura dei campi elettromagnetici generati da sistemi di telecomunicazione in tecnologia 5G", www.snpambiente.it.

IL FUTURO CORRE SULLE ONDE: LA FORMAZIONE IN ARPAE

LA FORMAZIONE CONTINUA RAPPRESENTA IL PILASTRO FONDAMENTALE PER GARANTIRE L'ECCELLENZA TECNICA E LA TUTELA AMBIENTALE. ARPAE EMILIA-ROMAGNA HA ORGANIZZATO UN PERCORSO DI FORMAZIONE E AGGIORNAMENTO PROFESSIONALE, CHE HA VISTO LA PARTECIPAZIONE ATTIVA DI TECNICI DELLE VARIE AREE TERRITORIALI.

In un panorama tecnologico in costante evoluzione, la formazione continua rappresenta il pilastro fondamentale per garantire l'eccellenza tecnica e la tutela ambientale. Con questo spirito, Arpa Emilia-Romagna ha organizzato tra il 2024 e il 2025 un importante percorso di formazione e aggiornamento professionale dedicato alle misure dei campi elettromagnetici generati dalle reti in tecnologia 4G avanzato e 5G, che ha visto la partecipazione attiva di tecnici delle varie aree territoriali.

Il percorso di formazione teorico-pratica è iniziato nel 2024 con due giornate di approfondimento sull'uso dell'analizzatore di spettro vettoriale (strumento sofisticato e performante, atto a misurare i segnali complessi come il 5G) e dello scanner di rete vettoriale (utilizzato per decodificare i segnali di ultima generazione), strumenti di recente acquisizione da parte del Centro tematico regionale agenti fisici dell'Agenzia: entrambi gli eventi hanno visto la partecipazione di più di una ventina di operatori di Arpa che si occupano di

misure Cem nei vari territori provinciali e hanno incluso dimostrazioni pratiche con le apparecchiature citate. Come formatori sono intervenuti l'allora responsabile del Centro tematico regionale sugli agenti fisici Laura Gaidolfi e la tecnica Barbara Notari dell'Area prevenzione ambientale (Apa) Centro di Arpa, due operatori di Ispra e Arpa Lazio (Daniele Franci e Settimio Pavoncello), nonché esperti rappresentanti delle case costruttrici degli strumenti in esame.

A seguito di alcune misure sperimentali effettuate da un gruppo ristretto di operatori di Apa Centro e Apa Ovest, nel corso del 2025 è stato organizzato, con il supporto del Centro tematico, un gruppo di miglioramento con l'obiettivo di condividere l'esperienza maturata con gli altri tecnici dell'Agenzia che si occupano di misure di campi elettromagnetici. La formazione è stata distribuita in tre distinte giornate. Non si è trattato solo di un momento di apprendimento frontale, ma di un vero e proprio laboratorio di scambio; è stata inoltre un'occasione per condividere conoscenze tecniche

e confrontarsi sulle criticità territoriali con l'obiettivo di applicare in modo omogeneo le linee guida Snpa pubblicate a marzo 2025 (*Linee guida per la misura dei campi elettromagnetici generati da sistemi di telecomunicazione a tecnologia 5G*) e di acquisire le competenze necessarie per una accurata misura del segnale 5G, al fine di assicurare che ogni intervento dell'Agenzia rispetti i più elevati standard di precisione e affidabilità.

Proprio questa nuova tecnologia, con le sue architetture a "fascio dinamico" (*beamforming*), introduce sfide radicalmente diverse rispetto alle tecnologie precedenti (3G e 4G). Mentre nei sistemi precedenti il segnale veniva trasmesso con diagrammi di irradiazione di forma costante, il 5G direziona l'energia in particolare dove e quando è richiesto dagli utilizzatori. Questa evoluzione tecnologica impone una revisione radicale degli approcci alle metodologie di misura e diventa sempre più importante comprendere la dinamica temporale e spaziale del segnale.

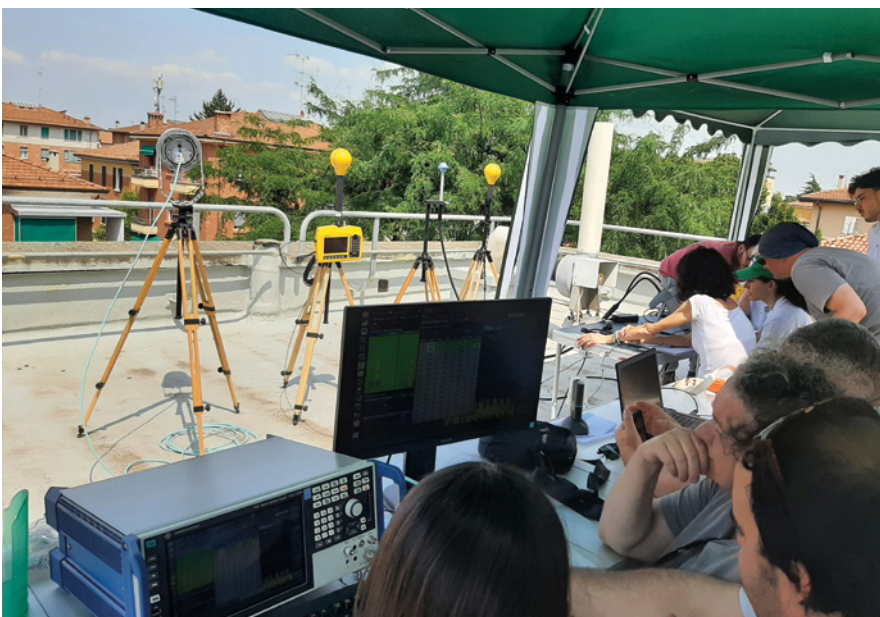




L'innovazione nelle metodologie di misura

Durante il lavoro del gruppo di miglioramento, il confronto tra gli operatori delle diverse sedi è avvenuto attraverso casi studio specifici: a una prima seduta prettamente teorica ha fatto seguito una seconda giornata sul campo, con indagini in un sito reale di telefonia, che ha interessato principalmente una stazione radio base posta nelle vicinanze della sede Arpae di Bologna. Durante le sessioni pratiche, i tecnici sono stati suddivisi in 4 gruppi che, a rotazione, si sono esercitati con altrettante catene di misura a banda

stretta, tra cui tre analizzatori di spettro portatili in dotazione ad Arpae da diversi anni mentre, presso una quarta postazione, essi hanno approfondito l'uso dell'analizzatore di spettro vettoriale recentemente acquistato. I due punti centrali del percorso formativo sono stati lo studio delle tecniche di estrapolazione del segnale e la complessa fase di elaborazione dei dati raccolti con i diversi strumenti di misura. Poiché il traffico dati emesso da un sistema 5G varia continuamente, è importante che i tecnici siano in grado di determinare i livelli massimi di esposizione reale al segnale 5G, al fine di verificare il rispetto dei limiti di legge. La condivisione delle esperienze maturate sul campo dalle



diverse sedi ha permesso di affinare gli algoritmi di calcolo e di ridurre i margini di incertezza nelle rilevazioni.

Verso una rete diffusa di competenze

“La forza dell’Agenzia risiede nella capillarità del suo personale”, è stato sottolineato durante la chiusura dei lavori nella terza e ultima giornata, in cui sono stati confrontati i risultati ottenuti tramite le diverse elaborazioni. “Creare una rete di operatori che parlano lo stesso linguaggio tecnico in tutte le sedi di Arpae è l’unica strada per governare l’innovazione tecnologica senza subirla”. Infine si evidenzia come tale esperienza, oltre a essere un momento di condivisione che ha permesso di affinare e uniformare l’efficacia dei controlli strumentali, è servita anche come preparazione all’interconfronto nazionale di Roma, dove Arpae ha partecipato con ben 3 squadre ottenendo ottimi risultati. L’integrazione delle informazioni tra le sedi ha inoltre permesso di mettere le basi per un’eventuale creazione di un protocollo di misura che si pone l’obiettivo di uniformare e migliorare l’efficacia dei controlli strumentali, in conformità con le più aggiornate normative tecniche nazionali e internazionali.

Prospettive

Il percorso di formazione sul 5G non si esaurisce con queste iniziative di formazione; anzi, queste devono intendersi come un punto di partenza per rendere sempre più omogenee le procedure. A tal fine, al termine di questo percorso formativo, è stata attivata una piattaforma permanente di confronto online, in cui i tecnici possono continuare a scambiarsi dati e quesiti tecnici in tempo reale.

In un’epoca in cui la connettività è diventata un bene primario, l’impegno di Arpae rimane quello di monitorare lo sviluppo delle infrastrutture con rigore scientifico. Grazie a questa iniziativa, l’Agenzia si conferma pronta a rispondere alle sfide della transizione digitale con competenza, trasparenza e un’organizzazione sempre più coesa.

Daniele Bontempelli, Barbara Notari

Unità specialistica campi elettromagnetici, Arpae Emilia-Romagna

LA VALUTAZIONE DELLA MASSIMA ESPOSIZIONE

ARPAE EMILIA-ROMAGNA NEGLI ULTIMI ANNI HA PRODOTTO ALCUNI CONTRIBUTI TECNICI SULLA VALUTAZIONE DELL'ESPOSIZIONE AI CAMPI ELETTROMAGNETICI IN UN DETERMINATO PUNTO O SITO DOPO L'INTRODUZIONE DEL 5G. LA SPERIMENTAZIONE HA EVIDENZIATO PROBLEMATICHE E ASPETTI DA CONSIDERARE PER UNA CORRETTA MISURAZIONE.

L'evoluzione delle reti di telecomunicazione verso lo standard 5G New Radio ha imposto un cambio di approccio nella sorveglianza dell'esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici: l'adozione di antenne attive *massive MIMO* e la tecnologia del *beamforming* hanno introdotto una variabilità spaziale e temporale del segnale che ha reso insufficienti le tecniche di misura utilizzate per le generazioni precedenti (2G-3G-4G). La sfida attuale per gli organi di controllo, amplificata dal recente innalzamento dei limiti di esposizione italiani a 15 V/m, risiede nella capacità di valutare non solo il livello di campo elettrico presente al momento della misura, ma soprattutto il livello massimo raggiungibile in condizioni di saturazione del traffico. Attraverso l'analisi di cinque contributi tecnici prodotti da Arpae, di cui uno risalente agli albori del 5G nel 2021 e gli altri più recenti (2024-2025), è possibile tracciare un percorso metodologico che parte dalla verifica della costanza dell'intensità dei canali di controllo Ssb (*Synchronization signal block*) in diverse condizioni di traffico [1], alla sperimentazione sul campo delle formule normative (Iec 62232 [2]) e di altre metodologie individuate nella linea guida Snpa [3], per arrivare alla decostruzione microscopica del segnale e alla gestione delle incertezze nei casi critici di "bordo cella", al fine di valutare la massima esposizione ai campi elettromagnetici in un determinato punto o sito.

La cornice normativa e la sfida dell'estrapolazione

A differenza dei segnali di controllo (emessi a potenza costante, come fasci che "spazzolano" il settore servito), i segnali di traffico 5G sono trasmessi solo su richiesta di servizio da parte



1



2

dell'apparecchio dell'utente e direzionati specificamente verso di esso. Per stimare la massima esposizione possibile ($E_{5G,max}$), la normativa tecnica internazionale (Iec 62232) ricalca la

- 1 Sito di Modena, collocazione delle sonde, con analizzatori portatili.
- 2 Analizzatore vettoriale.

procedura logica dell'estrapolazione dei sistemi pre-5G, stabilendo di misurare il campo elettrico associato al segnale di controllo Ssb ($E_{broadcast}$) e di moltiplicarlo per specifici fattori di scala che tengono conto della larghezza di banda totale e del guadagno dell'antenna.

La formula ufficializzata nella normativa internazionale è la seguente:

$$E_{5G,max} = E_{broadcast} \times \sqrt{F_{BW}} \times \sqrt{F_{PR}} \times \sqrt{F_{TDC}} \times \sqrt{BF^{-1}} \times \sqrt{F_{extbeam}}$$

dove $F_{extBeam}$ è dato dal rapporto tra il guadagno del fascio di traffico e quello dello fascio di controllo (Ssb) più in direzione del punto di misura e rappresenta l'effetto del *beamforming* nel punto di misura.

La determinazione sperimentale di questo fattore è uno degli obiettivi (e delle criticità riscontrate) nelle indagini condotte, mentre gli altri fattori derivano da caratteristiche intrinseche del segnale 5G e della modalità di trasmissione Tdd (*time division duplex*).

Il contesto operativo: indagine in un sito reale e complesso

Una prima indagine dell'Agenzia dell'Emilia-Romagna [4] si è concentrata su un sito complesso a Modena, caratterizzato dalla presenza di tutti i gestori e di tutte le tecnologie (dal vecchio Gsm al moderno 5G a 3.700 MHz), indagato inizialmente nel 2022 con strumentazione a banda larga e analizzatori di spettro scalari, poi riesaminato nel 2024 con strumentazione vettoriale.

