



Istituto di Fisica Applicata “Nello Carrara”

Consiglio Nazionale delle Ricerche

Area della Ricerca di Sesto Fiorentino

Via Madonna del Piano 10

50019 Sesto Fiorentino (FI)

**Verifica del rispetto dei valori
limite di esposizione per lavoratori
esposti a CEM a frequenza bassa e
intermedia:
aspetti generali e problemi aperti**

ing. Nicola Zoppetti

dott. Daniele Andreuccetti

n.zoppetti@ifac.cnr.it

d.andreuccetti@ifac.cnr.it



La Direttiva Europea 2004/40/EC

on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields)

- La direttiva definisce dei **Valori Limite di Esposizione** (in termini di quantità interne non misurabili se non in modo invasivo).
- La direttiva definisce anche dei **Valori di Azione** (in termini di quantità esterne facilmente misurabili).
- Il rispetto dei Valori di Azione implica il rispetto dei Valori Limite di Esposizione.
- **Se i Valori di Azione sono superati ciò NON implica il superamento dei Valori Limite di Esposizione**

Determination of exposure and assessment of risks

1. In carrying out the obligations laid down in Articles 6(3) and 9(1) of Directive 89/391/EEC, the employer shall assess and, if necessary, measure and/or calculate the levels of electromagnetic fields to which workers are exposed. Assessment, measurement and calculation may, until harmonised European standards from Cenelec cover all relevant assessment, measurement and calculation situations, be carried out in accordance with the scientifically-based standards and guidelines referred to in Article 3 and, when relevant, by taking into account the emission levels provided by the manufacturers of the equipment when it is covered by the relevant Community Directives.
2. On the basis of the assessment of the levels of electromagnetic fields undertaken in accordance with paragraph 1, if the action values referred to in Article 3 are exceeded, the employer shall assess and, if necessary, **calculate** whether the exposure limit values are exceeded.

Alcune classi di sorgenti a bassa frequenza

Trasporto e distribuzione di energia elettrica



	Valori attesi (ad 1 m dal conduttore)	Action Values
Campo Elettrico	50 kV/m	10 kV/m
Induzione magnetica	200 μT	500 μT

Riscaldamento industriale ad induzione magnetica



Frequenza	Potenza	Misure ¹	Limiti ²
[kHz]	[kW]	[A/m]	[A/m]
3.3	10	2500	24.4
3.5	32	2000	24.4
4.3	30	440	24.4
10.5	3	710	24.4
233	10	240	6.87

Il campo decade molto rapidamente allontanandosi dal crogiolo. Valori inferiori ai limiti si raggiungono a distanze di circa 50 ÷ 100 cm. Il ciclo di lavoro dipende dalle modalità di lavorazione.

L'esempio illustrato si riferisce alle applicazioni nell'industria orafa, ma esistono apparati per l'industria pesante che funzionano a potenze anche 100 volte più alte.

1. Valori indicativi rilevati nel punto accessibile più vicino al crogiolo
2. Direttiva 2004/40/CE

Come premessa due quesiti:

1. quando è necessario (e conveniente) verificare il rispetto dei limiti di esposizione mediante tecniche dosimetriche?

2. che tipo di strumenti possono essere utilizzati per verificare il rispetto dei limiti di esposizione?



1) Quando è necessario verificare il rispetto dei limiti di esposizione mediante tecniche dosimetriche?

DL 9 aprile 2008, n.81, Capo IV, Art 209, comma 2

*“A seguito della valutazione dei livelli dei campi elettromagnetici [...], **qualora** risulti che siano superati i valori di azione [...], il datore di lavoro **valuta** e, quando necessario, **calcola** se i valori limite di esposizione sono stati superati”.*

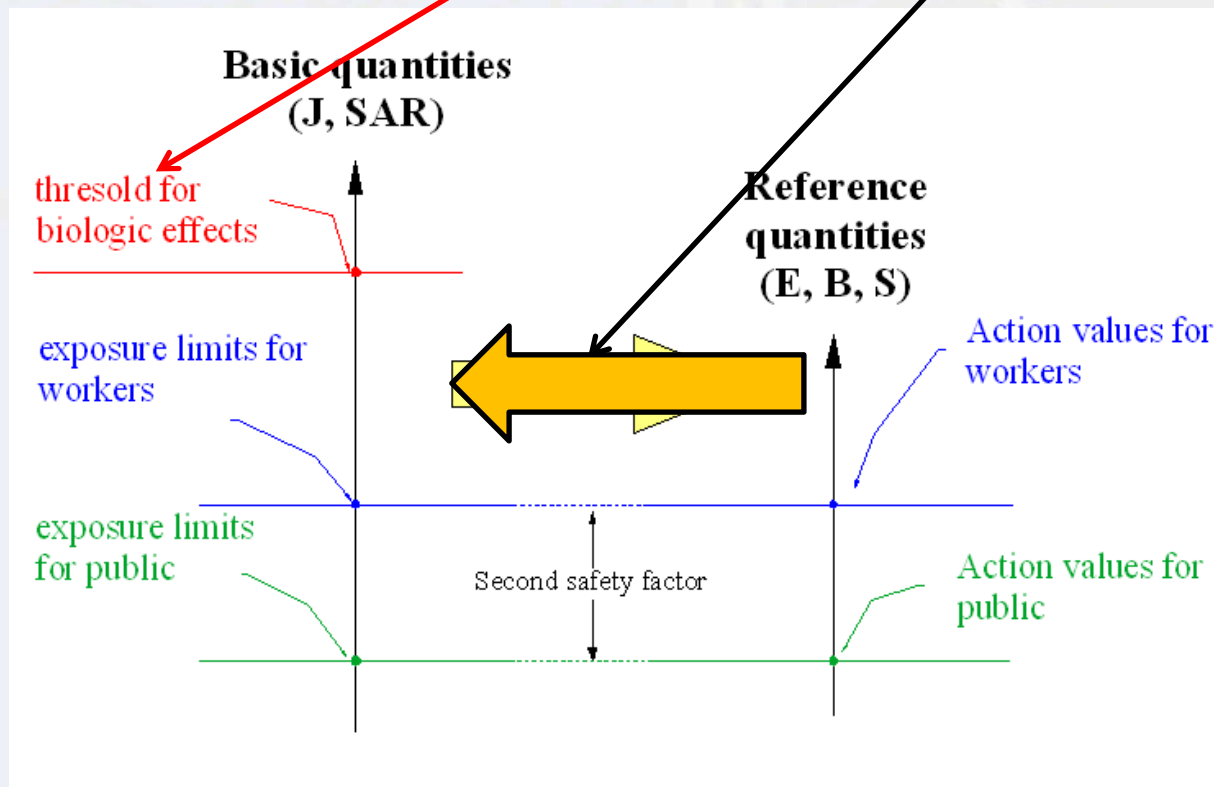
- **(valuta)** dal punto di vista economico, se investire nella verifica del rispetto dei valori limite di esposizione o se invece procedere immediatamente alla riduzione dei livelli di campo, per ricondurli al di sotto dei valori di azione (come è implicitamente consentito dall'Art.210);
- **(valuta)** dal punto di vista tecnico-scientifico, se – nell'effettiva situazione di esposizione con cui si ha a che fare – è ragionevole ipotizzare il rispetto dei valori limite di esposizione, non ostante il superamento dei valori di azione.

“Quando necessario”, ovvero se entrambe queste valutazioni danno esito positivo, allora ha senso passare al **“calcola”**.



2) Che tipo di strumenti possono essere utilizzati per verificare il rispetto dei limiti di esposizione?

I valori limite di esposizione sono ricavati a partire dalle **soglie degli effetti accertati**, mentre i valori di azione sono ricavati dai valori limite di esposizione sulla base di **modelli dosimetrici semplificati**. Tali modelli dosimetrici semplificati integrano in sé ulteriori fattori di cautela in quanto si riferiscono a condizioni di massimo accoppiamento tra campi ed organismo.



Se, a fronte di un superamento dei valori di azione, si applicassero gli stessi modelli dosimetrici semplificati e cautelativi utilizzati dall'ICNIRP (o altri ancora più cautelativi), **si troverebbe sempre che anche i valori limite di esposizione sono superati.**



2) Che tipo di strumenti possono essere utilizzati per verificare il rispetto dei limiti di esposizione?

È necessario utilizzare strumenti che permettano di dimostrare che *nella specifica situazione espositiva con cui si ha a che fare* i modelli dosimetrici impiegati dall'ICNIRP sono effettivamente troppo cautelativi.

In altre parole, si deve dimostrare – con un modello che *necessariamente* deve essere **il più possibile aderente alla situazione reale** – che in quella particolare **situazione** i valori limite di attenzione NON sono superati.

A questo fine, è evidentemente necessario usare i metodi ed i modelli più accurati e dettagliati disponibili.

Articolazione di un'analisi dosimetrica numerica a bassa frequenza



**Procedure
di
calcolo**



**Post
Processing**



**Densità
di corrente
media su
1 cm
solo tessuti
SNC**

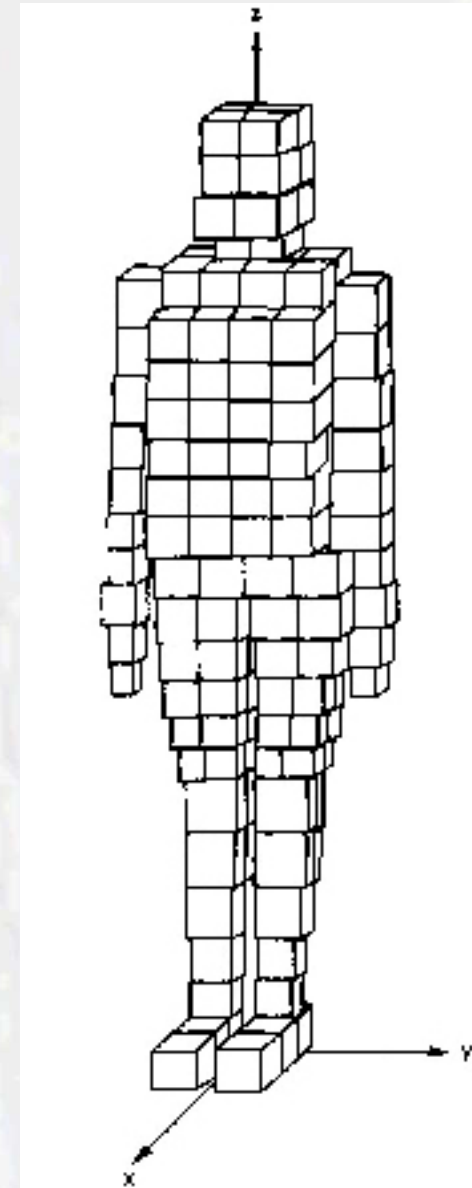
Densità di corrente (picco locale)



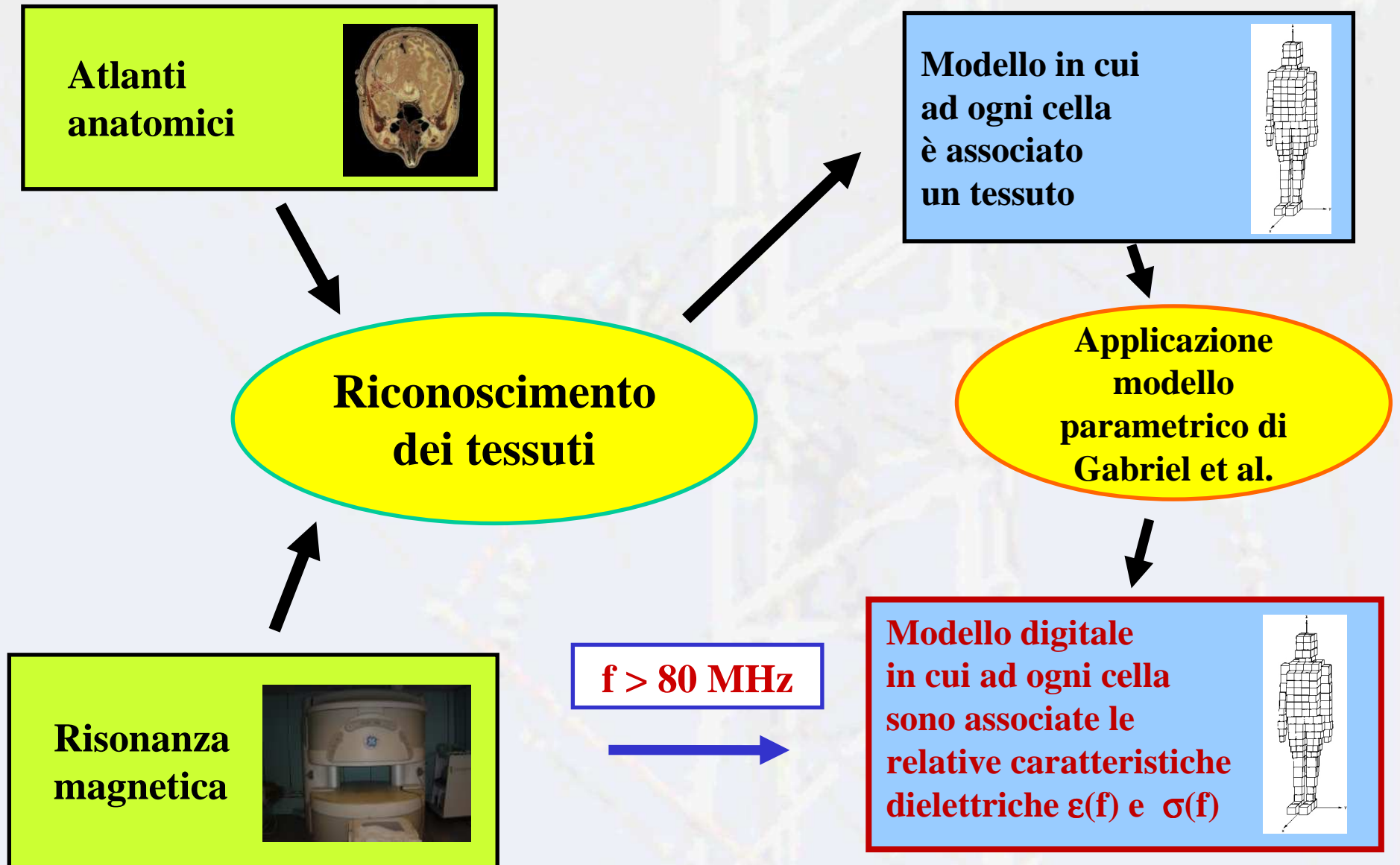
I modelli digitali dell'organismo umano

Cosa sono i modelli digitali di organismo ?

