

Approcci modellistici semplificati per la dosimetria elettromagnetica in assenza di fenomeni di propagazione

Bottauscio O.

Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica, Strada delle Cacce 91, 10135 Torino, o.bottauscio@inrim.it

Chiampi M.

Politecnico di Torino, Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino, mario.chiampi@polito.it

Zilberti L.

Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica, Strada delle Cacce 91, 10135 Torino, l.zilberti@inrim.it

INTRODUZIONE

Con la Raccomandazione 1999/519/EC e con la Direttiva 2004/40/EC (attualmente sospesa e in fase di revisione), il Parlamento Europeo ha di fatto fornito valore legale alle linee-guida dell'International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP, 1998), che prevedono la limitazione delle grandezze dosimetriche indotte in un corpo umano esposto a campi elettromagnetici. L'impossibilità, allo stato dell'arte, di rilevare sperimentalmente tali grandezze, comporta necessariamente il ricorso a modelli di calcolo ogniquale volta sia necessario verificarne la conformità con le suddette prescrizioni. Per quanto concerne l'esposizione a campi elettrici e magnetici quasi-stazionari, nonostante la disponibilità di software capaci di gestire modelli umani ad alta risoluzione, al momento la normativa vigente tende a proporre approcci semplificati, rinviando l'uso dei modelli più sofisticati considerati non ancora sufficientemente "maturi" (CENELEC, 2005 e 2007). Assolutamente priva di procedure di riferimento è invece l'analisi dosimetrica di un corpo in movimento all'interno di un forte campo magnetico stazionario (tipicamente in prossimità di tomografi a risonanza magnetica MRI), prevista dall'ICNIRP (ICNIRP, 2009) ma ancora confinata nella sfera della ricerca.

Il presente contributo vuole illustrare l'uso di alcuni modelli di calcolo sviluppati dagli autori seguendo un'ottica "normativa" ed utilizzabili per svolgere un'indagine dosimetrica nel caso di campi elettrici e magnetici quasi-stazionari (Bottauscio, Chiampi, Zilberti, 2009) e di movimento all'interno di campi magnetici stazionari (Chiampi, Zilberti, 2011). Tali modelli presentano infatti caratteristiche di semplicità ed efficienza, come richiesto comunemente dal processo di unificazione, ma al contempo risultano sufficientemente versatili da permettere lo studio di scenari d'esposizione alquanto complessi.

MODELLI DI CALCOLO

I modelli in oggetto si fondano sui teoremi integrali di Green e sulla loro applicazione numerica tramite il metodo degli elementi al contorno (Boundary Element Method - BEM). Una prima formulazione, sviluppata nel dominio della frequenza e dedicata ai campi elettrici quasi-stazionari, permette di simulare scenari d'esposizione che includano oggetti sia con potenziale noto e imposto, sia con potenziale flottante; l'eventuale presenza del terreno è gestita automaticamente per mezzo del metodo delle immagini. Un secondo modello, specifico per campi magnetici a bassa frequenza, consente la stima delle grandezze indotte in un corpo che si trovi in prossimità di conduttori percorsi da corrente, nell'ipotesi che il campo da essi prodotto si possa considerare imperturbato. I risultati forniti da questi due approcci sono sovrapponibili al fine di contemplare una possibile situazione di esposizione mista. Infine, una terza formulazione sviluppata nel dominio nel tempo è utilizzabile per svolgere l'analisi dosimetrica di un corpo che compia movimenti rigidi di traslazione o rotazione all'interno di un campo magnetico stazionario. Quest'ultimo modello, realizzato con preciso riferimento agli scanner MRI, permette di studiare gli effetti indotti nel corso dello spostamento di un operatore o di un paziente, secondo una qualsiasi traiettoria, nei pressi del tomografo. Tutti i succitati modelli di calcolo sono stati validati per mezzo di soluzioni analitiche e/o per confronto con simulazioni numeriche basate su schemi computazionali completamente indipendenti.