Nel 2022, sebbene fosse possibile misurare il livello complessivo di campo, l'estrapolazione del segnale 5G alla massima potenza era impedita dalla mancanza di strumentazione capace di analizzare la struttura vettoriale del segnale. I livelli misurati ed estrapolati alla massima potenza, applicando per i sistemi pre-5G le procedure indicate nell'Allegato E della Norma Cei 211-7 [5], indicavano valori prossimi all'allora vigente valore di attenzione di 6 V/m, rendendo il sito critico anche in assenza dell'estrapolazione del segnale 5G (*tabella 1*).

Nel 2024 ritornare sul sito con la strumentazione vettoriale ha permesso non solo di fare un confronto con i nuovi limiti (valore di attenzione innalzato a 15 V/m e limiti assentibili [6] relativi ai singoli gestori telefonici), ma anche di testare nuove metodologie di estrapolazione.

È emerso che, nonostante l'aumento dei limiti permetta teoricamente potenze maggiori, i valori misurati ed estrapolati sono rimasti contenuti, inferiori alle stime preventive cautelative. Questo studio ha confermato un effetto già visto negli anni di esperienza di Arpa e cioè che i modelli teorici tendono a sovrastimare l'esposizione reale, seppur valutata con le tecniche di estrapolazione alla massima potenza.

Questa conclusione è vera in particolare considerando l'insieme delle tecnologie in gioco, mentre per quanto riguarda il segnale 5G, l'estrapolazione alla massima potenza porta a risultati abbastanza simili al contributo stimato, seppur evidenzi una certa difficoltà a individuare i segnali di controllo corretti da prendere come riferimento, come è stato approfondito nelle esperienze successive (*figura 1*).

Anno	Metodo (tipologia analizzatore)	$E_{RE,Ssb0}$ (V/m)	$F_{extBeam}$	n. sottoportanti	Alfa24	$E_{estrapolato}$ (V/m)	$E_{stimato}$ (V/m)
2022	portatile	0,019	17,9	1.944	0,31	2,0	1,9
2024	portatile	0,020	17,9				
2024	vettoriale	0,016	18,9				

TAB. 1 CAMPO ELETTRICO
Valori di campo elettrico 5G estrapolato.

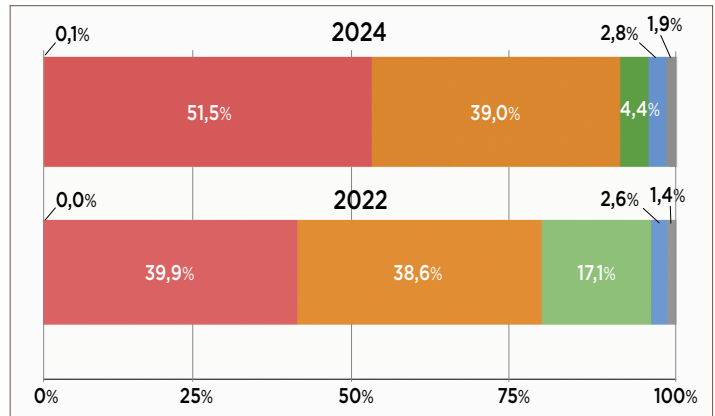


FIG. 1 CAMPO ELETTRICO

Valore di campo elettrico estrapolato alla massima potenza per ciascun sistema e gestore.

- Radio
 - Tv
 - Tim
 - WindTre
 - Vodafone
 - Iliad
 - Altro
- 2022
■ 2024

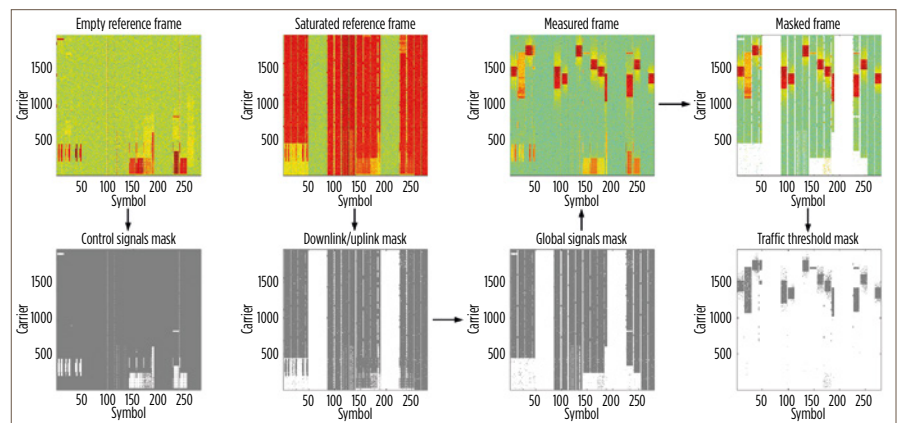
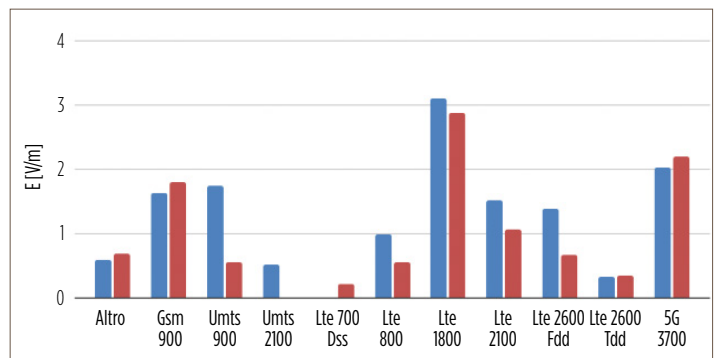


FIG. 2 ELABORAZIONE POTENZA
Procedura di elaborazione della potenza ricevuta per Re con script di Gnu octave.

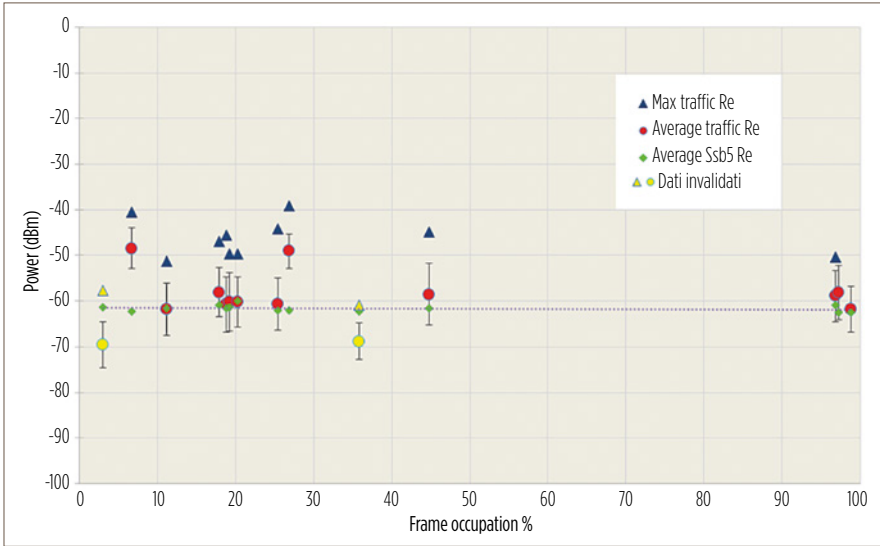


FIG. 3 POTENZA/SATURAZIONE
Parametri statistici dei valori di potenza dei Re in funzione della percentuale di occupazione della trama.

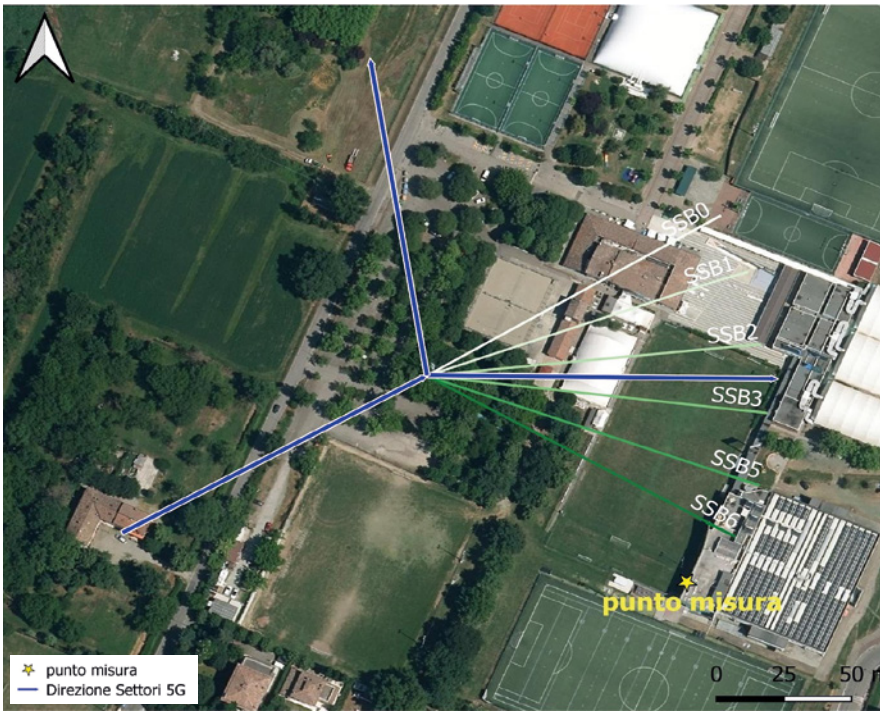


FIG. 4 DIREZIONI DI PUNTAMENTO
Sito di Modena: direzioni di puntamento delle antenne 5G e degli SSB della cella 1.

L'analisi microscopica: potenza correlata al traffico

Per colmare il divario tra valore previsto e misurato, è necessario comprendere la struttura del segnale 5G a livello di *resource elements* (Re), ovvero i “mattoni” elementari che compongono la trama del segnale. Qui si inserisce lo studio condotto a Reggio Emilia [7]: in un normale contesto urbano sono state usate diverse tecniche di forzatura del traffico tramite l’uso di smartphone commerciali, eseguendo *speed test* o scaricando file di grandi dimensioni, con l’ipotesi da verificare che la potenza media assegnata agli Re di traffico fosse costante indipendentemente dal carico della cella. È stata quindi analizzata la distribuzione di potenza dei Re acquisiti dall’analizzatore vettoriale durante la forzatura, processando i dati tramite algoritmi sviluppati *ad hoc* (con Gnu octave) con la finalità di distinguere le potenze ricevute sugli Re di controllo da quelle sugli Re di traffico e di analizzarle (figura 2).

I risultati dello studio hanno dimostrato che la distribuzione del valore medio della potenza associata ai Re di traffico non è costante e nemmeno risulta correlata in modo semplice alla quantità di traffico richiamato: infatti si è osservato che in condizioni di scarso traffico tale valor medio risulta anche di 10 dB più elevato di quello dei canali di controllo; tale differenza risulta maggiore di quella che si registra in condizioni di saturazione della cella 5G. L’implicazione per l’extrapolazione è critica: assumere un rapporto fisso tra la potenza associata ai canali di traffico e quella associata ai canali di controllo, basato su misure a basso traffico, potrebbe portare a sovrastimare l’esposizione, mentre misure in momenti di massimo traffico potrebbero non

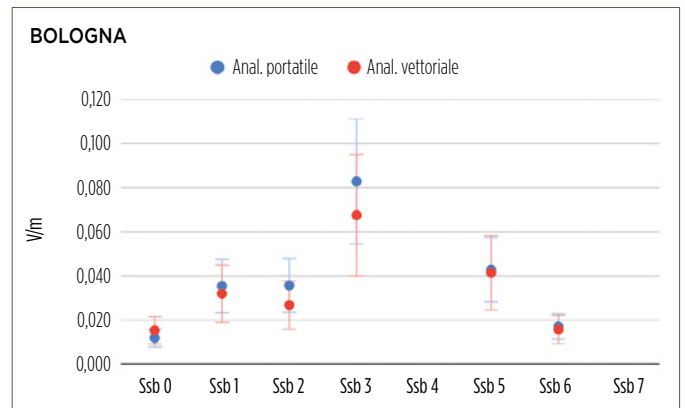
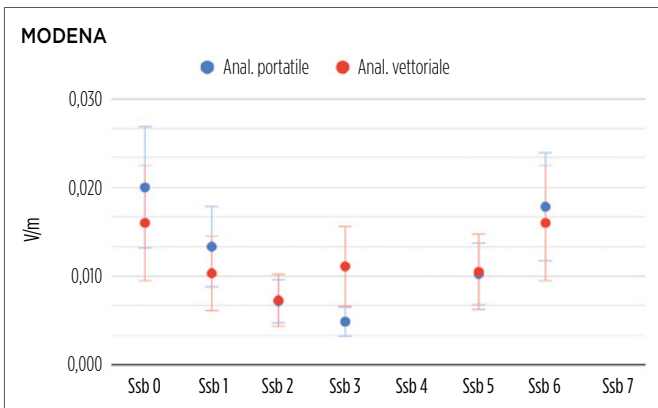


FIG. 5 BORDO CELLA
Campo elettrico per Re degli Ssb a “bordo cella” (Modena) e a “centro cella” (Bologna)



catturare i picchi di potenza istantanei dei singoli Re.
Le ragioni del comportamento osservato non sono chiare (*boosting* dinamico dei Re dovuto a interferenze sulle altre celle? variazione degli schemi di modulazione?) ma pongono l'accento sulla necessità di definire un protocollo di misura che individui univocamente il valore di campo del Re associato alla massima esposizione (*figura 3*).