- Sono una rappresentazione discretizzata del corpo umano composta da parti elementari dette **segmenti (celle)**.
- Ai fini del loro utilizzo per calcoli dosimetrici, a ciascun segmento devono essere attribuite le relative caratteristiche dielettriche (la **permittività ϵ** e la **conduttività σ**)



Come si attribuiscono le caratteristiche dielettriche a ciascun segmento?





Alcuni modelli utilizzati in letteratura

Le tecniche di elaborazione dei dati necessarie al riconoscimento dei tessuti si stanno perfezionando rapidamente, ma richiedono comunque un certo dispiego di mezzi e competenze. Da ciò deriva una relativa scarsità di modelli utilizzabili per le indagini a bassa frequenza e quindi un **numero limitato di fenotipi rappresentabili**.

Organization (Name of the phantom)	Sex	Height (cm)	Weight (kg)	Num. of Tissues	Voxel Size (mm)
Victoria Univ.	M	177.0	76	34	3.6 x 3.6 x 3.6
Utah Univ.	M	176.4	71	29	2 x 2 x 3
Brooks AFB	M	187.1	105	43	1 x 1 x 1
NICT (TARO)	M	173.2	65	51	2 x 2 x 2
NICT (HANAKO)	F	160.8	53	51	2 x 2 x 2
HPA (NORMAN)	M	176.0	73	37	2 x 2 x 2
HPA (NAOMI)	F	163.0	60	41	2 x 2 x 2
ITIS (ELLA)	F	160.0	58	84	(ARBITRARY) CAD MESH
ITIS (DUKE)	M	174.0	70	84	(ARBITRARY) CAD MESH
ITIS (BILLIE)	F	148.0	34	84	(ARBITRARY) CAD MESH
ITIS (THELONIUS)	M	106.0	17	84	(ARBITRARY) CAD MESH

Verifica del rispetto dei valori limite di esposizione per lavoratori esposti a CEM a frequenza bassa e intermedia: aspetti generali e problemi aperti

Modello parametrico di Gabriel

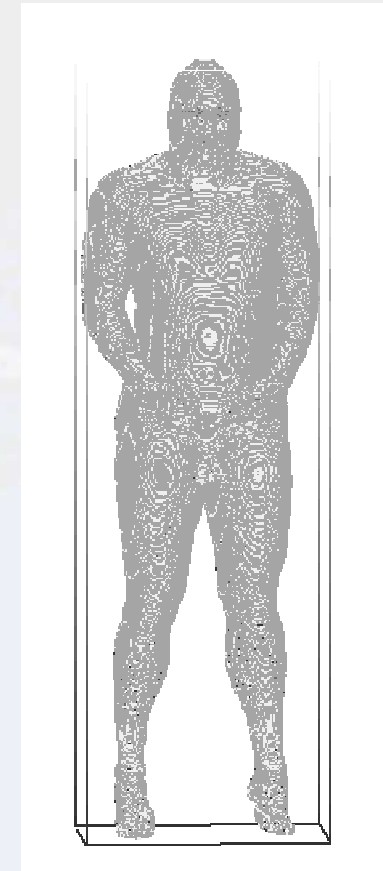
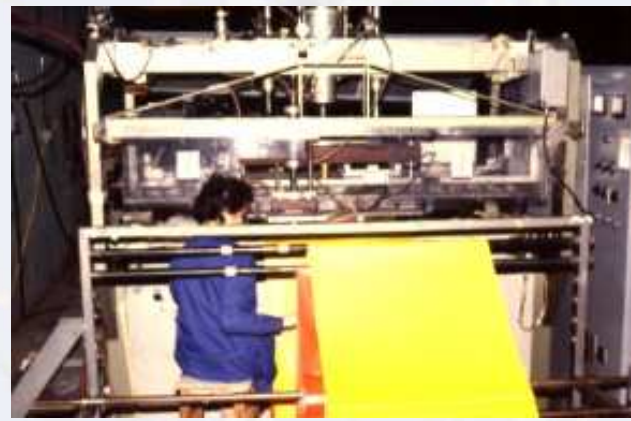
Una volta riconosciuto il tessuto corrispondente a ciascun segmento, è necessario attribuire ad esso la relativa conducibilità, alla frequenza di interesse. A tal fine può essere utilizzato il modello parametrico sviluppato da Camelia Gabriel e colleghi (1996), che copre nominalmente un amplissimo intervallo di frequenze (10 Hz-3 GHz).



È noto però che all'estremo inferiore di tale intervallo i valori restituiti siano molto meno accurati che a frequenze più alte e ciò costituisce un'importante fonte di incertezza nei risultati dei calcoli.

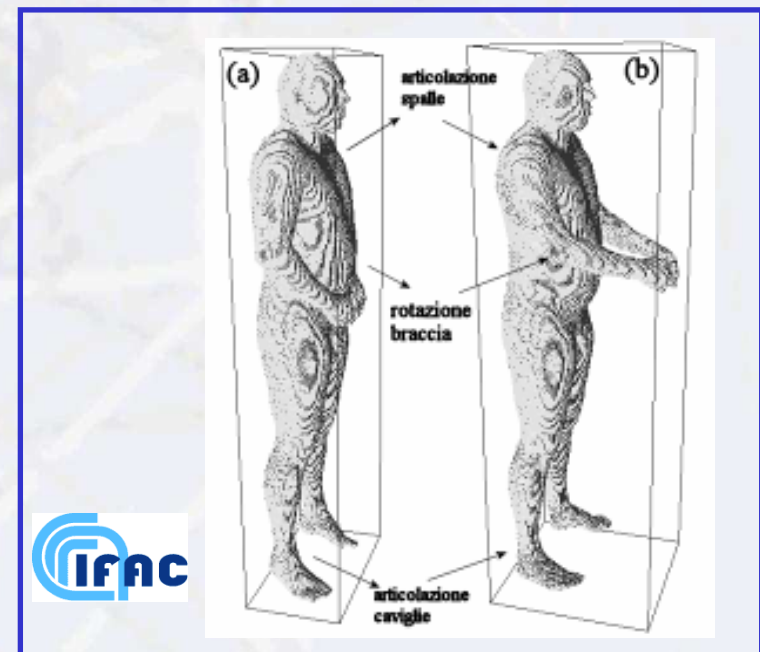
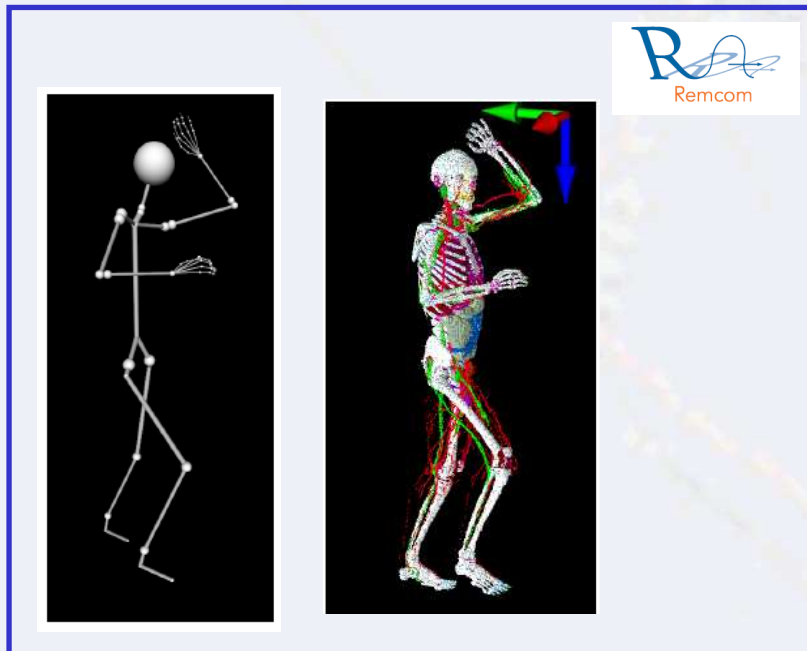
Postura del soggetto rappresentato

- **Modelli dell'organismo generalmente in posizione eretta.**
- **Necessità di rappresentare posture caratteristiche assunte negli ambienti di lavoro.**



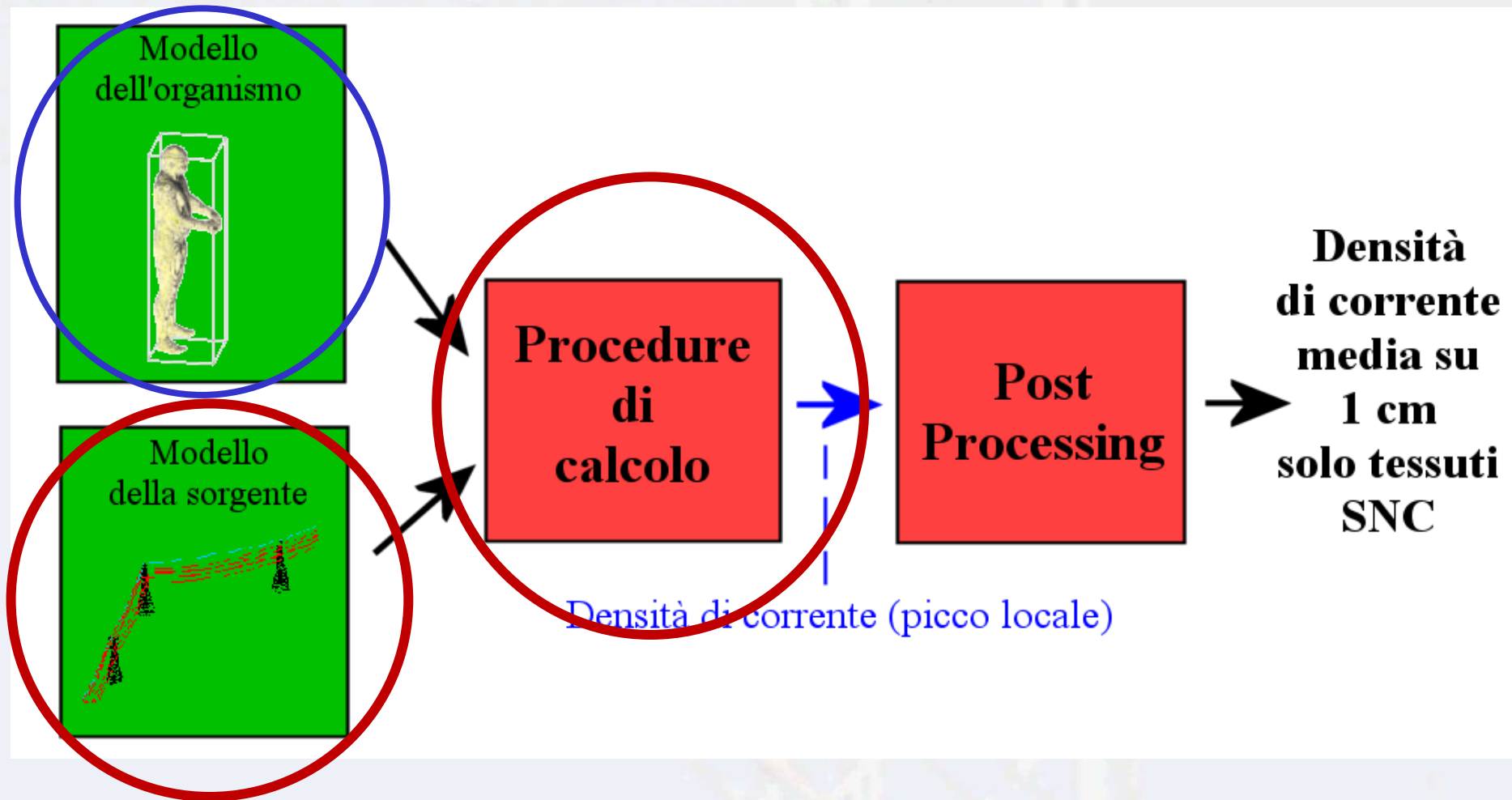
Modelli articolabili

- **Conservazione della massa**
- **Continuità dei tessuti**



Verifica del rispetto dei valori limite di esposizione per lavoratori esposti a CEM a frequenza bassa e intermedia: aspetti generali e problemi aperti

Articolazione di un'analisi dosimetrica numerica a bassa frequenza





Caratteristiche dei metodi di calcolo di elezione per le basse frequenze

Approssimazione
quasi-statica



- Si considerano separatamente campo elettrico e campo magnetico
- Si separa ciò che avviene all'esterno ed all'interno dell'organismo
- Si considera solo la conducibilità dei tessuti

Metodi nel dominio
della frequenza



- Semplicità di modellazione delle sorgenti di interesse
- Dipendenza dalla frequenza delle proprietà dielettriche dei tessuti.

