

Evoluzione metodologie di valutazione e misure per sistemi 5G: problematiche tecnologiche e attività sperimentali

Claudia Carciofi

Fondazione Ugo Bordoni

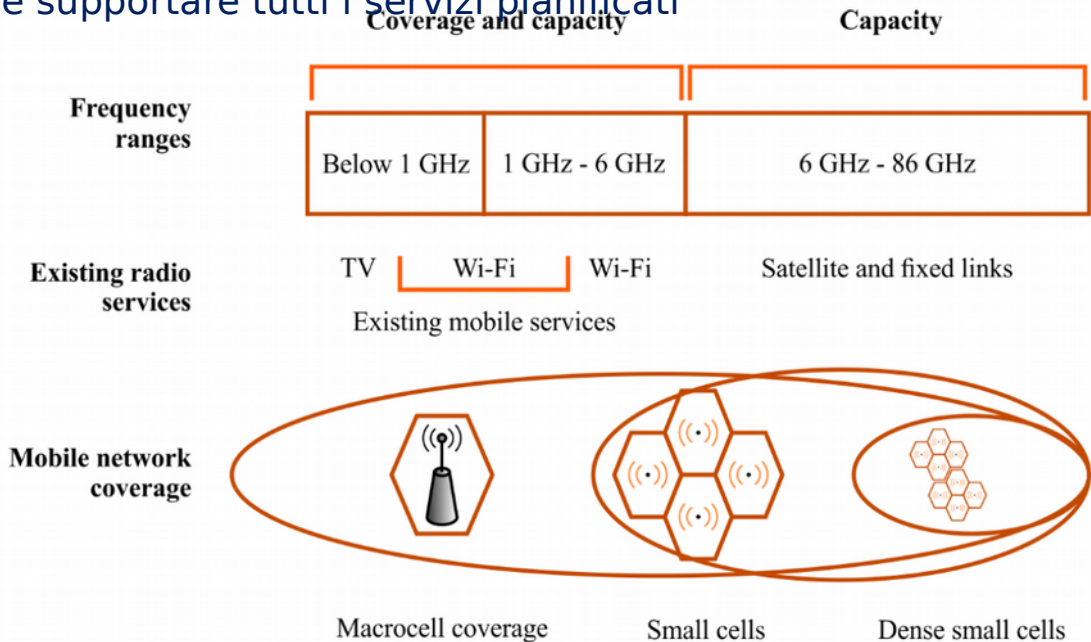
Il Progetto CEM in Emilia-Romagna: sviluppo e analisi dei risultati nell'ottica delle prospettive e futuri sviluppi tecnologici – Bologna 27 maggio 2019

Future reti 5G

- Le future reti 5G saranno reti dense, caratterizzate da un micro stazioni radiobase, localizzate più vicine agli utenti ed all'interno degli edifici.
- Allo stesso tempo le stazioni radiobase macro continueranno ad essere implementate, rendendo la rete altamente eterogenea
- Le esigenze di spettro 5G coinvolgeranno tre intervalli di frequenza chiave per fornire un'ampia copertura e supportare tutti i servizi pianificati

- sotto-1 GHz
- 1-6 GHz
- sopra 6 GHz

- Il paradigma 5G suggerisce di **aggiornare la metodologia di valutazione della conformità EMF** ai requisiti sulla esposizione umana adottando **nuovi approcci che tengano in considerazione il massive MIMO e le smart antennas**



Fonte Rec. ITU-R K.Sup9 2017-F07

Tipologie di coperture 5G

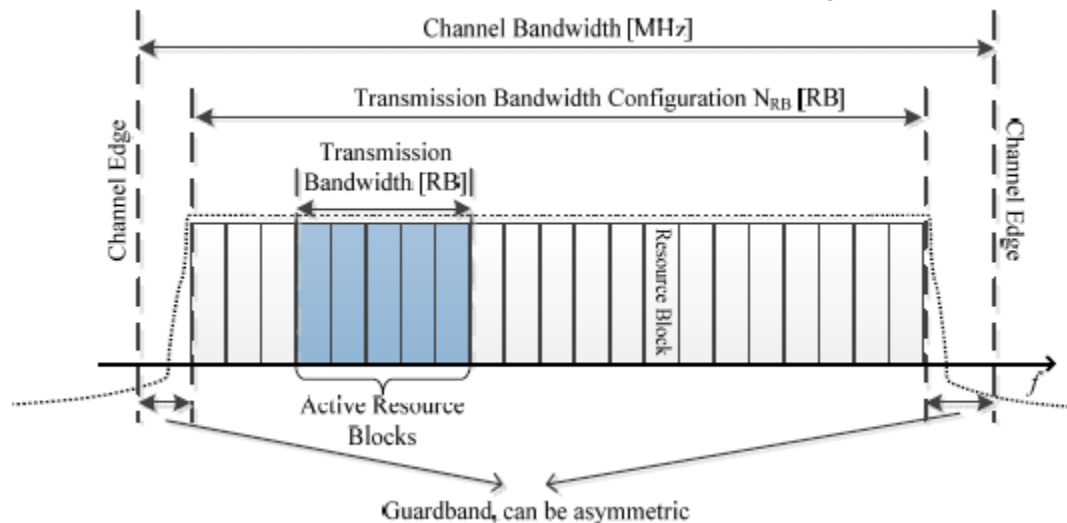
- Wide Area Base Stations (Macrocella)
- Medium Area Base Station (Microcelle)
- Local Area Base Stations (Picocelle)

3GPP BS class	Configuration	Total rated maximum Tx power over all bands	Gain range	Rated maximum EIRP range
Medium range BS	2 bands	20 W	7 – 13 dBi	100 – 400 W
	1 band	10 W	7 – 13 dBi	50 – 200 W
Local area BS	5 bands	2,5 W	2 – 5 dBi	4 – 8 W
	1 band	0,5 W	2 – 5 dBi	0,8 – 1,6 W
Home BS	5 bands	100 mW	0 – 3 dBi	0,1 – 0,2 W
	1 band	20 mW	0 – 3 dBi	0,02 – 0,04 W

Fonte Rec. ITU-R K.Sup9 2017-F07

Caratteristiche tecniche sistemi 5G (I)

- Segnale OFDM sia in DL che UL:
 - Coherent Optical OFDM per scenari ad alta capacità (DL e UL)
 - DFT - OFDM per UL
- Trasmissione: sia FDD che TDD
- Modulazioni: QPSK, 16 QAM, 64 QAM, 256 QAM
- Banda di canale BS (ETSI TS 138 104 V15.3.0 (2018-10))



Fonte Rec. ITU-R K.Sup9 2017-F07

Caratteristiche tecniche sistemi 5G (II)

- Bande di frequenza Release 15:
 - FR1 450-6 GHz
 - FR2 24.25 - 52.6 GHz
- Configurazioni banda di trasmissione per FR1 e FR2

Table 5.3.2-1: Transmission bandwidth configuration N_{RB} for FR1

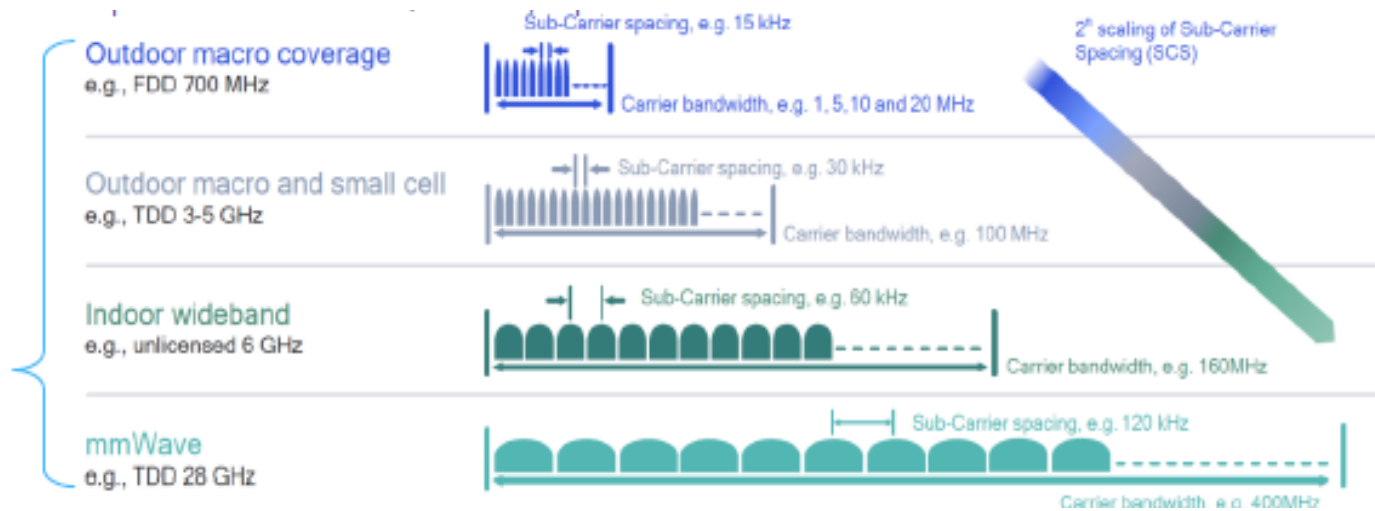
SCS (kHz)	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz	25 MHz	30 MHz	40 MHz	50 MHz	60 MHz	70 MHz	80 MHz	90 MHz	100 MHz
	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}
15	25	52	79	106	133	160	216	270	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
30	11	24	38	51	65	78	106	133	162	189	217	245	273
60	N.A	11	18	24	31	38	51	65	79	93	107	121	135

Table 5.3.2-2: Transmission bandwidth configuration N_{RB} for FR2

SCS (kHz)	50 MHz	100 MHz	200 MHz	400 MHz
	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}
60	66	132	264	N.A
120	32	66	132	264

