

Smartphone 5G: Valutazioni sull'inquinamento elettromagnetico

5G Smartphone: Electromagnetic Pollution Assessments

Chiara Lodovisi^{◆□}, Luca Chiaraviglio^{◆□}, Giulia Focarelli[●], Giuseppe Bianchi^{◆□}

◆ Consorzio Nazionale per le Telecomunicazioni

□ Dipartimento di Ingegneria Elettronica, Università degli studi di Roma Tor Vergata

● Università degli studi di Roma Tor Vergata

Sommario

Il crescente aumento nell'uso degli smartphone e l'implementazione della tecnologia 5G sulle reti radiomobili ha aumentato l'interesse nell'investigare l'esposizione umana ai campi elettromagnetici dovuta a questa nuova tecnologia. Nel presente lavoro viene richiamata la normativa italiana di sicurezza che stabilisce i limiti di esposizione fissati per i valori di campo elettromagnetico e viene brevemente descritto come la tecnologia 5G può impattare nell'esposizione sul corpo umano. E' stata condotta una campagna di misura, distinta tra misure attive e passive, per una valutazione preliminare del contributo dello smartphone sull'inquinamento elettromagnetico, vengono quindi descritte le misure eseguite e i risultati ottenuti.

Abstract

The increasing use of smartphones and the implementation of 5G technology on mobile networks has increased the interest in investigating human exposure to electromagnetic fields due to this new technology. In this work we recall the Italian safety regulations that establish the exposure limits set for electromagnetic field values and we briefly describe how 5G technology can impact exposure on the human body. A measurement campaign, distinguished between active and passive measurements, has been carried out for a preliminary assessment of the contribution of the smartphone on electromagnetic pollution, and the measurements performed and the results obtained are described.

Keyword

5G Smartphone, Electromagnetic fields exposure

1 - Introduzione

L'utilizzo degli smartphone è in continuo aumento in tutto il mondo, sia con finalità lavorative sia con finalità di svago, divertimento, come mezzo di comunicazione, per fare acquisti o guardare film e video. È diventato un mezzo di supporto sempre più presente e al centro della vita delle persone, soprattutto degli adolescenti. Secondo una statistica di GSMA (Global System for Mobile Communications) il 50 % della popolazione mondiale utilizza lo smartphone [1]. I dati ISTAT del 2018 riportano che l'85% degli adolescenti tra gli 11 e i 17 anni utilizza quotidianamente il cellulare, il 72% naviga su internet tutti i giorni. Il 60 % dei ragazzi utilizza lo smartphone anche a scuola e il 50% dichiara di trascorrere dalle tre alle sei ore extrascolastiche con lo smartphone in mano [2]. Secondo il report "L'età dello smartphone" del Dipartimento di Sociologia e Ricerca Sociale dell'Università degli Studi di Milano Bicocca [3], la maggioranza degli studenti intervistati dichiara di aver ricevuto uno smartphone tra gli 11 e i 12 anni. Secondo il CENSIS l'utilizzo degli smartphone è salito di + 7,6% rispetto al 2019 [4].

Il notevole incremento di smartphone e dispositivi che sfruttano la connessione radiomobile, ha portato alla conseguente crescita del numero di stazioni radio base, per garantire da un lato buona copertura dei livelli di segnale sul territorio e dall'altro essere in grado di gestire le richieste di accesso al servizio da parte degli utenti. Nonostante i campi elettromagnetici prodotti dalle stazioni radio base (SRB) rientrino nei limiti fissati dalle normative di sicurezza nazionali ed internazionali, vi è una forte avversione da parte di molti cittadini verso le installazioni di nuove SRB. Una preoccupazione diffusa è che l'esposizione del corpo umano ai segnali a radiofrequenza, e in particolari quelli relativi alla nuova tecnologia 5G, emessi dalle stazioni radio base, possa produrre effetti dannosi sulla salute. Quello che suscita meno interesse, o è meno considerato in generale, è il livello di campo elettromagnetico prodotto dal nostro smartphone, che invece ormai è parte integrante della nostra vita quotidiana. Eppure, gran parte dei livelli di esposizione a cui siamo sottoposti è dovuta ai dispositivi personali, inclusi i cellulari, piuttosto che alle stazioni radio base. L'obiettivo di questo lavoro è di dare un'indicazione preliminare, basata su misure sperimentali, dei livelli di inquinamento

elettromagnetico prodotto dai dispositivi radiomobili, fare un confronto con le emissioni dovute alle SRB e verificare se, in luoghi molto affollati il contributo preponderante di campo elettromagnetico misurato è dovuto allo smartphone.

2 – Normativa di sicurezza italiana

I principali riferimenti della normativa italiana in tema di esposizione umana ai campi elettromagnetici riportati sinteticamente sono:

- Legge 22 febbraio 2001, n.36 “Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici.”
- 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.”
- 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 ai campi elettrici e magnetici alla frequenza di rete (50 Hz) generati dagli elettrodotti.”
- Decreto Legislativo 9 aprile 2008, n.81 “Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n.123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro.”

Con il decreto dell'8 Luglio 2003, pubblicato nella G.U. n.199 del 28/8/2003 vengono stabiliti nell'art. 3 i limiti di esposizione ed i valori di attenzione: nel caso di esposizione a impianti che generano campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici con frequenza compresa tra 100 KHz e 300 GHz, non devono essere superati i limiti di esposizione, intesi come valori efficaci, riportati nella tabella 1. Nella valutazione dei limiti di esposizione durante una misura di campo elettromagnetico, tali valori limite vanno intesi mediati su un'area di 2m² e un tempo di 6 minuti. Questo limita l'incidenza di punti singolari e di brevi picchi di intensità.

Tabella 1 - Limiti di Esposizione (estratto da DPCM del 08/07/2003 allegato B) [5]

	Intensità di campo elettrico E [V/m]	Intensità di campo magnetico H [A/m]	Densità di potenza D [W/m ²]
Limiti di esposizione			
0.1 < f < 3 MHz	60	0.2	-
3 < f < 3000 MHz	20	0.05	1
3 < f < 300 GHz	40	0.1	4

A titolo di misura di cautela per la protezione di possibili effetti a lungo termine eventualmente connessi con le esposizioni ai campi generati alle suddette frequenze all'interno di edifici adibiti a permanenze non inferiori a quattro ore giornaliere, e loro pertinenze esterne, che siano fruibili come ambienti abitativi quali balconi, terrazzi e cortili esclusi i lastrici solari, si assumono i valori di attenzione indicati in Tabella 2.

I valori sono da intendersi come media dei valori nell'arco delle 24 ore (rif. Art. 14 comma 2-b D.L.179/2012 convertito con modificazioni nella L.221/12).

Tabella 2 - Valori di attenzione e obiettivi di qualità (estratto da DPCM del 08/07/2003 allegato B) [5]

	Intensità di campo elettrico E [V/m]	Intensità di campo magnetico H [A/m]	Densità di potenza D [W/m ²]
Valori di Attenzione			
0.1 MHz < f < 300 GHz	6	0.016	0.10 (3MHz-300GHz)

Le bande di frequenza impiegate nella telefonia mobile interessano la seconda fascia della tabella 1. In particolare, le tecnologie 2G/3G/4G sfruttano le frequenze tra 800 e 2600 MHz. La tecnologia 5G sfrutta tre bande, banda bassa (694 – 790 MHz), la banda denominata mid-band (3,6 – 3,8 GHz) e la banda elevata, mm-Wave (26,5 – 27,5 GHz).

