



23.2.2021

---

## Spiegazioni concernenti le antenne adattative e la loro valutazione secondo l'ordinanza sulla protezione dalle radiazioni non ionizzanti (ORNI)

---

### Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione: 5G e antenne adattative</b> .....	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Ordinanza sulla protezione dalle radiazioni non ionizzanti (ORNI)</b> .....	<b>3</b>
2.1	Revisione dell'ORNI del 2019 in materia di telefonia mobile.....	3
2.2	Informazioni di base concernenti la previsione e la misurazione delle radiazioni di telefonia mobile.....	3
<b>3</b>	<b>5G</b> .....	<b>4</b>
3.1	Informazioni tecniche .....	4
3.2	Previsioni e misurazione del 5G .....	5
<b>4</b>	<b>Antenne adattative e <i>beamforming</i></b> .....	<b>5</b>
4.1	Costruzione di antenne operabili in modo adattativo e definizioni .....	5
4.2	Tecnologie di <i>beamforming</i> .....	7
4.3	Applicazioni del <i>beamforming</i> .....	8
4.4	Conclusione .....	8
<b>5</b>	<b>Previsioni e misurazione della radiazione delle antenne adattative</b> .....	<b>9</b>
5.1	Aspetti di base .....	9
5.2	Diagrammi d'antenne convenzionali.....	9
5.3	Diagrammi d'antenne a involuppo e antenne adattative.....	10
5.4	Considerazione dei diagrammi d'antenna a involuppo nelle previsioni di radiazione delle antenne adattative secondo le raccomandazioni sull'esecuzione dell'ORNI .....	12
5.5	Impiego dei diagrammi d'antenna delle antenne adattative nelle misurazioni di collaudo	13
<b>6</b>	<b>Esposizione attraverso antenne adattative</b> .....	<b>15</b>
6.1	Studi di simulazione e considerazioni teoriche .....	15
6.2	Studi di misurazione.....	17
6.3	Misurazioni e simulazioni dell'UFCOM .....	17
6.4	Conclusione .....	20
<b>7</b>	<b>Fattore di correzione e limitazione automatica della potenza</b> .....	<b>21</b>
<b>8</b>	<b>Altri aspetti</b> .....	<b>23</b>
8.1	Considerazione della modalità di funzionamento TDD.....	23
8.2	Monitoraggio ed esperienze raccolte dalle raccomandazioni sull'esecuzione .....	24
<b>9</b>	<b>Ulteriori informazioni</b> .....	<b>25</b>



## 1 Introduzione: 5G e antenne adattative

Le antenne di telefonia mobile attualmente utilizzate in Svizzera trasmettono essenzialmente con una radiazione costante nello spazio. Al contrario, le antenne adattative indirizzano il segnale verso l'utente o il dispositivo mobile e lo riducono nelle altre direzioni («*beamforming*»). Tali antenne saranno sempre più utilizzate in futuro, soprattutto con la quinta generazione di telefonia mobile (5G), ma sono utilizzabili anche per le tecnologie attuali (ad es. 4G).

L'uso di antenne adattative in Svizzera è riconducibile a vari fattori sintetizzati qui di seguito.

- All'inizio del 2019, la Confederazione ha rilasciato ulteriori frequenze nelle bande a 700 megahertz (MHz), 1400 MHz e da 3500 MHz a 3800 MHz (= 3,5 gigahertz (GHz) fino a 3,8 GHz) per la telefonia mobile. In particolare, le antenne adattative saranno utilizzate nella banda di frequenza da 3,5 GHz a 3,8 GHz. Da un lato, dal punto di vista della tecnologia di telefonia mobile, tali frequenze hanno caratteristiche di propagazione peggiori rispetto alle gamme di frequenza utilizzate finora intorno ai 2 GHz e inferiori, cioè sono attenuate o più fortemente attenuate quando attraversano l'aria o gli involucri degli edifici. Dall'altro, data la minore lunghezza d'onda della radiazione in questa gamma di frequenza (circa 8 cm), è possibile costruire antenne più piccole e complesse con cui i segnali possono essere convogliati nella direzione desiderata. In questo modo si riesce a compensare la qualità più mediocre delle caratteristiche di propagazione.
- Gli organismi di standardizzazione per le telecomunicazioni hanno pubblicato il primo set completo di norme per lo standard 5G alla fine del 2018. Rispetto alle precedenti generazioni di telefonia mobile, il 5G presenta un segnale strutturato in maniera più flessibile e prevede anche esplicitamente l'uso di antenne adattative. Nell'aprile del 2019 sono entrate in funzione in Svizzera le prime antenne di telefonia mobile che trasmettono segnali 5G.

L'introduzione di antenne adattative è stata quindi incoraggiata con le frequenze nella gamma da 3,5 a 3,8 GHz utilizzate per la telefonia mobile dall'inizio del 2019, e con la standardizzazione 5G che è a pieno regime dalla fine del 2018. Tuttavia, lo standard 5G definisce solo le modalità con cui i segnali digitali giungono all'antenna (cioè, come sono divisi tra le diverse porte di un'antenna adattativa). La funzionalità delle antenne adattative, invece, non dipende dalla standardizzazione 5G, bensì dal produttore (cfr. fig. 1).

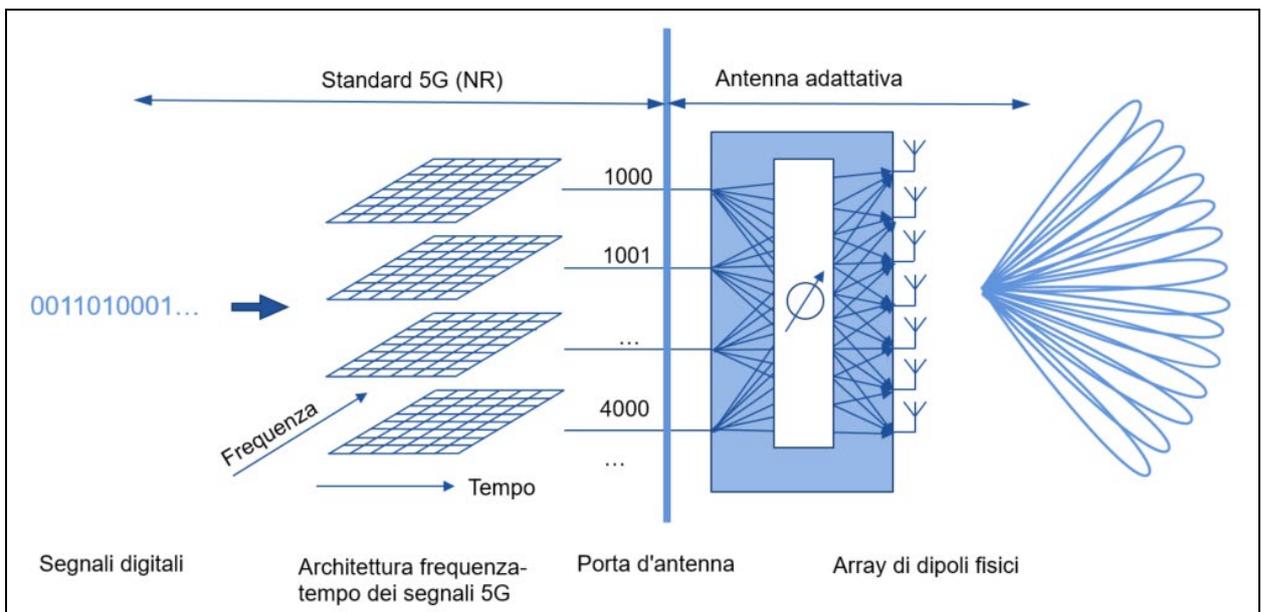


Figura 1: Rappresentazione schematica della relazione tra 5G e antenne adattative. Lo standard 5G definisce frequenza-tempo-struttura dei segnali e le modalità con cui i segnali giungono alle diverse porte dell'antenna. L'esercizio dell'antenna adattativa, invece, è indipendente dal 5G (fonte: METAS).

## 2 Ordinanza sulla protezione dalle radiazioni non ionizzanti (ORNI)

### 2.1 Revisione dell'ORNI del 2019 in materia di telefonia mobile

L'ordinanza sulla protezione dalle radiazioni non ionizzanti (ORNI) è neutrale dal punto di vista tecnologico per la telefonia mobile e si applica indipendentemente dal fatto che la tecnologia mobile sia di tipo 2G (GSM), 3G (UMTS), 4G (LTE) o 5G (New Radio). A causa delle nuove frequenze intorno ai 1400 MHz assegnate alla telefonia mobile all'inizio del 2019 e in vista dell'imminente impiego di antenne a funzionamento adattativo, risultava comunque necessaria una modifica dell'ORNI. Il 17 aprile 2019 sono state adottate varie decisioni.

- Per la gamma di frequenza da 900 MHz a 1800 MHz, nell'allegato 1 numero 64 ORNI non erano fissati valori limite per l'impianto. Il Consiglio federale ha fissato il limite a 5 volt per metro (V/m), coerentemente con l'attuale livello di precauzione.
- Per le antenne adattative, il Consiglio federale ha stabilito il principio secondo cui la variabilità delle loro direzioni di trasmissione e dei loro diagrammi d'antenna deve essere presa in considerazione per fissare lo stato di esercizio determinante in cui devono essere rispettati i valori limite dell'impianto secondo l'allegato 1 numero 64 ORNI.

Il 23.2.2021, l'UFAM ha pubblicato un complemento alle raccomandazioni sull'esecuzione dell'ORNI per le antenne adattative, in cui descrive in che modo la variabilità del diagramma d'antenna può essere considerata ai fini della valutazione prevista dalla ORNI. Le informazioni di base in merito a queste raccomandazioni sull'esecuzione e sugli aspetti fondamentali del 5G e delle antenne adattative sono illustrate nei prossimi capitoli.

### 2.2 Informazioni di base concernenti la previsione e la misurazione delle radiazioni di telefonia mobile

I Cantoni e i Comuni sono responsabili dell'autorizzazione e del controllo degli impianti telefonia mobile e del rispetto dei valori limite dell'ORNI. A seconda del Cantone, le procedure possono differire, ma i principi sono identici ovunque.

- **Previsioni di calcolo:** se si costruiscono nuovi impianti di telefonia mobile o si ampliano quelli esistenti, la radiazione prevista nelle vicinanze dell'impianto viene calcolata in anticipo per verificare il rispetto dei valori limite della ORNI. Questi calcoli si basano sui parametri operativi dell'impianto, come le direzioni del trasmettitore e la potenza di trasmissione. Queste informazioni e i risultati dei calcoli sono documentati nella scheda dei dati sul sito e sono controllati dalle autorità.
- **Misurazione di collaudo dopo la messa in esercizio:** se i calcoli mostrano che il valore limite dell'impianto secondo la ORNI supera l'80 per cento nei luoghi a utilizzazione sensibile (come abitazioni, scuole, ospedali, posti di lavoro fissi o parchi giochi per bambini), le autorità ordinano generalmente una misurazione di collaudo dopo la messa in esercizio dell'impianto nuovo o convertito. In questo modo, il rispetto dei valori limite dell'impianto è verificato non solo teoricamente, ma anche in condizioni operative reali.
- **Verifica durante l'esercizio:** siccome determinati parametri che influiscono sulle radiazioni nelle vicinanze di un impianto (come ad es. le potenze di trasmissione) possono essere impostati e modificati a distanza, gli operatori hanno implementato un sistema di garanzia della qualità nelle proprie centrali di rete. Si tratta di banche dati in cui i valori impostati per la direzione di trasmissione e la potenza massima di trasmissione sono registrati per ogni singolo impianto, per ogni frequenza e servizio di telefonia utilizzato e vengono confrontati quotidianamente con i parametri autorizzati. Le deviazioni dal funzionamento autorizzato devono essere rettifiche entro 24 ore laddove possibile tramite controllo a distanza, altrimenti entro una settimana lavorativa. Determinati parametri di esercizio e dati di autorizzazione (secondo la scheda dei dati sul sito) per tutti gli impianti figurano inoltre in una banca dati dell'Ufficio federale delle comunicazioni (UFKOM) e possono essere controllati dalle autorità.

Questa procedura di autorizzazione e di controllo è descritta nel presente documento in forma molto riassuntiva e solo nella misura necessaria per le presenti spiegazioni. Per informazioni dettagliate

sull'autorizzazione e sul controllo degli impianti telefonia mobile si rinvia al capitolo 7.2 del gruppo di lavoro [Rapporto di telefonia mobile e radiazioni](#) del 18 novembre 2019.

### 3 5G

#### 3.1 Informazioni tecniche

Il 5G si basa sullo standard 4G esistente (LTE). Il segnale 5G è strutturato in modo simile al segnale 4G in termini di frequenza-tempo-spazio ed è anche dotato della stessa **modulazione**, ovvero della **modulazione OFDM** («Orthogonal Frequency-Division Multiplexing», tecnologia di telefonia mobile multiplex a divisione di frequenza ortogonale).

Il 5G può quindi essere utilizzato insieme al 4G. In questa **modalità di esercizio «non stand-alone»**, la segnalazione (cioè la fornitura a una cella telefonica d'informazioni per identificare questa cella) avviene tramite una rete 4G già esistente. I dati dell'utente, tuttavia, sono trasmessi con lo standard 5G nella stessa banda di frequenza del 4G (i cosiddetti canali di traffico). Il 5G può essere utilizzato anche indipendentemente dal 4G. Nella **modalità di esercizio «stand-alone»**, sia la segnalazione che i dati dell'utente sono trasmessi via 5G. La piena efficienza del 5G si ottiene solo in questo modo.

Il 5G dispone quindi degli stessi canali di segnalazione e di scambi di cui sono provviste le attuali tecnologie di telefonia mobile. A differenza delle precedenti generazioni di telefonia mobile, in cui i canali di segnalazione e di scambi erano sempre trasmessi con lo stesso **diagramma d'antenna**, con il 5G tali canali possono essere trasmessi con diagrammi diversi (per maggiori dettagli si rinvia al cap. 5.3).

Nella standardizzazione internazionale, sono previste due **gamme di frequenza** per il 5G: una per le frequenze inferiori a 6 GHz (FR1: da 450 MHz a 6000 MHz) e una per le frequenze superiori a 6 GHz (FR2: da 24,25 GHz a 52,6 GHz), per le quali si parla di «onde millimetriche». In Svizzera, il 5G è utilizzato tra 700 MHz e 3800 MHz (= 3,8 GHz) (cfr. fig. 2). Le onde millimetriche non sono attualmente previste per la telefonia mobile in Svizzera. Il Consiglio federale dovrebbe decidere sull'uso di queste bande di frequenza nell'ambito dell'approvazione del Piano nazionale di attribuzione delle frequenze (PNAF).