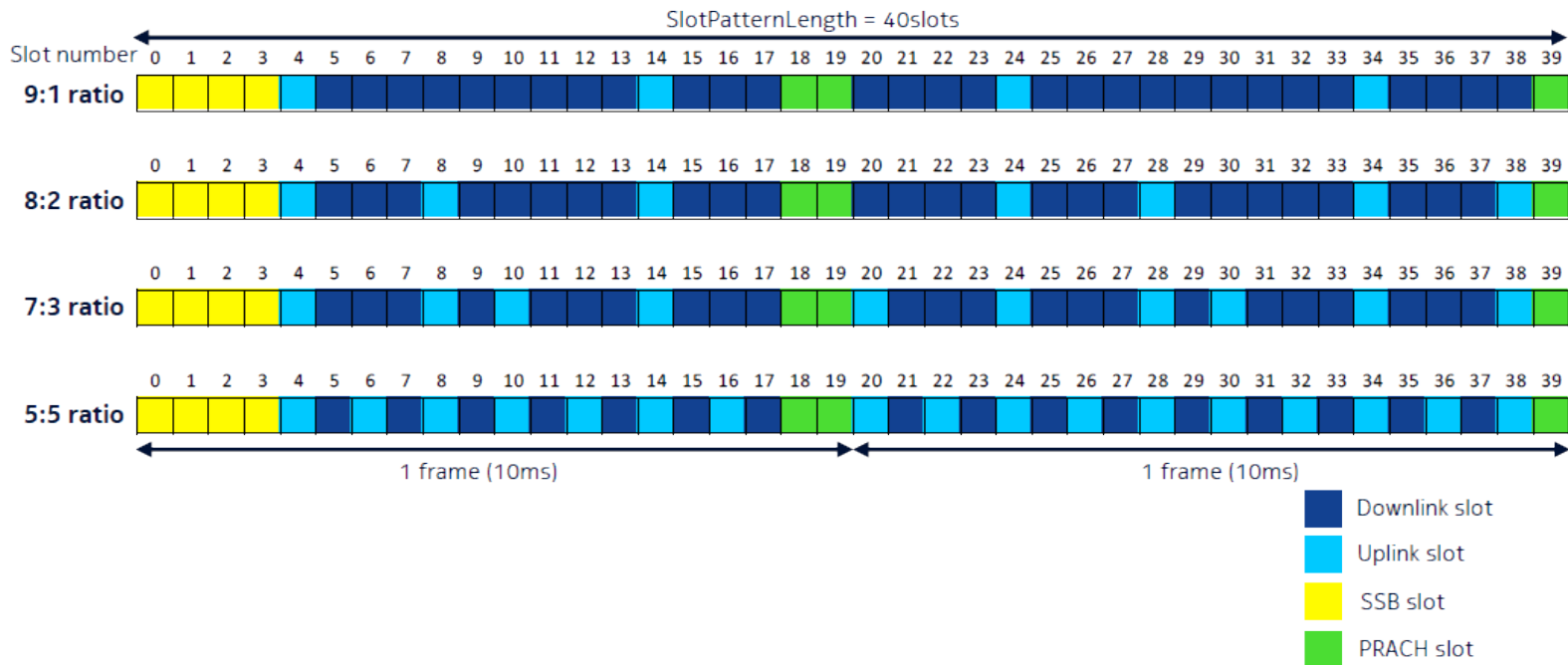
Caratteristiche tecniche sistemi 5G (III)

- Subcarrier spacing: variabile a seconda dello scenario (multipli di 15 KHz)



Caratteristiche tecniche sistemi 5G (IV)

- Struttura del frame:
 - Durata del frame 10 msec
 - Durata del subframe 1 msec: a sua volta suddiviso in time slots



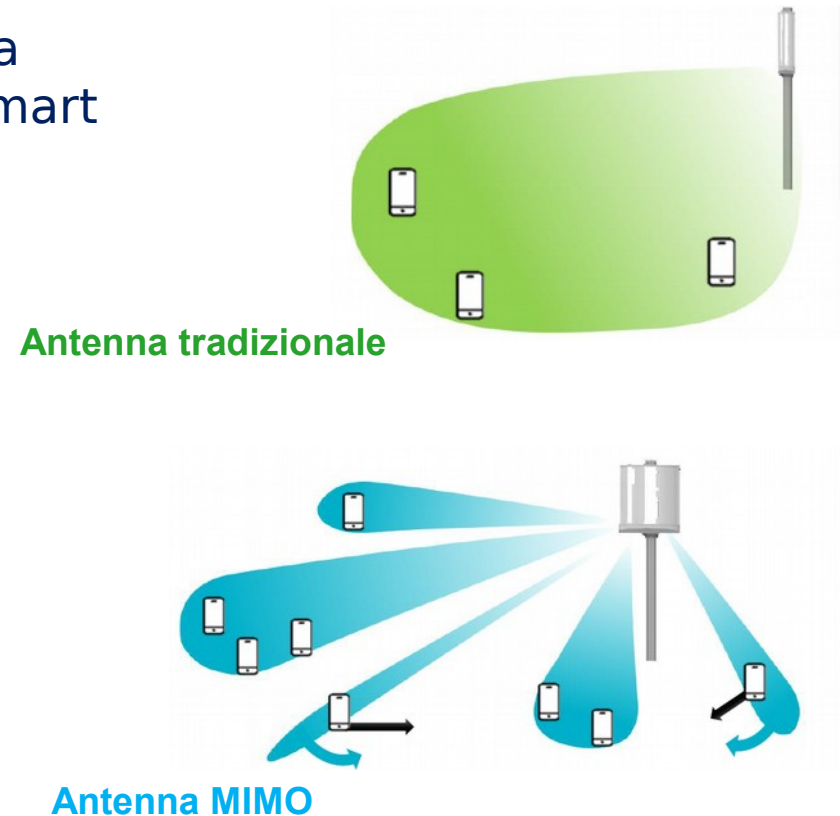
Caratteristiche tecniche sistemi 5G (V)

- Canali fisici DL e UL:
 - Downlink
 - Physical Broadcast Channel – PBCH
 - Physical Downlink Control Channel – PDCCH
 - Physical Downlink Shared Channel – PDSCH
 - Uplink
 - Physical Random Access Channel – PRACH
 - Physical Uplink Control Channel – PUCCH
 - Physical Uplink Shared Channel – PUSCH
- Segnali DL e UL:
 - Downlink
 - Synchronization signals
 - Primary synchronization signal – PSS
 - Secondary synchronization signal – SSS
 - Reference Signals – RS
 - Channel state information RS – CSI-RS
 - Phase tracking RS – PT-RS
 - Demodulation RS – DM-RS
 - Uplink
 - Reference Signals – RS
 - Sounding RS – S-RS
 - Phase Tracking RS – PT-RS
 - Demodulation RS – DM-RS

MIMO & 5G (1)

Il 5G New Radio (ITU, 3GPP) sarà caratterizzato da tecnologie di antenna avanzate come il Massive MIMO e le smart antennas

- **Energia trasmessa soltanto nelle direzioni in cui è necessario** invece che costantemente in un ampio settore
- L'approccio tradizionale basato sulla massima potenza teorica trasmessa potrebbe non risultare più appropriato.



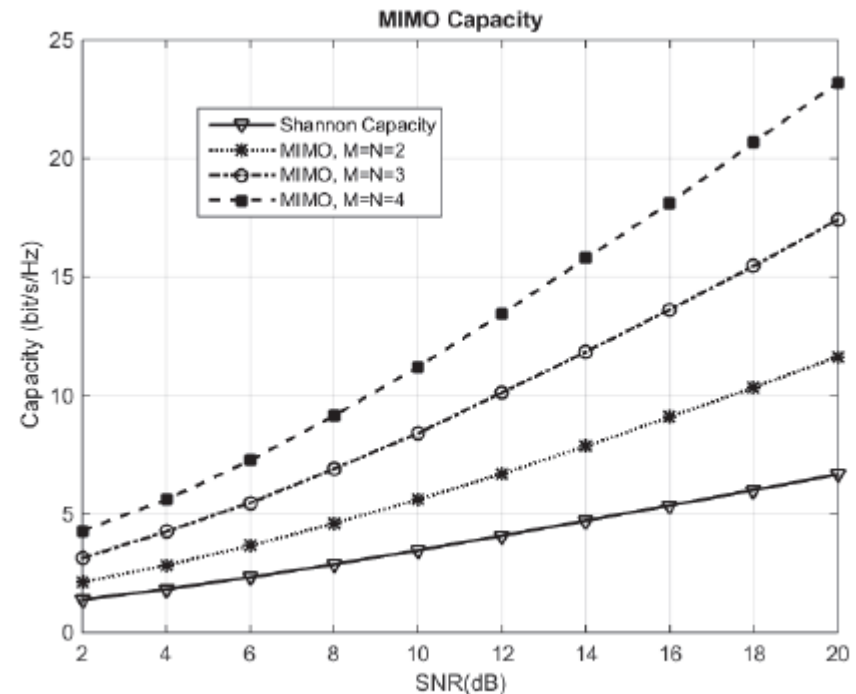
MIMO & 5G (2)

- Capacità del canale(Shannon)

$$C = B \cdot \log_2 (1 + S/N)$$

- Capacità MIMO

$$C = \min(M, N) \cdot B \cdot \log_2 (1 + S/N)$$



Aumentando M ed N, è possibile servire contemporaneamente più utenti nella stessa banda di frequenza senza aumentare la potenza trasmessa per terminale

MIMO & 5G (3)

Le stazioni base con antenne massive MIMO producono una serie di fasci stretti simultanei indirizzati verso i dispositivi target

Questo comportamento beam centric dei sistemi mMIMO differisce dalle tecnologie convenzionali fin ora utilizzate che prevedono che l'energia venga trasmessa in un ampio settore angolare

Questa particolarità influenza anche i livelli di esposizione ai campi a radiofrequenza

La potenza trasmessa viene diffusa in diverse direzioni per servire dispositivi che si trovano in diverse aree geografiche

Occorre quindi nella valutazione tenere conto della variazione di traffico e della distribuzione spaziale della potenza trasmessa o dell'EIRP

Nuove esigenze

Lo sviluppo del sistema 5G richiede quindi di identificare metodologie avanzate di valutazione e analisi dei livelli di campo che tengano conto della variabilità spaziale e temporale del segnale generato dai nuovi sistemi di antenna MIMO e beamforming

Occorre inoltre prevedere modalità di misura e valutazione specifica anche per segnali LTE TDD e per sistemi 4G NB-IoT

Necessità di aggiornamento delle norme CEI per la stima dei segnali TDD / Massive MIMO (Norma CEI 211.10)

Necessità di aggiornamento delle norme CEI per la misura dei segnali TDD / Massive MIMO (Norma CEI 211.7)

Norme internazionali per la valutazione dei livelli di campo generati da sistemi 5G

Gli standard di riferimento a livello internazionale per la valutazione dei livelli di esposizione dei nuovi sistemi 5G sono:

- Il Report Tecnico IEC EN 62232 ed 2 - “Determination of RF field strength, power density and SAR in the vicinity of radiocommunication base stations for the purpose of evaluating human exposure”, 2017
- Il Report Tecnico IEC 62669 ED2 - “Case studies supporting IEC 62232 - Determination of RF field strength and SAR in the vicinity of radio communication base stations for the purpose of evaluating human exposure”, 2019

