



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Biomedica

Dipartimento di Ingegneria dell'informazione

**Analisi del SAR sulla testa umana in funzione
della posizione dello smartphone**

**Analysis of the SAR on the human head as a
function of the smartphone position**

Relatore

Prof. Valter Mariani Primiani

Tesi di Laurea di:

Cosenza Matteo

Correlatore

Prof. Franco Moglie

A.A. 2022/2023

Ad Anita, Mauro, Federico,

Gabriele, Agostino e Niky ❤️ 🍷

Indice

- Introduzione

1. Breve storia della telefonia mobile.	1
2. Finite-Difference-Time-Domain (FDTD).	4
2.1 Analisi metodo.	4
2.2 Algoritmo di Yee.	8
3. Caratterizzazione elettromagnetica della testa . . .	11
3.1 Il modello.	11
3.2 Formula di Cole-Cole.	14
3.3 Permittività dielettrica dei tessuti.	15
4. Antenna PIFA	18
4.1 Analisi antenna	18
5. Sar (Specific Absorbing Rating).	21
5.1 Mappature e risultati.	22
6. Conclusioni	25

Introduzione:

Questa tesi ha come obiettivo quello di andare a studiare l'andamento del SAR, cercando valori accettabili che non sono elevati da costituire un problema, utilizzando modelli virtuali del corpo umano, sviluppati dalla Foundation for Research on Information Technologies in Society (IT'IS).

I modelli umani a corpo intero includono 4 soggetti: Ella, Duke, Billie e Thelonious; nella nostra ricerca andiamo a studiare il modello della testa di Ella, una donna di 26 anni.

Nello specifico, andremo a descrivere il SAR in funzione della posizione dello smartphone e come varia in base alla posizione di quest'ultimo.

1. BREVE STORIA DELLA TELEFONIA MOBILE

Lo smartphone è un telefono cellulare con capacità di calcolo, memoria e connessione dati molto più avanzate rispetto ai normali telefoni cellulari, basato su un sistema operativo per dispositivi mobili.

Tutto nacque intorno al 1973, quando venne ideato un sistema per il quale associare la telefonia all'utilizzo degli elaboratori elettronici, poi iniziati ad essere venduti solamente intorno al 1993. Il primo smartphone in assoluto, chiamato Simon, fu progettato dalla IBM nel 1992 ma lanciato sul mercato dalla BellSouth ed oltre alle semplici funzioni di un normale telefono possedeva anche orologio, calendario, rubrica, blocco note, fax, funzioni di posta elettronica e giochi. Purtroppo, la durata della batteria giocò un ruolo fondamentale, poiché fu la causa principale che portò al declino del primo smartphone della storia, ossia l'IBM.

La diffusione dello smartphone nei primi anni 2000 non fu uniforme ma diversa in base alla locazione geografica: negli USA si diffusero soprattutto dispositivi basati su Windows Mobile e BlackBerry, mentre in Europa si diffusero particolarmente i Nokia con il sistema operativo

Symbian, che fino al 2010 rimase il più utilizzato al mondo sugli smartphone. Sempre a metà anni 2000 la maggior parte degli smartphone aveva tastiere fisiche, solo alcuni usavano touchscreen resistivi, come il Palm Treos e il Sony Ericsson P800, che supportavano sia la scrittura normale che disegnando con il pennino graffiti che il software interpretava come caratteri alfanumerici.

Apple intorno al 2007 presentò e mise in vendita sul mercato il primo iPhone, con multitouch e pinch-to-zoom e questo tipo di prodotto ha conferito un notevole impulso al commercio degli smartphone, favorendo di conseguenza la concorrenza. Tra questi, Samsung con la serie Galaxy, LG con la serie Optimus e G, HTC, Sony, Huawei, OnePlus, Lenovo e molti altri marchi diffusi in Oriente ed emergenti in Europa.

Successivamente, aumentò anche la risoluzione negli schermi di smartphone: a ottobre 2012, HTC presenta il J Butterfly, il primo smartphone con schermo Full HD da 1920 x 1080 pixel, un anno dopo, a ottobre 2013, Vivo presenta Xplay 3S, primo dispositivo con risoluzione 2K 2560 x 1440 pixel e all'IFA di Berlino 2015 Sony presenta Xperia Z5 Premium, primo smartphone con risoluzione 4K 3840 x 2160 pixel e una densità di 806 ppi.

Nel 2013 fu prodotto lo Yotaphone, unico nel suo genere perché era l'unico a possedere il display a doppio schermo: uno schermo LCD frontale e uno schermo a carta elettronica posto sul lato posteriore.

Dal 2020 sono stati presentati smartphone pieghevoli, una nuova generazione di telefoni la cui caratteristica è quella di presentare un display in grado di piegarsi; in questo modo è possibile avere schermi più grandi, adatti al multitasking.

I telefoni di oggi sono diventati molto più potenti e performanti, con un'elevata capacità di calcolo, arrivando a possedere fotocamere da 48MP, chip interni del tipo A16 Bionic, reti cellulari 5G ultrarapide e schede grafiche con Dolby Vision 4K fino a 30 fps.