In Figura 1 sono riportate le tecnologie corrispondenti alle rispettive bande di frequenza, assegnate ad ogni operatore di telefonia mobile italiana.

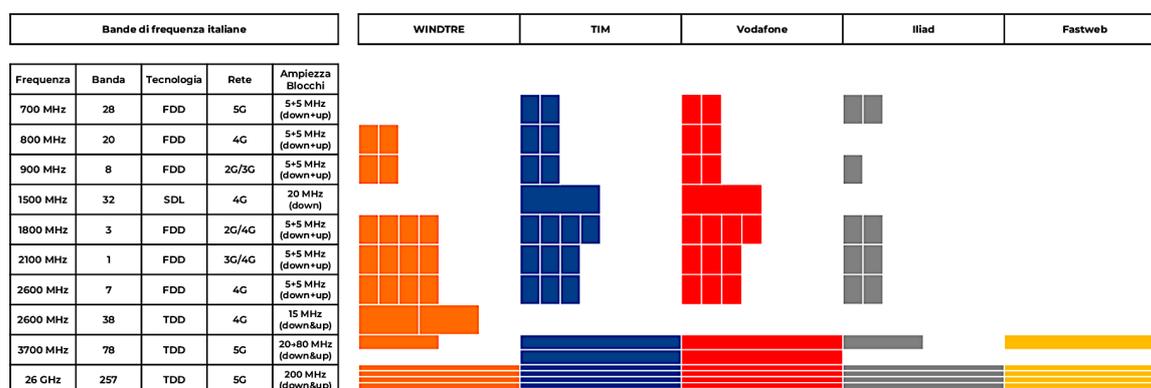


Figura 1 - Bande di frequenza assegnate agli operatori di telefonia radiomobile [6]

3 – Irradiazione 5G ed esposizione ai campi elettromagnetici

La tecnologia 5G rappresenta un'evoluzione in termini di prestazioni, rispetto alle generazioni precedenti, con particolare riferimento ai sistemi di trasmissione, ai sistemi di antenne, alle infrastrutture di rete e di calcolo e ai metodi di elaborazione e codifica dell'informazione. Si pone inoltre come obiettivo il miglioramento della rete, in termini di: velocità di trasmissione (fino ad 1 Gbps), densità degli utenti serviti per area geografica (fino ad un milione di dispositivi connessi per Km²) e ritardo della comunicazione (fino a ritardi di solo 1 ms). L'aumento della velocità di trasferimento dei dati si ottiene utilizzando frequenze radio più elevate rispetto a quelle delle reti cellulari attuali, rendendo necessaria l'installazione di un numero maggiore di antenne. Incrementando la frequenza di trasmissione, infatti, si ottengono vantaggi in termini di banda a discapito di un raggio di copertura inferiore. Le caratteristiche di radiopropagazione sono funzione della frequenza, tanto maggiore è la frequenza utilizzata tanto più il segnale si propaga in linea retta, tanto più è soggetto a riflessioni da parte di oggetti fisici di dimensioni maggiori o confrontabili con la rispettiva lunghezza d'onda e tanto minore è la distanza di copertura. Le antenne attualmente utilizzate dalle generazioni precedenti al 5G trasmettono con una radiazione settoriale, dovuta al fatto che sono antenne direttive con fascio di apertura orizzontale di circa 65° e all'interno di ogni settore presentano un diagramma di radiazione costante nello spazio. Il 5G utilizza invece

antenne adattative, che indirizzano il segnale verso lo User Equipment (UE) e lo riducono nelle altre direzioni. Le antenne adattative trasmettono le informazioni in modo mirato in direzione dell'utente per assicurargli la migliore velocità e allo stesso tempo ridurre le emissioni nelle altre direzioni. La loro emissione è quindi "adattativa", in base al numero di utenze da servire, alla loro posizione e al tipo di servizio. Per queste ragioni, spesso ci si riferisce alla tipica antenna 5G col nome di "smart antenna" (antenna intelligente).

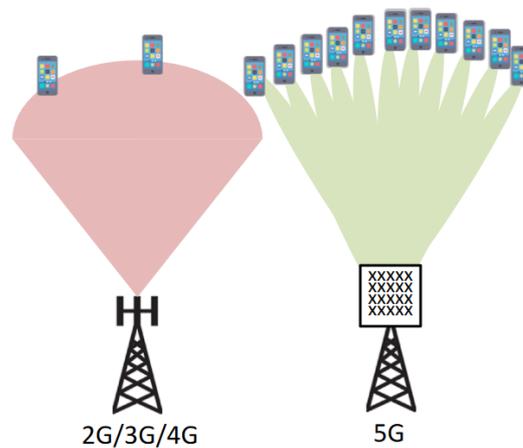


Figura 2 -Irradiazione antenne pre 5G e 5G [7]

Un'antenna adattativa è costituita da una serie di antenne elementari. Maggiore è il numero di elementi dell'antenna, maggiore è la direttività possibile e più stretto sarà il fascio. Quando vengono utilizzati molti elementi radianti, in numero considerevolmente maggiore rispetto a tecnologie precedenti al 5G, il sistema è chiamato Massive MIMO (massive multiple-input multiple-output). Con 96 elementi dell'antenna, che corrispondono a 192 dipoli, si ottiene il sistema di trasmissione x sistema di ricezione identificato come 64T/64R. Considerato che le antenne adattative tendono a concentrare il segnale nella direzione dello UE e a ridurlo nelle altre direzioni, la distribuzione dell'intensità del campo elettrico nello spazio differisce da quella delle antenne convenzionali. Parte della preoccupazione della popolazione nei riguardi del 5G è dovuta proprio alla tecnica di beamforming. Un'opinione diffusa, infatti, è che i fasci

stretti aumentino significativamente i livelli di campo elettromagnetico irradiato rispetto alle SRB che utilizzano antenne convenzionali.

È importante sottolineare, però, che la tecnica di beamforming garantisce che l'utente sia esposto all'irradiazione prodotta da un impianto 5G principalmente quando il suo dispositivo si connette alla rete. Solo contributi molto piccoli derivano dai fasci in altre direzioni. La potenza totale di trasmissione di un'antenna è distribuita tra i fasci, nel caso in cui ci siano più fasci simultanei. Di conseguenza maggiore è il numero di utenti, minore è l'irradiazione proveniente dalla SRB cui sono sottoposti. La presenza di un fascio puntato verso la direzione dell'utente attivo potrebbe generare esposizioni di picco potenzialmente più elevate rispetto al passato. Proprio per questo, i principali produttori di antenne 5G, forniscono anche dispositivi per il monitoraggio dell'effettiva potenza trasmessa. Tali sistemi, chiamati Power Lock, agiscono come limitatori di potenza trasmessa in una determinata direzione, garantendo che il limite massimo di esposizione istantanea non sia mai superato.

Nei sistemi 5G (come anche tecnologie pre 5G) viene implementato il controllo di potenza, che può essere diviso in controllo di potenza uplink e controllo di potenza downlink. Il quadro di base del controllo di potenza in uplink si basa principalmente su uno schema tecnico che combina il controllo di potenza veloce ad anello chiuso con il controllo di potenza ad anello aperto con compensazione parziale della perdita di strada (cioè FPC, Fractional Power Control) per determinare la potenza di trasmissione sui canali fisici. Il controllo della potenza in downlink si divide in controllo statico della potenza e controllo dinamico della potenza. Per controllo statico della potenza viene eseguita una misura in base alla capacità di copertura di ogni canale o segnale, i parametri statici di bias di potenza sono configurati sulla base della potenza di riferimento della cella ReferencePwr, in modo da regolare la potenza di trasmissione di quel canale o segnale. Nel controllo dinamico della potenza, invece, in base alla situazione reale di trasmissione di ogni canale o segnale e alle informazioni di feedback ricevute dal terminale, la potenza di trasmissione del canale o del segnale viene regolata in modo dinamico e adattivo.