FORMULAZIONE PER CAMPI ELETTRICI QUASI-STAZIONARI

A bassa frequenza i campi elettrici ambientali sono sostanzialmente prodotti da oggetti carichi caratterizzati da un certo valore di potenziale elettrico imposto. La tensione di questi oggetti rispetto al terreno tipicamente è nota (si pensi al caso delle linee elettriche di trasmissione e distribuzione), mentre la carica da essi posseduta può essere dedotta solamente risolvendo la relativa matrice di capacità. E' pertanto apparso ragionevole impostare la formulazione per l'analisi dosimetrica in riferimento al fasore del potenziale scalare elettrico V , rappresentando anche eventuali corpi elettricamente carichi tramite il potenziale da essi esibito. Quest'ultimo deve soddisfare ovunque l'equazione di Laplace, di cui, per un qualsiasi punto P interno ad una regione Ω omogenea e delimitata da una o più superfici chiuse $\partial\Omega$, la fisica-matematica fornisce la nota soluzione integrale:

$$V(P) = \oint_{\partial\Omega} \left(V \frac{d\Psi}{dn} - \Psi \frac{dV}{dn} \right) ds \quad (1)$$

dove \vec{n} è il versore normale diretto all'interno di Ω e, trattandosi di un problema quasi-stazionario, la funzione di Green assume la forma $\Psi = 1/(4\pi r)$ (r indica la distanza tra il punto di calcolo P ed un qualsiasi punto appartenente a $\partial\Omega$).

Il trattamento numerico di questa equazione è stato impostato secondo il BEM, che prevede la discretizzazione di ogni superficie in elementi, scelti di forma triangolare, aventi dimensioni relativamente ridotte. Su ognuno di tali triangoli il potenziale elettrico e la sua derivata normale sono stati assunti uniformi. Poiché la relazione (1) deve risultare valida anche per gli stessi punti appartenenti a $\partial\Omega$, è possibile imporre la validità proprio sulle superfici di frontiera delle diverse regioni costituenti il dominio di calcolo. Per ciascuno dei volumi presenti, il potenziale del generico elemento i -esimo di superficie riceve quindi il contributo di tutti gli M triangoli che si affacciano sul volume stesso:

$$\xi V_i = \sum_m^M V_m \int_{\partial\Omega_m} (\nabla \Psi_i \cdot \vec{n})_m ds - \sum_m^M (\nabla V \cdot \vec{n})_m \int_{\partial\Omega_m} \Psi_{i,m} ds \quad (2)$$

dove si dimostra necessario il fattore $\xi = 0.5$ per evitare la singolarità della funzione di Green quando $r = 0$.

Ogni elemento di superficie consente quindi la scrittura di un'equazione scalare che implica due incognite (il potenziale e la sua derivata normale). Al fine di delineare una matrice che descriva il problema e che contenga un numero di equazioni pari al numero di incognite, l'equazione (2) è scritta, per ciascun elemento, in riferimento ad entrambi i volumi che condividono la superficie su cui giace l'elemento stesso. Indicando tali volumi con (a) e (b), le incognite sono poi legate tra loro dalle condizioni di continuità del potenziale e della componente normale della densità di corrente totale:

$$V^{(a)} = V^{(b)} \quad (3)$$

$$\left(\nabla V^{(a)} \cdot \vec{n}^{(a)} \right) (\sigma^{(a)} + j\omega\epsilon^{(a)}) = - \left(\nabla V^{(b)} \cdot \vec{n}^{(b)} \right) (\sigma^{(b)} + j\omega\epsilon^{(b)})$$

dove σ rappresenta la conduttività del materiale, ϵ la permittività, ω la pulsazione e j l'unità immaginaria.

L'applicazione della procedura appena descritta conduce alla scrittura di un sistema algebrico lineare invertibile, a condizione di rispettare i seguenti accorgimenti:

- nel caso di oggetti a potenziale imposto (che fungerà da termine noto del problema) è necessario determinare una sola incognita per elemento e pertanto è sufficiente la scrittura dell'equazione (2) in riferimento al solo volume esterno;
- nel caso di oggetti con potenziale flottante uniforme, le incognite sono rappresentate da un unico valore del potenziale e dai valori assunti dalla sua derivata normale su ogni elemento; è pertanto sufficiente applicare la relazione (2) nel solo volume esterno ed introdurre poi un vincolo integrale che leghi la carica posseduta dall'oggetto (solitamente nulla) ai medesimi valori di derivata normale.

