

MODELLISTICA NUMERICA PER LO STUDIO DELL'ESPOSIZIONE DI RADIAZIONI ELETTROMAGNETICHE AD ELEVATA FREQUENZA IN AMBIENTI INDOOR

Matteo Cacciola, Giuseppe Megali

*Dipartimento D.I.C.E.A.M.
Università "Mediterranea" di Reggio Calabria*

Lo sviluppo tecnologico nel settore delle telecomunicazioni, ha registrato, nell'ultimo decennio, una rapida espansione, soprattutto nel campo specifico delle Wireless Local Area Network (WLAN). Tale diffusione, grazie alla facilità e comodità d'uso, con l'obiettivo di consentire il trasferimento di dati ad alta velocità coprendo piccole aree (uffici, palazzi), ha però determinato una sovraesposizione quotidiana a campi elettromagnetici a radio-frequenza, con particolare riferimento agli ambienti indoor. Questo aspetto ha mobilitato agenzie e comitati pubblici per valutare l'effettivo impatto dell'esposizione a questo tipo di campi, sulla salute umana. In quest'ottica, il presente lavoro si propone di fornire una valutazione accurata, mediante l'impiego di modellistica numerica, dell'influenza dovuta all'esposizione di campi elettromagnetici (frequenza di 2,45 GHz) sul cranio umano. In particolare, il sistema modellato propone la valutazione di differenti condizioni di esposizione, focalizzando l'attenzione su due parametri (Specific Absorption Rate (SAR) e incremento di temperatura), al fine di dimostrare, per i vari casi, il rispetto dei valori limite imposti dalla normativa vigente.

Mentre il settore della telefonia mobile ha come obiettivo la copertura di grosse aree geografiche, le WLAN, nate allo scopo di ridurre i costi d'installazione delle normali Local Area Network (LAN) e consentire una certa mobilità dei dispositivi di rete, hanno l'obiettivo di trasferire dati ad alta velocità e di coprire piccole aree. Grazie alla loro facilità e comodità d'uso, da un paio di anni a questa parte, questo settore ha avuto una rapida diffusione nel mercato, trovando largo consenso tra la gente. D'altro canto l'incremento nell'uso di questo tipo di tecnologie ha portato a una sovraesposizione quotidiana a campi elettromagnetici (EM) a radio-frequenza sia nell'ambiente domestico sia in quello lavorativo [1, 2]. Per questo motivo molte agenzie e comitati pubblici si sono mobilitati per valutare l'effettivo impatto sulla salute umana dell'esposizione a questo tipo di campi.

Di particolare interesse è lo studio dell'influenza sulla salute dell'uomo dei campi generati dalle WLAN. Questa tecnologia è di fatto una realtà ormai comune sia in ambito domestico che pubblico; basti pensare che non è più inusuale trovare bar, locali pubblici e persino aeroporti e stazioni ferroviarie che offrono un servizio di connessione wireless alla rete internet ai propri clienti. È pertanto ragionevole chiedersi se ci siano delle controindicazioni. Basti pensare che queste reti wireless, proprio per il loro intenso utilizzo, restano attive per lunghi periodi irradiando nello spazio un campo EM a cui le persone sono esposte per tutto l'arco lavorativo della giornata. In ambito domestico addirittura, vista ormai la larga diffusione di router wireless per l'accesso a internet

forniti proprio dal provider, si può supporre che i soggetti siano esposti tutto il giorno, giorno e notte, a questo tipo di campi.

Si tenga presente inoltre che la maggior parte delle WLAN attualmente opera in bande di frequenza “non licenziate” ovvero la ISM (Industrial Scientific Medical) che opera intorno alla frequenza dei 2,45 GHz e la U-NII (Unlicensed National Information Infrastructure) che opera, invece, intorno ai 5,5 GHz. Per le reti WLAN, l’istituto internazionale IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) ha pubblicato vari standard della famiglia 802.11.