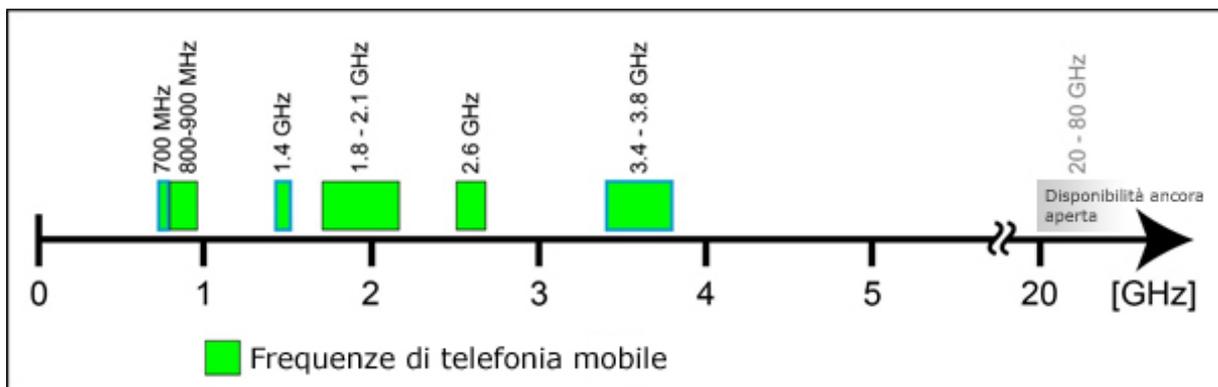


Figura 2: Il 5G può essere impiegato in Svizzera su tutte le frequenze autorizzate per le comunicazioni mobili da 700 MHz a 3,8 GHz. Le prime antenne adattative sono utilizzate nella gamma da 3,4 GHz a 3,8 GHz (fonte: gruppo di lavoro RNI dell'associazione Cercl'Air).

Nelle bande di frequenza da 700 MHz a 2,6 GHz in Svizzera, rispetto ai segnali dal terminale all'antenna (*uplink*) i segnali dalla stazione di base al dispositivo mobile (*downlink*) sono attualmente trasmessi su una frequenza diversa (o in una banda di frequenza adiacente separata), nota come **frequenza duplex** («Frequency Division Duplexing», **FDD**).

Da 3,4 a 3,8 GHz e in parte a 2,6 GHz, il *downlink* e l'*uplink* sono effettuati sulla stessa frequenza ma in tempi diversi, chiamati **tempo duplex** («Time Division Duplexing», **TDD**). Le finestre temporali per il *downlink* e l'*uplink* sono chiaramente definite; per il momento il rapporto tra *downlink* e *uplink* è rispettivamente di 4:1 e 80:20. La stazione di base trasmette quindi al massimo l'80 per cento del tempo durante un ciclo *downlink-uplink*, mentre il 20 per cento del tempo è riservato alla trasmissione dal

dispositivo mobile alla stazione di base. Il TDD trova impiego quando ci sono nettamente più dati da trasmettere in *downlink* che in *uplink*. Inoltre, sia il *downlink* che l'*uplink* presentano le stesse caratteristiche di propagazione.

L'utilizzo di FDD o TDD non dipende dalla generazione di telefonia mobile, ma è specificato nelle concessioni per le singole frequenze. Di conseguenza, l'FDD è utilizzato anche per il 5G tra 700 MHz e 2,6 GHz e il TDD in parte a 2,6 GHz e tra 3,4 GHz e 3,8 GHz.

### 3.2 Previsioni e misurazione del 5G

I valori limite d'immissione e dell'impianto specificati nella ORNI variano a seconda della frequenza della radiazione, ma non dipendono dalla tecnologia di telefonia mobile e quindi si applicano indipendentemente dal fatto che si tratti di 2G (GSM), 3G (UMTS), 4G (LTE) o 5G (New Radio). Le **previsioni di calcolo** delle radiazioni nel quadro della procedura di autorizzazione sono neutrali dal punto di vista tecnologico e pertanto sono applicabili anche al 5G.

La tecnologia di telefonia mobile utilizzata entra in gioco solo per le **misurazioni di collaudo** dopo la messa in servizio, poiché viene utilizzata una forma di segnale diversa a seconda dello standard di telefonia mobile. Nel rapporto tecnico del 18 febbraio 2020 «[Metodo di misurazione per stazioni di base 5G NR](#)», l'Istituto federale di metrologia (METAS) ha descritto come vengono definiti i segnali 5G e quali componenti del segnale vanno misurate. Ulteriori informazioni in merito figurano anche nel capitolo 2.1 delle [spiegazioni del 30 giugno 2020 concernenti il metodo di misurazione per le antenne adattative](#) dell'UFAM (disponibili unicamente in tedesco e in francese).

## 4 Antenne adattative e *beamforming*

### 4.1 Costruzione di antenne operabili in modo adattativo e definizioni

Un'antenna adattativa è costituita da una serie di antenne elementari (a polarizzazione incrociata) o di elementi disposti in colonne e file, anche note come antenne ad *array* (cfr. fig. 3).

- Interconnettendo diversi elementi dell'antenna, si può indirizzare la radiazione emessa, in un cosiddetto fascio. In termini semplificati, vale quanto segue: maggiore è il numero di elementi dell'antenna, maggiore è la direttività possibile, cioè più stretto è il fascio emesso e maggiore è il guadagno dell'antenna.
- Se gli elementi dell'antenna singoli o interconnessi sono controllati in modo diverso (ad es. tramite spostamenti di fase), la direzione principale di trasmissione del fascio può essere spostata orizzontalmente e verticalmente.

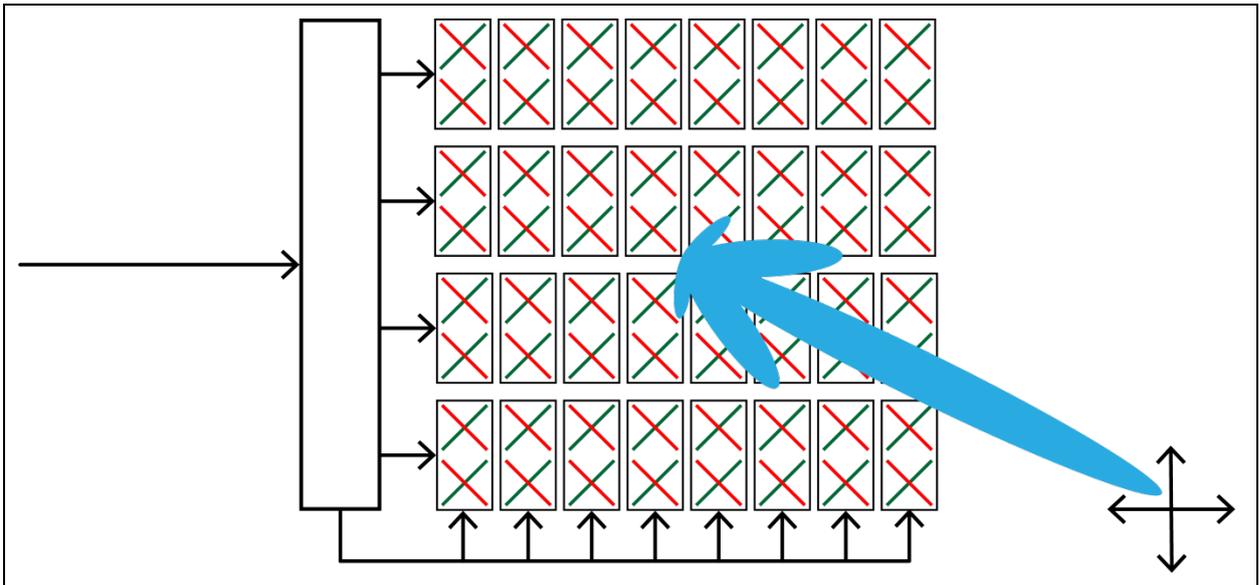


Figura 3: Esempificazione del principio di antenna adattativa con 64 elementi composti da dipoli incrociati (in rosso e verde). Nell'esempio, per ciascuna antenna due elementi sono collegati tra loro per formare un *sub-array*. L'antenna risulta dunque costituita di  $4 \times 8 = 32$  *sub-array*.

I seguenti termini sono usati in relazione al complemento alle raccomandazioni sull'esecuzione dell'ORNI per le antenne adattative.

Le **antenne adattative** secondo la ORNI sono antenne trasmettenti o sistemi di antenne che regolano automaticamente la loro direzione di trasmissione e/o il loro diagramma d'antenna a brevi intervalli di tempo, senza modifiche della direzione di montaggio.

Nelle antenne di telefonia mobile abitualmente in uso oggi, un **elemento dell'antenna** è formato da due dipoli polarizzati incrociati; nella figura 3, il dipolo verde è polarizzato a  $+45^\circ$  e il dipolo rosso a  $-45^\circ$ . I segnali trasmessi presentano quindi due diversi livelli di polarizzazione.

Gli elementi dell'antenna che sono fisicamente fissati tra loro sono chiamati **sub-array**. Per esempio, se un'antenna composta da 96 elementi (= 192 dipoli) possiede 3 elementi sempre collegati tra loro, l'antenna ha 32 *sub-array*; se 6 elementi sono collegati tra loro, l'antenna ha 16 *sub-array*. Oppure un'antenna composta da 64 elementi (= 128 dipoli) ha 32 *sub-array* se 2 elementi sono collegati in modo fisso tra loro e 16 *sub-array* se 4 elementi sono collegati fisicamente tra di loro.

Nel presente esempio, ogni polarizzazione di un *sub-array* è servita da un **percorso di trasmissione** separato – o per spiegarla al contrario: un percorso di trasmissione serve sempre tutti i dipoli interconnessi della stessa polarizzazione di un *sub-array*. Nel caso delle antenne con dipoli a polarizzazione incrociata, un *sub-array* presenta quindi 2 percorsi di trasmissione.

Ogni percorso di trasmissione è controllato da uno stadio di uscita separato (il cosiddetto trasmettitore o elemento TX). Un percorso di trasmissione corrisponde normalmente anche a un percorso di ricezione (ricevitore o RX), in cui i segnali fluiscono in direzione opposta durante la ricezione. Una cosiddetta antenna 64T/64R possiede quindi 64 percorsi di trasmissione o 32 *sub-array* e un'antenna 32T/32R ha 32 percorsi di trasmissione o 16 *sub-array* (cfr. tab. 1).

Tabella 1: Esempi numerici della correlazione tra il numero di dipoli, elementi dell'antenna, *sub-array* e percorsi di trasmissione per le antenne con dipoli a polarizzazione incrociata.

Numero di dipoli	Numero di elementi dell'antenna	Numero di elementi dell'antenna fisicamente interconnessi	Numero di <i>sub-array</i>	Numero di percorsi di trasmissione	Stadi di uscita (percorso di trasmissione x percorso di ricezione)
192	96	3	32	64	64×64 o 64T/64R
192	96	6	16	32	32×32 o 32T/32R
128	64	2	32	64	64×64 o 64T/64R
128	64	4	16	32	32×32 o 32T/32R

Il numero di fasci che un'antenna adattativa può generare dipende dal numero di unità controllabili separatamente. Per quanto riguarda l'esposizione umana, dove i diversi livelli di polarizzazione non hanno un ruolo significativo, è dunque rilevante il numero di *sub-array*. Il numero di percorsi di trasmissione (o ricetrasmittitori, ad es. 64T) è in genere riportato nelle schede tecniche dell'antenna. Per le antenne con due livelli di polarizzazione, questo dato può essere diviso per 2 per ottenere il numero di *sub-array* di un'antenna.

#### 4.2 Tecnologie di *beamforming*

Controllare i diversi elementi dell'antenna in modo diverso è diventato possibile grazie alle elevate prestazioni dei computer moderni, che riescono a elaborare i segnali più velocemente che in passato. A seconda del punto in cui, nell'elaborazione del segnale, avvengono gli spostamenti di fase per il diverso controllo degli elementi dell'antenna, sono possibili diversi numeri di fasci emessi simultaneamente e la tecnologia di *beamforming* prende un nome diverso, motivo per cui le definizioni non sono sempre usate esattamente allo stesso modo.

Se lo spostamento di fase applicato al segnale per i singoli elementi dell'antenna avviene dopo la conversione digitale-analogica del segnale (nella sezione ad alta frequenza dell'antenna), si parla di ***beamforming analogico***. Le antenne che funzionano con *beamforming* analogico possono trasmettere un solo fascio o un solo diagramma specifico d'antenna alla volta. Diversi diagrammi o direzioni di trasmissione (fasci) devono quindi essere propagati in successione. Inoltre, lo spostamento di fase è applicato all'intera banda di frequenza, vale a dire che le singole gamme di frequenza non possono essere trasmesse simultaneamente in direzioni diverse. Nel *beamforming* analogico, l'informazione di fase è applicata linearmente a tutti gli elementi di un'antenna, il che significa che al massimo può essere generato un numero di estensioni spaziali diverse o fasci corrispondente al numero di unità controllabili separatamente nell'antenna (*sub-array*).

Se il segnale viene diviso tra i vari elementi dell'antenna nella parte digitale di elaborazione e quindi prima della sua conversione digitale-analogica, si parla di ***beamforming digitale***. Con il *beamforming* digitale, teoricamente è possibile generare simultaneamente qualsiasi numero di fasci e in qualsiasi direzione, poiché ad ogni elemento dell'antenna può essere assegnata la propria informazione di ampiezza e fase. Inoltre, il diagramma d'antenna che ne risulta non deve necessariamente avere una chiara direzione del fascio principale. Per esempio, un canale può essere personalizzato per un terminale se non c'è una linea di visibilità verso la stazione base, utilizzando vie di propagazione diverse.

Le antenne adattative attualmente in uso impiegano spesso una combinazione di *beamforming* analogico e digitale, che è indicato come ***beamforming ibrido***. In questo caso, i diversi elementi dell'antenna sono combinati in un «blocco funzionale» e ciascuno è gestito con tecnologia analogica di *beamforming*. Questo si traduce in limitazioni sul numero di fasci che possono essere trasmessi simultaneamente. Se vengono emessi più fasci contemporaneamente, la potenza di trasmissione a disposizione della stazione di base viene suddivisa tra i vari fasci (UFCOM 2021).

