

V CONVEGNO NAZIONALE

IL CONTROLLO DEGLI AGENTI FISICI:
AMBIENTE, SALUTE E QUALITÀ DELLA VITA

Novara 6 - 7 - 8 giugno 2012

Dipartimento di Scienze del Farmaco
Università degli Studi del Piemonte Orientale
Largo Donegani, 2 - 28100 Novara



Sono stati richiesti i crediti ECM
e il riconoscimento per aggiornamento RSPP

Interconfronto tra pacchetti software per la dosimetria numerica a bassa frequenza

Rosaria Falsaperla

INAIL Settore Ricerca – Dipartimento Igiene del Lavoro
r.falsaperla@inail.it

**Andreuccetti D, Zoppetti N (CNR-IFAC)
Ardoino L, Barbieri E (ISPRA),
Contessa GM (Inail – DIL),
Pinto R (ENEA), Polichetti A (ISS)**



❖ *CONTESTO*

❖ *SCOPO INTERCONFRONTO*

❖ *APPLICATIVI ESAMINATI*

❖ *PROTOCOLLO*

❖ *RISULTATI*

❖ *SVILUPPI FUTURI*

CONTESTO

La dosimetria numerica riveste un ruolo cruciale nel processo di valutazione del rischio di esposizione a CEM

Ad oggi si riscontra:

- limitata disponibilità e scarsa diffusione di applicativi per le basse frequenze (fino a qualche centinaio di kHz)
- assenza di una validazione estesa
- necessità di approfondire le condizioni di applicabilità a situazioni particolari

Un confronto quantitativo tra i risultati ottenuti da diversi applicati a problemi standardizzati può fornire una validazione alternativa a quella sperimentale o analitica

SCOPO INTERCONFRONTO

- validare i risultati dosimetrici di ogni singolo sw
- verificare la compatibilità dei risultati quando i sw sono applicati alla soluzione del medesimo problema
- evidenziare punti di forza e limiti di ciascun sw in modo da individuare gli ambiti applicativi più adatti

APPLICATIVI ESAMINATI

➤ SEMCAD X ELF - SPEAG

➤ Software sviluppato presso il CNR-IFAC di Firenze (indicato nel seguito con SPFD_IFAC)

Andreuccetti D and Zoppetti N

➤ EM STUDIO® - CST Computer Simulation Technology

APPROSSIMAZIONE QUASI-STATICA

Le dimensioni degli oggetti coinvolti e le loro distanze mutue sono piccole rispetto alla lunghezza d'onda

QS1

Gli effetti di propagazione sono trascurabili: il campo elettrico e il campo magnetico possono essere calcolati utilizzando i metodi dell'elettrostatica e della magnetostatica.

La dimensione del corpo esposto è confrontabile o minore della profondità di penetrazione del campo magnetico.

QS2

Il corpo esposto non perturba significativamente il campo magnetico impresso.

Nel corpo esposto, la corrente di conduzione prevale su quella di spostamento.

QS3

Le cariche si muovono restando in fase con i campi. Il corpo esposto è pressoché equipotenziale. Il calcolo del campo elettrico esterno è indipendente dalla soluzione del problema interno.

SEMCAD X e SPFD_IFAC

$$\nabla \times \vec{E}_i = -j\omega \vec{B}_i = -j\omega \nabla \times \vec{A}_i \quad \rightarrow \quad \nabla \times (\vec{E}_i + j\omega \vec{A}_i) = 0 \quad \rightarrow \quad \vec{E}_i + j\omega \vec{A}_i = -\nabla \phi$$

$$\vec{E}_i = -\nabla \phi - j\omega \vec{A}_i$$

$$\nabla \times \vec{H}_i = (\sigma + j\omega \epsilon) \vec{E}_i \quad \rightarrow \quad \nabla \cdot (\nabla \times \vec{H}_i) = 0 = \nabla \cdot ((\sigma + j\omega \epsilon) \vec{E}_i)$$

$$\nabla \cdot [(\sigma + j\omega \epsilon) (-\nabla \phi - j\omega \vec{A}_i)] = 0$$

$$\sigma \gg \omega \epsilon$$

QS3

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

$$\vec{A}_i \approx \vec{A}_{sources}$$

QS2

L'incognita è il potenziale scalare ϕ ; il termine noto è il potenziale vettore magnetico $\vec{A}_{sources}$ legato alla sorgente