All'interno del codice di calcolo è stato inoltre implementato il metodo delle immagini che, senza alterare le dimensioni della matrice, permette di annoverare nelle simulazioni la presenza del terreno (rappresentato come un piano perfettamente conduttivo).

In seguito alla soluzione del sistema, è nuovamente l'equazione (2) a consentire il calcolo del potenziale in qualsiasi punto del dominio, questa volta ponendo però $\xi = 1$. Infine, anche la determinazione del campo elettrico può avvenire semplicemente esplicitando il gradiente della relazione (2) stessa.

FORMULAZIONE PER CAMPI MAGNETICI QUASI-STAZIONARI

All'interno di un corpo umano esposto a campi magnetici a bassa frequenza, le correnti dielettriche hanno tipicamente scarsa rilevanza rispetto a quelle di conduzione, che comunque non sono in grado di perturbare apprezzabilmente il campo ambientale. In assenza di oggetti ferromagnetici e/o fortemente conduttivi, capaci di deflettere le linee di flusso, il campo magnetico può pertanto essere trattato come una grandezza impressa, ricavabile tramite la nota legge di Biot-Savart grazie alla conoscenza delle correnti che fluiscono nelle sorgenti (ad esempio i conduttori di una linea elettrica). Sotto queste ipotesi, il fasore del campo elettrico \vec{E} in un qualsiasi punto P interno ad una regione omogenea è esprimibile per mezzo di una forma semplificata della classica Equazione Integrale di Campo Elettrico (EFIE) applicata alla superficie $\partial\Omega$ che delimita la regione stessa:

$$\vec{E}(\mathbf{P}) = \oint_{\partial\Omega} \left[(\vec{n} \cdot \vec{E}) \nabla \Psi + (\vec{n} \times \vec{E}) \times \nabla \Psi - j\omega\mu \Psi (\vec{n} \times \vec{H}) \right] ds \quad (4)$$

dove figurano la permeabilità magnetica μ , il fasore del campo magnetico \vec{H} e la funzione di Green precedentemente introdotta.

Anche in questo caso, il trattamento numerico dell'equazione (4) può essere svolto secondo la tecnica BEM, discretizzando la superficie $\partial\Omega$ in M elementi di dimensione sufficientemente ridotta da potervi considerare uniformi le grandezze di campo. Per un generico elemento i -esimo dovrà quindi essere verificata la relazione:

$$\xi \vec{E}_i = \sum_m (\vec{n} \times \vec{E})_m \times \int_{\partial\Omega_m} \nabla \Psi_{i,m} ds + \sum_m (\vec{n} \cdot \vec{E})_m \int_{\partial\Omega_m} \nabla \Psi_{i,m} ds - j\omega\mu \sum_m (\vec{n} \times \vec{H})_m \int_{\partial\Omega_m} \Psi_{i,m} ds \quad (5)$$

dove compare il già discusso fattore di singolarità ξ .

L'equazione (5) può essere proiettata sui versori di un riferimento locale individuato sull'elemento i -esimo, ottenendo quindi tre relazioni scalari in luogo di una vettoriale. Ripetendo questa procedura per tutti gli elementi presenti nel dominio di calcolo, si giunge alla scrittura di un sistema algebrico costituito da un numero di equazioni indipendenti pari al numero delle incognite. La soluzione di tale sistema conduce alla determinazione delle incognite (le componenti del campo elettrico sugli elementi) con cui, applicando nuovamente l'equazione (5) privata del fattore ξ , è possibile calcolare il valore del campo elettrico in un qualsiasi punto interno a $\partial\Omega$.

E' opportuno sottolineare che, a differenza di quanto osservato per la formulazione relativa ai campi elettrici, nel caso dei campi magnetici la presenza del terreno non richiede nessun accorgimento particolare poiché tipicamente non introduce effetti di perturbazione di alcun tipo.

