



Ricerca di Sistema elettrico

Dosimetria numerica di un sistema di bobine per il trasferimento di potenza dinamico senza contatto

Rosanna Pinto, Vanni Lopresto

DOSIMETRIA NUMERICA DI UN SISTEMA PER IL TRASFERIMENTO DI POTENZA DINAMICO SENZA CONTATTO

Rosanna Pinto, Vanni Lopresto (ENEA)

Settembre 2017

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2016

Area: Efficienza energetica negli usi finali elettrici e risparmio di energia negli usi finali elettrici ed interazione con altri vettori elettrici

Progetto: D.7 “Mobilità elettrica sostenibile”

Obiettivo: Tecnologie ed infrastrutture di ricarica veicoli elettrici , sub-obiettivo b1: Ricarica wireless dinamica

Responsabile del Progetto: ing. Antonino Genovese, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	5
1 INTRODUZIONE	6
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	7
2.1 MODELLO NUMERICO DEL NUOVO SISTEMA DI BOBINE	7
2.2 VALUTAZIONE NUMERICA DEI CAMPI MAGNETICI EMESSI DALLA COPPIA DI BOBINE DD	10
2.3 DOSIMETRIA NUMERICA IN UN MODELLO ELLISSOIDE OMOGENEO	11
2.3.1 <i>Dosimetria in ellissoide omogeneo posto nella Posizione A</i>	14
2.3.2 <i>Dosimetria in ellissoide omogeneo posto nella Posizione B</i>	15
2.3.3 <i>Dosimetria in ellissoide omogeneo posto nella Posizione C</i>	16
2.3.4 <i>Dosimetria in ellissoide omogeneo posto nella Posizione D</i>	17
2.3.5 <i>Dosimetria in ellissoide omogeneo posto nella Posizione E</i>	18
2.3.6 <i>Dosimetria in ellissoide omogeneo posto nella Posizione F</i>	19
2.4 DOSIMETRIA NEL MODELLO REALISTICO POSTO IN POSIZIONE D.....	19
3 CONCLUSIONI.....	21
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	22

Sommario

La ricarica dinamica senza contatto (RDSC) per i veicoli elettrici rappresenta una sfida tecnologica molto promettente per superare il limite rappresentato dall' autonomia delle batterie, che ancora rappresenta un ostacolo alla diffusione capillare della mobilità elettrica. Nel corso di questa annualità il gruppo del Prof Bertoluzzo, afferente al Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Padova, ha realizzato un progetto di massima di un prototipo per la RDSC, con bobine a geometria DD, operante alla frequenza di 85 kHz. Rispetto ai risultati raggiunti nella scorsa annualità, è stato necessario elaborare nuove specifiche che rendessero il sistema adatto alla trazione dell'auto SPAZIA di proprietà dell'ENEA. La prima parte di questo rapporto riguarda, quindi, la messa a punto del progetto finale del nuovo sistema di bobine mediante l'utilizzo di un codice di calcolo commerciale per la simulazione elettromagnetica. Il progetto così elaborato è stato inoltrato a una ditta artigiana che si è mostrata interessata alla realizzazione del prototipo. Una volta definita la nuova geometria, si è proceduto a una valutazione numerica dei campi elettromagnetici emessi dal sistema di bobine per verificare la conformità alle normative vigenti. Nel caso in esame, trattandosi di una sorgente ad 85 kHz, ai fini della valutazione delle emissioni, ci si è riferiti alla raccomandazione del Consiglio dell'Unione europea 1999/519/EC, che mutua l'impianto normativo definito nelle linee guida ICNIRP del 1998. Secondo questo approccio, in prima istanza è necessario confrontare le grandezze radiometriche, legate all'intensità del campo elettromagnetico imperturbato, con i rispettivi livelli di riferimento prescritti dalla normativa. Se uno di questi livelli è superato, si rende necessaria una verifica del rispetto dei limiti di base che coinvolgono le grandezze dosimetriche, cioè le grandezze fisiche indotte nel corpo del soggetto esposto e più direttamente connesse agli effetti sanitari che si intende prevenire.

Rispettando questo approccio, si è messa a punto una procedura di valutazione dell'esposizione che tenesse conto anche degli oneri computazionali delle simulazioni. Questa procedura ha permesso di identificare, fra numerosi scenari espositivi, quelli che presentavano le esposizioni maggiori e quindi, alla fine, di limitare a due il numero delle simulazioni volte agli studi dosimetrici, più approfonditi, su un modello realistico umano disomogeneo. Solo in uno dei due scenari considerati per gli studi dosimetrici sul modello antropomorfo si è superato il valore del limite di base per il torso e la testa fissato dalla raccomandazione europea, ottenendo un valore massimo calcolato pari a 0.24 A/m^2 .

1 Introduzione

La ricarica dinamica senza contatto (RDSC) per i veicoli elettrici rappresenta una sfida tecnologica molto promettente per superare il limite rappresentato dall' autonomia delle batterie, che ancora rappresenta un ostacolo alla diffusione capillare della mobilità elettrica. Nel corso di questi ultimi anni si sono realizzati numerosi progetti per la RDSC, alcuni derivanti dalla ricerca sulla ricarica statica senza contatto, come ad esempio, la tecnologia basata sull'accoppiamento induttivo magnetico. In quest'ultimo caso l'intero sistema prevede la realizzazione di una serie di bobine trasmettenti disposte su strada in modo tale da funzionare come un percorso elettrificato e da una bobina ricevente a bordo dell'auto che ricarica le batterie durante il movimento. A differenza dei sistemi a ricarica statica, i sistemi di RDSC devono avere bobine trasmettenti e riceventi molto robuste, nonché un'alta tolleranza ai disallineamenti tra gli assi delle bobine stesse. Devono inoltre avere un buon rendimento nel trasferimento della potenza anche con distanze tra le bobine che possono essere di alcune decine di centimetri e dei costi di costruzione accettabili. La scelta della geometria per le bobine trasmettente (track coil) e ricevente (pickup coil) rappresenta uno degli elementi fondamentali per il soddisfacimento dei criteri sopracitati. Una delle geometrie più promettenti è la bobina a 'doppia D' (DD coil), proposta da un gruppo neozelandese [1]. Il sistema trasmettente-ricevente formato da questa tipologia di bobine mantiene un buon accoppiamento per spostamenti limitati lungo l'asse di marcia e mostra una minore sensibilità ai disallineamenti laterali rispetto ad altre geometrie.

Un altro elemento non secondario, di cui tenere conto, è rappresentato dall'emissione di campi elettromagnetici fortuiti da parte di questi sistemi che devono essere conformi alla raccomandazione Europea 1999/519/EC [2], che fornisce i criteri minimi per la protezione dei cittadini europei dalle esposizioni ai campi elettromagnetici, oltre che alle regolamentazioni nazionali [3]. Il DPCM 8 luglio 2003 per le basse frequenze (0 Hz – 100 kHz) e gli elettrodotti, "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." (G.U. n. 200 del 29-8-2003), [3], stabilisce che "A tutela delle esposizioni a campi a frequenze comprese tra 0 Hz e 100 kHz, generati da sorgenti non riconducibili agli elettrodotti, si applica l'insieme completo delle restrizioni stabilite nella raccomandazione del Consiglio dell'Unione europea del 12 luglio 1999". Ad oggi, ci sono diversi lavori in letteratura che si sono occupati della valutazione dell'esposizione dovuta ai sistemi di trasferimento di potenza senza contatto di tipo statico [4 – 6], ma non c'è nessun lavoro che riguarda i sistemi di ricarica senza contatto di tipo dinamico.

Nel corso della prima annualità, il gruppo del Prof Bertoluzzo, afferente al Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Padova, ha realizzato un progetto di massima di un prototipo per la RDSC con bobine a geometria DD, operante alla frequenza di 85 kHz, destinato alla ricarica delle batterie dell'auto elettrica Urb-e dell'ENEA. Le specifiche di massima sono state fornite al gruppo di bioelettromagnetismo del dipartimento SSPT dell'ENEA che ha progettato un sistema di bobine DD soddisfacenti le specifiche richieste utilizzando un codice di calcolo che implementa il metodo degli elementi finiti per la simulazione elettromagnetica.