Il fatto che tali bande di frequenza siano non licenziate costituisce un vantaggio perché ne permette il largo utilizzo da molteplici soggetti (anche privati) ma, anche uno svantaggio, perché, a meno di una regolamentazione al riguardo, si corre il rischio di essere pervasi da molteplici campi generati da dispositivi WLAN di persone che vogliono realizzare una loro rete wireless privata. Inoltre, per trasmettere dati, i sistemi WLAN usano per lo più antenne omnidirezionali, poste ad altezza d’uomo o, antenne direttive, fissate sul soffitto della stanza. In entrambi i casi, comunque, la persona si viene a trovare in prossimità dell’antenna radiante dove il campo assume il suo valore massimo. In particolare, oltre al contributo dovuto all’onda diretta proveniente dall’antenna, il soggetto si trova esposto all’azione delle onde generate dai fenomeni di riflessione e diffrazione dell’onda incidente con le pareti e gli oggetti della stanza. Tutto questo porta alla conclusione che sia quantomeno lecito chiedersi quali siano le possibili conseguenze sulla salute dell’uomo e, in particolare, definire dei limiti nei valori di campo EM sicuri per l’uomo [2, 3].

In tale ottica si inserisce il presente lavoro: verranno presentati i risultati derivanti dallo studio condotto al fine di valutare le conseguenze dell’esposizione a campi EM generati da un comune router usato in molti luoghi come hotspot wireless, valutando, in diverse situazioni, due parametri principali: il SAR (Specific Absorption Rate) locale e l’incremento di temperatura [1]. Verrà illustrata la metodologia numerica approcciata per il problema in esame ed infine verranno illustrati i risultati ottenuti e tratte le conclusioni.

APPROCCIO ALLA FASE DI STUDIO

Per approcciare al problema, occorre anzitutto fornire la definizione di dosimetria, scienza che si occupa di quantificare l’interazione tra un campo EM e un corpo biologico ad esso esposto. Il problema della dosimetria dei campi EM non ionizzanti consiste nella:

- quantificazione della potenza assorbita da un organismo biologico immerso in un campo EM;
- determinazione della distribuzione di tale potenza nell’organismo esposto.

I tessuti umani esposti ad un campo EM ne assorbono l’energia e sono sottoposti a diversi effetti in funzione della sua frequenza. La nostra attenzione sugli effetti prodotti dalle radiazioni ad alta frequenza, in particolare a 2,45 GHz, tipica di applicazioni WLAN. Nella pratica, l’analisi si riduce alla del SAR [1]:

$$SAR = \frac{1}{2\rho} \sigma E^2 \quad \left[\frac{W}{Kg} \right], \quad (1)$$

parametro che fornisce il valore di potenza assorbita per unità di massa, dove σ rappresenta la conducibilità del tessuto cerebrale umano, ρ la densità ed E il valore di campo elettrico. Poiché la densità e il campo elettrico dipendono dal tipo di tessuto e l’uomo non è costituito da un corpo omogeneo si può preferire determinare il SAR medio. Il SAR medio è un parametro di particolare importanza, in quanto è ciò che sperimentalmente viene misurato. Esso fornisce la quantità di calore rilasciata dal corpo e dà quindi un’idea della sollecitazione termica a cui l’organismo è sottoposto. Il SAR è direttamente proporzionale alla conducibilità elettrica dei tessuti, a sua volta legata al contenuto d’acqua presente negli stessi. Ciò spiega la disomogeneità della reazione all’irraggiamento delle varie parti del corpo, anche in condizioni di esposizione omogenea; ad esempio, il tessuto muscolare e il sangue assorbono quantità di energia maggiori del tessuto osseo o del grasso. Il calore prodotto all’interno del corpo o in una parte di esso è direttamente proporzionale alla potenza assorbita, e quindi al SAR, tuttavia, l’incremento conseguente di temperatura non è necessariamente proporzionale al SAR, dato che dipende anche dal metabolismo e dalle caratteristiche termiche dei tessuti interessati, quali le proprietà attive e passive di scambiare calore. Proprio per questo aspetto, ai fini del completamento delle valutazioni, occorre tener presente le variazioni di temperatura determinate e derivate dall’esposizione.

