

ANALISI PREVISIONALI, MISURE STRUMENTALI E SITI “SATURI”

NELLE GRANDI CITTÀ SI ASSISTE ALLA SATURAZIONE (CON I MODELLI PREVISIONALI) DELLO SPAZIO ELETTRROMAGNETICO PER NUOVI SISTEMI E TECNOLOGIE. IL PROBLEMA DOVRÀ ESSERE AFFRONTATO ANCHE PER LE NUOVE INSTALLAZIONI 5G. UN'ANALISI CONDOTTA A BOLOGNA EVIDENZIA LA DIFFERENZA CON I RILIEVI STRUMENTALI, CHE MOSTRANO AUMENTI CONTENUTI.

La quinta generazione di reti mobili (5G) consentirà di soddisfare nuovi requisiti in termini di connettività e capacità anche grazie all'utilizzo delle bande ad onde millimetriche e di nuovi sistemi d'antenna di tipo MIMO e *beamforming*. Lo sviluppo di infrastrutture di rete per le nuove tecnologie 5G richiede di analizzare la situazione dei siti attualmente in uso dalle altre tecnologie (2G, 3G, 4G), al fine di verificare che l'introduzione di una nuova tecnologia, in aggiunta a quelle preesistenti, avvenga nel rispetto dei limiti vigenti. La valutazione dell'esposizione ai campi elettromagnetici a radiofrequenza (Rf Emf) è stata infatti una sfida fondamentale per l'implementazione della rete radiomobile fin dall'inizio dello sviluppo del mercato delle comunicazioni mobili. Si evidenzia che, in generale, nell'introduzione di nuove tecnologie si tende a riutilizzare i siti esistenti e le relative infrastrutture, al fine di ridurre il Capex (*Capital Expenditure*) e facilitare lo sviluppo della rete.

In questi scenari *co-siting* si rende necessario valutare l'esposizione combinata dei campi elettromagnetici a Rf prodotti da più tecnologie sovrapposte (Gsm, Umts, Lte, 5G).

Si deve comunque tener conto che nella maggior parte delle grandi città lo spazio elettromagnetico a disposizione nelle valutazioni previsionali per l'aggiunta di nuovi sistemi e tecnologie, è ormai prossimo alla saturazione. I limiti normativi italiani (Dpcm 8 luglio 2003 [1]) e le metodologie di valutazione previsionale, basate su ipotesi cautelative, che tengono conto, per esempio, della massima potenza trasmissibile, non agevolano l'installazione di nuovi impianti e possono rendere difficoltosa l'implementazione di nuovi servizi oltre a quelli esistenti. L'effetto saturazione risulta molto evidente nei centri storici delle grandi città, laddove la richiesta di nuovi servizi è maggiore, ma tale effetto comincia a essere significativo anche nelle aree più periferiche.



Inoltre, i sistemi 5G al fine di poter sfruttare la potenzialità in termini di *bit-rate* delle onde millimetriche faranno uso di antenne con tecnologie avanzate come ad esempio il *massive MIMO* (*Multiple Input, Multiple Output*) [2] e *beamforming*. Grazie a questo tipo di antenne “intelligenti”, il massimo guadagno d'antenna può essere indirizzato verso gli utenti, piuttosto che trasmettere costantemente in tutte le direzioni. Ciò significa che, una valutazione dell'esposizione basata su un approccio conservativo “tradizionale”, in cui la massima potenza teorica viene trasmessa in ogni direzione possibile per un lungo periodo di tempo, non è realistica [3]. In questo lavoro sarà analizzata la situazione di alcuni siti collocati in ambiente urbano e suburbano di una città media italiana come Bologna. In particolare, saranno analizzati in forma aggregata i risultati delle stime previsionali e i dati di misure, puntuali e in continuo, effettuate in prossimità di diverse tipologie di siti.