EM STUDIO

Utilizzati due solver:

Magneto Quasi Statico (MQS) (caso dei solidi omogenei). Risolve l'equazione:

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

Full Wave (caso dei solidi disomogenei). Risolve le equazioni di Maxwell nella forma completa includendo anche il termine delle correnti di spostamento:

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

L'incognita è il potenziale vettore \vec{A} ; il termine noto è la densità di corrente delle sorgenti \vec{J}_s

PROTOCOLLO INTERCOFRONTO

Frequenze di indagine

- ❖ scaletta con progressione geometrica nelle ELF-IF:
1 Hz - 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, 1%-ile, 25%-ile, 75%-ile, 99%-ile, tutto sul campo elettrico interno [V/m]; scarto relativo percentuale)
- ❖ parametri della simulazione (numero di celle, durata, etc.)

PROTOCOLLO INTERCOFRONTO

Modelli di riferimento

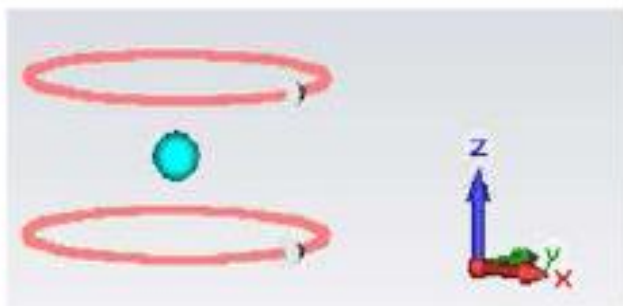
- ❖ prima fase: geometrie solide semplici e strutture omogenee (sfera, ellissoide, parallelepipedo)
- ❖ seconda fase: solidi disomogenei (sfera, cilindro cavo) per studiare le discontinuità di conducibilità su geometrie semplici
- ❖ terza fase: modelli antropomorfi ad alta risoluzione ed elevata disomogeneità (VHP). Applicazione a problemi realistici