Diversi studi dimostrano che l'ipotesi di un incremento di campo elettromagnetico associato all'uso di antenne direttive non è supportata da evidenze scientifiche.

Uno studio recente, condotto nel 2020, sulle SRB di una rete 5G commerciale in Australia [9], ha raccolto 24 ore di dati da 25 SRB con antenne Massive MIMO. Partendo da questi dati per ogni SRB è stata calcolata la potenza isotropica irradiata equivalente (EIRP) e confrontata con l'EIRP massima teorica dell'antenna. Dai dati si ottiene un EIRP che è inferiore alla metà di quello ottenuto teoricamente. Inoltre, è stata analizzata l'influenza sull'esposizione del numero di utenti attivi simultaneamente, con oltre 100.000 dispositivi mobili abilitati al 5G collegati alla rete. I risultati mostrano una riduzione del valore di EIRP, e quindi anche di campo irradiato, con l'aumentare del numero di utenti.

Lo studio condotto in [10] ha come obiettivo quello di analizzare scientificamente un'eventuale correlazione tra l'utilizzo di antenne 5G direttive e l'aumento di esposizione al campo elettromagnetico, un'opinione diffusa ipotizza che l'adozione di fasci molto stretti per servire gli utenti (il cosiddetto pencil beamforming) aumenti radicalmente i livelli di EMF irradiati dai gNB 5G rispetto alle stazioni wireless che non implementano il beamforming, rappresentando così una seria minaccia per la popolazione, e in particolare per quegli individui che sono irradiati dai fasci di traffico. I risultati dello studio evidenziano come il supposto aumento del CEM associato al pencil beamforming non è supportato da prove scientifiche; al contrario, quando il tuning dei fasci di traffico integra le informazioni di localizzazione, si osserva una forte riduzione dell'esposizione non solo sui punti di distribuzione ma anche sull'intero territorio. Inoltre, migliore è il livello di incertezza di localizzazione, più stretti sono i fasci sintetizzati, e di conseguenza minore è l'esposizione ai campi elettromagnetici.

4 – Strumentazione utilizzata per la campagna di misure

Per la valutazione del campo elettromagnetico generato dai dispositivi utente, è stato utilizzato il misuratore di campi elettromagnetici Wavecontrol SMP-2 [11], dotato di una sonda a banda larga WPF8. La risposta in ampiezza della sonda è dunque proporzionale a tutti i contributi dei campi E.M. presenti alle diverse frequenze nella banda di funzionamento.

L'antenna isotropica inoltre è in grado di ricevere l'irradiazione del campo E.M. da tutte le direzioni, indipendentemente dalla posizione delle sorgenti. Questo la rende ideale per condurre misurazioni in luoghi pubblici e affollati.

Gli smartphone impiegati durante la campagna di misura sono stati un OnePlus 8T 5G e un Samsung Galaxy S20plus 5G, questi dispositivi sono dotati di antenne isotrope, rispetto alle stazioni radio base che implementano antenne direttive.

In figura 3 è possibile vedere schematizzato il setup di misura implementato.

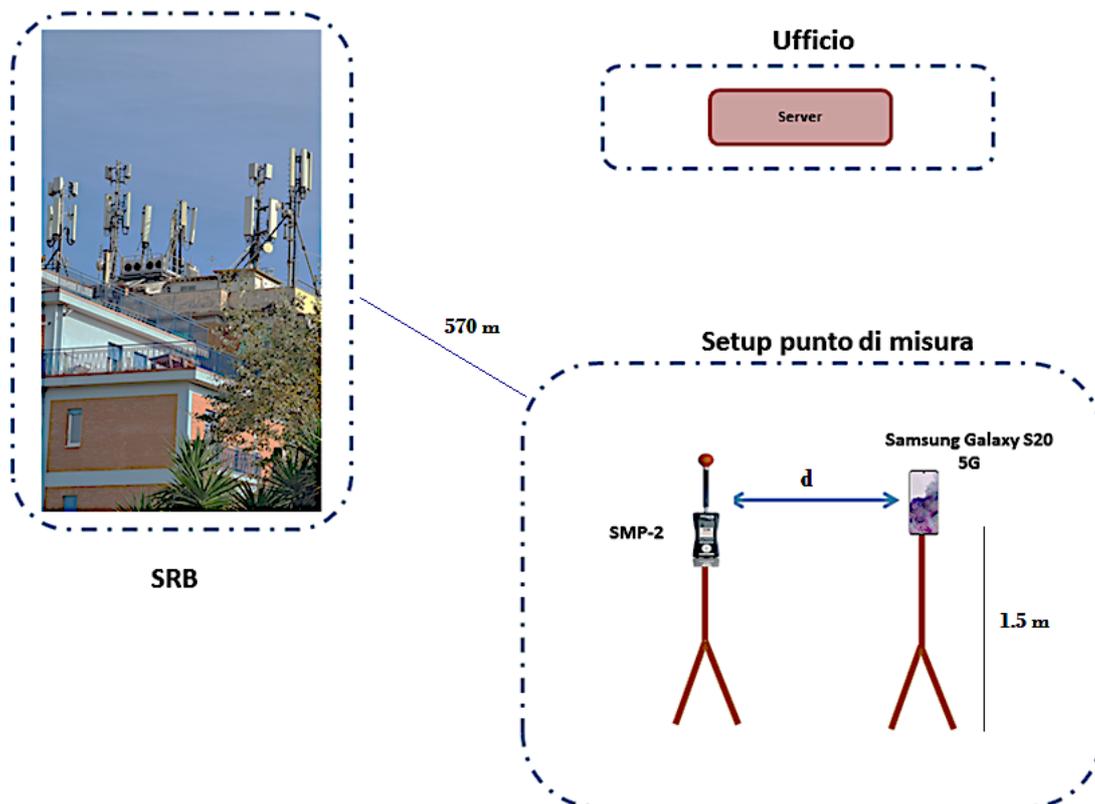


Figura 3 - Rappresentazione schematica del setup di misura implementato nelle misure attive.
Il setup "punto di misura" è stato replicato identico anche nelle altre tipologie e location di misura.

4.1 – Misure Attive

Le misure attive hanno l'obiettivo di verificare e quantificare l'aumento del campo E.M. in condizioni di attività dello smartphone. Per iniettare traffico in rete è stata installata sui cellulari iPerf3, un'applicazione in grado di creare flussi di dati tra client e server. E' uno strumento per misurazioni attive della massima larghezza di banda raggiungibile sulle reti IP. Supporta il tuning di vari parametri che si riferiscono a tempi, protocolli e buffer. Per ogni test riporta il throughput / bit rate misurato, la perdita e altri parametri.