Contenuti della IEC 62269

§	Base statio type	Evaluation type	Evaluation method
6	Small cell (indoor local area BS)	Product compliance (6.1)	SAR measurements (B.3.2)
7	Small cell (outdoor medium range BS)	Product compliance (6.1)	SAR measurement (B.3.2)
8	Small cell	Product installation compliance (6.2)	Field strength computations (B.4)
9	Small cell	In-situ RF exposure assessment (6.3)	Field strength measurements (B.3.1)
10	Street cell	Product compliance (6.1)	SAR (B.3.2) and field strength (B.3.1) measurements
11	Macro site	In-situ RF exposure assessment (6.3)	Field strength measurements (B.3.1)
12	Macro site (inspection with drone)	In-situ RF exposure assessment (6.3)	Field strength measurements (B.3.1)
13	All types of BS	Compliance using the actual maximum transmitted power or EIRP	Field strength measurements (B.3), computations (B.4) & actual max (B.5)
14	Macro (massive MIMO)	Product compliance (6.1)	Field strength computations (B.4)
15	Macro and small cell (massive MIMO)	Product installation compliance (6.2)	Field strength computations (B.4)
16	Small cell (massive MIMO)	Product installation compliance (6.2) and in-situ RF exposure assessment (6.3)	Field strength measurements (B.3) and computations (B.4)
17	Wireless link using parabolic dish antenna	Product compliance (6.1)	Field strength computations (F.11)



Standard IEC EN 62232

Lo standard IEC 62232 è stato tradotto nella legislazione UE tramite CENELEC EN 50401

- Data di ratifica: luglio 2017
- Data di pubblicazione: luglio 2018
- Date di ritiro: luglio 2020

La IEC 62232 ED 2 è stata recepita dal CEI a Marzo 2018

N O R M A I T A L I A N A C E I	
<i>Norma Italiana</i>	<i>Data Pubblicazione</i>
CEI EN 62232	2018-03
La seguente Norma è identica a: EN 62232:2017-12.	
<i>Titolo</i>	
Determinazione della intensità di campo elettromagnetico a radiofrequenza (RF), della densità di potenza e del tasso di assorbimento specifico (SAR) per valutare l'esposizione umana in prossimità di stazioni radio base	
<i>Title</i>	
Determination of RF field strength, power density and SAR in the vicinity of radiocommunication base stations for the purpose of evaluating human exposure	

Il Report Tecnico IEC 62669

Il Report tecnico IEC 62669 fornisce una serie di casi studio implementativi per la valutazione dei livelli di esposizione in diverse tipologie di scenari di copertura

- Ciascun caso di studio è stato scelto per illustrare un tipico scenario di valutazione e impiega i metodi descritti in IEC 62232: 2017
- I casi di studio sono forniti a titolo indicativo e non è possibile prescindere dalla conoscenza approfondita dei requisiti riportati nel Report IEC 62232: 2017
- Sulla base delle indicazioni riportate da ciascun caso di studio, vengono proposte indicazioni da considerare nella prossima revisione della IEC 62232
- ~~Le metodologie e gli approcci descritti possono essere utili per la~~ valutazione dei primi sistemi 5G

IEC 62232: approccio basato su «actual maximum power»: implementazione per sistemi 5G AAS

- Considera la distribuzione statistica temporale a lungo termine delle risorse allocate in fasci simultanei
- Considera la distribuzione statistica spaziale a lungo termine dei fasci in tutta l'area di copertura
- Considera la distribuzione statistica a lungo termine dell'allocazione DL/UL nei sistemi TDD

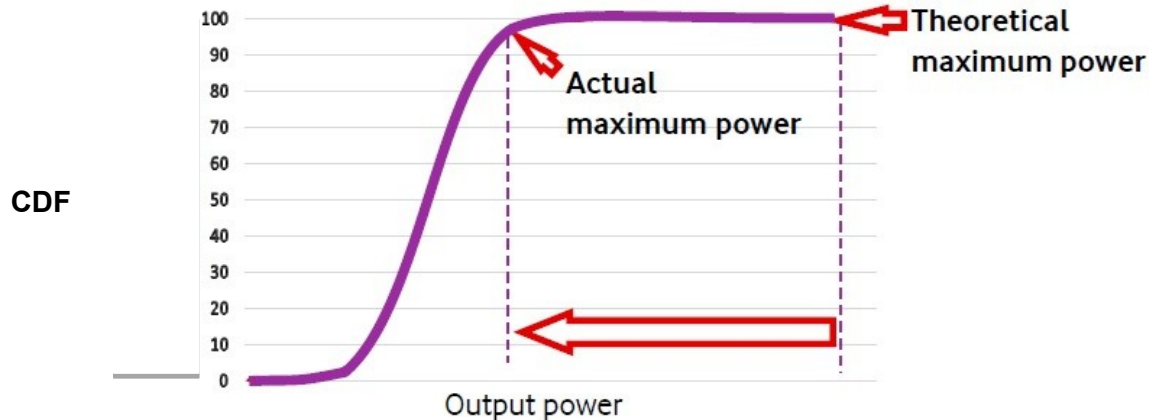
IEC 62232: approccio basato su «actual maximum power»

- Lo standard IEC 62232 consente di considerare **l'actual maximum transmitted power** al posto del massimo teorico
- Definito come il 95-esimo percentile di tutti i valori della potenza irradiata che contribuiscono alla esposizione elettromagnetica

actual maximum: value <of transmitted power or EIRP reached during operations at a given percentile of the cumulative distribution function (CDF) of a statistical evaluation taking into account the averaging time and the variation of the BS load for the whole duration of the statistical evaluation

averaging time

appropriate time over which exposure is averaged for purposes of determining compliance



Valutazione basata sull'“actual maximum transmitted power”

L'IEC 62232 consente di considerare nelle estrapolazioni l'actual maximum transmitted power come fattore di estrapolazione F_{ext}

Una volta stabilito F_{ext} sarà possibile determinare l'intensità del campo elettrico applicando la seguente formula:

$$E_{asmt} = E_{eval} * \sqrt{F_{ext}}$$

Dove:

- E_{asmt} è l'intensità di campo elettrico valutata
- E_{eval} è l'intensità del campo elettrico simulata o misurata
- F_{ext} è il fattore di estrapolazione

Il valore dell'actual maximum power deve essere fornito dal gestore e può essere ottenuto tramite gli strumenti di rete normalmente utilizzati per monitorare, controllare ed analizzare le prestazioni delle reti.

Determinazione dell'”actual maximum transmitted power”

I sistemi di gestione della rete forniscono una vasta gamma di contatori che sono rappresentativi del funzionamento e delle prestazioni del sistema.

I dati dei contatori possono essere trattati statisticamente per singola cella o per siti a più celle distribuiti anche su un'area geografica piuttosto ampia

La potenza trasmessa in downlink costituisce il parametro più utile ai fini della valutazione della esposizione

La potenza trasmessa da una stazione base varia in modo ciclico su base quotidiana, settimanale oppure stagionale

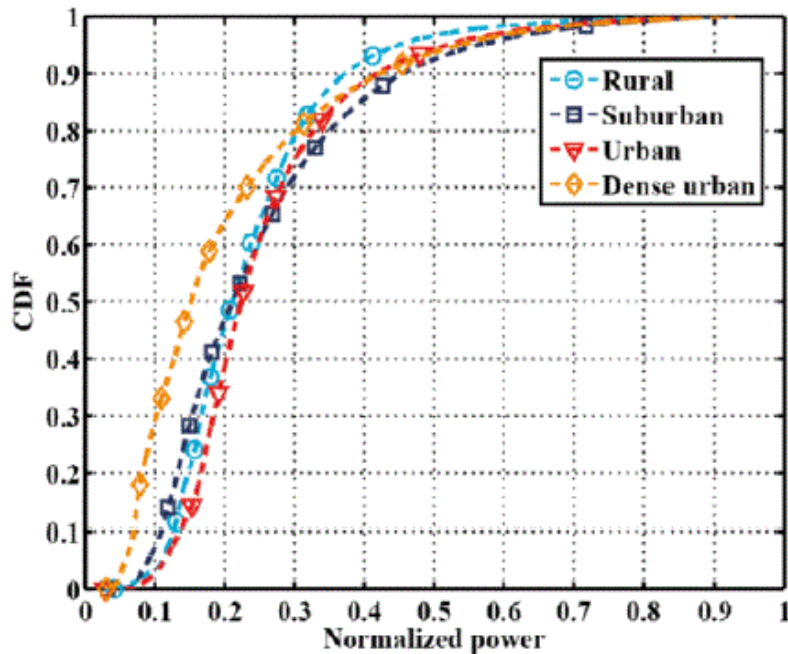
L'impatto delle variazioni di traffico sulle condizioni di esposizione è stato ampiamente studiato per reti 2G, 3G, 4G

Profili di traffico tipici sono pubblicati nella letteratura tecnica e considerati in norme tecniche internazionali come la ETSI 202706-1

Il Report tecnico IEC 62269 (che verrà trattato in seguito) riporta esempi di funzioni di distribuzione cumulativa della potenza trasmessa nel tempo per varie tipologie di rete

Distribuzione cumulativa della potenza rete 3G – fonte IEC62669

Distribuzione cumulativa della potenza trasmessa nel tempo normalizzata per differenti scenari in una rete 3G.



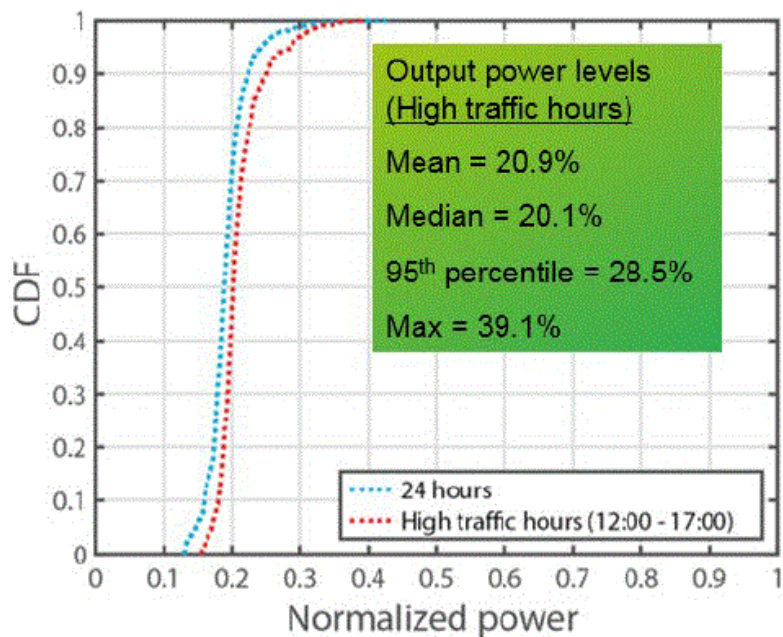
Le funzioni cumulative sono state ottenute da misurazioni basate sui contatori di rete per una rete 3G in India e considerano quattro diverse tipologie di scenario:

