

# 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)	$E_{RE, Ssb0}^{broadcast}$ (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.

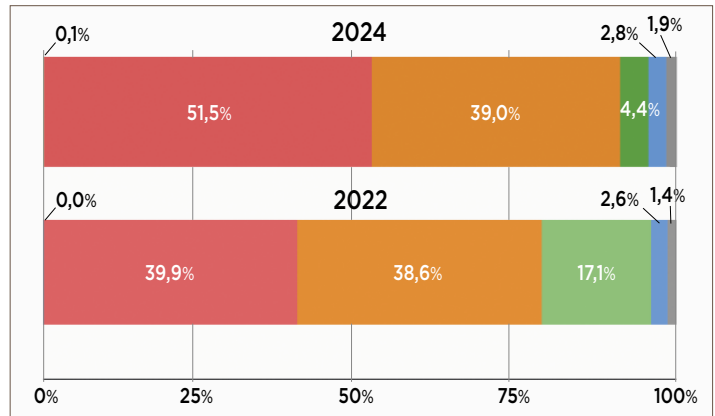


FIG. 1 CAMPO ELETTRICO

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

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

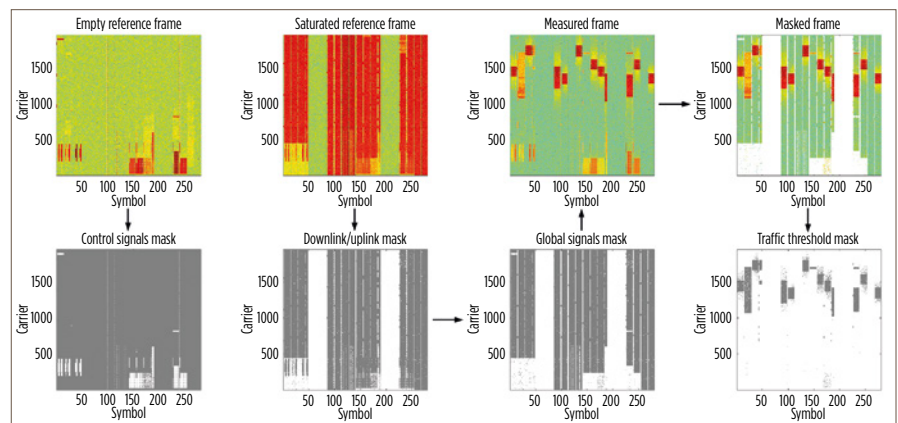
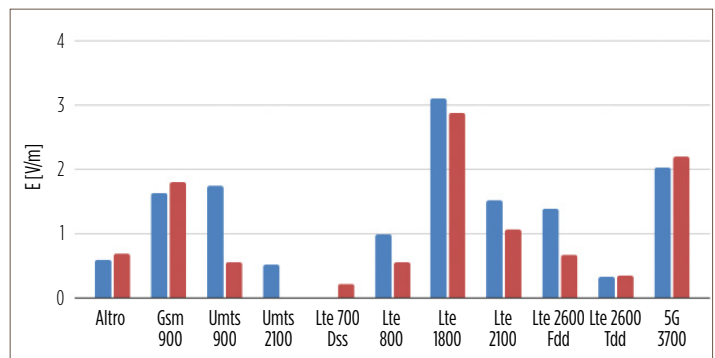


FIG. 2 ELABORAZIONE POTENZA  
Procedura di elaborazione della potenza ricevuta per Re con script di Gnu octave.