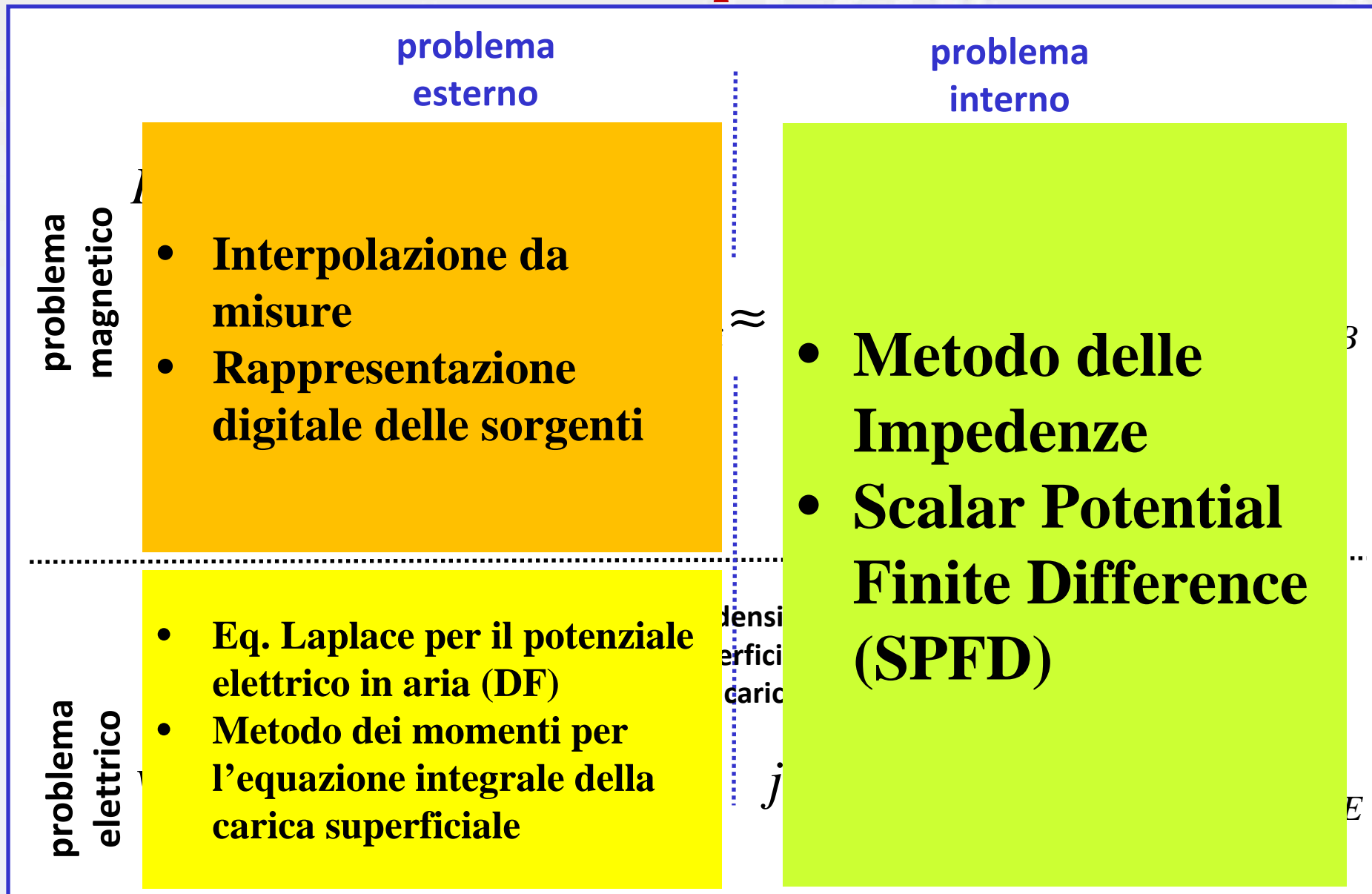
Differenze finite



- Semplicità
- Si sposano bene a modelli di organismo a celle cubiche e ad altissima risoluzione

Con opportuni adattamenti sono inoltre applicabili ed abbastanza diffusi anche i metodi alle differenze finite nel dominio del tempo, che sono attualmente i più utilizzati per risolvere problemi ad alta frequenza.

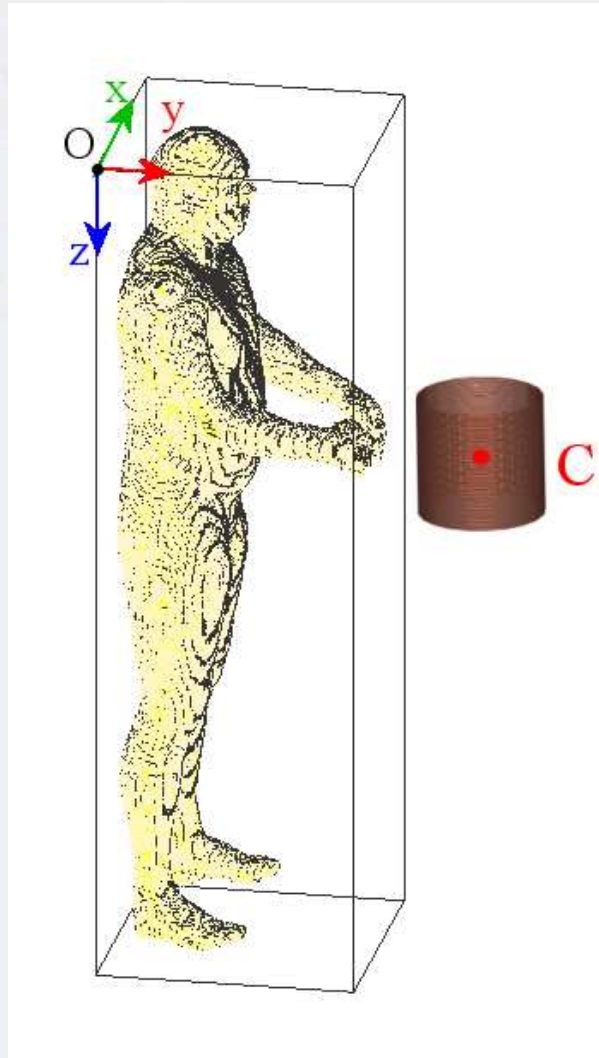
Calcolo delle grandezze dosimetriche in condizioni “quasi-statiche”



Caso 1:
**Esposizione al campo magnetico
generato da un fornello ad
induzione utilizzato
nell'industria orafa**



Forno ad induzione utilizzato nell'industria orafa



- Usato nell'industria orafa
- Solo campo magnetico
- $F = 3450 \text{ Hz}$
- $I = 400 \text{ A}$
- Sorgente monofase



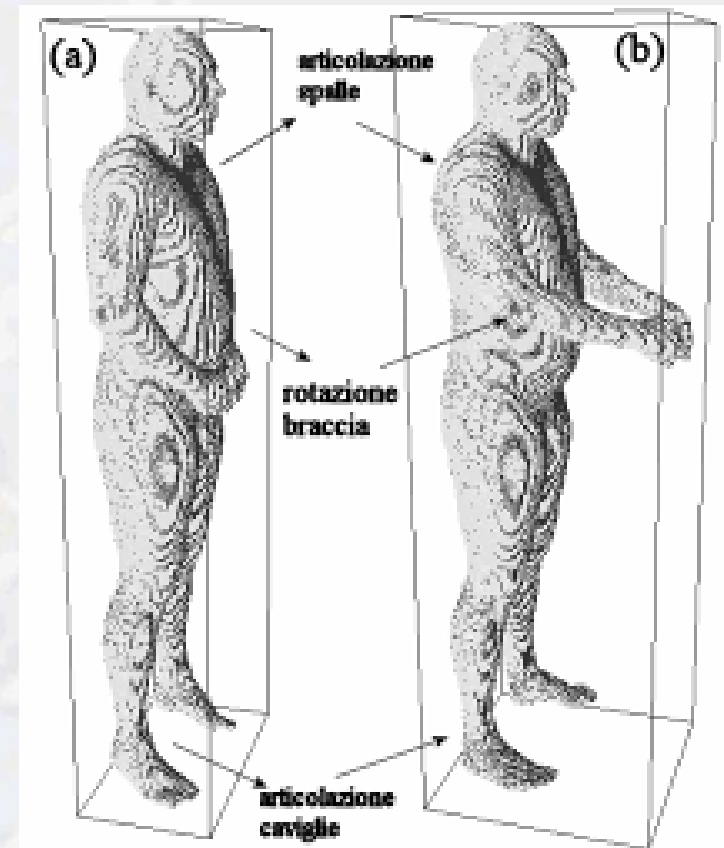
- $C_x=0,3\text{m}$ $C_y=0,75\text{m}$ $C_z=0,75\text{m}$
- Raggio= $0,09\text{m}$
- La punta delle dita è distante meno di 10 cm dai conduttori

Modello di organismo utilizzato

Il modello sviluppato nell'ambito del progetto VHP è stato articolato in una postura più simile a quella assunta dai lavoratori addetti a questo tipo di apparati

Si è utilizzato il modello a risoluzione minore tra quelle disponibili (celle di 3 mm) per ridurre le dimensioni del problema e quindi gli oneri computazionali.

Model	nx	ny	nz	n_cells	Model memory occupation [Mb]
Head 1mm	178	235	211	8826130	8.42
Man 3mm	196	114	626	13987344	13.34
Man 2mm	293	170	939	46771590	44.60
Man 1mm	586	340	1878	374172720	356.84