Agli inizi di questa annualità è stato comunicato al gruppo di lavoro che l'auto di destinazione del prototipo sarebbe cambiata, pertanto l'Università di Padova ha elaborato nuove specifiche [7] che poi sono state trasferite al gruppo di bioelettromagnetismo dell'ENEA per la definizione del progetto delle nuove bobine DD operanti alla frequenza di 85 kHz. Per il progetto finale si è tenuto conto anche delle specifiche tecniche che sono emerse dal confronto con la ditta artigiana che si è mostrata interessata alla realizzazione futura del prototipo. La prima parte di questa annualità ha riguardato quindi la messa a punto del progetto finale del nuovo sistema di bobine. Una volta definita la nuova geometria, si è proceduto a una valutazione numerica dei campi elettromagnetici emessi dal sistema di bobine per verificare la conformità alle normative vigenti. Nel caso in esame, trattandosi di una sorgente ad 85 kHz ai fini della valutazione delle emissioni ci si riferirà prevalentemente alla raccomandazione del Consiglio dell'Unione Europea, che si basa sul sistema dei limiti di base (riferiti a grandezze dosimetriche, cioè grandezze rappresentative dell'interazione del campo EM con i tessuti biologici alle diverse frequenze) e dei livelli di riferimento

(riferiti a grandezze radiometriche, cioè grandezze fisiche direttamente misurabili) [2]. I limiti di esposizione della raccomandazione europea recepiscono i limiti indicati nelle linee guida della International Commission on Non-Ionising Radiation Protection pubblicati nel 1998 (ICNIRP 1998) [8]. Tali limiti si basano sugli effetti biofisici (diretti e indiretti) scientificamente accertati, i quali sono associati alle esposizioni acute ai CEM, e non affrontano eventuali effetti associati alle esposizioni a lungo termine, per cui non si dispone attualmente di prove scientifiche conclusive in grado di stabilire una relazione causale. Secondo questo approccio, in prima istanza è necessario confrontare le grandezze radiometriche, legate all'intensità del CEM imperturbato, con i rispettivi livelli di riferimento prescritti dalla normativa. Se uno di questi livelli è superato, si rende necessaria una verifica del rispetto dei limiti di base che, come detto, coinvolgono le grandezze dosimetriche, cioè le grandezze fisiche indotte nel corpo del soggetto esposto e più direttamente connesse agli effetti sanitari che si intende prevenire.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Modello numerico del nuovo sistema di bobine

Una bobina di geometria DD è costituita da due bobine uguali a forma di D connesse in serie, ma disposte in modo tale che la corrente scorre in verso orario in una e in senso antiorario nell'altra. Questo fa sì che la bobina DD sia polarizzata, aumentando le sue proprietà di accoppiamento induttivo rispetto ad altre geometrie. In un sistema di riferimento ortogonale, per convenzione, gli assi x e y della bobina DD sono posti rispettivamente allineati e ortogonali al lato comune delle due sotto bobine, l'asse z è posto ortogonalmente al piano identificato dalla bobina (Figura1).

L'Università di Padova ha fornito le specifiche tecniche di un sistema di bobine di tipo DD per la RDSC di una piccola auto elettrica (l'auto elettrica SPAZIA di proprietà dell'ENEA). Queste specifiche sono riassunte in Tabella 1 [7].

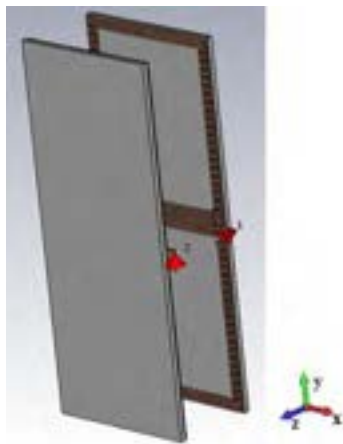


Figura 1. Modello del sistema di bobine DD coil accoppiate. Nell'immagine è rappresentato anche il nucleo di ferriti (in grigio) necessario al miglioramento del rendimento del sistema

Tabella1. Specifiche del nuovo sistema di bobine a geometria DD

Frequenza di lavoro	85 kHz
Massima dimensione lungo x	375 mm
Massima dimensione lungo y	900 mm
Numero di avvolgimenti	4
Distanza tra gli avvolgimenti	≥ 1 mm
Distanza tra le bobine	190 mm
Mutua Induttanza	15 μ H
Corrente in trasmissione	12.5 A (valore di picco)
Corrente in ricezione	80 A (valore di picco)

Sia la bobina di ricezione che quella di trasmissione hanno la stessa geometria e dimensione.

Il primo passo è stato quello di selezionare un filo di Litz adatto alla realizzazione degli avvolgimenti: la scelta è legata alla frequenza di utilizzo (85 kHz) e alla massima corrente che fluisce all'interno delle bobine (90 A, tenuto conto di un margine di sicurezza pari almeno al 10%). Il filo di Litz scelto per la realizzazione finale del prototipo è costituito da 3300 fili ognuno del diametro di 0.1 mm. Il diametro finale di rame è pari a 5.74 mm, la sezione finale del filo, tenuto conto dell'ingombro del rivestimento di Mylar è pari a 7.43 mm. Le singole bobine hanno dei nuclei di ferrite per confinare e guidare il campo magnetico preferenzialmente all'interno dello spazio delimitato tra le bobine stesse. In questo modo sia la mutua induttanza che l'auto induttanza delle bobine aumenta, inoltre il campo disperso attorno al sistema di bobine diminuisce notevolmente. In genere si utilizza uno strato di ferrite posto dietro ognuna delle bobine [8] (Figura 1), ma in [4] è stata dimostrata, per gli stessi scopi, la fattibilità dell'utilizzo di barre di ferrite, separate tra di loro e poste in modo opportuno. Così è possibile risparmiare sul costo delle ferriti e sul peso finale del sistema, senza degradare il rendimento del trasferimento di potenza.

L'ottimizzazione del sistema di bobine è stata effettuata attraverso delle simulazioni con un codice di calcolo commerciale, nello specifico con il solutore elettromagnetico in frequenza (FEM) di CST Microwave Studio (Computer Simulation Technologies, Germania). Per ridurre la complessità del modello e quindi aumentare la potenza di calcolo, per le simulazioni si è considerata una geometria rettangolare per le bobine DD al posto di quella ellittica, più realistica. Inoltre il filo di Litz è stato modellizzato come un singolo filo di conduttore elettrico perfetto (PEC) a sezione rettangolare ($5.74 \times 2.00 \text{ mm}^2$). Le bobine DD sono state modellizzate con 4 avvolgimenti distanziati tra di loro di 2 mm per tenere conto dell'ingombro del filo di Litz scelto per la realizzazione del prototipo finale. Per alimentare le bobine è stata scelta una porta discreta, denominata S-parameter, che simula una sorgente di corrente con una impedenza interna posta in parallelo che stimolando il carico con una potenza di 1 W, abilita la misurazione dei parametri di scattering a partire dalla potenza incidente e da quella riflessa alla porta. Nelle simulazioni è stato usato un grigliato di celle tetraedriche: la dimensione delle celle è stata impostata ad almeno 2 mm nella bobina. Per le barre di ferrite si è scelto di simulare le ferriti N87 (permeabilità magnetica, μ_r , pari a 2200) commercialmente disponibili in piccole barre della dimensione $9.3 \times 2.8 \times 1.6 \text{ cm}^3$. Ogni barra è costituita da 10 pezzi fino ad arrivare a una lunghezza totale pari a 93 cm. Il numero ottimale di barre di ferrite da disporre lungo l'asse x del sistema si è trovato facendo delle simulazioni che hanno permesso di calcolare la mutua induttanza (M) e il coefficiente di accoppiamento (k), al variare del numero delle barre, equidistanti tra di loro. Lo studio è stato fatto a partire dallo strato unico (dimensione $37.5 \times 93 \times 1.6 \text{ cm}^3$) e considerando un numero decrescente di barre fino a 4. In Figura 2 sono mostrati gli andamenti di M e k al variare del numero di barre: si può notare che sia il valore di M che il quello di k aumentano con l'aumentare del numero delle barre, inoltre con un numero di barre inferiore a 7 il valore di M risulta essere minore del valore di stabilito dalle specifiche ($15 \mu\text{H}$, Tabella1). Per questa ragione si è scelto un numero pari a 7 per le barre di ferrite da realizzare nel prototipo finale. Il valore di k per 7 barre è pari a 0.26, considerato pienamente accettabile per questo tipo di applicazioni [4]. La configurazione finale del prototipo prevede la realizzazione di tre bobine di tipo QQ a terra (chiamate #1, #2, #3), affiancate fra di loro sul lato lungo e una bobina a bordo (chiamata #4) a 19 cm di distanza dal sistema a terra. La distanza tra le bobine a terra è pari a 45 cm. Questa distanza tiene conto del supporto delle singole bobine e delle barre di ferrite la cui dimensione finale sarà pari a $980 \times 420 \times 50 \text{ mm}^3$. Questa configurazione è stata simulata per effettuare una analisi delle variazioni di M_{ij} ($i = 4, j = 1, 2, 3$) e delle induttanze L_i ($i = 1, 2, 3$) delle bobine al variare della posizione lungo l'asse x della bobina #4 sulle altre tre. Lo scorrimento (shift) della bobina #4 è stato simulato con passi discreti: shift = 0 rappresenta la posizione in cui la bobina #4 è perfettamente sovrapposta alla bobina centrale #2. Per l'analisi si è considerato un intervallo spaziale da -420 mm a 420 mm lungo l'asse x.