FORMULAZIONE PER MOVIMENTI IN CAMPO MAGNETICO STAZIONARIO

La formulazione precedente rappresenta il punto di partenza per lo sviluppo dello schema computazionale che consente l'analisi dosimetrica di un corpo in moto all'interno di un forte campo magnetico stazionario. Adottando le stesse ipotesi operative già illustrate ed assumendo un sistema di riferimento solidale ad una regione omogenea Ω in moto rigido, l'equazione (4) si modifica come segue:

$$\vec{E}(\mathbf{P}) = \oint_{\partial\Omega} \left[(\vec{n} \cdot \vec{E}) \nabla \Psi + (\vec{n} \times \vec{E}) \times \nabla \Psi - \mu \Psi \frac{d(\vec{n} \times \vec{H})}{dt} \right] ds \quad (6)$$

dove l'integrazione necessaria a determinare il campo elettrico nel generico punto P è nuovamente estesa alla superficie di contorno $\partial\Omega$ ma, dovendo questa volta operare nel dominio del tempo, il coefficiente complesso $j\omega$ è stato rimpiazzato dalla corrispondente derivata temporale, come richiesto dall'operazione di antitrasformata.

Le elaborazioni necessarie per la successiva gestione numerica dell'equazione (6) restano immutati rispetto agli schemi BEM già discussi; in particolare, la superficie $\partial\Omega$ è reticolata per mezzo di triangoli sui quali le grandezze di campo sono assunte uniformi. Occorre tuttavia trattare numericamente anche l'operatore di derivata che, approssimato da un rapporto incrementale, conduce alla versione discretizzata dell'equazione (6):

$$\xi \bar{E}_i = \sum_m^M (\bar{n} \times \bar{E})_m \times \int_{\partial\Omega_m} \nabla \Psi_{i,m} ds + \sum_m^M (\bar{n} \cdot \bar{E})_m \int_{\partial\Omega_m} \nabla \Psi_{i,m} ds - \mu \sum_m^M \left(\bar{n} \times \frac{\Delta \bar{H}}{\Delta t} \right)_m \int_{\partial\Omega_m} \Psi_{i,m} ds \quad (7)$$

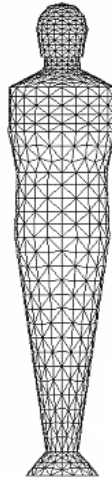
dove è interessante constatare come il rapporto incrementale non si applichi al versore normale \bar{n} , giacché, avendo assunto un riferimento locale e limitando l'analisi a moti rigidi, esso risulta costante nel tempo.

L'equazione (7), proiettata su un sistema locale di versori ed applicata a tutti gli elementi del reticolo, porta a definire il sistema algebrico lineare che descrive il fenomeno in ogni istante temporale esaminato. Per ottenere la soluzione relativa all'intera traiettoria di movimento, è quindi necessario ripetere la procedura per tutti i "passi" in cui è stato scomposto il moto della regione Ω . A questo proposito è bene notare che la matrice del sistema risulta invariante rispetto al passo temporale e pertanto può essere invertita una sola volta per tutte. Inoltre, il termine Δt interviene nel denominatore del termine noto dell'equazione (7) come un semplice fattore moltiplicativo; può perciò essere assunto inizialmente unitario senza perdita di generalità, a patto di moltiplicare poi la soluzione finale per il suo valore effettivo (operazione che rappresenta un riscalamento del campo elettrico indotto in ragione della velocità di movimento).

MODELLO BEM DEL CORPO UMANO

Le formulazioni BEM in oggetto sono state impiegate per valutare le grandezze dosimetriche in un soggetto che si possa trovare in diversi scenari d'esposizione. Per la rappresentazione del corpo umano, come già accennato si è deciso di adottare un modello capace di coniugarsi contemporaneamente con i requisiti di semplicità voluti dalle norme e con le esigenze di versatilità riscontrabili nello studio di situazioni verosimili. Per questo motivo, si è ritenuto opportuno creare una versione tridimensionale del cosiddetto "reference man" (CENELEC, 2007), ottenuto per rotazione intorno al proprio asse del profilo bidimensionale proposto dalla normativa e reticolato con circa 2300 elementi di superficie triangolari (fig. 1).

Figura 1 – Modello BEM del corpo umano



Il modello umano è assunto omogeneo, con conduttività e permittività relativa rispettivamente pari a 0.2 S/m e 10^5 , come indicato dalle norme (CENELEC, 2007). Dal momento che tutte le formulazioni BEM illustrate conducono al calcolo del campo elettrico indotto, il calcolo della densità di corrente è ottenibile semplicemente sulla base di tali proprietà.