2. FINITE-DIFFERENCE-TIME-DOMAIN (FDTD)

2.1 Analisi metodo

Il metodo Finite-Difference Time-Domain (FDTD) o metodo di Yee è una particolare tecnica di analisi numerica usata per determinare, nel dominio del tempo, le equazioni di Maxwell. Intorno al 1873, James Clerck portò avanti i suoi studi, pubblicando un trattato dove definì un algoritmo di quattro equazioni differenziali tramite le quali dimostrò la prima teoria unificata di magnetismo ed elettricità. Quest'ultime equazioni, che egli interpretò dagli studi sperimentali riportati da Gauss, Ampère, Faraday e altri studiosi, non solo spiegarono meglio la connessione tra campo elettrico e carica elettrica e tra campo magnetico e corrente elettrica, ma spiegarono anche l'unione intrinseca tra campo elettrico e campo magnetico. Le equazioni di Maxwell rappresentano i fondamenti della teoria dell'elettromagnetismo.

In un primo momento le equazioni di Maxwell potevano sembrare circoscritte in strutture di facile comprensione e simmetriche. Tanto

che, venivano utilizzati i metodi canonici, come la metodologia di separazione delle variabili, per ottenere risultati analitici molto più precisi. I risultati così ottenuti, infatti, risultavano particolarmente limitanti.

Tra il 1930 e il 1945, Joseph Bishop Keller (brillante matematico statunitense) ideò la teoria geometrica di diffrazione (GTD) utilizzando serie numeriche asintotiche, che però infine risultarono poco efficaci.

Intorno al 1960, l'avvento della tecnologia informatica e l'aumento esponenziale delle esigenze industriali portarono i ricercatori ad interessarsi all'uso di nuovi metodi per la risoluzione di problemi di natura elettromagnetica. L'ascesa dei computer permise un rapido sviluppo di tecniche nel dominio della frequenza. I più importanti approcci computazionali per le equazioni di Maxwell erano metodologie asintotiche basate su alte frequenze ed equazioni integrali; purtroppo, entrambe le tecniche, definite nel dominio della frequenza, presentarono molti limiti. Si pensò quindi di valutare un altro tipo di approccio, di natura più matematica, attraverso metodi numerici. Quest'ultimi permettono di stimare molteplici situazioni in maniera relativamente semplice. Sono noti vari tipi di metodi numerici: il

metodo dei momenti (MoM), il metodo degli elementi finiti (FEM) ed infine, il metodo delle differenze finite nel dominio del tempo (FDTD).

L'algoritmo della FDTD venne proposto per la prima volta intorno al 1966 da Kane S. Yee, un brillante ingegnere elettrico e matematico cinese-americano. In questo metodo le equazioni di Maxwell vengono discretizzate nel dominio del tempo, andando a cambiare a ogni derivata il corrispondente rapporto incrementale. Così facendo, le equazioni differenziali si trasformano in equazioni alle differenze finite, la cui soluzione sta nella divisione della zona di analisi in una griglia regolare.

Nel 1975, a dare una svolta significativa sullo studio della corretta stabilità numerica per l'algoritmo di Yee furono A. Taflove e M.E. Brodwin; infatti, trovarono una soluzione per i problemi riguardanti la dispersione elettromagnetica sinusoidale a S.S in due e tre dimensioni.

Ad oggi il modello FDTD risulta ancora un valido strumento per lo studio dei campi elettromagnetici, essendo un metodo moderatamente semplice ed intuitivo poiché non vi sono presenti calcoli troppo complessi da eseguire. Gli errori possono essere ben noti e possono essere limitati, questo garantisce stabilità e consistenza, inoltre risulta un approccio sistematico e non utilizzando algebra lineare risulta libero dalle limitazioni che quest'ultima porterebbe. Basandosi su un metodo

nel dominio del tempo, considera i caratteri impulsivi in maniera spontanea e naturale, calcolando direttamente la risposta impulsiva e di conseguenza, riesce a gestire in maniera efficiente anche i comportamenti non lineari. Infine, grazie alla suddivisione dello spazio in minuscoli cubi si può riuscire ad indicare per ognuno le caratteristiche del materiale che lo costituisce, così facendo riusciremo ad avere una riproduzione fedele dello spazio di interesse del problema.

Ovviamente il metodo FDTD presenta anche molteplici debolezze; la discretizzazione spazio-temporale delle griglie va a influire sull'accuratezza dei risultati; infatti, deve essere relativamente buona per far sì che risolvano anche le lunghezze d'onda più piccole, permettendo così di rappresentare qualunque forma geometrica. Infine, nel dominio considerato, tutti i punti del dominio devono avere dimensione finita.

In sintesi, possiamo affermare che, la tecnica FDTD fornisce risultati accurati, ingloba in essa complesse geometrie e strutture di antenne e può modellare praticamente qualsiasi tipologia di materiale per la tecnologia elettromagnetica.