IL MODELLO NUMERICO

L’approccio al problema è stato affrontato attraverso l’implementazione di un codice agli Elementi Finiti (Finite Element Method, FEM), basato sulla risoluzione del sistema di equazioni di Maxwell:

$$\begin{cases} \nabla \times E = -j\omega\mu_0\mu_r H \\ \nabla \times H = j\omega\varepsilon_0\varepsilon_r E + \sigma E \\ \nabla \cdot \varepsilon_0\varepsilon_r E = \rho \\ \nabla \cdot H = 0 \end{cases} \quad (2)$$

L'equazione finale di governo del sistema altro non è che l'equazione vettoriale di Helmholtz:

$$\nabla \times \mu_r^{-1}(\nabla \times E) - k_0^2 \left(\varepsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0} \right) E = 0 \quad (3)$$

Il codice andrà a risolvere per ciascun dominio che compone la geometria del problema, imposta la frequenza di interesse. Al riguardo, dovranno essere specificati, per ciascuno di essi, i valori di permeabilità elettrica ε_r , permittività magnetica μ_r e conducibilità elettrica σ . I valori di riferimento dei tessuti cerebrali sono stati imposti in accordo ai contributi di Schmid [4, 5].

Al fine di valutare l'incremento di temperatura, il modello sfrutta la cosiddetta Bioheat Equation nella seguente forma:

$$\nabla \cdot (-k\nabla T) = \rho_b c_b \omega_b (T_b - T) + Q_{met} + Q_{ext} \quad (4)$$

dove ρ_b rappresenta la densità, c_b il calore specifico, ω_b e T_b rispettivamente il tasso di perfusione e la temperatura del sangue; Q_{met} e Q_{ext} rispettivamente sorgente metabolica e spaziale termica. I valori delle costanti sono stati imposti, anche in questo caso, in accordo ai contributi di Schmid [4, 5].

Per risolvere questo problema, l'idea è stata quella di ridurre l'area di studio da analizzare mediante FEM ad un volume di dimensioni ridotte intorno alla testa e sfruttare un altro software per simulare tutto ciò che accade al suo esterno. L'applicabilità di tale approccio, trova fondamento dal Teorema di equivalenza nella teoria dei campi elettromagnetici [6].

In particolare, per lo studio degli effetti dei campi EM (analizzati mediante SAR e temperatura) su una testa umana, trattando scenari differenti ma il più possibile vicini alla realtà e dovendo valutare le risorse computazionali a disposizione, al fine di ottenere un decremento del carico computazionale, si è optato per la riproduzione degli scenari indoor mediante software basati sulla teoria del Ray Tracing [7, 8]. Al fine di ottenere i valori di campo EM, successivamente impiegati come sorgente nel seguente step di analisi FEM in ambiente multi-fisico, è stato importante, in ogni analisi, stabilire il numero di riflessioni, rifrazioni e trasmissioni che i vari raggi, che partivano dal trasmettitore, potevano avere interagendo con

gli elementi dello scenario. L'implementazione software mediante Ray Tracing, ha tenuto conto dell'inserimento di parametri caratteristici di antenne commerciali (sia unidirezionali che omnidirezionali). I valori di campo sono stati determinati andando a considerare dei ricevitori 'fittizi', delimitando una porzione volumetrica dello spazio che nella successiva fase includerà la testa umana. Successivamente, i valori di campo EM ottenuti dalla precedente analisi, sono stati inseriti come valori di input nel software basato su metodologia FEM; software in cui, per costruire il modello con cui effettuare le simulazioni, si è partiti da un modello di testa umana realizzata in CAD. La geometria di tale testa è la stessa geometria (SAM Phantom) utilizzata dall' IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers), IEC (International Electrotechnical Commission) e CENELEC (Comitato europeo di normalizzazione elettrotecnica) nei loro standard per le misurazioni del SAR [9-13]. La geometria originale è stata importata e, in aggiunta, campionati alcuni parametri dei materiali che compongono la testa umana con una funzione di interpolazione volumetrica che stima la variazione del tipo di tessuto interna alla testa. Questo file è stato creato da una successione di immagini di risonanza magnetica (MRI) di una testa umana; queste immagini contengono 109 slices, ciascuna con 256x256 voxel. La variazione dei parametri di permittività dielettrica, conducibilità e rate di perfusione nel modello, sono ottenuti come semplice funzione della variazione del punto interno alla testa.

SIMULAZIONI E RISULTATI

Nella presente sezione del documento, sono presentati i risultati ottenuti, sulla base dei vari scenari considerati (variazione altezza di interazione tra antenna e testa umana, diversificazione ambiente indoor) oltre che della variazione della tipologia di antenna.