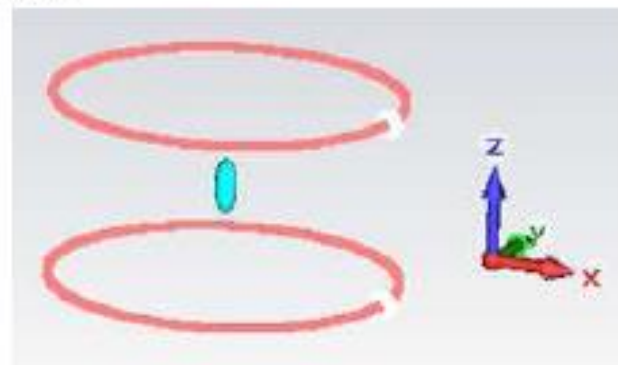
FASI GIA' REALIZZATE

MODELLI OMOGENEI

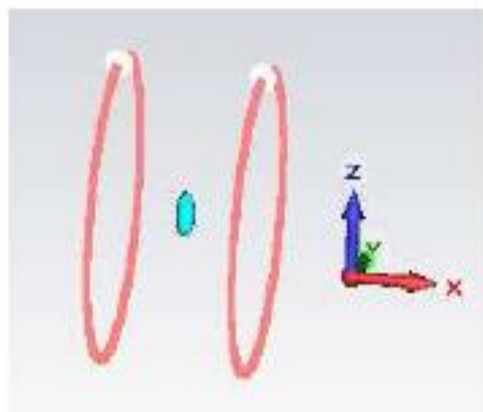
Differenti modelli Fase I



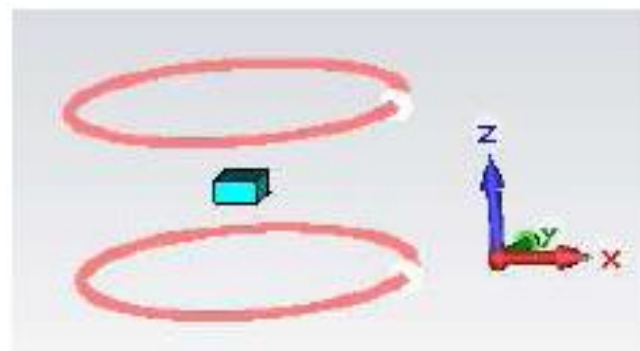
Sfera omogenea



Ellissoide omogeneo B_z (campo orientato lungo asse z)



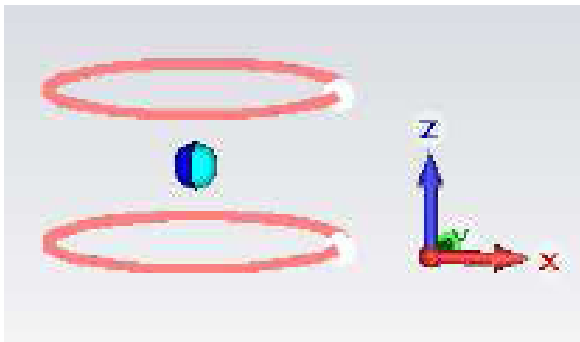
Ellissoide omogeneo B_x (campo orientato lungo asse x)



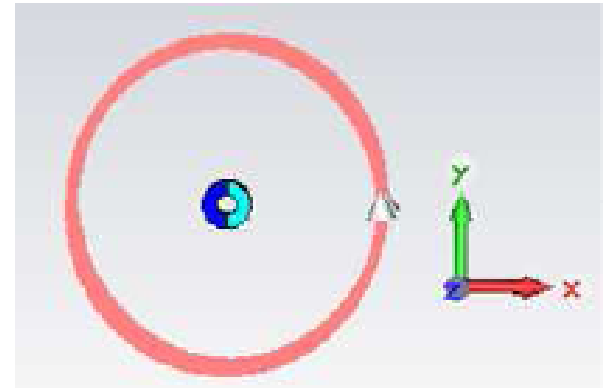
Parallelepipedo omogeneo

MODELLI DISOMOGENEI

Differenti modelli Fase II



Sfera disomogenea



Cilindro disomogeneo

Parametri comuni alle simulazioni:



$$f = 1 \text{ Hz}; B = 1 \text{ mT (rms)}$$

Valori di conducibilità impostati:

Solidi omogenei $\longrightarrow \sigma = 1 \text{ S/m (Fase I)}$

Solidi disomogenei $\longrightarrow \sigma = 1 \text{ S/m}; 0.1 \text{ S/m (Fase II)}$

