

Interconfronto tra pacchetti software per la dosimetria numerica a bassa frequenza

Falsaperla R.⁽¹⁾, Andreuccetti D.⁽²⁾, Ardoino L.⁽³⁾, Barbieri E.⁽³⁾, Contessa G.M.⁽¹⁾,
Pinto R.⁽⁴⁾, Polichetti A.⁽⁵⁾, Zoppetti N.⁽²⁾

¹ Istituto Nazionale per l'Assicurazione contro gli Infortuni sul Lavoro, Settore Ricerca – Dipartimento Igiene del Lavoro, Via Fontana Candida 1, 00040 Monte Porzio Catone; r.falsaperla@inail.it

² Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Fisica Applicata "Nello Carrara", Via Madonna del Piano 10, 50019 Sesto Fiorentino (Florence), Italy

³ ISPRA, Servizio di Metrologia Ambientale, Via Vitaliano Brancati 48, 00144

⁴ ENEA, Unità Tecnica Biologia delle Radiazioni e Salute dell'Uomo, Centro Ricerche Casaccia, Via Anguillarese 301, 00123 Rome, Italy.

⁵ Istituto Superiore di Sanità, Dipartimento di Tecnologie e Salute, Viale Regina Elena, 299 – 00161 Roma

INTRODUZIONE

L'approccio alla valutazione dei rischi per la salute connessi alle esposizioni ai campi elettromagnetici sul quale vi è maggior consenso a livello internazionale si basa sul sistema delle restrizioni di base e dei livelli di riferimento. Esso è stato recepito in Italia sia in ambito occupazionale (D.Lgs. 81/2008), sia per la popolazione generale, seppure in questo caso limitatamente ai campi generati da sorgenti non riconducibili né agli elettrodotti, né ai sistemi fissi delle telecomunicazioni e radiotelevisivi (DPCM 8/07/2003). Secondo questo approccio, in prima istanza è necessario confrontare le grandezze di tipo "radiometrico", legate all'intensità del campo elettromagnetico imperturbato, con i rispettivi livelli di riferimento prescritti dalla normativa. Se uno di questi livelli è superato, può essere opportuna una verifica del rispetto delle restrizioni di base: queste 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. La dosimetria elettromagnetica si occupa della determinazione delle grandezze dosimetriche avvalendosi di tecniche sperimentali, analitiche o numeriche. Queste ultime hanno mostrato le maggiori potenzialità ed hanno portato recentemente allo sviluppo di pacchetti software commerciali, che si affiancano ai programmi messi a punto in ambiti di ricerca. La proposta di applicativi per le basse frequenze (fino a qualche centinaio di kilohertz) è tuttora limitata e la loro diffusione scarsa: anche per questo non ne è disponibile una validazione estesa ed esaustiva e non ne sono completamente note le condizioni di applicabilità a situazioni particolari. Realizzare un confronto quantitativo tra i risultati ottenuti da programmi diversi applicati a problemi standardizzati può fornire una validazione alternativa a quella sperimentale, alquanto onerosa e non sempre possibile.

In questo contesto si inserisce il presente lavoro finalizzato ad effettuare un confronto quantitativo sui risultati di elaborazioni dosimetriche derivate da diversi pacchetti software applicati a casi di studio opportunamente definiti. Obiettivi primari di questo interconfronto consistono nella possibilità di dare risposta ad una serie di esigenze tra cui:

- validare i risultati dosimetrici di ogni singolo applicativo, in modo più approfondito di quanto sia fattibile attraverso verifiche sperimentali o confronti con soluzioni analitiche di problemi elementari;
- stabilire se – e fino a che punto – programmi distinti, applicati alla soluzione del medesimo problema, forniscano risultati compatibili, pur facendo uso di metodi diversi per la modellizzazione delle sorgenti e/o per la formulazione e la soluzione numerica delle equazioni di accoppiamento con l'oggetto esposto;
- ricavare indicazioni sul livello tipico di accuratezza che può caratterizzare i risultati della dosimetria numerica.

In generale, l'interconfronto può evidenziare i punti di forza ed i limiti dei pacchetti software analizzati, in modo da individuare gli ambiti applicativi più adatti ad ognuno di essi.