La normativa per lo sviluppo del 5G

Al fine di ottenere velocità di trasmissione dell'ordine dei Gbit/s, i sistemi 5G utilizzeranno reti più dense con un gran numero di micro stazioni

radiobase, localizzate più in prossimità degli utenti e all'interno degli edifici, anche al fine di sopperire alla elevata attenuazione che si avrà, ad esempio, nell'uso di onde millimetriche. Allo stesso tempo continueranno a essere installate *macro-cell* e *small-cell* e quindi la rete futura sarà fortemente eterogenea. Lo spettro previsto per le reti 5G comprende tre intervalli di frequenza, elemento chiave per fornire un'ampia copertura e supportare tutti i servizi previsti per il 5G: frequenze sub-1 GHz, frequenze 1-6 GHz e frequenze oltre 6 GHz [4]. Di conseguenza, le valutazioni di esposizione elettromagnetica per le tecnologie 5G dovrebbero essere in grado di considerare tutte queste bande di frequenza. Ad esempio, la International Electrotechnical Commission (Iec) nella norma IEC 62232 ha proposto un'estensione delle metodologie di valutazione dell'esposizione alle frequenze del 5G [5]. Inoltre il 5G utilizzerà antenne MIMO che hanno più elementi radianti, che possono essere utilizzati per inviare e ricevere più dati contemporaneamente di uno stesso utente oppure di più utenti (*SingleUserMimo* vs *MultiUserMimo*). Il vantaggio per gli utenti è che più persone possono connettersi simultaneamente alla rete e/o mantenere un elevato *throughput*. Le antenne intelligenti avranno la possibilità di trasmettere i dati richiesti solo nella direzione dell'utente e solo

durante il tempo di utilizzo, pertanto la tecnologia 5G sarà quindi più efficiente a fronte di un'esposizione media R_f E_{mf} ridotta. Inoltre, il *beamforming* ha il vantaggio di ridurre l'interferenza della rete e quindi l'emissione elettromagnetica nelle direzioni non intenzionali, indirizzando la potenza trasmessa solo nella direzione desiderata. Come già accennato, le metodologie di valutazione dell'esposizione devono tener conto dell'utilizzo di sistemi *massive MIMO* e quindi le normative specifiche devono essere aggiornate di conseguenza. A livello internazionale la Iec ha pubblicato due norme tecniche: la Iec 62232 [10] e la Iec TR 62669 [11] che includono metodologie per la valutazione dei livelli di esposizione generati dai nuovi sistemi d'antenna 5G *massive MIMO* e *beamforming*. Ad oggi, solo la norma tecnica Iec 62232 ED 2 è stata recepita dal Cei nel marzo 2018. Inoltre, l'introduzione di microcelle, picocelle e femtocelle in un'area urbana ad alta densità di utenti consentirà di ridurre i colli di bottiglia in aree congestionate dal traffico e, poiché possono lavorare in configurazioni "a bassa potenza", potranno essere utilizzate per implementare soluzioni a ridotto impatto dal punto vista delle emissioni elettromagnetiche [7].

Siti saturi: valutazioni previsionali

Nella seguente analisi, con il termine "sito saturo" si intende un sito in cui, mediante simulazioni modellistiche di campo elettromagnetico utilizzando i dati di impianto alla massima potenza, sono stati stimati valori di campo elettrico $|E|$ 5 V/m in punti in cui devono essere rispettati i valori di attenzione e gli obiettivi di qualità (6 V/m). L'analisi prende in considerazione l'evoluzione dell'effetto di saturazione elettromagnetica dei siti nel corso degli anni, in particolare analizzando la situazione al 2010 e al 2018. Lo scenario considerato è quello urbano, in cui tale aspetto risulta più evidente a causa del numero maggiore di stazioni radiobase necessario per far fronte alle elevate esigenze di traffico. Le simulazioni sono state eseguite da Arpa Emilia-Romagna (Area prevenzione ambientale metropolitana - Bologna) utilizzando uno strumento per valutare i livelli di esposizione elettromagnetica in ambienti reali (tool previsionale ArGIS [13]). In particolare, è stato adottato lo scenario più cautelativo, ovvero sono state considerate le condizioni di propagazione di spazio

FIG. 1
SITI SATURI

Percentuale di siti saturi in un tipico scenario urbano (Bologna): confronto tra dati del 2010 e del 2018.