[1]

2.2 Algoritmo di Yee:

L'algoritmo di Yee è un metodo di analisi introdotto da Yee ma sviluppato da Taflovey nel 1980, basato su un sistema in grado di calcolare il campo di un corpo scomposto in un reticolo di celle elementari dove vengono inizializzate come costanti le componenti del campo. Una volta che è terminata la discretizzazione della regione di analisi grazie alle celle di Yee, si discretizzano le equazioni di Maxwell nel dominio del tempo sostituendo il relativo rapporto incrementale con ogni derivata. In questo modo, l'algoritmo ci permette di andare a risolvere le equazioni contemporaneamente sia per i campi magnetici che per quelli elettrici, sfruttando la coppia di equazioni di Maxwell, riguardanti il rotore:

Legge di Faraday:

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t}$$

Legge di Ampère:

$$\nabla \times H = J_f + \frac{\partial D}{\partial t}$$

Legge di Gauss per il magnetismo:

$$\nabla \cdot B = 0$$

Legge di Gauss per il campo elettrostatico:

$$\nabla \cdot D = \rho_f$$

In questo caso E e D risultano campi elettrici legati dalla relazione $D = \epsilon E$ con ϵ che rappresenta la permittività elettrica del materiale, mentre invece H e B rappresentano i campi magnetici legati dalla relazione $B = \mu H$, (μ permeabilità magnetica del materiale); ρ_f è la densità di carica elettrica per unità di volume; per concludere abbiamo il parametro $J_f = \sigma E$ che rappresenta la densità di corrente per unità d'area, con σ conducibilità del materiale.

Dalle considerazioni fatte in precedenza, otteniamo sei equazioni alle derivate parziali:

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right)$$

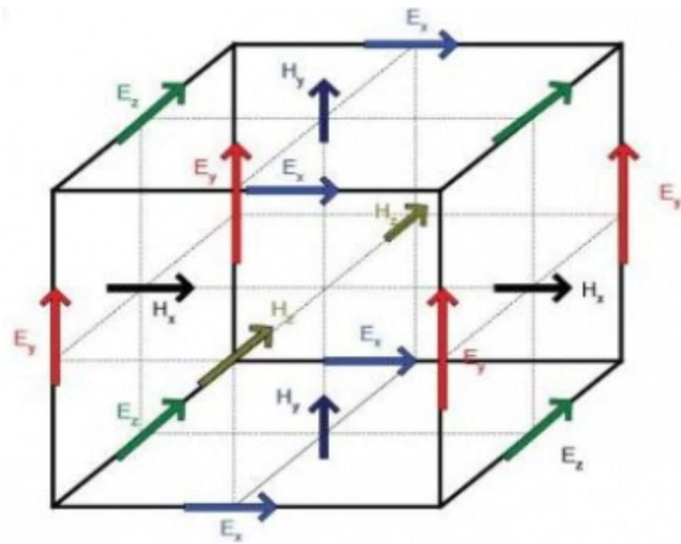
$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma E_x \right)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma E_y \right)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z \right)$$

Ora possiamo realizzare una discretizzazione spazio-temporale che ci permetterà di trovare le equazioni alle differenze finite che si basano sul metodo FDTD per studiare l'andamento delle onde elettromagnetiche con generici corpi tridimensionali;



(figura 1) – Configurazione griglia spazio-tempo nel metodo FDTD.

[2]

3. CARATTERIZZAZIONE ELETTROMAGNETICA DELLA TESTA

3.1 Il modello

Per stabilire simulazioni FDTD su dettagliate parti del corpo umano, la testa nel nostro caso, abbiamo scelto di utilizzare lo smartphone come dispositivo elettronico. Le funzionalità dello smartphone le abbiamo già ampiamente spiegate nell'introduzione, ora ci concentreremo a identificare la posizione scelta per il dispositivo nei relativi assi di riferimenti X;Y;Z e a spiegare quali sono stati i modelli virtuali di corpo umano utilizzati nella nostra simulazione. Il modello preso come riferimento nel nostro studio è quello di Ella, nel quale all'interno sono specificate tutte le informazioni relative a questo modello: dimensioni totali del file, numero identificativo del tessuto specifico, numero della cellula in coordinate e infine una tabella, relativa alle proprietà tissutali dalla pagina web IT'IS.