I risultati dello studio potranno, auspicabilmente, essere utili per indagare quantitativamente il rapporto tra restrizioni di base e livelli di riferimento stabiliti dagli organismi protezionistici in

funzione della frequenza e delle conducibilità e quindi il margine di cautela associato ai modelli dosimetrici utilizzati dalle linee guida internazionali (ICNIRP, 2010).

MATERIALI E METODI

Al momento l'interconfronto coinvolge tre applicativi per le basse frequenze: due commerciali (SEMCAD X di SPEAG e EMS di CST) e uno sviluppato presso il CNR-IFAC di Firenze. Il protocollo messo a punto per effettuare lo studio, illustrato nel dettaglio nel paragrafo seguente, si basa su un insieme di simulazioni standardizzate applicate a geometrie semplici (sfera, cilindro, ellissoide, parallelepipedo) in modo di assicurare la ripetibilità dei test effettuati. Si tratta di un protocollo aperto che potrà pertanto essere esteso ad altri software eventualmente disponibili in futuro e ad altre frequenze o altre situazioni di esposizione standardizzate.

GLI APPLICATIVI

I tre applicativi presi in considerazione per la dosimetria numerica alle basse frequenze, SEMCAD X (SPEAG, 2011), SPFD di IFAC (Zoppetti, 2009), EMS (CST, 2011), fanno uso della cosiddetta approssimazione quasi-statica, applicata in maniera diversa, permettendo in questo modo una grande semplificazione delle equazioni che descrivono l'accoppiamento tra campo elettromagnetico e soggetto esposto.

Si precisa che per poter applicare l'approssimazione quasi statica si devono considerare verificate tre distinte condizioni.

La prima condizione permette di trascurare gli effetti di propagazione e di considerare il campo elettrico ed il campo magnetico come agenti fisici indipendenti, che danno origine a due problemi distinti: il problema elettrico ed il problema magnetico. Tale condizione è verificata quando le dimensioni del problema, intese come massima dimensione del teatro espositivo, siano piccole rispetto alla lunghezza d'onda.

Una ulteriore semplificazione del problema magnetico è applicabile quando le dimensioni dell'oggetto esposto sono piccole rispetto alla profondità di penetrazione; questa condizione garantisce che gli effetti dei campi magnetici prodotti dalle correnti indotte nei tessuti saranno ridotti, e quindi il campo magnetico applicato non sarà essenzialmente perturbato dall'oggetto esposto.

L'ultima condizione permette di semplificare il problema elettrico ed è verificata quando i tessuti dell'organismo esposto possono essere considerati come buoni conduttori ($\sigma \gg \omega \epsilon$). Di conseguenza nel soggetto esposto le correnti di spostamento sono trascurabili rispetto alle correnti di conduzione.

Per la soluzione del sistema di equazioni in regime quasi-statico, il software non commerciale SPFD sviluppato da IFAC e il pacchetto software SEMCAD X (SPEAG) utilizzano il metodo Scalar Potential Finite Difference (SPFD), particolarmente adatto alla soluzione dei problemi in 3D perché porta a un'equazione scalare.

$$\nabla \cdot (\sigma (-\nabla \phi - j\omega \vec{A}_s)) = 0$$

dove σ è la conducibilità elettrica, ϕ il potenziale scalare di tipo "elettrostatico", ω la pulsazione del campo e A_s il potenziale vettore dovuto alle sole sorgenti.

Questa equazione viene risolta per ottenere il potenziale scalare, da cui vengono calcolate le grandezze interne (campo elettrico interno e densità di corrente).

Il pacchetto Software EMS (CST), partendo sempre dall'approssimazione quasi-statica per le basse frequenze, utilizza invece una formulazione basata sul potenziale vettore magnetico (solutore Magneto Quasi-Statico MQS), che porta alla soluzione dell'equazione:

$$\left(\nabla \times \frac{\nabla}{\mu} \times + j\omega \sigma \right) \vec{A} = \vec{J}_s$$

dove J_s è la densità di corrente delle sorgenti.