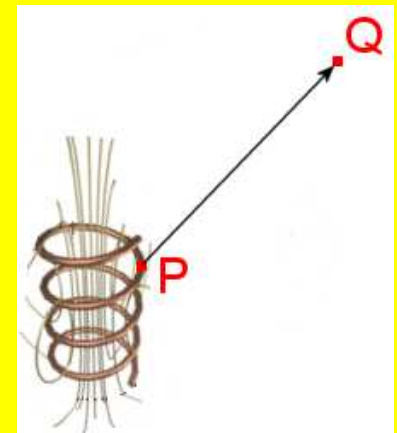
La modellazione della sorgente



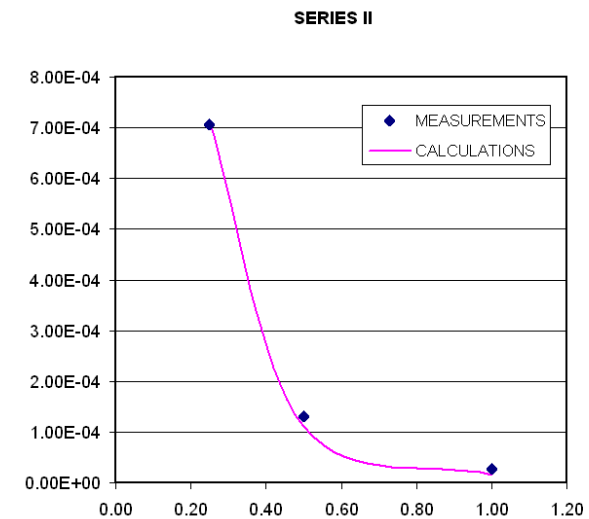
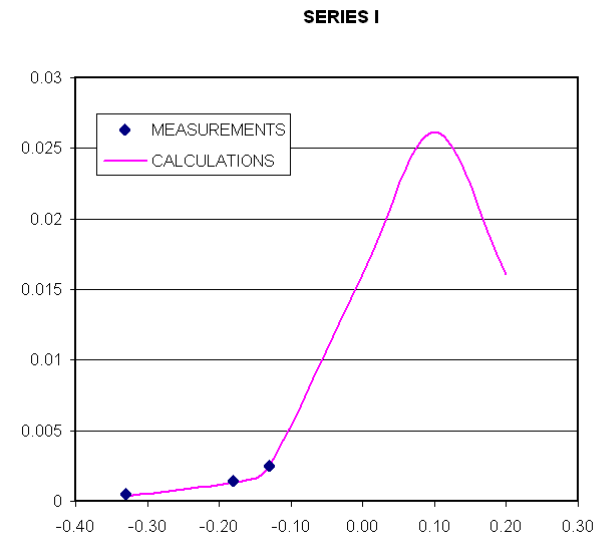
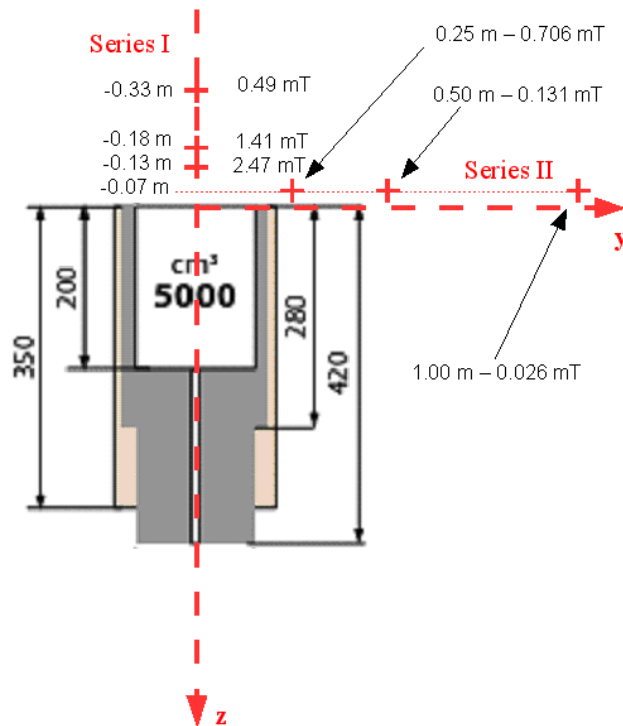
- Basata sulla integrazione numerica della legge di Biot-Savart in forma differenziale
- Le dimensioni del solenoide (diametro e lunghezza) sono ricavate dalla documentazione tecnica rilasciata dal costruttore
- La corrente sugli avvolgimenti è scelta in accordo con i dati di targa della sorgente (tensione di lavoro e potenza)
- Il prodotto (Corrente x n.spire) e l'esatta posizione del solenoide nell'apparato sono stati fissati in modo da ottimizzare l'accordo tra dati misurati e calcolati

I è la corrente, Q è il punto di calcolo del campo, Γ è la curva che descrive la sorgente e P è un punto generico lungo di essa

$$\mathbf{B}(Q) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{P \in \Gamma} \frac{d\mathbf{P} \times (\mathbf{Q} - \mathbf{P})}{|\mathbf{Q} - \mathbf{P}|^3} \quad \mathbf{A}(Q) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{P \in \Gamma} \frac{d\mathbf{P}}{|\mathbf{Q} - \mathbf{P}|}$$

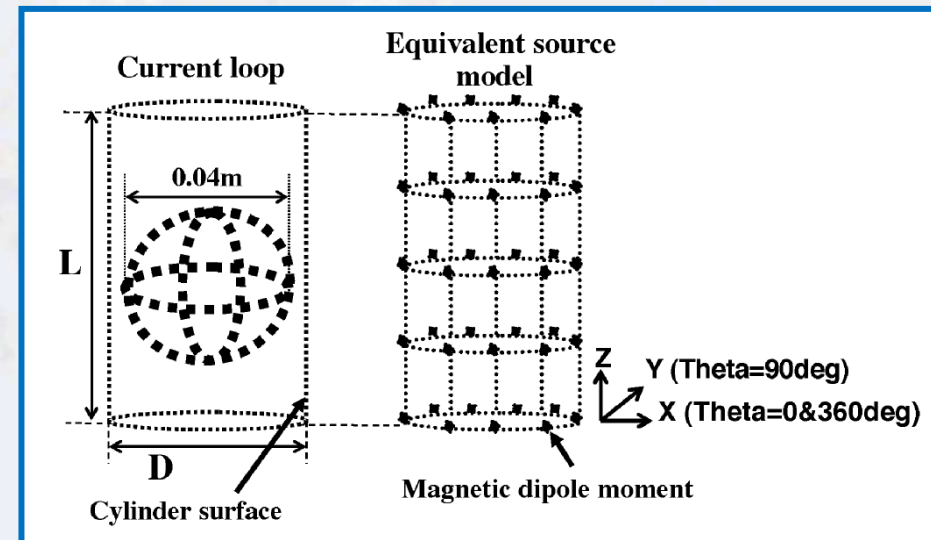


Measurement setup and results



Modellazione della sorgente a partire da misure (molti punti): **CEI EN 50366/A1** recentemente sostituita dalla **CEI EN 62233**

- L'applicazione della norma CEI EN 62233 implica la misura del campo magnetico su una immaginaria superficie cilindrica che racchiude la sorgente.
- Più grande è il numero dei punti di misura, migliore sarà l'accuratezza del modello equivalente della sorgente



Articolazione dell'analisi numerica



Distribuzione del campo nel volume occupato dal modello di organismo

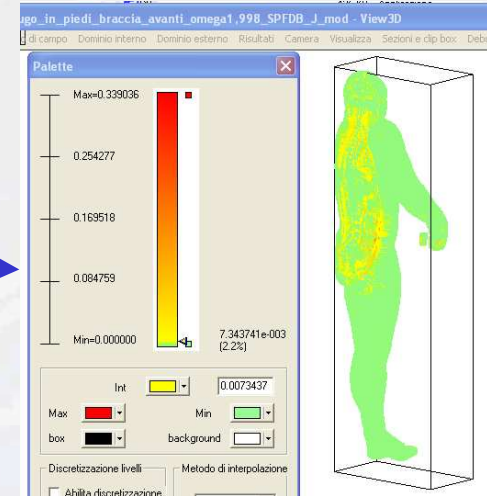
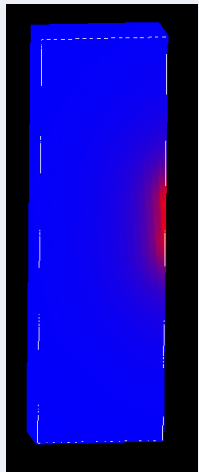
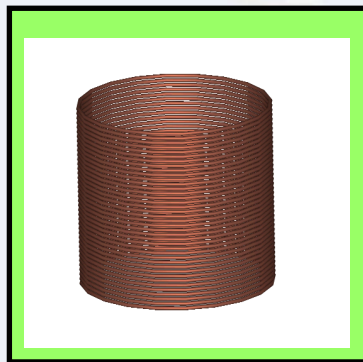
σ

SPFD

$$\Phi_{n0} = \frac{1}{\sum_{i=1}^6 \bar{\sigma}_{mi}} \cdot \sum_{i=1}^6 \left\{ \bar{\sigma}_{mi} \left[\Phi_{ni} - (-1)^i j \omega l_c A_{mi} \right] \right\}$$

\vec{A}

Solenoide



\vec{J}_{peak}

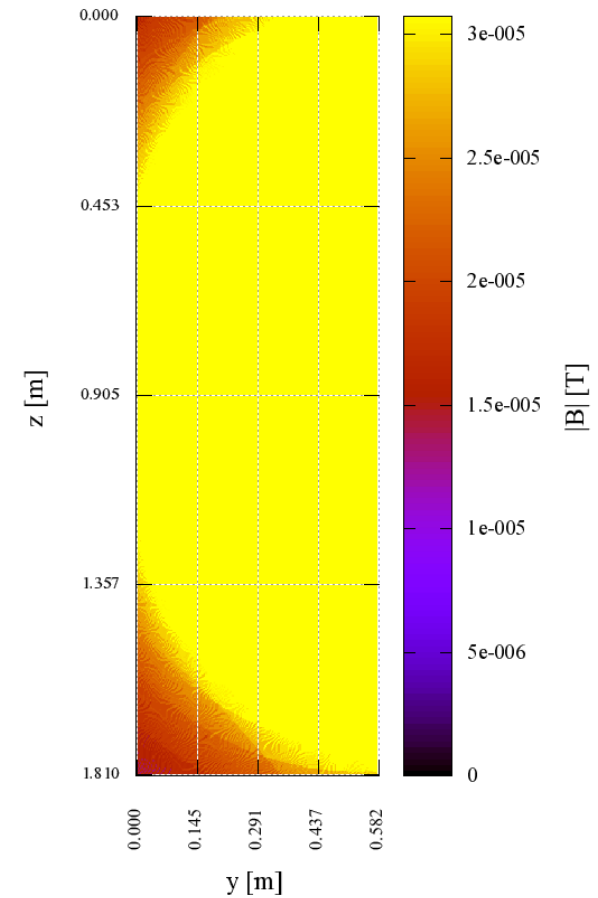
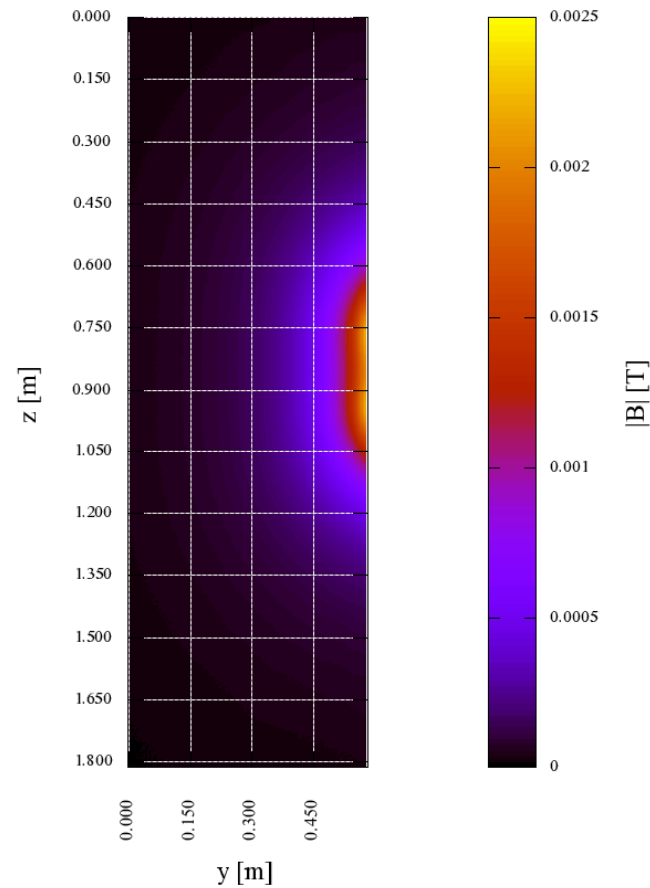
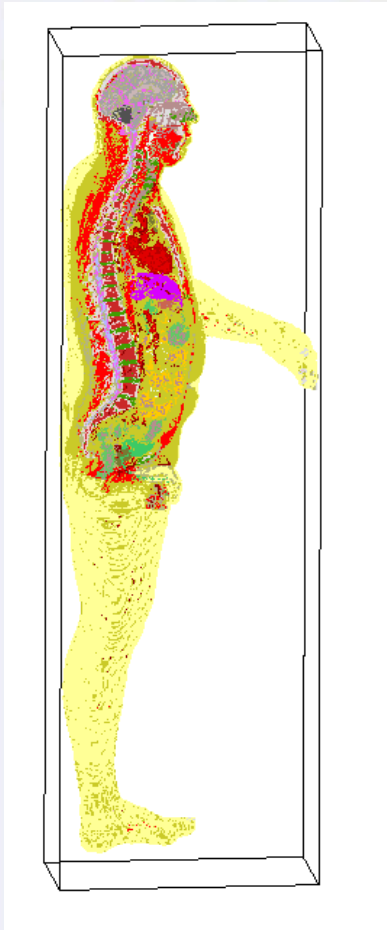


**Sezione
sagittale**
($x=0,3\text{ m}$)

Induzione magnetica B

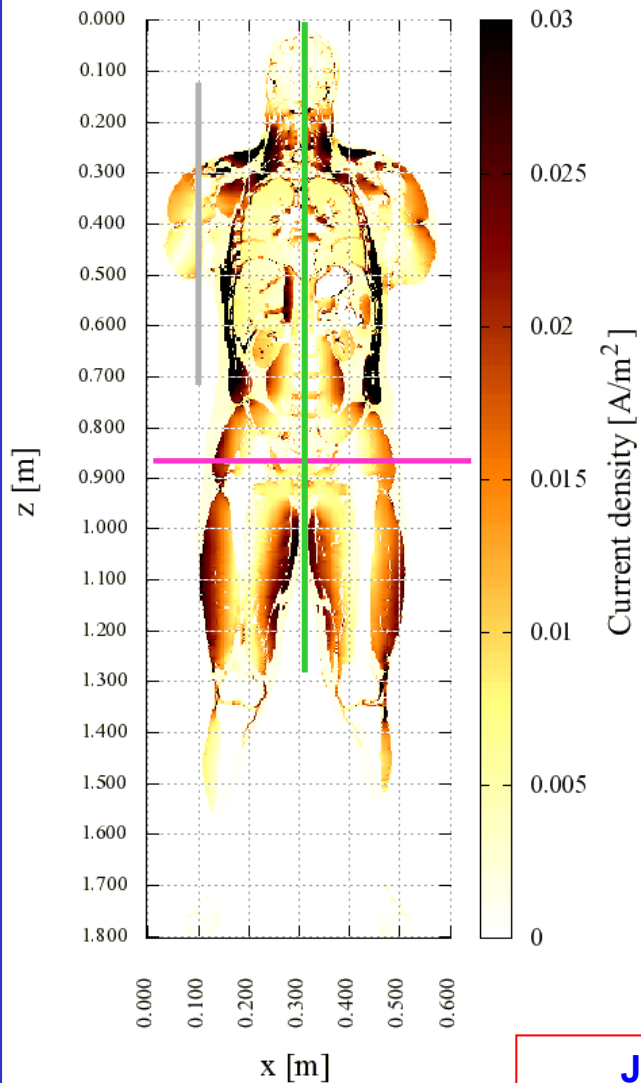
Il massimo si
raggiunge nella
zona occupata
dalle mani, e
supera i 2,5 mT