■ Siti saturi
■ Siti non saturi

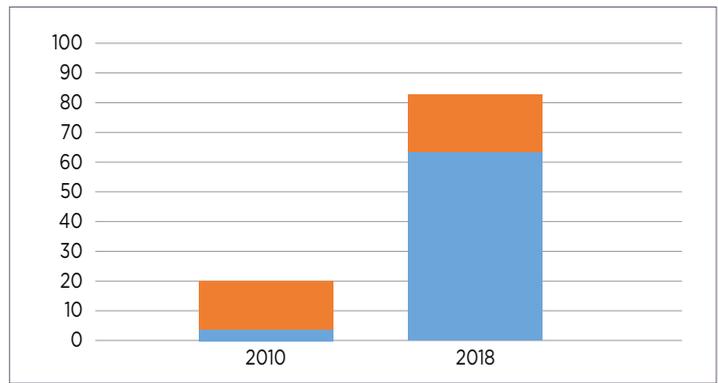
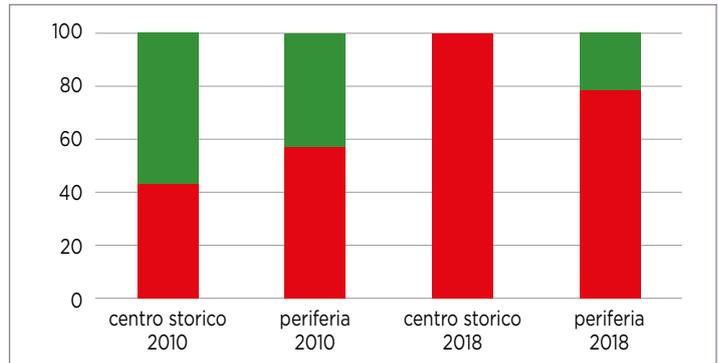


FIG. 2
SITI SATURI

Distribuzione dei siti saturi in diversi scenari urbani (Bologna) nel 2010 e nel 2018.

■ Siti saturi
■ Siti non saturi



libero e la massima potenza al connettore d'antenna dichiarata. La simulazione dei livelli di campo elettromagnetico prodotti dalle stazioni radiobase è stata effettuata nella città di Bologna, che è abbastanza rappresentativa di una situazione urbana media in Italia. In particolare, è stata eseguita un'analisi comparativa valutando la distribuzione della percentuale di "siti saturi" al 2010 e al 2018 partendo dai dati forniti da Arpa Emilia-Romagna. In figura 1 si può osservare che la percentuale di "siti saturi" è più che quadruplicata nel periodo 2010-2018, passando infatti dal 19% del 2010 all'83% del 2018. Nello specifico, nel 2010 tale percentuale nel centro città e in periferia (aree suburbane) era del 15% e del 4% rispettivamente, mentre il dato del 2018 indica il 20% dei siti saturi in centro città e il 63% in zone più periferiche. Va però sottolineato che, al 2018, la totalità (100%) dei siti del centro storico (rappresentativo di un'area urbana densa) risultano saturi, come si può osservare dall'analisi di figura 2. Questa diversa distribuzione è dovuta alla maggiore densità di siti e di edifici in centro storico, oltre alla necessità di soddisfare l'alta richiesta di traffico sia in termini di numero di utenti che di capacità trasmissiva. Sempre in riferimento all'anno 2018, anche nelle aree periferiche la percentuale di siti saturi è comunque elevata, pari al 79%, rendendo problematica anche in tali aree l'implementazione di nuove tecnologie. Queste considerazioni possono essere generalizzate a tutti gli