### 4.3 Applicazioni del *beamforming*

Oltre alle diverse possibilità di formare i fasci, ci sono anche diverse possibilità di applicare la tecnologia di *beamforming*. In pratica, sono menzionate le seguenti varianti, anche se le denominazioni non sono sempre coerenti a seconda della fonte (UFCOM 2021).

- Per i collegamenti di telefonia mobile senza riflessi, soprattutto in linea di vista, la stazione base invierà un fascio singolo diretto con la migliore qualità di connessione al terminale (**SISO: Single Input, Single Output**).
- Nel caso di connessioni di telefonia mobile più scadenti, l'antenna può inviare lo stesso flusso di dati al dispositivo mobile attraverso vie diverse, ad esempio tramite riflessioni da strutture circostanti come facciate di case o rialzi del terreno, e ridurre la radiazione in direzione di altri utenti (**SIMO: Single Input, Multiple Output**).
- Per aumentare la velocità dei dati, diversi flussi di dati possono anche essere inviati a un dispositivo mobile simultaneamente attraverso diversi fasci (**SU-MIMO: Single User - Multiple Input, Multiple Output**).
- Nell'uso quotidiano, diversi terminali sono controllati simultaneamente da un'antenna della stazione di base attraverso diversi fasci. Le connessioni individuali si adattano alla struttura all'interno della cella di telefonia mobile e possono stabilire sia connessioni dirette che connessioni tramite riflessi (**MU-MIMO: Multi User - Multiple Input, Multiple Output**).
- Se l'antenna della stazione base è composta da un numero elevato di elementi d'antenna (oltre cento) e può quindi generare molti fasci individuali, allora un dispositivo terminale può essere controllato simultaneamente attraverso vari percorsi di connessione (**mMIMO: massive Multiple Input, Multiple Output**).

### 4.4 Conclusione

Indipendentemente dalla denominazione delle applicazioni e delle tecnologie di *beamforming*, i seguenti punti sono rilevanti per quanto concerne l'esecuzione dell'ORNI per le antenne adattative.

- Interconnettendo diversi elementi dell'antenna (cosiddetti *sub-array*), si può generare una direttività della radiazione emessa, un cosiddetto fascio. In termini semplificati, vale quanto segue: maggiore è il numero di elementi, maggiore è la direttività possibile, cioè più stretto è il fascio emesso e maggiore è il guadagno dell'antenna.
- Il numero di fasci che un'antenna adattativa può generare dipende dal numero di unità d'antenna controllabili separatamente – il numero di *sub-array*.
- A seconda della tecnologia utilizzata, può essere emesso un solo raggio alla volta o diversi raggi contemporaneamente.
- Il diagramma d'antenna non deve necessariamente avere una direzione chiara del fascio principale, ma può presentare diverse caratteristiche.
- Tuttavia, tutti i fasci e le forme di estensione possibili rimangono all'interno di un diagramma d'antenna a inviluppo (cfr. cap. 5.3).
- Se viene emesso solo un fascio alla volta, la massima potenza di trasmissione può essere concentrata in questo fascio. Se diversi fasci sono emessi in contemporanea, la potenza di trasmissione disponibile per la stazione base è suddivisa tra i vari fasci, come dimostrato anche dalle misurazioni effettuate dall'Ufficio federale delle comunicazioni (UFCOM) nell'estate del 2020 (UFCOM 2021).

## 5 Previsioni e misurazione della radiazione delle antenne adattative

### 5.1 Aspetti di base

L'esposizione nelle vicinanze di una stazione di base dipende fondamentalmente dalla potenza di trasmissione equivalente ERP (*effective radiated power*) dell'antenna, dal modello di radiazione spaziale dell'antenna (diagramma d'antenna), dalla distanza e dalla direzione dell'antenna e dall'attenuazione da parte dell'involucro dell'edificio (muri, tetti). Se, in una determinata situazione, questi fattori sono noti, è possibile calcolare l'immissione causata da un'antenna di telefonia mobile in una posizione specifica nell'ambiente, espressa come intensità del campo elettrico in volt per metro (V/m). Tutti questi parametri e i risultati dei calcoli sono documentati nella scheda dei dati sul sito che gli operatori devono presentare e che viene controllata dall'autorità.

Sia per le antenne convenzionali che per quelle adattative, i diagrammi d'antenna, che descrivono il modello di radiazione spaziale dell'antenna, costituiscono un elemento centrale per le previsioni di calcolo nell'ambito delle autorizzazioni.

### 5.2 Diagrammi d'antenne convenzionali

Già le antenne convenzionali non trasmettono uniformemente in tutte le direzioni, ma raggruppano i segnali di telefonia mobile e li dirigono nella direzione del fascio principale desiderato. All'esterno del cono, la radiazione è ancora presente, seppure molto ridotta. Tuttavia, i cosiddetti «lobi laterali» appaiono accanto al fascio principale, in cui anche la radiazione è anche più elevata. La figura 4 mostra una rappresentazione 3D della radiazione di un'antenna LTE misurata con un drone.

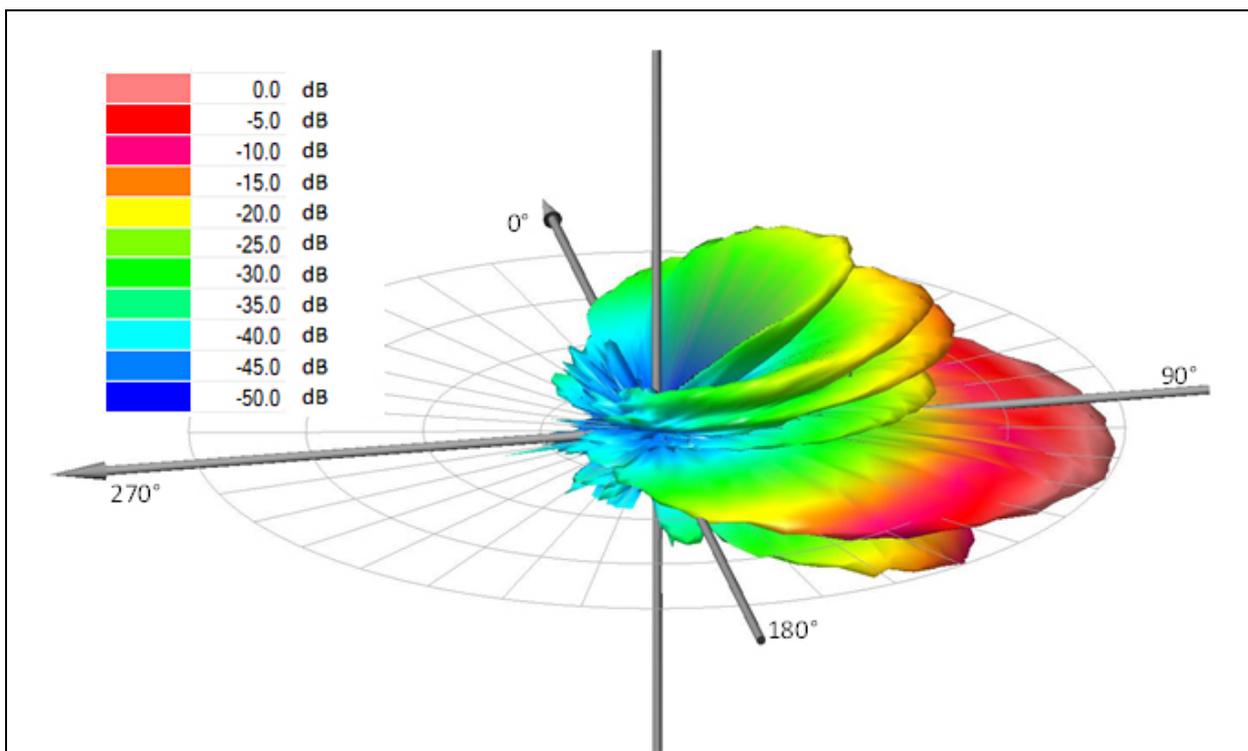


Figura 4: Rappresentazione in 3D della radiazione di un'antenna LTE che trasmette alla frequenza di 1800 MHz. L'antenna si trova al centro del grafico e trasmette con una leggera inclinazione verso il basso (elevazione) nella direzione contrassegnata con 90° (azimut). Oltre al fascio principale di colore rosso, sono visibili anche i lobi laterali (fonte: STRAPAG 2018).

Se si osserva la rappresentazione in 3D lateralmente e si fa una sezione verticale, si ottiene il diagramma dell'antenna verticale bidimensionale (cfr. fig. 5, a sinistra). Nell'esempio illustrato, si può vedere che l'antenna non irradia orizzontalmente (0°), bensì con una leggera inclinazione verso il basso.

Se si osserva l'antenna dall'alto e si fa una sezione orizzontale attraverso il diagramma dell'antenna 3D, si ottiene il diagramma dell'antenna orizzontale bidimensionale (cfr. fig. 5, a destra), che mostra in quale direzione (azimut in gradi) l'antenna sta trasmettendo.

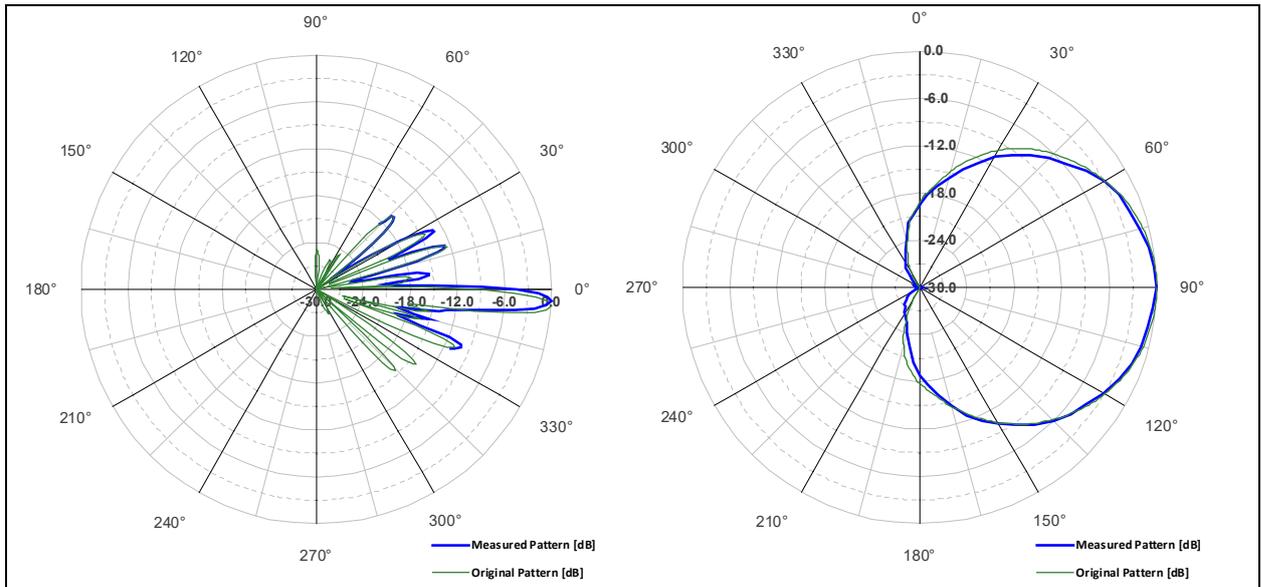


Figura 5: Schema verticale dell'antenna (a sinistra) e orizzontale (a destra) di un'antenna LTE che trasmette nella gamma dei 1800 MHz. In verde il diagramma originale misurato in laboratorio e in blu il diagramma dell'antenna misurato sul campo con un drone (in termini d'intensità del campo elettrico) (fonte: STRAPAG 2018).

I diagrammi d'antenna orizzontali e verticali sono forniti dal produttore dell'antenna e sono anche inclusi nella scheda dei dati sul sito che gli operatori devono presentare per la procedura di autorizzazione, che fornisce informazioni essenziali per calcolare l'intensità del campo elettrico nei luoghi a utilizzazione sensibile in prossimità dell'impianto.

I diagrammi d'antenna sono misurati dal produttore in laboratorio. Nel 2018, nell'ambito di uno [studio pilota](#), l'UFAM ha fatto misurare il modello di radiazione spaziale di un impianto di telefonia mobile esistente in un ambiente reale utilizzando un drone. I risultati hanno mostrato che i diagrammi d'antenna misurati corrispondevano sostanzialmente ai modelli originali (cfr. STRAPAG 2018).

### 5.3 Diagrammi d'antenne a involuppo e antenne adattative

L'allegato 1 numero 63 ORNI definisce ciò che si considera lo stato di esercizio determinante di un impianto di telefonia mobile in cui il valore limite dell'impianto deve essere rispettato nei luoghi a utilizzazione sensibile. In linea di principio, lo stato di esercizio determinante indica il traffico massimo di dati e chiamate alla massima potenza di trasmissione.

Nel caso delle antenne convenzionali, il modello di radiazione spaziale (rappresentato come diagramma d'antenna) è sempre il medesimo. Nel caso delle antenne adattative, invece, il modello di radiazione può assumere caratteristiche spaziali differenti per il massimo di scambi di chiamate e dati alla massima potenza di trasmissione. Per esempio, si può formare un unico fascio, che può essere trasmesso in diverse direzioni (cfr. fig. 6) per permettere alle antenne adattative di raggiungere un'elevata copertura nell'area ed eventualmente rifornire le zone prima poco coperte ai margini della cella di copertura con un'intensità di campo maggiore. Diversi fasci possono anche essere emessi simultaneamente e la loro direzione di trasmissione principale può anche variare.