Nel caso di solidi disomogenei, come spiegato più avanti, EMS richiede l'utilizzo di un solver basato sulla soluzione delle equazioni di Maxwell nella forma completa (solutore "Full Wave"), che include anche il termine delle correnti di spostamento:

$$\left(\nabla \times \frac{\nabla}{\mu} \times + j\omega\sigma - \omega^2\epsilon \right) \vec{A} = \vec{J}_s$$

Infatti, nel caso dei solidi disomogenei, il solutore MQS non ha fornito risultati in linea con gli altri applicativi per cui gli sviluppatori, interpellati, hanno suggerito di utilizzare il solutore "Full Wave" che ha fornito risultati migliori a scapito però di una risoluzione più bassa di quella imposta nel caso dei solidi omogenei, poiché, come prevedibile, richiede maggiori risorse di calcolo rispetto al solutore MQS in quanto basato sulla soluzione di un sistema con un numero maggiore di equazioni. Presumibilmente a causa di questa ridotta risoluzione e per altri aspetti che andranno ulteriormente indagati, il solutore Full Wave ha presentato delle anomalie nella distribuzione dei valori di campo elettrico interno. Per estrarre dati congrui pertanto è stato necessario rielaborare i risultati eliminando i valori eccessivamente elevati presenti nelle code della distribuzione, verosimilmente corrispondenti alle zone di interfaccia solido/aria. CST si sta interessando per risolvere questo problema.

IL PROTOCOLLO

Come già evidenziato, obiettivo primario del protocollo consiste nell'effettuare un confronto quantitativo tra i risultati dosimetrici, in particolare valori del campo elettrico interno, forniti dai differenti pacchetti software disponibili. Allo scopo di testare in modo approfondito le caratteristiche tecniche dei vari pacchetti, il protocollo si sviluppa in differenti fasi successive, nelle quali vengono via via complicati i parametri delle simulazioni secondo il seguente:

Frequenze di indagine

- 1 Hz
- scaletta con progressione geometrica nelle ELF-IF, per esempio: - 50 Hz – 500 Hz – 5 kHz – 50 kHz – 500 kHz

Induzione magnetica

- sinusoidale
- ampiezza pari al livello di riferimento ICNIRP per ciascuna frequenza
- omogenea con polarizzazione lineare (salvo casi particolari)

Parametri di interconfronto

- parametri statistici (media, StDev, mediana, 99%-ile, 1%-ile, 25%-ile, 75%-ile, tutto sul campo elettrico interno [V/m]; scarto relativo percentuale). L'1%-ile e il 99%-ile sono stati introdotti in quanto più rappresentativi dei valori estremi nella distribuzione reale dei dati, piuttosto che i valori massimo e minimo dedotti direttamente dalle simulazioni. Tali valori sono infatti generalmente non utilizzabili in quanto fortemente affetti da errori legati al mesh e alla gestione delle criticità da parte dei codici di calcolo. Per lo stesso motivo il 99%-ile del valore di campo elettrico interno viene indicato dall'ICNIRP quale valore rilevante ai fini della valutazione di conformità con le restrizioni di base per la bassa frequenza (ICNIRP, 2010)
- parametri della simulazione (discretizzazione, numero di celle, durata, etc.)

Modelli di riferimento

- prima fase: interconfronto su problemi di base aventi anche soluzione analitica, cioè con geometrie solide semplici e strutture omogenee (tessuto muscolare)
 - sfera (possibilmente con diverse risoluzioni)
 - ellissoide di rotazione, campo parallelo all'asse di rotazione
 - ellissoide di rotazione, campo ortogonale all'asse di rotazione
 - parallelepipedo
- seconda fase: studio delle discontinuità di conducibilità (muscolo-grasso) su geometrie semplici
 - due sfere concentriche
 - due semisfere con piano di separazione ortogonale al campo
 - due semisfere con piano di separazione parallelo al campo

- cilindro cavo con piano di separazione parallelo all'asse
- terza fase: interconfronto con modelli antropomorfi ad alta risoluzione ed elevata disomogeneità e problemi realistici
 - VHP 2 mm campo verticale
 - VHP 2 mm campo orizzontale fronte-retro
 - VHP 2 mm campo orizzontale destra-sinistra
 - VHP 2 mm campo non omogeneo generato da una sorgente reale monofase standardizzata (per esempio un crogiolo ad induzione)

dove con VHP viene indicato il modello di organismo sviluppato in seno al Visible Human Project (USNLM, 1994).

