



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)

La dosimetria dei Campi Elettromagnetici nel contesto del Decreto Legislativo 81/2008

ing. Nicola Zoppetti

n.zoppetti@ifac.cnr.it

Cosa è la dosimetria e chi la usa

La dosimetria nell'ambito del d.lgs 81/2008

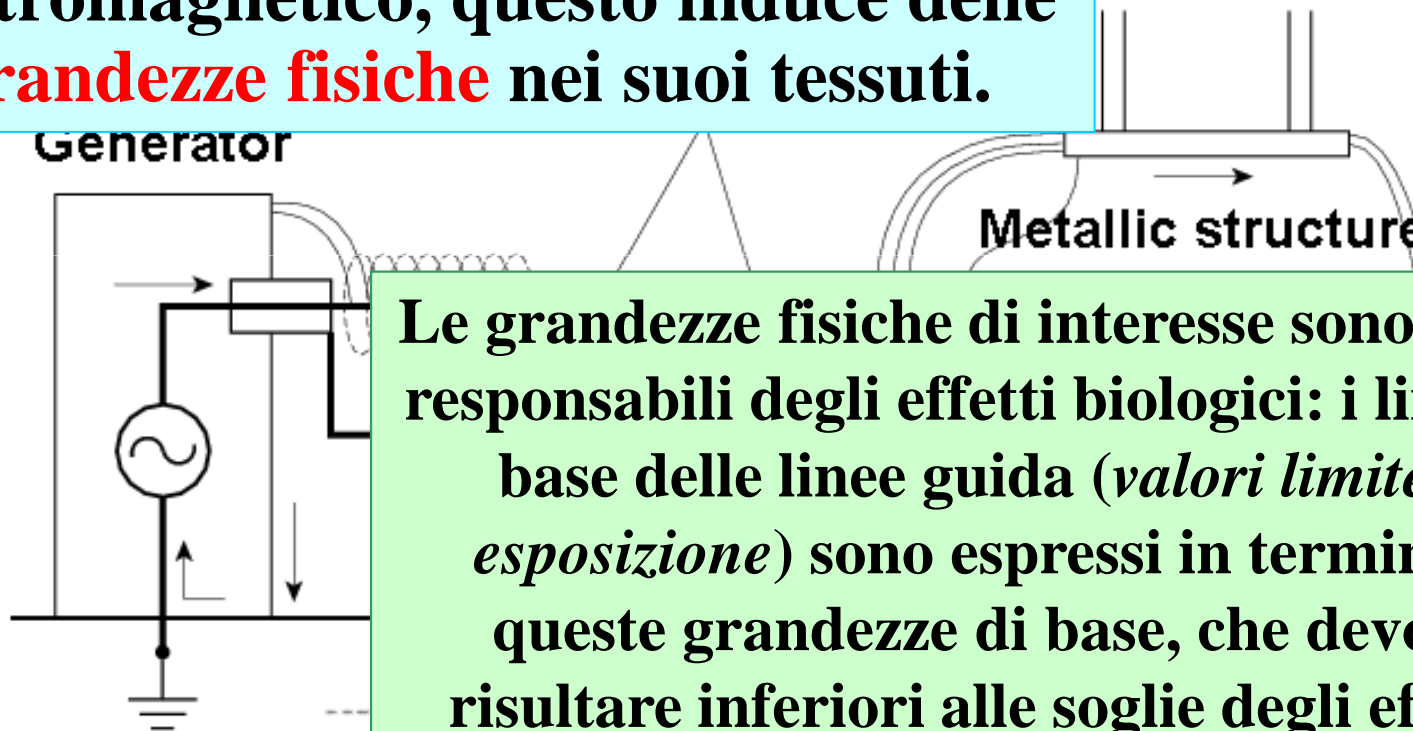
Elementi di dosimetria numerica:

- Modelli digitali dell'organismo umano.
- Modelli delle sorgenti di campo.
- Metodi numerici.

Esempi

Cosa è la dosimetria dei campi elettromagnetici?

Quando un “oggetto biologico” è esposto ad un campo elettromagnetico, questo induce delle **grandezze fisiche** nei suoi tessuti.



Le grandezze fisiche di interesse sono quelle responsabili degli effetti biologici: i limiti di base delle linee guida (*valori limite di esposizione*) sono espressi in termini di queste grandezze di base, che devono risultare inferiori alle soglie degli effetti.

electric field
current

**Industrial RF
heater (dielectric
loss)**

A bassa (fino a 100kHz), la grandezza dosimetrica di base considerata è la densità di corrente \vec{J} (oppure, secondo le bozze di linee guida pubblicate nel 2009, il campo elettrico *in-situ* E_i).

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}_i$$

A frequenze più alte la grandezza dosimetrica di base considerata è il SAR (Specific Absorption Rate)

$$SAR = \frac{J^2}{\sigma \delta}$$

- I campi inducono correnti nei tessuti biologici
- Le correnti producono potenza (effetto Joule)

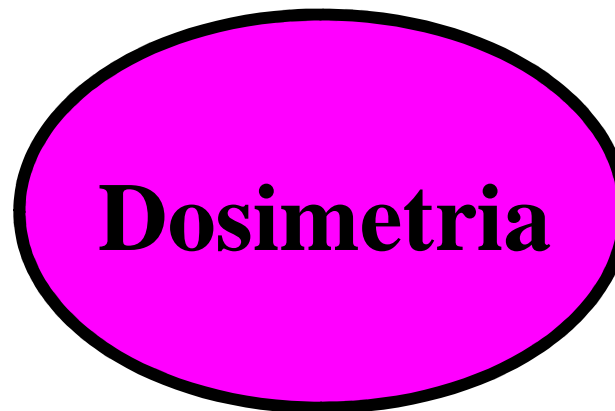
| Freq. | |
|------------------|------------------------------|
| 0 -100 kHz | Only J |
| 100 kHz – 10 MHz | Both J and SAR |
| 10 MHz - 300 GHz | Only SAR |

Measurable
external quantities

Compliance with basic
restrictions if reference
levels are violated

Internal quantities

\vec{E}
 \vec{H}



\vec{J}
SAR



Development of
reference levels

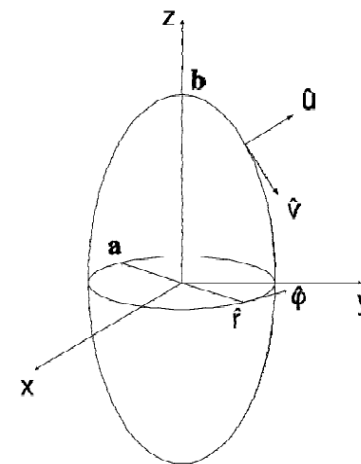
Può fare uso di:

1. Strumenti di misura e fantocci antropomorfi (dosimetria sperimentale).
2. Soluzione per via teorica delle equazioni di Maxwell (dosimetria analitica).
3. **Tecniche di calcolo numerico (dosimetria numerica).**

Dosimetria sperimentale



Dosimetria analitica



$$\vec{E}(r)_\phi = -j \frac{1}{2} \omega \mu_0 r H_0 \hat{\phi}$$

Chi fa uso della dosimetria?