ESEMPI DI APPLICAZIONE DELLE FORMULAZIONI BEM

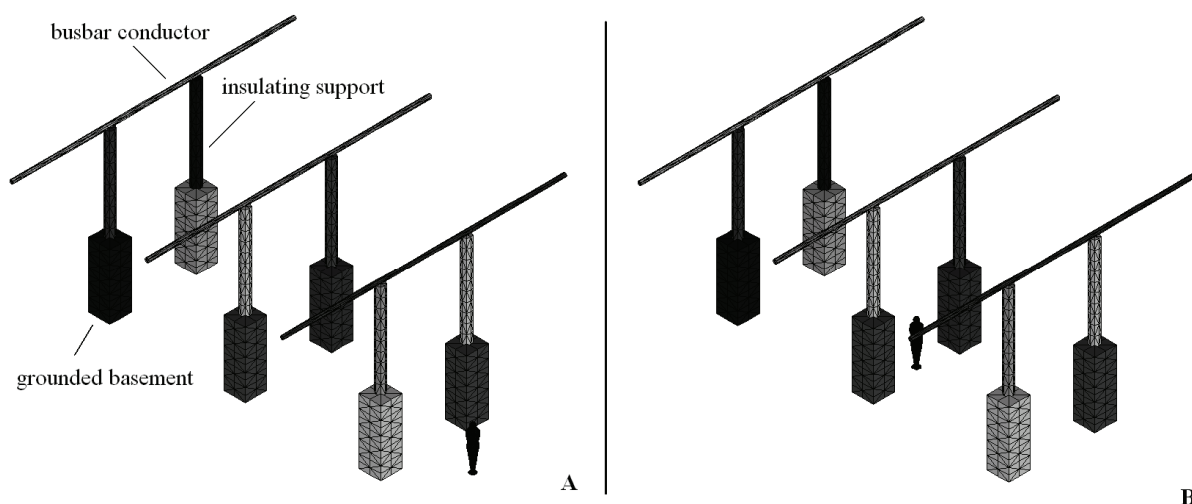
In questa sezione vengono presentati alcuni esempi di applicazione dei modelli di calcolo per fini dosimetrici. E' importante rilevare che, benché siano stati studiati per riprodurre situazioni realistiche, i casi illustrati non rappresentano vere e proprie indagini dosimetriche esaustive, ma sono qui utilizzati al fine di evidenziare le potenzialità dei suddetti modelli computazionali.

Per quanto concerne l'esposizione a campi tempo-varianti con bassa frequenza, è stata prevista la possibilità di studiare l'effetto congiunto dei campi elettrici e magnetici, sfruttando la linearità dei due problemi e sovrapponendo quindi i risultati forniti dalle due formulazioni specifiche. Sebbene nelle più recenti versioni delle proprie linee-guida l'ICNIRP abbia adottato restrizioni di base sul campo elettrico indotto (ICNIRP, 2010), in conformità alla Raccomandazione 1999/519/EC e alla Direttiva 2004/40/EC, si è deciso di mostrare i risultati in termini di densità di corrente.

ESPOSIZIONE IN UNA SOTTOSTAZIONE ELETTRICA

Come esempio di esposizione congiunta a campi elettrici e magnetici quasi-stazionari, si propone il caso di un operatore che si trovi in prossimità dei conduttori di una linea trifase a 380 kV, operativa alla frequenza di 50 Hz all'interno di una sottostazione elettrica. Tali conduttori si trovano ad un'altezza di 6.5 m sopra il terreno e distano tra loro 5.5 m. La distanza tra le due colonne isolanti che sostengono ogni conduttore è di 3.5 m e l'operatore è posto in due diverse posizioni, indicate con A e B, corrispondenti rispettivamente alle zone dove è più intenso il campo elettrico oppure quello magnetico (fig. 2).