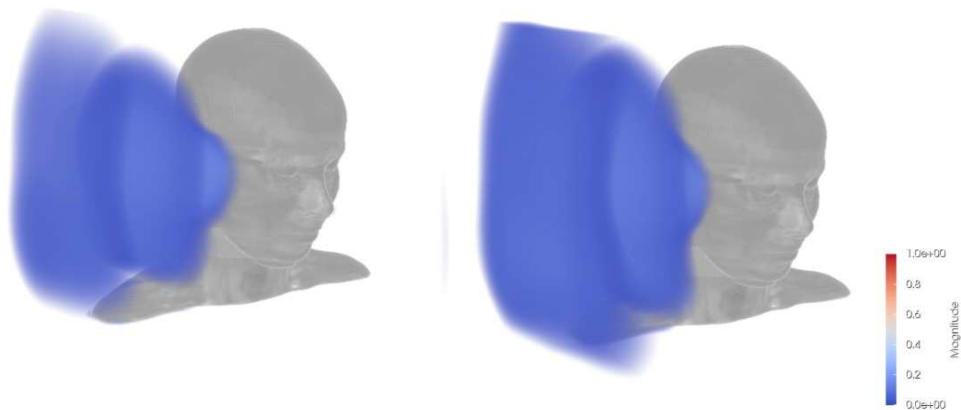


Tissue	Dielectric properties														
Name	ε_0	$\Delta\varepsilon_1$	τ_1 (ms)	α_1	$\Delta\varepsilon_2$	τ_2 (ms)	α_2	σ (S/m)	$\Delta\varepsilon_3$	τ_3 (ms)	α_3	$\Delta\varepsilon_4$	τ_4 (ms)	α_4	
Adrenal Gland	4	55	7.958	0.1	2500	159.155	0.1	0.5	10^5	159.155	0.2	$4 \cdot 10^7$	15.915	0	
Air	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Bile	4	66	7.579	0.05	50	1.592	0	1.4	0	159.155	0.2	0	15.915	0.2	
Blood	4	56	8.377	0.1	5200	132.629	0.1	0.7	0	159.155	0.2	0	15.915	0	
Blood vessel wall	4	40	8.842	0.1	50	3.183	0.1	0.25	10^5	159.155	0.2	10^7	1.592	0	
Bone	2.5	10	13.263	0.2	180	79.577	0.2	0.02	5000	159.155	0.2	10^5	15.915	0	
Bone (Cancellous)	2.5	18	13.263	0.22	300	79.577	0.25	0.07	$2 \cdot 10^4$	159.155	0.2	$2 \cdot 10^7$	15.915	0	
Bone (Cortical)	2.5	10	13.263	0.2	180	79.577	0.2	0.02	5000	159.155	0.2	10^5	15.915	0	
Bone (Marrow red)	2.5	9	14.469	0.2	80	15.915	0.1	10^4	1591.55	0.1	$2 \cdot 10^6$	15.915	0.1		
Bone (Marrow yellow)	2.5	3	7.958	0.2	25	15.915	0.1	0.0005	5000	1591.55	0.1	$2 \cdot 10^6$	15.915	0.1	
Brain	4	40	7.958	0.1	700	15.915	0.15	0.04	$2 \cdot 10^5$	106.103	0.22	$4.5 \cdot 10^7$	5.305	0	
Brain (Grey matter)	4	45	7.958	0.1	400	15.915	0.15	0.02	$2 \cdot 10^5$	106.103	0.22	$4.5 \cdot 10^7$	5.305	0	
Brain (White matter)	4	32	7.958	0.1	100	7.958	0.1	0.02	$4 \cdot 10^4$	53.052	0.3	$3.5 \cdot 10^7$	7.958	0.02	
Breast fat	2.5	3	17.68	0.1	15	63.66	0.1	0.01	$5 \cdot 10^4$	454.7	0.1	$2 \cdot 10^7$	13.26	0	
Breast gland	4	55	7.958	0.1	2500	159.155	0.1	0.5	10^5	159.155	0.2	$4 \cdot 10^7$	15.915	0	
Bronchi	2.5	38	7.958	0.1	400	63.662	0.1	0.3	$5 \cdot 10^4$	15.915	0.2	10^6	15.915	0	
Bronchi lumen	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Cartilage	4	38	13.263	0.15	2500	144.686	0.15	0.15	10^5	318.31	0.1	$4 \cdot 10^7$	15.915	0	
Cerebellum	4	40	7.958	0.1	700	15.915	0.15	0.04	$2 \cdot 10^5$	106.103	0.22	$4.5 \cdot 10^7$	5.305	0	

Figura 2 - Tabella di riferimento presa dall'articolo "SAR Computation Due to Wearable Devices by Using High-Resolution Body Models and FDTD Numerical Code" [2]

Abbiamo suddiviso il compartimento della testa di Ella in tre sezioni, dividendo il segmento spalla-testa con distanza 530 dall'asse x, il segmento nuca-naso con distanza 300 dall'asse y e infine dal segmento punta testa-pianta del piede con distanza 300 dall'asse z. Mentre per quanto riguarda le coordinate dell'antenna abbiamo una distanza di 125 dall'asse XZ, 145 dall'asse XY e una distanza di 170 dall'asse YZ, mentre il parametro che varia (175-165) rappresenta il movimento dello smartphone che si allontana dall'orecchio.

Nelle prossime immagini andremo a vedere come impatta il campo elettromagnetico sul modello di testa preso come riferimento:



Da queste immagini possiamo notare come varia l'intensità del campo elettromagnetico emesso dallo smartphone, (in riferimento al parametro 175-165).