Si è voluto indagare se l'intensità del campo elettromagnetico cambiasse di valore al variare di alcuni parametri, quali: il throughput dei dati, la distanza tra il cellulare e lo strumento a banda larga, la distanza tra il cellulare e la stazione radio base. Per la valutazione della distanza tra la sonda e lo smartphone è stato accertato di trovarsi nella condizione di campo lontano [8]. Considerando una frequenza pari a 3600 MHz e una dimensione massima dell'antenna dello smartphone pari a 10 cm (dimensione maggiorata rispetto alla realtà, per essere in una condizione di garanzia), la distanza di circa 20 cm corrisponde alla zona di radiazione di campo lontano. Sono state eseguite tre diverse tipologie di misura, una volta accertato che la connessione 5G fosse attiva:

- I. Variando la distanza tra smartphone e sonda, con throughput fissato. Il punto di misura è rimasto invariato durante le prove, per mantenere una distanza dalla SRB costante. Una diminuzione del campo E.M. misurato allontanando lo strumento dal cellulare è la condizione che ci si aspetta sia verificata. Il set di misure è stato eseguito sia in condizione di LOS (*line of sight*, nel punto di misura la SRB si trova in linea di vista), che di NLOS (*non line of sight*, la SRB era ostruita da un palazzo). Per variare la distanza, il meno possibile, tra la stazione radio base e i punti di misura, sono stati scelti due diversi piani dello stesso edificio, alla medesima latitudine e longitudine. A parità di throughput nella condizione NLOS un incremento del valore di campo E.M. è atteso, poiché lo smartphone emette maggiore potenza per trasmettere verso la SRB in condizioni non favorevoli.

- II. Variando il throughput, ma mantenendo costante la distanza tra lo strumento e il cellulare e tra il punto di misura e la SRB. In questo caso il campo E.M. dovrebbe crescere all'aumentare del throughput, la riduzione del tempo di simbolo viene compensata aumentando l'ampiezza del segnale trasmesso, e di conseguenza anche la potenza, al fine di mantenere elevata l'energia del simbolo stesso e di conseguenza assicurare una bassa probabilità d'errore. Anche in questo caso si è valutato il campo E.M. in condizione di LOS e di NLOS.
- III. Diminuendo la distanza con la stazione radio base e mantenendo costante quella tra sonda e smartphone. Ci si aspetta un aumento del campo elettromagnetico dovuto al maggiore contributo emesso dalla SRB.

4.1.1 – Misure indoor variando la distanza tra sonda e smartphone

Lo strumento a banda larga e lo smartphone (OnePlus 8T 5G) sono stati fissati su due cavalletti, ad una altezza da terra pari a circa 1 metro e mezzo. Sono stati posti tra loro, rispettivamente, a una distanza pari a 20 cm per la prima misura e a 120 cm per la seconda. In Figura 4 è riportata un'immagine degli strumenti utilizzati durante la campagna di misura. Il throughput è stato fissato a 10Mbit/s. Il campo elettromagnetico è valutato durante la trasmissione uplink.



Figura 4 - Immagine del setup di misura

I punti di misura scelti sono situati su due piani differenti dell'edificio di Ingegneria dell'Informazione dell'Università di Tor Vergata. In entrambi è stata fatta una misura preventiva di fondo elettromagnetico della durata di un minuto, per valutare i contributi di campo elettromagnetico presente, senza il contributo dello smartphone sottoposto a misura. In Tabella 3 sono riportati i risultati delle misure eseguite. Analizzando i risultati emerge un valore di campo E.M. maggiore nella condizione NLOS e quando lo smartphone si trova più vicino alla sonda di misura.

Tabella 3 - Risultati ottenuti per le misure indoor nelle condizioni LOS e NLOS

	E [V/m] LOS	E [V/m] NLOS
Fondo	0,478	0,260
Distanza 20 cm	1,6	2,599
Distanza 120 cm	0,590	0,545

Quando la sonda si trova a una distanza di 120 cm, il campo E.M. misurato è di valore paragonabile nelle due condizioni. Occorre però rilevare che nella condizione NLOS il fondo misurato risulta minore, quindi l'incremento rispetto alla condizione LOS è stato più cospicuo. I risultati preliminari di queste misure rispecchiano i valori attesi di diminuzione del valore di campo E.M. allontanandosi dallo strumento di misura e l'incremento di potenza emessa dallo smartphone in condizioni di non visibilità con la SRB.

4.1.2 – Misure indoor e outdoor variando il throughput

Per questo set di misure è stata mantenuta fissa la distanza di 20 cm tra sonda e smartphone, le misure sono state eseguite con entrambi i modelli di smartphone, per verificarne eventuali analogie di emissione. Sono state ripetute tre misure di trasmissione uplink per ogni valore di throughput, che è stato fatto variare. È stato iniettato traffico in upload dallo smartphone verso il server, gli ACK sono dal server verso il client. Le misure sono state eseguite nella condizione LOS e NLOS, il fondo elettromagnetico riscontrato è pari a 0,391 V/m. Nelle Tabelle 4 e 5 e sono riportati i risultati ottenuti.

Tabella 4 - Risultati delle misure ottenute, variando il throughput, nella condizione LOS

Throughput [Mbit/s]	LOS					Smartphone
	2	5	10	20	max	
E [V/m] I mis.	0,611	0,784	1,119	1,353	2,178	Samsung S20
E [V/m] II mis.	0,602	0,760	1,090	1,408	1,873	
E [V/m] III mis.	0,586	0,773	1,098	1,384	2,087	
E [V/m] media	0,600	0,772	1,102	1,382	2,046	
<hr/>						
E [V/m] I mis.	0,716	0,879	1,502	nd	nd	OnePlus 8T
E [V/m] II mis.	0,725	0,946	1,498	nd	nd	
E [V/m] III mis.	0,718	0,963	1,521	nd	nd	
E [V/m] media	0,720	0,929	1,507	nd	nd	

Tabella 5 - Risultati delle misure ottenute, variando il throughput, nella condizione NLOS

Throughput [Mbit/s]	NLOS					Smartphone
	2	5	10	20	max	
E [V/m] I mis.	0,819	1,030	1,510	1,994	2,744	Samsung S20
E [V/m] II mis.	0,624	1,061	1,527	1,963	2,794	
E [V/m] III mis.	0,771	1,061	1,426	2,018	2,774	
E [V/m] media	0,738	1,051	1,488	1,992	2,771	
<hr/>						
E [V/m] I mis.	1,247	1,990	2,888	nd	nd	OnePlus 8T
E [V/m] II mis.	1,349	1,965	2,890	nd	nd	
E [V/m] III mis.	1,332	1,962	2,830	nd	nd	
E [V/m] media	1,309	1,972	2,869	nd	nd	

Lo smartphone OnePlus 8T aveva una limitazione sul traffico, dovuta all'offerta 5G attiva, pari a 10 Mbit/s; non è stato quindi possibile compiere le misure a 20 Mbit/s e al massimo raggiungibile. iPerf3 può essere impostato con un massimo di 100 Mbit/s, in questa particolare misura lo smartphone Samsung ha raggiunto valori di throughput pari a 66, 58 e 64 Mbit/s nelle prove ripetute. I risultati, come evidenziato in Figura 5, mostrano un aumento del valore di campo E.M. misurato aumentando il throughput, sia nella condizione LOS sia NLOS. Nella condizione NLOS a sua volta si evidenzia un ulteriore aumento rispetto alla condizione LOS.