CONCLUSIONI

In questo contributo sono stati analizzati gli effetti dei campi elettromagnetici generati dai comuni dispositivi Wi-Fi come Access Point e Hotspot wireless. Gli aspetti principali su cui si è focalizzata, l'attenzione sono stati il SAR e l'incremento di temperatura. Quella dell'analisi del SAR per dispositivi che irradiano un campo EM è una pratica abbastanza comune. Lo studio condotto, ha dimostrato come le preoccupazioni della gente comune riguardo queste tecnologie non trovano alcun fondamento se

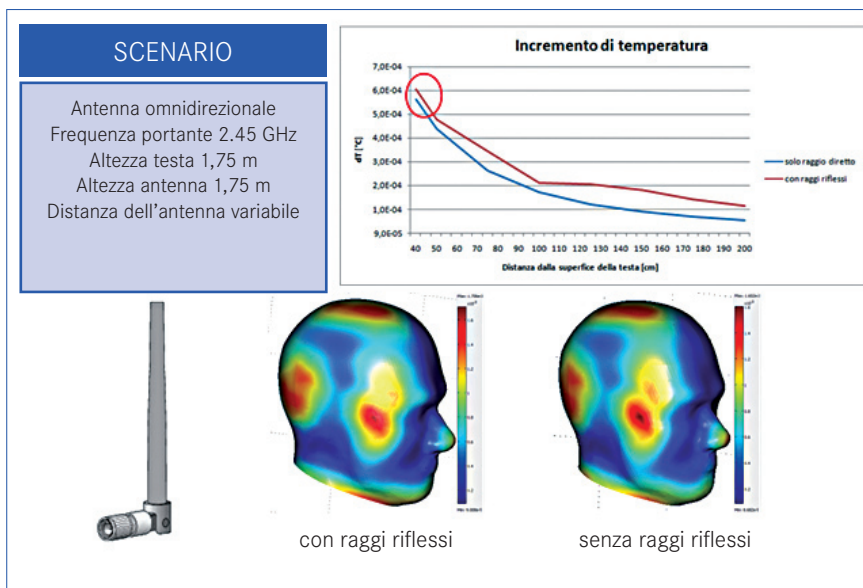


Fig. 1 - Variazione di temperature sulla superficie della testa in relazione allo scenario indicato.

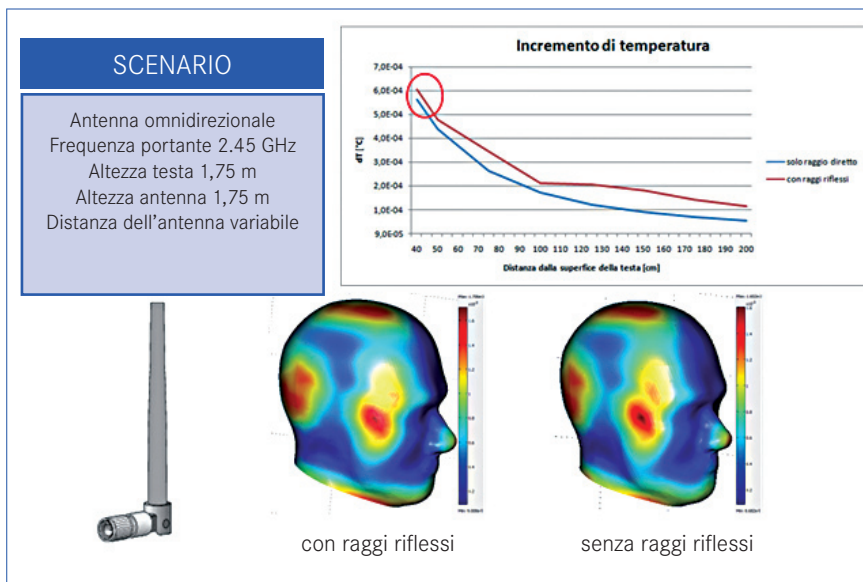


Fig. 2 - Variazione del SAR in relazione allo scenario indicato.

