



Convegno Nazionale Airp  
Roma, 29 settembre - 1 ottobre 2021

## **I nuovi diagrammi di irradiazione prodotti dai sistemi di telecomunicazioni ad antenne attive: l'attività di SNPA in relazione alle modalità di valutazione preventiva**

Laura Gaidolfi<sup>1</sup>, Daniele Franci<sup>2</sup>, Enrico Grillo<sup>2</sup>, Barbara Scavolini<sup>3</sup>, Fabio Francia<sup>4</sup>, Daniela De Bartolo<sup>5</sup>, Mattia Vaccarone<sup>6</sup>, Enrica Caputo<sup>6</sup>, Stefano Coltellacci<sup>2</sup>, Settimio Pavoncello<sup>2</sup>, Lia Pattini<sup>5</sup>, Mattia Scola<sup>7</sup>, Alberto Maria Silvi<sup>4</sup>, Salvatore Barba<sup>8</sup>, Matteo Tiberti<sup>1</sup>, Elena Ponzetti<sup>3</sup>, Giuseppe Marsico<sup>9</sup>

<sup>1</sup>Arpae Emilia Romagna, <sup>2</sup>Arpa Lazio, <sup>3</sup>Arpa Marche, <sup>4</sup>Arpa Toscana, <sup>5</sup>Arpa Lombardia, <sup>6</sup>Arpa Piemonte, <sup>7</sup>Arpa Veneto, <sup>8</sup>Arpa Friuli Venezia Giulia, <sup>9</sup>ISPRA

*lgaidolfi@arpae.it*

### **INTRODUZIONE**

Il D.Lgs 259/2003 pone in capo alle Agenzie Ambientali ("Organismo competente ad effettuare i controlli" ai sensi dell'art.14 della L 36/2001) il compito di accertare la compatibilità dei progetti relativi alle installazioni di sistemi per comunicazione elettronica, ovvero il rispetto dei valori di riferimento (limite di esposizione, valore di attenzione e obiettivo di qualità) per la protezione della popolazione dalle esposizioni ai campi elettromagnetici definiti dalla normativa italiana (DPCM 08/07/2003).

Ai fini delle valutazioni dei progetti, oltre alla conoscenza dell'inserimento dell'impianto nel contesto urbanistico, sono necessari i dati dei parametri tecnici dell'impianto, che devono essere forniti dal gestore e consistono in particolare in:

- marca e modello d'antenna, da cui si evincono: banda di frequenza, guadagno, tilt elettrico, ampiezza del fascio, diagramma di irradiazione dell'antenna
- altezza del centro elettrico, direzione di massimo irraggiamento, potenza al connettore d'antenna, eventuale tilt meccanico, parametri variabili in funzione della necessità di copertura del servizio, compatibilmente con il rispetto dei valori di riferimento normativi

Nei sistemi "tradizionali", finora valutati dalle Agenzie Ambientali, sono impiegate antenne di tipo passivo, il cui fascio di irradiazione presenta una sagomatura fissa nel tempo.

Con l'introduzione della tecnologia di nuova generazione 5G nel panorama dei servizi per telecomunicazione, si è assistito all'inserimento di sistemi ad antenne mMIMO/antenne attive (AAS); uno degli aspetti innovativi riguarda l'emissione di potenza in relazione alla presenza di terminali che richiedono il servizio, comportando un diagramma di irradiazione variabile nello spazio e nel tempo (fig. 1).

Figura 1 - Modalità di emissione per antenne tradizionali (sinistra) e antenne attive (destra)



## ANTENNE ATTIVE

Alcune soluzioni del sistema LTE TDD e il sistema 5G NR che sfruttano la tecnologia MaMIMO utilizzano antenne a fascio tempo-variante, in grado di sintetizzare più fasci indirizzati verso direzioni differenti e riconfigurabili dinamicamente in relazione all'ambiente elettromagnetico.

L'uso contemporaneo di uno o più fasci aventi una sagomatura variabile nel tempo ottenuta con tecniche di "beamforming", ciascuno alimentato con potenze anch'esse variabili nel tempo, permette di migliorare le prestazioni del servizio, limitando l'irradiazione ai soli settori angolari nella direzione degli utenti, minimizzando nel contempo l'emissione nelle direzioni adiacenti.

Pertanto, a differenza di quanto avviene nei sistemi tradizionali, nei sistemi equipaggiati con antenne a fascio tempo-variante non esiste proporzionalità diretta, attraverso il diagramma di irradiazione, fra la potenza totale trasmessa e l'EIRP nella direzione dell'utente; ne consegue che la sola indicazione della potenza totale trasmessa dall'antenna, valutata al connettore d'antenna, non consente di conoscere in maniera deterministica, in un determinato istante, l'effettiva distribuzione dei livelli di campo elettromagnetico nello spazio circostante il sistema radiante.