- Rurale
- Suburbano
- Urbano
- Urbano denso

Fonte: P. Joshi, M. Agrawal, B. Thors, D. Colombi, A. Kumar, and C. Törnevik, "Power level distributions of radio base station equipment and user devices in a 3G mobile communication network in India and the impact on assessments of realistic RF EMF exposure," IEEE Access, 2977 vol. 3, pp. 1051-1059, 2015

Distribuzione cumulativa della potenza rete 2G/3G/4G - fonte IEC62669

Distribuzione cumulativa della potenza trasmessa normalizzata una rete mista 2G/3G/4G



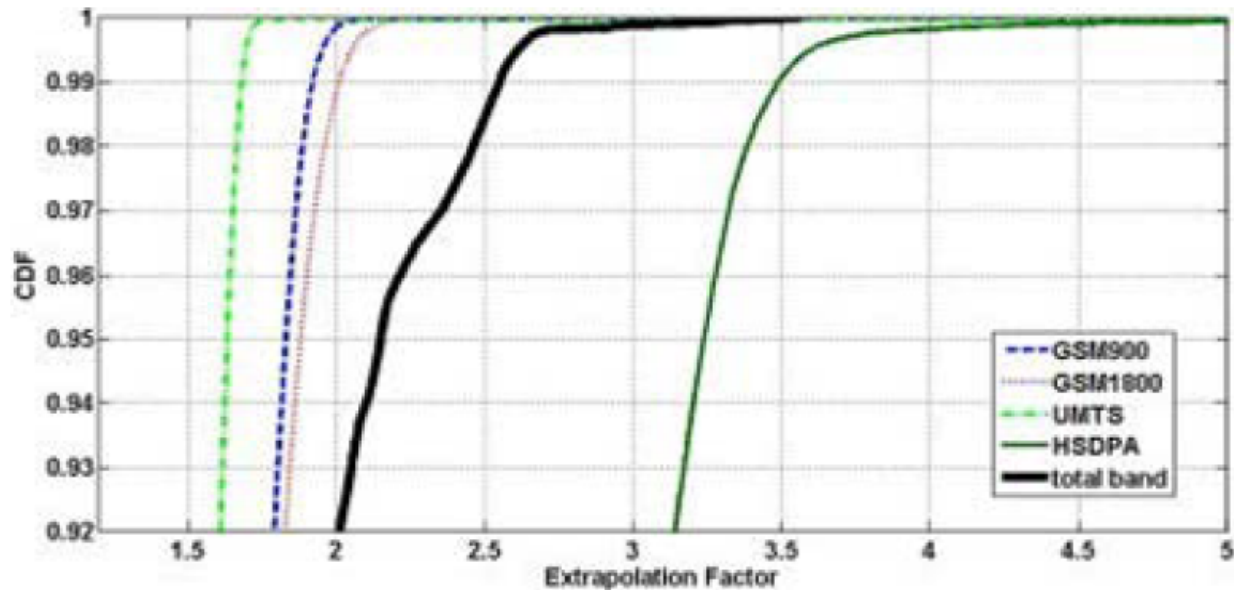
Le funzioni cumulative sono state ottenute da misurazioni basate sui contatori di rete

Le distribuzioni sono state ottenute considerando un elevato numero di celle con diverse tecnologie

È stata operata una distinzione tra dato relativo alle 24 ore e dato relativo unicamente alle ore di punta

Fonte: P. Joshi, B. Thors, D. Colombi, C. Törnevik, and L.-E. Larsson, "Realistic output power levels of multi-technology radio base stations and the implication on RF EMF exposure compliance assessments," The Joint Annual Meeting of The Bioelectromagnetics Society and the European BioElectromagnetics Association co-organized with the European COST EMF-MED Action 2982 BM1309, 5-10 June, Ghent, Belgium, 2016

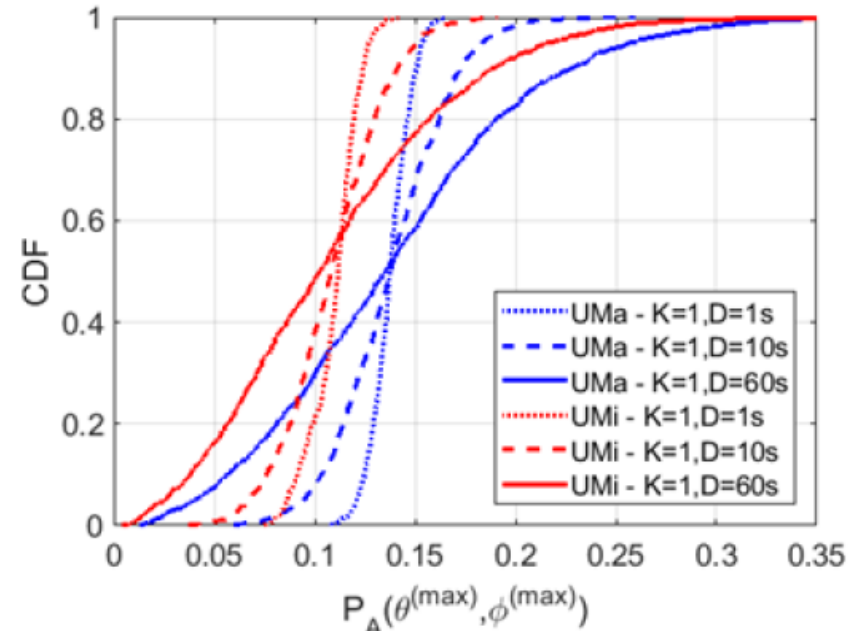
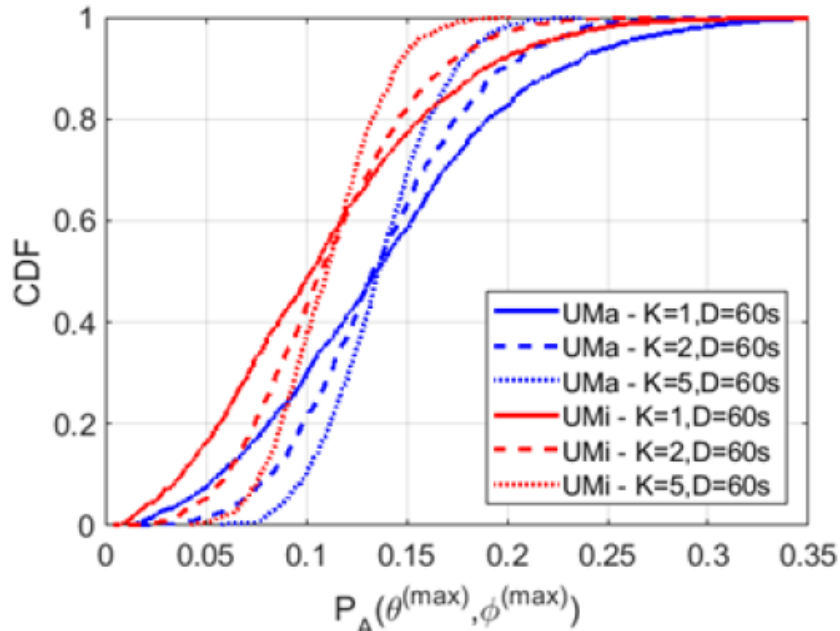
Fattori di estrapolazione: fonte IEC 62669



Esempi fattore di estrapolazione di reti 2G e 3G
con una media temporale di 6 minuti

Simulazioni variazione temporale e spaziale 5G massive MIMO: fonte IEC62669

Distribuzione cumulativa potenza normalizzata per coperture macro e micro



Urban Macro (UMa) and Urban Micro (UMi) definite in 3GPP TR 36.873 e TR 38.901

Frequenza 2 GHz

Altezza installazione 25 m UMa e 10 m UMi

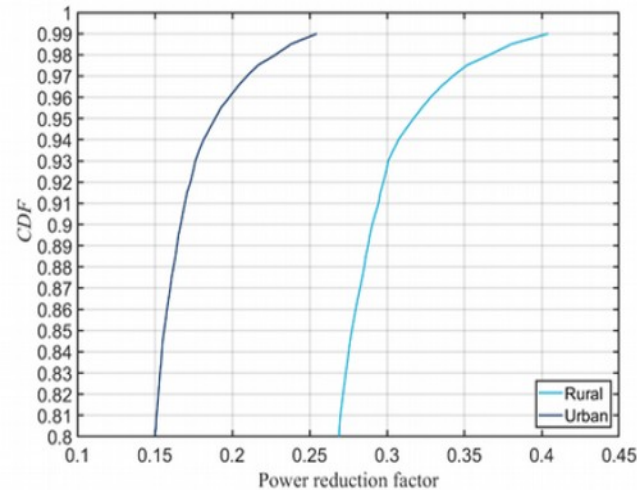
Numero settori 3, Numero siti 7

Tipo antenna array antenna 8 x 8

K = numero utenti D = durata servizio utente

Potenza normalizzata media temporale 6 minuti

Actual Maximum Power 5G massive MIMO: simulazioni fonte IEC62669



1529

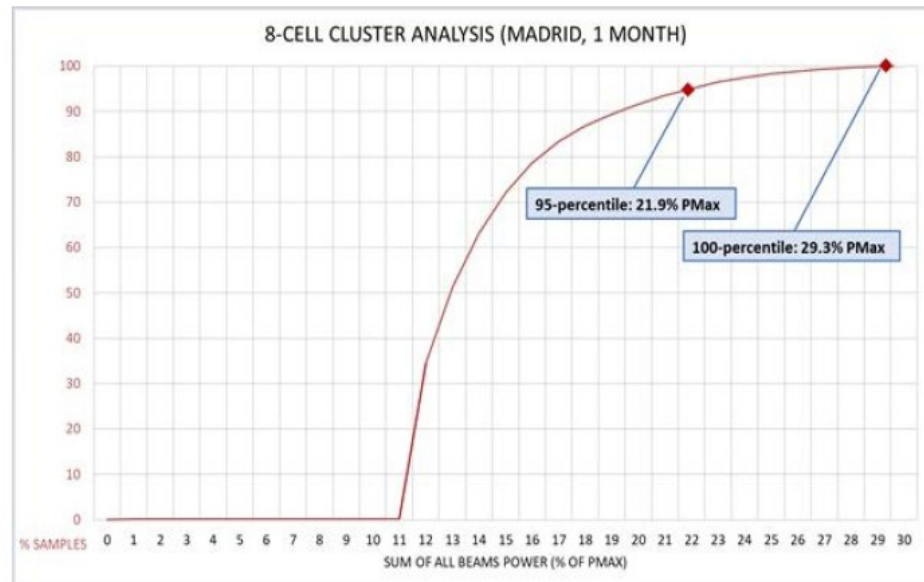
1530 **Figure 17 – CDF of the power reduction factor for rural and urban installation scenarios**

1531 The results were computed for an 8x8 mMIMO antenna designed to cover $\pm 60^\circ$ in azimuth and $\pm 15^\circ$
1532 in elevation. The beam power fractions will be lower for antennas with more elements; however, the
1533 provided values can conservatively be applied for larger arrays when no specific statistical analysis is
1534 available.