Nella stesura del protocollo era stato previsto di inserire anche il modello descritto nella norma CEI EN 62311 ivi appositamente definito per la validazione dei codici numerici. Si è poi deciso di non includerlo in quanto non conforme all'estrazione dei parametri statistici previsti dal nostro protocollo.

Al momento sono state implementate solo simulazioni afferenti alle prime due fasi. Nella prima sono state prese in considerazione semplici strutture omogenee (sfera, ellissoide, parallelepipedo), mentre nella seconda lo studio è stato esteso a solidi disomogenei ovvero costituiti da parti a conducibilità differente, allo scopo di approfondire il ruolo della conducibilità e dei contrasti di conducibilità tra tessuti confinanti sulle valutazioni di campo elettrico indotto.

Tutte le simulazioni sono state effettuate considerando un campo magnetico esterno omogeneo di 1 mT (rms) con polarizzazione lineare e alla frequenza di 1 Hz. A questo scopo la sorgente è stata realizzata nel caso dei software EMS e SEMCAD X simulando due bobine di Helmholtz circolari.

Per garantire un campo magnetico uniforme nel volume di interesse sono stati inizialmente posti i seguenti parametri per il sistema di bobine:

- raggio: 1 m
- corrente di alimentazione: 1110 A (rms)

Tali impostazioni si sono rivelate idonee per le tutte le simulazioni effettuate con SEMCAD X il cui solutore in bassa frequenza permette di collocare la sorgente al di fuori del dominio di calcolo. Nel caso di EMS invece, che include la sorgente nel dominio di calcolo e impone, quindi, l'espansione dello stesso per rendere efficaci le condizioni al contorno, le dimensioni delle bobine dovrebbero essere ridotte al fine di contenere il volume totale di calcolo, con la possibile conseguenza di un peggioramento del grado di uniformità del campo magnetico nel volume di interesse e di una limitazione nella risoluzione imponibile. Avendo a disposizione una piattaforma con ingenti risorse di calcolo presso la sede ENEA, le simulazioni con EMS sono state effettuate con le bobine di raggio 1 metro presso la sede ENEA e con le bobine con raggio 30 cm ($r = 30$ cm; $I_{rms} = 334$ A) presso la sede INAIL al fine di valutare la coerenza tra le due diverse configurazioni del modello.

A fronte di questo aspetto, EMS mostra una certa versatilità nella scelta del "mesh" che può essere a tetraedri (fig.1) o esaedri (cubi), consentendo la possibilità di una migliore rappresentazione dello scenario in funzione delle forme geometriche in gioco.

Figura 1 – EMS. Visualizzazione della mesh tetraedri

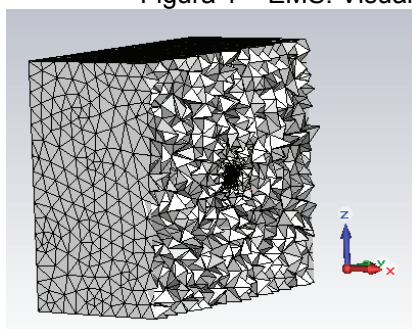


Fig.1a – Mesh tetraedri sul dominio di calcolo

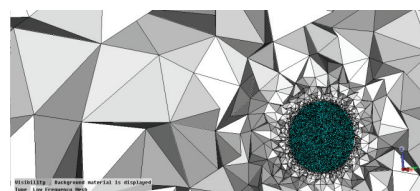


Fig.1b – Particolare mesh tetraedri in prossimità dell'oggetto

Nel caso del software SPFD_IFAC, non essendo necessario simulare la sorgente, è stata data direttamente in input al modello una distribuzione di campo magnetico uniforme definita ad hoc.

Ad oggi sono stati presi in considerazione i seguenti modelli di riferimento:

FASE I – Solidi omogenei

Parametri comuni alle simulazioni: $f = 1 \text{ Hz}$; $B = 1 \text{ mT}$; $\sigma = 1 \text{ S/m}$

- Caso 1. Sfera (raggio 46 mm); campo magnetico parallelo all'asse z (Fig.2a)
- Caso 2. Ellissoide B_z (asse maggiore 46 mm; asse minore 20 mm); campo magnetico parallelo all'asse z (Fig.2b)
- Le Caso 3. Ellissoide B_x (asse maggiore 46 mm; asse minore 20 mm); campo magnetico parallelo all'asse x (Fig.2c)
- Caso 4. Parallelepipedo a base quadrata (lato di base 80 mm; altezza 40 mm); campo magnetico parallelo all'asse z (Fig.2d)