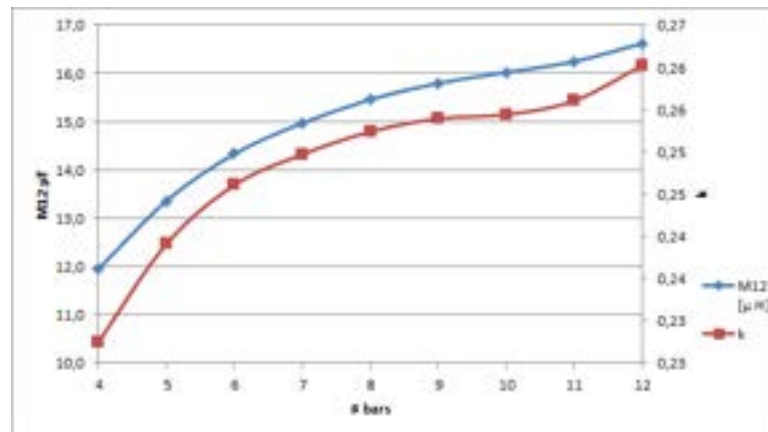


Figura 2. Mutua induttanza e fattore di accoppiamento ottenute al variare del numero di barre di ferrite. I valori corrispondenti al numero 12 sono quelli calcolati considerando lo strato unico di ferrite

Gli andamenti delle 4 induttanze sono mostrati in Figura 3.: come atteso, l'induttanza della bobina a bordo (L_4) è praticamente costante ($59.90 \pm 0.03 \mu H$) durante il movimento, inoltre per le induttanze delle bobine a terra (L_1, L_2, L_3) la variazione rispetto al loro valor medio non supera il 2.2 %. Gli andamenti di M_{41}, M_{42}, M_{43} , sono mostrati in Figura 4: tutte e tre le mutue induttanze hanno valori oscillanti, il loro valore massimo ($14.9 \mu H$) si presenta ove la bobina #4 si sovrappone perfettamente a #1 (M_{41} , shift = -420), #2 (M_{42} , shift = 0), #3 (M_{43} , shift = +420). La somma di M_{41}, M_{42}, M_{43} , anche questa riportata in Figura 4, è uguale a $17.0 \pm 0.5 \mu H$, rimane costante durante lo scorrimento, pertanto la tensione indotta nella bobina a bordo può essere considerata costante durante il movimento.

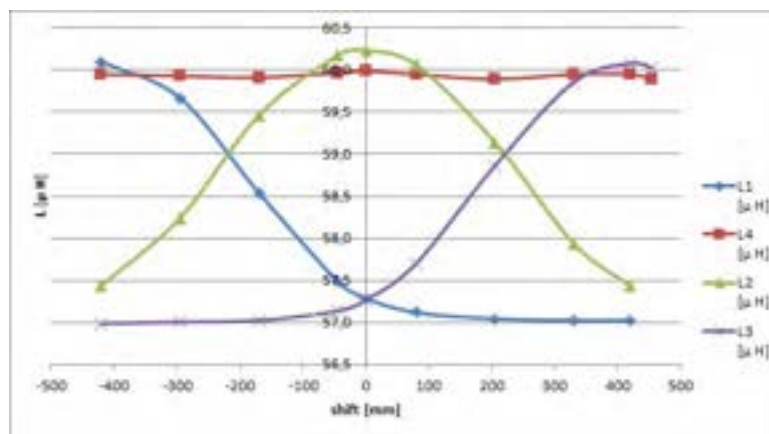


Figura 3. Induttanze delle bobine a terra (L_1, L_2, L_3) e della bobina a bordo (L_4) in funzione del movimento di quest'ultima sulle altre lungo l'asse x

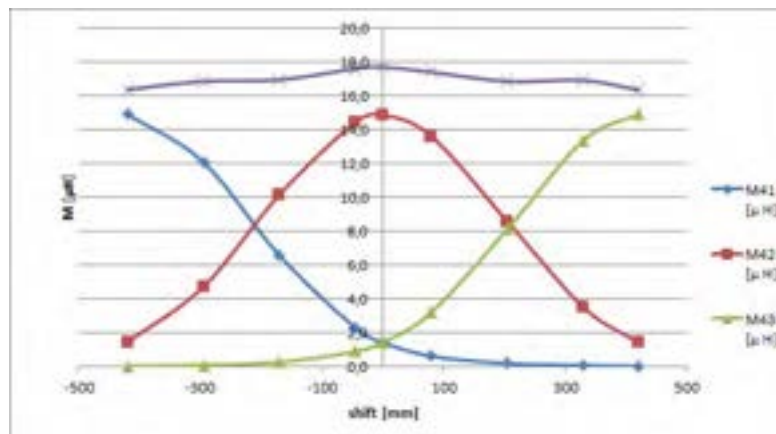


Figura 4. Mutue Induttanze tra le bobine a terra e quella a bordo in funzione del movimento di quest'ultima sulle altre lungo l'asse x

Completata questa fase si è consegnato il progetto finale delle bobine a una ditta che costruirà il prototipo.

2.2 Valutazione numerica dei campi magnetici emessi dalla coppia di bobine DD

I sistemi di ricarica senza contatto generano dei campi magnetici i cui livelli possono eccedere i livelli di riferimento fissati dalla raccomandazione europea [2] e dalla normativa nazionale vigente [3]. Nel caso del sistema in esame, il campo di induzione magnetica (B) è stato valutato numericamente utilizzando il solutore in bassa frequenza di EM Studio della CST. La geometria del sistema di bobine DD è la stessa di quella definita nel paragrafo precedente. L'alimentazione delle due bobine è stata impostata con una sorgente del tipo 'coil source' presente nell'intermezzo di aria presente in ogni bobina. Le correnti impostate sono state di 12.5 A di picco e 80 A di picco rispettivamente per la bobina trasmittente e ricevente. Anche in questo caso si è usato un grigliato a tetraedri con un infittimento locale del grigliato di 2 mm all'interno delle bobine. In Figura 5 sono mostrati le distribuzioni di B sui piani yz (Figura 5a) e xz (Figura 5b) posti a 30 cm dalle bobine. Nella legenda si è impostato il fondo scala a $33.1 \mu\text{T}$ che è uguale al livello di riferimento (picco) ad 85 kHz fissato in [2] per l'esposizione della popolazione. Come è evidente, sui due piani il valore di riferimento fissato per il campo B viene superato ($B_{\text{max}} = 43.8 \mu\text{T}$ sul piano xz e $B_{\text{max}} = 55.3 \mu\text{T}$ nel piano yz). Questo dato è stato confermato anche nel caso in cui è stato simulato lo scorrimento della bobina #4 sulle bobine #1, #2, #3. In figura 6 sono presentati i valori di picco valutati numericamente su un piano xz posto a 30 cm dalle bobine e ottenuti variando secondo passi discreti la posizione della bobina #4 sulle altre. Anche in questo caso si è considerato un intervallo spaziale da -420 mm a 420 mm lungo l'asse x per lo spostamento. Il valore shift = 0 è il punto in cui la bobina #4 è perfettamente allineata con la bobina #2.

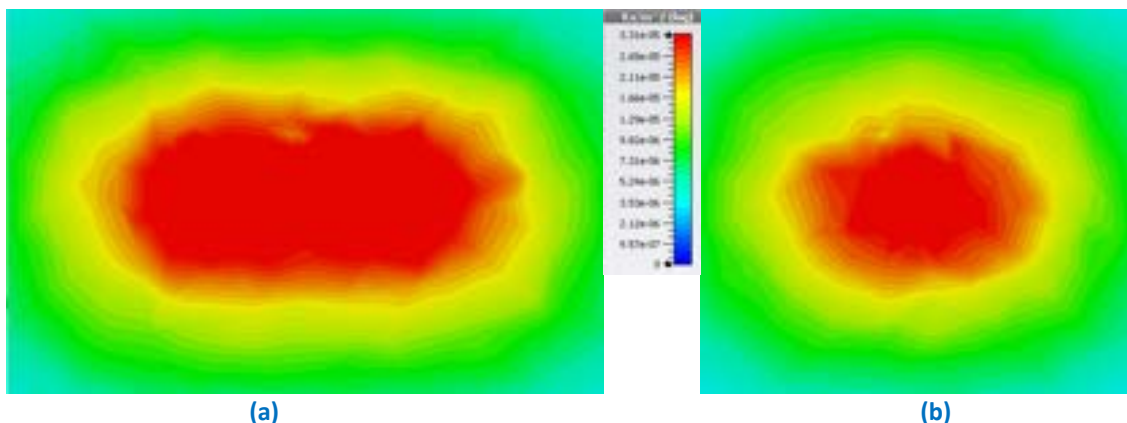


Figura 5. Campo B valutato sui piani yz (a) e xz (b) posti a 30 cm dalla coppia di bobine DD

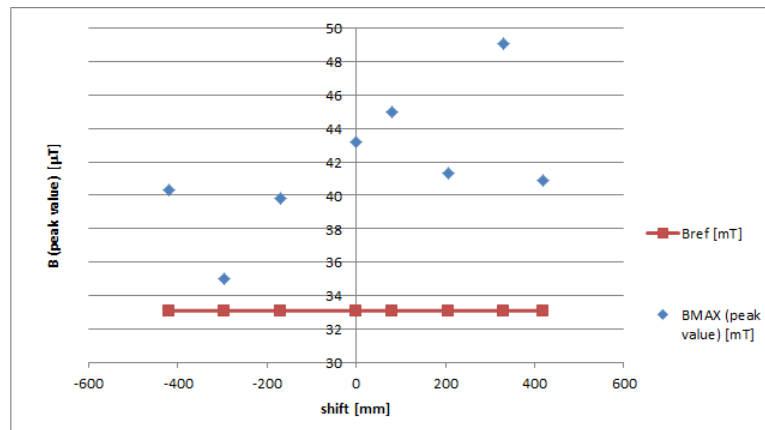


Figura 6. Valori massimi del campo B di picco valutati su un piano xz posto a 30 cm dal sistema e ottenuti al variare della posizione della bobina #4 sulle bobine #1, #2, #3. La linea continua rossa rappresenta il valore di riferimento a 33.1 μT definito in [2].