1535 Based on these results, a power reduction factor F_{DLF} of 0,32 may be used for rural mMIMO sites, and
1536 a factor of 0,19 for urban mMIMO sites. The effects of TDD may be considered by multiplying with a
1537 suitable technology duty cycle, e.g. $F_{TDC} = 0,75$, according to Equation (1).

Actual Maximum Power 5G massive MIMO: misure fonte IEC62669

1707 Figure 20 shows a statistical analysis performed using one-month counter logging from a small
1708 sample of 8 cells using the same 3GPP Band 38 mMIMO antenna models in Madrid (see experiment
1709 #1 in Table 16). The environment is an urban scenario, with low traffic conditions. Results include only
1710 the averaged RF transmitted power with no further correction due to beam distribution; therefore, this
1711 is an overly conservative case.



1712

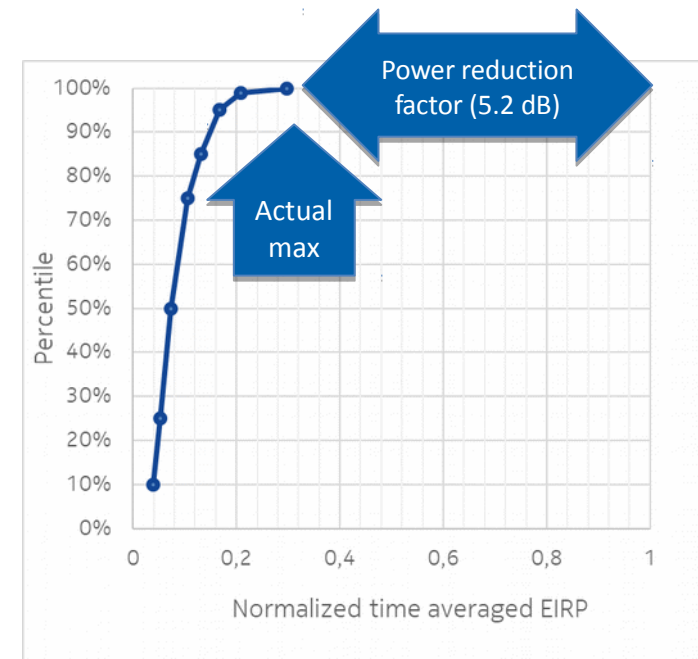
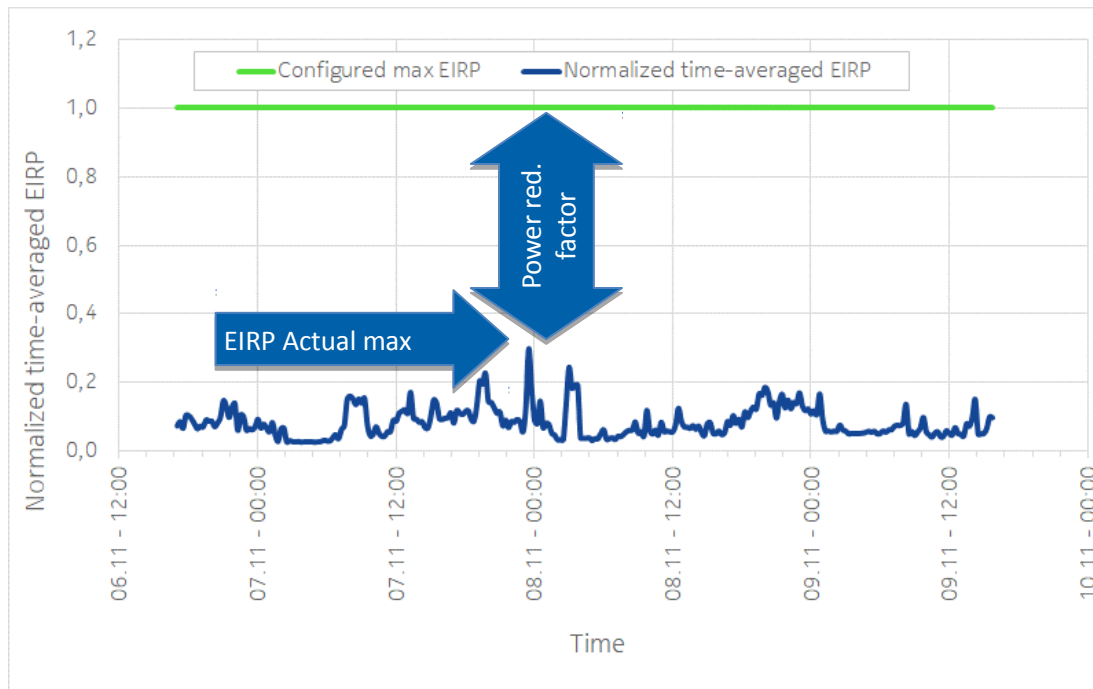
1713

Figure 20 – CDF of measurement on 8-cell cluster

- I risultati ottenuti con modelli teorici e diverse misure mostrano che per antenne Massive MIMO il valore effettivo della massima potenza è inferiore al 25% del valore massimo teorico

Variazione temporale potenza trasmessa

► Esempio cella 4G cell

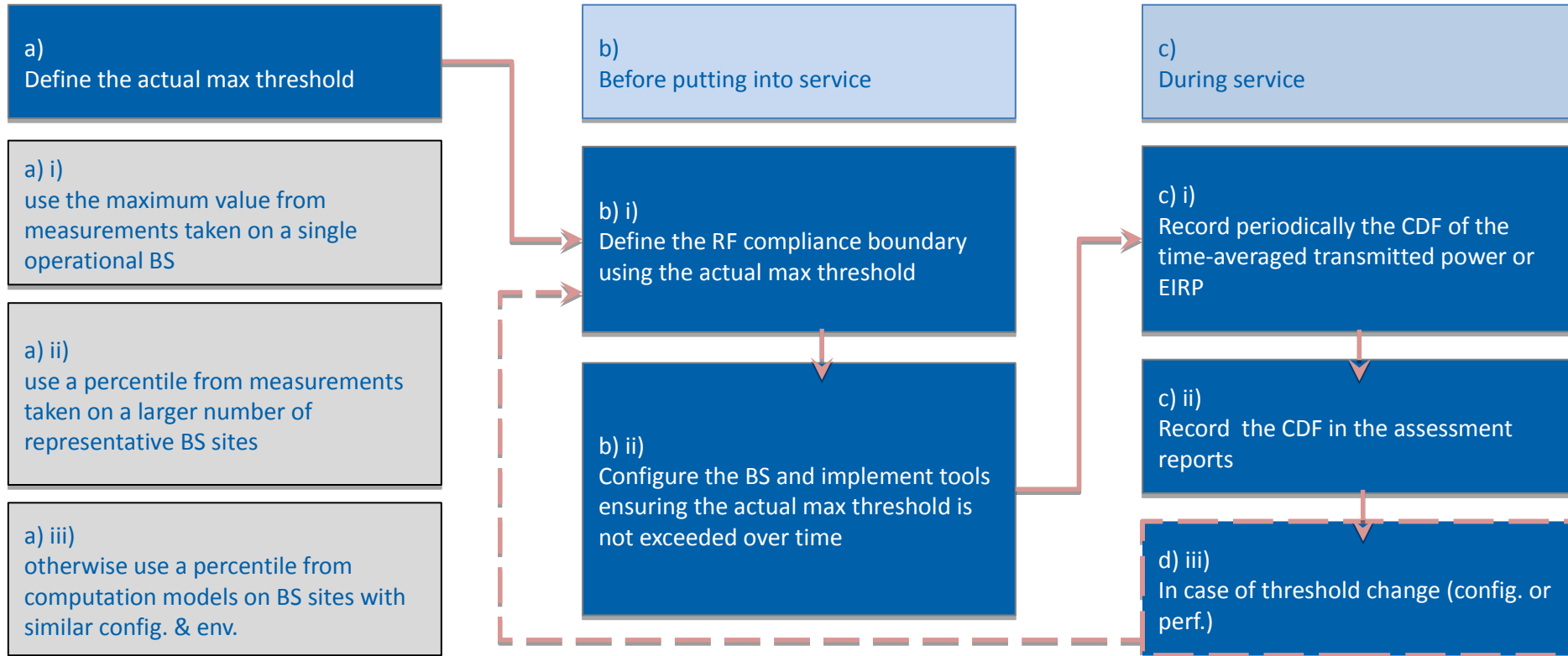


Metodologia di valutazione proposta da IEC TR 62669

General principle for RF compliance based on actual max power:
[from 106/473/DTR – section 13.1.2]

- ▶ The real time-averaged transmitted power by BSs during service, called actual transmitted power, is generally below the time averaged maximum transmitted power.
- ▶ The actual maximum transmitted power can be used to determine the RF compliance boundary provided that the operator is implementing tools ensuring this threshold is not exceeded over time during service.
- ▶ ~~These tools can be based on BS counters and features developed by manufacturers to monitor and control the RF transmitted power or EIRP and other relevant characteristics of the BS.~~
- ▶ This applies to all types of BS, whether they are using fixed beams or steerable beams like with mMIMO.