Figura 2 – Differenti modelli Fase I

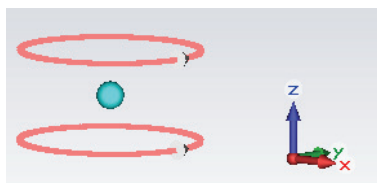


Fig.2a – Sfera omogenea

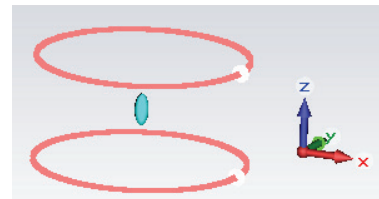


Fig.2b – Ellissoide omogeneo B_z (campo orientato lungo asse z)

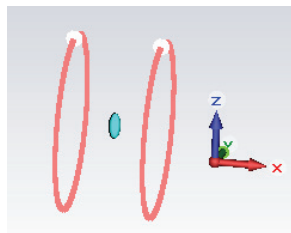


Fig.2c – Ellissoide omogeneo B_x (campo orientato lungo asse x)

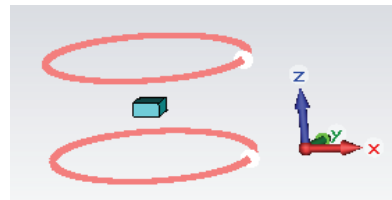


Fig.2d – Parallelepipedo omogeneo

FASE II – Solidi non omogenei

Due tessuti di differente conducibilità separati dal piano $X = 0$;

Parametri comuni alle simulazioni: $f = 1 \text{ Hz}$; $B = 1 \text{ mT}$; campo magnetico parallelo all'asse z

- conducibilità $\sigma_1 = 0.1 \text{ S/m}$ (coordinate x negative)
- conducibilità $\sigma_2 = 1 \text{ S/m}$ (coordinate x positive)
- Caso 5. Sfera (raggio 46 mm): (Fig. 3a)
- Caso 6. Cilindro disomogeneo (raggio interno 20 mm; raggio esterno 46 mm; altezza 60mm)

Figura 3 – Differenti modelli Fase II

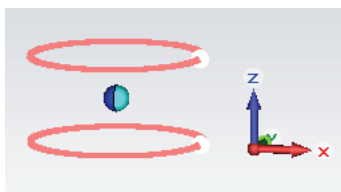


Fig.3a – Sfera disomogenea

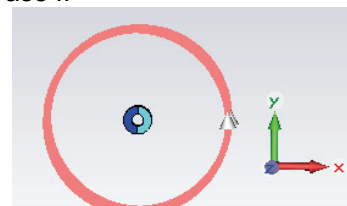


Fig.3b – Cilindro disomogeneo

Le simulazioni EMS e SEMCAD X sono state fatte girare su piattaforme hardware che dispongono almeno di 2 GB di RAM, ampiamente superiori a quella base richiesta dai codici (515 MB).

RISULTATI

A seguito dell'effettuazione delle simulazioni, sono state condotte le elaborazioni statistiche previste dal protocollo. Come valutazione dell'affidabilità dei risultati è stato scelto un criterio di scarto relativo percentuale S_k , valutato sulla base della seguente formula per tutti i parametri di interconfronto E_k [V/m]:

$$S_k = \frac{|E_k - \bar{E}|}{\bar{E}} * 100$$

dove la variabile k si riferisce ai vari applicativi (EMS_INAIL, EMS_ENEA, SEMCAD X, SPFD_IFAC) ed \bar{E} [V/m] è la media sui valori di E_k .

Relativamente alla Fase I (solidi omogenei) si presentano i risultati ottenuti con SEMCAD X, IFAC e EMS (MQS) utilizzato con le due possibili opzioni relative alle dimensioni delle bobine, in particolare EMS_INAIL si riferisce alle simulazioni effettuate con bobine di raggio $r = 30$ cm, mentre EMS_ENEA a quelle effettuate con bobine di raggio $r = 1$ m (tab. 1-4).