scenari urbani in Italia, dove la situazione di utenti, traffico e capacità è simile. Un'ulteriore analisi delle criticità nelle aree urbane è stata fatta valutando la percentuale di siti saturi nei quali il valore del campo elettromagnetico simulato è pari a 6 V/m, che è risultata pari al 20% del totale, con una differenziazione tra centro storico e periferia pari al 36% e al 15% rispettivamente. Un altro aspetto che è stato analizzato è l'applicazione del fattore "Alpha24" [8] che consente di valutare una riconfigurazione nei siti esistenti tenendo conto dell'effettiva potenza media trasmessa nelle 24 ore. La riconfigurazione di un sito Rbs (*Radio Base Station*) consiste generalmente nella variazione della tecnologia esistente e/o nell'inserimento di un nuovo sistema di trasmissione (4G/5G) che spesso comporta la modifica della potenza autorizzata. Nell'area urbana e suburbana di Bologna, dal 2015 all'inizio del 2017 circa il 62% degli impianti esistenti è stato riconfigurato. In particolare, nel 40% di tali riconfigurazioni è stato applicato il fattore di riduzione "Alpha24", poiché le riconfigurazioni rappresentano un metodo utile per gestire in modo efficiente lo spazio elettromagnetico già disponibile. La notevole presenza di siti saturi riduce tuttavia i vantaggi di tale flessibilità e aumenta la complessità per l'introduzione di nuove tecnologie come il 5G. Infatti, nel 2018 su 91 impianti valutati solo in 6 casi è stata richiesta l'applicazione del fattore "Alpha24".

Si è inoltre esaminato l'impatto sulle richieste complessive di autorizzazione/ riconfigurazione dell'utilizzo del fattore di assorbimento del campo elettromagnetico da parte delle strutture degli edifici [9] per l'anno 2018. La percentuale di impianti per i quali è stata richiesta l'applicazione del fattore di assorbimento per pareti senza finestre (6 dB) è risultata pari al 35% del totale e per ogni impianto, mediamente, è stata richiesta l'applicazione del fattore di assorbimento per due edifici.

Livelli di esposizione: misure strumentali

Per completare l'analisi sui livelli di esposizione sono state analizzate le misure in banda larga effettuate negli anni 2010 e 2018 da Arpa Emilia-Romagna sia in modalità puntuale che continua nel centro e nella periferia di Bologna. Il monitoraggio in continuo tramite le centraline è stato effettuato in un numero limitato di punti, prevalentemente su terrazzi o lastrici solari ai piani alti di edifici, mentre le misure puntuali sono più numerose e includono la caratterizzazione della esposizione in ambienti *indoor* e *outdoor*, sia a piani alti che a piani più bassi di edifici.

Sono stati presi in considerazione un centinaio di dati di misura per ognuno dei due anni considerati: per l'anno 2010 il 27% dei punti di misura è ubicato nella periferia, mentre per l'anno 2018 la distribuzione dei punti tra centro e periferia è confrontabile (48% centro e 52% periferia).

I risultati delle misure sono stati elaborati in forma aggregata per entrambi gli anni considerati attraverso la valutazione statistica delle percentuali dei dati di misura che rientrano in diversi intervalli di valori di campo elettrico E (V/m). Tali valutazioni sono state inoltre differenziate per anno e per tipologia di scenario ambientale (es. centro città e periferia, *indoor/outdoor*, piani alti e piani bassi).

Analisi dati 2018

La prima analisi si è focalizzata sui risultati di misura relativi al 2018, per valutare la situazione attuale dei livelli di esposizione reale negli scenari tipici di centro e periferia della città di Bologna. La percentuale maggiore dei risultati di misura (71%) è compresa nell'intervallo tra 0 e 1 V/m, mentre le percentuali decrescono da poco più del 10% per l'intervallo da 1 a 2 V/m al 1% per l'intervallo tra 4 e 5 V/m. Si sottolinea

FIG. 3
LIVELLI DI CAMPO CENTRO/PERIFERIA

Livelli di campo misurato (Bologna, 2018), confronto tra centro e periferia.