- (1) Chi scrive gli standard di esposizione utilizza la dosimetria per ricavare i livelli di riferimento (**valori di azione**) a partire dalle restrizioni di base (**valori limite di esposizione**).

(2) Gli esperti applicano modelli dosimetrici per verificare la conformità con i le restrizioni di base (valori limite di esposizione) quando i livelli di esposizione (valori di azione) sono violati.

(3) I biologi/biofisici applicano modelli dosimetrici per determinare i livelli dei campi nei tessuti dei soggetti/campioni esposti.

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 degli **Exposure Limit Values** (in termini di quantità interne non misurabili se non in modo invasivo).
- La direttiva definisce anche degli **Action Values** (in termini di quantità esterne facilmente misurabili).
- Il rispetto degli Action Values implica il rispetto degli Exposure Limit Values.
- Se gli Action Values sono superati ciò NON implica il superamento degli Exposure Limit Values
- Se gli Action Values sono superati, il datore di lavoro può:
 - ridurre il livello di esposizione
 - **calcolare, utilizzando tecniche dosimetriche, se non risultino superati gli Exposure Limit Values.**

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.



DECRETO LEGISLATIVO 9 aprile 2008 , n. 81

(11/40)

Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro.

Capo IV

Protezione dei lavoratori dai rischi di esposizione a campi elettromagnetici

Art. 209.

Identificazione dell'esposizione e valutazione dei rischi

1. Nell'ambito della valutazione dei rischi di cui all'articolo 181, il datore di lavoro valuta e, quando necessario, misura o calcola i livelli dei campi elettromagnetici ai quali sono esposti i lavoratori. La valutazione, la misurazione e il calcolo devono essere effettuati in conformita' alle norme europee standardizzate del Comitato europeo di normalizzazione elettrotecnica (CENELEC). Finche' le citate norme non avranno contemplato tutte le pertinenti situazioni per quanto riguarda la valutazione, misurazione e calcolo dell'esposizione dei lavoratori ai campi elettromagnetici, il datore di lavoro adotta le specifiche linee guida individuate od emanate dalla Commissione consultiva permanente per la prevenzione degli infortuni e per l'igiene del lavoro, o, in alternativa, quelle del Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI), tenendo conto, se necessario, dei livelli di emissione indicati dai fabbricanti delle attrezzature.

2. A seguito della valutazione dei livelli dei campi elettromagnetici effettuata in conformita' al comma 1, qualora risulti che siano superati i valori di azione di cui all'articolo 208, il datore di lavoro valuta e, quando necessario, calcola se i valori limite di esposizione sono stati superati.



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

(12/40)

Cosa fare, dunque, in caso di superamento dei valori di azione? Il testo del DL 81/2008 prevede letteralmente (Art.209, comma 2) che “... qualora risulti che siano superati i valori di azione di cui all'articolo 208, il datore di lavoro **valuta e, quando necessario, calcola** se i valori limite di esposizione sono stati superati”.

Occorre innanzitutto intendersi su come interpretare quel “**valuta e, quando necessario ...**”. A nostro avviso esso comprende due aspetti:

- **dal punto di vista economico**, occorre valutare se convenga investire nella verifica del rispetto dei valori limite di esposizione o se invece sia preferibile procedere immediatamente alla riduzione dei livelli di campo, per ricondurli al di sotto dei valori di azione (come è implicitamente consentito dall'Art.210);
- **dal punto di vista tecnico-scientifico**, occorre valutare 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.

“**Se 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? ^(13/40)

Nelle direttiva 2004/40/CE (o meglio nelle sottostanti raccomandazioni ICNIRP), 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**: per esempio, per il campo magnetico a bassa frequenza, il modello della spira circolare. A questi modelli si applicano però dei **coefficienti cautelativi** abbastanza ampi da assicurare che - in qualunque situazione di esposizione - il rispetto dei valori di azione garantisca il rispetto dei valori limite di esposizione.

Se, per verificare se sono rispettati i valori limite di esposizione, si applicassero gli stessi modelli dosimetrici semplificati e cautelativi utilizzati dall'ICNIRP, è ovvio che si troverebbe *sempre* che anche i valori limite di esposizione sono superati.



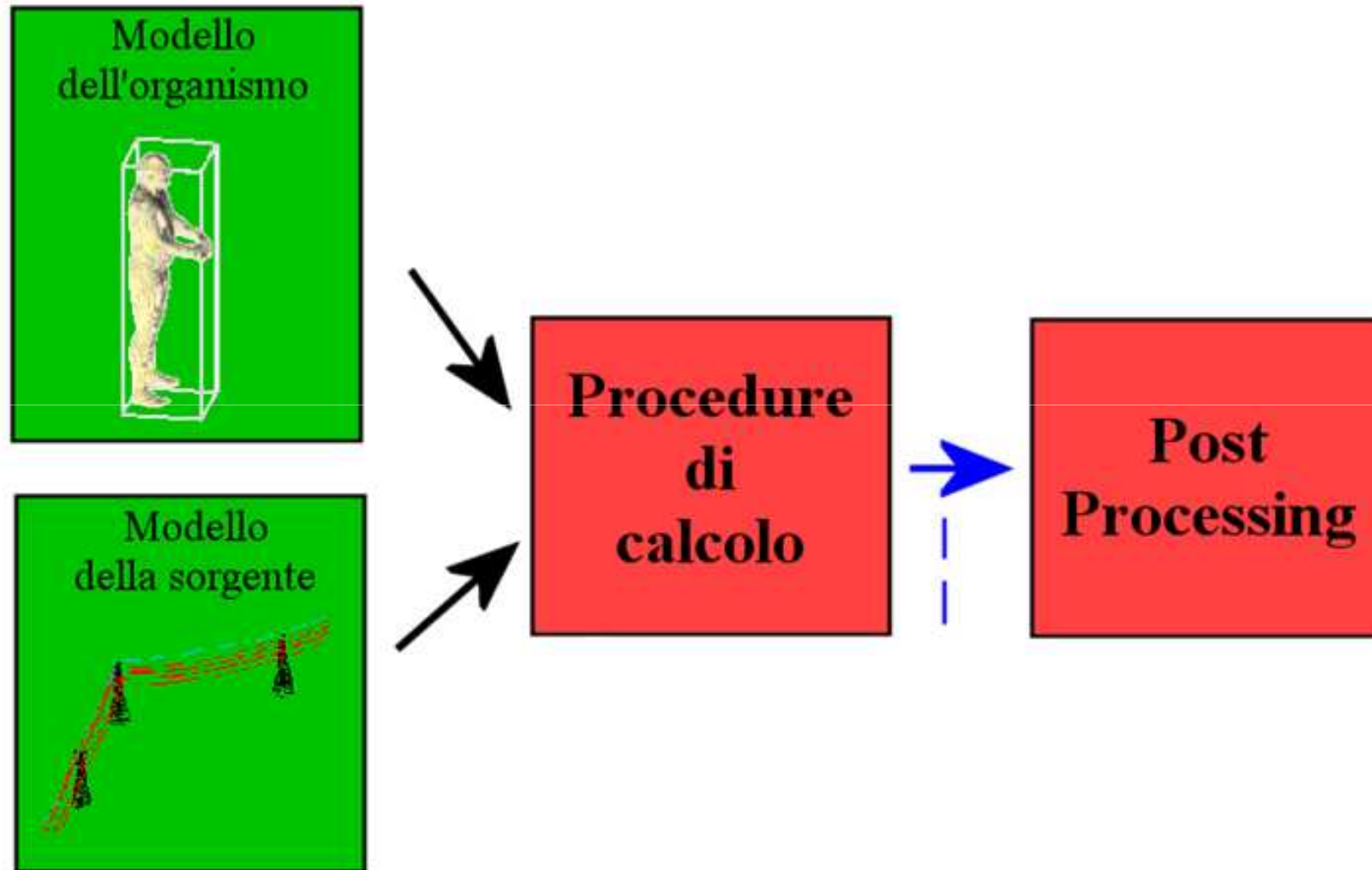
2) Che tipo di strumenti possono essere utilizzati per verificare il rispetto dei limiti di esposizione? ^(14/40)