Per quanto riguarda la Fase II (solidi disomogenei) si presentano i risultati del Caso 5 (sfera disomogenea) derivati da SEMCAD X, SPFD_IFAC e EMS_INAIL ("Full Wave") (tab. 5).

Relativamente al Caso 6 (cilindro disomogeneo), si presentano solo i risultati di SEMCAD X e di SPFD_IFAC in quanto quelli di EMS non si sono rivelati congrui e ci stiamo ancora lavorando (tab.6).

Si riportano di seguito le tabelle riepilogative dei risultati di tutti gli applicativi¹. I valori si riferiscono tutti al campo E espresso in V/m.

Nel caso della sfera omogenea, che rappresenta il più semplice tra quelli esaminati, si riportano anche i risultati dei parametri descrittivi calcolati a partire dalla soluzione analitica.

Tabella 1 – Risultati Sfera omogenea

F1_C1 – sfera	EMS_INAIL	EMS_ENEA	SEMCAD X	SPFD_IFAC	StDev	Sol analitica
Media distribuzione (* ¹)	8,56E-05	8,39E-05	8,43E-05	8,50E-05	7,40E-07	8,50E-05
Minimo (* ²)	2,01E-07	1,26E-06	2,22E-06	0,00E+00	-	0
Massimo (* ²)	2,36E-04	1,44E-04	1,80E-04	2,07E-04	-	1,44E-04
1%-ile (min)	1,27E-05	1,14E-05	1,10E-05	1,13E-05	7,69E-07	1,18E-05
25%-ile	6,04E-05	5,98E-05	5,97E-05	6,04E-05	3,77E-07	6,04E-05
50%-ile (Mediana)	8,70E-05	8,66E-05	8,68E-05	8,78E-05	5,35E-07	8,79E-05
75%-ile	1,13E-04	1,12E-04	1,11E-04	1,12E-04	8,16E-07	1,12E-04
99%-ile (-> max)	1,65E-04	1,39E-04	1,40E-04	1,43E-04	1,23E-05	1,41E-04

Tabella 2 – Risultati Ellissoide – Campo magnetico orientato lungo asse z

F1_C3 – ellissoide B _z	EMS_INAIL	EMS_ENEA	SEMCAD X	SPFD_IFAC	StDev
Media (* ¹)	3,82E-05	3,75E-05	3,66E-05	3,69E-05	6,87E-07
Minimo	8,02E-07	9,62E-07	6,62E-07	0,00E+00	-
Massimo	1,00E-04	1,07E-04	7,42E-05	9,04E-05	-
1%-ile (min)	7,42E-06	7,42E-06	5,08E-06	4,52E-06	1,53E-06
25%-ile	2,69E-05	2,61E-05	2,58E-05	2,59E-05	4,99E-07
50%-ile (Mediana)	3,84E-05	3,80E-05	3,80E-05	3,80E-05	1,71E-07
75%-ile	4,85E-05	4,80E-05	4,80E-05	4,85E-05	2,89E-07
99%-ile (max)	7,07E-05	6,80E-05	6,32E-05	6,42E-05	3,47E-06

Note alle tabelle

(*1) questa Media rappresenta la media dei valori della distribuzione volumetrica del campo all'interno dell'oggetto ed è estratta come parametro di confronto: non ha, quindi, alcun valore statistico.

(*2) il Minimo e il Massimo sono estratti a puro titolo dimostrativo della scarsa affidabilità dovuta a diversi fattori tra cui il fatto che spesso sono localizzati in prossimità di criticità morfologiche (superfici di discontinuità, spigoli, etc) e quindi sono affetti da errori legati alla gestione della griglia di calcolo. Non sono pertanto utilizzati come parametro di confronto.

Tabella 3 – Risultati Ellissoide - Campo magnetico orientato lungo asse x

F1_C4 – ellissoide B_x	EMS_INAIL	EMS_ENEA	SEMCAD X	SPFD_IFAC	StDev
Media (* ¹)	4,83E-05	4,75E-05	4,59E-05	4,63E-05	1,11E-06
Minimo	9,06E-07	3,41E-07	2,62E-06	0,00E+00	-
Massimo	1,78E-04	1,84E-04	1,22E-04	1,44E-04	-
1%-ile (min)	6,22E-06	7,36E-06	5,26E-06	5,64E-06	9,18E-07
25%-ile	3,26E-05	3,60E-05	2,90E-05	2,93E-05	3,28E-06
50%-ile (Mediana)	4,67E-05	4,62E-05	4,37E-05	4,36E-05	1,65E-06
75%-ile	6,47E-05	6,40E-05	6,12E-05	6,22E-05	1,61E-06
99%-ile (max)	1,06E-04	1,01E-04	9,68E-05	9,84E-05	4,07E-06