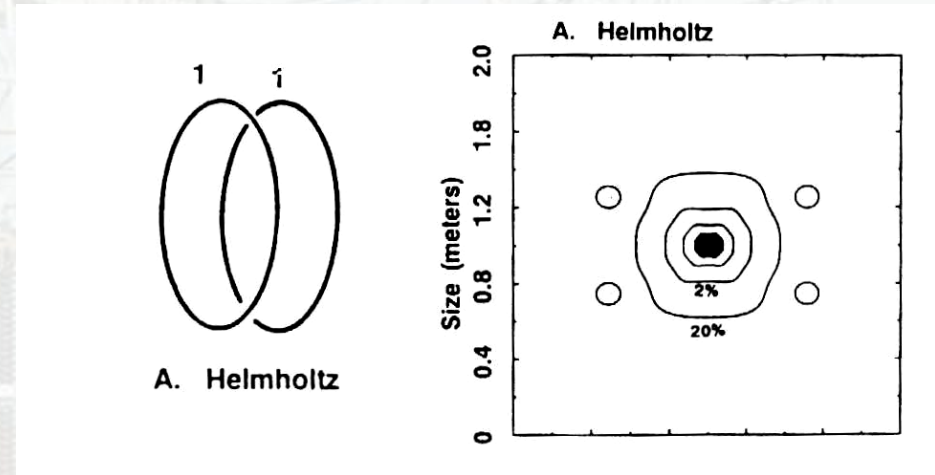
SORGENTE DI CAMPO MAGNETICO

SEMCAD X, EMS:

Bobine di Helmholtz

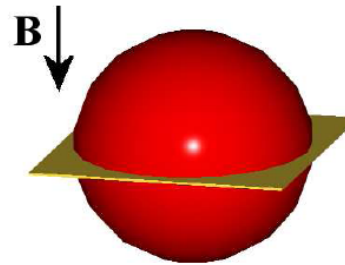
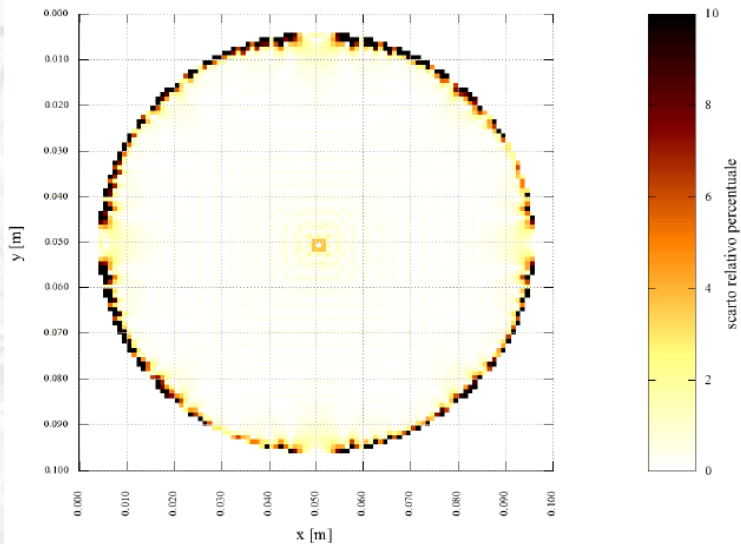
Valori impostati:

- raggio: 1 m / 30 cm
- corrente di alimentazione: 1110 A / 334 A (rms)

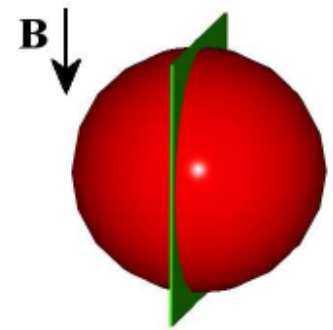
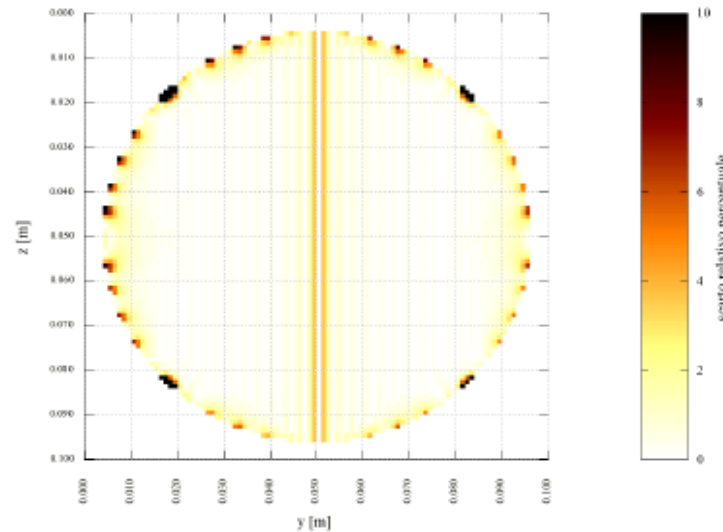