D'altra parte, se si utilizzassero modelli altrettanto semplificati, ma non altrettanto cautelativi, non si potrebbe garantire la sicurezza del lavoratore esposto. In entrambi questi casi, sarebbe equivalente o addirittura preferibile limitarsi ad imporre il rispetto dei valori di azione senza deroghe.

L'unica condizione in cui, a nostro avviso, è accettabile che siano violati i valori di azione senza che venga meno la sicurezza del soggetto esposto, è che si dimostri 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.

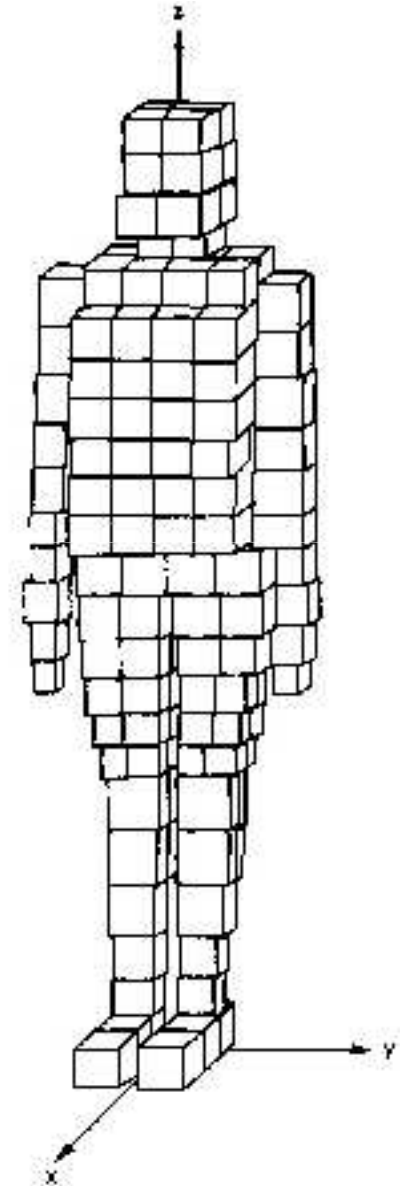
A questo fine, è evidentemente necessario usare i metodi ed i modelli più accurati e dettagliati disponibili.

Articolazione di un'analisi dosimetrica numerica



I modelli digitali dell'organismo umano

- Sono una rappresentazione discretizzata del corpo umano composta da parti elementari dette **segmenti**.
- 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?



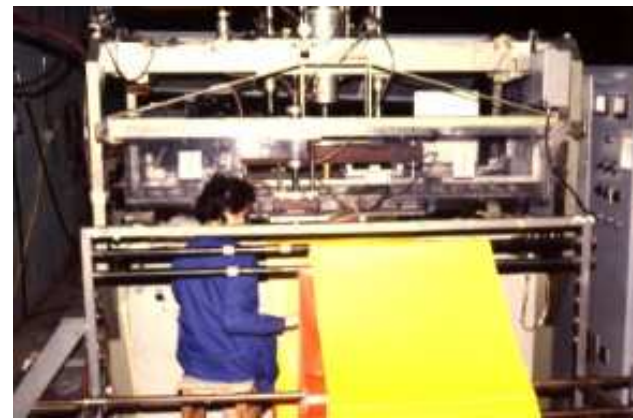
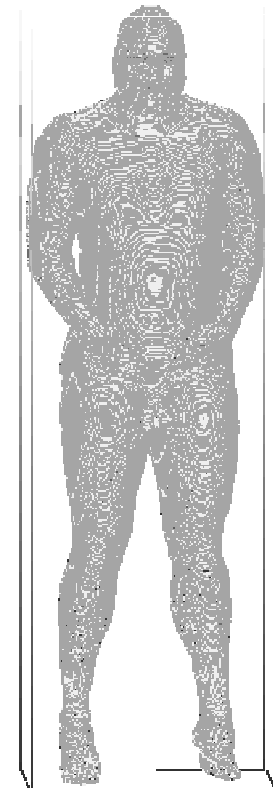


Alcuni modelli utilizzati in letteratura ^(19/40)