[3]

3.2 Formula di Cole-Cole

Per la nostra indagine dobbiamo andare a studiare i meccanismi di accoppiamento tra un campo elettromagnetico (emesso dallo smartphone) ed un oggetto biologico, tramite la dosimetria elettromagnetica. Con questo termine definiamo la quantità (dose) e la distribuzione di potenza elettromagnetica assorbita dal campione in esame, una volta che sono a conoscenza delle caratteristiche del campo elettromagnetico incidente, come permittività dielettrica e conducibilità. La grandezza fondamentale della dosimetria è il tasso di assorbimento specifico , o chiamato anche SAR (Specific Absorbing Rate) rappresentato dalla potenza elettromagnetica dissipata per unità di massa.

Le metodologie e le tecniche di cui la dosimetria si avvale possono essere di natura sperimentale, teorica e numerica. In questo nostro studio andiamo a sfruttare strumenti che ci permettono di misurare le grandezze dosimetriche, ma quando ciò risulta non possibile, allora dobbiamo andare a realizzare dei modelli che rappresentano il più fedelmente le proprietà elettromagnetiche e morfologiche del corpo.

Per riuscire a studiare questi modelli nel settore dosimetrico, è fondamentale avere una conoscenza completa delle caratteristiche elettriche dei tessuti biologici presi in esame per tutte le frequenze alle quali sono esposti.

3.3 Permittività dielettrica dei tessuti

Definiamo la permittività dielettrica relativa come:

$$\varepsilon_{eff}^*(\omega) = \varepsilon_r' - j \left(\varepsilon_r''(\omega) + \frac{\sigma_{dc}}{\omega \varepsilon_0} \right) = \varepsilon_r'(\omega) - j \left(\frac{\sigma_{ac}(\omega) + \sigma_{dc}}{\omega \varepsilon_0} \right)$$

La conducibilità elettrica è identificata dalla grandezza:

$$\sigma(\omega) = \sigma_{ac}(\omega) + \sigma_{dc} = \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r''(\omega) + \sigma_{dc}$$

La permittività di un tessuto, al crescere della frequenza, decresce facendo riferimento a tre parametri fondamentali noti come:

- Rilassamento α ;
- Rilassamento β ;
- Rilassamento γ ;

Il valore del rilassamento risulta fortemente influenzato dalla costante di tempo τ ; infatti bisogna specificare che per alcuni tessuti potrebbero non essere facilmente distinguibili.

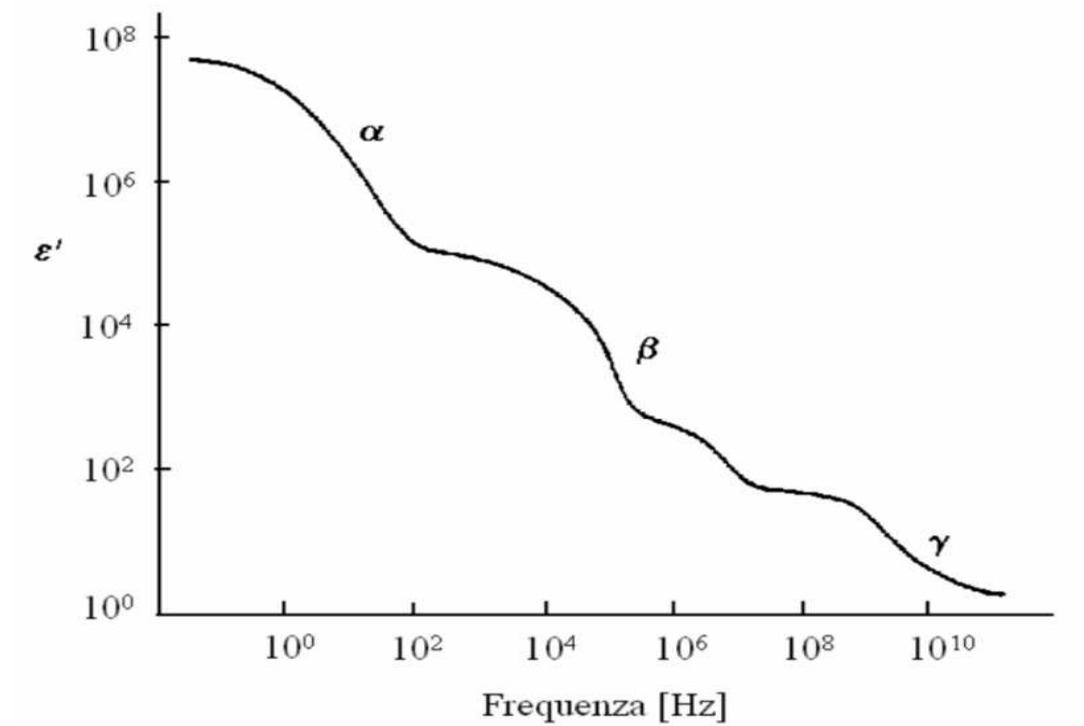


Fig. 3 - Andamento frequenziale tipico della parte reale della permittività dielettrica relativa per un tessuto biologico

Le seguenti proprietà dielettriche, caratterizzate dalla figura precedentemente vista, possiedono un'interazione con le componenti del tessuto a livello cellulare e molecolare; i rilassamenti α e β sono legati alle proprietà intrinseche delle membrane cellulari. Una delle funzioni principali delle membrane è quella di regolare e stabilizzare il flusso di ioni e metaboliti tra le soluzioni elettrolitiche extra e intracellulari.