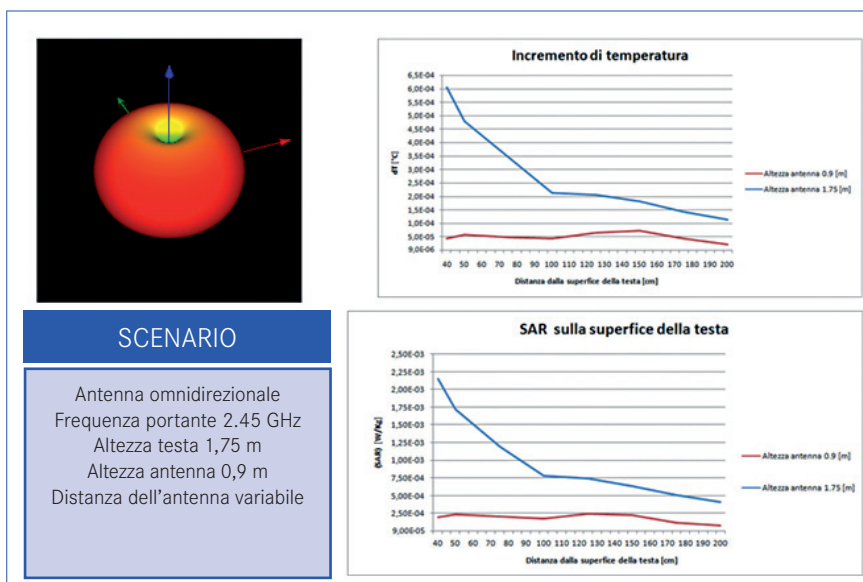


Fig. 3 - Variazione di temperatura sulla superficie della testa e SAR in relazione allo scenario indicato.

Fig. 4 - Variazione di temperatura sulla superficie della testa e SAR in relazione allo scenario indicato, considerando la posizione della sorgente come da figura.

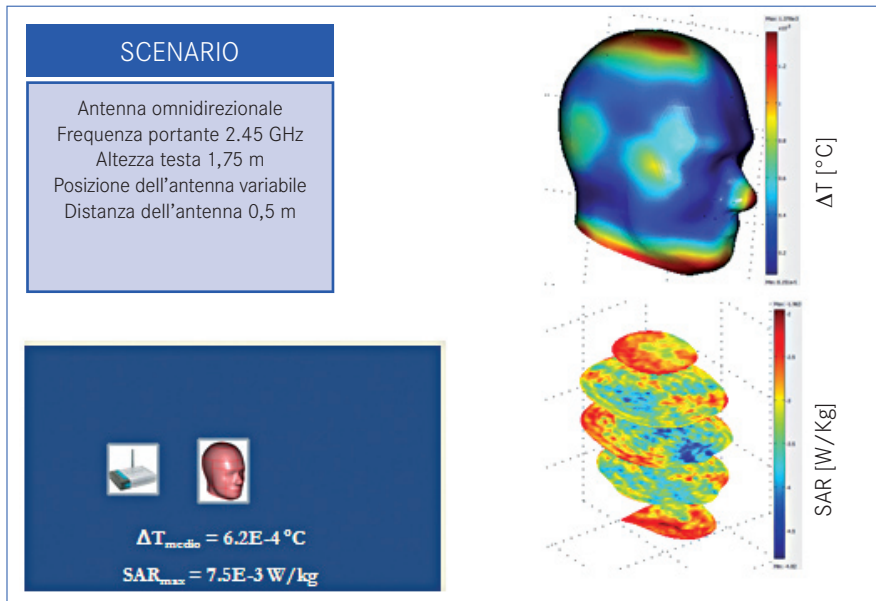


Fig. 5 - Variazione di temperatura sulla superficie della testa e SAR in relazione allo scenario indicato.