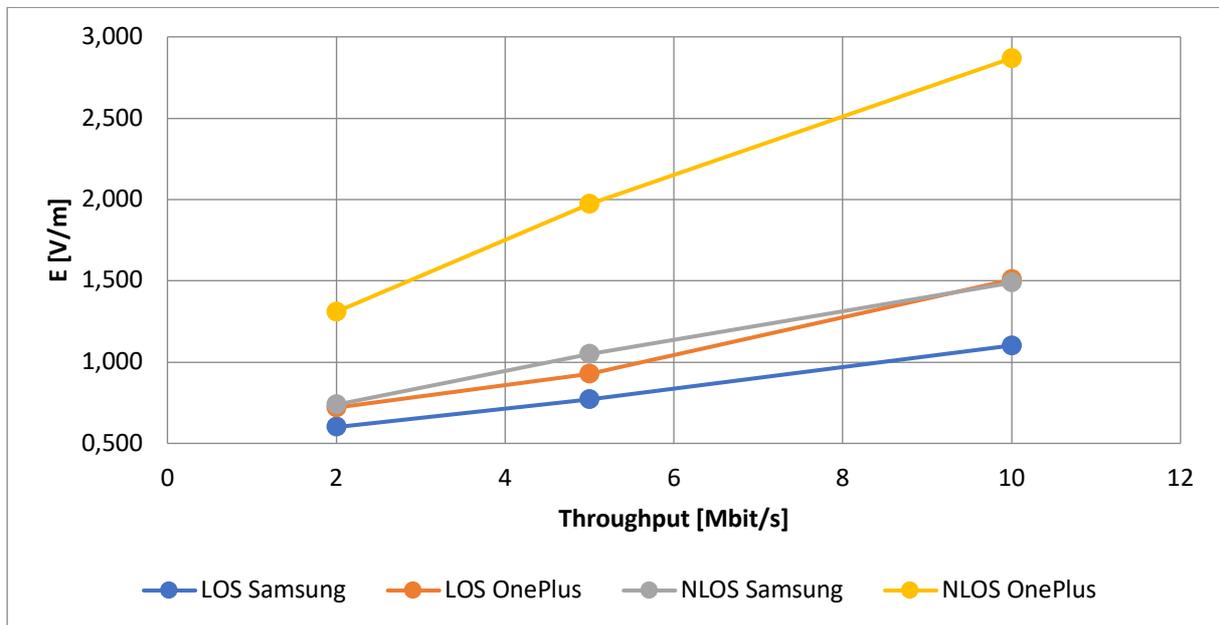


Figura 5 - Andamento del campo E.M dei due smartphone a confronto

Osservando i risultati dei campi elettromagnetici emessi dai due smartphone si nota una differenza di emissione, che nel caso dello smartphone OnePlus risulta essere maggiore. Una possibile spiegazione di questa differenza riscontrata potrebbe risiedere nei diversi valori di SAR (Specific Absorption Rate – tasso di assorbimento specifico). Il SAR indica la misura della quantità di energia assorbita dal corpo umano esposto a un campo elettromagnetico a radiofrequenza.

Per il telefono OnePlus 8T tale valore è di 0,94 W/kg per la testa e di 1,4 W/Kg per il corpo (10 g). Per il Samsung Galaxy S20plus è di 0,376 W/kg per la testa e di 1,57 W/kg per il corpo [12]. I valori di SAR per la testa sono dunque minori per il Samsung, mentre quelli per il corpo sono simili per i due cellulari. È necessario, però, sottolineare che il valore di SAR è valutato in condizioni di laboratorio, potrebbe quindi variare in un ambiente non controllato.

Oltre alle misure effettuate considerando la trasmissione uplink, è stato ripetuto lo stesso set di misure, valutando però la trasmissione downlink, è stato generato traffico in download dal server al client, e il client a sua volta ha generato ACK verso il server. Rispetto al valore di fondo elettromagnetico misurato (0,391 V/m) si riscontra un aumento minimo del campo E.M. In Figura 5 6 sono riportati a confronto, il valore medio del campo E.M. delle tre misure considerando le comunicazioni uplink e downlink per lo smartphone Samsung S20, nella condizione di linea di vista.

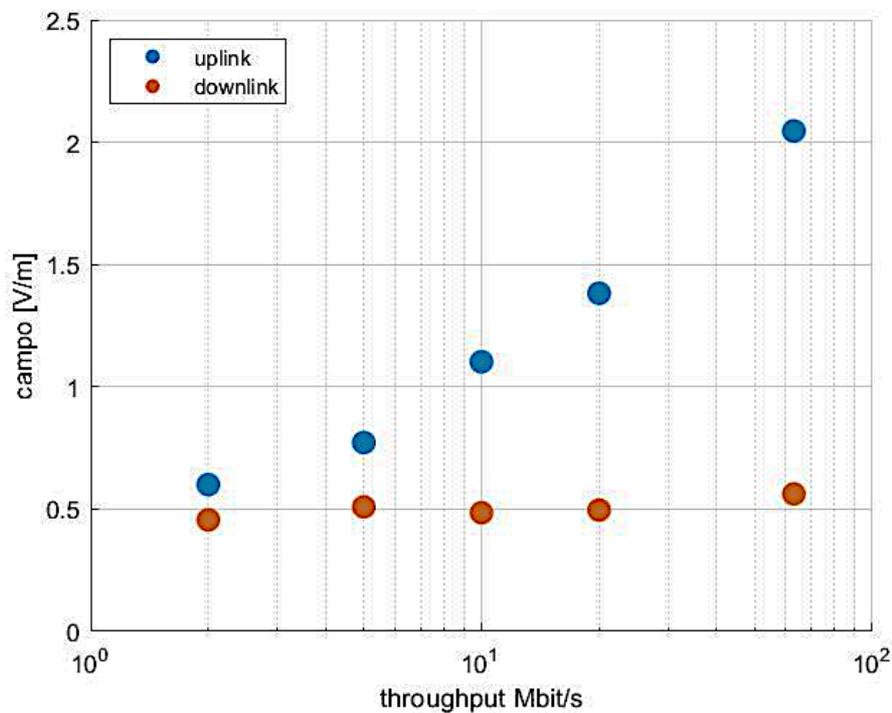


Figura 6 - Andamento del campo E.M. nelle trasmissioni uplink e downlink utilizzando lo smartphone Samsung S20

E' interessante sottolineare come nel caso dell' upload ci sia l'aumento crescente all'aumentare del throughput, cosa che non emerge nel caso del download, dove il valore di campo E.M misurato resta pressoché costante.

Diminuendo la distanza tra la SRB e il punto di misura, si attende come risultato un aumento del valore di fondo elettromagnetico. Il contributo dominante, in questo caso, dovrebbe provenire dalla SRB, quindi l'incremento del valore di campo misurato dovrebbe essere meno evidente rispetto alle misure indoor prese a maggiore distanza dalla SRB. Per fare delle ulteriori analisi, abbiamo eseguito un set di misure outdoor, a una distanza di circa 200 metri dalla SRB, ripetendo fedelmente il setup del punto di misura indoor, variando il throughput e considerando comunicazione uplink e downlink.

La misura di fondo E.M. misurato è stata pari a 2,6V/m, valore molto maggiore rispetto alle misure indoor.

Le misure hanno evidenziato che valori rilevati durante la trasmissione in upload risultano poco maggiori rispetto al fondo E.M. Essendo il cellulare in linea di vista e nelle vicinanze della SRB, non necessita di una potenza troppo elevata per trasmettere, soprattutto se il throughput fissato è basso. I valori di campo elettromagnetico misurato durante la il download, invece, sono tutti paragonabili alla misura di fondo, non si riscontra dunque una variazione di campo.