La sfida del “bordo cella”: quando la geometria complica la misura

Riesaminando il sito di Modena [8] con la consapevolezza acquisita sull'analisi vettoriale, ci si è focalizzati sulle condizioni di misura non ideali: nella realtà, infatti, i punti di misura sensibili (come una terrazza o un'abitazione) raramente si trovano esattamente nella

direzione di massima irradiazione dell'antenna (*figura 4*).
Nel caso in esame, il punto di misura si trovava al bordo della cella servita da un'antenna 5G: l'analisi spettrale con decodifica dei canali di controllo ha rivelato che il fascio di controllo con direzione di puntamento più prossima al punto stesso (Ssb6) risultava ricevuto con meno potenza rispetto al lobo secondario del diagramma di irradiazione di un altro fascio di controllo (Ssb0). La difficoltà nell'individuare il fascio di controllo dominante per il punto di misura rende problematica l'applicazione della formula standard Iec.
In questo contesto, sono state confrontate cinque diverse metodologie di estrapolazione del contributo del segnale 5G, ottenendo risultati con elevata dispersione (da 0,13 V/m a 1,35 V/m) a fronte di un valore teorico atteso di 1,9 V/m (*figura 5*).

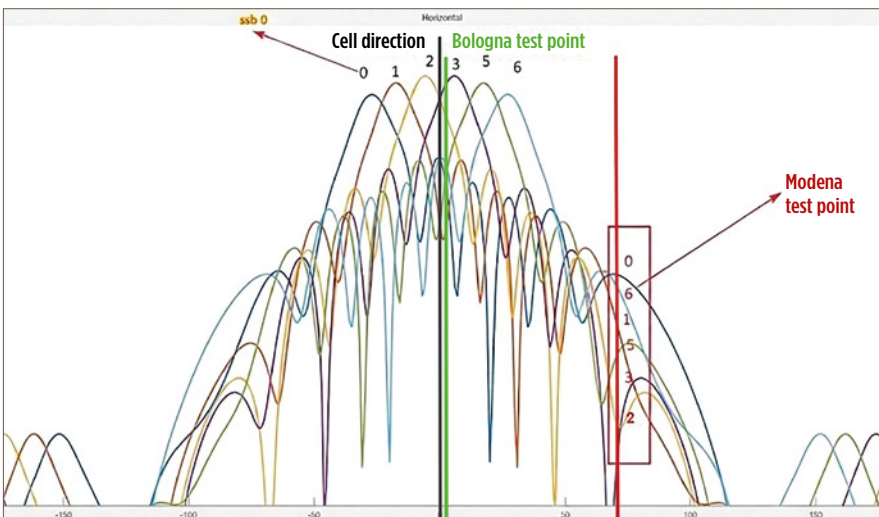


FIG. 6 IRRADIAZIONE
Diagrammi elementari di canali di controllo Ssb e azimut dei punti di misura.

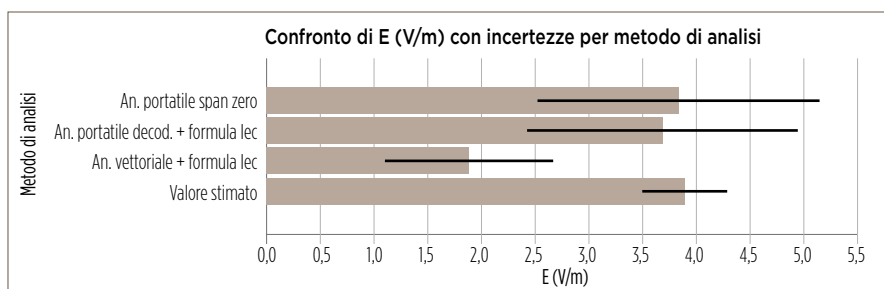


FIG. 7 CONFRONTO METODI DI ANALISI
Confronto tra valore di campo elettrico estrapolato e stimato.

La confusione nella gerarchia degli Ssb

Il cerchio si chiude con il lavoro presentato al Congresso Airp 2025 [9], che rappresenta la sintesi critica e l'evoluzione delle esperienze precedenti. In questo caso, il sito scelto (terrazza della sede Arpa di Bologna) si trovava quasi al centro della cella nella direzione di puntamento dell'antenna 5G, in condizioni di visibilità ottica. Si trattava dello scenario ideale per testare la formula Iec, considerando peraltro che il segnale 5G era trasmesso da un'antenna della stessa marca e modello dell'esperienza di Modena. Anche in questo scenario geometricamente semplice, la sequenza

di intensità degli Ssb misurata è risultata disattesa. Ci si aspettava una decrescenza ordinata basata sulla distanza angolare, invece i lobi secondari hanno nuovamente alterato la gerarchia dei segnali ricevuti (figura 6). Questo conferma che i diagrammi di irradiazione elementari degli Ssb possono essere complessi e che l'identificazione del "fascio dominante" richiesta dalla norma Iec è un punto di debolezza sistemico, non un'eccezione del "bordo cella". È emerso inoltre un problema di polarizzazione: i segnali di controllo e di traffico, pur trasmessi con la stessa polarizzazione ($\pm 45^\circ$), venivano ricevuti con intensità diverse sui piani orizzontale e verticale probabilmente a causa delle riflessioni urbane, complicando ulteriormente la stima del rapporto F_{extBeam} con strumentazione non isotropica istantanea.

L'efficacia della misura a span zero

Il dato più rilevante del lavoro del 2025 è il confronto tra i risultati delle diverse metodologie di misure e l'estrapolazione rispetto al valore teorico preventivo (3,9 V/m). Attraverso il Metodo Iec (con F_{extBeam} sperimentale), i risultati ottenuti risultano variabili e dipendenti dalla catena strumentale, con un ottimo accordo usando l'analizzatore portatile (3,7 V/m) ma una ampia sottostima usando l'analizzatore vettoriale (1,9 V/m) a causa della difficoltà nel catturare il picco simultaneo su tutti gli assi. La misura a span zero (metodologia formulata nella linea guida Snpa), che prevede la misura della potenza nel dominio del tempo durante la forzatura del traffico, ha fornito un risultato di 3,85 V/m, praticamente identico al valore previsto di 3,9 V/m (figura 7).

Sintesi critica e prospettive

L'insieme delle esperienze fatte negli ultimi anni da Arpae permette di formulare alcune conclusioni utili per il lavoro dei prossimi anni:

- limiti della formula Iec: l'applicazione della formula Iec 62232 (basata sugli Ssb) è di difficile applicazione in campo. La dipendenza dai lobi secondari degli Ssb e la variabilità del parametro F_{extBeam} rendono il metodo intrinsecamente instabile
- efficacia dell'approccio delle linee guida Snpa: le linee guida Snpa, recepite nel

lavoro del 2025, introducono metodologie alternative. La tecnica a span zero con forzatura del traffico (vedasi formula 2 in [9]) si è infatti dimostrata la più robusta e ripetibile, superando la necessità di decodificare la complessa gerarchia dei fasci e misurando direttamente il campo elettrico totale rilevato in un certo punto di indagine durante la condizione di massimo traffico

- la necessità della forzatura del traffico: tutte le esperienze confermano che senza un'efficace forzatura del traffico (tramite terminali commerciali, o meglio predisposti *ad hoc*, e download massivi), non è possibile valutare la massima esposizione. Tuttavia, la stabilità del traffico richiamato rimane un punto critico: l'uso di *speed test* o trasferimenti di file implica una variabilità temporale che richiede operatori esperti per essere gestita
- rispetto dei limiti di legge: in tutti i casi esaminati (Modena, Reggio Emilia e Bologna), anche forzando il sistema al massimo e utilizzando le stime più conservative, i valori misurati ed estrapolati rimangono ampiamente al di sotto del valore stimato teorico e sempre inferiori al valore di attenzione di 15 V/m. In conclusione, la sperimentazione condotta da Arpae indica che, nonostante la complessità dell'architettura del segnale 5G, la verifica sperimentale può

essere semplificata. Le ultime evidenze del 2025 suggeriscono che al momento un approccio preferenziale per controlli ambientali più rapidi e cautelativi sia l'abbandono della ricerca del "fascio di controllo" a favore di una misura integrata della potenza ricevuta durante la forzatura del traffico (modalità *span zero*). Si sottolinea, tuttavia, che per accertare l'effettiva condizione di massima esposizione è importante verificare, tramite tecniche di misura vettoriali, che tale forzatura induca l'effettivo riempimento della trama.

Barbara Notari

Arpae Emilia-Romagna

Si ringrazia per la collaborazione il gruppo di lavoro composto da Matteo Tiberti, Martino Cremona, Irene Taddei, Emanuele De Sena, Massimo Tedeschini, Simone Colantonio, Roberto Tinarelli, Elena Fusillo e Andrea Caccoli.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Tiberti M. et al., 2021, "Misura in campo del segnale 5G sulla Srp Tim di via Calabria Vecchia a Granarolo (BO)", *Atti Convegno nazionale Airp di radioprotezione*, Roma, 29 settembre-1 ottobre 2021.
- [2] Iec 62232, *Methods for the assessment of electric, magnetic and electromagnetic fields associated with human exposure*, 2020, Technical Report TC 106.
- [3] Snpa, 2025, *Linee guida Snpa per la misura dei campi elettromagnetici generati da sistemi di telecomunicazione in tecnologia 5G*, Linee guida Snpa n. 54/2025, Isbn 978-88-448-1249-2.
- [4] Notari B. et al., 2024, "Studio di un sito Srp complesso con 5G: dalle misure all'estrapolazione alla configurazione autorizzata nell'ottica delle verifiche per il rispetto del 'nuovo' valore di attenzione", *Atti Convegno nazionale Airp di radioprotezione*, Lucca, 25-27 settembre 2024.
- [5] Cei 211-7/E 2019-11, *Guida per la misura e per la valutazione dei campi elettromagnetici nell'intervallo di frequenza 10 kHz-300 GHz con riferimento all'esposizione umana. Appendice E: Misura del campo elettromagnetico da stazioni radio base per sistemi di comunicazioni mobili (2G, 3G, 4G, 5G)*.
- [6] Legge 214/2023 e Dlgs 48/2024.
- [7] Tiberti M. et al., 2024, "Analisi della distribuzione dei livelli di potenza dei resource elements 5G-NR in diversi scenari di traffico attraverso misure in campo con analizzatore vettoriale", *Atti VIII Convegno nazionale Agenti fisici*, Pavone Canavese, 27-29 novembre 2024.
- [8] Notari B. et al., 2024, "Approfondimenti del segnale 5G NR sub-6 GHz in un sito reale: confronti tra misure con analizzatori di spettro, portatile e vettoriale, al fine dell'estrapolazione alla massima potenza", *Atti VIII Convegno nazionale Agenti fisici*, Pavone Canavese, 27-29 novembre 2024.
- [9] Notari B. et al., 2025, "Criticità nell'individuazione del canale di controllo Ssb ai fini di una corretta estrapolazione del segnale 5G", *Atti XXXIX Congresso nazionale Airp di Radioprotezione*, Padova, 29-31 ottobre 2025.

MISURE DI SEGNALI 5G IN PROPAGAZIONE NLOS

UNO STUDIO AFFRONTA LE SFIDE DELLA MISURA DEI CAMPI ELETTROMAGNETICI 5G IN BANDA MILLIMETRICA (FR2), ANALIZZANDO SCENARI LOS E NLOS. ATTRAVERSO TEST SPERIMENTALI E DIVERSE CONFIGURAZIONI D'ANTENNA, PROPONE UNA METODOLOGIA AFFIDABILE PER VALUTARE L'ESPOSIZIONE E VALIDARE I PARAMETRI DI RETE.

Nonostante gli impianti 5G che operano nella banda delle onde millimetriche (Fr2) non siano ancora molto diffusi in Italia, è essenziale prestare attenzione alla misurazione dell'esposizione ai campi elettromagnetici generati da questi sistemi, in particolar modo nei casi di propagazione *non in linea di vista* (Nlos).

La letteratura scientifica ha proposto numerose soluzioni pratiche [1,2,3] per valutare con precisione il livello massimo del campo nei punti di misurazione dei sistemi 5G nella banda Fr1 (sub-6 GHz). Al contrario, l'adozione della banda Fr2 è stata lenta a causa della complessità della tecnologia delle onde mm-wave e della limitata diffusione di dispositivi mobili compatibili con questa banda. Lo studio presentato è stato il primo ad affrontare le sfide legate a tale tipologia di misurazioni, proponendo una metodologia efficace per ottenere risultati affidabili.