Dall'impianto normativo definito in [2], dato che il livello di riferimento su campo B è stato superato si è reso necessaria la verifica del rispetto dei limiti di base che coinvolgono le grandezze dosimetriche. Alla frequenza di 85 kHz, la grandezza dosimetrica da considerare è la densità di corrente (A/m^2), indotta all'interno del corpo esposto.

2.3 Dosimetria numerica in un modello ellissoide omogeneo

Gli studi preliminari di dosimetria sono stati eseguiti utilizzando il fantoccio ellissoidale omogeneo definito in [9]. Questi studi sono stati utili ad individuare lo scenario di esposizione peggiore in una condizione semplificata e poco onerosa per il calcolo; fatto questo è stato possibile procedere con le simulazioni che utilizzavano un modello disomogeneo, antropomorfo, più realistico.

Il modello ellissoidale ha un raggio lungo pari a 750 mm e un raggio corto pari a 175 mm, è costituito da tessuto 'muscolo' le cui proprietà dielettriche ad 85 kHz sono: permittività dielettrica relativa $\epsilon_r = 8496.6$ e conducibilità $\sigma = 0.36 \text{ S}/\text{m}$. Le simulazioni sono state eseguite con il solutore a bassa frequenza EM Studio di CST.

In una prima fase si è studiata una situazione semplice in cui la sorgente era rappresentata da una sola coppia di bobina DD, il fantoccio ha asse maggiore perpendicolare al sistema ed è stato posto a 30 cm di distanza lungo la direzione x e lungo la direzione y. In questo caso si è simulata una condizione di laboratorio in cui il funzionamento delle bobine viene provato su un tavolo di lavoro. Nella figura 7, sono mostrate le distribuzioni della densità di corrente sul piano $xz = 0$ quando il fantoccio è posto a 30 cm dal sistema di bobine lungo la direzione x (Figura 7a) e sul piano $yz = 0$ quando il fantoccio è posto a 30 cm dal sistema di bobine lungo la direzione y (Figura 7b). Per entrambe le distribuzioni si è posto come fondo scala il valore di $0.17 \text{ A}/\text{m}^2$, che rappresenta il limite di base (valore efficace) ad 85 kHz definito in [2]. Come si può vedere, in questo semplice caso il valore del limite di base viene superato.

In figura 8 sono mostrate le funzioni di distribuzione cumulativa relative ai casi dell'ellissoide posto a 30 cm dal sistema di bobine lungo la direzione x (Figura 8a) e dell'ellissoide posto a 30 cm dal sistema di bobine lungo la direzione y. La funzione di distribuzione cumulativa, calcolata su un insieme di dati, associa a ciascun valore delle ascisse la probabilità che l'insieme dei dati a disposizione abbia valori minori o uguali ad x. Pertanto, a partire dall'insieme dei valori di densità di corrente indotta all'interno del fantoccio, si può definire la funzione di distribuzione e, ponendo come soglia il valore di $0.17 \text{ A}/\text{m}^2$, si può stabilire la percentuale dei valori che superano tale soglia. Dato che ad ogni valore di densità di corrente indotta è associato un volume pari alla cella di calcolo, questa percentuale rappresenta, per estrapolazione, anche la quantità di volume dell'ellissoide in cui viene superato il limite di base imposto.

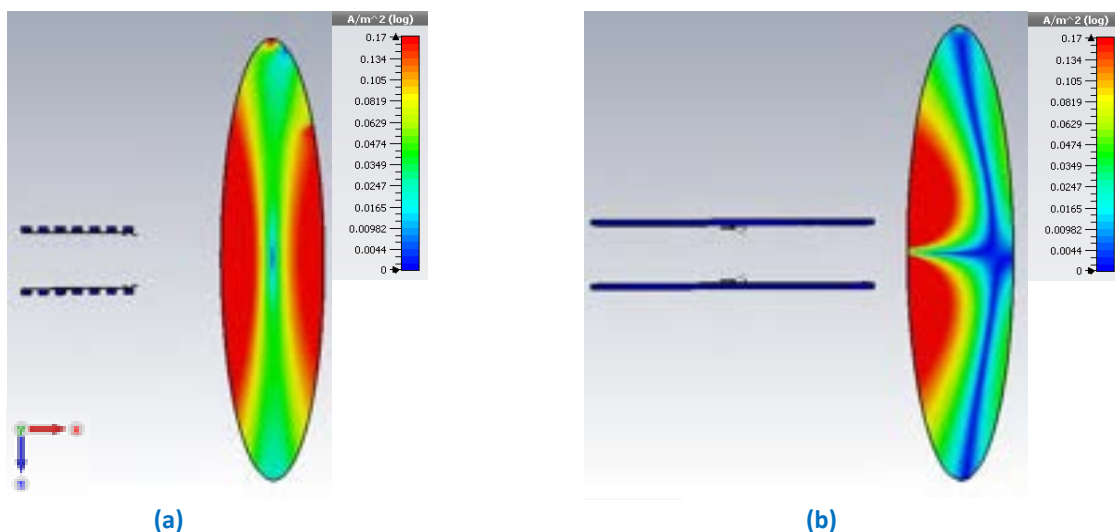


Figura 7. Distribuzioni della densità di corrente sui piani: (a) $xz = 0$ con il fantoccio ellissoidale posto a 30 cm dal sistema di bobine lungo la direzione x, (b) $yz = 0$ con il fantoccio ellissoidale posto a 30 cm dal sistema di bobine lungo la direzione y

Nel caso dell'ellissoide posto a 30 cm di distanza dal sistema di bobine, lungo la direzione x, circa il 40% del volume esposto supera il valore del limite di base (Figura 8a), nel caso dell'ellissoide posto a 30 cm di distanza dalle bobine lungo la direzione y, circa il 57% del volume esposto supera il valore del limite di base per la densità di corrente indotta (Figura 8b)

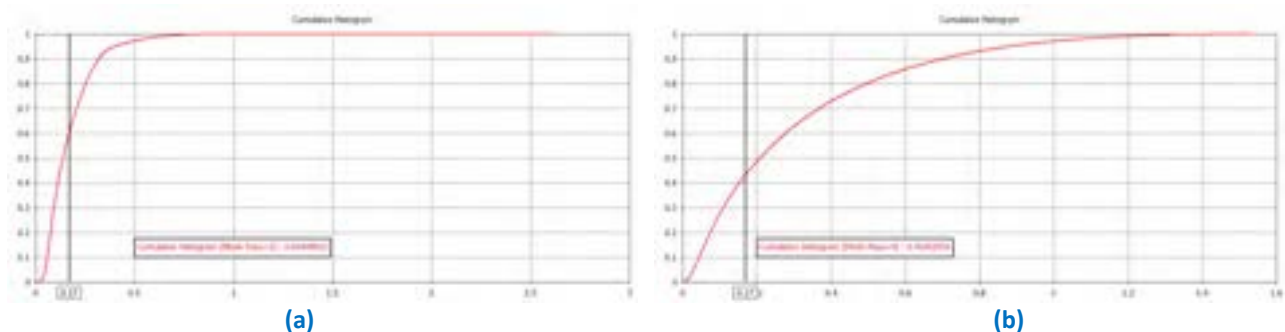


Figura 8. Funzioni di distribuzione cumulativa dei valori di densità di corrente indotta nel fantoccio ellissoidale posto a 30 cm dal sistema di bobine lungo la direzione x (a) e nel fantoccio ellissoidale posto a 30 cm dal sistema di bobine lungo la direzione y (b)

Verificata la possibilità che in una situazione semplificata (singola coppia di bobine) si possono superare i limiti di base fissati in [2], si è simulata una situazione espositiva pari alla configurazione finale del prototipo che prevede tre bobine di tipo QQ a terra (chiamate #1, #2, #3), affiancate fra di loro sul lato lungo e una bobina a bordo (chiamata #4) a 19 cm di distanza dal sistema a terra. Nel paragrafo 2.2 si è stabilito che la condizione di esposizione massima si ha quando la bobina #4 è spostata a $x = +330$ cm rispetto al centro del sistema a terra. Infatti, in questo caso, si riscontra il valore massimo di B, pari a $49.1 \mu T$, calcolato su un piano posto a 30 cm dal sistema (Figura 6). Si è scelta quindi questa configurazione peggiore, dal punto di vista espositivo, per effettuare uno studio dosimetrico considerando l'ellissoide a una distanza fissa di 30 cm dal sistema lungo la direzione y e variando la sua posizione lungo x secondo passi discreti pari a 175 cm, pari alla dimensione del raggio minore dell'ellissoide.

In Figura 9, sono mostrati i diversi scenari considerati al variare della posizione (Posizione A, B, C, D, E, F), lungo l'asse x, dell'ellissoide rispetto al sistema completo.