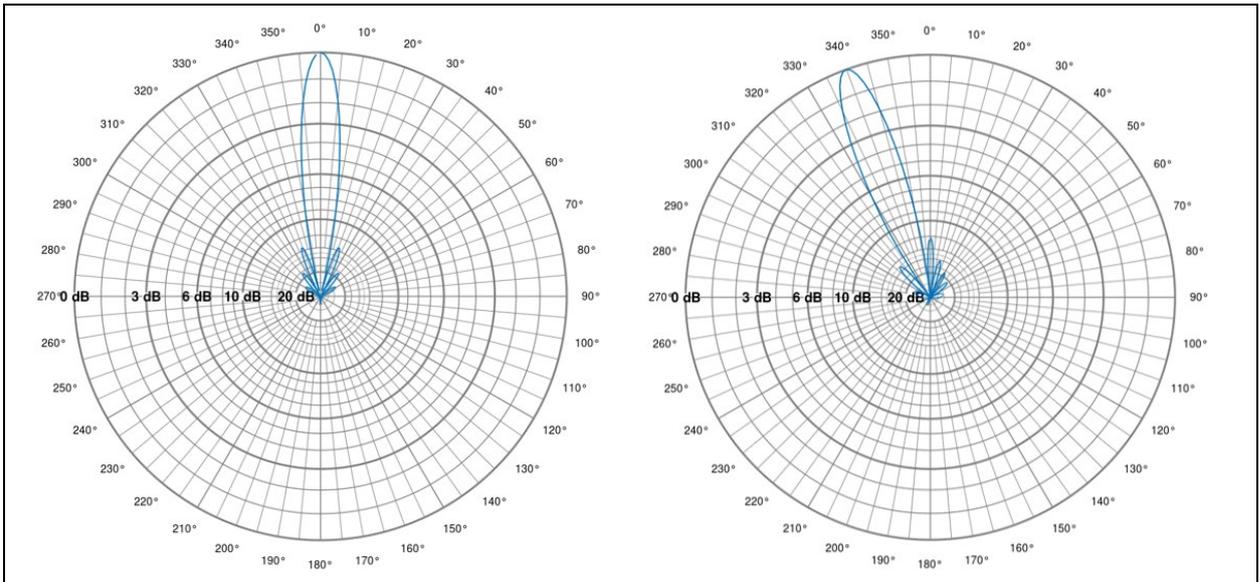


Figura 6: Alcuni esempi di come può apparire il diagramma d'antenna orizzontale di un'antenna adattativa nello stato di esercizio determinante. Nell'immagine a sinistra l'azimut della direzione di trasmissione principale è 0° e nell'immagine a destra 340°.

Il diagramma d'antenna nello stato di esercizio determinante non è quindi sempre lo stesso per le antenne adattative. Le previsioni di calcolo per le antenne adattative si basano dunque su un diagramma d'antenna a inviluppo, che include tutti i diagrammi possibili nello stato di esercizio determinante (cfr. fig. 7). I diagrammi d'antenna a inviluppo tengono conto del fatto che i fasci in direzioni che deviano fortemente dalla direzione del fascio principale sono meno fortemente raggruppati e mostrano un guadagno d'antenna minore.

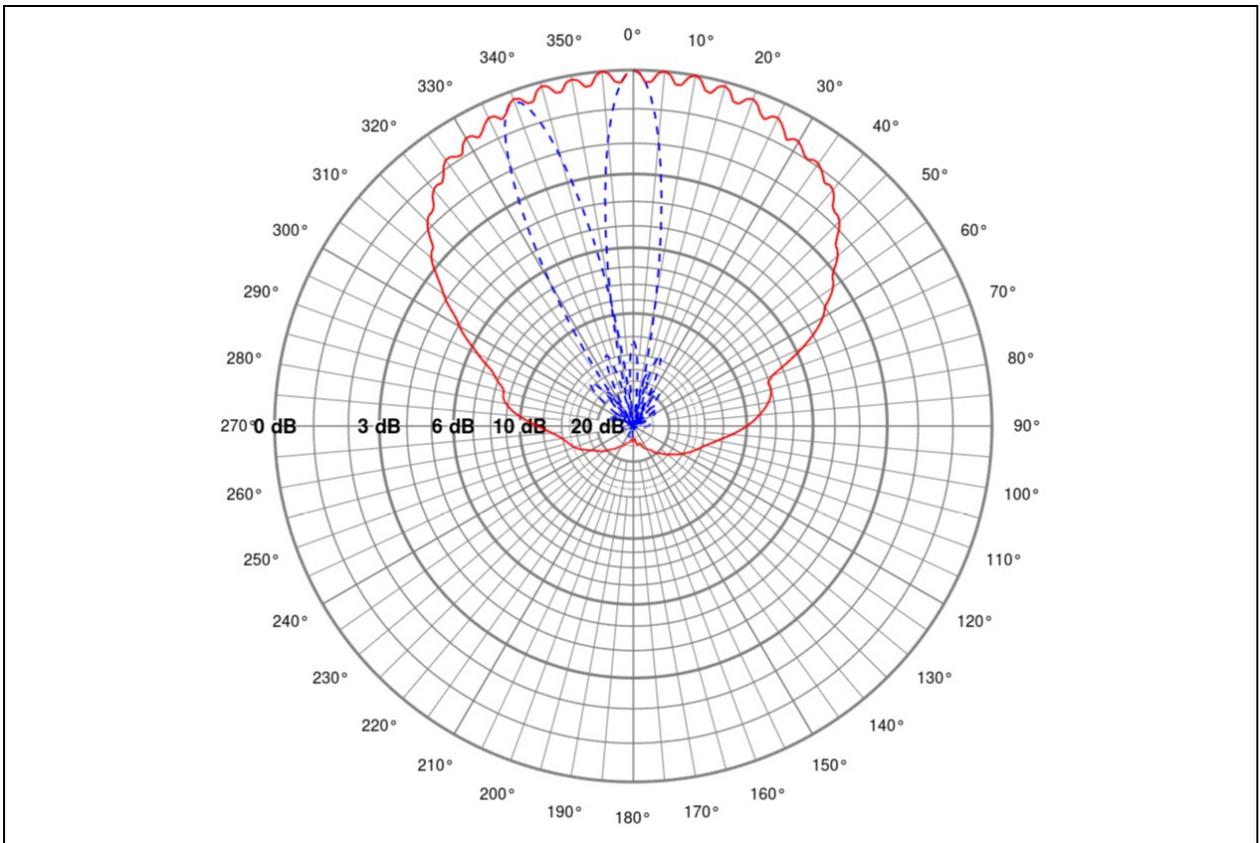


Figura 7: Esempio di diagramma d'antenna orizzontale a inviluppo di un'antenna Ericsson (AIR6488) che trasmette nella gamma 3,6 GHz. Il diagramma d'antenna a inviluppo include tutti i diagrammi che possono teoricamente verificarsi nello stato di esercizio determinante. Questi singoli diagrammi non possono essere tuttavia trasmessi tutti in contemporanea.

Nell'esempio della figura 7, le caratteristiche dei singoli fasci sono chiaramente visibili nel diagramma d'antenna a involuppo, una conseguenza del fatto che questa antenna utilizza diagrammi predefiniti. Tuttavia, esistono anche antenne adattative che calcolano e regolano continuamente il diagramma al fine di fornire la migliore copertura possibile per i dispositivi mobili attivi nella cella di telefonia mobile. Oltre alla posizione dei dispositivi finali e ai loro requisiti di qualità per il collegamento di telefonia mobile, sono inclusi anche i riflessi e le ombre esistenti e altre condizioni limite come la topografia. In questo modo le forme del fascio o i diagrammi d'antenna concretamente applicati assumono contorni differenti, pur essendo sempre dei diagrammi d'antenna a involuppo. Uno di questi esempi è illustrato nella figura 8.

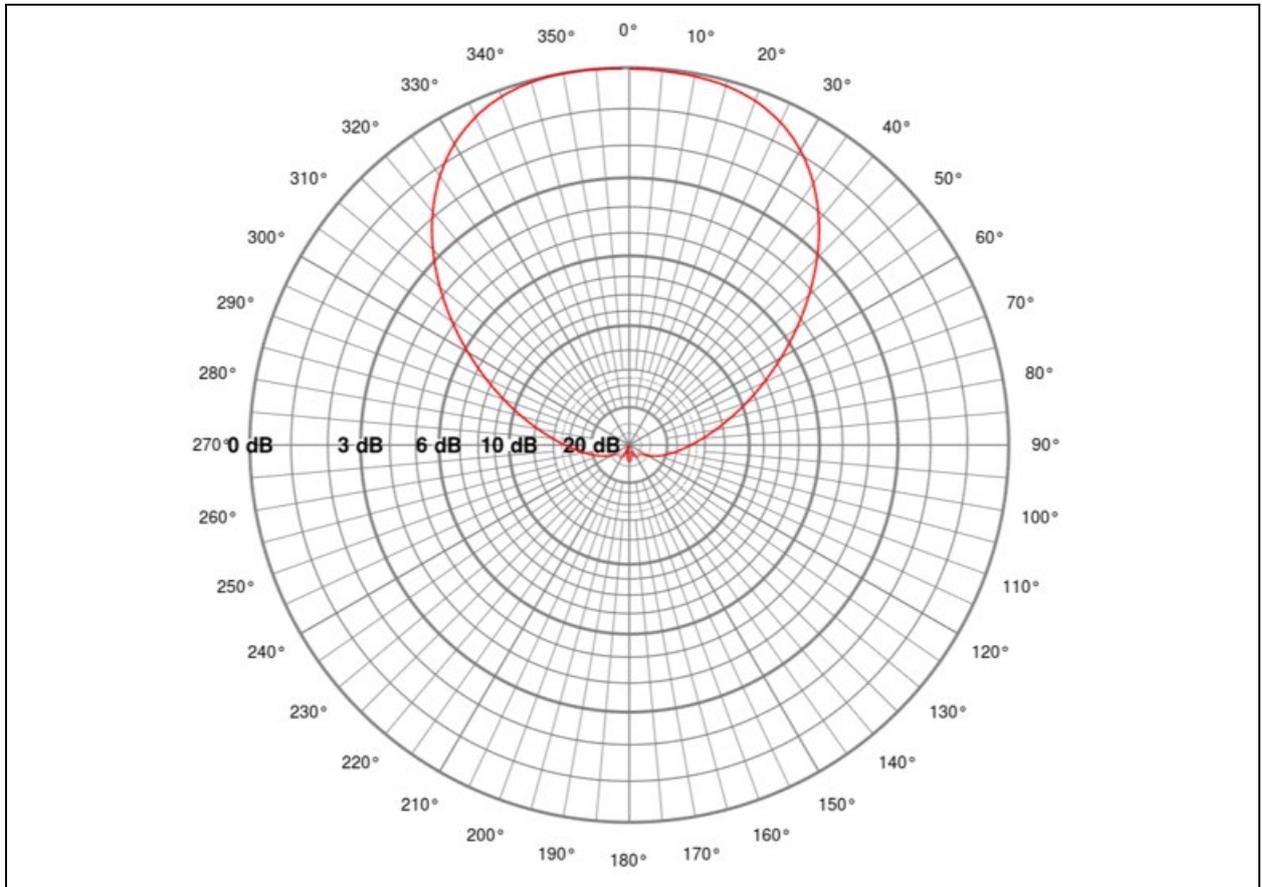


Figura 8: Esempio di diagramma d'antenna orizzontale a involuppo di antenna Huawei (AAU5313) che trasmette a una frequenza da 3,6 a 3,8 GHz, dove i singoli diagrammi d'antenna possono assumere contorni differenti. Di conseguenza, i fasci che non sono più distinti sono visibili nell'involuppo. I singoli diagrammi d'antenna rimangono sempre tuttavia all'interno dell'involuppo.

#### 5.4 Considerazione dei diagrammi d'antenna a involuppo nelle previsioni di radiazione delle antenne adattative secondo le raccomandazioni sull'esecuzione dell'ORNI

Come già menzionato, nell'ambito dell'autorizzazione le previsioni di calcolo per le antenne adattative si basano sui diagrammi d'antenna a involuppo, sia verticali che orizzontali (cfr. fig. 9).

Tuttavia, siccome i vari diagrammi d'antenna su cui si basa il diagramma d'involuppo non possono verificarsi tutti simultaneamente, i calcoli basati sui diagrammi d'antenna a involuppo sovrastimano significativamente la radiazione effettiva. Siccome finora si è applicato questo scenario peggiore, le antenne adattative sono di conseguenza valutate con maggiore rigore rispetto a quelle convenzionali.

Affinché le antenne adattative non risultino svantaggiate rispetto a quelle convenzionali, nella revisione 2019 dell'ORNI il Consiglio federale ha precisato che occorre considerare la variabilità delle direzioni di trasmissione e dei diagrammi per le antenne adattative nello stato di esercizio determinante (all. 1 n. 63 ORNI). Ciò avviene conformemente al complemento del 23.2.2021 alle raccomandazioni sull'esecuzione dell'ORNI per le stazioni di base di telefonia mobile riguardanti le antenne adattati-

ve applicando un fattore di correzione alla potenza massima di trasmissione. Questo fattore è graduato – a seconda del numero di *sub-array* (cfr. cap. 7). Il fattore di correzione deriva dagli studi e dalle misurazioni di cui al capitolo 6

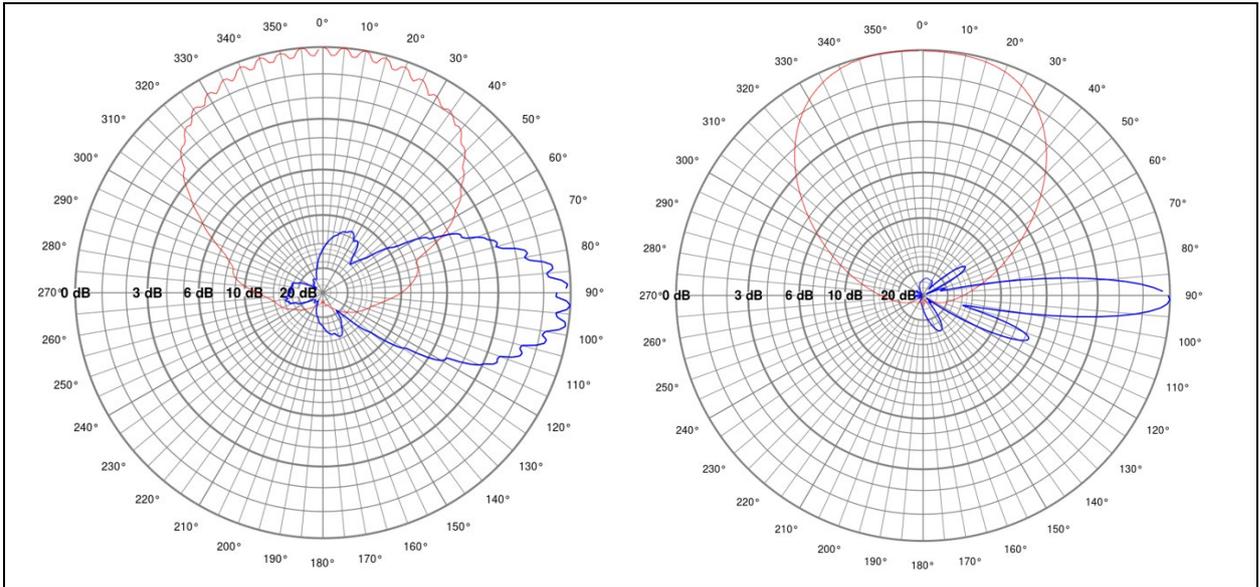


Figura 9: Alcuni esempi di diagrammi d'antenna a involuppo visti verticalmente (in blu) e orizzontalmente (in rosso) utilizzati per le previsioni di calcolo nell'ambito delle autorizzazioni. L'esempio di antenna Ericsson (AIR6488) è illustrato a sinistra e di antenna Huawei (AAU5313) a destra. I diagrammi d'antenna a involuppo includono tutti i diagrammi singoli teoricamente possibili. Tuttavia, questi ultimi non possono verificarsi tutti in contemporanea. I diagrammi d'antenna a involuppo tengono conto del fatto che i fasci in direzioni che deviano fortemente dalla direzione del fascio principale sono meno raggruppati e mostrano un guadagno d'antenna minore.