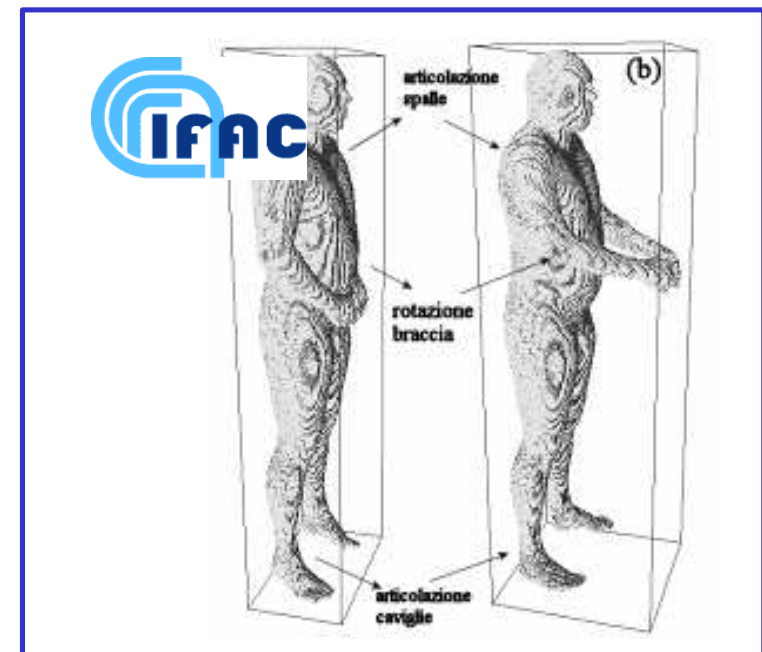
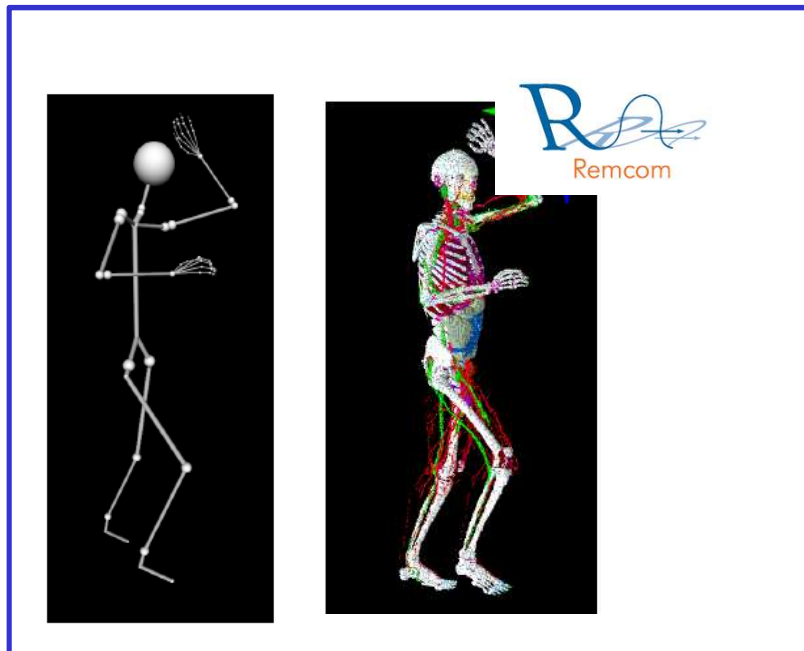
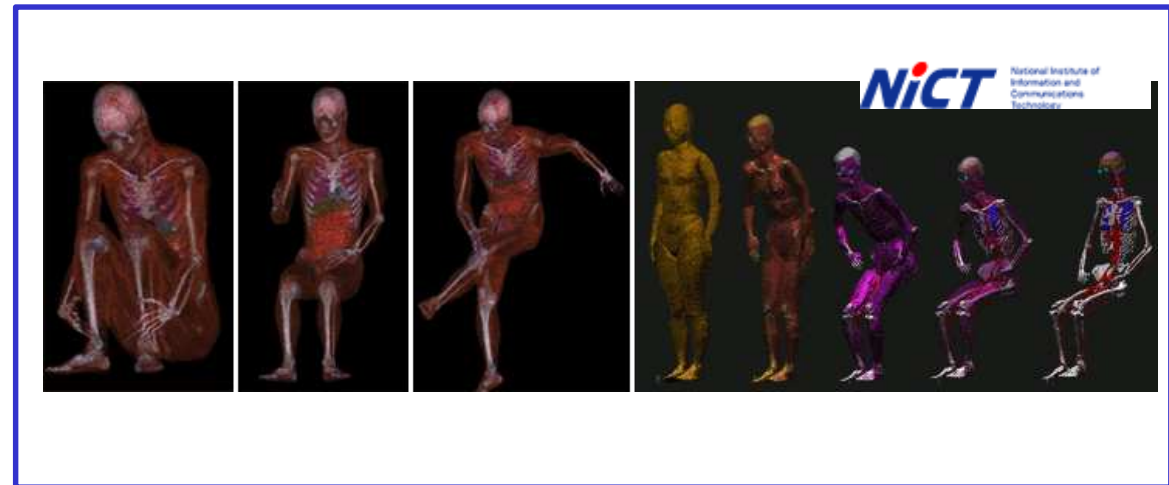
Le tecniche di elaborazione dei dati necessarie al riconoscimento dei tessuti si stanno perfezionando rapidamente, ma richiedono comunque un certo dispiego di mezzi e competenze. Da ciò deriva una relativa scarsità di modelli e quindi un numero limitato di fenotipi rappresentabili.

| 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 |

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



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



Il modello delle sorgenti di campo

Sorgenti e campi impressi

- **I CAMPI IMPRESSI IMPERTURBATI:** sono quelli generati dalle sorgenti nel cosiddetto “teatro espositivo” in presenza dai possibili oggetti presenti nel teatro espositivo stesso ma **in assenza del soggetto esposto.**
- **I valori di azione sono espressi in termini di valori efficaci imperturbati.**
- **I CAMPI TOTALI** sono quelli generati dalle sorgenti nel cosiddetto “teatro espositivo” **in presenza sia del soggetto esposto sia degli altri eventuali oggetti.**
- Nelle analisi dosimetriche si considerano le sorgenti nella configurazione in cui queste generano i campi imperturbati ai quale ci si vuole riferire e si calcolano i **CAMPI TOTALI.**



Approcci alla modellazione (24/40) delle sorgenti

- Distribuzione uniforme
(approccio worst case)
- Fit da misure.
- Modelli analitici o numerici

Metodi di calcolo delle grandezze dosimetriche

Bassa frequenza

Grazie ad alcune approssimazioni, si risolvono separatamente i problemi legati all'esposizione al campo elettrico ed al campo magnetico

Alta frequenza

Si risolve un unico problema in cui campo elettrico e magnetico sono mutuamente accoppiati

**Nel dominio della
frequenza**

Si fa riferimento a forme
d'onda sinusoidali

**Nel dominio
del tempo**

Si segue l'evoluzione
temporale del campo
totale

**Elementi finiti
(FEM)**

Tetraedri
(modellazione di
superfici curve)