La valutazione dell'esposizione ai CEM, pertanto, richiede un approccio di tipo statistico basato sulla distribuzione spazio-temporale della potenza irradiata, cioè, utilizzando la formula (1) presente in CEI IEC TR 62269.

$$\text{EIRP}(\theta, \phi) = P_{\text{TMX}} \cdot F_{\text{TDC}} \cdot F_{\text{PR}} \cdot G_{\text{MLB}} \cdot F(\theta, \phi) \quad (1)$$

dove:

$P_{\text{TMX}}$ =potenza massima trasmessa

$F_{\text{TDC}}$ =fattore di scala dipendente dalla configurazione del sistema ("duty cycle")

$F_{\text{PR}}$ = fattore di scala dipendente dallo scenario di esposizione (numero, posizione, durata del servizio, spostamento di ciascun utente)

$G_{\text{MLB}} \cdot F(\theta, \phi)$ = diagramma di irradiazione derivato dall'involuppo dei fasci elementari

Il Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (SNPA), del quale fanno parte l'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) e le Agenzie Regionali e delle province autonome di Trento e di Bolzano per la Protezione dell'Ambiente, si è quindi confrontato per definire criteri omogenei su tutto il territorio nazionale per la definizione e l'utilizzo dei parametri specifici di tali sistemi, necessari per la valutazione dei progetti.

A tal fine ha predisposto il documento “Criteri per la valutazione delle domande di autorizzazione all’installazione di impianti di telefonia mobile con antenne mMIMO”, la cui più recente revisione è pubblicata nella delibera 88 di novembre 2020 (Delibera 88/2020).

In tale documento viene specificato che il gestore deve fornire le informazioni specifiche:

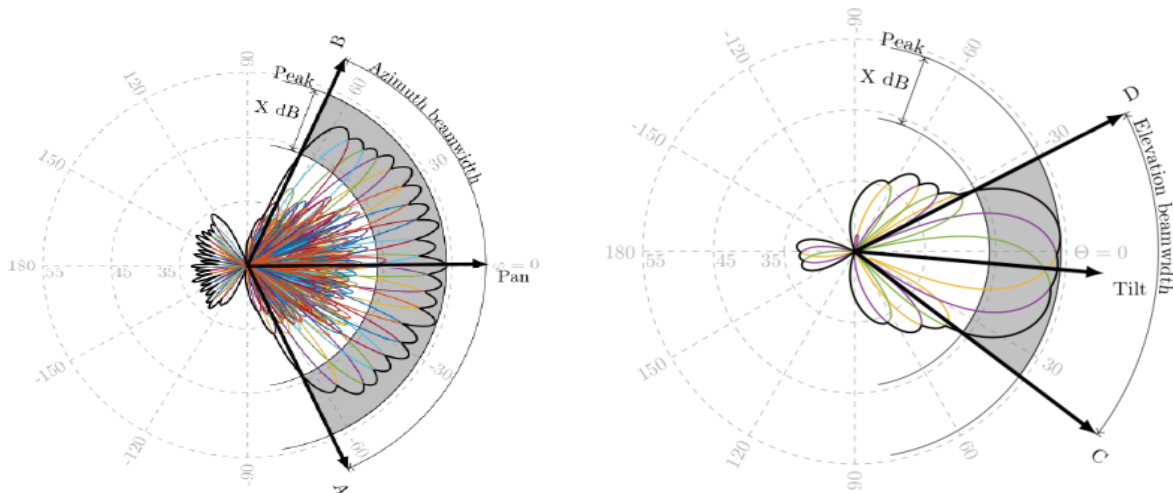
1.  $P_{max}$  (corrispondente a  $P_{TMX}$ )
2. Il diagramma di irradiazione nella specifica configurazione hardware e software di esercizio, costituito dall’involuppo risultante a partire dai possibili diagrammi di irradiazione sintetizzabili dall’antenna attiva mMIMO e relativi alla configurazione implementata dal gestore (diagrammi elementari)

Oggetto di questo lavoro è presentare i primi risultati emersi dalle attività del gruppo di lavoro istituito a livello SNPA con il compito di verificare la modalità di costruzione del diagramma di involuppo attraverso i diagrammi elementari forniti dai gestori

## DIAGRAMMI DI INVILUPPO

Il diagramma di irradiazione di involuppo è un diagramma non fisico ottenuto a partire da tutti i possibili diagrammi sintetizzabili nella specifica configurazione: per ogni grado orizzontale e verticale ( $\phi$  e  $\theta$ ), deve essere individuato il valore di attenuazione minimo, normalizzandolo al massimo guadagno, corrispondente a  $G_{MLB}$  (fig. 2).