Setup e metodologia delle misure

Il sito selezionato per le misure si trova nel comune di Ivrea e ospita un impianto 5G a 27,4 GHz di proprietà di Vodafone. Sono stati individuati quattro punti di misura con caratteristiche di visibilità

diverse rispetto al punto di emissione, comprendendo sia scenari in piena linea di vista che in totale non linea di vista (da P1 a P4 in *figura 1a*).

La visibilità relativa tra la stazione radio base (Bs) e i punti di misura è mostrata in *figura 1b*, dove i punti colorati in verde sono in condizione Los e quelli colorati in rosso in condizione Nlos. Le principali caratteristiche del segnale trasmesso dalla Bs sono riportate nella *tabella 1*.

Per completezza, in *figura 2*, è riportata la configurazione della trama.

Per impostare il collegamento con la Bs e forzare il flusso di dati di *downlink* è stato utilizzato un telefonino (*user equipment*, Ue) in banda Fr2 e dotato di una funzionalità che permette di monitorare i *resource block* (Rb) trasmessi, al fine di verificare che la trama fosse piena durante l'acquisizione della traccia.

Le misurazioni sono state eseguite con un analizzatore di spettro Keysight N9960B Vsa, che poteva essere collegato o a un'antenna omnidirezionale o a una direttiva, come osservabile in *figura 3*:
- antenna Steatite Q-Par, polarizzata linearmente, omnidirezionale, operante nella banda di frequenza da 26 GHz a 40 GHz

- antenna Horn Schwarzbeck, modello Bba9120I, funzionante nella banda di frequenza da 3 GHz a 40 GHz.

L'analizzatore è stato configurato in modalità *zero span* (Zs) alla frequenza centrale degli Ssb, e sono state acquisite tracce in Average (Avg), MaxHold (Mh), Clear-Write (Cw):

- la traccia Avg è ottenuta facendo la media di n=10 tracce
- la traccia Mh mostra il massimo livello che il segnale raggiunge nelle n tracce
- la traccia Cw rappresenta l'ultima delle n tracce.

Durante la campagna di misura sono stati eseguiti test progettati per acquisire quante più informazioni possibili sia sui canali di controllo nell'Ssb sia sul canale di traffico:

- test *Idle*: l'Ue è in modalità inattiva, ovvero non ci sono dati di traffico scambiati con la Bs e quindi è possibile misurare solo la potenza degli Ssb
- test *traffic*: l'Ue è configurato per forzare

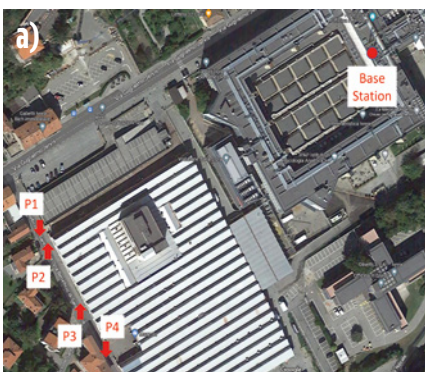


FIG. 1 SITO DI MISURA

I pixel verdi indicano i punti nella propagazione Los, quelli rossi nella propagazione Nlos.

a) Vista satellitare del sito di misura.

b) Visibilità tra Bs e punti di misura.

Parametri	Valori
Center frequency fc	27.400 GHz
Bandwidth B	200 MHz
Duplexing	Time-domain duplex (Tdd)
Downlink/uplink sequence	D-D-D-S-U
Special slot	10:2:2
Ftdc	0,742
Ssb sub-carrier spacing Δf	240 kHz (μ = 4)
Traffic sub-carrier spacing Δf	120 kHz (μ = 3)
Ssb allocation [2, Δ4]	Case E
Ssb slots	8
Ssb per slot	4
Ssb periodicity	20 ms
Downlink traffic	full frame
Mimo configuration	Grid of beams

TAB. 1 CONFIGURAZIONE

Configurazione della stazione radio base (Bs).

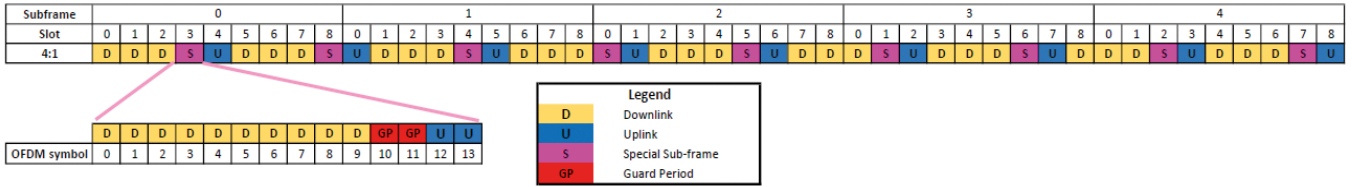


FIG. 2 TRAMA
Configurazione della trama.



FIG. 3 STRUMENTI
Antenne di misura e analizzatore di spettro vettoriale.

la trasmissione in *downlink* ad alta velocità utilizzando il software iPerf [4]
 - test *download (Dl) speed*: l'Ue viene gestito tramite applicazioni specifiche, come la *Ookla speedtest* [5], che si occupa di attivare il collegamento con la Bs e di indirizzare il fascio verso la Ue
 - test *upload (Ul) speed*: la stessa applicazione utilizzata per il test *download speed* viene utilizzata per forzare il traffico nella tratta *uplink*.

Risultati sperimentali

La figura 4a mostra 2 ms di una traccia Mh acquisita in P1 con l'antenna direttiva.
 Poiché non c'è traffico tra la Ue e la Bs, la potenza ricevuta si riferisce solo agli Ssb. La figura mostra un cluster di blocchi Ssb. Se ingrandiamo uno dei blocchi (figura 4b), vediamo che esso è composto da quattro diversi livelli di potenza, ciascuno dei quali rappresenta un Ssb associato a un diverso raggio della griglia. Ciascun Ssb ha una durata di circa 19 μs, vicino ai 16,8 μs attesi.
 In figura 5 è mostrato uno zoom di 1 ms di una traccia Avg registrata in P1 durante il test del traffico.
 La traccia mostra chiaramente la sequenza degli slot D-D-D-S-U di figura 2. La durata di ciascun slot D è

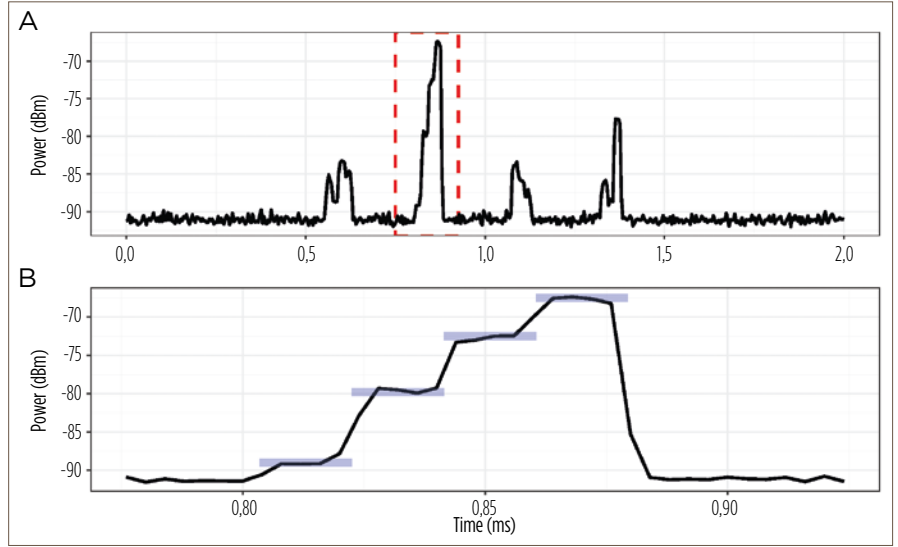


FIG. 4 SSB
Misure degli Ssb nel punto P1 con antenna direttiva.

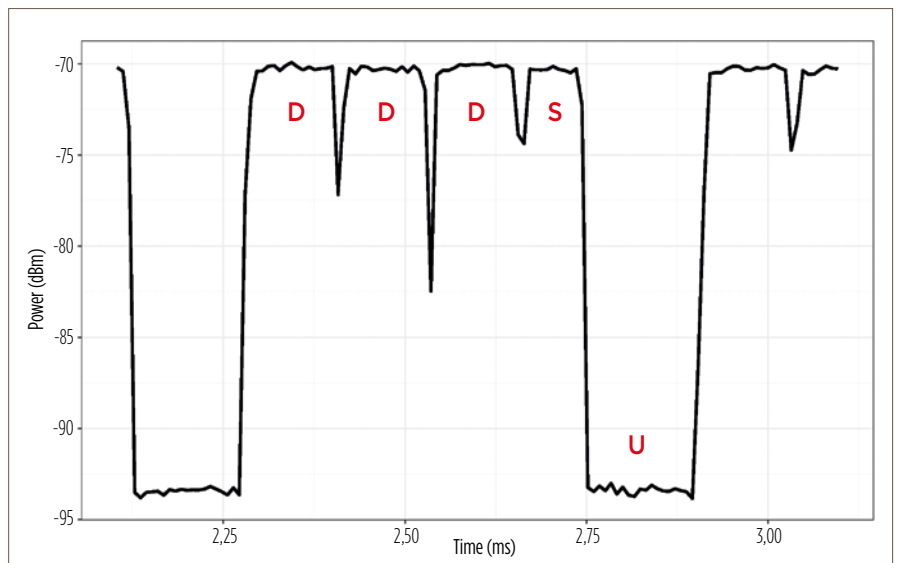


FIG. 5 RILEVAMENTO DELLO "SPECIAL SLOT"

TAB. 2
LIVELLI DI CAMPO

Confronto tra livelli di campo in dBm tra antenna direttiva e antenna omnidirezionale (Bs).

Point	Antenna		
	Omnidirectional	Directional	
		Base station	Max power
P1	-77,02	-69,78	N/A
P2	-88,67	-87,35	N/A
P4	-89,83	-92,83	-82,69

compresa tra 112 e 119 μ s, vicino ai 116,6 μ s come previsto per il segnale in esame. Le misurazioni Zs possono essere utilizzate anche per studiare le differenze tra i segnali di controllo (figura 4) e il traffico (figura 5). Nel caso in questione, i canali di controllo e di traffico vengono trasmessi sugli stessi raggi.

Questa analisi mostra che le misurazioni scalari possono essere efficaci nel validare la configurazione fornita dall'operatore/ produttore riportata nella tabella 1. La figura 6 mostra tracce in Zs della potenza misurata con l'antenna omnidirezionale in ciascun punto di misurazione con le tre modalità di traccia (Cw, Avg e Mh), per ciascun test.

Traffico

In P1, quando il traffico *downlink* viene forzato si osserva che la porzione *downlink* del frame è piena e i Re vengono trasmessi a potenza costante, con un livello quasi identico in tutte e tre le modalità di acquisizione. Esiste anche traffico *uplink* generato dall'Ue che viene catturato dall'antenna ricevente.

La potenza misurata dei Re di *uplink* dipende dalla distanza tra la Ue e l'antenna ricevente.

Passando da una propagazione Los completa (P1) a una condizione quasi Nlos (P2), la potenza del traffico *downlink* diminuisce perché una porzione rilevante viene attenuata dall'edificio che blocca parzialmente la propagazione tra Bs e Ue.

In questo scenario, la potenza di *uplink* diventa dominante rispetto al collegamento *downlink*.

In P3 non è stato possibile effettuare misurazioni poiché non è stato possibile

stabilire la connessione *downlink* a causa delle forti condizioni Nlos.

In P4 (Nlos con riflessioni e diffrazione), il livello di potenza del canale *downlink* è simile a quello misurato in P2.

Download (DL) speed

I risultati sono simili a quelli ottenuti nel test del traffico, l'unica differenza è che è stata ricevuta una certa potenza anche in P3, sebbene sia relativa al canale di *uplink*, mentre per il canale di *downlink* c'è solo il rumore di fondo come previsto. Infine sono stati eseguiti test di "traffico" con l'analizzatore collegato sia all'antenna direttiva sia a quella omnidirezionale per valutare la differenza nei livelli di potenza tra i punti di misurazione Los e Nlos. I risultati sono riportati nella tabella 2 per la traccia Avg.

L'analisi dei risultati riportati in tabella 2 mostra che quando si ha a che fare con uno scenario Los, l'uso di

antenne direttive può garantire risultati di misura più accurati.

Al contrario, le antenne direttive in caso di propagazione Nlos non garantiscono che la densità di potenza proveniente da direzioni diverse a causa delle riflessioni venga misurata interamente.