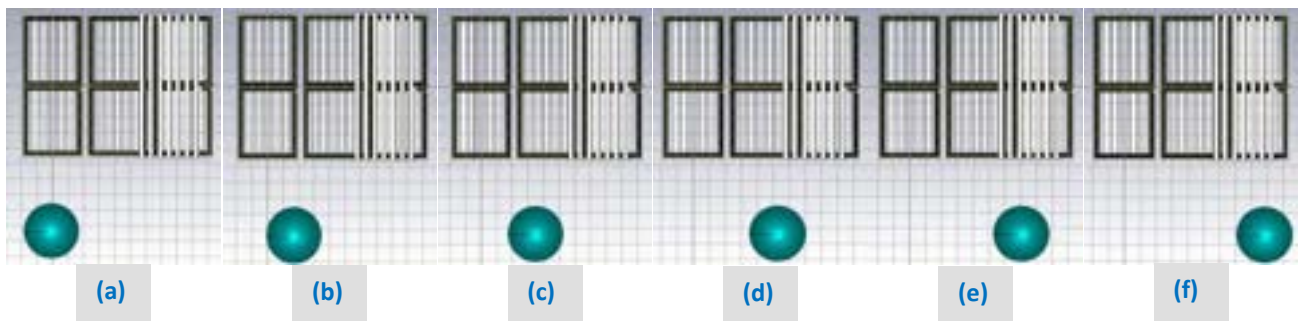


Figura 9. Scenari considerati per la dosimetria del sistema completo: l'ellissoide è posizionato a 30 cm di distanza dal sistema e la sua posizione varia a passi discreti pari a 175 cm lungo l'asse x; posizione A (a), posizione B (b), posizione C (c), posizione D (d), posizione E (e), posizione F (f).

Per tutte le posizioni A-F si è considerato il sistema di bobine su due quote diverse:

- il piano mediano del sistema è coplanare all'asse minore dell'ellissoide (Figura 10a), di seguito chiamata 'posizione mediana';
- quota delle bobine a terra posto a una distanza di 20 cm (lungo z) dall'estremo inferiore dell'ellissoide, in questo caso si riproduce una situazione in cui il sistema è posto a terra (Figura 10b), di seguito chiamata 'posizione a terra'.

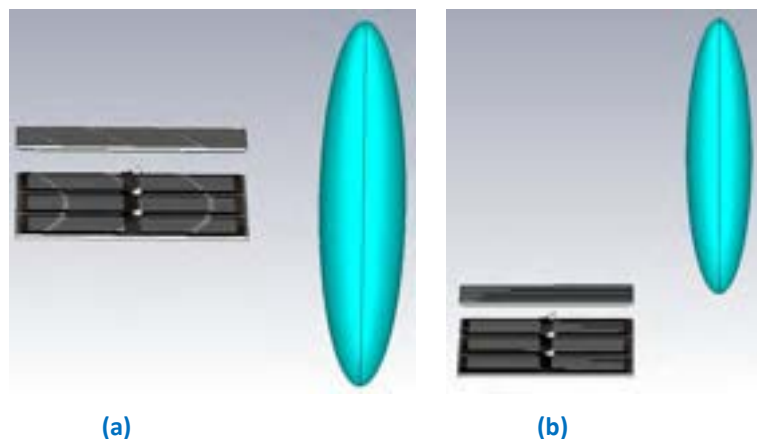
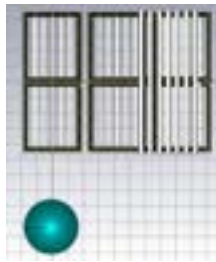


Figura 10. Scenari considerati per la dosimetria del sistema completo: l'ellissoide è posizionato a 30 cm di distanza dal sistema di bobine, che è stato considerato sia coplanare all'asse minore dell'ellissoide (a), che posto a una distanza di 20 cm (lungo z) dall'estremo inferiore dell'ellissoide (b).

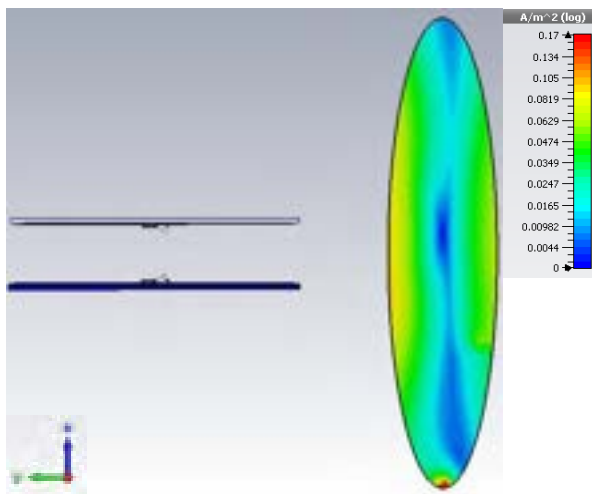
Di seguito, per ogni posizione considerata, verranno forniti:

- un'immagine della distribuzione della densità di corrente in un piano perpendicolare al sistema di bobine e mediano all'ellissoide, in questo caso il fondo scala della legenda è posto a 0.17 A/m^2 , pari al valore del limite di base definito ad 85 kHz in [2];
- la percentuale di valori di densità di corrente indotti all'interno dell'ellissoide superiori o uguali al valore di soglia pari a 0.17 A/m^2 .

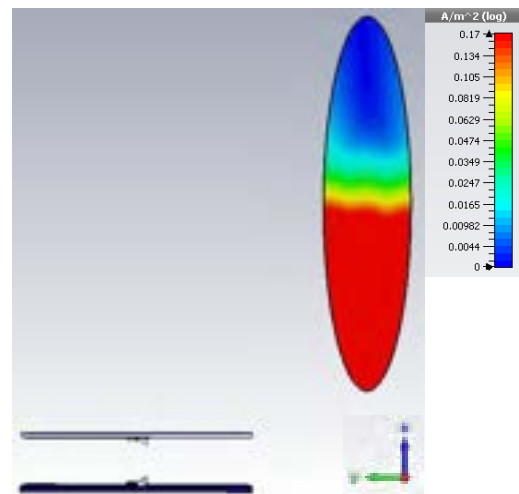
2.3.1 Dosimetria in ellissoide omogeneo posto nella Posizione A



Posizione A



(a)

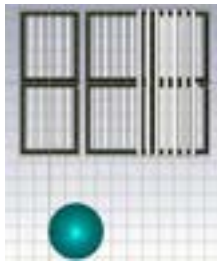


(b)

Figura 11. Distribuzione della densità di corrente sul piano yz trasversale all'ellissoide posto in Posizione A rispetto al sistema di bobine completo: (a) posizione mediana, (b) posizione a terra

Dall'analisi dei valori di densità di corrente indotta, calcolati nell'ellissoide nella posizione A, si evince che per la posizione mediana solo il 0.03% di questi valori non è conforme al limite di base definito in [2], mentre per la posizione a terra ben il 60% risulta non conforme. Questo può essere dovuto a una distribuzione di campo magnetico fortemente disomogenea nel volume in prossimità del sistema di bobine.

2.3.2 Dosimetria in ellissoide omogeneo posto nella Posizione B



Posizione B

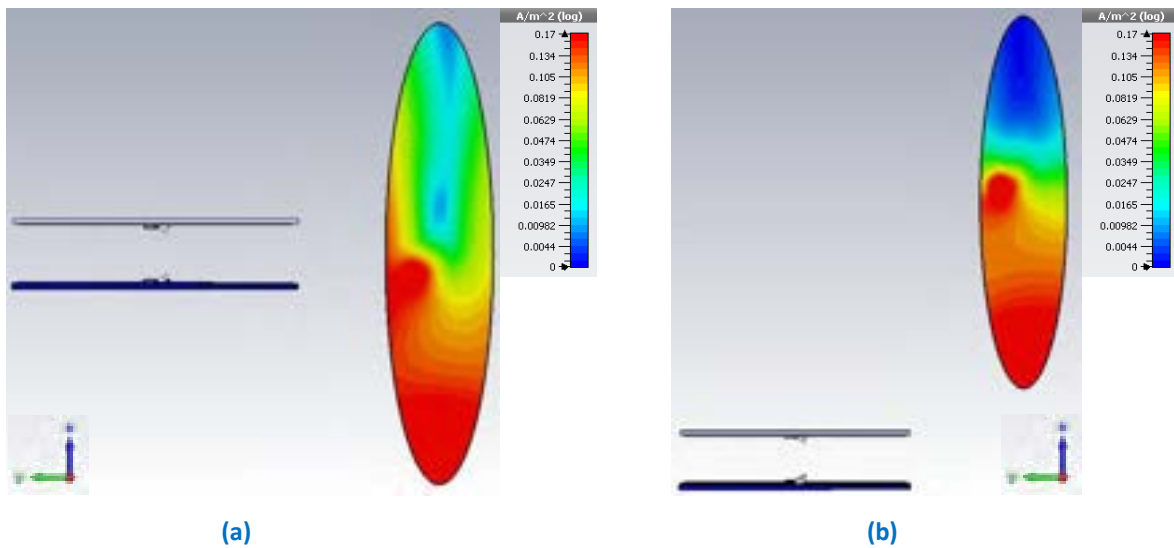
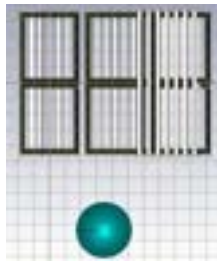