## 5.5 Impiego dei diagrammi d'antenna delle antenne adattative nelle misurazioni di collaudo

Se le previsioni di calcolo suggeriscono che è stato superato l'80 per cento del valore limite dell'impianto, le autorità ordinano generalmente una misurazione di collaudo dopo la messa in servizio dell'impianto. Come già accennato, gli impianti di telefonia mobile devono rispettare il valore limite di impianto dell'ORNI per quanto riguarda il traffico massimo di chiamate e dati alla massima potenza di trasmissione. Questo cosiddetto stato di esercizio determinante si verifica di rado nella realtà e non è nemmeno possibile ricrearlo in fase di misurazione. Per tale motivo in genere si procede a una misurazione di collaudo quando il sistema è effettivamente in esercizio. A causa della loro radiazione periodica e della potenza costante, i canali di segnalazione sono i più indicati a tale scopo. Il risultato della misurazione viene poi estrapolato allo stato di esercizio determinante (il cosiddetto valore di valutazione) per valutare se il valore limite dell'impianto è rispettato.

In linea di principio, questo metodo è applicabile anche alle antenne adattative. Tuttavia, a differenza del 4G, dove i canali di segnalazione e di traffico sono irradiati con lo stesso diagramma d'antenna, con il 5G possono essere trasmessi con modelli diversi. I diagrammi d'antenna dei canali di traffico sono descritti nel precedente capitolo 5.3 I canali di segnalazione nel 5G possono essere trasmessi tramite un intervallo che va da uno a otto fasci o tramite un intervallo che va da uno a otto diagrammi d'antenna (cfr. fig. 10). Se vengono trasmessi più fasci, ciò non avviene simultaneamente, bensì in sequenza.

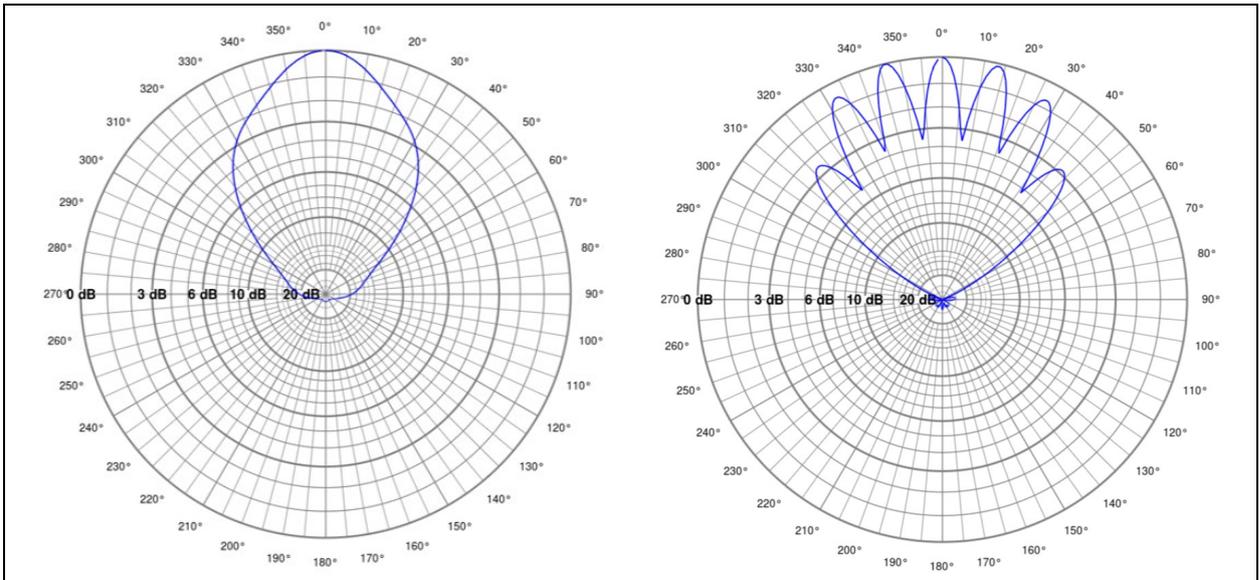


Figura 10: Due esempi di diagrammi di canali di segnalazione di antenne adattative 5G. L'antenna Ericsson (AIR6488) nell'immagine a sinistra usa un solo diagramma d'antenna per la segnalazione, mentre l'antenna Huawei (AAU5313) nell'immagine a destra usa 7 fasci. Il diagramma d'antenna a involucro include tutti e i 7 fasci. Tuttavia, i singoli fasci non sono trasmessi simultaneamente, bensì in sequenza.

A causa dei diversi diagrammi d'antenna dei canali di segnalazione e di traffico (cfr. fig. 11), a differenza del 4G, il fattore di estrapolazione per le antenne adattative non è più costante per tutte le direzioni di trasmissione. Nel rapporto tecnico del 18 febbraio 2020 «[Metodo di misurazione per stazioni di base 5G NR](#)» e nel [complemento del 15 giugno 2020](#), METAS ha precisato che il valore di valutazione può essere estrapolato per diversi diagrammi d'antenna. Informazioni in merito si trovano anche nelle [spiegazioni del 30 giugno 2020 concernenti il metodo di misurazione per le antenne adattative](#) dell'UFAM (disponibili unicamente in tedesco e in francese).

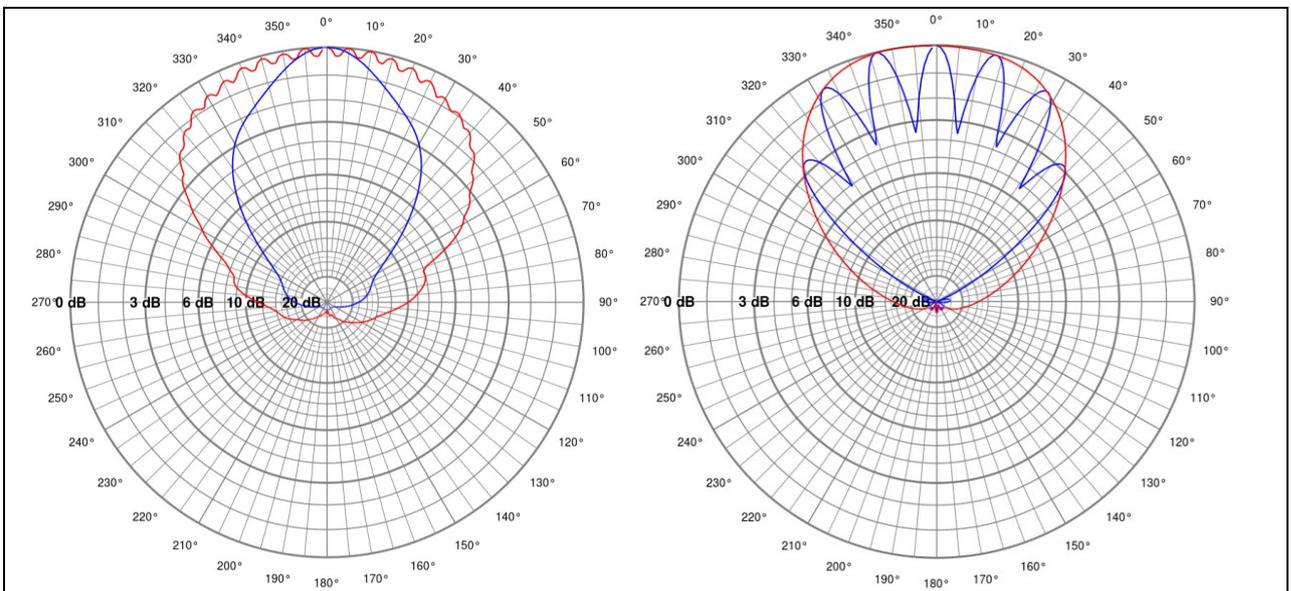


Figura 11: Diagrammi d'antenna a involucro per i canali di traffico (in rosso) e i canali di segnalazione (in blu) di un'antenna adattativa Ericsson (AIR6488) a sinistra e di un'antenna adattativa Huawei (AAU5313) a destra. I grafici dei canali di traffico e di segnalazione sono entrambi normalizzati a 0 dB, dunque non figurano i guadagni di antenna più elevati dei canali di traffico.

## 6 Esposizione attraverso antenne adattative

Considerato che le antenne adattative tendono a concentrare il segnale nella direzione dell'utente o del dispositivo mobile e a ridurlo nelle altre direzioni, la distribuzione dell'intensità del campo elettrico nello spazio differisce da quella delle antenne convenzionali. Siccome tuttavia l'utilizzo delle antenne adattative è piuttosto recente, le pubblicazioni riguardanti le distribuzioni concrete sono ancora poche. Queste informazioni sono essenziali per poter includere correttamente la variabilità delle direzioni dei trasmettitori e dei diagrammi d'antenna nella valutazione secondo la ORNI.

Gli studi trattano le antenne ad *array* di diverse dimensioni o le antenne ad *array* con un diverso numero di elementi dell'antenna, che sono sempre disposti a quadrato (ad es. *array* 4×4, 8×8, ecc.). Le conclusioni statistiche degli studi si ottengono quando questi elementi dell'antenna possono essere controllati separatamente. Il loro numero corrisponde quindi al numero di *sub-array* come definito nel capitolo 4.1

Alcuni risultati degli studi condotti finora sono riassunti nei prossimi capitoli.

### 6.1 Studi di simulazione e considerazioni teoriche

I primi studi di simulazione dei produttori di antenne sono stati condotti nel 2017 (Thors et al.) e nel 2018 (Baracca et al.). Lo studio di **Thors et al.**<sup>1</sup> ha valutato le potenze di trasmissione massime realistiche che si verificano nei diversi scenari di esercizio di un'antenna ad *array* 8×8. Sulla base degli standard della Commissione elettrotecnica internazionale IEC<sup>2</sup> e dell'Unione internazionale delle telecomunicazioni (ITU)<sup>3</sup>, il 95° percentile di tutte le possibili potenze di trasmissione è stato fissato come massima potenza realistica. In altre parole, la massima potenza realistica indica il livello di potenza che non viene superato nel 95 per cento dei casi esaminati. Lo studio ha analizzato la potenza di trasmissione media su 6 minuti per la copertura di una zona urbana e una rurale, una con una distribuzione uguale di utenti e una con una maggiore densità di utilizzo nel centro. Durante le simulazioni si sono considerati parametri quali la durata di utilizzo, i diversi utilizzi della rete e il funzionamento TDD. Per il *beamforming* sono state formulate alcune ipotesi semplificate. I risultati hanno dimostrato che, a seconda dello scenario, le potenze massime realistiche variano tra il 7 per cento (0,07 o -11,5 dB) e il 22 per cento (0,22 o -6,5 dB) della potenza massima teoricamente possibile. Il valore più alto del 22 per cento si è registrato per una zona urbana e un utilizzo della rete di circa il 95 per cento.

Lo studio di **Baracca et al.**<sup>4</sup> riguardava una disposizione di 7 stazioni di base, ciascuna delle quali alimentano tre celle di telefonia mobile con antenne ad *array* 8×8. Con diverse altezze e distanze tra le antenne, lo studio ha simulato una rete urbana con celle di telefonia mobile di grandi dimensioni («urban macro UMa») e una con celle di piccole dimensioni («urban micro UMi»). Si è ipotizzato che l'80 per cento degli utenti fossero all'interno e il 20 per cento all'esterno degli edifici. Per varie configurazioni d'uso (da 1 a 5 utenti attivi simultaneamente, durata della connessione da 1 a 60 secondi), si sono calcolate le distanze di sicurezza necessarie (in funzionamento FDD) per rispettare i limiti della Commissione internazionale per la protezione dalle radiazioni non ionizzanti (ICNIRP) su una media di 6 minuti. Dai calcoli è stato possibile ricavare le potenze di trasmissione che si registrano e confrontarle con la massima potenza di trasmissione possibile. Tale potenza massima è stata definita come la potenza di trasmissione che si verifica quando un unico utente per cella di telefonia mobile è alimentato per 6 minuti (ovvero esiste un unico fascio che, con il massimo fattore di guadagno dell'antenna, irradia la persona per 6 minuti). Questo perché i limiti dell'ICNIRP devono essere rispettati anche in situazioni del genere. Secondo i calcoli un maggior numero di utenti per cella e/o una minore durata della connessione porta a una minore potenza irradiata per utente. Nel 95 per cento dei casi, non è stato superato il 22 per cento (scenario UMi) e il 26 per cento (scenario UMa) della potenza massima. In termini di potenza massima, le riduzioni erano quindi rispettivamente di 0,22 o di -6,6 dB e 0,26 o -5,9 dB. Nel

<sup>1</sup> Thors et al., Time-Averaged Realistic Maximum Power Levels for the Assessment of Radio Frequency Exposure for 5G Radio Base Stations Using Massive MIMO, IEEE Access (Vol. 5), 19711–19719, 2017

<sup>2</sup> IEC 62232:2017: Determination of RF field strength, power density and SAR in the vicinity of radiocommunication base stations for the purpose of evaluating human exposure, 516p., 2017

<sup>3</sup> ITU-T K.100: Measurement of radio frequency electromagnetic fields to determine compliance with human exposure limits when a base station is put into service, International Telecommunication Union ITU, 2019

<sup>4</sup> Baracca et al., A Statistical Approach for RF Exposure Compliance Boundary Assessment in Massive MIMO Systems, International Workshop on Smart Antennas (WSA), Bochum (Germany), 2018

99 per cento dei casi, non si è superato il 27 per cento (0,27 o -5,7 dB, scenario UMi) e il 32 per cento (0,32 o -5 dB, scenario UMa) della potenza massima.