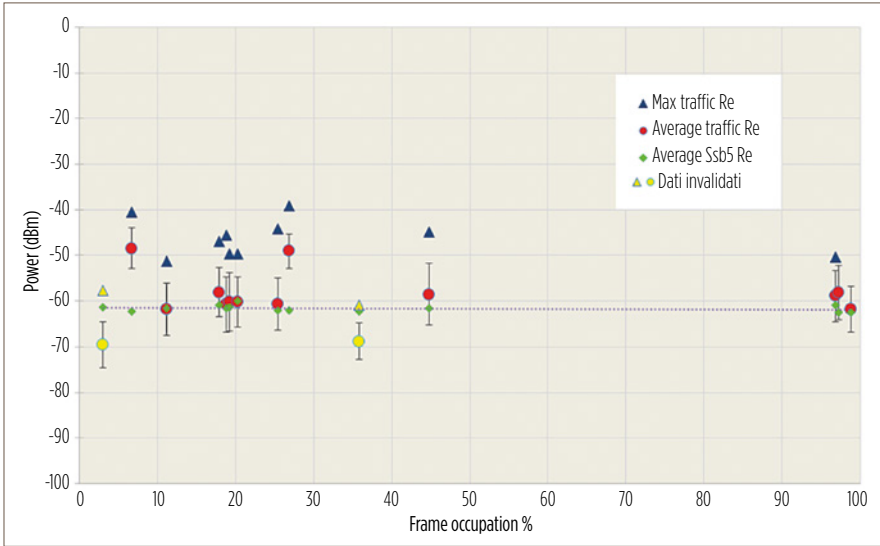


FIG. 3 POTENZA/SATURAZIONE  
Parametri statistici dei valori di potenza dei Re in funzione della percentuale di occupazione della trama.

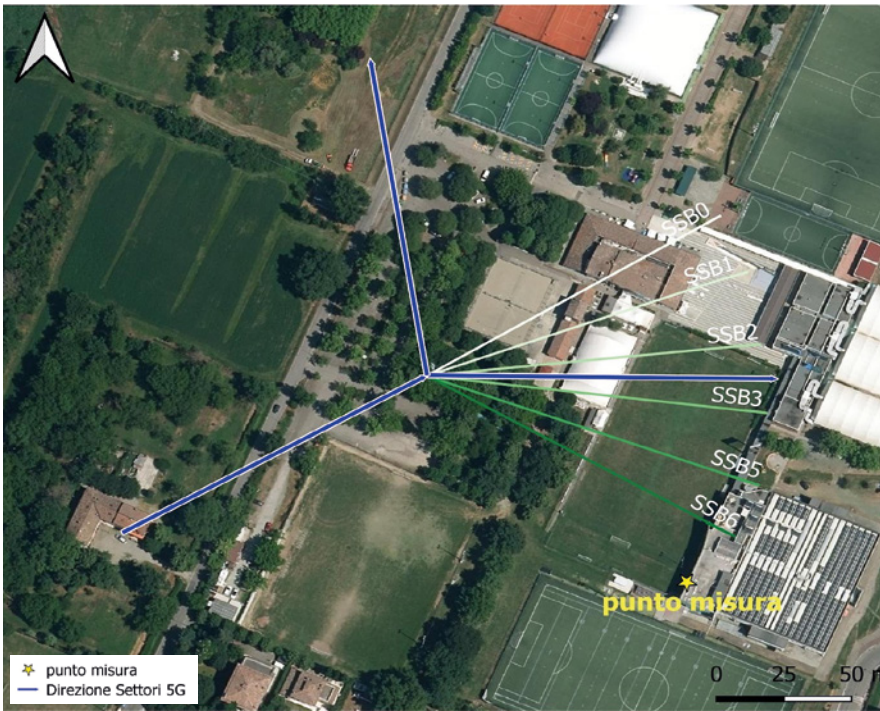


FIG. 4 DIREZIONI DI PUNTAMENTO  
Sito di Modena: direzioni di puntamento delle antenne 5G e degli SSB della cella 1.