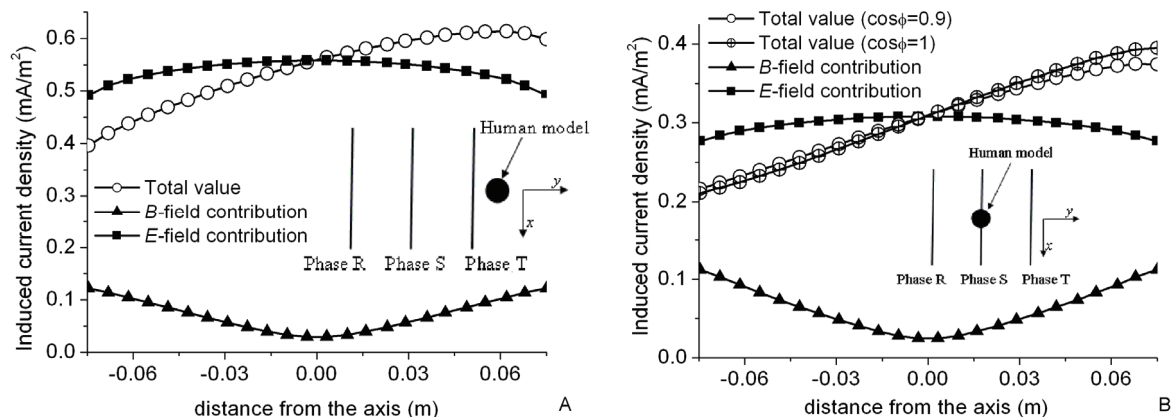
Figura 2 – Scenari d'esposizione A e B all'interno di una sottostazione elettrica



Nel corso delle simulazioni si ipotizza che i tre conduttori siano percorsi da un sistema equilibrato di correnti, di valore efficace pari a 1500 A. In fig. 3 si riporta l'andamento della densità di corrente indotta lungo l'asse x, all'altezza della fronte del modello umano. Come si può notare, la strategia di calcolo ha permesso di valutare separatamente la densità di corrente indotta a causa del campo magnetico e quella dovuta al campo elettrico ambientale; nei casi esaminati è quest'ultimo a determinare l'effetto prevalente. Si noti come, trattandosi di una grandezza vettoriale

e fasoriale, la densità di corrente totale risulti in alcuni punti amplificata ed in altri ridotta rispetto ai due singoli contributi. Si noti altresì come, per la sola posizione B, sia stato messo in evidenza l'effetto di un fattore di potenza non unitario.

Figura 3 – Densità di corrente indotta all'altezza della fronte del modello umano



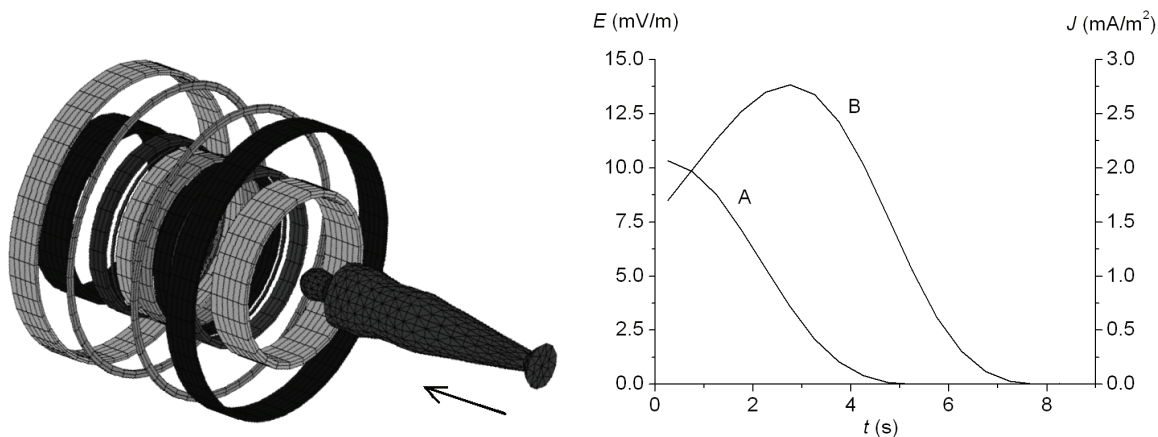
ESPOSIZIONE IN PROSSIMITA' DI UN TOMOGRAFO MRI

In questo paragrafo si illustrano alcuni esempi di valutazione dell'esposizione di un corpo che si muove all'interno di un campo magnetico stazionario. Lo scenario scelto riguarda un tomografo a risonanza magnetica nucleare di tipo tradizionale (tubolare), con un'induzione magnetica nominale di 1.5 T, costituito da un sistema di 13 bobine che occupano approssimativamente un volume cubico con lato di 1.6 m. Come spesso previsto dai costruttori, alcune bobine sono contravvolte per limitare l'entità del campo magnetico al di fuori del dispositivo.