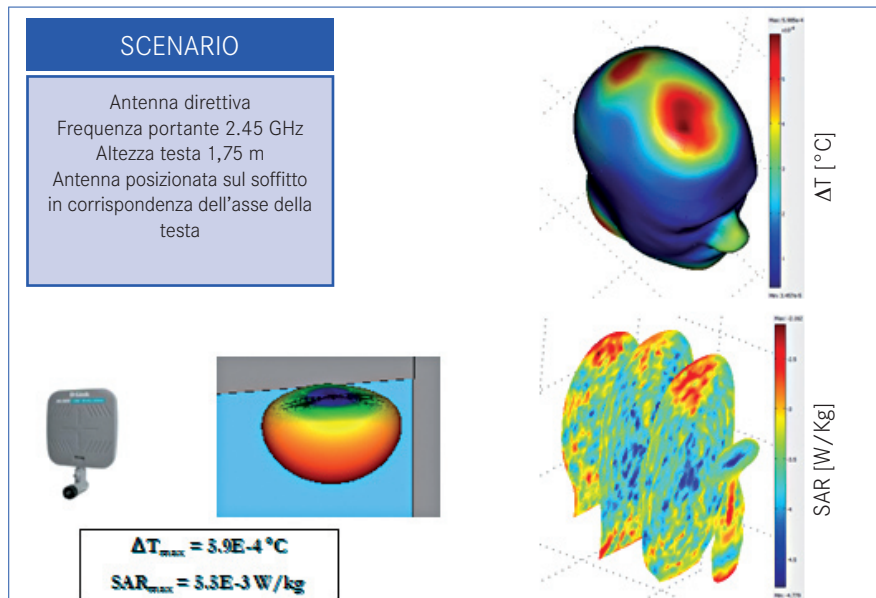
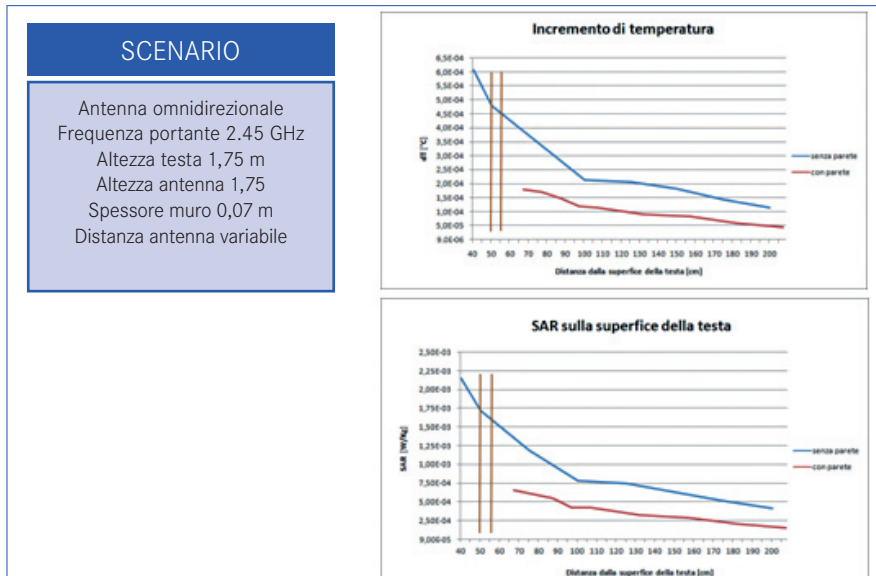


Fig. 6 - Variazione di temperatura sulla superficie della testa e SAR in relazione allo scenario indicato (in tal caso, rispetto ai precedenti casi, si è considerata la presenza di un muro tra la sorgente irradiante e la testa umana).