SPFD_IFAC: distribuzione uniforme di campo in input

SPFD_IFAC - SFERA OMOGENEA

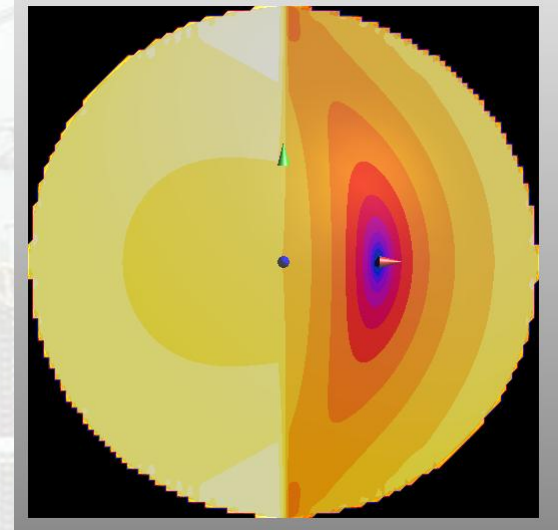
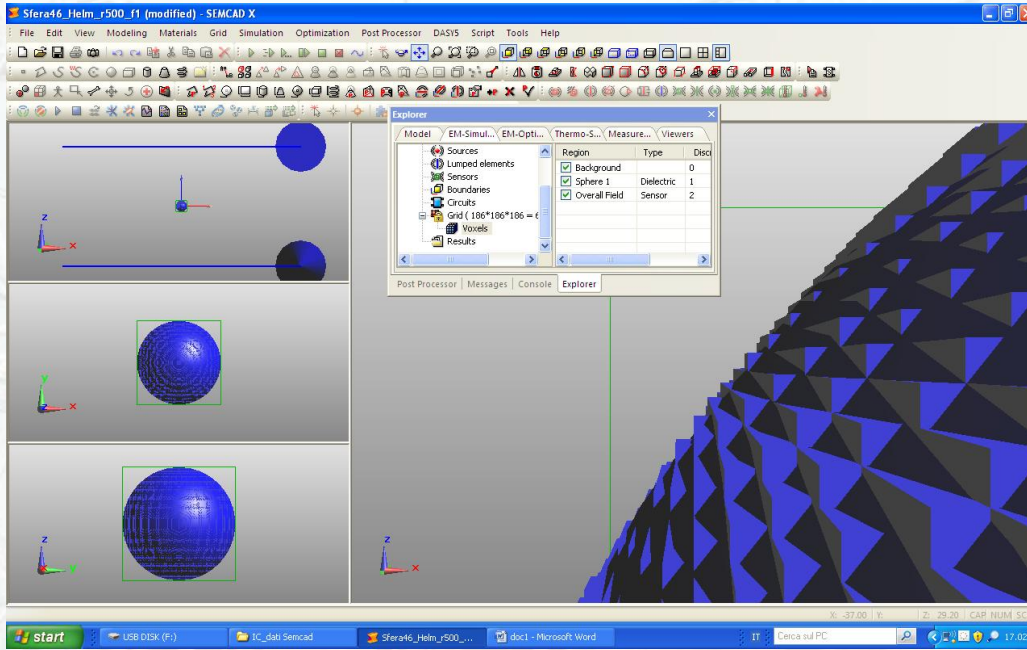


scarto relativo percentuale tra campo elettrico interno determinato analiticamente e campo elettrico calcolato