I risultati sono espressi in termini di evoluzione temporale del campo elettrico e della densità di corrente in corrispondenza di due punti, indicati con A e B, rispettivamente localizzati in prossimità della tempia sinistra e del cuore.

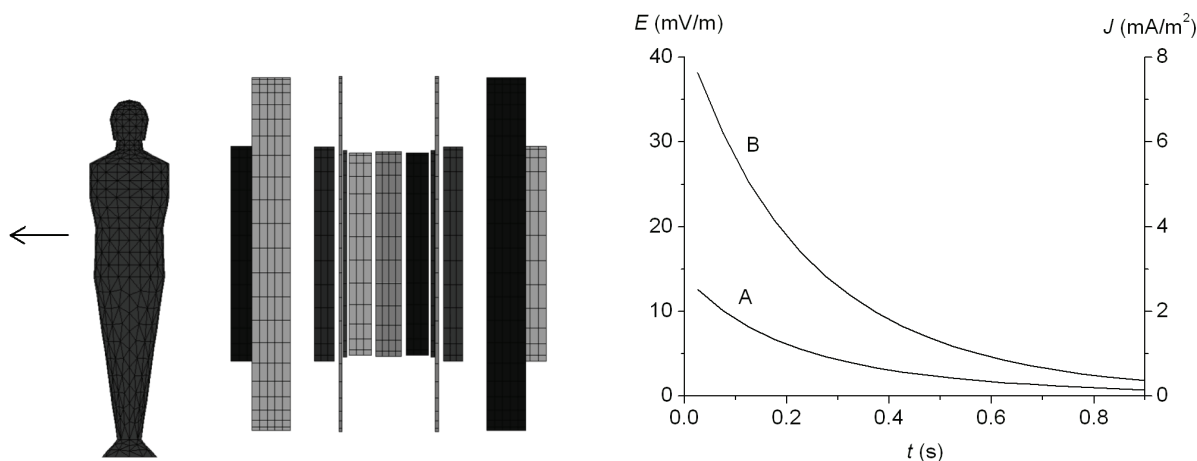
Nel primo caso (fig. 4) si esamina l'esposizione di un paziente che viene introdotto all'interno del tomografo con una velocità di 0.1 m/s, partendo da una posizione iniziale tale per cui la testa si trova allineata con l'apertura della macchina. Data l'elevata uniformità dell'induzione magnetica all'interno del dispositivo MRI, l'evoluzione temporale del campo indotto nei punti A e B tende a smorzarsi se si limita l'analisi ad uno spostamento di 1 m.

Figura 4 – Valutazione dell'esposizione di un paziente introdotto nel tomografo



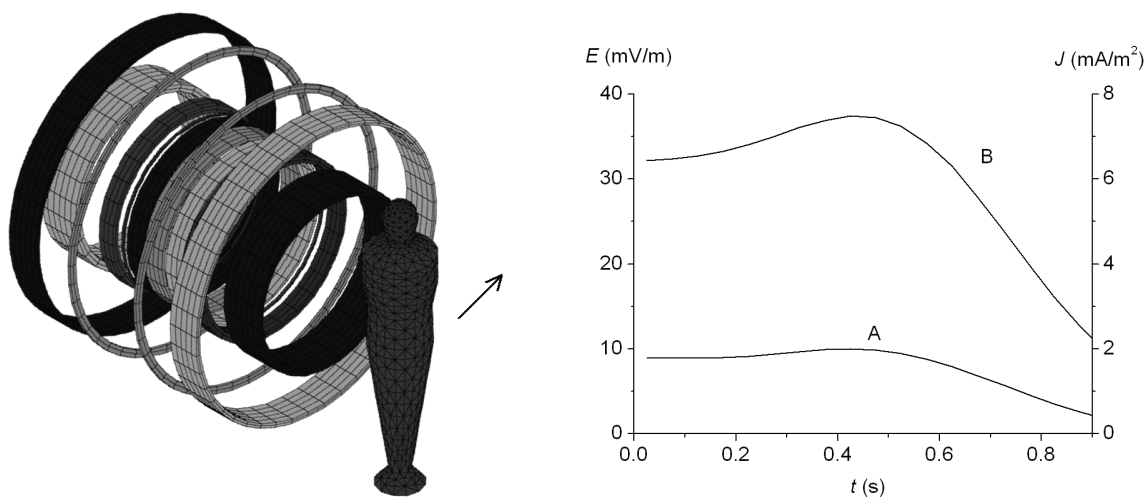
La seconda situazione esaminata prevede un movimento di traslazione del modello umano posto in posizione eretta, con l'asse inizialmente collocato a 0.5 m dalla macchina. Lo spostamento avviene lungo l'asse del tomografo, con velocità uniforme di 1 m/s. Il campo indotto assume qui un tipico andamento monotono decrescente, giustificato dal decadimento del campo magnetico allontanandosi dal tomografo (fig. 5).