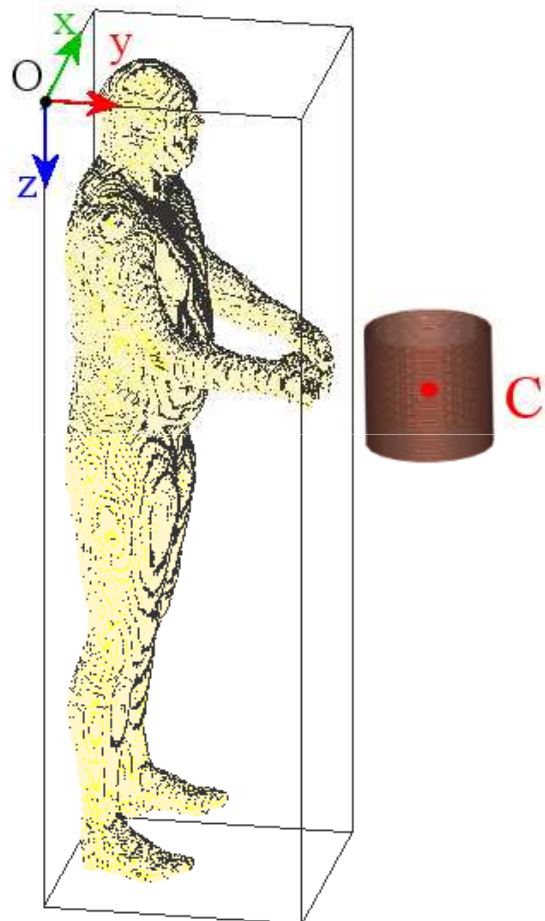
**Metodo dei momenti
(MOM)**

Elementi
conduttori

**Differenze finite
(FD)**

Celle cubiche

Fornetto a induzione

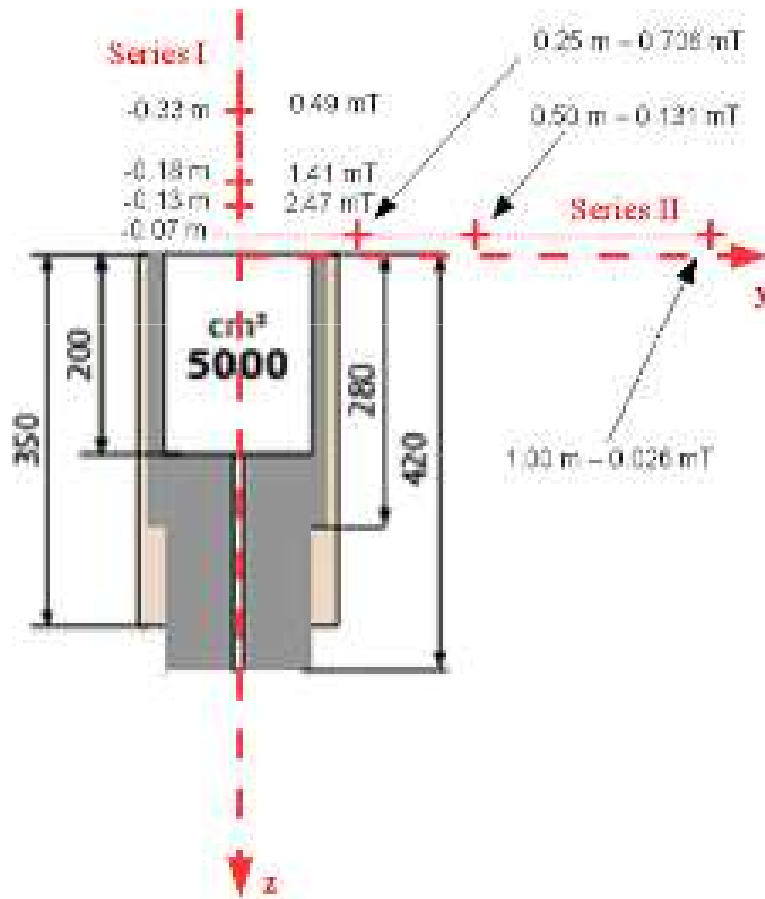


- Used in the gold industry
- **Magnetic field only**
- $F = 3450 \text{ Hz}$
- $I = 400 \text{ A}$
- Monophase source



- $C_x=0,3\text{m}$ $C_y=0,75\text{m}$ $C_z=0,75\text{m}$
- Radius= $0,09\text{m}$
- The edges of the fingers are less than 10 cm distant from the conductors

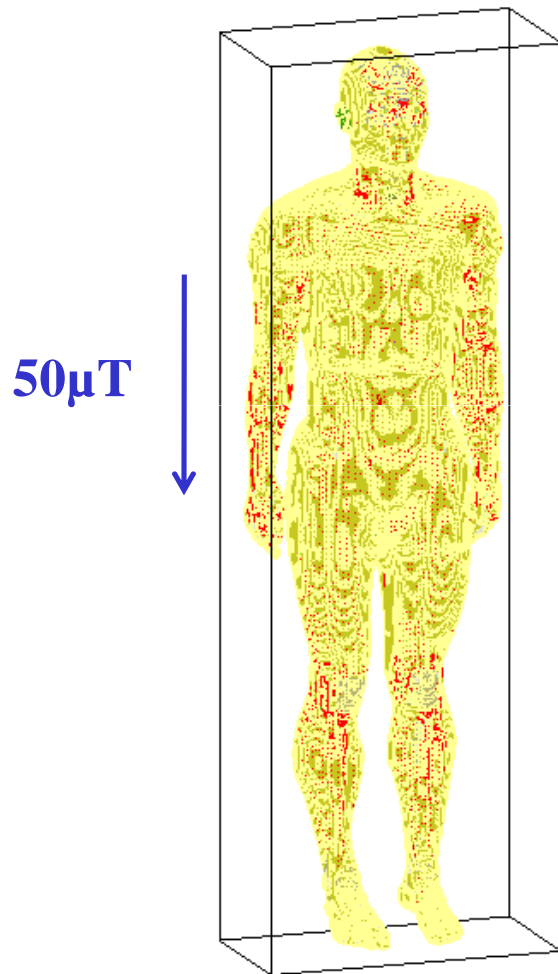
Distribuzione di campo omogenea, modello di organismo non articolato a risoluzione intermedia



Utilizzo una distribuzione di campo parallelo all'asse del solenoide e pari al massimo valore misurato (circa 2,5 mT)

A 3450 Hz il valore di azione è pari a 30,7 μ T.