■ Centro
■ Periferia

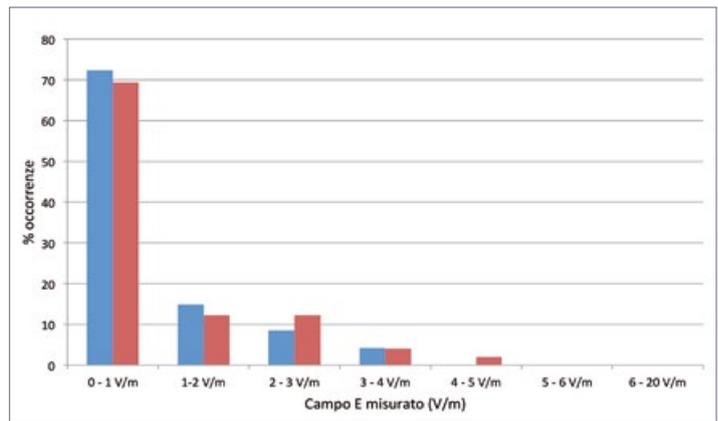


FIG. 4
LIVELLI DI CAMPO 2010/2018

Livelli di campo misurato (Bologna), confronto tra il 2010 e il 2018.

■ 2010
■ 2018

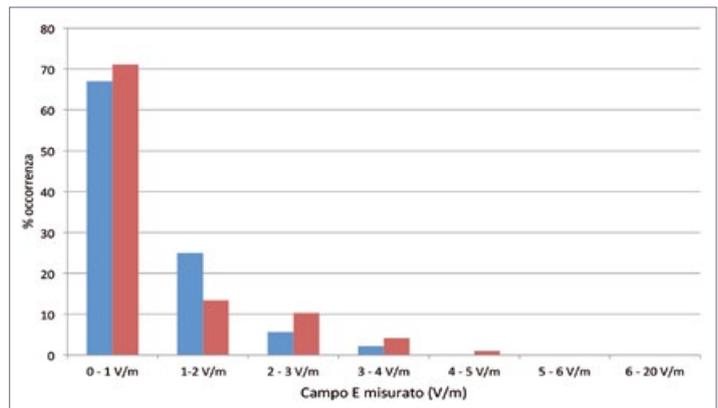
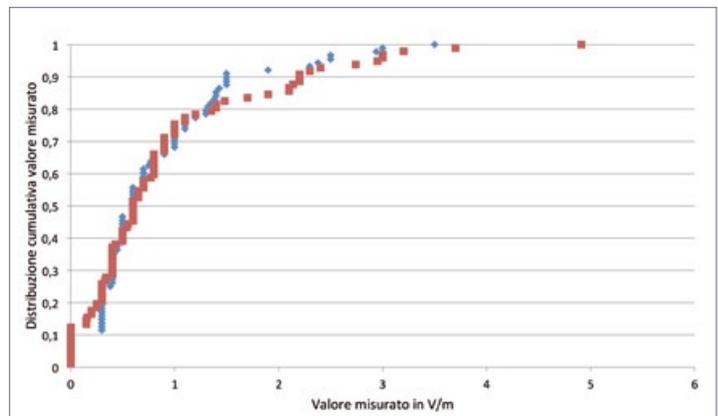


FIG. 5
CUMULATIVE CAMPO ELETTRICO 2010/2018

Confronto distribuzioni cumulative misure campo elettrico tra il 2010 e il 2018.

◆ 2010
■ 2018



che in nessun caso sono stati misurati valori di campo elettrico uguali o superiori a 6 V/m.