In tale condizione, dovrebbero essere preferite le antenne omnidirezionali, prestando attenzione al contributo di *uplink* quando si eseguono misurazioni che non possono separare la trasmissione di *uplink* dalla trasmissione di *downlink*.

Sara Adda¹, Valeria Bottura², Stefano D'Elia³, Nicola Pasquino⁴, Riccardo Suman⁵, Mattia Vaccaroni¹

- 1. Arpa Piemonte
- 2. Arpa Valle d'Aosta
- 3. Vodafone networks, mobile access engineering
- 4. Dieti, Università degli studi di Napoli Federico II

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Adda S., Aureli T., Bastonero S., D'Elia S., Franci D., Grillo E., Migliore M.D., Pasquino N., Pavoncello S., Schettino F., Schiavoni A., Scotti R., Suman R., Vaccaroni M., 2022, "Methodology based on vector and scalar measurement of traffic channel power levels to assess maximum exposure to electromagnetic radiation generated by 5G NR systems", *Ieee Access*, vol. 10, pp. 12125-12136.
- [2] Adda S., Aureli T., D'Elia S., Franci D., Grillo E., Migliore M.D., Pavoncello S., Schettino F., Suman R., 2020 "A theoretical and experimental investigation on the measurement of the electromagnetic field radiated by 5G base stations", *Ieee Access*, vol. 8, pp. 101448-101463.
- [3] Betta G., Capriglione D., Cerro G., Miele G., Migliore M.D., Šuka D., 2022, "Experimental analysis of 5G pilot signals' variability in urban scenarios", *Ieee*.
- [4] iPerf software, <https://iperf.fr>.
- [5] Ookla speedtest, www.speedtest.net

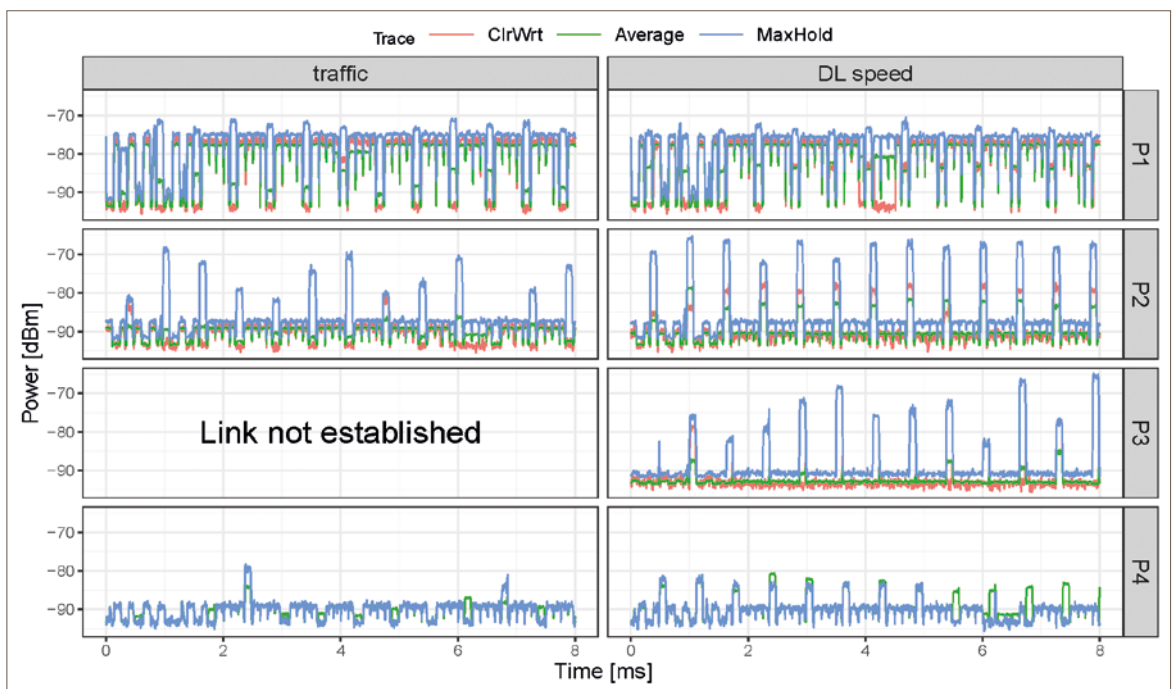


FIG. 6 ZERO SPAN

Tracce in Zs con antenna omnidirezionale per ogni tipo di traccia in ogni.

L'ESPOSIZIONE AI CEM IN VENETO DALL'AVVENTO DEL 5G

DAL 2009 ARPA VENETO MONITORA L'ESPOSIZIONE AI CAMPI ELETTROMAGNETICI NEI CAPOLUOGHI REGIONALI TRAMITE MODELLISTICA E DATI DEI CENSIMENTI ISTAT. L'EVOLUZIONE DELL'INDICATORE DAL 2009 AL 2025, CONFRONTANDO SCENARIO PRE-5G, DIFFUSIONE DELLA RETE E RISULTATI DELLE MISURE SUL CAMPO.

Nel mondo delle telecomunicazioni italiane, il 2019 è l'anno del 5G: una nuova tecnologia per la telefonia mobile che prometteva di rivoluzionare ancora una volta la nostra vita, con una maggiore velocità di connessione, un tempo di risposta più basso (la cosiddetta latenza) e un'interazione tra dispositivi e sensori in grado di automatizzare molte attività che comunemente svolgevamo. A distanza di sette anni, molte di quelle promesse sono state solo parzialmente mantenute, anche se l'installazione della rete 5G è andata avanti, rendendo la diffusione degli impianti dotati di questa tecnologia sempre più capillare.

Ma come è aumentata l'esposizione della popolazione dopo l'avvento di questa tecnologia? In questo articolo tenteremo di rispondere basandoci sulla realtà del territorio veneto. Nella regione, sin dal 2001, è stato implementato un catasto delle sorgenti fisse di telecomunicazioni, che dopo diverse evoluzioni è ora popolato attraverso l'applicativo Nirweb direttamente dai gestori di telefonia mobile, ogni qual volta vogliono richiedere l'installazione di un nuovo impianto o la modifica di uno esistente. Tale database, denominato Dbnir, oltre a fungere da catasto per tutti gli enti comunali, regionali e nazionali (da Nirweb si estraggono infatti i dati per popolare il catasto elettromagnetico nazionale, Cen, di Ispra), è utilizzato da Arpa Veneto per le valutazioni modellistiche che sono alla base dei pareri previsti dalla legislazione nazionale per le nuove installazioni o la modifica di stazioni radio base (Srb) esistenti.

Indicatore di esposizione

I dati contenuti nel database inoltre sono stati utilizzati, a partire dal 2009, per calcolare un indicatore dell'esposizione della popolazione, che correla i dati dei censimenti Istat realizzati negli anni

al campo elettrico simulato, al fine di poterne valutare l'evoluzione nel tempo. L'indicatore è stato calcolato nei sette comuni capoluogo, adottando la seguente procedura: innanzitutto si è partiti dallo studio dell'edificato concentrandosi sulla verifica della correttezza di alcune caratteristiche fondamentali degli edifici quali: piede, altezza, gronda e soprattutto la destinazione d'uso; nel calcolo dell'indicatore infatti vengono considerati solamente gli edifici civili, commerciali, lavorativi e industriali, cioè quelli in cui è possibile la permanenza prolungata nel tempo. Nella fase successiva è stata eseguita la selezione degli impianti di interesse per il calcolo, includendo solamente le Srb attive nel territorio del rispettivo comune capoluogo e nel raggio di 500 metri oltre i confini comunali, visto che anche il loro contributo può risultare significativo nel calcolo dell'esposizione.

Successivamente al controllo degli edifici e alla selezione degli impianti, si è proceduto con il calcolo dell'indicatore tramite una funzionalità apposita presente all'interno dell'applicativo

NirGis2, che è il software open source sviluppato internamente ad Arpa Veneto per la simulazione dei campi elettromagnetici a radiofrequenza, funzionante in ambiente Qgis. Tale applicativo simula il campo elettrico generato all'interno degli edifici dalle diverse Srb, senza tener conto dell'attenuazione fornita dalle pareti e a un'altezza di 5 metri sopra il livello del suolo, che corrisponde a considerare il primo piano come piano di residenza. Questa scelta è giustificata da un lato da un'analisi sull'edificato dei comuni capoluogo che ha dimostrato come il primo piano sia quello più popolato, dall'altro da uno studio eseguito sul comune di Verona [1], che ha mostrato come i risultati dell'indicatore di esposizione ottenuti considerando l'intera popolazione residente all'altezza di 5 metri siano analoghi a quelli ottenuti ripartendo la popolazione su tutti i piani di residenza.

Avendo quindi attribuito un valore di campo elettrico a ogni edificio significativo, è possibile calcolare il campo medio all'interno di ogni sezione

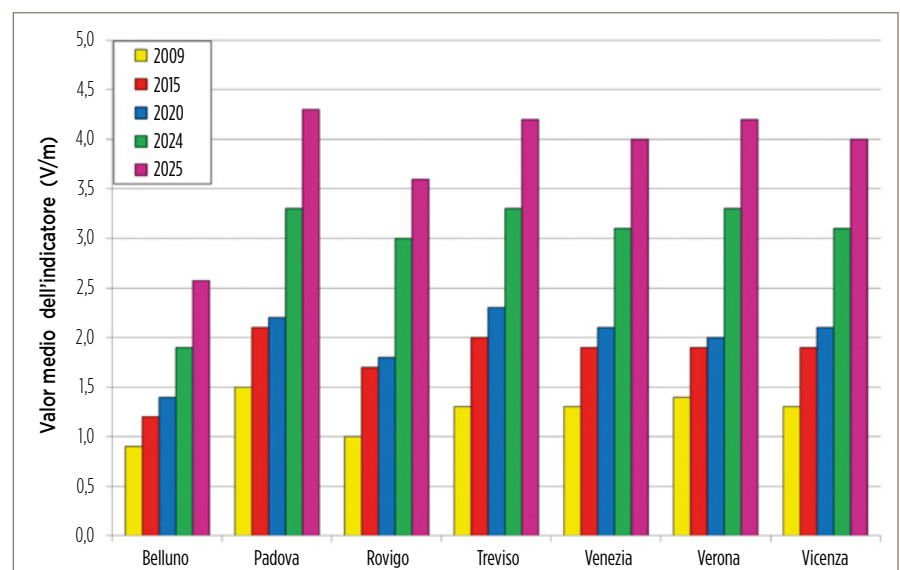


FIG. 1 CAMPO ELETTRICO

Confronto dei valori medi dell'indicatore di esposizione valutato in diversi anni per i 7 comuni capoluogo del Veneto

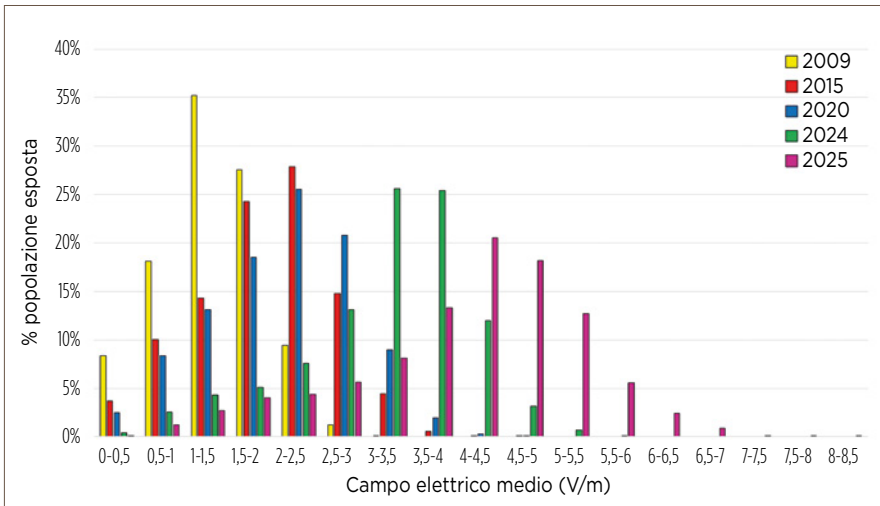


FIG. 2 CAMPO ELETTRICO E POPOLAZIONE ESPOSTA
 Indicatore dell'esposizione della popolazione al campo elettrico calcolato nei 7 comuni capoluogo del Veneto (anni 2009, 2015, 2020, 2024 e 2025).

di censimento Istat, e associare tale valore alla popolazione residente all'interno delle sezioni (reperita negli anni dai diversi censimenti, l'ultimo risalente al 2021 [2]), ottenendo l'indicatore di esposizione.

L'evoluzione nel tempo e l'avvento del 5G

Come vedremo, tali analisi sono state ripetute nel 2009, 2015, 2020, 2024 e 2025, quindi per valutare l'effetto dell'avvento del 5G sull'esposizione va considerato il confronto tra i dati ottenuti nel 2024-2025 e quelli degli anni precedenti (l'indicatore del 2020 considera gli impianti installati fino a fine 2019, e a quella data il numero di stazioni con tecnologia 5G in Veneto era molto limitato).