Il rilassamento α deriva quindi dalla natura disomogenea del tessuto ed è associato alle varie polarizzazioni elettriche che si verificano in prossimità delle membrane cellulari.

Il rilassamento β invece deriva principalmente da due processi: il primo proviene dalle proprietà capacitive delle membrane cellulari nell'immagazzinare la carica elettrica; mentre il secondo deriverebbe dalla polarizzazione di proteine e altre molecole con gruppi ionizzati in soluzione.

Il rilassamento γ è dovuto alla polarizzazione delle molecole d'acqua libere all'interno del tessuto e questo rilassamento è centrato ad una frequenza di 20 GHz, prossima a quella relativa all'acqua pura.

Per concludere, tutti questi rilassamenti si sovrappongono in frequenza, determinando nel tessuto un'ampia dispersione dielettrica;

pertanto, è possibile che lo spettro effettivo di un tessuto in realtà si discosti dall'andamento idealizzato riportato in fig. 2, ossia non presenti in modo evidente le peculiarità viste in precedenza.

[4]

4. ANTENNA PIFA

4.1 Analisi antenna

Un'antenna a F invertita è una tipologia di antenna utilizzata nelle comunicazioni wireless, costituita da un'antenna a monopolo che corre parallela a un piano di massa ed è connessa a massa ad un'estremità. Questa particolare progettazione presenta diversi vantaggi rispetto ad una semplice antenna: risulta più corta e più compatta e inoltre non occorre la necessità di componenti esterni per quanto riguarda l'adattamento di impedenza.

Ideata intorno agli anni '50, il suo utilizzo più diffuso risulta essere l'antenna a F invertita planare, indicata come PIFA (planar inverted-F antenna). Possono essere stampate come un formato a microstriscia, una tecnologia utilizzata che permette ai vari componenti RF di essere progettati fabbricati come parte dello stesso circuito stampato usato.