Nel 2020, uno studio (**Tingyong & Skrivervik**)<sup>5</sup> commissionato da un operatore svizzero di telefonia mobile al politecnico federale di Losanna (EPFL) ha confermato i risultati di Thors et al. e Baracca et al. Tramite una cosiddetta simulazione Monte Carlo, i principi di calcolo sono stati affinati ed è stato modellato uno scenario d'uso più realistico per effettuare una valutazione più accurata dell'esposizione. Nei calcoli sono stati inclusi parametri come ad esempio gli scenari di utilizzo, la distribuzione degli utenti, il tempo di utilizzo, il numero di utenti attivi simultaneamente, il tempo mediato, la modalità di funzionamento FDD/TDD e l'estensione del diagramma d'antenna di un'antenna ad *array* 8×8. In uno scenario esemplificativo con un'equa distribuzione degli utenti, un tempo di utilizzo di un secondo e un funzionamento FDD, Tingyong & Skrivervik hanno calcolato una potenza massima realistica del 14 per cento (95° percentile relativo alla potenza massima teoricamente possibile), mentre Thors et al. hanno determinato il 13 per cento e Baracca et al. dal 14 al 16 per cento. Per tutti gli scenari, lo studio dell'EPFL ha calcolato fattori di riduzione compresi tra 0,01 (-20 dB) e 0,3 (-5,2 dB).

Basandosi su una rete LTE esistente a Gent (Belgio), **Matalatala et al.**<sup>6</sup> 2019 hanno studiato come poter ottimizzare le reti 5G con antenne adattative («massive MIMO») in termini di ubicazione e occupazione, al fine di minimizzare contemporaneamente il consumo di energia e l'esposizione dell'utente dalla stazione base e dal dispositivo mobile. A questo scopo, l'area di studio è stata progettata con una cosiddetta rete a celle multiple, ciascuna delle quali conteneva un'antenna della stazione base con diversi elementi, con un numero di elementi variabile a seconda dello scenario. Sono stati simulati scenari di comunicazione realistici per l'esercizio della rete. Lo studio ha mostrato che quando il numero di elementi utilizzati per stazione base aumenta da 16 a 256, il numero di stazioni base necessarie per una rete con antenne adattative diminuisce. Questo a sua volta comporta una diminuzione del 12 per cento dell'intensità del campo elettrico causato dalle stazioni di base e un aumento del +70 per cento dell'esposizione dal telefono cellulare dell'utente, con entrambe le esposizioni che aumentano esponenzialmente al numero di utenti simultanei. Per l'area considerata, è stata ottenuta una rete ottimale in termini di consumo energetico e di esposizione, composta da 37 stazioni base con 64 elementi ciascuna. Inoltre, è stato dimostrato che l'esposizione dalle stazioni di base era 5 volte inferiore (-14 dB) con le antenne adattative (per tutti i diversi numeri di elementi di antenna indagati, 95° percentile) rispetto allo scenario di riferimento 4G.

Dallo stesso gruppo di ricerca dell'università di Gent (Belgio) proviene uno studio del 2020 di **Shikhantsov et al.**<sup>7</sup>, che ha stimato le potenze massime realistiche di trasmissione delle antenne massive MIMO 5G in un ambiente urbano basato sul cosiddetto *ray-tracing*. Il metodo del *ray-tracing* è stato usato per simulare la propagazione delle emissioni della telefonia mobile in un modello di macrocella urbana all'aperto. Per diversi scenari con antenne adattative composte da 64 elementi, lo studio ha calcolato valori (95° percentile) compresi tra circa -10 dB (0,1) e -3 dB (0,5) rispetto al massimo teorico, e per uno scenario realistico con una durata di utilizzo di 10 secondi, riduzioni nell'intervallo da -7 dB (0,2) a -6 dB (0,25).

Oltre agli studi di simulazione, ci sono anche considerazioni teoriche sulla possibile potenza di trasmissione per le antenne adattative. Sulla base di ipotesi inerenti il volume dei dati trasmessi e sulla velocità dei dati, sul numero di persone alimentate nel sito di ubicazione dell'antenna e sul numero di fasci, l'**Agence Nationale des Fréquences ANFR**<sup>8</sup> ha calcolato che un'antenna adattativa trasmette per circa 15 secondi su 6 minuti. Un periodo pari al 4 per cento del tempo, ed è per questo che l'ANFR applica un fattore di riduzione di 0,04 o -13,5 dB alla potenza di trasmissione per i calcoli di esposizione. Tale media, solo temporale, non è compatibile con lo stato di esercizio determinante dell'ORNI. In linea di principio, ciò si basa sul traffico massimo di chiamate e di dati alla massima potenza di tra-

<sup>5</sup> Tingyong & Skrivervik (2020): EMF Exposure Assessment Based on Monte Carlo Method, EPFL (École Polytechnique Fédérale de Lausanne), 45p.

<sup>6</sup> Matalatala et al., Multi-Objective Optimization of Massive MIMO 5G Wireless Networks towards Power Consumption, Uplink and Downlink Exposure, Appl. Sci. 2019, 9, 4974

<sup>7</sup> Shikhantsov et al (2020): Ray-Tracing-based numerical assessment of the spatiotemporal duty cycle of 5G Massive MIMO in an outdoor urban environment, Appl. Sci. 2020, 10, 7631; doi:10.3390/app10217631

<sup>8</sup> ANFR (2020): Evaluation de l'exposition du public aux ondes électromagnétiques 5G - Volet 2: premiers résultats de mesures sur les pilotes 5G dans la bande 3400-3800 MHz, Agence Nationale des Fréquences ANFR, 34p., 2020.

missione; nel caso delle antenne adattative, secondo l'allegato 1 numero 63 si deve tenere conto anche della loro variabilità spaziale.

In un rapporto tecnico (IEC TR 62669:2019<sup>9</sup>) basato sugli studi di Thors et al., Baracca et al. e sulle valutazioni delle potenze di trasmissione delle antenne adattative esistenti utilizzate per l'LTE, l'IEC propone un fattore di riduzione di 0,25 o -6 dB relativo alla massima potenza di trasmissione possibile quando i calcoli di esposizione sulle antenne adattative sono eseguiti in rapporto ai limiti ICNIRP.

## 6.2 Studi di misurazione

Nell'ambito di uno studio su una stazione base LTE con antenne adattative in una zona urbana, **Werner et al.**<sup>10</sup>(2019) hanno eseguito una serie di misurazioni. L'antenna era di tipo *array* 8×8 in modalità TDD e con una potenza di ingresso di 120 W. I risultati delle misurazioni sono stati espressi in proporzione per corrispondere all'esposizione al 100 per cento di utilizzo della stazione base e confrontati con i limiti ICNIRP. I valori misurati estrapolati al massimo utilizzo erano dal 7,3 al 16,1 per cento del valore limite ICNIRP, mentre la previsione calcolata per il caso peggiore (potenza di trasmissione massima simultanea in tutte le direzioni) ha portato a un'esposizione del 79,3 per cento del valore limite ICNIRP, pari a un fattore di riduzione compreso tra 0,20 (-6,9 dB) e 0,09 (-10,4 dB).

Nel 2020 **Colombi et al.** ha condotto un primo studio sulle stazioni base in una rete 5G commerciale<sup>11</sup>. L'operatore della rete è stato tra i primi in Australia a introdurre il 5G, e nel gennaio 2020 oltre 100 000 dispositivi mobili abilitati al 5G erano collegati alla sua rete. Lo studio ha raccolto 24 ore di dati operativi da 25 stazioni base con antenne Massive MIMO – in particolare, le potenze di trasmissione e i dati di riferimento che hanno permesso di determinare il diagramma d'antenna irradiato per ogni connessione. Partendo da questi dati, per ogni stazione base è stata calcolata la distribuzione spaziale dell'ERP media e confrontata con l'ERP massima teorica dell'antenna. L'ERP massima di tutte le stazioni di base nelle 24 ore era inferiore di 8,8 dB rispetto al massimo teorico. Utilizzando i valori ERP registrati delle 25 stazioni base per questo confronto, la riduzione del valore ERP massimo teorico per tutta la durata dell'esperimento era rispettivamente di -20,2 dB (95° percentile) e -18 dB (99° percentile). Questo studio ha inoltre analizzato l'influenza sull'esposizione del numero di utenti attivi simultaneamente. I valori ERP mediati su 6 minuti per ogni stazione base sono stati ordinati in base al numero di utenti attivi. I risultati mostrano una riduzione del valore maggiore di ERP registrato di tutte le stazioni base con l'aumento del numero di utenti. La riduzione rispetto al valore massimo ERP teorico corrisponde rispettivamente a -8,8 dB per 15 utenti attivi e a -22 dB per 190 utenti attivi.

## 6.3 Misurazioni e simulazioni dell'UFCOM

Nell'estate del 2020, l'UFCOM ha effettuato una serie di misurazioni di prova su due antenne adattative approvate di due diversi operatori. Le due antenne ad *array* 8×8 hanno trasmesso nella banda dei 3,5 GHz. L'UFCOM ha allestito un esperimento con due telefoni cellulari in ciascun caso e ha misurato l'esposizione in diverse condizioni («solo segnalamento», «entrambi i telefoni cellulari nella stessa posizione: esposizione nel fascio di dati ed esposizione accanto al fascio di dati» e «telefoni cellulari in due posizioni diverse: esposizione in uno dei due fasci di dati ciascuno»). Inoltre, sulle antenne è stato testato il funzionamento della limitazione automatica della potenza (cfr. cap. 7). Dopo le misurazioni, l'UFCOM ha riprodotto la situazione di misurazione con un software di calcolo, ha calcolato le esposizioni per le diverse condizioni di funzionamento testate e le ha confrontate con i risultati delle misurazioni. In una seconda fase, l'esposizione derivante da un'antenna adattativa (con fino a 13 fasci) nell'area di misurazione è stata confrontata tramite calcolo con l'esposizione da un'antenna convenzionale. Questo lavoro e i risultati sono descritti in dettaglio nel rapporto dell'UFCOM «Test di licenza e misurazione di antenne adattative». Qui di seguito figura un estratto dei risultati principali.

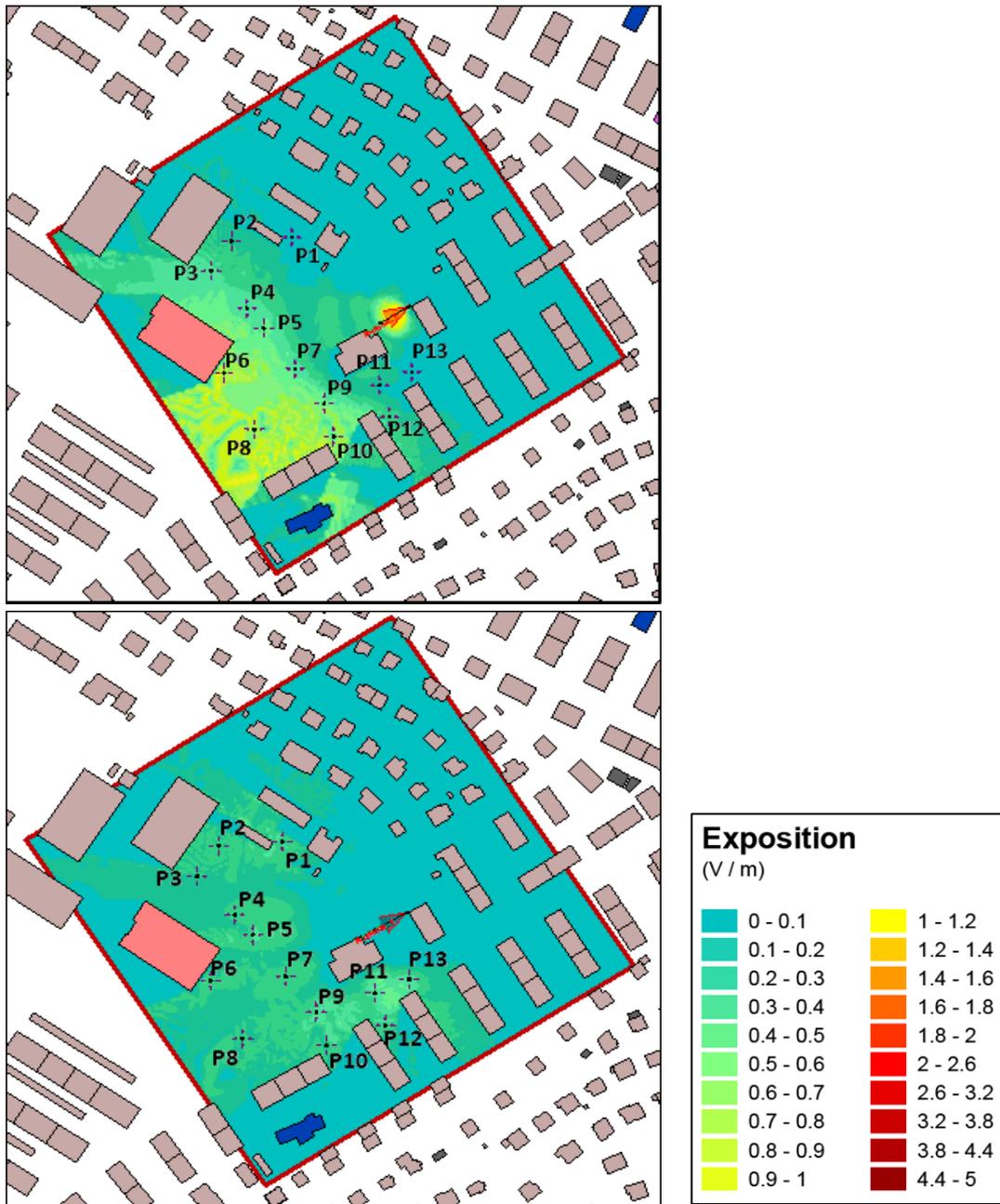
<sup>9</sup> IEC TR 62669:2019: Case studies supporting IEC 62232 - Determination of RF field strength, power density and SAR in the vicinity of radiocommunication base stations for the purpose of evaluating human exposure, 124p., 2019

<sup>10</sup> Werner et al. (2019): A Comparison between Measured and Computed Assessments of the RF Exposure Compliance Boundary of an In-Situ Radio Base Station Massive MIMO Antenna. IEEE Access, Volume 7, 170682-170689, 2019

<sup>11</sup> Colombi et al. (2020): Analysis of the Actual Power and EMF Exposure from Base Stations in a Commercial 5G Network. Appl. Sci. 2020, 10, 5280

Nel complesso, i risultati hanno confermato le basi teoriche riguardanti la tecnologia di telefonia mobile e la propagazione del campo.