Figura 5 – Valutazione dell'esposizione di una persona che si allontana longitudinalmente dal tomografo



Infine, l'ultimo caso proposto è perfettamente analogo al precedente, ma questa volta lo spostamento avviene in direzione radiale e, a causa della particolare distribuzione spaziale dell'induzione magnetica, il campo indotto manifesta un'evoluzione più articolata (fig. 6).

Figura 6 – Valutazione dell'esposizione di una persona che si allontana radialmente dal tomografo



Gli esempi presentati in questo paragrafo illustrano l'insorgere di campi elettrici dall'andamento temporale aperiodico e relativamente complesso. Data la modesta velocità di movimento, un'analisi armonica applicata alle singole componenti spaziali del campo indotto condurrebbe all'identificazione di segnali armonici di frequenza prossima ad 1 Hz, a cui, in generale, si sovrappone un segnale unidirezionale non nullo.

CONCLUSIONI

Gli approcci computazionali proposti rappresentano uno strumento affidabile ed efficiente per la dosimetria elettromagnetica di fenomeni lentamente variabili. Pur mantenendo caratteristiche di

semplicità, essi si svincolano da talune ipotesi restrittive spesso presenti nelle procedure normative (ad esempio di bidimensionalità) e consentono di analizzare innumerevoli scenari d'esposizione plausibili. La stima delle grandezze indotte ottenibile grazie ad essi costituisce un valido elemento d'indagine, da affiancare alle campagne di misurazione sperimentali per la verifica di conformità ai limiti vigenti.

Bibliografia

Bottauscio O., Chiampi M., Zilberti L., *Boundary Element Approaches for the Evaluation of Human Exposure to Low Frequency Electromagnetic Fields*, IEEE Trans. Mag., Vol. 45, 2009.

Chiampi M., Zilberti L., *Induction of Electric Field in Human Bodies Moving Near MRI: An Efficient BEM Computational Procedure*, IEEE Trans. Biomed. Eng., Vol. 58, 2011.

CENELEC, *Exposure to electric or magnetic fields in the low and intermediate frequency range - Methods for calculating the current density and internal electric field induced in the human body Part 1: General*, EN 62226-1, 2005.

CENELEC, *Exposure to electric or magnetic fields in the low and intermediate frequency range - Methods for calculating the current density and internal electric field induced in the human body Part 2-1: Exposure to magnetic fields - 2D models*, EN 62226-2-1, 2005.

CENELEC, *Exposure to electric or magnetic fields in the low and intermediate frequency range - Methods for calculating the current density and internal electric field induced in the human body Part 3-1: Exposure to electric fields - Analytical and 2D numerical models*, EN 62226-3-1, 2007.

ICNIRP, *Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)*, Health Physics, Vol. 74, 1998.

ICNIRP, *Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields*, Health Physics, Vol. 96, 2009.

ICNIRP, *Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz)*, Health Physics, Vol. 99, 2010.

Parlamento Europeo, *Council recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz) (1999/519/EC)*, 1999.

Parlamento Europeo, *Directive 2004/40/EC of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields) (18th individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC)*, 2004.