Per le analisi statistiche dettagliate dei risultati ottenuti si rimanda ai risultati presentati nel corso del convegno Airp 2025, tenutosi a Padova a fine 2025 [3]. Ci si soffermerà ora sui risultati contenuti nelle figure 1 e 2, che mostrano nei diversi anni di calcolo rispettivamente l'andamento del valor medio dell'indicatore nei sette comuni capoluogo del Veneto e l'indicatore complessivo, ottenuto aggregando i dati ottenuti nei sette comuni. È immediato valutare come i valori dell'indicatore calcolato nel 2025 siano quasi sempre doppi rispetto a quelli calcolati nel 2020, che come detto rappresenta la situazione pre-avvento del 5G. Anche la figura 2, oltre a mostrare come negli anni mediamente la popolazione risulti esposta a valori di campo sempre più elevati, evidenzia che se nel 2020 la maggior parte della popolazione era esposta a

valori di campo compresi tra 2 e 2,5 V/m, nel 2025 tale valore si è spostato tra 4 e 4,5 V/m.

Si fa inoltre notare come nell'indicatore ci sia stato un forte aumento tra il 2024 e il 2025, principalmente per l'effetto dell'innalzamento dei limiti dei campi elettromagnetici, con il valore di attenzione/obiettivo di qualità passato da 6 a 15 V/m a fine aprile 2024, per effetto della L. 214/23.

Ma tale incremento, calcolato con simulazioni che si basano sulle potenze richieste dai gestori in sede di autorizzazione, è effettivamente visibile nell'attività di misura? La risposta in base ai dati disponibili a oggi, sembrerebbe essere no. A titolo di esempio si mostra in figura 3 l'andamento del campo elettrico medio misurato nei monitoraggi effettuati dal 2016 al 2025 nella provincia di Vicenza. Il grafico mostra sì una tendenza all'aumento, fisiologica considerando che anche le potenze associate agli altri sistemi, in particolare 4G, sono aumentate negli ultimi anni, ma non paragonabile a quella riscontrata sull'indicatore. Se si aggregano i dati fino al 2019 e dal 2020 in poi, si vede

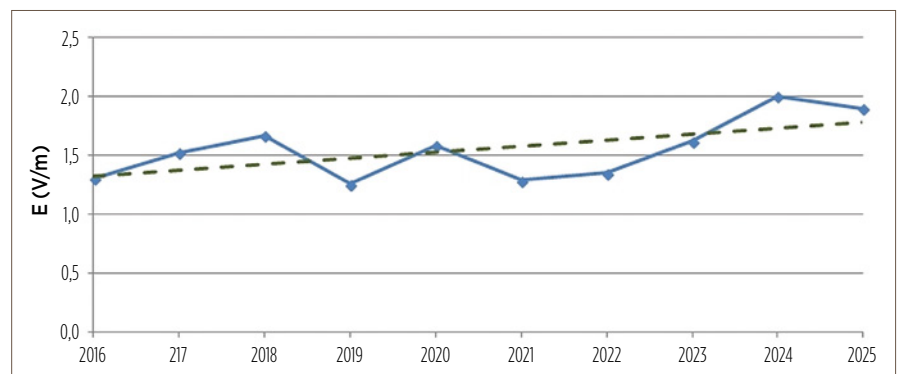


FIG. 3 CAMPO ELETTRICO MEDIO
 Campo elettrico medio riscontrato nei monitoraggi di campo elettrico realizzati in provincia di Vicenza negli ultimi 10 anni.

che il campo medio è passato da 1,5 a 1,6 V/m, e anche limitando la media agli ultimi 3 anni, in cui i gestori hanno concentrato maggiormente l'installazione dei sistemi 5G a 3.700 MHz, il valore diventa 1,8 V/m. Un risultato analogo si era riscontrato in una serie di misure puntuali mostrate nel corso del convegno Airp 2025 [3], realizzate negli stessi punti in una sezione di censimento di Vicenza nel 2024 e nel 2025, per valutare se a un incremento del campo elettrico simulato nei due anni corrispondesse un analogo aumento di quello misurato. Il risultato finale è stato che a un incremento del campo elettrico ottenuto in simulazione del 29%, è corrisposto un aumento medio del campo misurato del 5%, a indicare nuovamente come a una crescita sostanziale della potenza autorizzata sia corrisposta una variazione modesta del campo elettrico reale.

Commento ai risultati

Ma a cosa può essere ascritta una differenza così importante? Le cause principali vanno ricercate probabilmente nel peculiare funzionamento dei sistemi 5G a 3.700 MHz e nel loro sottoutilizzo allo stato attuale. Questa tecnologia infatti utilizza quasi sempre antenne massive MIMO, che grazie ad algoritmi di beamforming riescono a generare lobi di radiazione specifici per illuminare le aree di spazio in cui sono presenti gli utenti che richiedono il servizio; questo si traduce mediamente in una riduzione del tempo di esposizione della popolazione, che sempre più spesso non viene considerato nelle richieste di autorizzazione fatte dai gestori. Per quanto riguarda invece lo scarso utilizzo della rete 5G, questo lo si può vedere dai dati che i gestori forniscono sull'andamento delle potenze degli impianti 5G nei database istituiti ai sensi del Dm 02/12/2014. Il risultato

di questi due fattori lo si può notare nei monitoraggi a banda stretta realizzati su questi tipi di segnale, grazie alla strumentazione acquisita da Arpa Veneto nell'ambito dell'ultimo progetto nazionale di ricerca Cem. In figura 4 viene mostrato, in un punto in cui è stato realizzato un monitoraggio a banda stretta, l'andamento del campo elettrico totale e la componente aggregata del solo 5G a 3.700 MHz installato in zona da 3 gestori su 4.

È quindi lecito attendersi nei prossimi anni, con uno sfruttamento più marcato delle potenzialità delle reti 5G legate all'introduzione negli smartphone dell'intelligenza artificiale e delle sue applicazioni, un aumento del campo elettrico, anche se probabilmente non tale da pareggiare quello riscontrato nel calcolo dell'indicatore di esposizione. Da un altro punto di vista, il margine rilevato nelle valutazioni modellistiche è confortante e sottolinea una volta di più l'importanza dell'attività preventiva svolta dal sistema agenziale su questo tipo di matrici.

Giuseppe Lorenzetto, Alexandru Timis, Flavio Trotti

Arpa Veneto

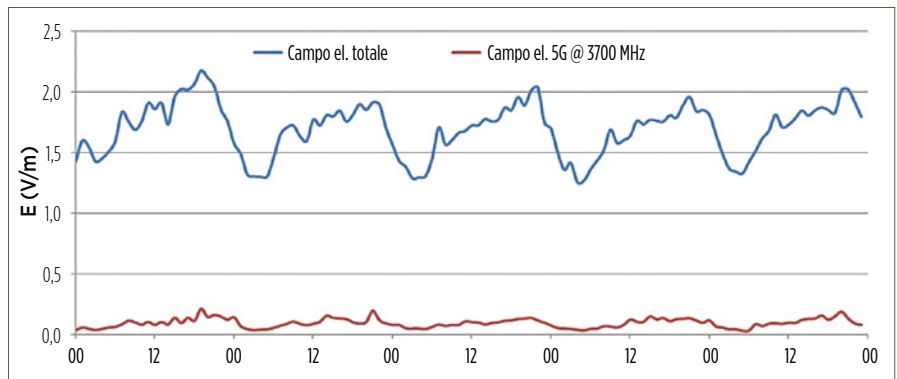


FIG. 4 5G E CAMPO ELETTRICO TOTALE
confronto tra campo elettrico totale e dovuto ai soli sistemi 5G a 3.700 MHz durante un monitoraggio a banda stretta.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Poli S. et al., 2016, "Indicatore di esposizione della popolazione al campo elettrico prodotto dalle stazioni radio base calcolato considerando la distribuzione della popolazione per piano nel comune di Verona", *Atti VI convegno nazionale agenti fisici "Il controllo degli agenti fisici: ambiente, territorio e nuove tecnologie"*, Alessandria, 6-8 giugno 2016.
- [2] Istat, 2021, Censimento permanente della popolazione e delle abitazioni 2021, www.istat.it/statistiche-per-temi/censimenti/popolazione-e-abitazioni/risultati/
- [3] G. Lorenzetto et al., 2025, "L'indicatore di esposizione al campo elettrico generato dagli impianti di telefonia mobile un anno dopo la modifica dei limiti: uno studio sul territorio del Veneto", *Atti XXXIX congresso nazionale Airp di radioprotezione*, Padova, 29-31 Ottobre 2025.



CARATTERIZZAZIONE DI UN'ANTENNA MASSIVE MIMO

MISURE IN CAMPO SU ANTENNA ATTIVA SVOLTE DA ARPA TOSCANA EVIDENZIANO DIFFERENZE NELLA POTENZA RICEVUTA DI OLTRE 20 DB TRA CONDIZIONI DI PRESENZA E ASSENZA DI TRAFFICO, CONTRO I 7,8 DB ATTESI CON ANTENNE PASSIVE. I DATI CONFERMANO IL BEAMFORMING IBRIDO E LA MASSIMA ESPOSIZIONE IN PROSSIMITÀ DEL TERMINALE ATTIVO.

L'utilizzo delle antenne attive (*active antenna systems, Aas*) costituisce una delle maggiori innovazioni introdotte con le più recenti tecnologie radiomobili. Al contrario di quanto operato dalle antenne passive finora utilizzate, esse permettono di implementare i meccanismi di generazione dinamica dei fasci di trasmissione quali il *beam sweeping* e il *beamforming* che caratterizzano i sistemi di trasmissione 5G Nr di ultima generazione. Sfruttando le proprie capacità di elaborazione, un Aas può irradiare infatti due differenti tipi di fasci, a seconda del loro utilizzo: i fasci di *broadcast* e i fasci di traffico. I primi sono fasci utilizzati per fornire la copertura della cella servita e vengono trasmessi in sequenza a intervalli costanti (*beam sweeping*). Al contrario, i fasci di traffico sono attivati solo in occasione dell'assegnazione a un terminale di un canale di traffico. Il fascio attivato dall'antenna dipende dalla posizione del terminale rispetto a essa (*beamforming*). Questa tipologia di antenne può essere tuttavia utilizzata anche sui precedenti sistemi 4G Lte che utilizzano lo schema di trasmissione Tdd (*time division duplex*) dove le comunicazioni nelle due direzioni, tra stazione radio base e terminale mobile, avvengono sulla medesima risorsa radio su base temporale. Nel sistema 4G Lte l'uso delle antenne avviene, tuttavia, in maniera ibrida, adoperando il *beamforming* per la trasmissione dei canali dati dedicati degli utenti, ma non il *beam sweeping* per la trasmissione dei segnali di controllo della cella per la trasmissione dei quali viene utilizzato, al contrario, un fascio statico come avviene con le tradizionali antenne passive. Tutto ciò consente di utilizzare tipicamente la medesima antenna attiva per la trasmissione del segnale Lte Tdd in banda 2.600 MHz (B38) e 5G Nr in banda 3.700 MHz (N78).

Il comportamento dell'antenna attiva durante la trasmissione dei canali dati



FIG. 1 FORZATURA DEL TRAFFICO A DIVERSE DISTANZE DALL'ANTENNA

Foto aerea dell'area oggetto di studio con la posizione del sistema di misura e del terminale di forzatura lungo la direzione di puntamento della cella.