Figura 2 - Diagramma di involuppo: fascio orizzontale (sinistra) e verticale (destra)



Le antenne attive possono sintetizzare fasci di irradiazione che si possono classificare in due tipologie:

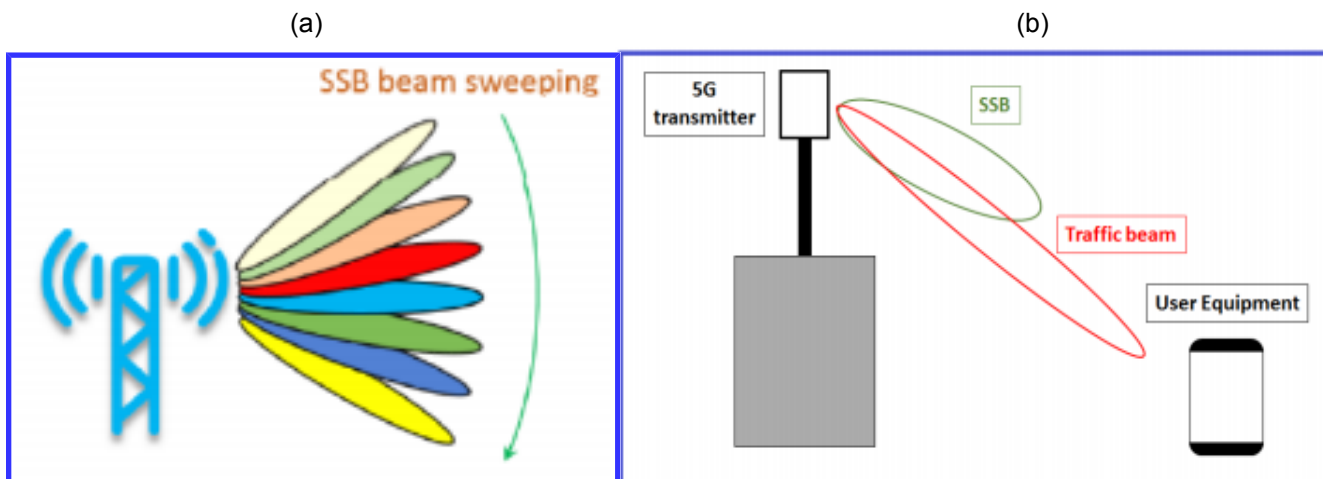
### Broadcast Beams:

sono i fasci utilizzati dal sistema per irradiare i *canali di controllo*, che hanno la finalità di garantire la copertura della cella. Ciascun fascio trasporta uno specifico ‘blocco di sincronizzazione’ (SS-Block) e i diversi fasci si attivano in maniera sequenziale, replicando periodicamente la sequenza di trasmissione degli SS-Blocks (tipicamente con periodo 20 ms). La forma e le caratteristiche dei fasci di broadcast non dipendono dalla presenza di terminali mobili presenti nelle vicinanze dell’antenna (fig.3 a).

**Traffic Beams:**

sono i fasci sintetizzabili dal sistema che trasportano il traffico (essenzialmente PDSCH) tra antenna e utente. Sono user-based, ovvero attivati esclusivamente a seguito della presenza di un terminale mobile connesso che scambia traffico con l'antenna. Sono caratterizzati da un guadagno più elevato rispetto ai fasci di broadcast (fig.3b).

Figura 3 - Il segnale SSB è associato ad un numero finito di fasci preselezionati (a), i dati di traffico sono trasmessi focalizzando un fascio verso l'utente(b) (Franci, 2020)



A seconda delle caratteristiche dell'antenna, esistono due modalità di creazione dei fasci di traffico (NGMN Alliance, 2020):

1. GRID OF BEAMS (GoB): in questa configurazione, i fasci di traffico vengono selezionati tra un numero finito di possibili fasci pre-configurati. differenziabili in relazione allo scenario di inserimento, tra i quali il sistema d'antenna sceglie, in tempo reale, quello/i più adatto/i da usare istante per istante
2. CONTINUOUS BEAMFORMING (CB o EEB – Eigen Based Beamforming): in questa configurazione, il fascio di traffico viene costruito in maniera adattiva, sintetizzando in maniera real-time il fascio che offre la migliore copertura alla UE. A differenza della modalità GoB, i singoli fasci sintetizzabili non sono enumerabili, ma sono (in teoria) infiniti perché costruiti variando in maniera continua gli array dei pesi applicati a ciascun singolo elemento radiante della AAS.