Tabella 4 – Risultati parallelepipedo

F1_C5 – parallelep	EMS_INAIL	EMS_ENEA	SEMCAD X	SPFD_IFAC	StDev
Media (* ¹)	8,04E-05	8,84E-05	8,75E-05	8,77E-05	3,76E-06
1%-ile (min)	1,21E-05	1,39E-05	1,40E-05	1,40E-05	9,45E-07
25%-ile	6,09E-05	-	6,64E-05	6,52E-05	2,89E-06
50%-ile (Mediana)	8,13E-05	8,91E-05	8,35E-05	8,41E-05	3,29E-06
75%-ile	1,03E-04	-	1,11E-04	1,11E-04	4,62E-06
99%-ile (max)	1,49E-04	1,63E-04	1,61E-04	1,63E-04	6,69E-06

Tabella 5 - Fase 2 – Solidi non omogenei: Semisfere

F2_C2 – sfera	EMS_INAIL	SEMCAD X	SPFD_IFAC	StDev
E (σ=1)				
Media	5,40E-05	5,39E-05	5,44E-05	3,00E-07
Minimo	1,23E-06	8,31E-07	0,00E+00	-
Massimo	3,55E-04	1,46E-04	1,45E-04	-
1%-ile (min)	8,31E-06	7,52E-06	7,73E-06	4,10E-07
25%-ile	3,66E-05	3,75E-05	3,83E-05	8,33E-07
50%-ile (Mediana)	5,18E-05	5,12E-05	5,22E-05	5,28E-07
75%-ile	7,20E-05	6,98E-05	7,00E-05	1,25E-06
99%-ile (max)	1,07E-04	1,23E-04	1,08E-04	8,84E-06
E (σ=0,1)				
Media	1,36E-04	1,36E-04	1,38E-04	1,14E-06
Minimo	6,17E-05	5,41E-05	4,98E-05	-
Massimo	2,41E-04	2,81E-04	3,03E-04	-
1%-ile (min)	7,96E-05	8,08E-05	8,18E-05	1,08E-06
25%-ile	1,10E-04	1,13E-04	1,15E-04	2,40E-06
50%-ile (Mediana)	1,35E-04	1,35E-04	1,37E-04	1,14E-06
75%-ile	1,57E-04	1,56E-04	1,58E-04	9,55E-07
99%-ile (max)	2,16E-04	2,15E-04	2,19E-04	2,05E-06

Tabella 6 – Fase 2 – Solidi non omogenei: Risultati Cilindro cavo

F2_C4 – cilindro cavo	E(σ=1)		E(σ=0,1)	
	SEMCAD X	SPFD_IFAC	SEMCAD X	SPFD_IFAC
Media	4,13E-05	4,13E-05	1,90E-04	1,91E-04
1%-ile (min)	2,65E-06	2,85E-06	1,43E-04	1,39E-04
25%-ile	2,36E-05	2,41E-05	1,82E-04	1,84E-04
50%-ile (Mediana)	3,97E-05	4,04E-05	1,88E-04	1,89E-04
75%-ile	5,78E-05	5,78E-05	1,96E-04	1,98E-04
99%-ile (max)	8,65E-05	8,60E-05	2,37E-04	2,49E-04

I valori dello scarto relativo percentuale sono risultati inferiori al 10% in tutti i casi esaminati con valori più elevati solo in corrispondenza dell'1%-ile e del 99%-ile.

A titolo esemplificativo si riportano i valori dello scarto relativo percentuale nel caso della sfera omogenea (tab.7) calcolati rispetto ai parametri derivati dalla soluzione analitica (tab.1).