Il valore di azione pari
30,7 mT è superato nella
maggior parte del volume
di interesse



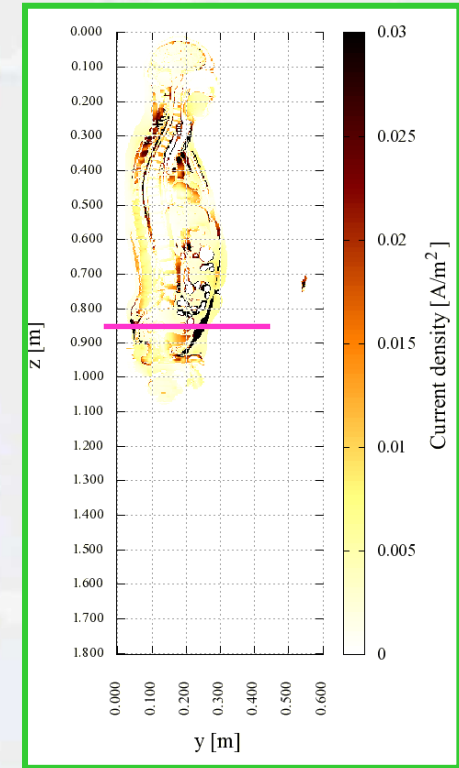
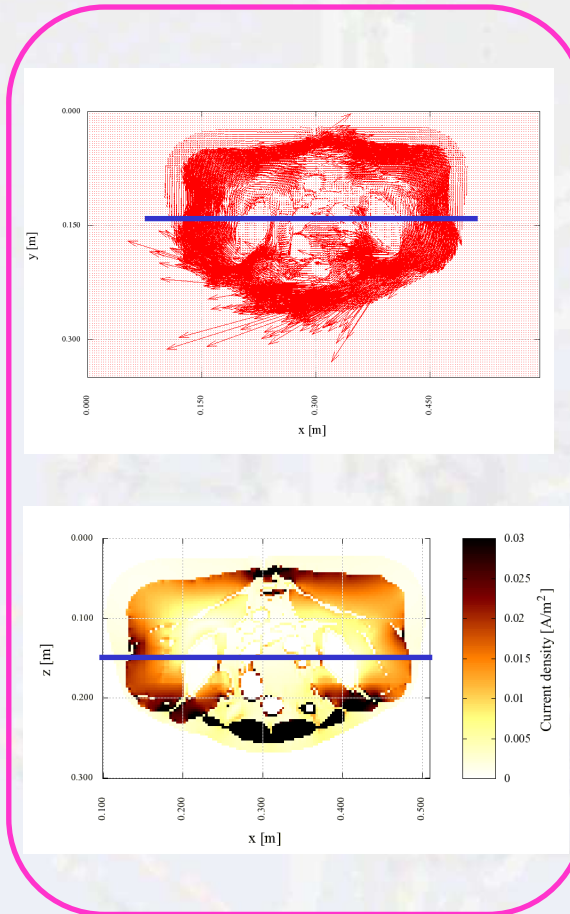


Coronal section ($y=0,15\text{ m}$)

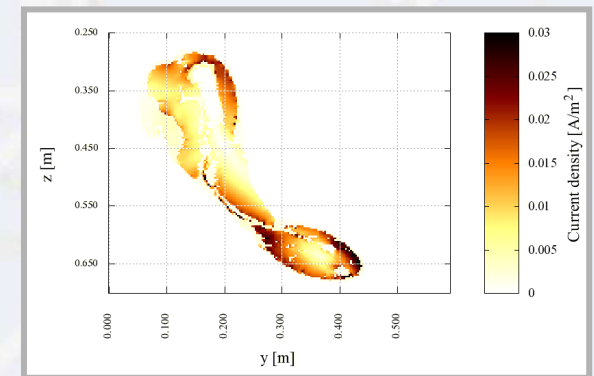


J (picco locale)

Axial section ($z=0,85\text{ m}$)



Sagittal section ($x=0,30\text{ m}$)



Sagittal section ($x=0,10\text{ m}$)

Jicnirp @ 3450 Hz = 0,0345 A/m²



J (picco locale)

	 J local peak [mA/m²]
<i>Brain gray matter</i>	7.59
<i>Brain white matter</i>	4.19
<i>Cerebellum</i>	11.00
<i>Cerebro spinal fluid</i>	112.79
<i>Nerve & spinal chord</i>	19.29
<i>Fat</i>	91.82
<i>Heart</i>	17.89
<i>Muscle</i>	235.13
<i>Tendon</i>	280.11

Valore limite di esposizione@ 3450 Hz : 34,5 mA/m²

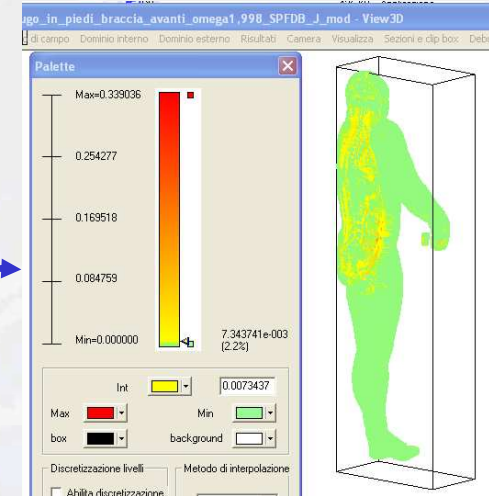
Layout of the numerical analysis



σ

SPFD

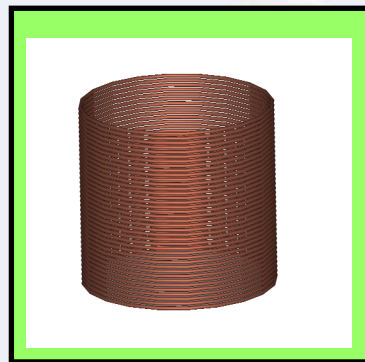
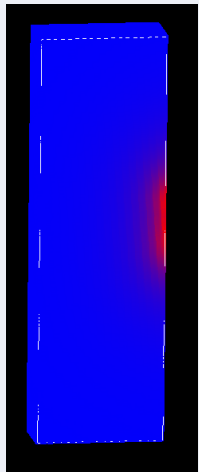
$$\Phi_{n0} = \frac{1}{\sum_{i=1}^6 \bar{\sigma}_{mi}} \cdot \sum_{i=1}^6 \left\{ \bar{\sigma}_{mi} \left[\Phi_{ni} - (-1)^i j \omega l_c A_{mi} \right] \right\}$$



\vec{J}_{peak}

\vec{A}

- Media superficiale di J su 1 cm²
- Limitazione al Sistema Nervoso Centrale (SNC)



La verifica del rispetto dei limiti si conclude con il raffronto della media superficiale limitata al SNC con il valore limite di esposizione alla frequenza di interesse.

Post-processing

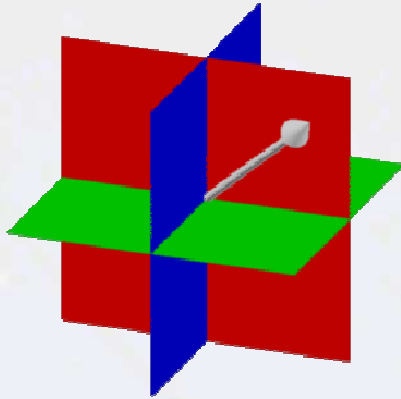
Una volta determinato il valore della densità di corrente in ciascuna cella (picco locale) si devono eseguire due ulteriori operazioni:

DL n.81/2008, allegato XXXVI (pp. 277 e seguenti)

- **Media superficiale di J** “*[...] su una sezione di 1 cm² perpendicolare alla direzione della corrente*”
(Nota 3 alla tabella 1).
- **Limitazione al Sistema Nervoso Centrale** dal momento che “*I valori limite di esposizione per la densità di corrente si prefiggono di proteggere dagli effetti acuti risultanti dall’esposizione sui tessuti del sistema nervoso centrale nella testa e nel torace*”
(Nota 2 alla tabella 1).



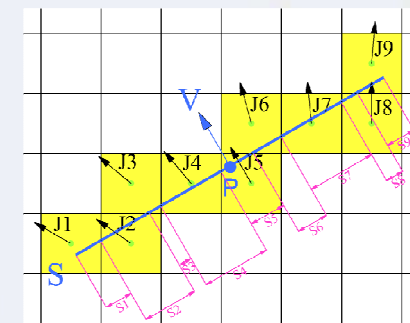
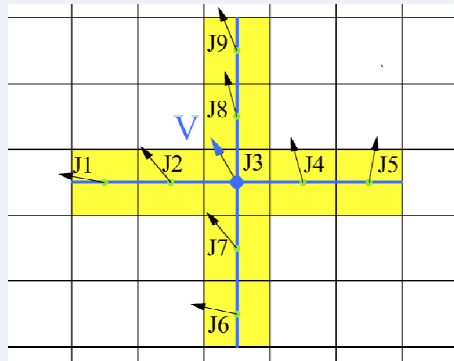
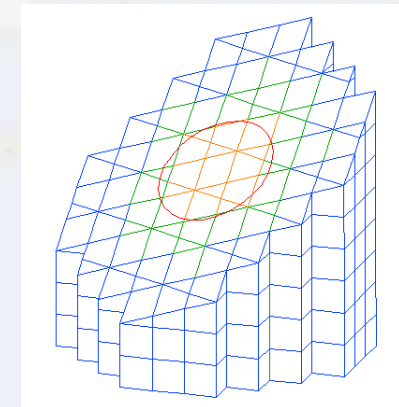
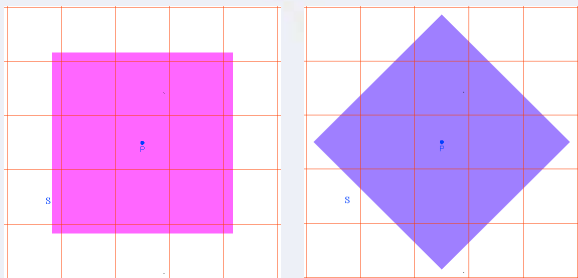
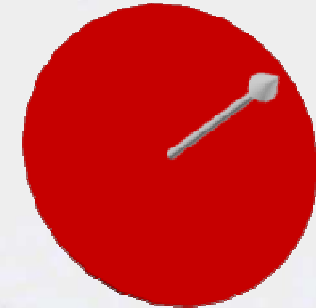
Media superficiale: algoritmo semplificato ed esatto



L'algoritmo semplificato introduce due tipi di approssimazione:

- L'uso di superfici quadrate che intersecano differenti porzioni del modello di organismo al variare della loro orientazione.

- Le superfici quadrate utilizzate NON sono necessariamente perpendicolari alla densità di corrente, come richiesto dalla Direttiva 2004/40 e quindi dal DL 81/2008.



[*] T.W.Dawson, K.Caputa and M.Stuchly. *Magnetic field exposures for UK live-line workers. Physics in Medicine and Biology, Vol.47 (2002), pp.995-1012*



Algoritmo esatto vs semplificato

	$ J $ avg 1cm^2 (exact) [mA/m ²]	$ J $ avg 1cm^2 (simpl.) [mA/m ²]
<i>Brain gray matter</i>	12.51	7.71
<i>Brain white matter</i>	8.97	4.96
<i>Cerebellum</i>	16.11	9.58
<i>Cerebro spinal fluid</i>	32.84	77.89
<i>Nerve & spinal chord</i>	38.15	19.10
<i>Fat</i>	87.72	61.73
<i>Heart</i>	22.13	15.97
<i>Muscle</i>	85.30	164.57
<i>Tendon</i>	75.85	195.77

- Le differenze possono superare i 3 dB, in entrambi i sensi

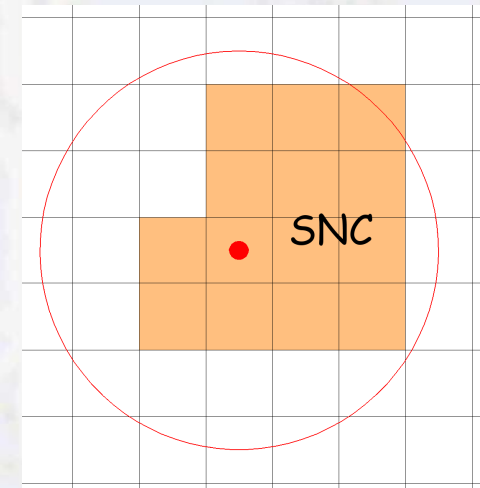


Limitazione al sistema nervoso centrale

I tessuti “bersaglio” per l’operazione di media sono quelli del SNC
“I valori limite di esposizione per la densità di corrente si prefiggono di proteggere dagli effetti acuti risultanti dall’esposizione sui tessuti del sistema nervoso centrale nella testa e nel torace”.