**ATTIVITÀ DEL SOTTOGRUPPO SNPA**

Inizialmente sono state raccolte in un elenco le tipologie di antenna relative ad impianti per i quali erano state ricevute dai gestori istanze per l'installazione. Sono state inoltre condivise alcune metodologie di calcolo del diagramma di involuppo fornite dai gestori/vendor. Per alcune tipologie di impianti, alcune Arpa avevano richiesto e ricevuto i diagrammi elementari: il sottogruppo ha quindi definito l'algoritmo di base, di seguito riportato, per la costruzione del diagramma di involuppo, necessario per procedere quindi ad un confronto con quanto fornito dal gestore.

## PROCEDURA

- Partendo dalla lettura dei file .msi dei singoli diagrammi elementari, caratterizzati ciascuno da un Guadagno massimo  $G_i$  ( $G_{\max\_i}$ ) e da un'attenuazione orizzontale e verticale per ciascun angolo  $\phi$  e  $\theta$  rispettivamente  $(A_\phi)_i$  e  $(A_\theta)_i$ , si determinano:

$$G_{\text{MAX}} = \max(G_{\max\_i}); \Delta G_i = G_{\text{MAX}} - G_{\max\_i}$$

- Si procede alla normalizzazione dell'i-esimo diagramma a  $G_{\text{MAX}}$

$$(A_\phi)_i^* = (A_\phi)_i + \Delta G_i; (A_\theta)_i^* = (A_\theta)_i + \Delta G_i$$

- Per ogni grado orizzontale e verticale  $\phi$  e  $\theta$ , si identifica il valore minimo dei valori di attenuazione normalizzati

$$(A_\phi)^{\text{INV}} = \min [(A_\phi)_i^*]; (A_\theta)^{\text{INV}} = \min [(A_\theta)_i^*]$$

- Viene infine creato il file di involuppo con estensione .msi caratterizzato dai parametri:

$$\begin{aligned} \text{guadagno} &= G_{\text{MAX}} \\ \text{attenuazioni orizzontali e verticali} &= G_{\text{MAX}} - (A_\phi)^{\text{INV}}; G_{\text{MAX}} - (A_\theta)^{\text{INV}} \end{aligned}$$

## ATTIVITA' DI CONFRONTO

Nelle figure successive si riporta graficamente il risultato del confronto fra i diagrammi di irradiazione di involuppo riportato dal gestore e quello calcolato da SNPA (fig. 4).