- L'esposizione alle antenne adattative dipende in maniera preponderante dalla posizione del terminale in uso.
- La parte principale dell'intensità del campo elettrico in un punto della cella di telefonia mobile è chiaramente causata dal fascio specifico emesso in questa direzione nel caso delle antenne adattative. Solo contributi molto piccoli derivano dai fasci in altre direzioni. Nelle misurazioni di prova, il segnale desiderato all'esterno di un fascio è stato ricevuto con un'intensità di campo almeno 3 volte (10 dB) inferiore a quella all'interno del fascio (in media anche 12 volte inferiore).
- Le misurazioni hanno inoltre evidenziato che la potenza totale di trasmissione di un'antenna è distribuita tra i fasci attualmente disponibili quando ci sono diversi fasci simultanei.
- Le misurazioni hanno altresì confermato il funzionamento della limitazione automatica della potenza.
- Le simulazioni (cfr. anche fig. 12) hanno dimostrato che l'intensità di campo è distribuita più uniformemente davanti all'antenna con le antenne adattative rispetto a quelle convenzionali.
- Per la situazione studiata, l'intensità del campo elettrico nella direzione del fascio principale di fronte all'antenna era inferiore fino a un fattore 3 per l'antenna adattativa rispetto a quella convenzionale. Mentre con quest'ultimo la parte principale del segnale è sempre trasmessa in questa direzione, indipendentemente dal punto nella cella di telefonia mobile in cui viene richiesto, con le antenne adattative ciò accade quando i dati sono effettivamente richiesti in quel punto.
- L'efficienza di trasmissione laterale è nettamente migliore con le antenne adattative, poiché possono concentrare la radiazione in modo più forte ed emetterla in modo più mirato. Il confronto con l'antenna convenzionale mostra fino a un fattore 6 in più di intensità del campo elettrico, il che significa che i dati vengono trasmessi in modo più efficiente e in meno tempo.
- L'intensità di campo attraverso il canale di segnalazione è inferiore di un fattore 3 circa con un'antenna adattativa rispetto a una convenzionale.



Punto	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13
<b>E (V/m) antenna convenzionale</b>	0,04	0,13	0,32	0,35	0,44	0,61	0,36	0,51	0,54	0,35	0,10	0,27	0,06
<b>E (V/m) antenna adattativa</b>	0,20	0,15	0,17	0,21	0,29	0,20	0,28	0,16	0,37	0,12	0,34	0,28	0,36
<b>Rapporto convenzionale / adattativa</b>	0,20	0,87	1,88	1,67	1,52	3,05	1,29	3,19	1,46	2,92	0,29	0,96	0,17

Figura 12: Si illustra l'intensità del campo elettrico in volt per metro generato da un'antenna convenzionale con una potenza di trasmissione di 200 W ERP (fig. sopra) e da un'antenna adattativa con 13 fasci (fig. sotto). Per l'antenna adattativa, la potenza di trasmissione è stata divisa tra i 13 fasci ed è di 15,4 W ERP per fascio. I valori di intensità di campo calcolati sono elencati per 13 punti all'interno del campo di misurazione. Si può vedere che l'intensità di campo nei punti 3–10, situati di fronte all'antenna, è maggiore con l'antenna convenzionale che con quella adattativa. Ai lati dell'antenna (punti 1, 2, 11–13) accade esattamente il contrario, poiché le antenne adattative irradiano meglio sui lati. L'esposizione media sull'area è di 0,15 V/m per l'antenna convenzionale e di 0,074 V/m per l'antenna con 13 fasci (fonte: UFCOM).

## 6.4 Conclusione

I risultati degli studi di simulazione e misurazione descritti sono riassunti nella tabella 2. Le potenze di trasmissione delle antenne adattative (con un diverso numero di elementi) mediate su 6 minuti si collocano, a seconda dello scenario, in un intervallo tra circa l'1 (0,01 o -20 dB) e il 50 per cento (0,5 o -3 dB) della potenza massima teorica. La gamma dei risultati dello studio è molto ampia. Per quanto riguarda le antenne ad *array* 8×8, le potenze di trasmissione rilevate sono per lo più comprese tra circa il 10 (0,1 o -10 dB) e il 32 per cento (0,32 o -5 dB) della potenza massima teorica.

Gli studi hanno inoltre mostrato che la differenza tra la potenza di trasmissione massima rilevata e quella teorica dipende dalla dimensione dell'antenna, cioè dal numero di unità controllabili indipendentemente (*array* o *sub-array*). Sulla base di studi che hanno esaminato diverse dimensioni di antenne, è stato derivato un fattore di correzione graduato applicabile alla massima potenza di trasmissione possibile delle antenne adattative (cfr. cap. 7). La correlazione tra il fattore di correzione e i risultati dello studio è illustrata nella figura 13.

Tabella 2: Panoramica degli studi che hanno effettuato simulazioni e misurazioni, in particolare delle potenze di trasmissione previste, per quanto riguarda la stima delle esposizioni alle antenne adattative.

Studio	Metodo / Osservazioni	Differenza tra potenza massima realistica e teorica		Altre riduzioni
		95° percentile	Massimo o 99° percentile	
Thors et al (2017).	Modellazione statistica, <i>array</i> 8×8 e altre dimensioni di <i>array</i> , diversi scenari di copertura (zona rurale, urbana).	da 0,07 a 0,22 -11,5 dB -6,5 dB		
Baracca et al (2018).	Simulazione / statistiche, <i>array</i> 8×8, 2 scenari di copertura urbani.	da 0,22 a 0,26 da -6,6 dB a -5,9 dB	99. P: da 0,27 a 0,32 da -5,7 dB a -5 dB	
Tingyong & Skrivervik (EPFL, 2020)	Simulazione Monte Carlo con vari scenari di utilizzo, distribuzioni degli utenti, numero di utenti e durata d'utilizzo, <i>array</i> 8×8	da 0,01 a 0,3 da -20 dB a -5,2 dB		
Matalatala et al (2019)	Simulazione: ottimizzazione di una rete telefonia mobile con antenne adattative (numero di elementi variabile) per quanto riguarda l'esposizione e il consumo di energia			Esposizione da 5G a 4G: -14 dB
Shikhantsov et al (2020).	Simulazione di copertura urbana con macrocelle, scenari per antenne mMIMO con diverso numero di elementi. Scenario realistico: 64 elementi	Tutti gli scenari: da 0,1 a 0,5 da -10 dB a -3 dB Realistico: da 0,2 a 0,25 da -7 dB a -6 dB		
ANFR	Approccio della media temporale incompatibile con lo stato di esercizio determinante dell'ORNI			Tempo medio di oltre 6 minuti: -13,5 dB
IEC TR 62669:2019	Valutazione degli studi Thors et al., Baracca et al. e delle misure su antenne adattative utilizzate per LTE	0,25 -6 dB		
Werner et al (2019).	Misurazione esposizione 8×8 <i>array</i> (mMIMO) 4G / 2,3 GHz / TDD / in rapporto al 100% di utilizzo		da 0,09 a 0,20 da -10,4 dB a -6,9 dB	
Colombi et al (2020).	Misurazione / valutazione dei dati di esercizio (compresa la potenza di trasmissione) di 25 antenne mMIMO 5G a uso commerciale	0.1 -20 dB	99. p.: 0,016 o -18 dB Massimo: da 0,03 a 0,16 da -15 dB a -8 dB	

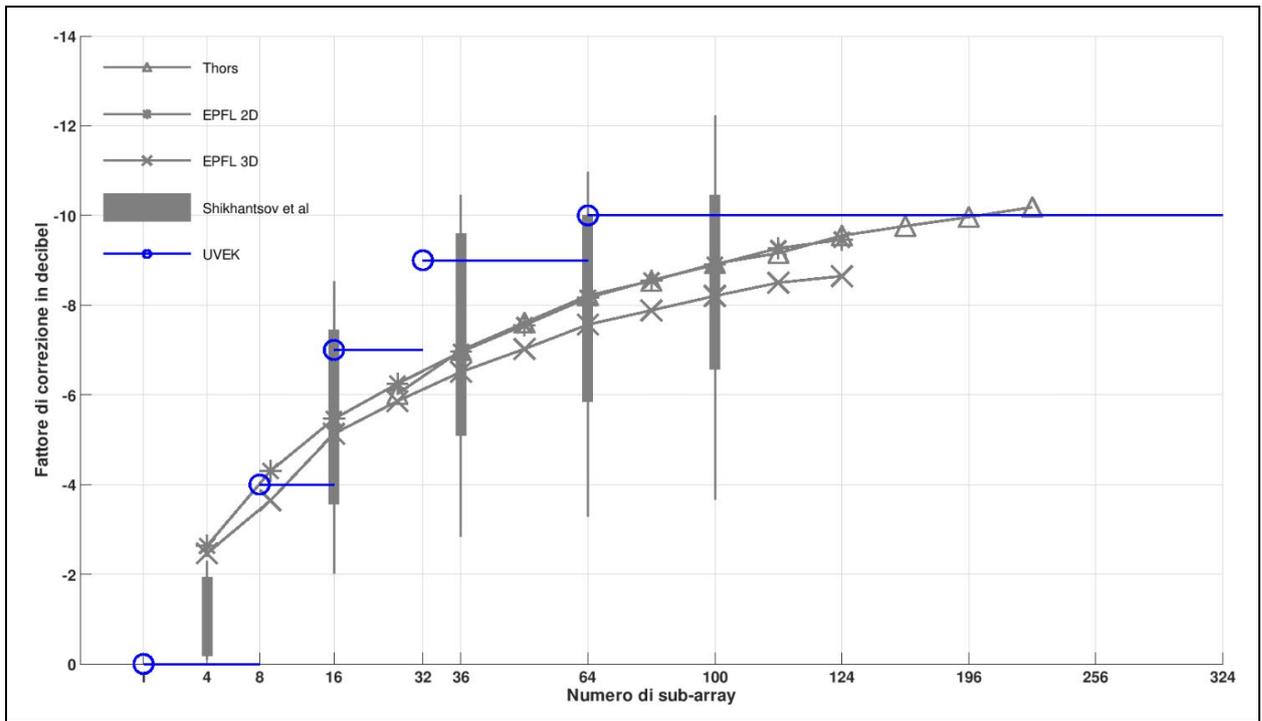


Figura 13: Fattori di correzione dagli studi precedenti considerando diverse dimensioni di antenna in grigio (Thors et al. (2017), Tingyong & Skrivervik (EPFL, 2020) e Shikhantsov et al. (2020)), e in blu i fattori di correzione derivati a seconda delle dimensioni dell'antenna (numero di *sub-array*).

## 7 Fattore di correzione e limitazione automatica della potenza

Lo stato di esercizio determinante in cui devono essere rispettati i valori limite dell'impianto secondo l'allegato 1 numero 64 ORNI è determinato come segue per le antenne adattative secondo il complemento del 23.2.2021 alle raccomandazioni sull'esecuzione dell'ORNI per le stazioni di base di telefonia mobile:

- la base per lo stato di esercizio determinante è costituita dal traffico massimo di chiamate e dati alla massima potenza di trasmissione, espressa come massima potenza di trasmissione possibile  $ERP_{max, n}$ ;
- per tenere conto della variabilità delle direzioni del trasmettitore e dei diagrammi d'antenna nelle antenne adattative, viene applicato un fattore di correzione  $K_{AA}$  alla massima potenza di trasmissione possibile  $ERP_{max, n}$ . Questo fattore di correzione  $K_{AA}$  dipende dalla dimensione dell'antenna, espressa nel numero di *sub-array* (cfr. tab. 3).

La potenza di trasmissione  $ERP_n$  dell'antenna adattativa  $n$  si calcola dunque come segue:  $ERP_n = ERP_{max, n} \times K_{AA}$ . Questa potenza di trasmissione determinante  $ERP_n$  viene inserita nella scheda dei dati sul sito e utilizzata in combinazione con i diagrammi d'antenna a involuppo per calcolare l'intensità del campo elettrico al fine di verificare se il valore limite dell'impianto è rispettato nei luoghi a utilizzazione sensibile.

Tabella 3: Fattore di correzione  $K_{AA}$ . I fattori di correzione specificati sono la correzione massima consentita per il numero corrispondente di *sub-array*. Maggiore è la correzione, minore è il valore numerico del fattore. I valori indicati nella tabella corrispondono quindi al limite inferiore del valore numerico del fattore di correzione.

Numero di <i>sub-array</i>	Fattore di correzione $K_{AA}$	Fattore di correzione in dB
64 e oltre	$\geq 0,10$	$\geq -10$ dB
da 32 a 63	$\geq 0,13$	$\geq -9$ dB
da 16 a 31	$\geq 0,20$	$\geq -7$ dB
da 8 a 15	$\geq 0,40$	$\geq -4$ dB
da 1 a 7	1	0 dB

A causa di questa definizione dello stato di esercizio determinante, nell'esercizio effettivo può dunque accadere che la potenza di trasmissione determinante  $ERP_n$  sia superata per un breve periodo (al massimo fino alla massima potenza di trasmissione possibile  $ERP_{max, n}$ ); il fattore di correzione può essere applicato solo se l'antenna adattativa è dotata di una limitazione automatica della potenza.