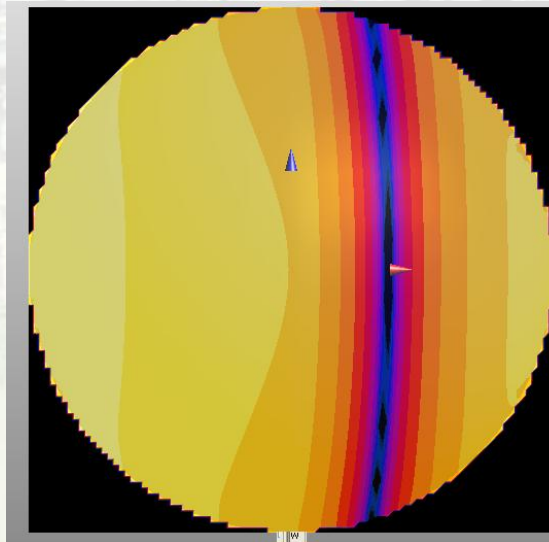
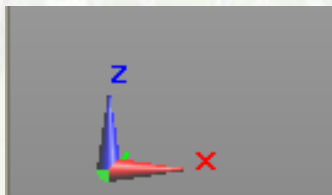
Nel volume occupato dalla sfera (risoluzione 0.5 mm) la variabilità di B è dell'ordine di $\pm 1\%$

SEMCAD X - SFERA DISOMOGENEA

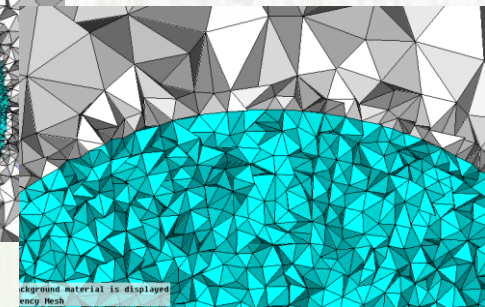
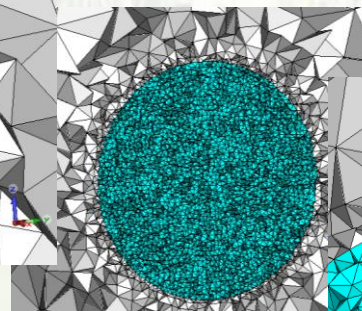
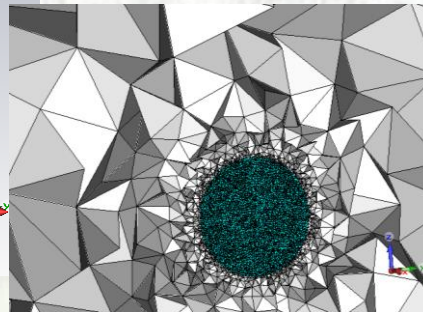
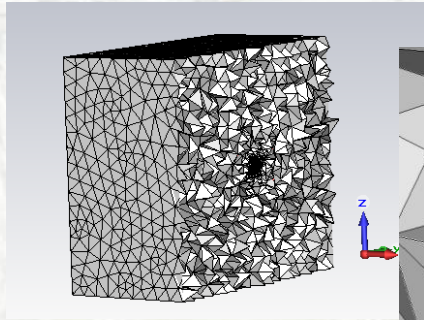
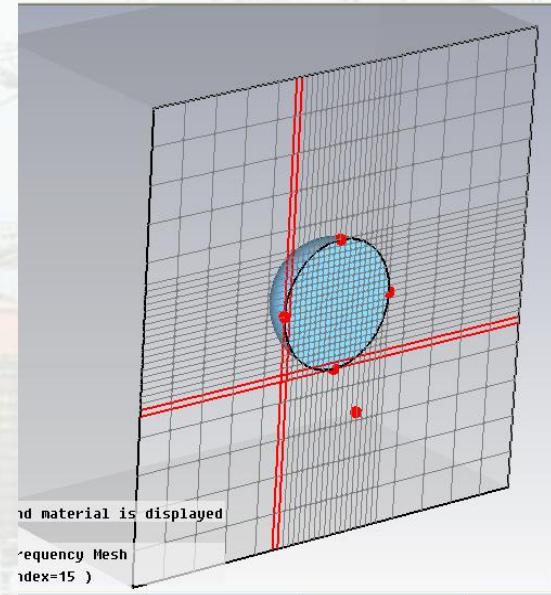
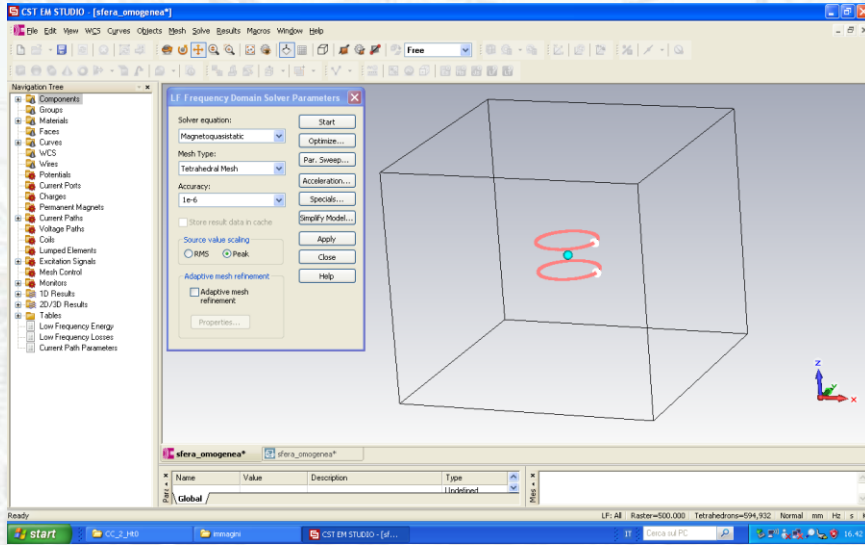