Distribuzione di campo omogenea, modello di organismo non articolato a risoluzione intermedia

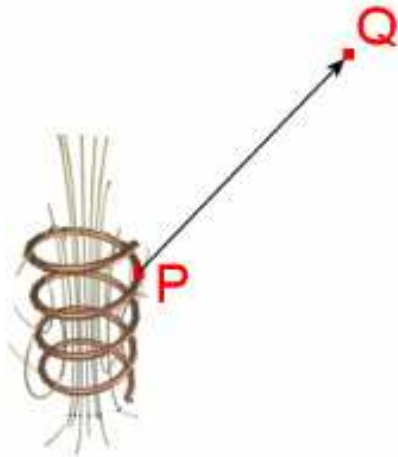


Utilizzando il valore di campo ricavato dalle
misure a circa 70 cm dal solenoide
(50 μ T)

| Tessuto | J media 1 cmq [mA/mq] | Restrizione di base ICNIRP a 3450 Hz [mA/mq] |
|--------------------|-----------------------|--|
| Blood | 31.4 | 34,5 |
| BrainGreyMatter | 24.1 | |
| BrainWhiteMatter | 18.0 | |
| Cerebellum | 15.8 | |
| CerebroSpinalFluid | 27.1 | |
| Nerve | 15.4 | |
| SpinalChord | 12.6 | |
| Hippocampus | 5.4 | |
| MedullaOblongata | 7.1 | |
| Midbrain | 5.6 | |
| Pons | 9.3 | |
| Thalamus | 3.9 | |

induction heater

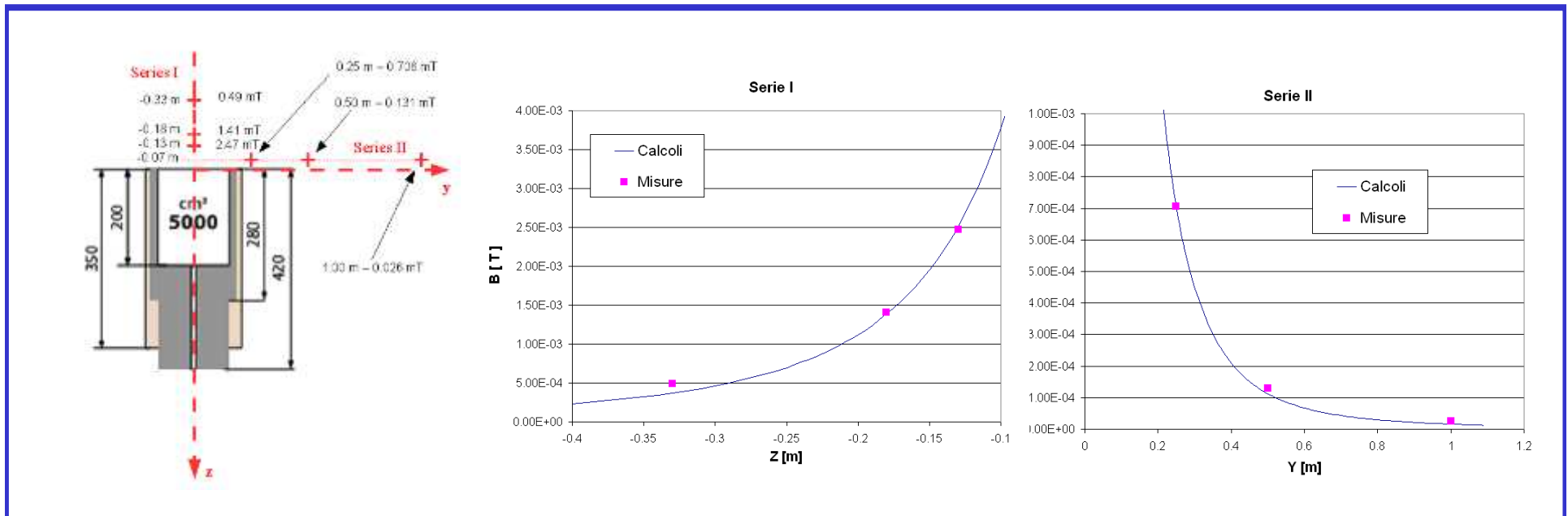
Modeling the source



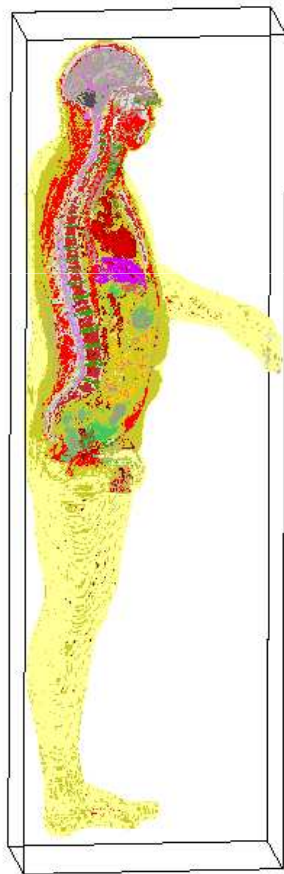
$$\mathbf{B}(Q) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{P \in \Gamma} \frac{d\mathbf{P} \times (\mathbf{Q} - \mathbf{P})}{|\mathbf{Q} - \mathbf{P}|^3}$$

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

Measurement setup and results



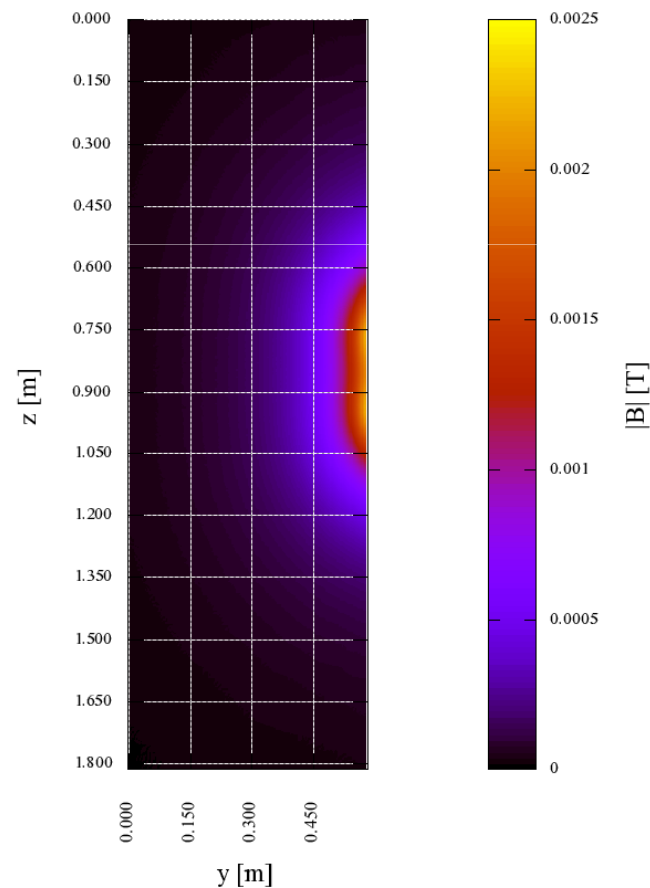
Median
sagittal
section
($x=0,3\text{ m}$)