Figura 4 a – Antenna GoB - diagramma di involuppo fornito dal gestore

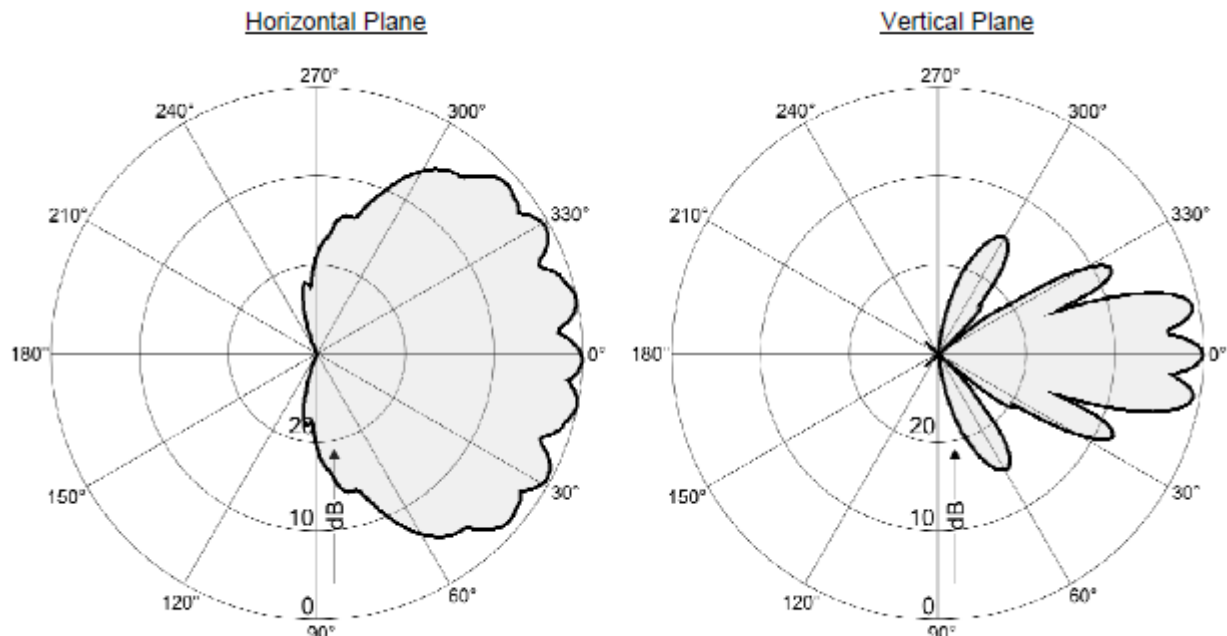
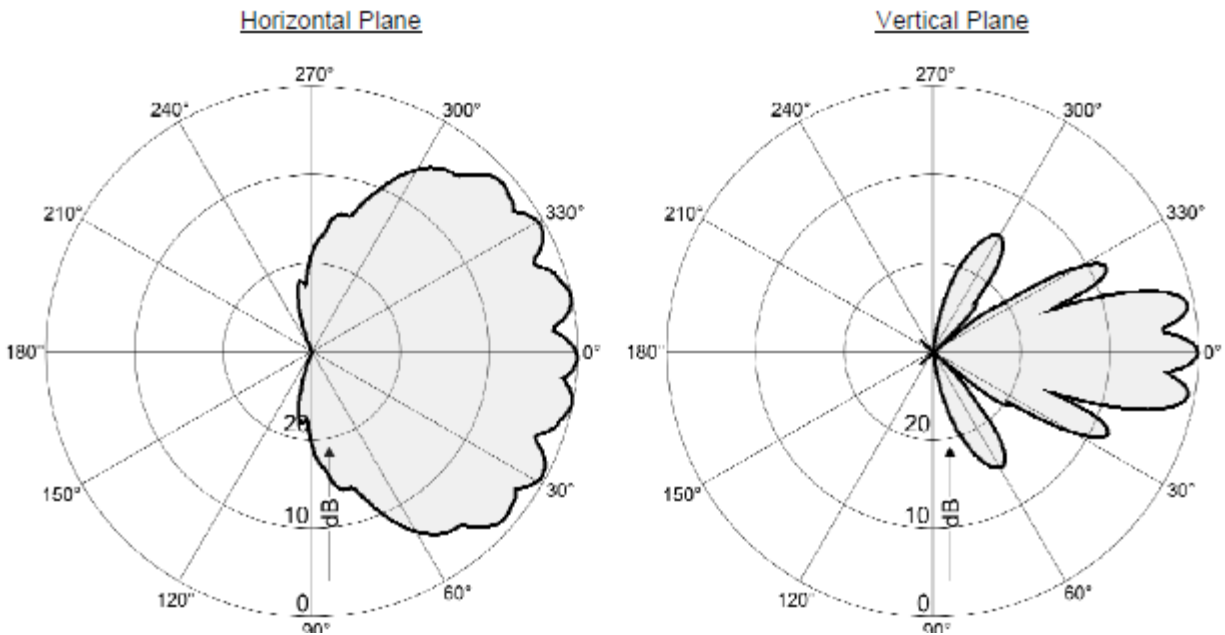
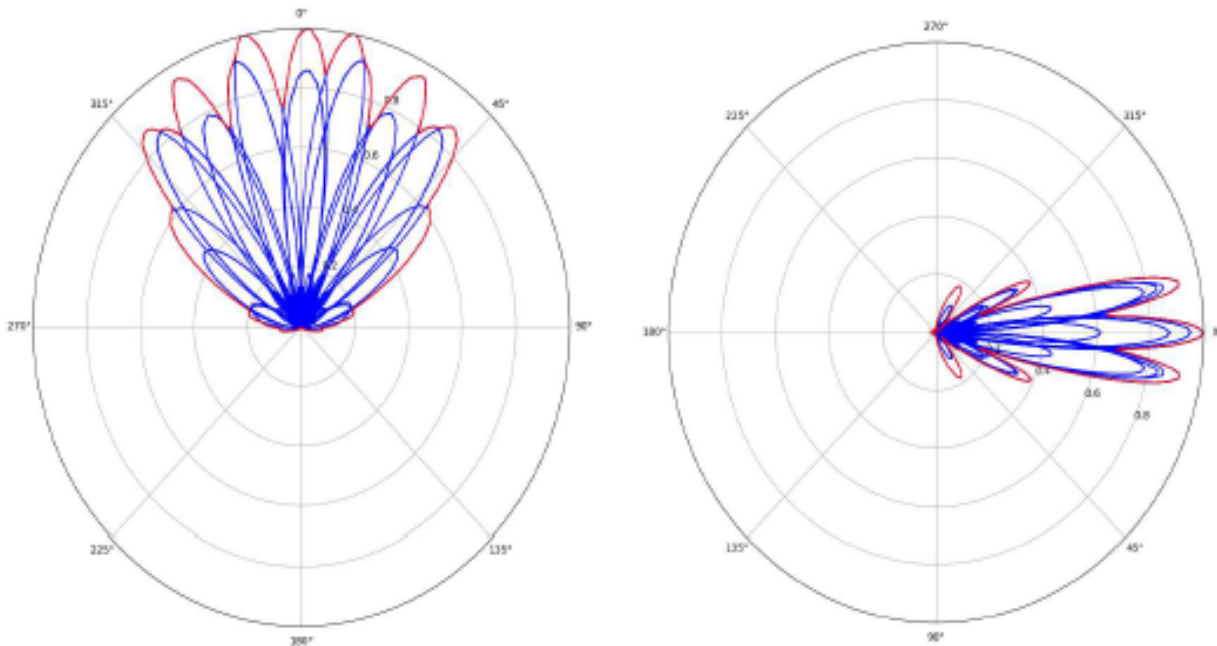