Implementazione approccio basato su actual transmitted power proposto da IEC TR 62669



Metodologia di valutazione EIRP di sistemi MIMO e beamforming

Il Rapporto Tecnico IEC 62269 propone una metodologia di valutazione dell'EIRP che tiene conto della variabilità di emissione dei sistemi di antenna MIMO e beamforming espressa attraverso la seguente equazione:

$$EIRP(\vartheta, \varphi) = P_{TXM} * F_{TDC} * G_{MLB} * F_{PDL}(\vartheta, \varphi) * F_G(\vartheta, \varphi)$$

Fattori deterministici
(fissi)

P_{TXM} : **potenza massima** trasmessa in downlink

F_{TDC} : **fattore di scala** determinato dal duty cycle tecnologia

G_{MLB} : **guadagno d'antenna** nel lobo principale per i fasci fissi o nella direzione di puntamento per i fasci non statici

Variazione di potenza trasmessa dovuta al traffico

Potenza normalizzata in downlink in un tempo T

Concetto simile ad alfa24

Variazione del guadagno di antenna dovuto alla variazione di orientamento del fascio

Definizione dei parametri dell'equazione

Nella equazione:

- θ è l'azimut
- ϕ è l'elevazione
- P_{TXM} è la potenza massima trasmessa in downlink (fattore deterministico)
- F_{TDC} è un fattore di scala rappresentativo del duty cycle della tecnologia del segnale (fattore deterministico)
- G_{MLB} è il guadagno d'antenna nel lobo principale per i fasci fissi o nella direzione di puntamento per i fasci non statici (fattore deterministico)
- $F_{PDL}(\theta, \phi)$ è la potenza trasmessa in downlink normalizzata $F_{PDL}(\theta, \phi, t)$ mediata sull'intervallo di tempo T
- $F_G(\theta, \phi)$ è la parte variabile normalizzata del guadagno $F_G(\theta, \phi, t)$ mediata nell'intervallo di tempo T
- t è il tempo
- T è l'intervallo temporale nel quale viene effettuata la media

Fattori statistici

I fattori statistici sono rappresentati dal fattore EIRP normalizzato definito come:

$$F_{EIRP}(\vartheta, \varphi) = F_{PDL}(\vartheta, \varphi) * F_G(\vartheta, \varphi)$$

Il fattore di riduzione della potenza è derivato dalla analisi statistica (con particolare riferimento alle funzioni di distribuzione cumulativa) della potenza trasmessa mediata nel tempo e di conseguenza non include fattori deterministici

L'actual maximum transmitted power è derivato dalla potenza massima trasmessa (generalmente corrispondente alla potenza massima trasmessa nominale) attraverso la seguente equazione:

$$P_{TXMA} = P_{TXM} * F_{TDC} * F_{PR}$$

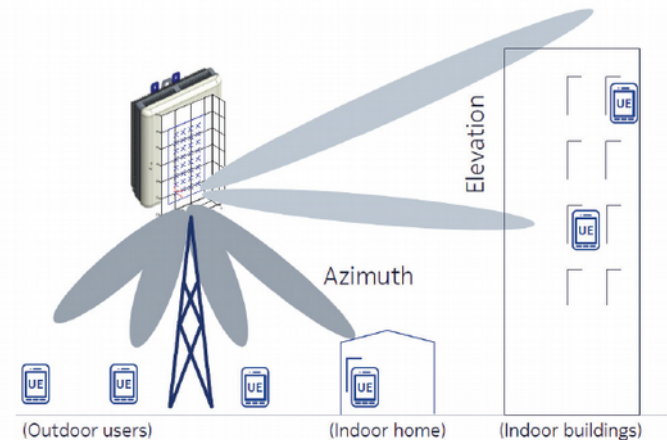
Dove:

P_{TXMA} è l'actual maximum transmitted power

F_{PR} è il fattore di riduzione in potenza

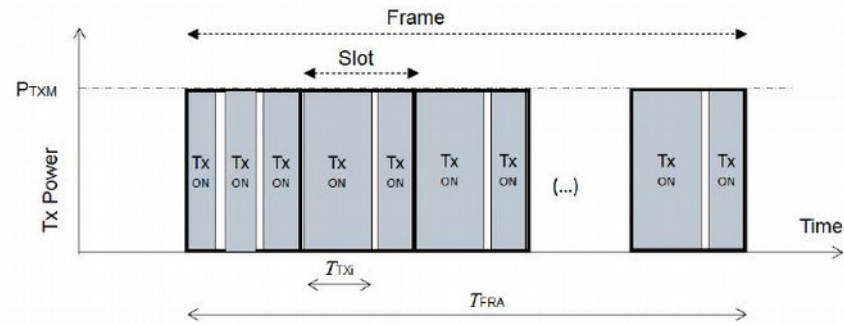
Conclusioni

- Il 5G New Radio (NR) è caratterizzato dalla tecnologia MIMO che prevede che il fascio sia direzionato unicamente dove necessario, invece che trasmettere costantemente energia in un settore ampio
- Un approccio conservativo basato sulla potenza teorica massima trasmessa in ogni possibile direzione per un periodo di tempo lungo non è realistico
- **IEC ha definito un modello statistico per studiare le emissioni del 5G (IEC62232)**
- Il modello statistico IEC è stato studiato per una rete MIMO-smart antennas ad 800 MHz considerando valutazioni di densità di potenza a 20 m per verificare il rispetto dei limiti ICNIRP
 - La combinazione del modello statistico IEC per MIMO e smart antennas combinato con l'approccio italiano mediato nel tempo ha mostrato che possono essere rispettati i valori di attenzione italiani rendendo possibile il roll out 5G.



Fattore di duty cycle

Il fattore di duty cycle F_{TDC} dipende sia dalla tecnologia utilizzata sia dalla implementazione della tecnologia da parte dell'operatore



Per le tecnologie GSM e UMTS il valore di default di F_{TDC} è pari a 1

Per LTE-FDD e NR-FDD il valore approssimativo di F_{TDC} è pari a 1

Per LTE-TDD e NR-TDD il valore approssimativo di F_{TDC} è dato da:

$$F_{TDC} = \frac{T_{TX}}{(T_{TX} + T_{RX})}$$
 ed i valori tipici sono compresi tra 0.75 e 0.80 a seconda del formato speciale di sottotrama implementato. Quando non si conosce la sotto trama specifica si può utilizzare un valore approssimativo di 0.75

T_{TX} è la durata totale del segnale di downlink per frame

T_{RX} è la durata totale del periodo di tempo dedicato alla ricezione per frame

Sistemi LTE-TDD

Per effettuare una corretta misurazione del segnale LTE TDD occorre conoscerne le caratteristiche.

I segnali LTE nel dominio del tempo sono organizzati in frame della durata di 10 millisecondi ciascuno.

A sua volta, ciascun frame è costituito da 10 subframe della durata di 1 millisecondo. Infine, il singolo subframe è costituito da 14 simboli, che rappresentano le unità temporali fondamentali in cui si suddivide il frame del segnale LTE.

La modalità FDD è caratterizzata dall'utilizzo di due bande di frequenza separate, una per la trasmissione in downlink e l'altra per quella in uplink.

Nella modalità TDD, invece, le trasmissioni in downlink ed in uplink condividono la stessa banda di frequenze e sono separate su base temporale.

Pertanto nella modalità TDD i subframe possono essere classificati in tre categorie subframe di downlink, subframe di uplink, subframe speciali, a seconda della specifica funzione che assolvono. I subframe speciali separano i subframe di downlink da quelli di uplink.

Struttura frame

Lo schema di alternanza tra i tre tipi di subframe è definito dalla specifica configurazione $C_{dw/ul}$ implementata dal segnale.

Lo standard TDD prevede 7 differenti configurazioni - numerate da 0 a 6 - ciascuna delle quali corrisponde a uno specifico schema. Le configurazioni downlink/uplink ammesse sono riportate nella tabella.

Configurazione down/up ($C_{dw/ul}$)	Periodicità del punto di switch tra DL e UL	Numero dei subframe									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	5 ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	5 ms	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	5 ms	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	10 ms	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	10 ms	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	10 ms	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	5 ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

Tabella tratta da: ECC Report 296, "National synchronisation regulatory framework options in 3400-3800 MHz: a toolbox for coexistence of MFCNs in synchronised, unsynchronised and semi-synchronised operation in 3400-3800 MHz", 2019

Segnali LTE-TDD

La modalità TDD introduce un ulteriore elemento a cui fare attenzione durante l'esecuzione delle misure e nelle successiva fase di estrapolazione alla massima potenza o nelle 24 ore: l'occupazione temporale del frame LTE da parte del canale di downlink avviene per una frazione β_{TDD} inferiore al 100%. Il fattore β_{TDD} può essere facilmente calcolato come il rapporto tra il numero di simboli dedicati al downlink e 140, ossia il numero di simboli che compongono il frame LTE. Il parametro β_{TDD} è stato calcolato per tutte le configurazioni ammesse per il segnale LTE-TDD.

		$C_{\text{dw/ul}}$						
		0	1	2	3	4	5	6
C_s	0	0.243	0.443	0.643	0.621	0.721	0.821	0.343
	1	0.329	0.529	0.729	0.664	0.764	0.864	0.429
	2	0.343	0.543	0.743	0.671	0.771	0.871	0.443
	3	0.357	0.557	0.757	0.679	0.779	0.879	0.457
	4	0.371	0.571	0.771	0.686	0.786	0.886	0.471
	5	0.243	0.443	0.643	0.621	0.721	0.821	0.343
	6	0.329	0.529	0.729	0.664	0.764	0.864	0.429
	7	0.343	0.543	0.743	0.671	0.771	0.871	0.443
	8	0.357	0.557	0.757	0.679	0.779	0.879	0.457
	9	0.286	0.486	0.686	0.643	0.743	0.843	0.386

Modalità di misura ed estrapolazione segnali LTE-TDD (2)

Tenendo conto del fatto che in sede di valutazione dei livelli di campo e di relativo confronto con i limiti si è interessati a valutare esclusivamente la trasmissione in downlink, le equazioni per l'extrapolazione alla massima potenza e nelle 24 ore riportate nelle Linee Guida CEI 211-7 E, applicabili alla modalità FDD, possono essere sostituite per la modalità TDD dalle seguenti:

$$E = \sqrt{\frac{n_{RS}}{BF}} * \sqrt{\sum_n (E_{RS_{ANTn}})^2} * \sqrt{\alpha_{24DAY}} * \sqrt{\beta_{TDD}} \quad (1)$$

$$E = \sqrt{\frac{n_{RS}}{BF}} * \sqrt{\sum_n (E_{RS_{ANTn}})^2} * \sqrt{\alpha_{24AUT}} * \sqrt{\beta_{TDD}} \quad (2)$$

$$E = \sqrt{\frac{n_{RS}}{BF}} * \sqrt{\sum_n (E_{RS_{ANTn}})^2} * \sqrt{\beta_{TDD}} \quad (3)$$

Nelle equazioni i fattori α rappresentano ancora la fluttuazione di potenza dovuta al carico di traffico variabile, mentre l'alternanza downlink/uplink tipica della configurazione TDD utilizzata viene descritta dal fattore β_{TDD} .

La misurazione operativa anche in questo caso può essere fatta con analizzatore di spettro vettoriale o tramite un analizzatore di spettro in modalità channel power, misurando il canale di controllo.

Sistemi NB-IoT - Introduzione

La tecnologia NB-IoT è standardizzata nell'ambito della Release 13 del 3 GPP per sistemi 4G.

I canali di broadcast e quelli di sincronizzazione sono equivalenti ai corrispondenti canali presenti nei sistemi 4G e l'occupazione di banda è pari a quella di un singolo PRB (ovvero 180 kHz).

Esistono tre modalità di implementazione delle reti NB-IoT:

Modalità Stand Alone: il sistema è del tutto indipendente rispetto alle altre tecnologie radio. In questi casi solitamente il segnale NB-IoT va ad occupare una porzione di banda di solito riservata a una portante GSM;

Modalità Guard Band: il sistema è implementato all'interno della banda di guardia tra due canali LTE adiacenti;

Modalità in band: il sistema è implementato all'interno della banda tipicamente riservata ad un canale LTE, andando ad occupare la porzione di banda riservata ad un PRB.