La limitazione automatica della potenza è un'applicazione software sull'antenna che rileva continuamente la potenza totale dell'antenna adattativa irradiata in un settore di telefonia mobile. Se si verificano picchi di potenza a breve termine superiori alla potenza di trasmissione  $ERP_n$  dichiarata nella scheda dei dati sul sito, la potenza (e quindi la capacità fornita) viene ridotta in misura tale che la potenza di trasmissione media su un periodo di 6 minuti non superi la potenza di trasmissione dichiarata. La funzione di limitazione automatica della potenza permette di calcolare continuamente la «media effettiva» della potenza di trasmissione nei 6 minuti precedenti. Se è prevedibile che questa media effettiva possa superare la potenza di trasmissione autorizzata, la potenza di trasmissione viene ridotta in misura tale che il valore medio rimanga ben al di sotto della soglia specificata.

I picchi di potenza a breve termine possono raggiungere un valore massimo  $ERP_{max, n}$  che corrisponde alla potenza di trasmissione autorizzata  $ERP_n$  moltiplicata per il reciproco del fattore di correzione. Con un fattore di correzione di 0,1, il valore di picco della potenza di trasmissione può essere al massimo dieci volte superiore al valore dichiarato. Allo stesso tempo, questo significa che l'intensità del campo elettrico calcolato per l'antenna adattativa può essere superata di un massimo di 3,2 volte a breve termine. Se si considera che un trasmettitore telefonia mobile con antenne adattative è nella maggior parte dei casi dotato anche di antenne convenzionali, l'intensità di campo dell'intero sistema aumenta di un fattore minore nel breve termine. Se, per esempio, un luogo a utilizzazione sensibile (LAUS) è irradiato «per metà» da antenne convenzionali e per metà da antenne adattative di un impianto con la stessa potenza di trasmissione determinante (ipotesi: stesse distanze, stessi effetti schermanti degli edifici o dovuti alla direzione), l'intensità di campo totale può superare per breve tempo di 2,3 volte l'intensità di campo calcolata: la potenza di trasmissione delle antenne convenzionali rimane invariata, mentre nel caso delle adattative può aumentare di un fattore 10 a breve termine, risultando in un fattore 5,5 per la potenza totale di trasmissione. Anche in questo caso non si è considerato il fatto che diverse antenne adattative raramente trasmettono simultaneamente alla massima potenza.

La limitazione automatica della potenza deve essere mappata nel sistema di garanzia della qualità degli operatori di rete mobile in modo tale da essere facilmente comprensibile per l'autorità.

## 8 Altri aspetti

### 8.1 Considerazione della modalità di funzionamento TDD

I valori limite dell'impianto che gli impianti di telefonia mobile devono rispettare nello stato di esercizio determinante figurano nell'allegato 1 numero 64 ORNI per il *valore efficace* dell'intensità del campo elettrico. Il valore efficace è – sostanzialmente – il valore medio di una variabile nel tempo relativa alla potenza. Per una tensione o un'intensità di campo, si dovrebbe usare il valore quadratico medio, poiché la potenza è proporzionale al quadrato della tensione o dell'intensità di campo. In inglese, il valore efficace di tale quantità è chiamato «Root Mean Square» o «RMS». La figura 14 mostra il valore RMS usando l'esempio di una grandezza fisica che presenta un andamento sinusoidale nel tempo.

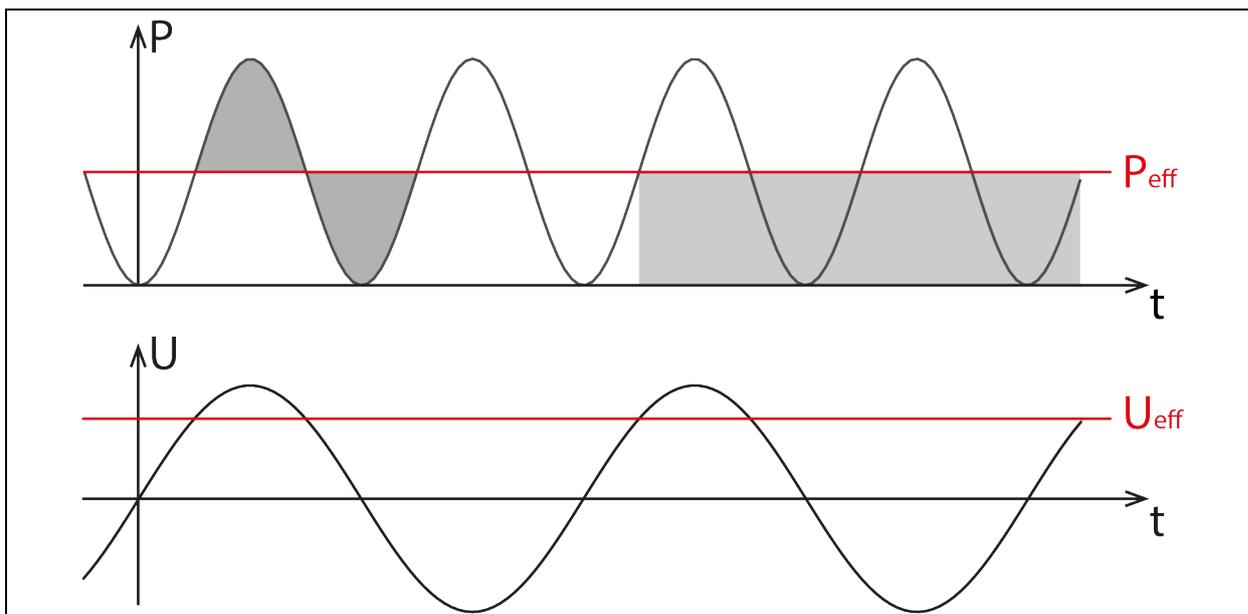


Figura 14: Valore efficace di una grandezza fisica che presenta un andamento sinusoidale. Figura superiore: Il valore efficace della potenza può essere illustrato graficamente:  $P_{\text{eff}}$  corrisponde alla metà dell'ampiezza di  $P$ ; i valori sopra  $P_{\text{eff}}$  fanno media con i valori sotto  $P_{\text{eff}}$ . Figura inferiore:  $P_{\text{eff}}$  convertito in una tensione  $U$ :  $U_{\text{eff}}$  corrisponde a  $0,71 (= \sqrt{0,5})$  volte l'ampiezza di  $U$  ( $U$  è proporzionale alla radice quadrata di  $P$ ).

Il valore efficace dell'intensità di campo corrisponde quindi alla potenza irradiata mediata in un certo periodo di tempo. Il valore limite dell'impianto deve essere sempre rispettato alla massima potenza di trasmissione. Dato che nella modalità FDD usata finora un sistema di telefonia mobile trasmette continuamente quando emette segnali (ad es. il canale di segnalazione), questi segnali non hanno una struttura chiara, che si ripete periodicamente (ad es. una forma sinusoidale) e la potenza massima di trasmissione è rilevante per il limite del sistema, nella modalità FDD sono inutili ulteriori considerazioni sulla potenza mediata in un periodo di tempo. I controlli dinamici della potenza risultanti dall'esercizio effettivo non devono essere presi in considerazione per quanto riguarda il limite dell'impianto.

Nelle concessioni per la telefonia mobile da 3,4 GHz a 3,8 GHz (e in parte da 2,6 GHz), è obbligatoria la modalità di funzionamento TDD: il *downlink* e l'*uplink* avvengono sulla stessa frequenza ma in tempi diversi. Nella modalità TDD, come attualmente implementato dagli operatori mobili per il 5G, una stazione di base trasmette i dati dell'utente solo al massimo per l'80 per cento del tempo all'interno di uno slot temporale 5G di 1 ms (o 0,5 ms) e il 20 per cento del tempo all'interno dello slot è riservato alla trasmissione dei dati dal dispositivo mobile alla stazione di base. Di conseguenza, il valore efficace dell'intensità del campo elettrico è inferiore rispetto a quello che si otterrebbe se la stazione di base trasmettesse costantemente (cfr. fig. 15).

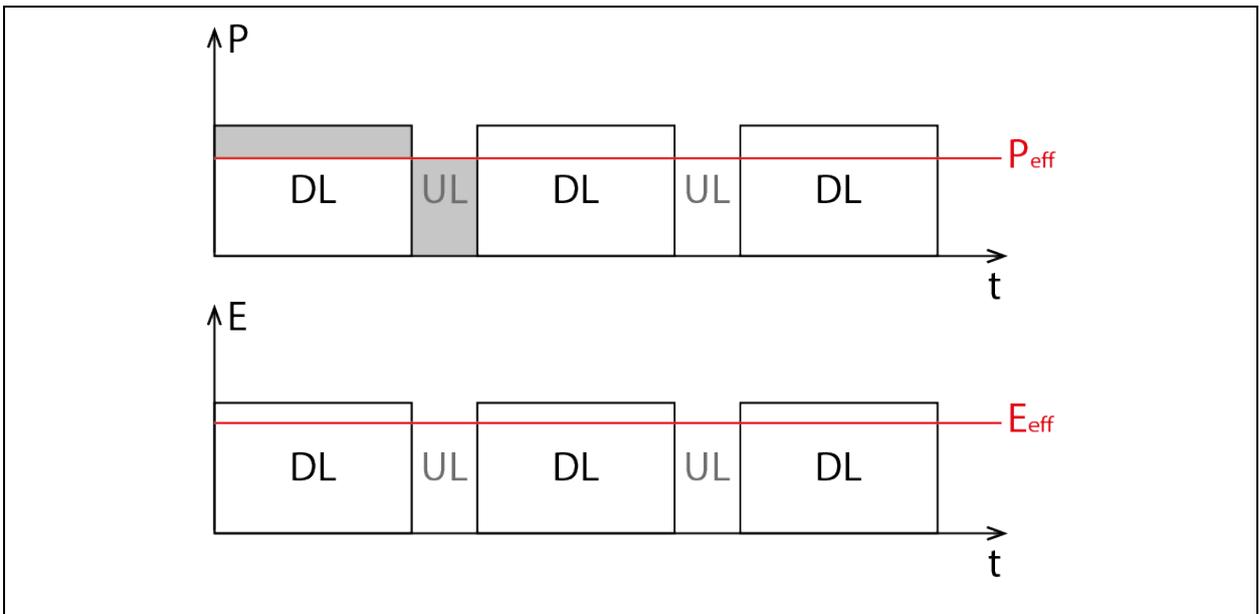


Figura 15: Valore efficace della potenza di trasmissione  $P_{eff}$  (in alto) e dell'intensità del campo elettrico  $E_{eff}$  (in basso) per il funzionamento TDD relativo alla potenza massima di trasmissione. Poiché la stazione di base trasmette solo un massimo dell'80% del tempo quando trasmette i dati utente (DL: *downlink*) e il 20% del tempo è riservato all'*uplink* (UL), il valore efficace dell'intensità del campo elettrico ( $E_{eff}$ ) è inferiore rispetto a una situazione in cui la stazione base trasmetta tutto il tempo. Il valore effettivo della potenza di trasmissione è il valore medio nel tempo  $t$ , rappresentato dalla linea rossa ( $P_{eff}$ ). Le aree su sfondo grigio nel grafico superiore per la potenza di trasmissione hanno la stessa superficie. Il grafico inferiore corrisponde al valore efficace dell'intensità del campo elettrico, pari al valore quadratico medio nel tempo  $t$ .

Poiché la potenza irradiata mediata in un periodo di tempo è determinante per il valore efficace di un impianto telefonia mobile, il rapporto tra il tempo di trasmissione in questo periodo e la durata del periodo - il cosiddetto *duty-cycle* - può essere preso in considerazione per la potenza di trasmissione determinante nella modalità di funzionamento TDD. Questo perché il ciclo di lavoro è un parametro di sistema regolabile e costante, e pertanto la media della potenza massima di trasmissione sul ciclo di lavoro è conforme alle disposizioni dell'ORNI sui valori limite dell'impianto.

Al rapporto tra *downlink* e *uplink* attualmente specificato di 4:1 o 80:20, il *duty-cycle* è 0,8. Il *duty-cycle* per la modalità TDD non è specificato nella scheda dei dati sul sito, ma deve essere inserito nel sistema di garanzia della qualità per garantire che il percorso di potenza per il monitoraggio della potenza di trasmissione sia documentato correttamente.

## 8.2 Monitoraggio ed esperienze raccolte dalle raccomandazioni sull'esecuzione

Con il fattore di correzione e la limitazione automatica della potenza, nell'esecuzione dell'ORNI per gli impianti di telefonia mobile vengono introdotti due elementi nuovi, che devono essere accompagnati da studi empirici nella fase iniziale.

## 9 Ulteriori informazioni

Gruppo di lavoro telefonia mobile e radiazioni (2019): «[Rapporto di telefonia mobile e radiazioni](#)». Rapporto del 18 novembre 2019 commissionato dal Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni.

Ufficio federale delle comunicazioni UFCOM (2020): «[Scheda informativa sul 5G - Panoramica introduttiva](#)», 30.1.2020.

Ufficio federale delle comunicazioni UFCOM (2020): «Testkonzession und Messung adaptive Antennen (GS-UVEK-325.1-9/2/1) ». 24.9.2020 e «Testkonzession und Messungen adaptive Antennen (GS-UVEK-325.1-9/2/1) – Bericht-Nachtrag» (Concessione di test e misurazioni antenne adattative (GS-UVEK-325.1-9/2/1) – Aggiunte al rapporto, disponibili unicamente in tedesco), 8.2.2021.

Ufficio federale dell'ambiente UFAM (2020): «[Spiegazioni del 30 giugno 2020 concernenti il metodo di misurazione per le antenne adattative](#)», 30.6.2020.

Ufficio federale dell'ambiente UFAM (2021): «Complemento del 23 febbraio 2021 alle raccomandazioni sull'esecuzione dell'Ordinanza sulla protezione dalle radiazioni non ionizzanti (ORNI) per le stazioni di base di telefonia mobile e WLL, UFAFP 2002», 23.2.2021.

Istituto federale di metrologia METAS (2020a): rapporto tecnico del 18 febbraio 2020 «[Metodo di misurazione per stazioni di base 5G NR](#)», 18.2.2020.

Istituto federale di metrologia METAS (2020b): [Complemento del 15 giugno 2020 al rapporto tecnico sui metodi di misurazione delle stazioni di base 5G NR fino a 6GHz](#) (disponibile unicamente in tedesco e in francese), 15.6.2020.

STRAPAG (2018): «[Pilotstudie für Emissionsmessungen an einer Mobilfunksendeanlage mittels Flugdrohne](#)» (studio pilota per misurare le emissioni in una stazione base di telefonia mobile utilizzando un drone, disponibile unicamente in tedesco). Rapporto commissionato dall'Ufficio federale dell'ambiente UFAM, 23.11.2018.