Nel grafico riportato in Figura 7 vengono confrontati i valori di campo E.M. in condizione di NLOS indoor rispetto a quelli misurati in condizione di LOS outdoor. Questi ultimi risultano circa costanti fino a 50Mbit/s, per poi aumentare leggermente in corrispondenza del throughput massimo. I valori di campo elettromagnetico misurati nella condizione NLOS dipendono in modo più evidente dal throughput. Inoltre, aumentano fino a raggiungere i valori misurati sotto la stazione radio base o li superano, nel caso del cellulare OnePlus 8T.

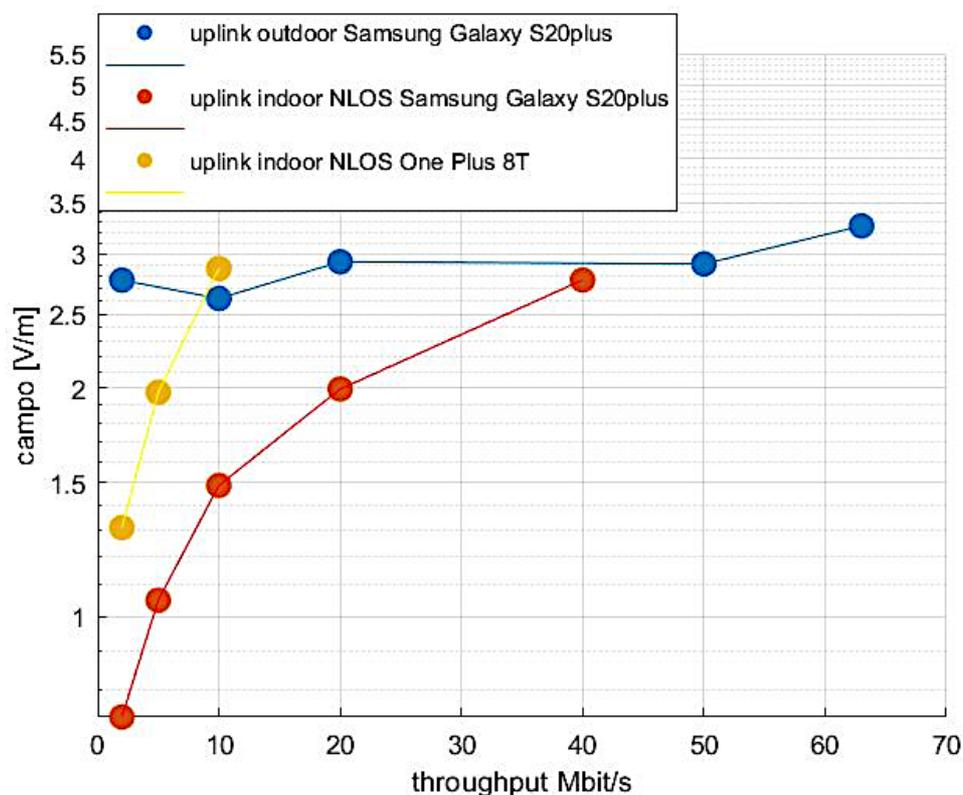


Figura 7 - Confronto tra i valori di campo E.M. misurati indoor e outdoor

Possiamo dunque affermare che, nonostante il fondo di campo E.M. dovuto alla SRB sia maggiore quando ci si trova nei pressi dell'antenna, utilizzando uno smartphone è facile raggiungere o superare lo stesso valore in condizione di non visibilità della SRB.

Per ogni valore di campo elettromagnetico è stato calcolato l'intervallo di confidenza al 95% della misura. Per il 95% del tempo di misura (1 min) il campo E.M. è compreso tra il valore $M-c$ e il valore $M+c$, dove M è il valore medio nel minuto di misurazione e c la confidenza.

Lo strumento acquisisce un valore di campo E.M. ogni 0,5 s, quindi per un minuto di misurazione i campioni registrati dallo strumento sono 120, che vengono poi mediati per ottenere il valore finale. Calcolando l'intervallo di confidenza sui 120 campioni per ogni misura da un minuto, si ottengono gli intervalli di confidenza riportati in Tabella 6.

Tabella 6 - Intervalli di confidenza rispetto alle comunicazioni uplink e downlink variando il throughput

Throughput [Mbit/s]	2	5	10	20	63
Uplink [Mbit/s]	2,770	2,620	2,928	2,909	3,264
Confidenza [Mbit/s]	0,013	0,011	0,008	0,022	0,013
Downlink [Mbit/s]	2,600	2,540	2,772	2,822	2,710
Confidenza [Mbit/s]	0,007	0,010	0,001	0,014	0,008

4.2 – Misure Passive

Le misure passive hanno l'obiettivo di valutare il campo elettromagnetico considerando solo il contributo dei dispositivi utenti presenti nelle vicinanze della sonda, nel punto di misura. Sono stati presi in considerazione luoghi perlopiù affollati, come centri commerciali e locali dell'università. Occorre sottolineare che queste misure non sono ripetibili, perché ottenute in un ambiente non controllato. Lo scopo di tali misure è quello di valutare cosa accade in termini di intensità di campo elettromagnetico quando il numero di persone in un ambiente aumenta. Il risultato che ci si aspetta è un aumento di campo E.M. quando il luogo diventa affollato, causato dall'incremento della potenza complessiva dovuto all'emissione dei dispositivi mobili. Si vuole inoltre determinare se questo aumento sia rilevante rispetto al campo E.M. dovuto alla stazione radio base. Per questo motivo sono state eseguite misure ripetute in fasce orarie differenti, alle quali corrisponde un afflusso di persone diverso, dopo aver effettuato una misura di riferimento iniziale quando i locali sono vuoti.

4.2.1 – Misure indoor presso locali dell'Università

Sono stati scelti due luoghi per eseguire le misure: un'aula universitaria con 41 studenti intenti a sostenere un esame e la mensa universitaria durante la pausa pranzo. Durante la misura, la cui durata è stata un minuto, la sonda era fissata su un cavalletto, perpendicolare al pavimento, ad una altezza di 1,5 metri.

All'interno dell'aula sono state eseguite tre misure per ognuno dei cinque punti scelti: prima con l'aula vuota, poi chiedendo ai 41 studenti di utilizzare il proprio smartphone e infine durante la sessione d'esame in cui era vietato l'utilizzo dei dispositivi personali.

In Figura 8 sono riportati i risultati ottenuti per i tre differenti scenari di misura. Il valore rappresenta il campo E.M. come media della durata del minuto di misura. Dai dati raccolti si riscontra un effettivo aumento del campo E.M. in corrispondenza della misura effettuata mentre gli studenti utilizzavano lo smartphone; tale comportamento si riscontra in tutti i punti di misura. Per quanto riguarda la misura effettuata mentre gli studenti svolgevano l'esame, in generale, si riscontra un livello di campo E.M. minore rispetto alla condizione di utilizzo e maggiore rispetto all'aula vuota, comportamento dovuto al fatto che gli smartphone non erano necessariamente spenti.