C’è un problema!

**Quando il punto di applicazione della
media superficiale è vicino ad una
superficie di separazione tra organi del
SNC ed altri tessuti, la superficie di 1 cm²
potrebbe intersecare celle che non
appartengono a SNC**

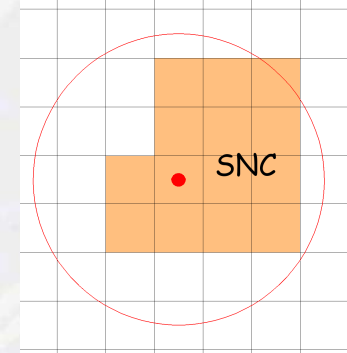


Come procedere in questi casi?



Limitazione della media superficiale al sistema nervoso centrale

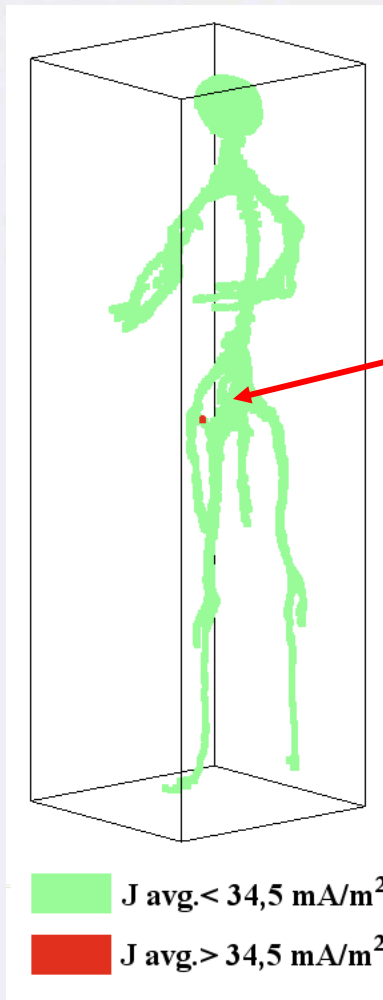
$$J_S = \frac{\sum_{i=1}^N [S_i (\vec{J}_i \cdot \vec{V})]}{\sum_{i=1}^N S_i}$$



FULL AVERAGING: il punto di applicazione della media è sempre all'interno di un voxel che appartiene al SNC; nella media si considerano comunque anche i contributi dati da eventuali celle che NON appartengono al SNC.

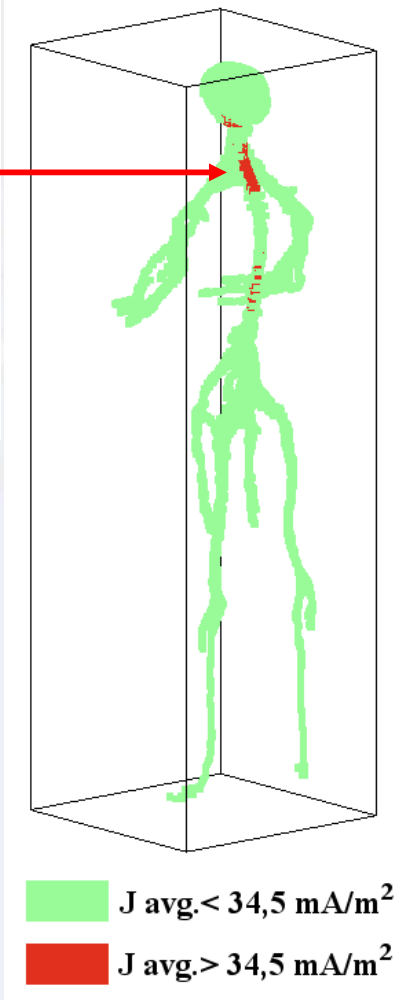
La media superficiale è introdotta “*data la non omogeneità elettrica del corpo*”. Se lo scopo della media è di tenere conto della non omogeneità elettrica dell'organismo, non appare avere senso l'esclusione di alcuni tessuti, una volta definita la superficie sulla quale mediare.

Nel caso del fornetto sono rispettati i valori limite di esposizione?



	$ J $ avg 1cm ² (exact) [mA/m ²]	$ J $ avg 1cm ² (simpl.) [mA/m ²]
Brain gray matter	12.51	7.71
Brain white matter	8.97	4.96
Cerebellum	16.11	9.58
Cerebro spinal fluid	32.84	77.89
Nerve & spinal chord	38.15	19.10
Fat	87.72	61.73
Heart	22.13	15.97
Muscle	85.30	164.57
Tendon	75.85	195.77

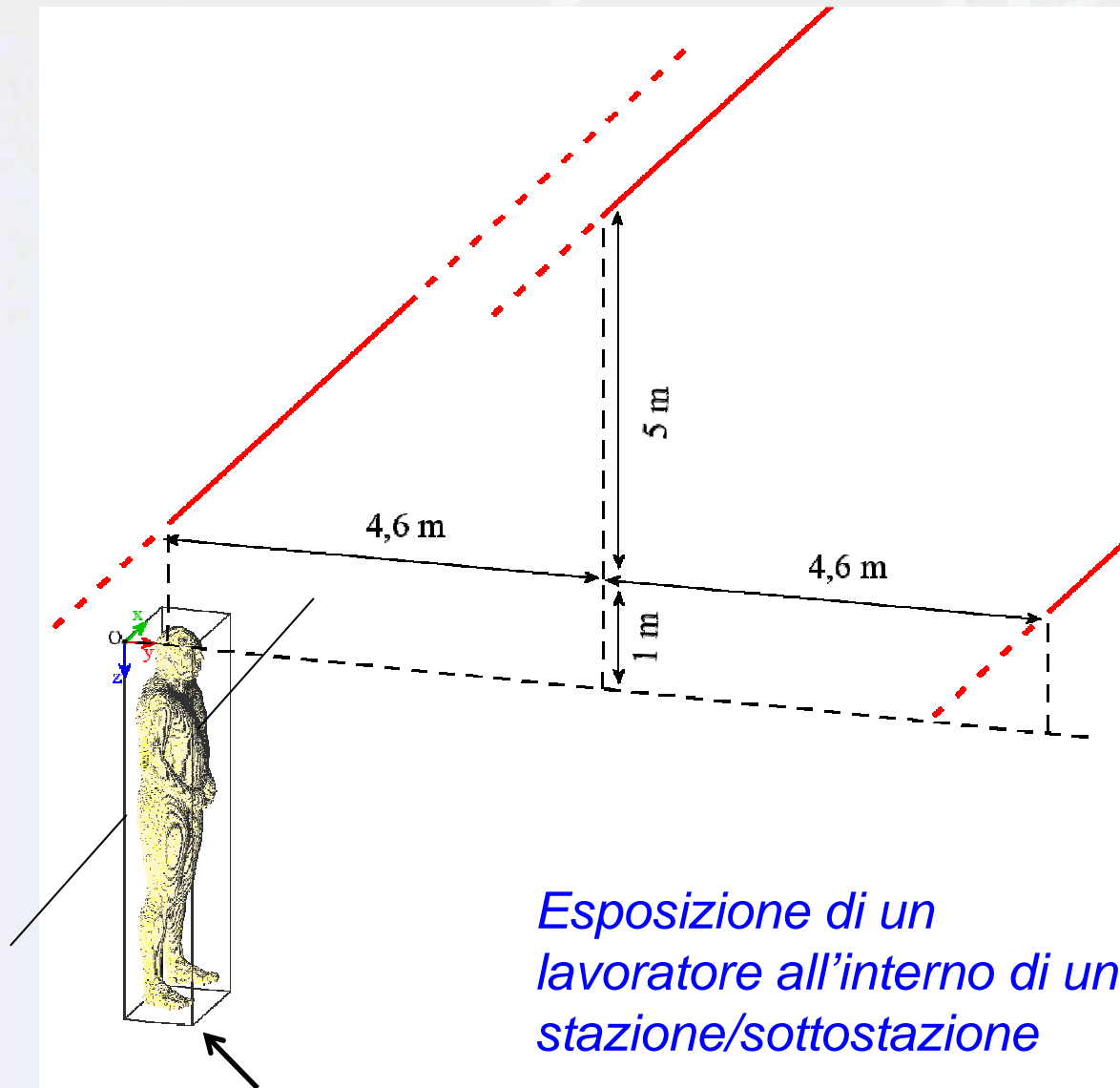
- Usando l'algoritmo di media "esatta" i valori limite di esposizione sono superati nel sistema nervoso periferico (zona del bacino).
- Usando l'algoritmo di media semplificata i valori limite di esposizione sono superati nel fluido cerebro-spinale (liquor). Pur facendo formalmente parte del SNC il liquor non è una struttura nervosa propriamente detta. In letteratura non vi è uniformità di vedute sul considerare o meno il liquor parte del SNC.



Valore limite di esposizione @ 3450 Hz : 34,5 mA/m²

Caso 2:
**Esposizione al campo elettrico e
magnetico generato da una linea
trifase a 380 kV**

Caso 2: linea elettrica trifase



*Esposizione di un
lavoratore all'interno di una
stazione/sottostazione*

Caviglie articolate

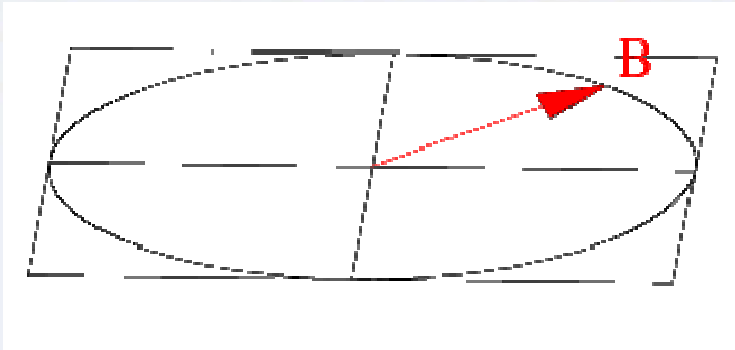
- Campo elettrico e magnetico
- $F = 50 \text{ Hz}$
- $||I|| = 2955 \text{ A}$
- $|V_{gr}| = \frac{380000}{\sqrt{3}} = 219393 \text{ V}$
- Sorgente trifase bilanciata

Il conduttore più vicino è posto 1 m sopra la testa del soggetto esposto



Sorgenti trifase

I campi generati da una sorgente trifase sono caratterizzati da polarizzazione ellittica



In un generico punto un campo con polarizzazione ellittica può essere rappresentato con un vettore a componenti complesse ovvero come composizione di due vettori a componenti reali:

$$\mathbf{B}_c = \mathbf{B}_p + j\mathbf{B}_q$$

Nel caso dei campi con polarizzazione ellittica I calcoli sono comunque più onerosi rispetto al caso di polarizzazione lineare. A bassa frequenza è possibile sia eseguire un unico calcolo utilizzando numeri complessi, sia due calcoli indipendenti utilizzando numeri reali e ricomponendo I risultati in fase di post-processing.