## 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

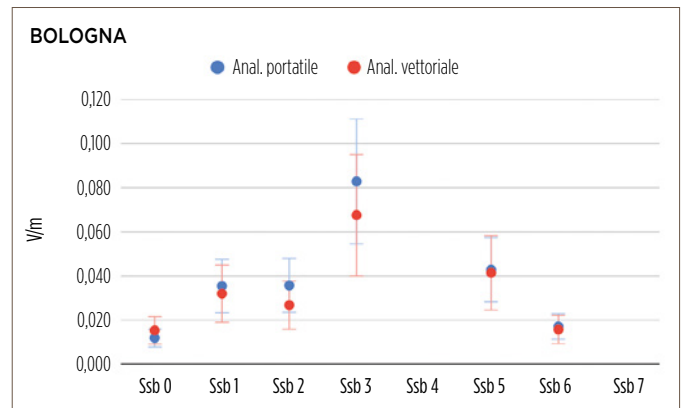
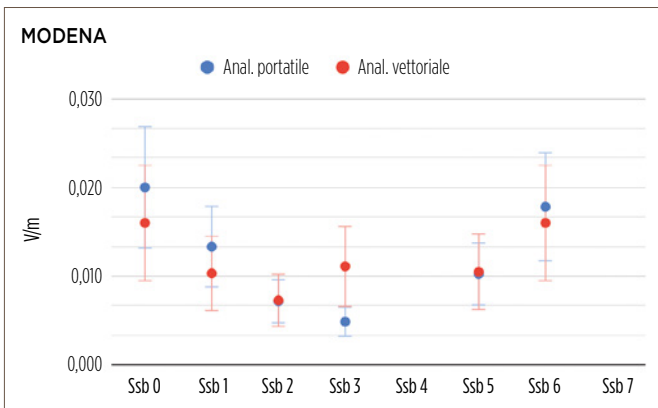


FIG. 5 BORDO CELLA  
Campo elettrico per Re degli Ssb a “bordo cella” (Modena) e a “centro cella” (Bologna)



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*).

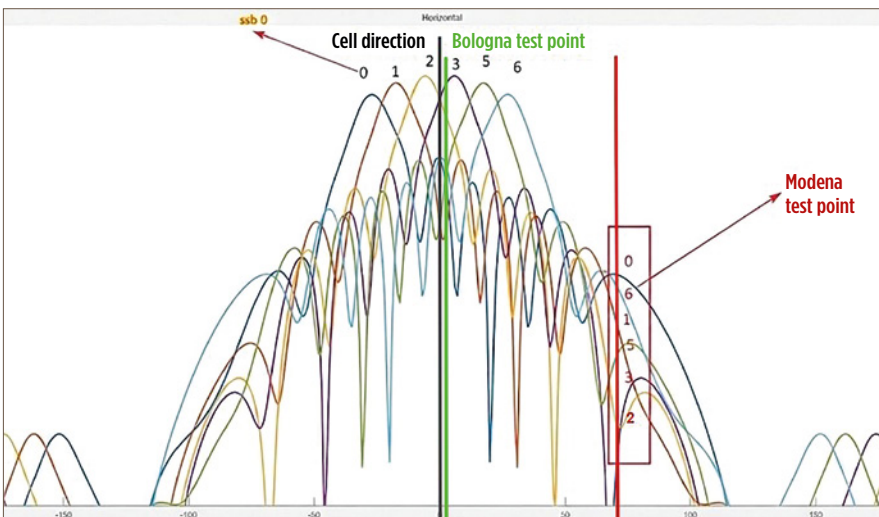


FIG. 6 IRRADIAZIONE  
Diagrammi elementari di canali di controllo Ssb e azimut dei punti di misura.

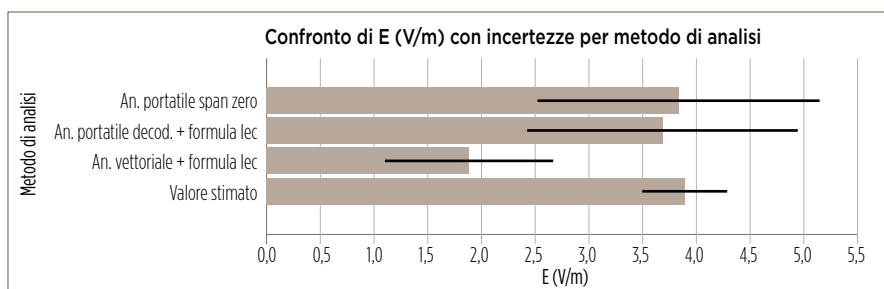


FIG. 7 CONFRONTO METODI DI ANALISI  
Confronto tra valore di campo elettrico estrapolato e stimato.

### 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  $F_{\text{extBeam}}$  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  $F_{\text{extBeam}}$  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 Arpa Emilia-Romagna 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  $F_{\text{extBeam}}$  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 Arpa Emilia-Romagna 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

Arpa 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 Caccioli.

## 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.