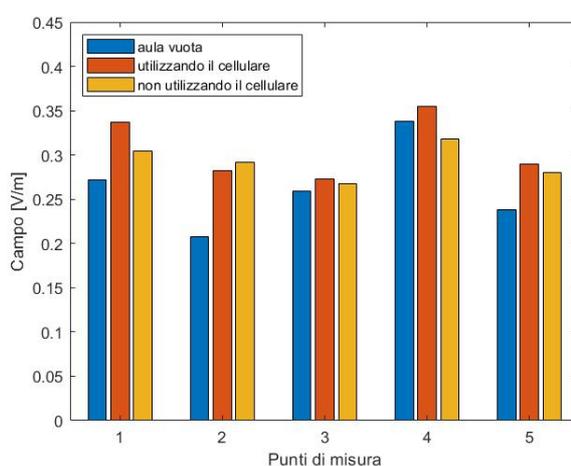


Figura 8 - Risultati del campo E.M. mediato, ottenuti dalle misure eseguite presso un'aula universitaria

4.2.2 – Misure indoor presso la mensa Universitaria

Vista la notevole affluenza di persone, è stata scelta la mensa come secondo scenario di misure. La sonda è stata posizionata nei pressi della fila per la cassa, proprio per la propensione all'utilizzo dello smartphone nei momenti di attesa. L'arco temporale di misura è stato di 80 minuti, tra le 12.30 e le 13.50, l'intervallo di campionamento è stato di 0.5 s, i risultati mediati in intervalli di un minuto. Le persone presenti sono state conteggiate mediante un contatore che veniva incrementato e decremento ogni volta rispetto all'entrata o all'uscita dalla mensa. Nelle Figure 9 e 10 sono riportati, rispettivamente, i valori di campo E.M. e il numero di persone presenti rispetto all'orario della misura.

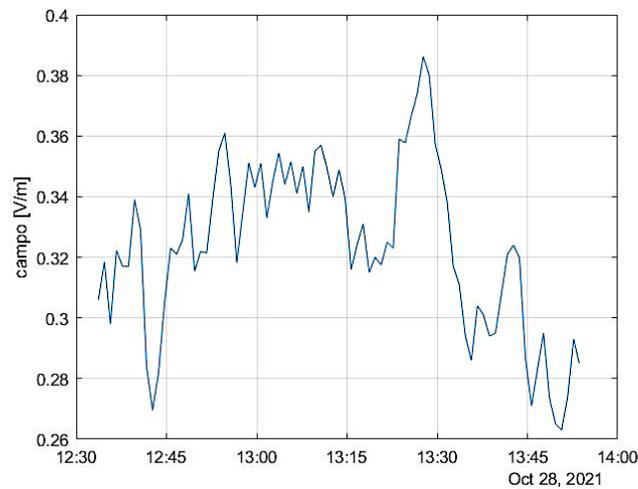


Figura 9 - Andamento dei valori di campo E.M. registrati nella fascia oraria della pausa pranzo presso la mensa universitaria

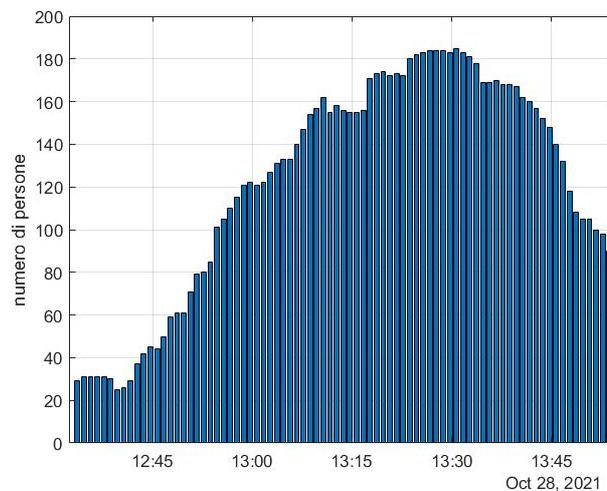


Figura 10 - Numero di persone registrato presso la mensa universitaria nella fascia oraria considerata per le misure

Analizzando insieme i due andamenti si può notare una correlazione tra i due grafici, specialmente nella fascia 13:25–13:30, in cui sia il numero di persone sia il campo elettromagnetico raggiungono il valore massimo. Dopo le 13:30 ci si aspetterebbe un'intensità di campo maggiore rispetto a quella effettivamente misurata dato che il numero di persone resta comunque alto, invece il campo E.M. risulta inferiore anche rispetto ai valori registrati intorno alle 13:00, in cui il numero di persone è minore. La presumibile spiegazione potrebbe

risiedere nel fatto che dalle 12:30 in poi, anche se il numero di persone è inferiore, queste si trovano per la maggior parte in coda e quindi nei pressi dello strumento, mentre dalle 13:30 risultano prevalentemente seduti ai tavoli, con la coda quasi completamente smaltita.

4.2.3 – Misure indoor e outdoor presso un centro commerciale

Come terzo e ultimo scenario di misura è stata condotta una campagna di misura presso un centro commerciale, con condizioni analoghe rispetto allo scenario di Tor Vergata, ovvero SRB limitrofa ai punti di misura, con installate antenne che sfruttano tecnologie pre 5G e con antenne dedicate alla tecnologia 5G nella mid band. Sono stati scelti dodici punti di misura tra indoor e outdoor, visibili in Figura 11.

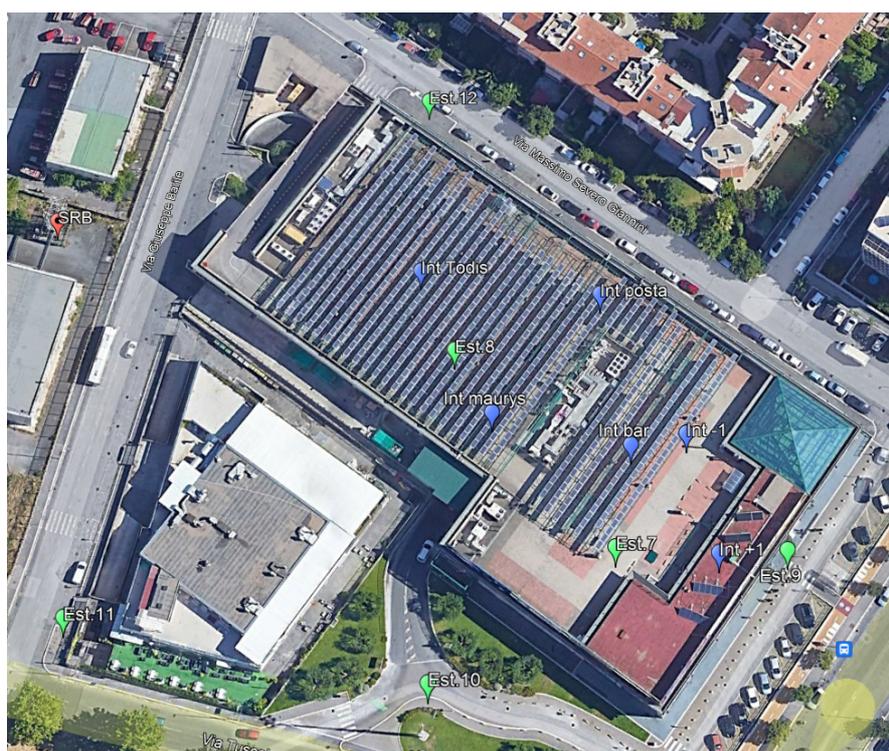


Figura 11 - Disposizione dei punti di misura indoor e outdoor presso un centro commerciale

Le misure sono state ripetute tre volte nell'arco della giornata: alle 8:00, subito dopo l'apertura del centro commerciale, momento in cui l'afflusso di persone era esiguo; alle 13:00, quando si è riscontrato un notevole aumento del numero delle persone, soprattutto nella zona ristorazione alle 20:00, quando la presenza dentro il centro commerciale si era ridotta ma la presenza nelle case limitrofe al centro commerciale era decisamente aumentata. Le misure sono state condotte in accordo con tutte le altre misure eseguite. In Figura 12 sono riportati i risultati delle misure eseguite.