Il grafico di *figura 3* mette a confronto i livelli di campo misurati in centro con quelli relativi alle zone periferiche. Da tale analisi si evidenzia che in generale le percentuali di valori contenuti nei diversi intervalli di campo elettrico considerati sono simili nei due scenari. La percentuale risulta maggiore nel centro città rispetto alla periferia nei primi due intervalli che corrispondono a valori misurati inferiori a 2 V/m.

Dall'analisi dei dati di misura del 2018 non appaiono evidenti situazioni con livelli di esposizione reale confrontabili con i valori stimati per i siti saturi. Come ci si poteva aspettare, i valori delle analisi comparative misurati ai piani bassi

o in ambienti interni risultano compresi negli intervalli caratterizzati da livelli di campo elettrico inferiori, rispetto ai piani alti e agli ambiente esterni.

Confronto dati anni 2010 – 2018

I risultati delle misure negli anni 2010 e 2018 sono stati confrontati in tre diverse tipologie di analisi:

- 1) l'analisi comparata delle occorrenze dei livelli di campo misurati nei diversi intervalli di campo elettrico considerati precedentemente
 - 2) lo studio delle distribuzioni cumulative dei livelli di campo nei due anni
 - 3) l'analisi comparata delle occorrenze dei livelli di campo distinti per centro e periferie.
- In *figura 4* vengono confrontate le percentuali delle misure nelle diverse

fascie di valori di campo elettrico per il 2010 e per il 2018. Dalla analisi viene confermato che in entrambi gli anni, la maggior parte dei valori di campo elettrico E (V/m) sono compresi nell'intervallo tra 0 e 1 V/m.

Quello che emerge per il 2018 è un lieve aumento rispetto al 2010 delle percentuali negli intervalli di valori di campo superiori ai 2 V/m e una diminuzione nell'intervallo 1-2 V/m. Si evidenzia che a tali differenze potrebbero aver contribuito anche le diverse posizioni dei punti di misura.

Un'ulteriore analisi può essere effettuata sulla base della distribuzione cumulativa dei dati presentata in *figura 5*. Nel grafico vengono riportate per un confronto le distribuzioni cumulative dei dati di misura calcolate per il 2018 e per il 2010. Dalla analisi delle due curve emerge una coincidenza del 50-esimo percentile che per entrambe le curve è posizionato nella parte medio-alta della fascia 0-1 V/m. Il campo elettrico medio calcolato su tutti i punti di misura è di 0,8 V/m per il 2010 e di 0,9 V/m per il 2018. Il 90-esimo percentile è pari a 1,5 V/m per il 2010 e a 2,2 V/m per il 2018, il 95-esimo percentile è pari a 2,1 V/m per il 2010 e a 3,0 V/m per il 2018.

Per quanto riguarda i valori di campo misurati in centro città, dal confronto tra i dati rilevati nel 2010 e nel 2018 emerge un piccolo aumento percentuale nel 2018 dei valori che rientrano nelle fasce 0-1 V/m, 2-3 V/m e 3-4 V/m e una diminuzione nella fascia 1-2 V/m. La stessa analisi per la periferia evidenzia un aumento nel 2018 rispetto al 2010 della percentuale di occorrenze nelle fasce superiori a 2 V/m e una diminuzione per valori inferiori.

Conclusioni

Ciò che emerge dall'analisi dei dati delle stime e delle misure è una evidente differenza tra la valutazione con modelli previsionali e quella derivante da rilievi strumentali. Si nota che nella città di Bologna il numero di "siti saturi", valutati attraverso stime previsionali, è cresciuto considerevolmente dall'anno 2010 al 2018, con un incremento significativo nelle aree periferiche, mentre le misure evidenziano un aumento contenuto del valore medio di campo elettrico nello stesso arco temporale.