Il sistema inoltre è facilmente scalabile al crescere del traffico IoT con possibili allocazioni multiple di canali da 180 kHz.

Sistemi NB-IoT (2)

Nella modalità in band non tutti i PRB possono essere destinati ad ospitare il segnale NB-IoT.

La lista dei PRB autorizzati varia a seconda della larghezza di banda del segnale LTE.

Il segnale NB-IoT non può mai essere implementato nei 6 PRB centrali della banda, per evitare interferenze con i canali broadcast dell'LTE. La modalità di duplexing utilizzata dall'NB-IoT è la FDD.

La presenza del segnale NB-IoT nella configurazione in band e guard band non ha impatti sulla potenza totale massima trasmissibile dalla cella LTE ospitante, ma richiede una metodologia di misura del campo elettromagnetico che consideri la presenza dell'NB-IoT.

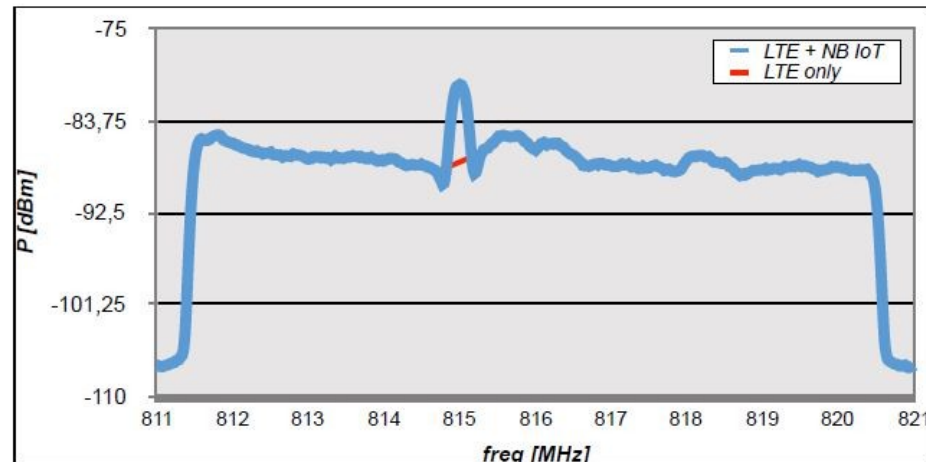
Metodologia di misura dei campi generati da sistemi NB-IoT

La presenza del segnale NB-IoT nella configurazione in band introduce un contributo energetico che va a sommarsi a quello del segnale LTE ospitante.

Nel caso di NB-IoT in band il campo elettrico totale sarà dato dalla somma in quadratura del campo generato dall'LTE e del campo generato dall'NB-IoT.

Attraverso un analizzatore di spettro in modalità channel power è possibile evidenziare il contributo prodotto dal segnale NB-IoT che si distingue nettamente dal “panettone” tipico del :

La metodologia di misura in channel power può essere utilizzata per la verifica del superamento dei limiti solo se mediata su un intervallo temporale rappresenta del limite a cui si correla (6 minuti per il limite di esposizione e 24 ore per il valore di attenzione).



Segnali NB-IoT – estrapolazione alla massima potenza

Poiché i canali di controllo del segnale NB-IoT risultano essere del tutto analoghi a quelli del segnale LTE, il valore del campo elettrico associato al segnale NB-IoT estrapolato alla massima potenza, può essere ottenuto mediante una formula analoga a quella utilizzata nelle linee Guida CEI 211-7 E . Ne consegue che il campo E_{NB-IoT} estrapolato alla massima potenza è dato da:

$$E_{NB-IoT} = \sqrt{\frac{12}{BF_{NB-IoT}}} * \sqrt{\sum_n (E_{RS_NB-IoTn})^2}$$

Dove:

E_{NB-IoT} è il valore massimo del campo elettrico prodotto dal segnale NB-IoT;

$E_{RS_NB-IoTn}$ sono i valori misurati di campo elettrico del segnale RS per ciascuno degli n rami di trasmissione MIMO del segnale NB-IoT;

12 è il numero di sottoportanti associate ad un singolo PRB;

BF_{NB-IoT} è il boosting factor associato al RS del segnale NB-IoT.

Segnali NB-IoT – calcolo del campo elettrico totale (1)

La presenza del segnale NB-IoT nella configurazione in band introduce un contributo energetico aggiuntivo rispetto a quello associato al segnale LTE ospitante. Per questo motivo il campo totale deve essere costituito dalla somma di due termini:

$$E_{LTE+NBloT} = \sqrt{(E_{LTE})^2 + (E_{NBloT})^2}$$

Tenendo conto che il campo E estrapolato alla massima potenza per il segnale LTE è dato da:

$$E = \sqrt{\frac{n_{RS}}{BF}} * \sqrt{\sum_n (E_{RS_ANTn})^2}$$

Dove n_{RS} è il numero totale di sottoportanti del segnale LTE, BF è il boosting factor ed E_{RS_ANTn} sono i valori di campo elettrico del segnale RS per ciascuno degli n rami di trasmissione MIMO implementati dal segnale LTE.

Segnali NB-IoT – calcolo del campo elettrico totale (2)

Considerando che i canali di controllo del segnale NB-IoT risultano del tutto analoghi a quelli del segnale LTE, il valore del campo elettrico totale estrapolato alla massima potenza per il segnale NB-IoT in-band può essere scritto come:

$$\sqrt{\left[\frac{n_{RS} - n_{PRB-NB-IoT} * 12}{BF} \sum_n (E_{RS_ANTn})^2 \right] + \sum_{nNB-IoT} (E_{NB-IoT_n})^2}$$

Dove n_{RS} è il numero di sottoportanti LTE da considerare se il segnale fosse unicamente LTE senza che vengano sottratte risorse al sistema LTE da parte dell' NB-IoT.

Essendo infatti un certo numero di risorse allocate ai segnali NB-IoT, l'LTE non potrà disporre di un numero di sottoportanti pari a n_{RS} ma ad un numero di portanti pari a n_{RS} meno le sottoportanti allocate all'NB-IoT che sono date da $n_{PRB-NB-IoT} * 12$, dove $n_{PRB-NB-IoT}$ rappresenta il numero di PRB associati al segnale NB-IoT e 12 è il numero di portanti associate ad un singolo PRB.

Modello per valutazione densità di potenza

- Per la valutazione della densità di potenza emessa da sistemi di antenne avanzati è stato utilizzato un modello statistico basato su una combinazione di
 - **probabilità spaziale** considerando un modello di densità di potenza per l'analisi di MIMO e smart antennas
 - **probabilità temporale** per l'analisi delle emissioni di potenza secondo l'approccio statistico italiano per le procedure di misura dei campi elettromagnetici
- Lo scopo di questo lavoro consiste nell'investigare come utilizzare l'approccio statistico per una valutazione più appropriata alle nuove tecnologie quali il 5G

Riferimento: C. Carciofi, S.Persia, S. D'Elia, R.Suman - "EMF evaluations for future networks based on Massive MIMO" - Atti del 2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), pp.1197-1202, 2018

Approccio deterministico conservativo IEC62232

La densità di potenza deterministica può essere calcolata partendo da una formula sferica semplice:

$$S_{\text{det}} = \frac{P_{\text{avg}} * G_u * D_{\theta}}{4\pi r^2}$$

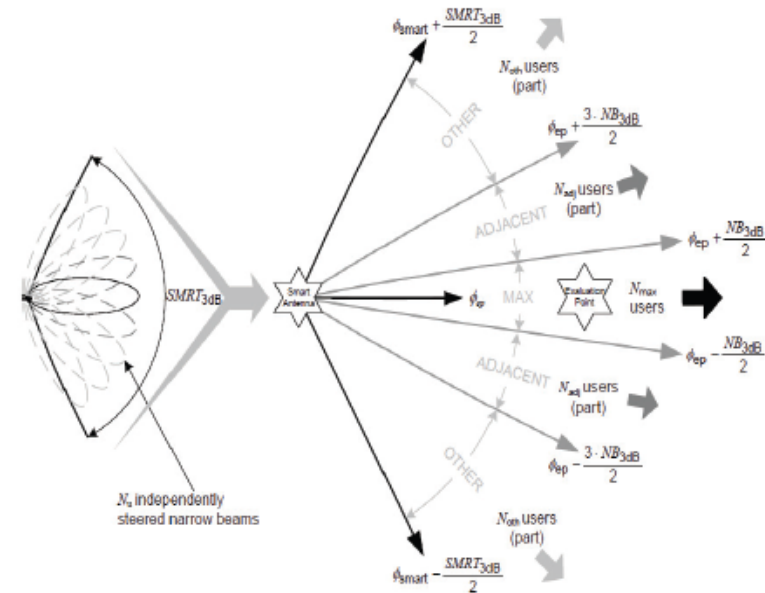
dove, P_{avg} (Watt) è il valore massimo della potenza media (temporale) trasmessa dall'antenna, G_u è il guadagno massimo del fascio diretto ad un singolo utente, D_{θ} è la direttività del fascio stretto diretto al punto di valutazione ed r la distanza dell'utente espressa in metri.

L'approccio deterministico conservativo presuppone che per il 100% del tempo la cella sia a pieno carico.

Approccio statistico conservativo IEC62232

Caso di studio:

- N_{Max} utenti si vengono a trovare nella stessa direzione e la potenza trasmessa è diretta verso il punto di valutazione



Numero statistico di utenti(N)

$$S_{sta} = S_u * (\delta_{max} * N_{max} + \delta_{adj} * N_{adj} + \delta_{oth} * N_{oth})$$

Fattore di fascio stretto(δ)

Densità di potenza deterministica conservativa(S)

Obiettivo:

- Valutare il campo elettromagnetico per una BS con tecnologia MIMO e smart antenna e verificare che rimanga al disotto dei limiti riportati nelle linee guida ICNIRP

Normativa italiana in sintesi(1)

The La normativa italiana è basata su tre livelli di protezione

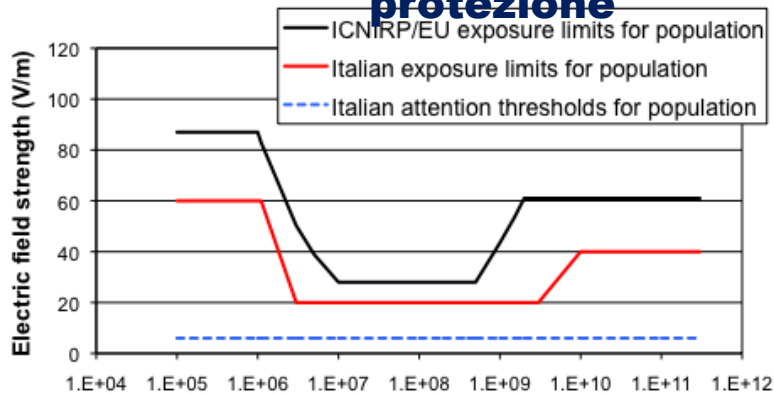


TABLE 3 COMPARISON BETWEEN ICNIRP REFERENCE LEVELS AND ITALIAN LEVELS FOR THE PUBLIC EXPOSURE TO RF FIELDS

FREQUENCY BAND [MHz]	ICNIRP LIMIT [V/m]	ITALIAN LIMIT [V/m]
800	39	6
900	41	
1800	58	
2100	61	
2600	61	

L'attuale normativa italiana per le esposizioni ai campi elettromagnetici definisce tre limiti differenti, tutti più bassi rispetto a quanto indicato nelle linee guida ICNIRP e nella Raccomandazione Europea