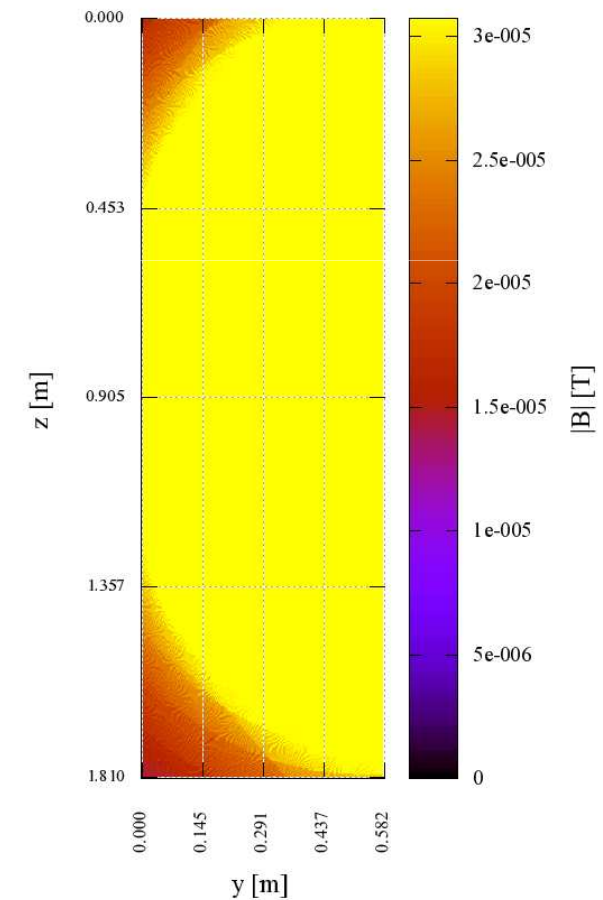
Case 1: induction heater B field

(33/40)