Campo elettrico sul piano $z = 0$

Campo elettrico sul piano $y = 0$



EMS (CST) - BOUNDING BOX E MESH





RISULTATI

Sono state effettuate le elaborazioni statistiche previste dal protocollo e come valutazione dell'accuratezza dei risultati è stato scelto un criterio di scarto relativo percentuale S_k :

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

\bar{E} [V/m] indica la media dei risultati forniti dai vari programmi

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

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

Scarto rel. percentuale rispetto alla soluzione analitica

	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

SFERA DISOMOGENEA

F2_C2 – sfera	EMS INAIL	SEMCAD X	SPFD IFAC	StDev
	E ($\sigma=1$)			
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 ($\sigma=0,1$)			
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

CONCLUSIONI

SOLIDI OMOGENEI

I risultati ottenuti dai vari applicativi si rivelano coerenti tra loro. Il caso della sfera omogenea evidenzia un ottimo accordo anche con la soluzione analitica

SOLIDI DISOMOGENEI

I risultati forniti da SEMCAD X e SPFD_IFAC risultano congrui in entrambi i casi di studio affrontati.

Nel caso di EMS, il solutore Full Wave migliora la qualità dei risultati rispetto al solutore MQS ma comporta una richiesta di risorse di calcolo più elevata a scapito della risoluzione imponibile

SVILUPPI FUTURI

- *Approfondire i risultati ottenuti utilizzando per gli stessi modelli altri parametri di valutazione, ad esempio il confronto tra valori di campo interno estratti lungo particolari direzioni (raggi della sfera)*
- *Proseguire nell'implementazione del protocollo, in particolare investigare i limiti di applicabilità dei codici in funzione della frequenza e dell'applicazione a modelli antropomorfi complessi*