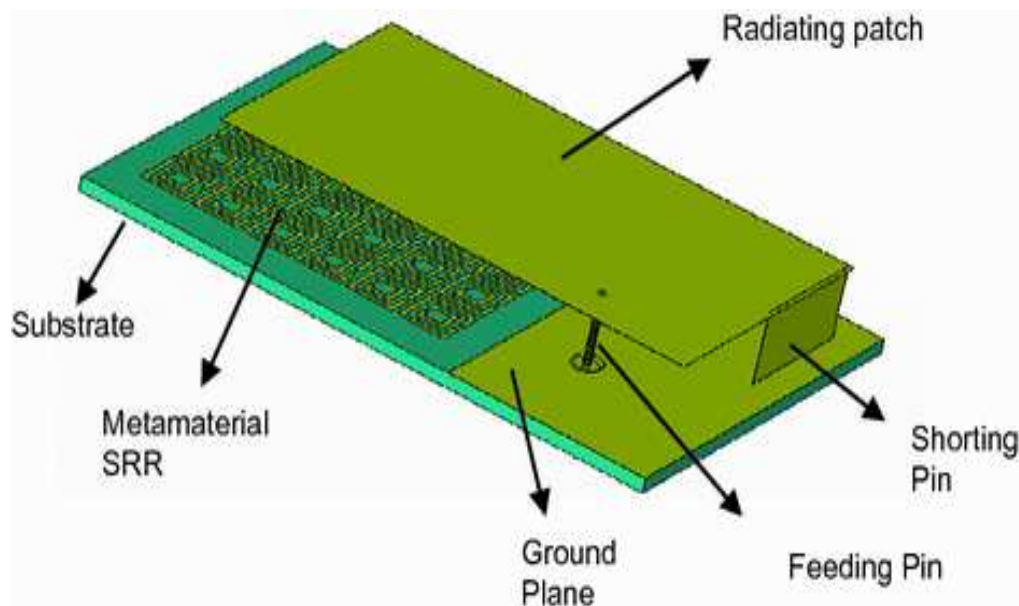
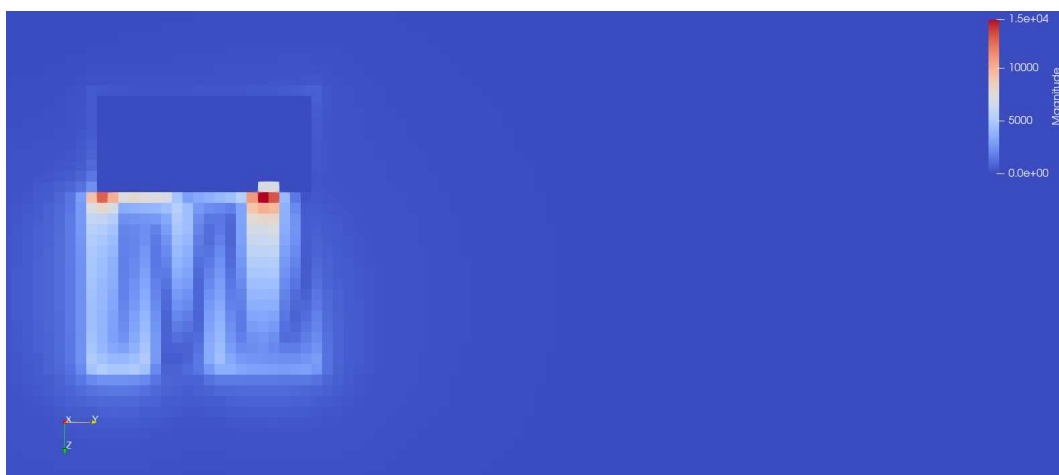
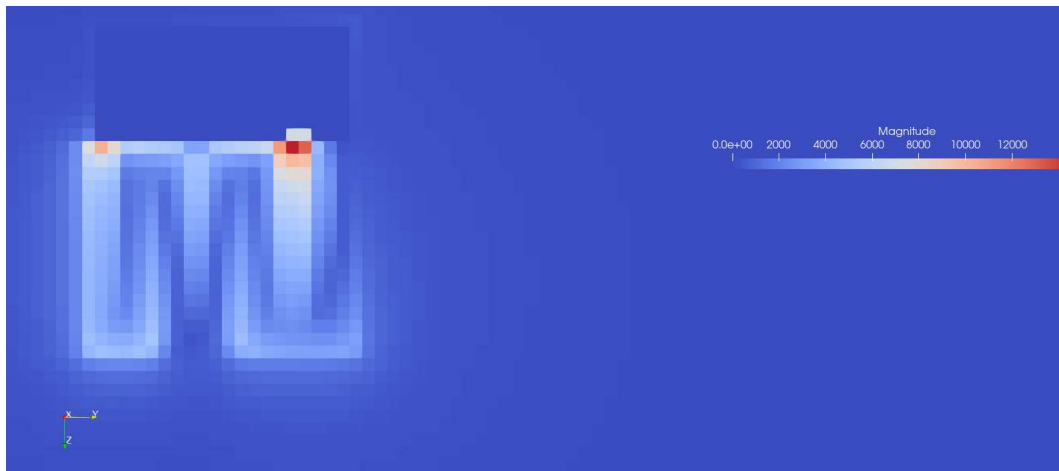


Fig. 4 – Schematizzazione Antenna PIF. Immagine presa dal sito “ResearchGate”

L'antenna risulta risonante a una lunghezza d'onda di un quarto a causa del perno di cortocircuito all'estremità. Possiede ottime qualità SAR; l'alimentazione appare inserita tra l'estremità aperta e quella in corto e va a determinare l'impedenza di ingresso.

Nel nostro studio riporteremo qui di seguito le due rappresentazioni di come appare l'antenna e il relativo campo elettromagnetico:



5. SAR (SPECIFIC ABSORBING RATE)

Il SAR è una grandezza usata per rappresentare e descrivere l'interazione di un campo elettromagnetico con il tessuto biologico; definito dallo standard della Commissione Elettrotecnica Internazionale (IEC) come unità di potenza per massa di tessuto (W/kg), è la misura della velocità con cui l'energia viene assorbita per unità di massa da un corpo umano se esposto a un campo elettromagnetico a radiofrequenza (RF).

Nell'esatto momento in cui le onde elettromagnetiche (a bassa frequenza) impattano il corpo umano, la corrente indotta irradia i nervi e di conseguenza avviene un'esposizione ad onde ad alta frequenza, come nel nostro caso quelle emesse da uno smartphone, provoca un riscaldamento, in grado di aumentare la temperatura corporea.

A questa grandezza è associato il concetto di dosimetria delle radiazioni elettromagnetiche; l'obiettivo della dosimetria, come

spiegato in precedenza, è indicare la misura o la stima dell'energia elettromagnetica assorbita nell'unità di tempo.

Le quantità usate sono:

- 1- SAR locale, che risulta essere l'energia trasferita nell'unità di tempo ad un elemento infinitesimale di volume di corpo, diviso per la massa dell'elemento di volume;
- 2- SAR medio, che è la quantità totale di energia trasferita al corpo nell'unità di tempo, diviso per la massa del corpo.

I parametri che vanno ad influenzare il SAR invece sono molteplici: intensità, frequenza, polarizzazione e configurazione del soggetto irradiato rispetto al campo, dimensioni del corpo preso in considerazione, geometria interna ed esterna e proprietà dielettriche.