I risultati ottenuti forniscono alcune considerazioni:

- le procedure autorizzatorie nazionali, di nuovi impianti o riconfigurazione di quelli

esistenti, richiedono un'analisi modellistica preventiva adottando criteri cautelativi (ad es. massima potenza di alimentazione, propagazione in spazio libero) che non descrivono sempre lo scenario reale massimizzando i livelli di esposizione

- la valutazione previsionale viene eseguita su tutto il volume dell'edificio e nella maggior parte dei casi il valore massimo di campo elettrico stimato ricade al colmo del tetto, in punti o luoghi inaccessibili.

Viceversa, la maggior parte delle misure strumentali viene eseguita nei piani abitabili a quote inferiori al colmo e comunque quasi mai in corrispondenza del punto di massimo stimato

- l'applicazione del fattore "Alpha24" consente di valutare una riconfigurazione nei siti esistenti tenendo conto dell'effettiva potenza media trasmessa nelle 24 ore

- l'utilizzo del fattore di attenuazione, dove previsto, quasi sempre applicato sulla copertura dell'edificio consente in generale la riconfigurazione degli impianti anche in presenza di "sito saturo".

Va detto che se da un lato le valutazioni preventive cautelative determinano una sovrastima del valore stimato rispetto a quello misurato, è anche vero che ciò ha consentito, fin ora, il rispetto dei limiti di riferimento normativi in uno scenario di continuo sviluppo tecnologico delle reti di telecomunicazioni.

Claudia Carciofi¹, Giuseppe Anania², Marina Barbiroli³, Daniele Bontempelli², Valeria Petrini¹, Simona Valbonesi¹, Cristina Volta², Simone Colantonio²

1. Fondazione Ugo Bordoni
2. Arpa Emilia-Romagna, Area prevenzione ambientale metropolitana Bologna
3. Università degli Studi di Bologna, Dipartimento di Ingegneria dell'energia elettrica e dell'informazione

Il lavoro è stato presentato al VII Convegno nazionale Agenti fisici di Stresa (5-7 giugno 2019) ed è in pubblicazione nel numero di settembre del Bollettino Airp

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Decreto del presidente del Consiglio dei ministri 8 luglio 2003, "Fissazione dei limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici generati a frequenze comprese tra 100 kHz e 300 GHz" (GU n. 199 del 28-8-2003).
- [2] T.L. Marzetta, "Massive MIMO: An introduction", *Bell Labs Tech. J.*, vol. 20, pp. 11-22, Mar. 2015.
- [3] B. 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, pp. 19711-19719, October 2017.
- [4] Radio Spectrum Policy Group, *Strategic Roadmap Towards 5G for Europe*, "Opinion on spectrum related aspects for next generation wireless systems (5G)", RSPG16-032 Final, Brussels, 09 November 2016.
- [5] IEC 62232:2017, 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*, August 2017.
- [6] ITU-T K-Series Recommendations, "5G technology and human exposure to RF EMF", November 2017.
- [7] GSMA Booklet *Improving wireless connectivity through small cell deployment*, December 2016.
- [8] Decreto 2 dicembre 2014, "Linee guida, relative alla definizione delle modalità con cui gli operatori forniscono all'ISPRA e alle ARPA/APPA i dati di potenza degli impianti e alla definizione dei fattori di riduzione della potenza da applicare nelle stime previsionali per tener conto della variabilità temporale dell'emissione degli impianti nell'arco delle 24 ore", GU Serie Generale n.296 del 22-12-2014).
- [9] Decreto 5 ottobre 2016 "Approvazione delle Linee Guida sui valori di assorbimento del campo elettromagnetico da parte delle strutture degli edifici", (GU Serie Generale n.252 del 27-10-2016).
- [10] 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*.
- [11] 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*.
- [12] Linee Guida CEI 211-7, "Guida per la misura e per la valutazione dei campi elettromagnetici nell'intervallo di frequenza 10 kHz - 300 GHz, con riferimento all'esposizione umana", 2011.
- [13] ArGIS, Software per la valutazione dell'impatto elettromagnetico - Versione 1.3, conforme alle prescrizioni della Guida CEI 211-10 V1 2004-01, www.wirelessfuture.it