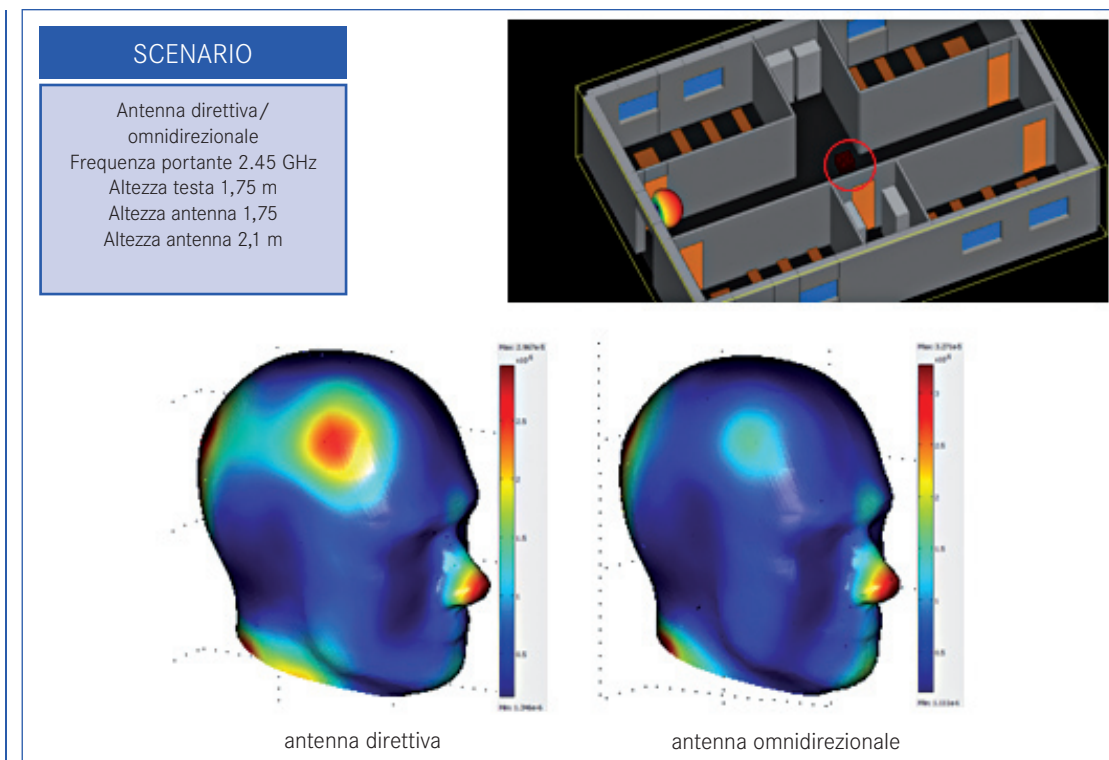


Fig. 7 - Variazione di temperatura sulla superficie della testa in relazione allo scenario indicato (nel caso di antenna direttiva e antenna omnidirezionale).

non nel comune principio per cui ciò che non si conosce fa paura. Le simulazioni effettuate, hanno evidenziato, nei vari casi, valori ben al di sotto dei limiti fissati dalle attuali normative. Dei 2 [W/kg] fissati dalle linee guida ICNIRP in merito ai valori di SAR per testa e corpo solo lo 0,02% viene effettivamente raggiunto. L'analisi, tuttavia ha consentito di mettere in luce un altro aspetto che in generale non viene tenuto in considerazione ovvero quanto in profondità penetra la radiazione. Questo può risultare utile nel momento in cui si vuole analizzare la potenza della radiazione assorbita dai vari tessuti scendendo in profondità nel cervello. All'analisi del SAR si è scelto di affiancare lo studio dell'incremento di temperatura sulla superficie del cervello per capire come l'assorbimento della radiazione interessa le varie zone dello scalpo. Si è notato che le zone in cui il campo magnetico raggiunge i valori più alti sono quelli in cui si registra il massimo incremento di temperatura, ed è proprio in tali punti che il grafico del SAR ha evidenziato una maggiore penetrazione della radiazione. Per quanto riguarda i valori ottenuti, è risultato che, anche in questo caso, non vi è alcun rischio per la salute umana. Le temperature misurate, registrano un incremento massimo di appena 0,002 °C nelle zone di esposizione diretta, in particolare nella testa e nel collo dove i tessuti più molli, a differenza

delle ossa del cranio che assorbono la maggior parte della radiazione. Tali valori sono ben al di sotto della soglia dei 0,5 °C oltre il quale si può definire come termico l'effetto della radiazione sui tessuti umani e molto sotto l'1 °C oltre il quale si possono verificare danni irreversibili ai tessuti soprattutto per lunghi periodi di esposizione.

Tra i parametri che maggiormente influenzano gli effetti della radiazione sulla testa, è emerso che la distanza risulta essere un parametro discriminante. Anche altri fattori, però, come le specifiche dell'antenna, possono risultare rilevanti. Infine, un altro aspetto evidenziato è stato che gli oggetti all'interno della stanza possono influenzare la radiazione incidente sulla testa, quindi gli effetti prodotti, soprattutto se costituiti da materiali riflettenti.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bernardi P, Cavagnaro M, Pisa S, Piuze E, SAR Distribution and Temperature Increase in an Anatomical Model of the Human Eye Exposed to the Field Radiated by the User Antenna in a Wireless LAN, IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, vol. 46, no. 12, pp. 2074-2082, 1998
- [2] Hietanen M., Alanko T, Occupational expo-

sure related to radiofrequency fields from Wireless communication systems, Finnish Institute of Occupational Health, Department of Physics