Figura 4 b – Antenna GoB - diagramma di involuppo calcolato da SNPA (basso)



Inoltre, la figura successiva (fig. 5) conferma che i singoli diagrammi elementari sono contenuti all'interno dell'involuppo, separatamente sul piano orizzontale e verticale,  $[(G_{max}, i, \phi, \theta) \leq G_{max} \text{ inv fornito dal gestore}]$ .

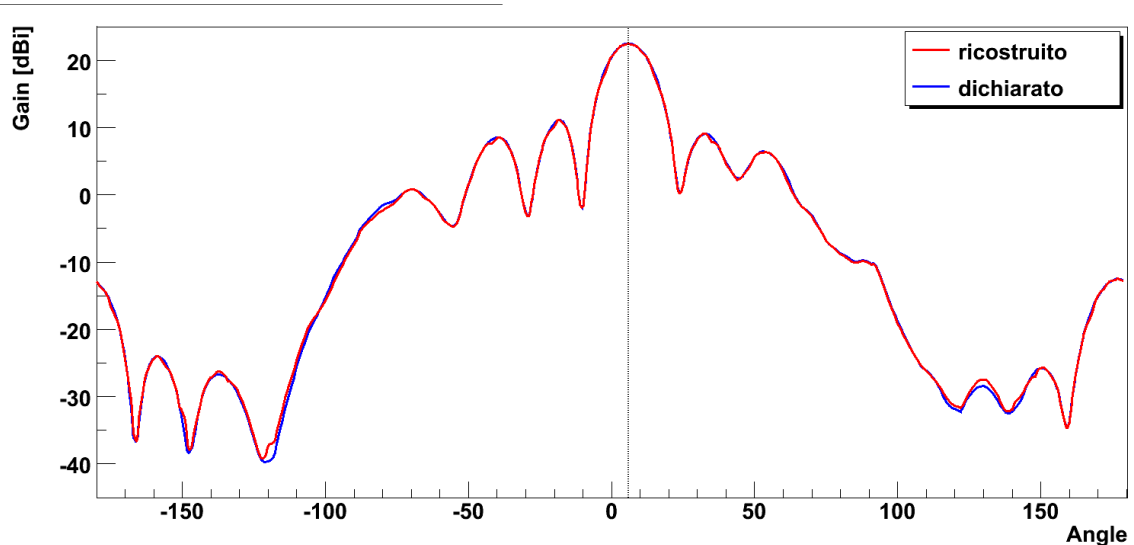
Figura 5 – Antenna GoB - diagramma di involuppo (rosso) contiene i diagrammi elementari (blu)



Considerazioni analoghe possono essere riportate anche per l'analisi su un diagramma di involuppo di un'antenna a fascio continuo (fig. 6 a,b), per il quale il gestore, su richiesta di SNPA,