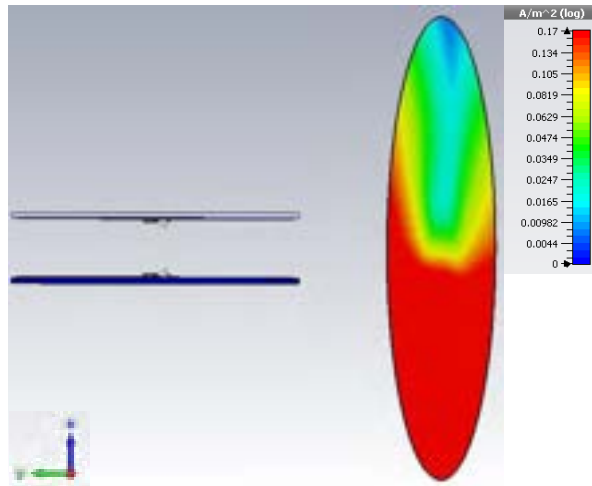
Figura 12. Distribuzione della densità di corrente sul piano yz trasversale all'ellissoide posto in Posizione B rispetto al sistema di bobine completo: (a) posizione mediana, (b) posizione a terra

Dall'analisi dei valori di densità di corrente indotta, calcolati nell'ellissoide nella posizione B, si evince che per la posizione mediana solo il 14% di questi valori non è conforme al limite di base definito in [2], mentre per la posizione a terra il 31% risulta non conforme.

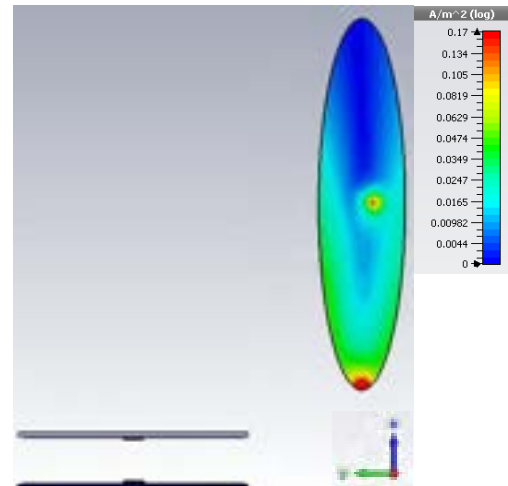
2.3.3 Dosimetria in ellissoide omogeneo posto nella Posizione C



Posizione C



(a)

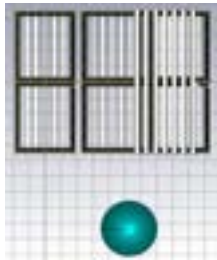


(b)

Figura 13. Distribuzione della densità di corrente sul piano yz trasversale all'ellissoide posto in Posizione C rispetto al sistema di bobine completo: (a) posizione mediana, (b) posizione a terra

Dall'analisi dei valori di densità di corrente indotta, calcolati nell'ellissoide nella posizione C, si evince che per la posizione mediana il 49% di questi valori non è conforme al limite di base definito in [2], mentre per la posizione a terra solo l'1% dei valori risulta non conforme.

2.3.4 Dosimetria in ellissoide omogeneo posto nella Posizione D



Posizione D

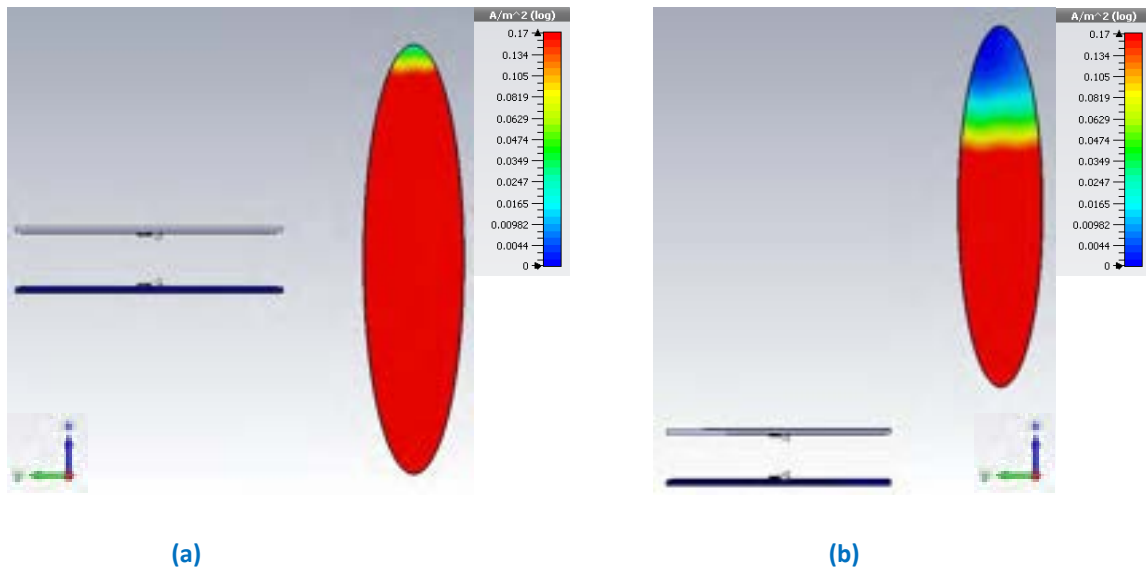
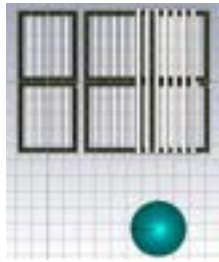


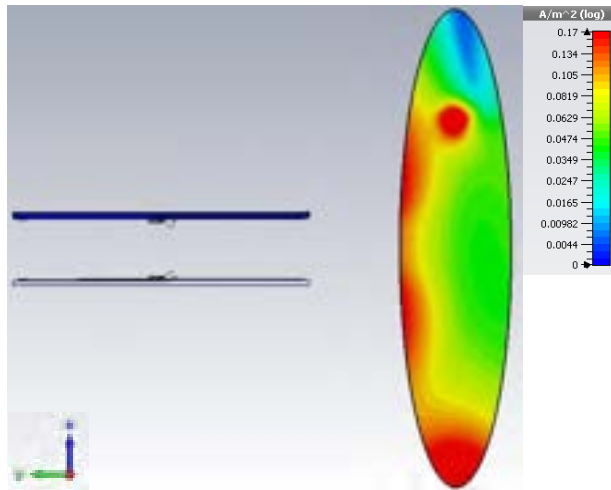
Figura 14. Distribuzione della densità di corrente sul piano yz trasversale all'ellissoide posto in Posizione D rispetto al sistema di bobine completo: (a) posizione mediana, (b) posizione a terra

Dall'analisi dei valori di densità di corrente indotta, calcolati nell'ellissoide nella posizione D, si evince che per la posizione mediana del sistema di bobine praticamente il 100% dei valori calcolati non è conforme al limite di base definito in [2], mentre nel caso del sistema posizionato a terra il 74% dei valori non è conforme.

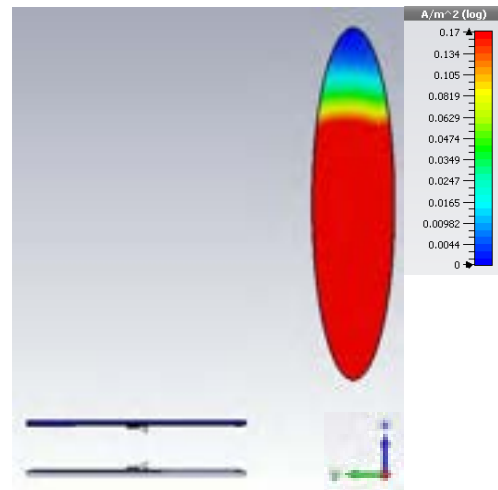
2.3.5 Dosimetria in ellissoide omogeneo posto nella Posizione E



Posizione E



(a)

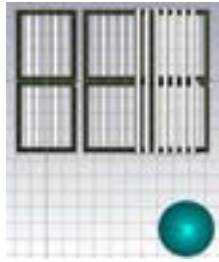


(b)

Figura 15. Distribuzione della densità di corrente sul piano yz trasversale all'ellissoide posto in Posizione E rispetto al sistema di bobine completo: (a) posizione mediana, (b) posizione a terra

Dall'analisi dei valori di densità di corrente indotta, calcolati nell'ellissoide nella posizione E, si evince che per la posizione mediana del sistema di bobine solo il 22% dei valori calcolati non è conforme al limite di base definito in [2], mentre nel caso del sistema posizionato a terra il 70% dei valori non è conforme.