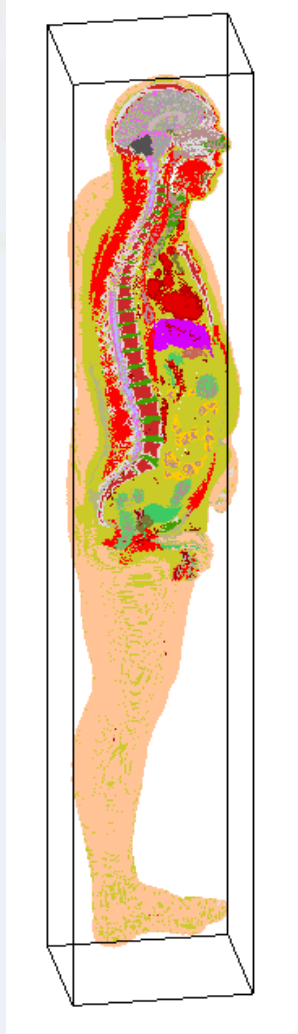
$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_p + j\mathbf{J}_q$$



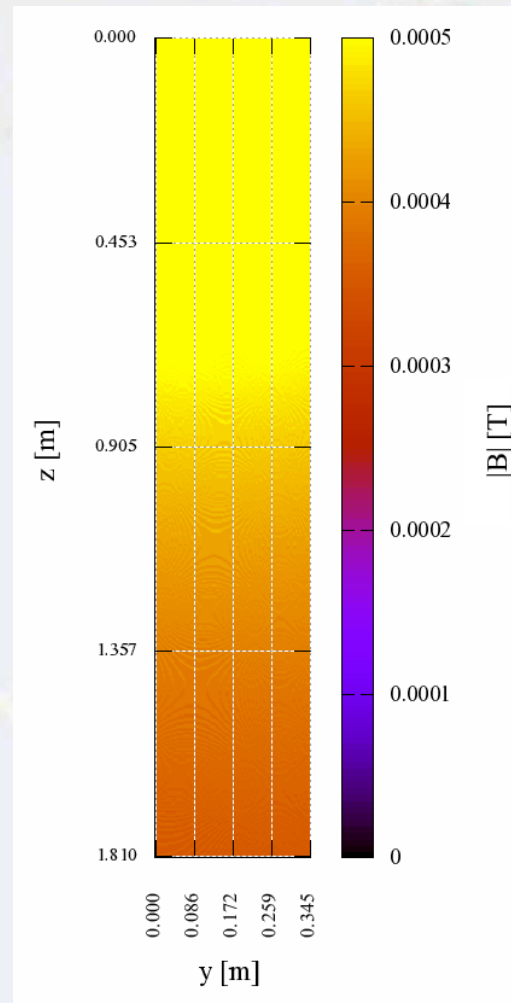
Induzione magnetica impressa e densità di corrente

$$|\mathbf{B}_p + j\mathbf{B}_q|$$

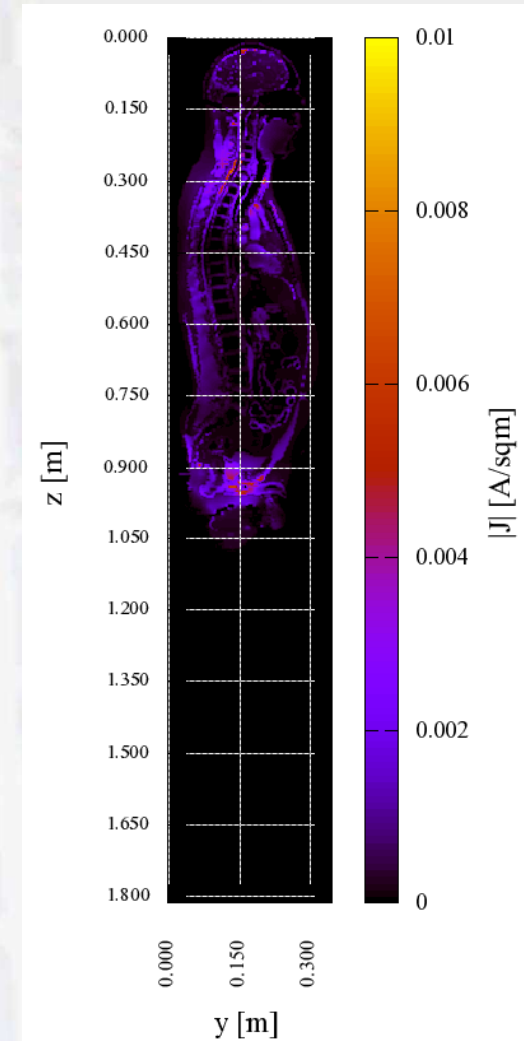
$$|\mathbf{J}_p + j\mathbf{J}_q|$$



Sezione sagittale
($x=0,3\text{ m}$)



La parte superiore del corpo è esposta a livelli che superano il valore di azione di $500\ \mu\text{T}$

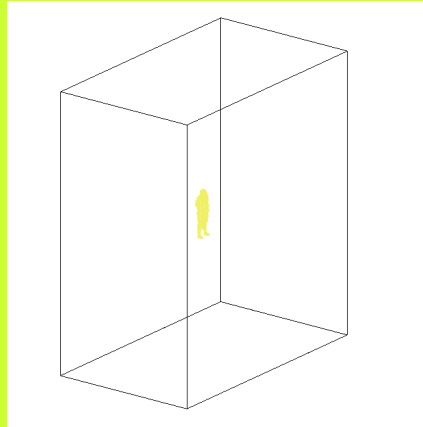


Valore limite di esposizione @ 50 Hz
 $0,01\ \text{A/m}^2$

Esposizione al campo elettrico (Eq. Di Laplace + Differenze Finite)

Problema esterno

Il volume considerato deve essere molto più grande di quello occupato dal modello di organismo. In tal modo, sul contorno, si può considerare trascurabile l'influenza del soggetto esposto.



LAPLACE Eq.

$$\Phi_0 = \sum_{i=1}^6 \Phi_i / 6$$

Densità di carica sulla superficie del soggetto esposto, che viene trattato come un perfetto conduttore

$j\omega q$

Problema interno

In questo caso l'organismo è considerato in tutta la sua inomogeneità



σ

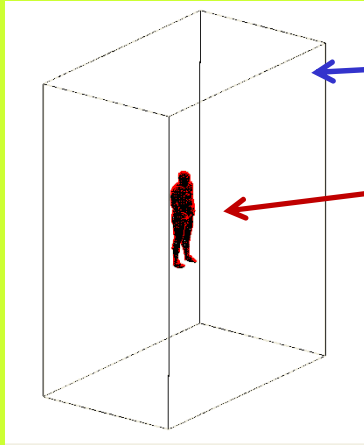
SPFD

$$\Phi_{n0} = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^6 \bar{\sigma}_{mi}} \right) \cdot \left[\sum_{i=1}^6 \{ \bar{\sigma}_{mi} \cdot \Phi_{ni} \} + \frac{j\omega q_{n0}}{l_c} \right]$$

$J_{picco-locale}$



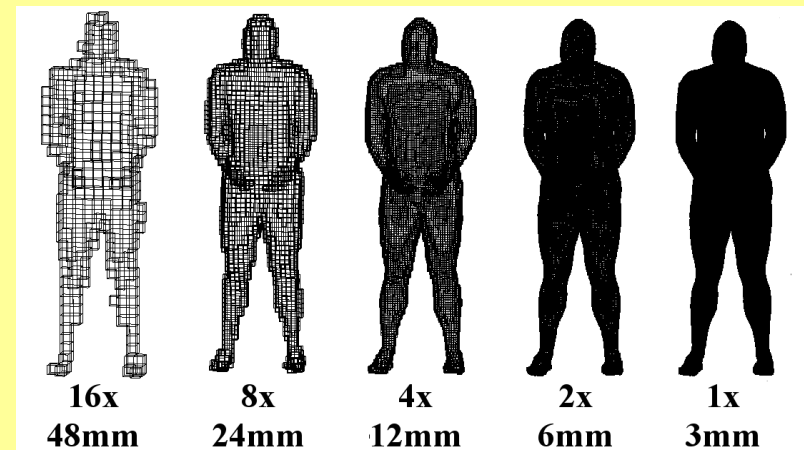
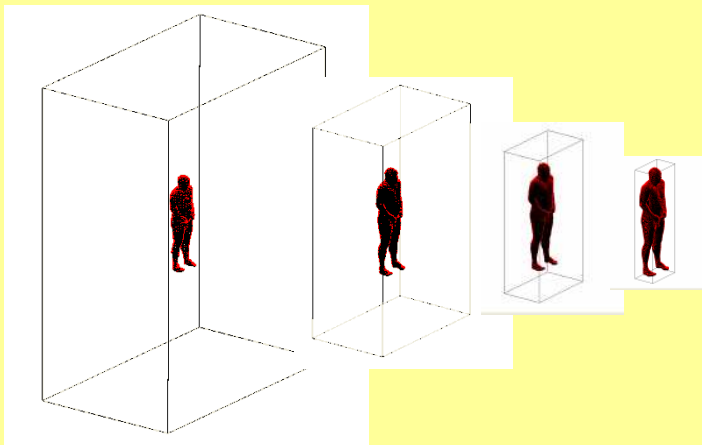
Tecniche per la soluzione del problema elettrico esterno (Eq. Di Laplace + Differenze Finite)



Celle grandi ai margini del volume di calcolo

Celle sempre più piccole via via che ci si avvicina al modello di organismo

Su ciascuna griglia intermedia, la distribuzione di potenziale iniziale viene determinata mediante interpolazione della soluzione ottenuta sulla griglia a risoluzione inferiore

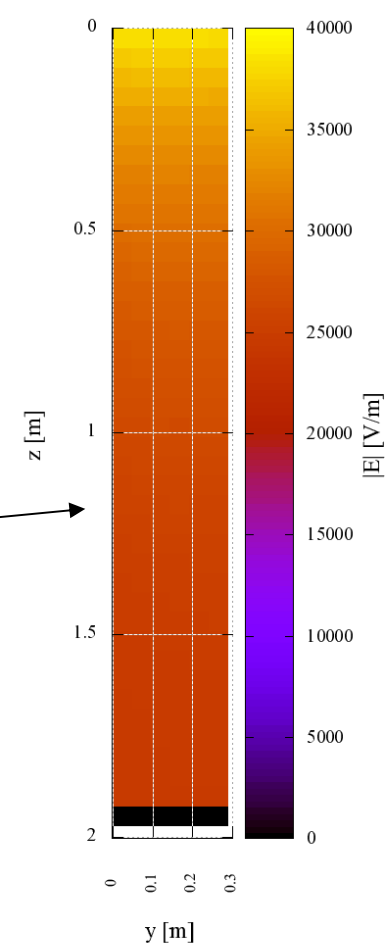
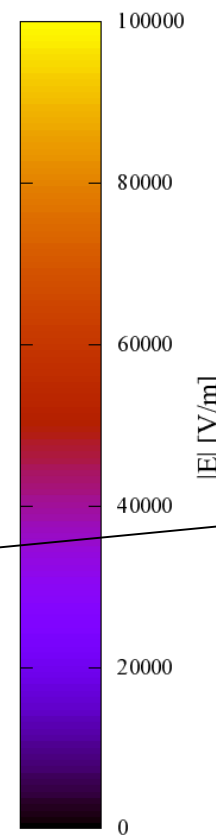
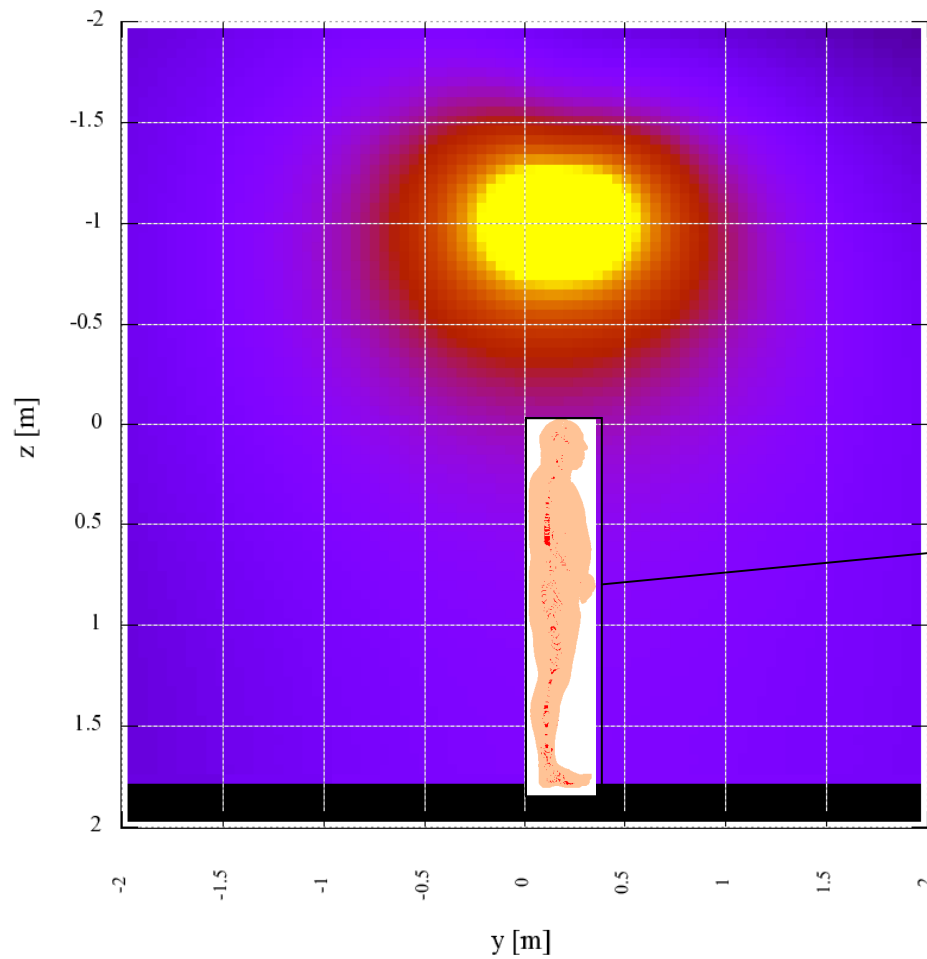


Verifica del rispetto dei valori limite di esposizione per lavoratori esposti a CEM a frequenza bassa e intermedia: aspetti generali e problemi aperti