The maximum
value (close to
the hands and to
the coils)
is above 2,5 mT

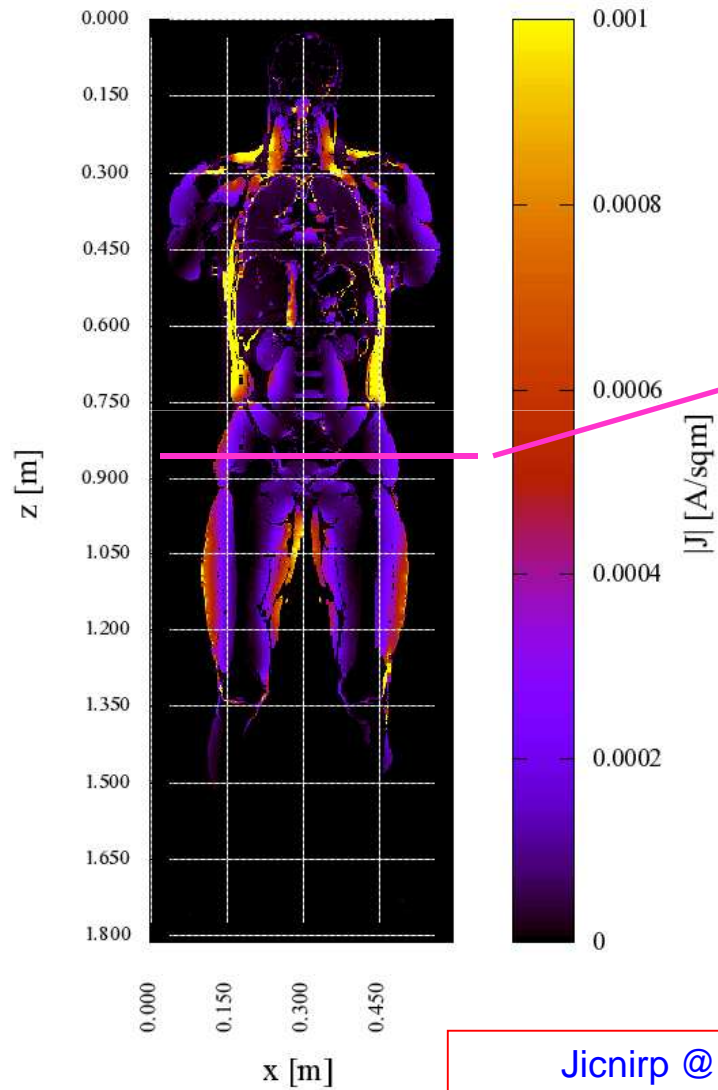


A large part of the
body volume is
over the action
value 30,7 μT

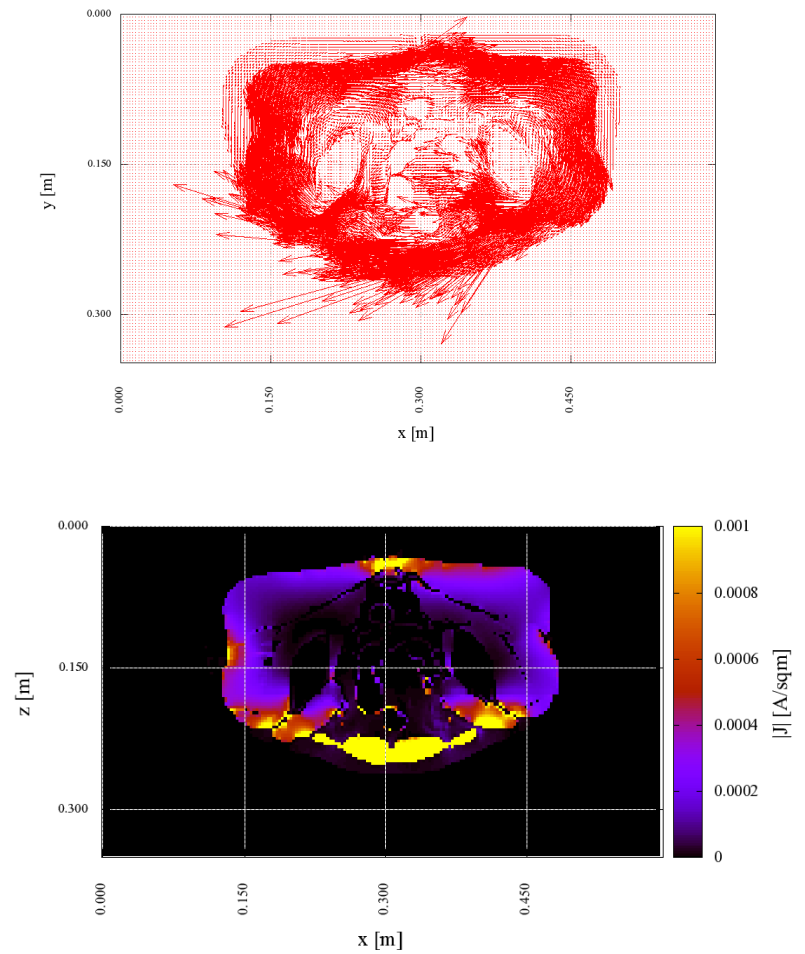


Case 1: induction heater J

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

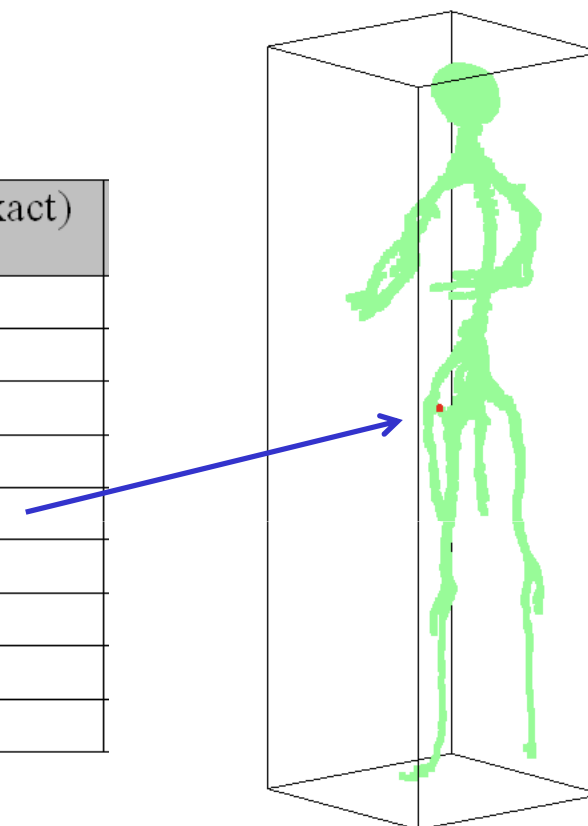


Axial section
($z=0,85\text{ m}$)



Jicnirp @ 3450 Hz = 0,0345 A/m²

| | J local peak [mA/m²] | J avg 1cm²(exact) [mA/m²] |
|---------------------------------|--|--|
| <i>Brain gray matter</i> | 7.59 | 12.51 |
| <i>Brain white matter</i> | 4.19 | 8.97 |
| <i>Cerebellum</i> | 11.00 | 16.11 |
| <i>Cerebro spinal fluid</i> | 112.79 | 32.84 |
| <i>Nerve & spinal chord</i> | 19.29 | 38.15 |
| <i>Fat</i> | 91.82 | 87.72 |
| <i>Heart</i> | 17.89 | 22.13 |
| <i>Muscle</i> | 235.13 | 85.30 |
| <i>Tendon</i> | 280.11 | 75.85 |

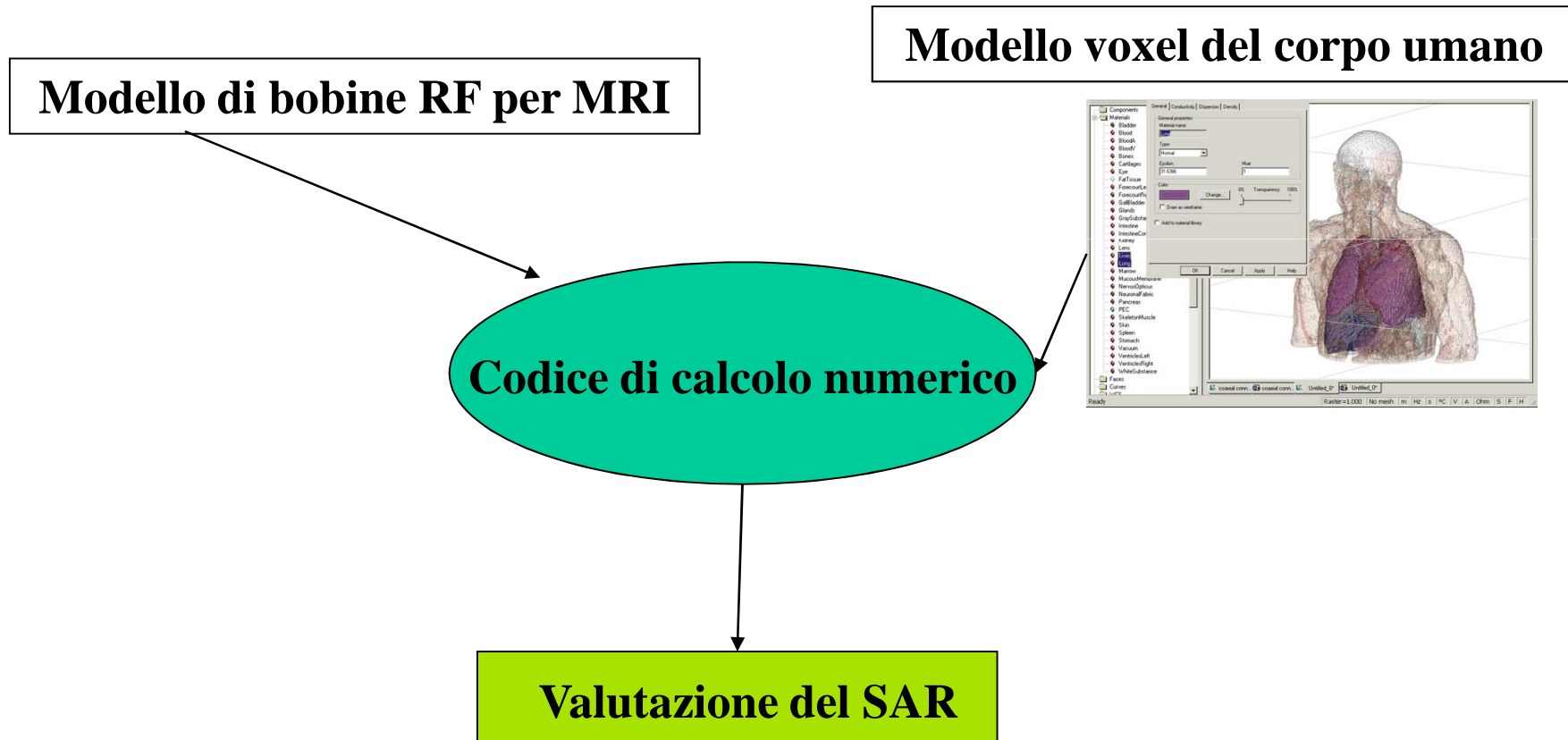


J avg.< 34,5 mA/m²
 J avg.> 34,5 mA/m²

Jicnirp @ 3450 Hz = 34,5 mA/m²

Alta frequenza

Valutazione del SAR (specific absorption rate) durante le procedure in MRI che richiedono la presenza dell'operatore durante la scansione:





Risonanza magnetica

(38/40)

<http://www.itis.ethz.ch/downloads/VT2007017FinalReportv04.pdf>

Limiti ICNIRP (lavoratori):

- 0,4 W/kg (corpo intero)
- 10 W/kg (localizzato: testa e tronco)
- 20 W/kg (localizzato: arti)



**È tutto.
Grazie per l'attenzione!!**