2.3.6 Dosimetria in ellissoide omogeneo posto nella Posizione F



Posizione F

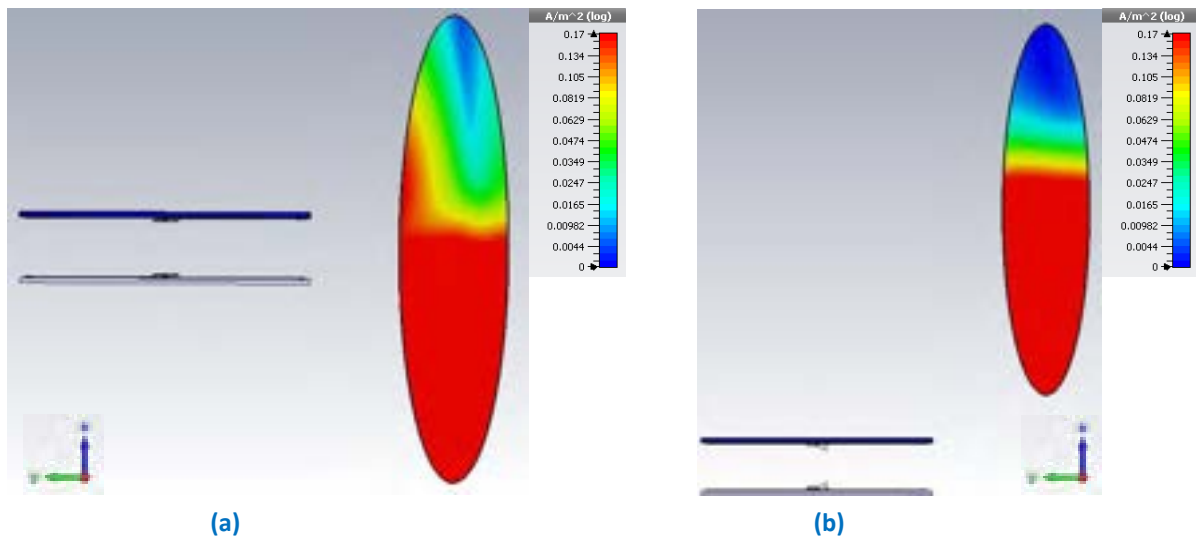


Figura 16. Distribuzione della densità di corrente sul piano yz trasversale all'ellissoide posto in Posizione F rispetto al sistema di bobine completo: (a) posizione mediana, (b) posizione a terra

Dall'analisi delle funzioni di distribuzioni cumulative derivate dai valori di densità di corrente calcolati nell'ellissoide nella posizione F, si evince che per la posizione mediana il 64% dei valori non è conforme al limite di base definito in [2], mentre per la posizione a terra il 60% dei valori risulta non conforme.

Dall'analisi comparata sui dati di dosimetria ottenuti considerando l'ellissoide omogeneo in diverse posizioni rispetto al sistema completo si evince che lo scenario peggiore è rappresentato dall'ellissoide in posizione D, per entrambe le posizioni considerate del sistema di bobine. Pertanto, una volta identificato lo scenario espositivo peggiore, si è provveduto a sostituire l'ellissoide omogeneo con un modello umano più realistico nelle simulazioni descrittive di tale scenario.

2.4 Dosimetria nel modello realistico posto in posizione D

Il solutore EM Studio di CST è in grado di importare il modello CAD di donna realizzato nell'ambito del Visible Human Project [10]. Il modello è costituito da 26 tessuti e da 216 parti diverse per un grigliato a tetraedri costituito da un totale di circa 160000 facce triangolari. Questo modello è stato ottimizzato per le simulazioni con il solutore FEM in bassa frequenza. Ai tessuti sono state associate le proprietà dielettriche ad 85 kHz.

Come anticipato nel precedente paragrafo, all'ellissoide posto in posizione D (asse verticale del modello perpendicolare al piano delle bobine e posto a 30 cm da esse) è stato sostituito il modello realistico. Anche in questo caso si sono considerate le due posizioni predefinite per il sistema completo di bobine: la posizione mediana (Figura 17a) e la posizione a terra (Figura 17b). Il grigliato utilizzato per le simulazioni è stato quello di default calcolato dal codice, senza infittimenti impostati dall'utente. Anche così, il peso computazionale di queste ultime simulazioni è risultato al limite delle possibilità di calcolo a disposizione del laboratorio.

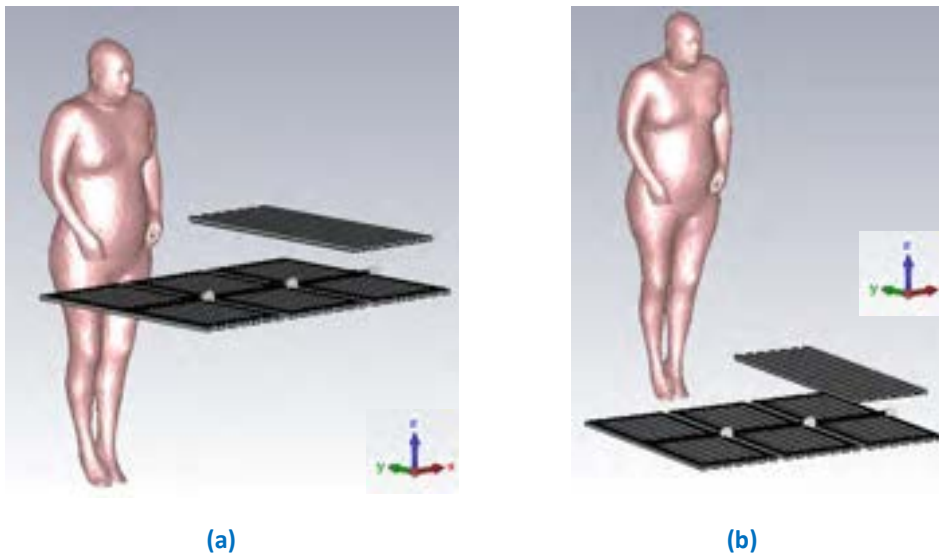


Figura 17. Scenari analizzati con il modello realistico posto nella posizione D rispetto alle bobine e con il sistema posto nella posizione mediana (a) e nella posizione a terra (b)

Anche in questo caso si è valutato il valore della densità di corrente indotta nel modello esposto. Nelle figure 24a e 24 b sono mostrate le distribuzioni di densità di corrente su un piano verticale xz trasversale al modello nelle due posizione considerate.

Ad 85kHz il limite di base della raccomandazione è pari a 0.17 A/m^2 (valore efficace) nella testa e nel torso. Con il sistema posto a terra questo limite non viene mai superato. Con il sistema posto nella posizione mediana, i valori di densità di corrente indotta sono maggiori nella zona del torso (Figura 18a), pertanto si è andata ad estrarre la funzione di distribuzione (Figura 19). Dall'analisi della funzione di distribuzione si evince che il limite di base è superato solo dallo 0.02% dei campioni. Il valore massimo calcolato è pari a 0.24 A/m^2 .

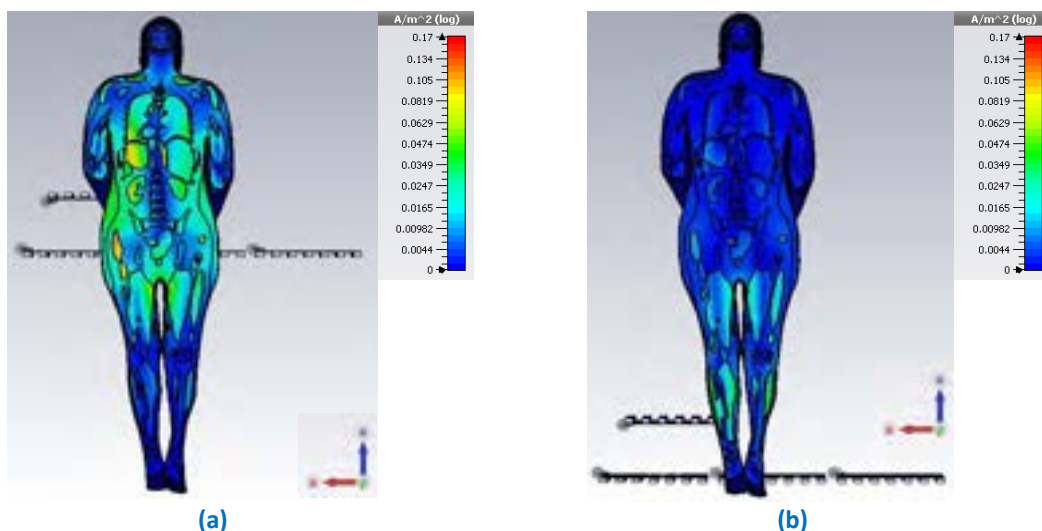


Figura 18. Distribuzione di corrente indotta all'interno del modello realistico posto a 30 cm dal sistema completo di bobine e con quest'ultimo posto nella posizione mediana (a) e nella posizione a terra (b)