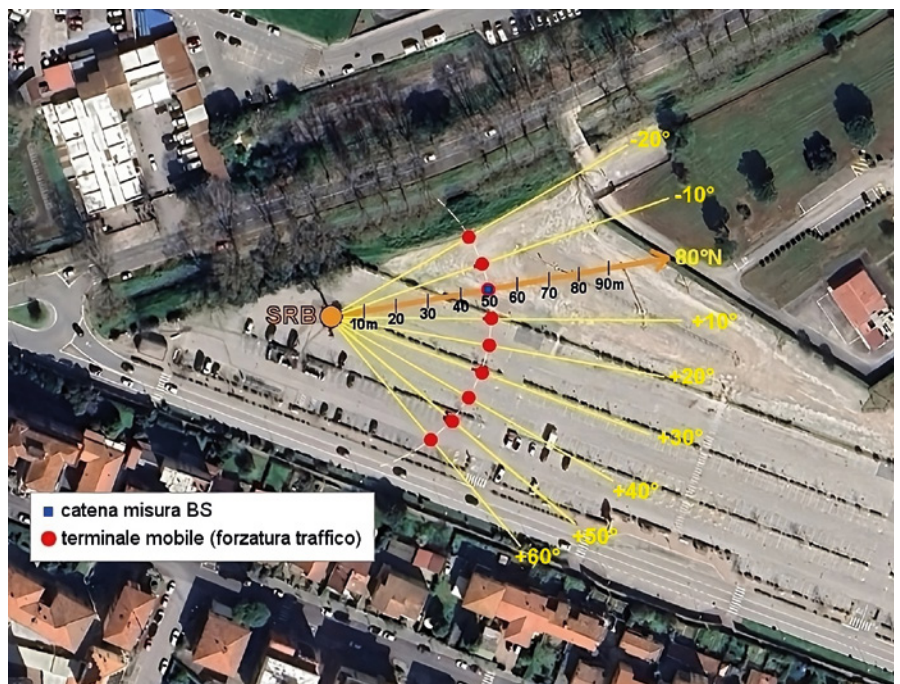


FIG. 2 FORZATURA DEL TRAFFICO A DIVERSI ANGOLI RISPETTO AL PUNTAMENTO DELL'ANTENNA

Posizione del sistema di misura e del terminale di forzatura a diversi angoli rispetto alla direzione di puntamento della cella.

utente è stato caratterizzato monitorando il segnale ricevuto dalla cella Lte Tdd di un impianto nel comune di Pisa attraverso un analizzatore di spettro in modalità *span zero* posizionato in prossimità dell'impianto e variando la posizione di un terminale mobile utilizzato per la forzatura della trasmissione dati da parte della cella. L'impianto oggetto dei test, installato su un traliccio all'interno di un parcheggio, utilizza un'antenna attiva Zte mod. A9622. La misura del segnale ricevuto è stata eseguita per mezzo di una catena strumentale costituita da un analizzatore Rodhe & Schwarz mod. Fsh8 collegato a un'antenna biconica Seibersdorf mod. Pcd8250. La disponibilità da parte dell'analizzatore di spettro di ampiezze del filtro Rbw fino a 20 MHz in modalità *span zero* consente di monitorare nel tempo l'andamento del segnale Lte ricevuto. Per il monitoraggio del segnale è stata scelta una postazione fissa posta a 50 m dalla base del traliccio lungo la direzione di puntamento di uno dei settori della stazione (80° N). Per la forzatura del traffico dati è stato utilizzato un terminale mobile, dotato di sistema operativo Android e con abilitate le funzioni di amministratore (*root*). In questa configurazione, è possibile forzare il terminale (e di conseguenza la stazione)

a utilizzare una determinata banda (B38 in questo caso) per la trasmissione dei dati tramite l'app gratuita *Network signal guru*, scaricabile dalla *repository* ufficiale Android. Una volta selezionata la banda di utilizzo, la forzatura del traffico viene effettuata tramite siti internet per la misura della velocità di download dei dati (*speed test*) o che consentono di definire la dimensione del pacchetto dati allo scopo di garantire maggiore durata e stabilità nel download dei dati. Il comportamento dell'antenna è stato indagato mantenendo, come detto, fissa la postazione di misura e variando la posizione del terminale mobile, dapprima a distanze variabili (da 10 m a 90 m con passo 10 m) lungo la direzione di puntamento della cella (*figura 1*) e, successivamente, a diverse angolazioni rispetto alla direzione di puntamento della cella (da -20° a +60°) mantenendo sempre il terminale alla distanza di 50 m dalla base del traliccio (*figura 2*). Nel dominio della frequenza, come noto, il sistema Lte è costituito da un insieme di sottoportanti spaziate tra loro di 15 kHz, il cui numero complessivo dipende dalla larghezza di banda disponibile. Nel caso di utilizzo di un'antenna passiva tradizionale, che irradia segnali di controllo e canali

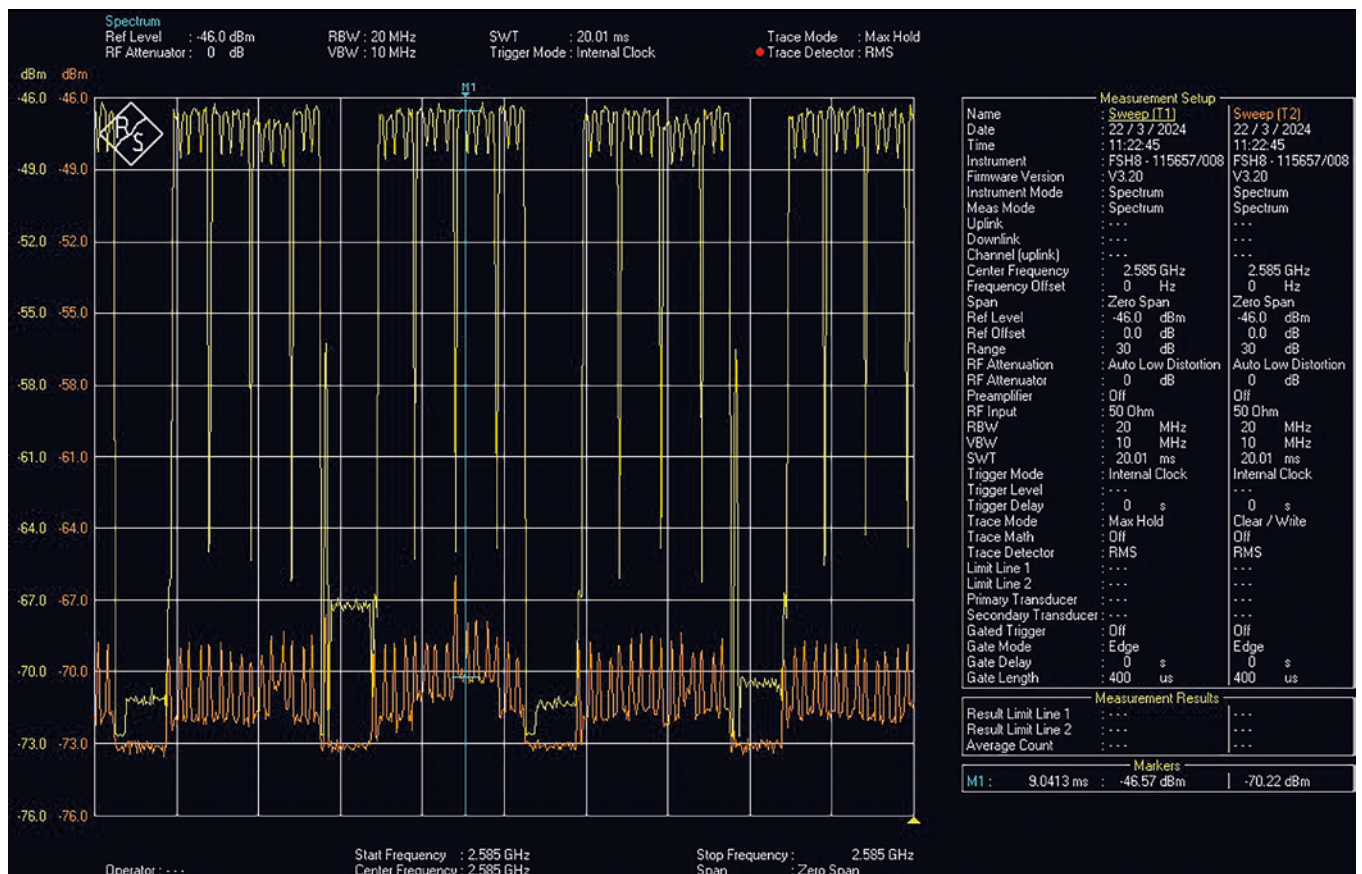


FIG. 3 SEGNALE RICEVUTO NEL TEMPO CON ANALIZZATORE DI SPETTRO
 Acquisizione con terminale di forzatura in prossimità della catena di misura (d=50 m) in presenza (traccia gialla) e assenza (traccia arancione) di forzatura.

di traffico per mezzo del medesimo fascio, il rapporto (ovvero la differenza in unità logaritmiche) tra la potenza ricevuta in assenza di traffico durante la trasmissione dei segnali di controllo del sistema Lte (*reference signal*, Rs) e quella nella condizione di trama interamente riempita (ovvero di massimo traffico) è attesa pari a circa $10 \cdot \log(2/12) = -7,8$ dB, essendo 2/12 il rapporto del numero di sottoportanti occupate dai Rs rispetto al numero totale disponibile.

I risultati ottenuti nel caso di antenna attiva mostrano, invece, valori massimi per tale differenza di gran lunga superiori a quelli attesi con un'antenna passiva (oltre 20 dB) oltre che dipendenti dalla posizione del terminale di forzatura.

In particolare, il segnale ricevuto sull'analizzatore di spettro risulta massimo con il terminale mobile in prossimità del punto di misura (*figura 3*). Ciò lascia pertanto ipotizzare l'attivazione di uno specifico fascio di traffico, di guadagno maggiore, diretto verso il terminale mobile. Quanto ricevuto nel punto di misura dipenderà pertanto dal diagramma di irraggiamento del fascio che si attiva e dalla posizione del punto di misura rispetto all'antenna trasmittente.

La *figura 4* riporta l'andamento in dipendenza della posizione del terminale lungo la direzione di puntamento della cella della differenza (delta) in dB tra il livello di potenza misurato con forzatura del traffico e quello ottenuto con trama piena durante la trasmissione del fascio *broadcast* nel punto di misura. Tale differenza è legata al diverso guadagno, nella direzione del punto di misura, del fascio che si attiva nel momento della forzatura del traffico rispetto a quello di *broadcast*.

In *figura 5* è analogamente riportato l'andamento della stessa quantità (delta), ottenuta nel punto di misura, facendo variare l'angolo della posizione del terminale di forzatura rispetto alla direzione di puntamento della cella. In entrambi i grafici i valori risultano massimi con il terminale in prossimità del punto di misura. I risultati confermano il comportamento ibrido dell'antenna e mostrano come la massima esposizione determinata dalle antenne attive avvenga nella zona in prossimità del terminale che accede alla risorsa radio.

Andrea Barellini¹, Barbara Bracci¹, Gaetano Licitra², Andrea Pinzauti¹, Francesco Sbrana³, Alberto Maria Silvi¹

Arpa Toscana

1. Settore Agenti fisici

2. Dipartimento provinciale di Pisa

3. Settore informativo regionale ambientale

FIG. 4
DIFFERENZA DI POTENZA - POSIZIONE

Andamento della differenza di potenza ricevuta con fasci di traffico e broadcast (trama piena) in dipendenza dalla posizione del terminale di forzatura lungo la direzione di puntamento della cella.

■ delta

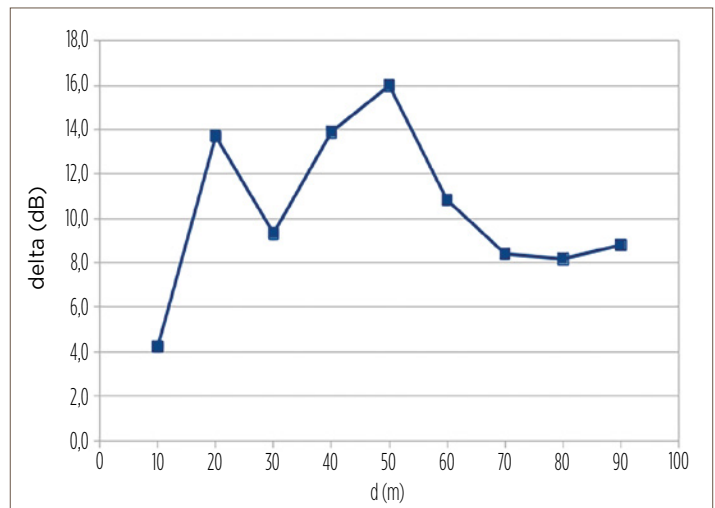
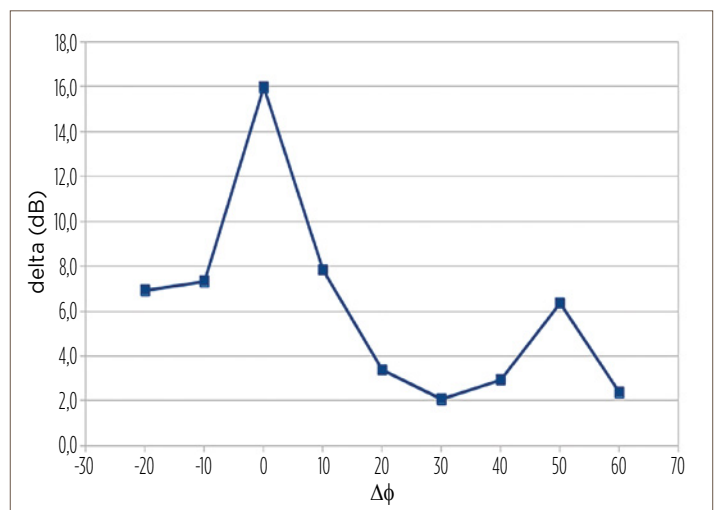


FIG. 5
DIFFERENZA DI POTENZA - ANGOLO

Andamento della differenza di potenza ricevuta con fasci di traffico e broadcast (trama piena) in dipendenza del diverso angolo del terminale di forzatura rispetto alla direzione di puntamento della cella.