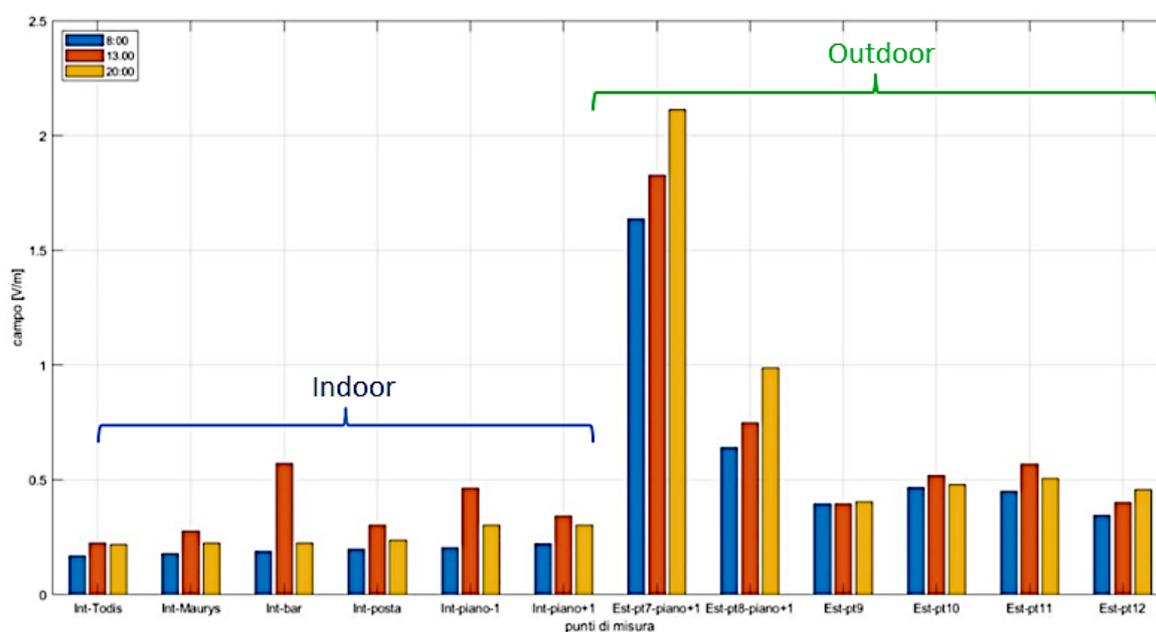


Figura 12 - Andamento del campo E.M. misurato in diverse fasce orarie per ogni punto di misura

presso il centro commerciale

Sul grafico sono riportati i risultati sia dei punti di misura indoor sia di quelli outdoor. Osservando i valori indoor si nota un incremento dei valori di campo E.M. misurato nella fascia oraria centrale, che corrisponde al numero maggiore di persone all'interno del centro commerciale. Il valore più alto registrato corrisponde al punto di misura relativo al bar: in questa fascia oraria rispetto alla prima fascia si misura un campo E.M. di valore triplicato. La misura interna al piano -1 corrisponde al parcheggio, e va sottolineato che questo non è

chiuso. La tendenza dei risultati indoor è coerente con quanto atteso: aumento del campo E.M. in corrispondenza dell'aumento di utenti, in particolare nel caso di utenti fermi che utilizzano in modo considerevole lo smartphone (es. seduti in pausa pranzo). In questo frangente si assiste ad un incremento dei livelli di esposizione del corpo umano dovuto principalmente alla presenza dello smartphone. Osservando l'andamento dei risultati delle misure outdoor, di particolare rilievo sono i valori di campo E.M. misurato in corrispondenza dei punti 7 e 8: questi infatti si trovano al piano superiore del centro commerciale e in linea di vista con la SRB. Si può notare come la tendenza dei valori di campo E.M. misurati nei punti outdoor sia maggiore nella terza fascia oraria, quando la presenza di utenti nel centro commerciale non è così elevata, ma il numero di utenti nella zona servita dalla SRB è incrementato in modo considerevole, con la conseguenza di una maggiore potenza emessa. Anche nelle misure outdoor c'è corrispondenza tra l'aumento del campo E.M. e il numero di utenti serviti, sebbene i valori rilevati di campo siano mediamente più alti rispetto a quelli rilevati nei punti indoor proprio perché il contributo della SRB è maggiore e meno schermato.

5 – Conclusioni e sviluppi futuri

Con il presente lavoro si è indagato l'impatto delle emissioni elettromagnetiche dovute ai terminali mobili (smartphone) in termini di inquinamento elettromagnetico. Attraverso una campagna di misure diversificata è stata prodotta un'analisi preliminare di esposizione del corpo umano alle emissioni prodotte dalle SRB, soprattutto da quelle prodotte dai nostri smartphone. Mediante i risultati delle misure attive, si è osservato come il campo elettromagnetico aumenti di intensità specialmente quando lo smartphone è in attività e si trova a qualche centimetro da noi. I fattori rilevanti ai fini della variazione di campo elettromagnetico risultano essere la distanza dal dispositivo e la velocità di trasmissione dei dati. Abbiamo inoltre riscontrato come la lontananza o la non visibilità rispetto alla SRB sia causa di un aumento di campo elettromagnetico, in quanto è necessaria maggiore potenza per la comunicazione. Attraverso il risultato delle misure passive, si è osservato come i valori di campo elettromagnetico aumentino quando la densità di persone in un ambiente aumenta e queste utilizzano il proprio smartphone. Occorre sottolineare che i livelli di campo E.M. misurati, sono rientrati nei limiti imposti dalla legge italiana. La campagna di misure condotta pone le basi per estendere l'analisi preliminare ad esempio adottando strumenti di misura più selettivi in frequenza, indagando le emissioni di altri modelli di smartphone e confrontando i diversi operatori di telefonia radiomobile, che implementano in modo diverso la propria rete.

6 - Bibliografia

- [1] [Online] Available: <https://www.gsma.com/>
- [2] [Online] Available: <https://www.istat.it/it/>
- [3] [Online] Available: www.benesseredigitale.eu/pubblicazioni
- [4] [Online] Available: <https://www.censis.it/>
- [5] DPCM 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" (G.U.R.I. n. 199 del 28 agosto 2003).
- [6] [Online] Available: <https://www.agendadigitale.eu/infrastrutture/5g-e-campi-elettromagnetici-ecco-perche-litalia-deve-adeguarsi-alleuropa/>
- [7] [Online] Available: https://it.wikipedia.org/wiki/5G_in_Italia.
- [8] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 3rd ed. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons Inc., 2005.
- [9] Colombi, D.; Joshi, P.; Xu, B.; Ghasemifard, F.; Narasaraju, V.; Törnevik, C. "Analysis of the Actual Power and EMF Exposure from Base Stations in a Commercial 5G Network". *Appl. Sci.* 2020, 10, 5280.
- [10] L. Chiaraviglio, S. Rossetti, S. Saida, S. Bartoletti and N. Blefari-Melazzi, "'Pencil Beamforming Increases Human Exposure to ElectroMagnetic Fields": True or False?," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 25158-25171, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3057237.
- [11] [Online] Available: https://www.wavecontrol.com/rfsafety/images/data-sheets/en/SMP2_Datasheet_EN.pdf
- [12] [Online] Available: <https://www.devicespecifications.com/it/model-sar/75d852f6>