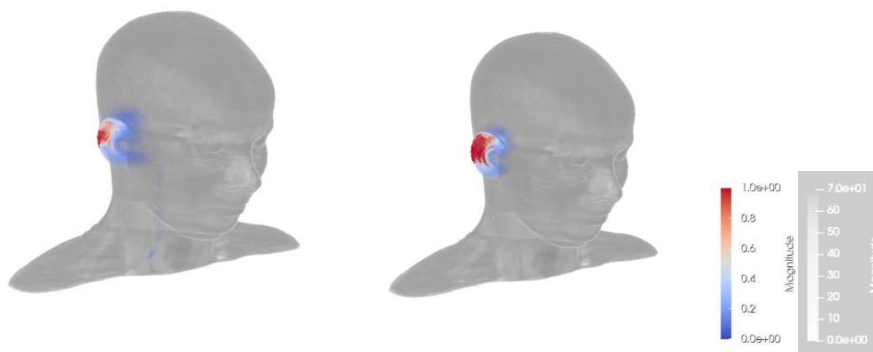
$$SAR = \frac{\sigma |E|^2}{2\rho} \quad [5]$$

5.1 Mappature e risultati

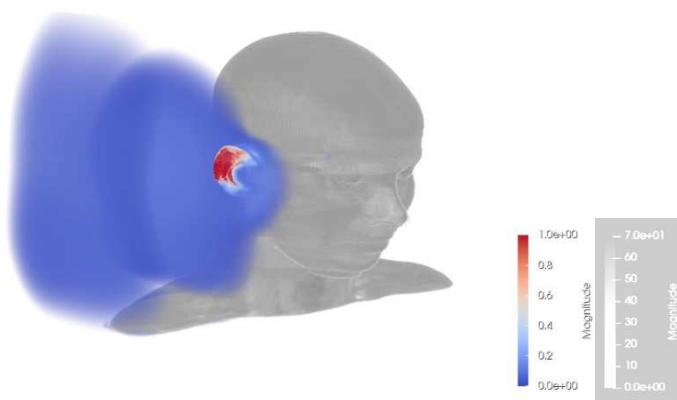
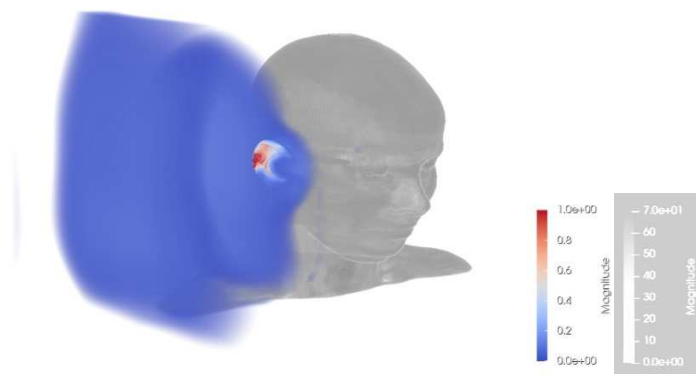
Nel nostro studio abbiamo utilizzato il software ParaView, una piattaforma open-source utilizzabile per l'analisi di dati o applicazioni di visualizzazione. Le analisi grafiche vengono visualizzate in 3D e viene utilizzato in maniera molto consistente nell'ambito scientifico.

Il progetto ParaView nacque intorno agli anni 2000 tramite i fondi concessi dal US Department of Energy ASCI Views program e grazie alla collaborazione tra Kitware e Los Alamos National Laboratory dove pubblicarono il primo prototipo nell'ottobre 2002.

Qui di seguito, possiamo notare come viene rappresentato il SAR, tramite ParaView:



Osserviamo invece gli effetti sovrapposti tra intensità del SAR e campo elettromagnetico emesso dallo smartphone:



[6]

6. CONCLUSIONI

Il lavoro che abbiamo svolto ha come obiettivo finale la caratterizzazione elettromagnetica della testa tramite simulazioni FDTD. Lo smartphone e il modello di Ella sono stati fedelmente riprodotti in 3D, raggiungendo l'obiettivo.

La posizione del nostro smartphone risulta fondamentale al fine dello studio del campo elettromagnetico e pronto per future applicazioni.

BIBLIOGRAFIA

- 1- *A. Taflove, S.C. Hagness, Computational Electrodynamics The Finite- Difference Time-Domain Method, second edition.*
- 2- *F.T. Ulaby, Fundamentals of Applied Electromagnetics, Pearson Education 2004, first edition*
- 3- *Sar Computation Due to Wearable Devices by using high-resolution body models and FDTD numerical code; “Greta Silla, Luca Bastianelli, Emanuel Colella, Franco Moglie and Valter Mariani Primiani”*
- 4- *Fenomeni Bioelettrici – Capitolo 6; “Federico Carpi and Danilo De Rossi*
- 5- *Tratto da Greta Silla 1.4 – Specific Absorbing Rate (SAR)*
- 6- *Download ParaView: <https://www.paraview.org/download/>*

*Figura 3 - Immagine presa da ResearchGate:
https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-the-PIFA-Antenna-2_fig1_332834425*