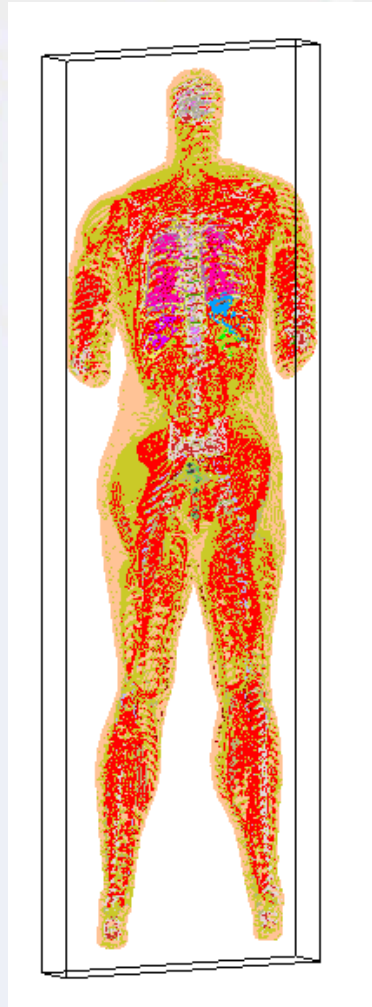
Campo elettrico impresso

$$|\mathbf{E}_p + j\mathbf{E}_q|$$

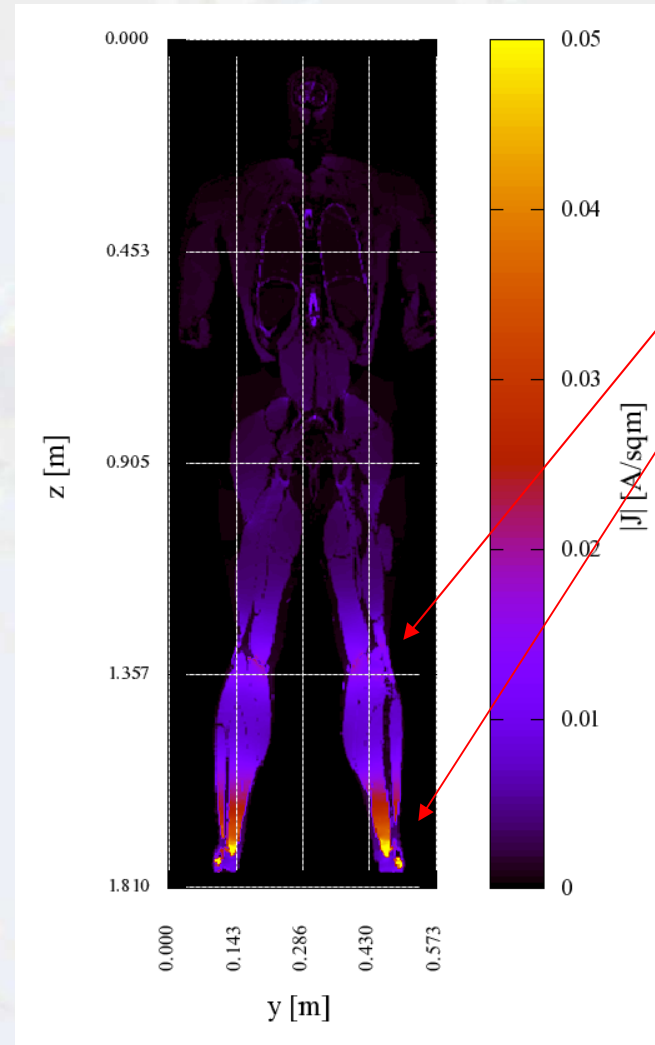
Tutto il corpo è esposto a valori di campo elettrico superiori al livello di azione



Problema elettrico interno: soggetto cortocircuitato a terra



Sezione coronale
($x=0,10\text{ m}$)



Valore limite di esposizione @ 50 Hz
 $0,01\text{ A/m}^2$

La densità di corrente è più intensa laddove la sezione è minore

Il rateo di convergenza è più lento rispetto al caso del problema magnetico interno



Composizione ?

Secondo la normativa le correnti indotte dal campo magnetico e dal campo elettrico devono essere considerate **separatamente**.

I rapporti di fase tra tensione e corrente su ciascun conduttore di una linea trifase sono in genere noti.

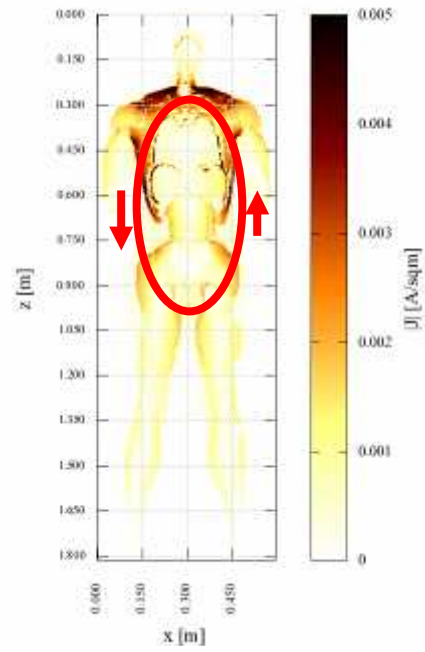
Se tali rapporti di fase sono correttamente considerati durante la soluzione del problema dosimetrico è possibile comporre le densità di corrente indotte dal campo magnetico ed elettrico:

$$\mathbf{J}_B = \mathbf{J}_{pB} + j \mathbf{J}_{qB}$$

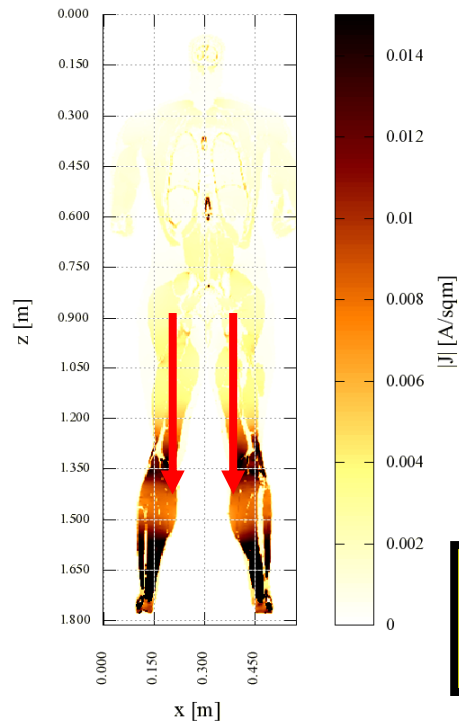
$$\mathbf{J}_E = \mathbf{J}_{pE} + j \mathbf{J}_{qE}$$

$$\mathbf{J}_{B+E} = \left(\mathbf{J}_{pB} + \mathbf{J}_{pE} \right) + j \left(\mathbf{J}_{qB} + \mathbf{J}_{qE} \right)$$

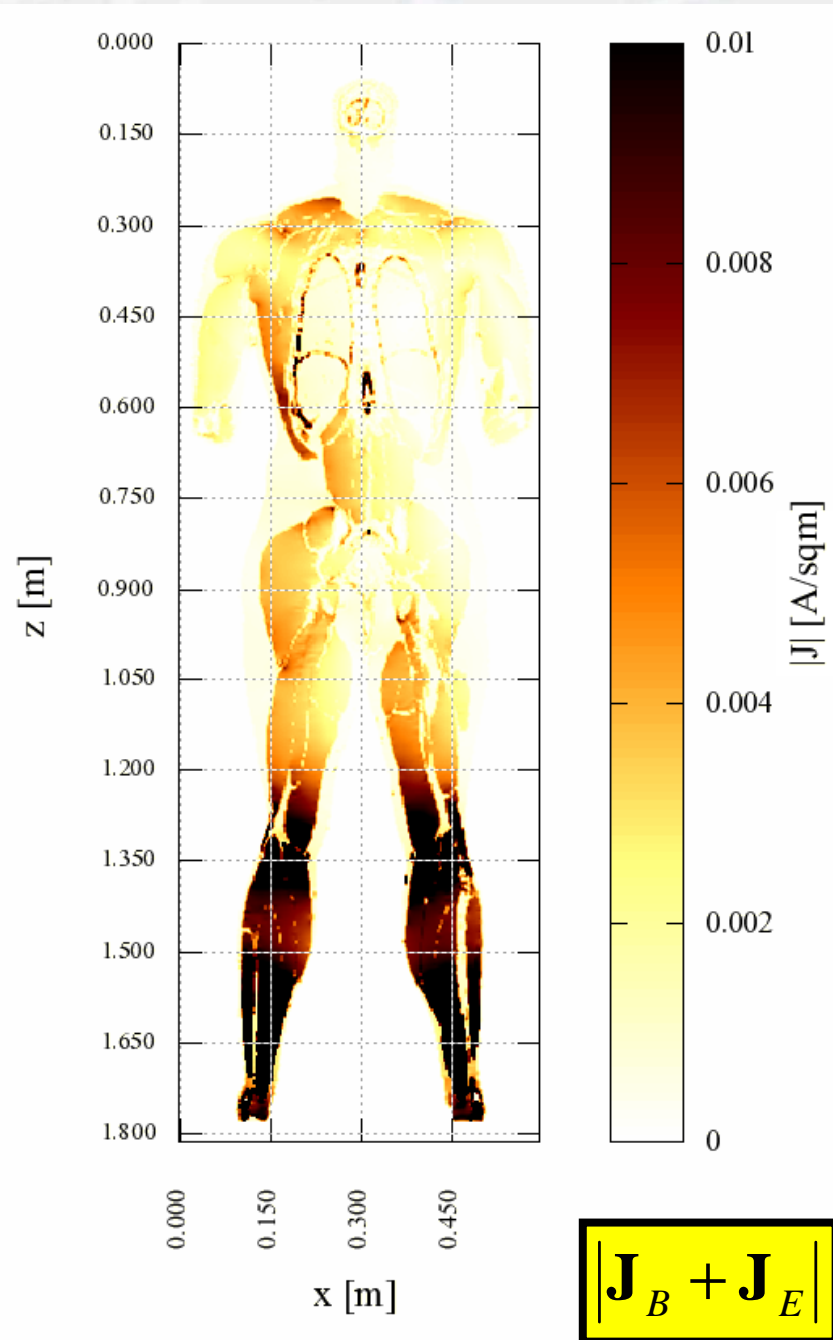
I lucidi seguenti si riferiscono al caso di corrente e tensione in fase su ciascun conduttore



$$|J_B|$$



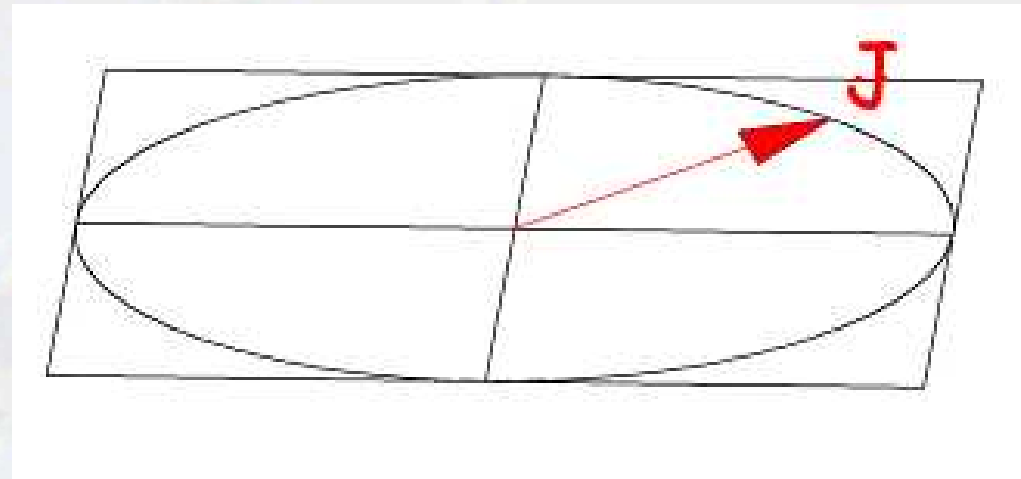
$$|J_E|$$



$$|J_B + J_E|$$

Media superficiale di una densità di corrente vettore polarizzata ellitticamente

Il concetto di superficie perpendicolare alla densità di corrente non è ben definito nel caso di polarizzazione ellittica di J .



Nel caso di polarizzazione ellittica l'algoritmo semplificato per l'esecuzione della media superficiale è comunque applicabile, non facendo riferimento alla superficie effettivamente ortogonale alla densità di corrente

Concludendo

I principali problemi posti dal processo di verifica dei valori limite di esposizione sono legati ai modelli di organismo ed alla fase di post-processing. Il calcolo delle grandezze interne fa riferimento a tecniche avanzate e spesso impegnative ma comunque ben definite.

Si elencano di seguito i principali problemi aperti:

- Caratteristiche dielettriche tessuti a bassa frequenza
- Fenotipi e posture modelli di organismo
- Media superficiale
 - ✓ Algoritmi
 - ✓ Polarizzazione ellittica
- Limitazione al sistema nervoso centrale