■ delta



RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Coltellacci et al., 2023, "Lte Tdd mMimo: analisi dei segnali per la verifica di conformità della procedura di misura contenuta nella norma Cei 211-7/E", *Atti del Convegno nazionale Airp*, Cagliari, 27-29 settembre 2023.

Ericsson, 2024, *Ericsson Massive MIMO Handbook*, 3a edizione.

www.sharetechnote.com/html/5G/5G_Phy_BeamManagement.html

www.sharetechnote.com/html/FrameStructure_DL.html#Overview

www.sharetechnote.com/html/Handbook_Lte.html

www.sharetechnote.com/html/LTE_TDD_Overview.html

Ngmn, 2023, *Recommendation on base station active antenna system standards v.3.0*, www.ngmn.org.

Nsn, 2013, *Nokia solutions and network active antenna systems: a step-change in base station site performance*.

Ispra/Snpa, 2023, Report progetto ricerca Cem - Campi elettromagnetici e salute: studi di valutazione dell'esposizione e approfondimento sui possibili rischi delle esposizioni a lungo termine a basse e alte frequenze - Attività C - Sviluppo tecnologico e suoi effetti sull'esposizione: i sistemi 5G: campagne di misura svolte su impianti di telefonia mobile dotati di tecnologia "Lte-Tdd mMimo" della società Wind Tre Spa.

Itu-R, 2014, *Passive and active antenna systems for base stations of lmt systems*, Report Itu-r M.2334-0.

MONITORAGGIO CEM CON CENTRALINA SELETTIVA

UN PROTOTIPO DI CENTRALINA SELETTIVA IN BANDA STRETTA CONSENTE IL MONITORAGGIO PER 24 ORE DEI CEM, DISTINGUENDO I CONTRIBUTI PER FREQUENZA. TESTATO DA ARPA PUGLIA IN AMBIENTE URBANO E CONFRONTATO CON STRUMENTI IN COMMERCIO, MOSTRA RISULTATI COMPATIBILI E PROMETTE MISURE PIÙ AFFIDABILI PER LA VERIFICA DEL RISPETTO DEI LIMITI.

Negli ultimi decenni l'evoluzione delle tecnologie di telecomunicazione ha determinato un incremento significativo del numero di sorgenti di campi elettromagnetici nell'ambiente, in particolare nelle aree urbane e periurbane. Stazioni radio base per connessione in mobilità, sistemi di radio-telediffusione, reti wi-fi e altre infrastrutture contribuiscono in modo variabile ai livelli di esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici (Cem). La valutazione dell'esposizione è regolamentata da normative nazionali che stabiliscono limiti di esposizione, valori di attenzione e obiettivi di qualità, al fine di tutelare la salute umana e l'ambiente, e da guide tecniche di settore (Cei 211-7) che indicano le modalità di misura. In tale contesto, il monitoraggio ambientale rappresenta uno strumento essenziale per verificare il rispetto dei limiti di legge, analizzare l'evoluzione nel tempo delle emissioni e fornire informazioni trasparenti ai cittadini e alle autorità competenti.

Il controllo di primo livello dei Cem è effettuato mediante misure puntuali o monitoraggi in continuo mediante sistemi di misura a banda larga, in grado di fornire una stima del livello di campo elettrico complessivo. Tuttavia, tali approcci non consentono di distinguere il contributo delle singole sorgenti né di analizzare in dettaglio l'andamento del campo elettrico nelle diverse bande di frequenza. Attualmente sono disponibili centraline selettive che permettono la misura separata dei contributi associati a specifici intervalli di frequenza. Esse sono dotate

di sensori isotropici e di moduli di analisi in grado di suddividere lo spettro di frequenza in bande, tipicamente associate alle principali tipologie di sorgenti di emissione (ad esempio radiodiffusione, telefonia mobile, sistemi wireless). Le grandezze misurate sono generalmente espresse in termini di campo elettrico efficace (Rms) e mediate su intervalli temporali configurabili. Dette centraline possono operare in modo autonomo e sono spesso dotate di sistemi di trasmissione dati per l'invio da remoto dei valori delle misure a un server centrale. Tuttavia, tali misure non possono essere impiegate per eseguire il confronto diretto con i limiti e hanno lo scopo di fornire indicazioni circa la variabilità del segnale complessivo nel tempo e individuare la tecnologia che prevalentemente contribuisce a eventuali superamenti dei limiti.

Per poter, invece, attribuire direttamente il superamento ai sensi della vigente normativa e della guida Cei 211-7, è necessario eseguire un monitoraggio della durata di 24 ore in grado di discriminare i diversi contributi al campo elettrico complessivo con risoluzione in frequenza che permetta un'analisi dettagliata delle componenti del segnale stesso, adeguata a effettuare le attività di controllo proprie della Arpa.

In tale contesto si è studiata la possibilità di implementare una centralina di monitoraggio in banda stretta che consenta l'acquisizione dei singoli segnali per un periodo di almeno 24 ore, in modo da poter eseguire il confronto diretto del risultato di detta misura con i limiti applicabili. Utilizzando un finanziamento



del Mase, Arpa Puglia ha quindi acquistato un analizzatore di spettro con un elevato grado di protezione dagli agenti atmosferici, in catena con una antenna omnidirezionale. È stato quindi costruito un prototipo di centralina di monitoraggio in banda stretta che fosse trasportabile e potesse essere agevolmente installata all'interno di abitazioni (ambiente *indoor*) o all'esterno (ambiente *outdoor*). È stata anche prevista la possibilità di alimentare la centralina con pannello solare e batteria oltre che di interrogare da remoto la centralina stessa tramite un modem. Le misure in campo, utilizzando il prototipo di centralina sopra descritto, sono state quindi eseguite in ambiente urbano, presso un'abitazione privata in linea di vista con una Srb di cui erano noti i segnali emessi. Il punto di misura distava circa 150 m dalla Srb ed era posizionato a 22° rispetto alla direzione di massimo irraggiamento. Per un intervallo di tempo di 1 ora, oltre al monitoraggio con la centralina, sono state eseguite in parallelo misure sugli

Catena di misura	Prototipo centralina selettiva	Catena Anritsu	Catena Narda
Analizzatore	Anritsu mod. MS27102A	Anritsu mod. MS2090A	Narda Srm 3006
Cavo	Cfd 240 low loss	Anritsu type JBY 300	Narda 3602/02
Antenna	Keysight mod. N6850A	Clampco mod. AP3000	Narda 3502/01

TAB. 1
STRUMENTAZIONE

Descrizione delle catene di misura impiegate nella sperimentazione.

stessi segnali, utilizzando due catene strumentali costituite da analizzatori di spettro e antenne commerciali. Questo ha consentito di eseguire un confronto fra i risultati del prototipo e i singoli analizzatori, oltre che un confronto fra le due catene strumentali commerciali. In *tabella 1* si riportano i dettagli della strumentazione utilizzata.

Ogni serie di misure è stata effettuata tramite l'acquisizione in modalità *channel power*, impostando le tracce in *average*,

min hold e *max hold* e analizzando i segnali, per ciascuna banda di frequenza, dell'unico operatore presente sulla Srh in linea di vista. Non disponendo di dispositivi per la forzatura del traffico, al fine di rendere efficace il confronto per ogni banda di frequenza, sono stati confrontati set di dati acquisiti contemporaneamente dalle tre catene strumentali.

I risultati delle misure sono riportati nel grafico in *figura 1*.

Per poter eseguire il confronto fra le

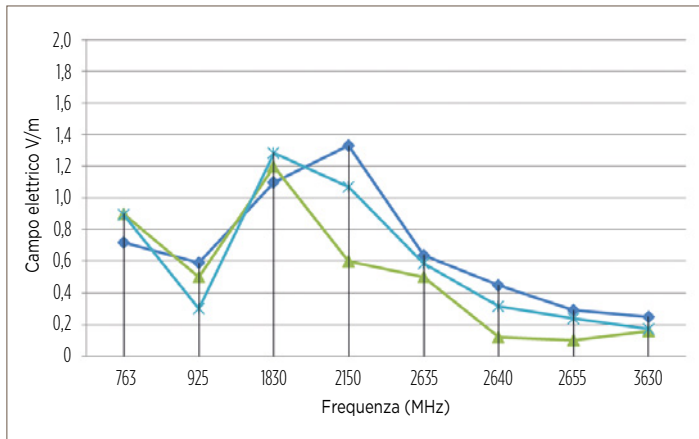
misure sopra riportate, è stato calcolato l'indice di compatibilità, o errore normalizzato, fra i risultati forniti dalla centralina e le singole misure eseguite con i due analizzatori di spettro. Tale procedura è mutuata dalla norma Iso 17043/2023 appendice B, che è preposta al confronto di due misure di cui una sia una misura di riferimento (procedura valida per i laboratori metrologici), ed è molto utile anche nel nostro caso perché ci consente di calcolare l'indice di compatibilità fra le misure eseguite. Dai dati ottenuti si evince che, per valori di campo superiori a 0,6 V/m, si ha una buona compatibilità fra le misure rilevate con la centralina e quelle eseguite con gli analizzatori di spettro commerciali. Anche gli analizzatori di spettro risultano fra loro in buon accordo per segnali significativi. I risultati ottenuti sono decisamente incoraggianti e meritano ulteriori approfondimenti al fine di rendere quanto più affidabile possibile la procedura di misura appena descritta e il dato ottenuto. Infatti l'uso di un siffatto sistema di monitoraggio in continuo a banda stretta consentirebbe di superare la problematica relativa alla forzatura del traffico durante una misura di campo elettrico necessaria, allo stato attuale, per poter escludere il superamento dei limiti quando si eseguono misure di breve durata. Infatti la centralina eseguendo misure nell'arco delle 24 ore fornisce un valore medio che tiene già in conto la variabilità temporale intrinseca al segnale 5G o, comunque, intrinseca ai segnali caratterizzati da una considerevole variabilità temporale.

Inoltre, è stato possibile verificare che il valore medio del campo elettrico misurato nell'arco delle 24 ore è, per tutti i segnali rilevati, sempre inferiore o, al più, uguale rispetto a quanto si rileva durante una misura di breve durata eseguita al mattino nella fascia oraria di massimo traffico (13.00-14.00). Pertanto se ne deduce che, nel contesto in esame, una misura di breve durata che restituisca un risultato inferiore rispetto al valore di attenzione, garantisce il non superamento dello stesso essendo una misura che restituisce un valore sovrastimato rispetto al campo elettrico medio. Il prototipo esaminato è in fase di ulteriori test anche in diversi contesti territoriali.

FIG. 1
RISULTATI
DELLE MISURE

Confronto fra i set di dati acquisiti con le tre catene strumentali.

◆ Anritsu
▲ Prototipo centralina
✕ Srm



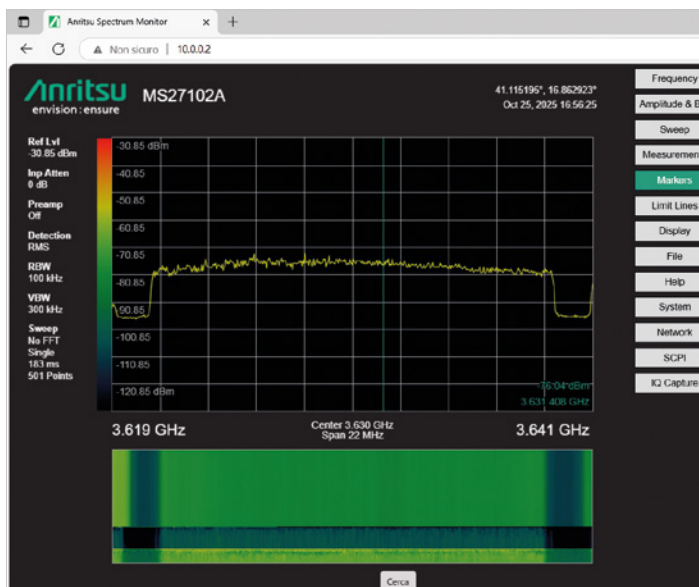
TAB. 2
CONFRONTO
FRA I DATI ACQUISITI
CON IL PROTOTIPO
DI CENTRALINA

Mediati su 24 ore e mediati su un ora (massimo traffico)

Frequenza centrale (MHz)	Prototipo centralina selettiva 24h (campo elettrico ± incertezza V/m)	Prototipo centralina selettiva 13.00-14.00 (campo elettrico ± incertezza V/m)
763	0,6±0,2	0,9±0,2
927	0,4±0,1	0,5±0,1
1830	0,9±0,2	1,2±0,2
2150	0,4±0,1	0,6±0,1
2635	0,4±0,1	0,5±0,1
2640	0,1±0,02	0,12±0,2
2655	0,1±0,02	0,1±0,02
3630	0,1±0,02	0,16±0,03

FIG. 2
MISURA

Esempio di acquisizione della misura in Channel Power con il prototipo di centralina.



Maddalena Schirone^{1,2},
Tiziana Cassano¹, Lucia Barbone¹

Arpa Puglia

1. Servizio agenti fisici

2. Direttrice servizio territoriale