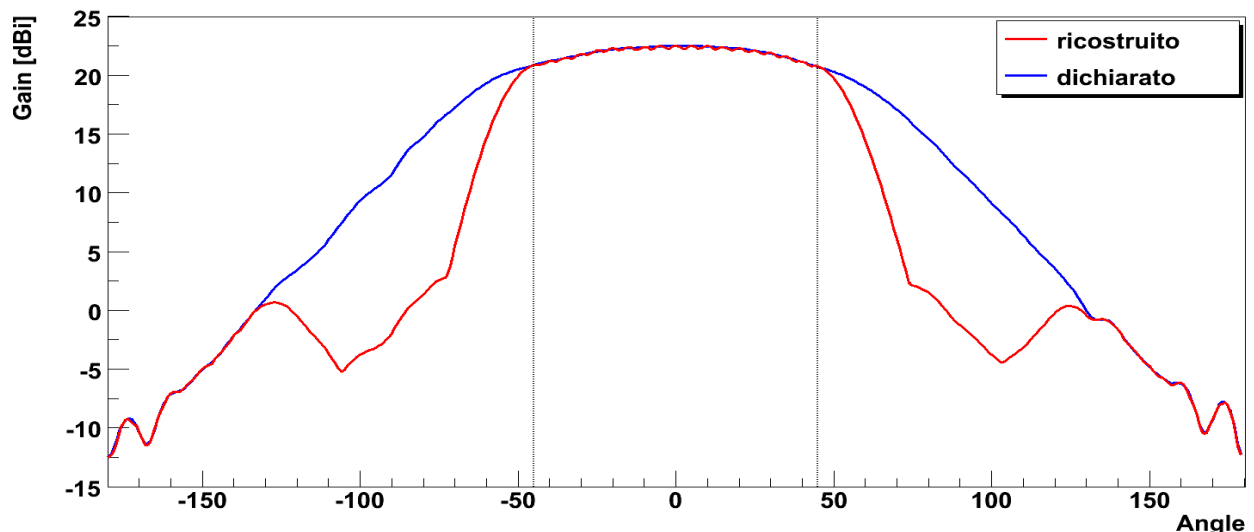
ha fornito almeno un diagramma elementare ogni 5 gradi contenuto nell'apertura a metà potenza dell'antenna (HPBW) del diagramma di involuppo sul piano orizzontale e almeno uno ogni 3 gradi contenuto nell'apertura a metà potenza dell'antenna (HPBW) del diagramma di involuppo sul piano verticale.

Figura 6 a – Antenna a fascio continuo - diagramma di involuppo verticale



L'involuppo verticale ricostruito presenta un eccellente accordo con quello presentato dal gestore, verificando anche l'indicazione del tilt elettrico di 6 gradi (linea verticale).

Figura 6 b – Antenna a fascio continuo - diagramma di involuppo orizzontale



L'involuppo orizzontale risulta in eccellente accordo nella regione  $[-45, 45^\circ]$  (evidenziata dalle linee verticali), mentre diverge sensibilmente nelle altre regioni; tale divergenza è giustificabile dall'estrazione dei fasci elementari fornita in quel range angolare.

Sono invece state rilevate differenze in situazioni specifiche, che tuttavia si osservano prevalentemente nei retrolobi; si è ipotizzato che per questi angoli, le differenze riscontrate possano essere attribuite ad una non corretta attribuzione del contributo dei fasci attivi sui canali



di controllo che risulterebbe superiore al contributo dei fasci attivi sui canali di traffico. A questo proposito sono tuttora in corso ulteriori approfondimenti.

In questa analisi, è emersa l'opportunità di migliorare l'accuratezza della stima dell'irradiazione di campo elettromagnetico avendo a disposizione la funzione guadagno (teorica o misurata) dell'antenna, per ogni coppia di angoli  $\theta$  e  $\phi$ .

Come riportato al punto 6.4.2 della Norma CEI 211-10, l'utilizzo dei diagrammi di irradiazione sul solo piano orizzontale e verticale ( $A_\theta$  e  $A_\phi$ ) "... presenta limiti di applicabilità e margini di errore, in particolare per le direzioni esterne al lobo principale".

Infatti, la ricostruzione del solido di irradiazione avviene attraverso l'interpolazione dei (360+360) valori di attenuazione presenti nei diagrammi d'antenna orizzontale e verticale forniti nelle istanze (generalmente con step di  $1^\circ$ ), approssimazione accettabile per quanto riguarda "...indicazioni significative sull'andamento dei lobi principali e sulle ampiezze massime dei lobi secondari...".

Considerando comunque che i diagrammi di irradiazione orizzontale e verticale rappresentano dei valori estratti da una ricostruzione tridimensionale dei 360-360 (se passo  $1^\circ$ ) valori di attenuazione (teorici o misurati) prodotti dai costruttori di antenna, il gruppo di lavoro SNPA suggerisce che nell'ambito della revisione della Norma CEI 211-10 possa essere approfondito anche questa tematica.

Potrebbe essere utile infatti indicare sia le situazioni di criticità che richiedano l'utilizzo del solido di irradiazione maggiormente aderente alle reali condizioni di irradiazione, sia le modalità operative di utilizzo dei valori forniti, nell'ambito delle procedure di valutazione dei progetti degli impianti.