Un **limite di esposizione** di 20 V/m (mediato su 6 minuti)

Due soglie

- **Valore di attenzione di 6 V/m** (mediato sulle 24 ore)
- **Obiettivo di qualità di 6 V/m** (mediato sulle 24 ore)

Normativa italiana in sintesi (2)

- Il rispetto del valore di attenzione e degli obiettivi di qualità si ottiene considerando come input per la valutazione:
 - La potenza media trasmessa nelle 24 ore, valutata sulla base della riduzione della potenza massima al connettore d'antenna attraverso un fattore specifico che tiene conto della variabilità temporale delle emissioni degli impianti nelle 24 ore
- Il Comitato elettrotecnico italiano ha stabilito nelle linee guida (CEI 211) un fattore di riduzione della potenza massima, α_{24} , che deriva che:

$$P_{24h} = P_{MAX} * \alpha_{24}$$

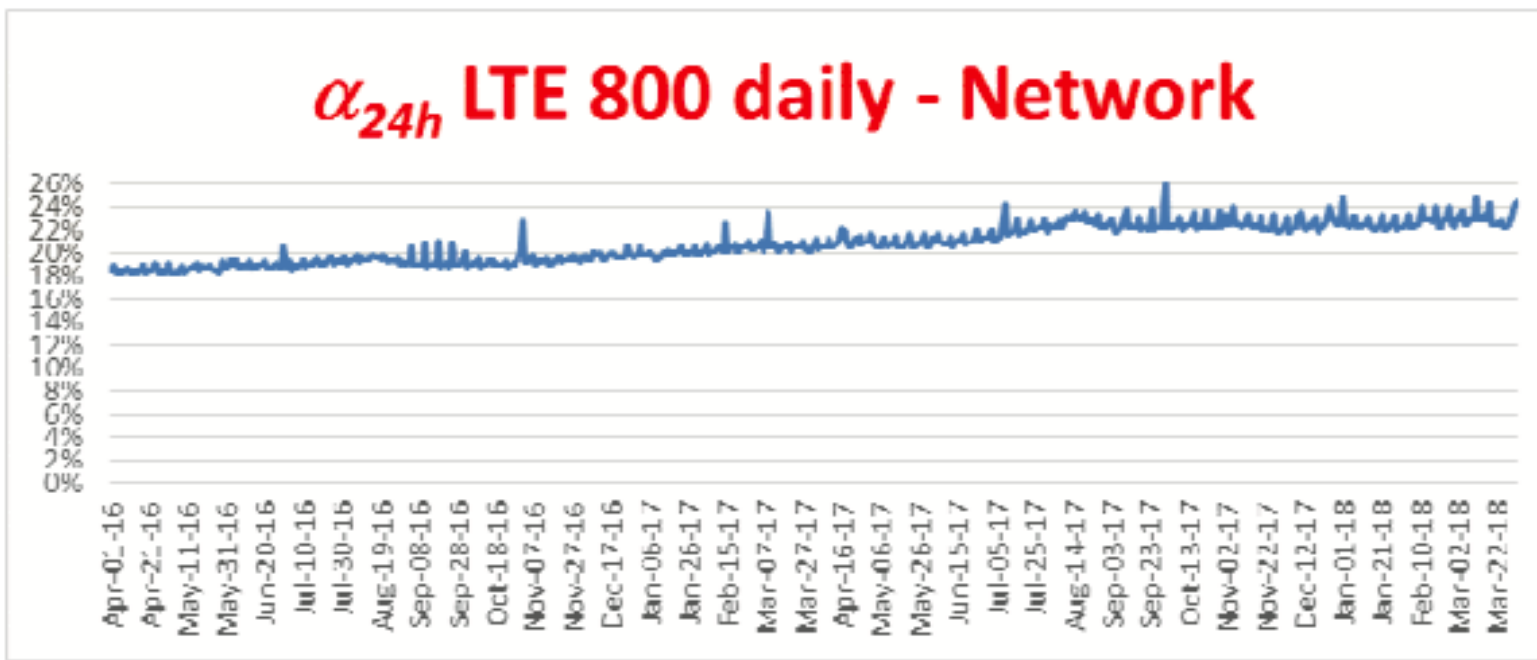
Potenza media trasmessa nelle 24 ore

Potenza massima trasmessa

→ *Gli operatori dovrebbero fornire questo valore per ciascun sito e per tecnologia. Il valore massimo per anno deve essere dichiarato per il processo autorizzativo*

Valutazione della distribuzione temporale per una rete 4G italiana

- il coefficiente α_{24} giornaliero , per il caso riportato di una rete 4G@800 MHz Vodafone, è del **23 %**
- I dati raccolti su tutta la rete Vodafone 4G hanno confermato che le emissioni reali sono molto inferiori alla potenza teorica massima utilizzata per il calcolo della conformità dei livelli di campo



Valutazione statistica di esposizione per sistemi MIMO

- La valutazione statistica è stata fatta considerando:
 - Modello statistico come indicato nelle linee guida IEC per valutare il 95% della densità di potenza @ distanza $r=20$ m dall'antenna MIMO (distribuzione spaziale)
 - Modello statistico indicato nel documento IEC-62232 con l'introduzione di un fattore di riduzione giornaliero (α^{24}) della potenza, secondo quanto indicato nelle linee guida CEI (distribuzione spaziale + distribuzione temporale)

Valutazione esposizione per MIMO e smart antennas: Parametri

Parametri di antenna	
Tipo di antenna	Settoriale
Frequenza	800 MHz
P_{Tx} per settore	25-35 Watt
Guadagno	15-16 dBi
SMRT _{3dB} (*)	120°
N_{3dB} (**)	15°
D_{θ}	1

(*) ampiezza del fascio per settore

(**) ampiezza del fascio per utente

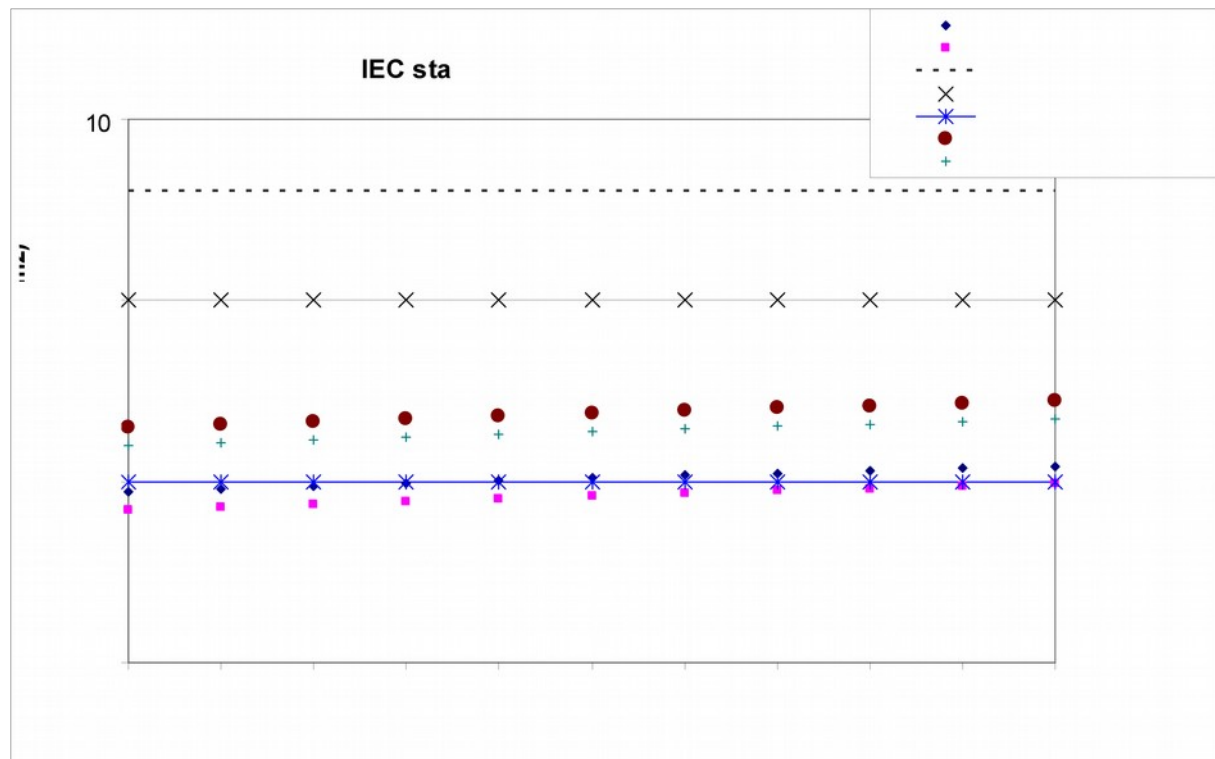
(***) valori di N ottenuti considerando la funzione di probabilità cumulativa $F(k,P,R,N)$ che stabilisce la probabilità che k utenti su N si trovano all'interno del fascio target per il quale si ha il 95% di densità di potenza.

Parametri modello statistico	
δ_{max}	1
δ_{adj}	0.5
δ_{oth}	0.0063
N_u	24
N_{max} (***)	6
N_{adj} (***)	9
N_{oth} (***)	9

Valutazione statistica di esposizione per MIMO e smart antennas: Risultati dell'approccio statistico conservativo IEC

Valutazioni di densità di potenza sul modello statistico IEC (@20 m):

- **Soddisfa ampiamente** i limiti ICNIRP ed i limiti italiani per tutti i valori di potenza trasmessa considerati a 20 m di distanza
- **Non soddisfa** i valori di attenzione e gli obiettivi di qualità italiani per quasi tutte le potenze considerate per antenna con G=16 e per potenza trasmessa > 31 Watt con G=15



Valutazione statistica di esposizione per MIMO e smart antennas: Risultati dell'approccio conservativo IEC con applicazione del modello italiano mediato nel tempo

Il modello statistico IEC ed il modello italiano mediato nel tempo confermano che:

- Le valutazioni in densità di potenza rimangono sempre al di sotto dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità indipendentemente dal guadagno dell'antenna e dalla potenza trasmessa