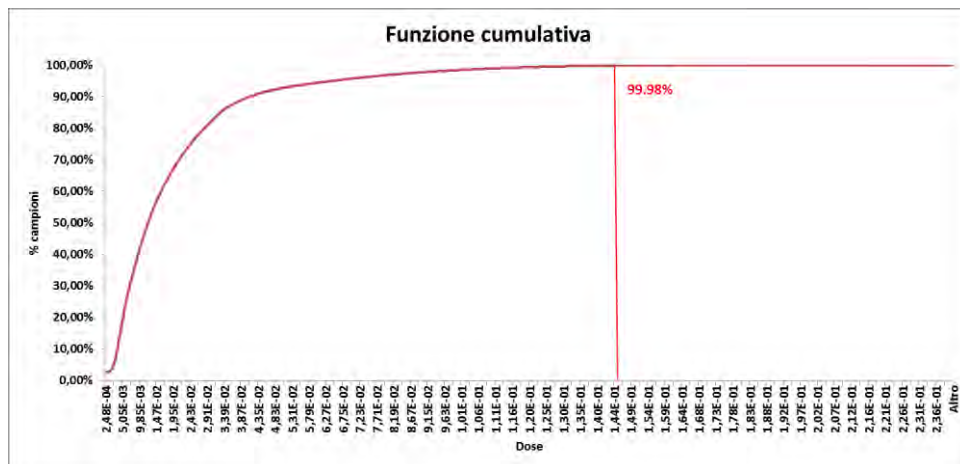


Figura 19. Funzione cumulativa dei valori di densità di corrente calcolati nel torso e nella testa del modello antropomorfo realistico. Il sistema di bobine è nella posizione mediana

3 Conclusioni

In questa annualità il gruppo di bioelettromagnetismo del dipartimento SSPT dell'ENEA ha realizzato il progetto finale del prototipo del sistema di bobine a geometria DD per la ricarica dinamica senza contatto e operanti alla frequenza di 85 kHz, da destinare all'auto SPAZIA dell'ENEA. Questo prototipo prevede la realizzazione di tre bobine uguali da mettere a terra affiancate e una bobina da mettere a bordo dell'auto. Il progetto è stato sottoposto a una ditta artigiana che realizzerà il prototipo nei prossimi mesi. Per la definizione del progetto finale si è utilizzato un codice di calcolo per la simulazione elettromagnetica provvisto di un solutore FEM a bassa frequenza.

Definita la geometria del sistema si è proceduto a una valutazione numerica dell'esposizione ai campi elettromagnetici emessi dal sistema di bobine per verificare la conformità alle normative vigenti. Nel caso in esame, trattandosi di una sorgente ad 85 kHz ai fini della valutazione delle emissioni ci si riferirà prevalentemente alla raccomandazione del Consiglio dell'Unione europea 1999/519/CE, che si basa sul sistema dei limiti di base (riferiti a grandezze dosimetriche, cioè grandezze rappresentative dell'interazione del campo EM con i tessuti biologici alle diverse frequenze) e dei livelli di riferimento (riferiti a grandezze radiometriche, cioè grandezze fisiche direttamente misurabili), mutuato dalle linee guida della International Commission on Non-Ionising Radiation Protection pubblicati nel 1998 (ICNIRP 1998).

Al fine di una valutazione dell'esposizione esaustiva, che tenesse conto anche della onerosità delle simulazioni, legata alla complessità del sistema, si è messa a punto una procedura di valutazione che ha permesso l'identificazione di scenari 'peggiori' dal punto di vista della esposizione e, quindi, di limitare le simulazioni più complesse a un numero contenuto di casi. La procedura si è scelta secondo i seguenti passi:

- simulazione del sistema completo di bobine in aria, mimando lo spostamento della bobina a bordo sulle tre bobine a terra mediante passi discreti lungo l'asse di traslazione;
- identificazione dello scenario peggiore in aria, considerando come parametro il massimo calore dei campi di induzione magnetica B su un piano ortogonale al sistema di bobine e distante 30 cm dal sistema stesso;
- studi dosimetrici su un ellissoide omogeneo posizionato con l'asse maggiore perpendicolare al sistema di bobine, con le 4 bobine fisse nella posizione identificata nel passo precedente,: l'ellissoide è stato posto a 30 cm dal sistema; la posizione dell'ellissoide è stata fatta variare a passi discreti parallelamente all'asse di traslazione della bobina a bordo su quelle a terra. Per ogni posizione dell'ellissoide si sono considerati due diversi posizionamenti del sistema di bobine, uno con il piano mediano coplanare con l'asse minore dell'ellissoide (simulazione di una postazione di laboratorio in cui il sistema è posto su un banco di lavoro per prove sperimentali) e uno posto a una quota tale da simulare il suo posizionamento a terra;
- identificazione dello scenario peggiore per le due diverse posizioni del sistema di bobine;

- studio dosimetrico su un modello umano disomogeneo, più realistico sui due scenari identificati al punto precedente.

Nella prima fase di analisi delle emissioni sul sistema completo in aria si è trovato che, su un piano distante 30 cm dal sistema di bobine, il valore del campo B, fissato nella raccomandazione ad 85 kHz e pari a 33.1 μT (valore di picco), viene superato per tutte le configurazioni considerate. Nello scenario peggiore, il valore di picco per il campo B trovato è pari a 49.1 μT . Nella configurazione di bobine identificata come quella in grado di generare lo scenario espositivo peggiore, si è effettuato lo studio dosimetrico su un ellissoide omogeneo. Si sono considerate posizioni diverse dell'ellissoide rispetto al sistema di bobine. Anche in questo caso si sono identificati delle situazioni di esposizione peggiore, in cui quasi il 100% del volume dell'ellissoide era esposto a valori di densità di corrente indotta superiori al limite di base definito ad 85 kHz nella raccomandazione europea. Per questi scenari si è sostituito l'ellissoide con un modello umano realistico disomogeneo e si sono eseguiti gli studi dosimetrici previsti. Nel caso del sistema di bobine posto a terra, non ci sono superamenti del valore limite di base per il torso e la testa fissato dalla raccomandazione europea. Se, invece, il sistema di bobine è posto nella posizione mediana il valore massimo calcolato è pari a 0.24 A/m² e quindi non conforme.

Questo primo studio preliminare ha mostrato che i sistemi di ricarica dinamica senza contatto possono presentare dei problemi dal punto di vista dell'esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici emessi. I livelli di riferimento fissati dalle normative nazionali ed europee possono essere superati in prossimità del sistema di bobine. Gli studi dosimetrici condotti hanno altresì dimostrato che limitarsi a studi su casi semplici, come ad esempio l'ellissoide omogeneo definito dalla norma IEC 62110:2009, può portare a delle valutazioni di conformità fuorvianti, nel senso che la possibilità di sovrastimare l'esposizione è elevata. Per questo motivo è necessario effettuare gli studi dosimetrici su modelli anatomici più complessi e realistici che sono in grado di fornire delle indicazioni più accurate. Purtroppo l'onere computazionale di questo tipo di simulazioni, anche nella condizione di un grigliato non molto accurato, è risultato al limite delle possibilità di calcolo a disposizione del laboratorio. Per questo motivo, durante la prossima annualità sarebbe opportuno utilizzare la piattaforma di calcolo parallelo CRESCO dell'ENEA per poter effettuare simulazioni più accurate. Inoltre, in questo modo sarà possibile esaminare scenari espositivi più complessi, che prevedano per esempio la presenza (seppur in modo semplificato) dell'auto.

4 Riferimenti bibliografici

1. M. Budhia, J. T. Boys, G. A. Covic, and C.-Y. Huang, "Development of a single-sided flux magnetic coupler for electric vehicle IPT charging systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 1, (2013), pp. 318–328.A.
2. raccomandazione del Consiglio dell'Unione europea del 12 luglio 1999, pubblicata nella G.U.C.E. n. 199 del 30 luglio 1999.
3. 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 ai campi elettrici e magnetici alla frequenza di rete (50 Hz) generati dagli elettrodotti', GU Serie Generale n.200 del 29-8-2003.
4. R. Pinto, M. Bertoluzzo, V. Lopresto, S. Mancini, C. Merla, G. Pede, A. Genovese, G. Buja, "Exposure assessment of stray electromagnetic fields generated by a wireless power transfer system", *Proceedings of 9th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2015*.
5. I. Laakso and A. Hirata, "Evaluation of the induced electric field and compliance procedure for a wireless power transfer system in an electrical vehicle", *Phys. Med. Biol.*, vol. 58, pp. 7583–7593, October 2013.
6. T. Shimamoto, I. Laakso and A. Hirata, "In-situ electric field in human body model in different postures for wireless power transfer system in an electrical vehicle", *Phys. Med. Biol.*, vol. 60, pp. 163–173, January 2015.
7. H.K. Dashora, G. Buja, M. Bertoluzzo, R. Pinto, V. Lopresto, "Analysis and Design of DD Coupler for Dynamic Wireless Charging of Electric Vehicles", *Journal of Electromagnetic Waves and Applications (TEWA)*, 2017, DOI: 10.1080/09205071.2017.1373036. Published online: 08 Sep 2017.

8. ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection), "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz)," Health Phys., vol. 99, (2010), pp. 818–836.
9. IEC 62110:2009, "Electric and magnetic field levels generated by AC power systems - Measurement procedures with regard to public exposure"
10. M.J. Ackerman, "The Visible Human Project", Proc. IEEE., vol. 86, pp. 504-511, March 1998.