## CONSIDERAZIONI FINALI

L'introduzione dei sistemi a fascio variabile impone, per il sistema Agenziale, una vera rivoluzione nell'ottica della valutazione dell'esposizione in quanto cade il paradigma che i canali di controllo, analogamente ai canali di traffico, vengano trasmessi sempre a potenza costante su tutta la cella.

Pertanto, è necessario introdurre concetti statistici nel processo di valutazione dei progetti, finora caratterizzato da parametri chiaramente determinabili, almeno per quanto riguarda i dati tecnici dell'impianto.

Questa necessità impone che le definizioni e le modalità di applicazione dei fattori statistici siano uniformi su tutto il territorio nazionale.

Oltre alla gestione del diagramma di inviluppo, il SNPA, nella delibera citata, definisce anche le modalità di gestione del fattore di riduzione della potenza massima  $P_{max}$  che tenga conto della variabilità spazio-temporale dell'emissione.

Per quanto riguarda il confronto con il limite di esposizione, tale fattore coincide con il parametro  $F_{PR}$  indicata in (1) e può essere applicato, vincolato alla registrazione dei dati per un periodo minimo pari a 30 giorni nelle normali condizioni di esercizio dell'impianto.

Per quanto riguarda il confronto con le soglie mediate sulle 24 ore (valori di attenzione e obiettivi di qualità), non essendo disponibili da subito i dati delle potenze medie sulle 24 ore come stabilito dal DM 2/12/2014, per un periodo transitorio della durata di 24 mesi dal 12/11/2020 (data di pubblicazione della Delibera SNPA), in luogo del fattore  $\alpha_{24}$ , può essere utilizzato un fattore di riduzione pari a 0.31, già comprensivo del fattore  $F_{TDC}$ .

Tale valore deriva da un caso studio, riportato nel documento CEI IEC TR62669:2019, e risulta il valore più cautelativo in relazione all'esposizione della popolazione, in quanto lo studio è stato realizzato in uno scenario di traffico molto elevato e bassa mobilità degli utenti (tab. 18). Gli studi riportati nella CEI IEC TR62669:2019 sono stati infatti condotti allo scopo di definire valori





Convegno Nazionale Airp  
Roma, 29 settembre - 1 ottobre 2021

numerici alla riduzione statistica della potenza associata al diagramma di involuppo in relazione alla variabilità spazio-temporale dei fasci emessi dall'antenna, riduzione statistica individuabile nel fattore  $F_{PR}$

### Bibliografia

CEI IEC TR 62669 *Casi di studio a supporto della Norma IEC 62232 – Determinazione dell'intensità di campo RF, della densità di potenza e del SAR in prossimità delle stazioni radio base per la valutazione dell'esposizione umana*, 2019

Daniele Franci, Stefano Coltellacci, Enrico Grillo, Settimio Pavoncello, Tommaso Aureli, Rossana Cintoli and Marco Donald Migliore, *Experimental Procedure for Fifth Generation (5G) Electromagnetic Field (EMF) Measurement and Maximum Power Extrapolation for Human Exposure Assessment*, 2020, MDPI

Decreto Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare 2 dicembre 2014, *Linee guida, relative alla definizione delle modalità con cui gli operatori forniscono all'ispra e alle arpa/appa i dati di potenza degli impianti e alla definizione dei fattori di riduzione della potenza da applicare nelle stime previsionali per tener conto della variabilità temporale dell'emissione degli impianti nell'arco delle 24 ore*, 2014, Gazzetta Ufficiale Serie Generale n.296 del 22-12-2014

Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 8 luglio 2003, *Fissazione dei limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici generati a frequenze comprese tra 100 kHz e 300 GHz*, 2003, Gazzetta Ufficiale Serie Generale n.199 del 28-08-2003

Delibera del Consiglio SNPA n. 88, *Criteri per la valutazione delle domande di autorizzazione all'installazione di impianti di reti di comunicazione elettronica con antenne mMIMO/AASs*, novembre 2020  
Legge 22 febbraio 2001, n. 36 *Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici*, Gazzetta Ufficiale n. 55 del 7 marzo 2001

Next Generation Mobile Networks (NGMN) Alliance, *Recommendation on Base Station Active Antenna System Standards v 1.0*, 2020

Norma CEI 211-10, *Guida alla realizzazione di una stazione radio base per rispettare i limiti di esposizione ai C.E.M. ad alta frequenza*, 2002 – Allegati A, B, C, D, E, F, G