Tabella 7 – Sfera omogenea. Scarto relativo percentuale

	EMS_INAIL	EMS_ENEA	SEMCAD X	SPFD_IFAC
Media	0,7	1,3	0,8	0,0
1%-ile	7,8	3,5	6,9	4,5
25%-ile	0,0	0,9	1,1	0,0
50%-ile	1,1	1,5	1,3	0,1
75%-ile	0,7	0,2	1,1	0,2
99%-ile	16,9	1,5	0,8	1,0

DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

Si è intrapreso un interconfronto tra applicativi per la dosimetria numerica dei campi elettromagnetici in bassa frequenza (fino a qualche centinaio di chiloherzt), strumenti necessari per la verifica delle restrizioni di base previste dalle normative. L'attenzione è stata focalizzata sulla bassa frequenza in quanto ad oggi meno indagata nell'ambito della modellistica numerica.

Nel lavoro presente si sono affrontati solo alcuni aspetti del protocollo previsto che, come descritto, è molto complesso e dettagliato e sarà pertanto oggetto di studi e approfondimenti futuri.

In particolare in questa prima fase dello studio un notevole impegno è stato indirizzato ad acquisire una maggiore conoscenza dei due software commerciali, EMS e SEMCAD X, sia da un punto di vista dell'utilizzo che degli aspetti teorici di base. Superata questa fase iniziale si intende approfondire i risultati presentati in questa sede utilizzando per gli stessi modelli altri parametri di valutazione, basati ad esempio sul confronto tra i valori di campo interno estratti lungo direzioni opportunamente identificate (ad esempio raggi della sfera), allo scopo di analizzare con maggiore dettaglio le distribuzioni dei valori di campo all'interno degli oggetti.

E' importante precisare che, in base alle modalità con il quale è stato definito, il protocollo presentato risulta aperto e versatile in quanto si presta all'applicazione ad altri pacchetti software eventualmente disponibili in futuro e a nuovi casi di studio di interesse.

Basandoci su quanto sviluppato al momento e sul calcolo dello scarto relativo percentuale, i risultati ottenuti dai vari applicativi nel caso dei solidi omogenei si rivelano coerenti tra loro (vedi tab.7). Il caso della sfera omogenea inoltre ha evidenziato un ottimo accordo anche con la soluzione analitica.

Per quanto riguarda i casi dei solidi disomogenei, i risultati forniti dai due software SEMCAD X e SPFD_IFAC risultano congrui in entrambi i casi di studio affrontati. L'interconfronto si è rivelato quindi un buon indicatore della coerenza tra i due applicativi basati sullo stesso metodo (SPFD), risultando uno strumento di validazione reciproca.

Relativamente al software EMS è stato necessario utilizzare due solutori diversi. Per i solidi omogenei i risultati si rivelano congrui con il solutore in bassa frequenza MQS (magneto quasi-statico).

Nei casi disomogenei, l'applicazione del solutore Full Wave, suggerito dagli sviluppatori quale alternativa al solver MQS, migliora la qualità dei risultati ma comporta una richiesta di risorse di calcolo più elevata a scapito della risoluzione imponibile e rivela delle complessità che necessitano un approfondimento di cui CST si sta occupando.

Nell'insieme i risultati di questo studio, una volta completato il protocollo, contribuiranno quindi a valutare le potenzialità e le eventuali limitazioni dei programmi analizzati e lo stato dell'arte ad oggi della dosimetria numerica in bassa frequenza.

Bibliografia

CEI Comitato Elettrotecnico Italiano *CEI EN 62311: Valutazione degli apparecchi elettronici ed elettrici in relazione ai limiti di base per l'esposizione umana ai campi elettromagnetici (0 – 300 GHz)* (2008)

CST - Computer Simulation Technology *CST EM STUDIO® Static and low frequency design and analysis* (2011) Darmstadt Germany

ICNIRP - International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: *GUIDELINES FOR LIMITING EXPOSURE TO TIME-VARYING ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS (1 Hz TO 100 kHz)* (2010), Health Physics, Vol. 99, 6:818-836

SPEAG *SEMCAD X v14.6 User Manual* (2011) Zürich Switzerland

USNLM. The Visible Human Project®. Internet resource at

http://www.nlm.nih.gov/research/visible/visible_human.html, (1994) U.S. National Library of Medicine

Zoppetti N. and Andreuccetti D. *Review of open problems in assessing compliance with 2004/40/EC Directive exposure limit values for low frequency current density by means of numerical techniques* (2009)

Radiation Protection Dosimetry Vol.137, 3-4: 247-251