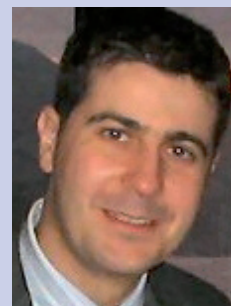
- [3] W.Guy A., Lin J.C., Kramar P.O., Emery A.F., Effect of 2450-MHz Radiation on the Rabbit Eye, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. MTT-23, no. 6, pp.492-298, 1975
- [4] G. Schmid, G. Neubauer, P.R. Mazal, "Dielectric properties of human brain tissue measured less than 10 hours post-mortem at frequencies from 800-2,450 MHz", Bioelectromagnetics, Vol. 24:6, pp. 423-430, 2003.
- [5] G. Schmid, G. Neubauer, F. Alesch, U.M. Illievich, "Dielectric properties of porcine brain tissue in the transition from life to death at frequencies from 800-1,900 MHz", Bioelectromagnetics, Vol. 24(6), pp. 413-423, 2003.
- [6] Franceschetti G., Campi Elettromagnetici, Boringhieri, Italy, 1983
- [7] Glassner A., An Introduction to Ray Tracing, Academic Press, New York, NY, USA, 1989.
- [8] Shirley P., Morley K.R., Realistic Ray Tracing, 2nd Edition, A. K. Peters, New Jersey, USA, 2001.
- [9] CENELEC Basic Standard for the Measurement of Specific Absorption Rate Related to Human Exposure to Electromagnetic Fields From Mobile Phones (300 MHz{3 GHz), CENELEC EN 50361: 2001, 2001.
- [10] ECC Electronics Communications Committee within the European Conference Postal and Telecommunications Administrations. Measuring Non-Ionizing Electromagnetic Radiation (9 kHz-300 GHz), 2003.
- [11] ICRUM International Commission on Radiation Units and Measurements, Radiation quantities and units, ICRU Report 33 (Bethesda, MD: ICRU), 1980.
- [12] IEC, Human Exposure to Radio Frequency Fields From Handheld and Body-Mounted Wireless Communication Devices-Human Models, Instrumentation and Procedures, Part 1: Procedure to Determine the Specific Absorption Rate (SAR) for Handheld Devices Used in Close Proximity to the Ear (Frequency Range of 300MHz to 3 GHz), IEC 62209 Part 1, 2005.
- [13] IEEE Recommended Practice for Determining the Peak Spatial-Average Specific Absorption Rate (SAR) in the Human Head From Wireless Communications Devices: Measurement Techniques, IEEE Standard 1528-2003, 2003.

GLI AUTORI

Matteo Cacciola (1978),

è attualmente Assegnista di Ricerca post-dottorato presso l'Università degli Studi "Mediterranea" di Reggio Calabria. Già laureato in Ingegneria Elettronica (2003) secondo il previgente ordinamento e Dottore di Ricerca (2008) in Ingegneria Informatica, Biomedica e delle Telecomunicazioni presso la "Mediterranea", ha concentrato la propria attività di ricerca nell'ambito del Soft Computing applicato alla regolarizzazione di problemi inversi di tipo elettrico e magnetico. È co-autore di circa 100 articoli fra capitoli di libro, riviste e convegni nazionali/internazionali, nonché depositario di una richiesta di brevetto nazionale. Ha in passato ricevuto diversi premi e riconoscimenti scientifici.

Email: matteo.cacciola@unirc.it



Giuseppe Megali

(1981), System Engineer presso AnsaldoSTS, Società del gruppo Finmeccanica. Ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca in "Ingegneria Informatica, Biomedica e delle Telecomunicazioni" (2011), dopo aver conseguito la laurea specialistica in Ingegneria Elettronica (2007), entrambi presso l'Università Mediterranea di Reggio Calabria. È autore/co-autore di circa 50 pubblicazioni su capitoli di libro e riviste internazionali, atti di congressi nazionali/internazionali e di un brevetto nazionale. Ha in passato ricevuto diversi premi e riconoscimenti scientifici nazionali e internazionali: Best ENNS Poster Award 2008; vincitore del Premio Anasilaos Giovani 2010; inserito nell'edizione 2012 del Who's Who in the World; vincitore Premio su Computer Ethics ETIC 2011 (AICA&Rotary International); inserito nella rivista Mondo Digitale (n°42-giugno 2012); inserito nell'edizione 2012 del '2000 Outstanding Scientists of the 21st Century' International Biographical Center of Cambridge.

Email: giuseppe.megali@unirc.it

