

Elettromagnetismo computazionale e bioelettromagnetismo

Maurizio Sarti

sarti.m@irea.cnr.it

Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente (IREA)

Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR)

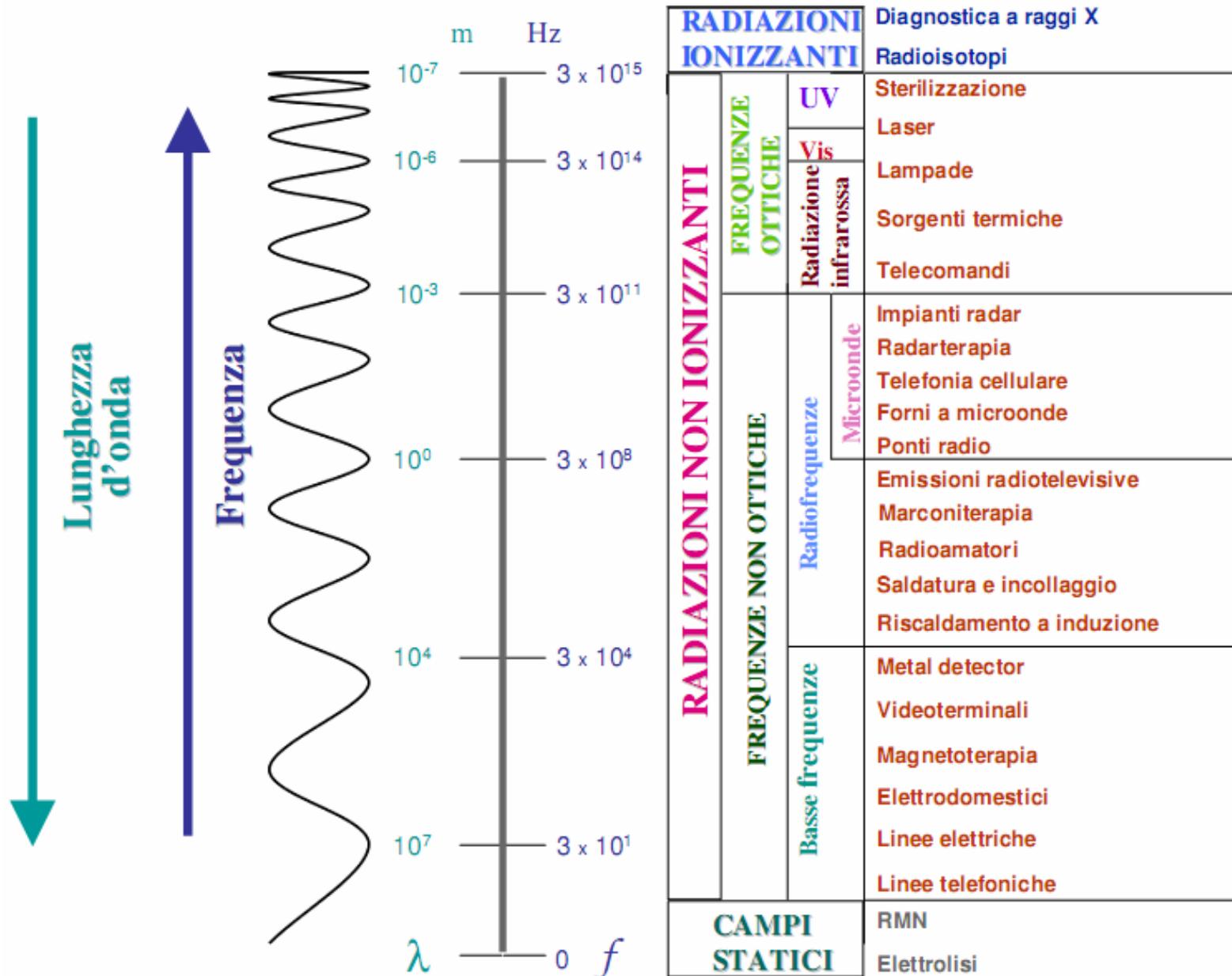
Via Diocleziano 328, 80124 Napoli, Italia

Università degli Studi di Napoli "Parthenope", Napoli, 2 Dicembre, 2010

Sommario

- **Cenni introduttivi**
- **Caratterizzazione di un espositore per colture cellulari a 50 Hz**
- **Applicazioni numeriche nella ricostruzione ossea**
- **Caratterizzazione di un espositore per colture cellulari a 900 MHz**

Spettro elettromagnetico



Restrizioni per campi elettrici e magnetici variabili nel tempo

Caratteristiche dell'esposizione	Intervallo di frequenza	Densità di corrente per la testa ed il tronco (mA/m ²)(rms)	SAR mediato sul corpo intero (W/kg)	SAR localizzato (testa e tronco)	SAR localizzato (arti)
Esposizione professionale	fino a 1 Hz	40	-	-	-
	1-4 Hz	40/ <i>f</i>	-	-	-
	4 Hz-1 kHz	10	-	-	-
	1-100 kHz	<i>f</i> /100	-	-	-
	100 kHz-10 MHz	<i>f</i> /100	0,4	10	20
	10 MHz-10 GHz	-	0,4	10	20
Esposizione del pubblico	fino a 1 Hz	8	-	-	-
	1-4 Hz	8/ <i>f</i>	-	-	-
	4 Hz-1 kHz	2	-	-	-
	1-100 kHz	<i>f</i> /500	-	-	-
	100 kHz-10 MHz	<i>f</i> /500	0,08	2	4
	10 MHz-10 GHz	-	0,08	2	4

Gli effetti biologici e sanitari che sono stati accertati nell'intervallo di frequenza tra 10 MHz e pochi GHz possono essere interpretati come risposte ad un aumento della temperatura corporea di oltre 1° C. In condizioni ambientali normali, un simile aumento di temperatura è provocato da un'esposizione ad un SAR al corpo intero di circa 4 W/kg per circa 30 minuti. Si è quindi scelto un SAR medio sul corpo intero di 0,4 W/kg, come limite in grado di fornire un'adeguata protezione per l'esposizione professionale. Per l'esposizione della popolazione si introduce un ulteriore fattore di sicurezza pari a 5, che fornisce un limite di 0,08 W/kg per il SAR medio sul corpo intero.

Livelli di riferimento per l'esposizione a campi elettrici e magnetici

1 GAUSS = $1e-4$ T

Esposizione professionale
a 50Hz => 5 GAUSS

Intervallo di frequenza	Intensità del campo elettrico (V/m)	Intensità del campo magnetico (A/m)	Induzione magnetica (μ T)	Densità di potenza dell'onda piana equivalente S_{eq} (W/m^2)
fino a 1 Hz	-	$1,63 \times 10^5$	2×10^5	-
1-8 Hz	20.000	$1,63 \times 10^5/f^2$	$2 \times 10^5/f^2$	-
8-25 Hz	20.000	$2 \times 10^4/f$	$2,5 \times 10^4/f$	-
0,025-0,82 kHz	$500/f$	$20/f$	$25/f$	-
0,82-65 kHz	610	24,4	$30,7$	-
0,065-1 MHz	610	$1,6/f$	$2,0/f$	-
1-10 MHz	$610/f$	$1,6/f$	$2,0/f$	-
10-400 MHz	61	0,16	0,2	10
400-2000 MHz	$3f^{1/2}$	$0,008f^{1/2}$	$0,01f^{1/2}$	$f/40$
2-300 GHz	137	0,36	0,45	50

Esposizione del pubblico
a 50Hz => 1 GAUSS

Intervallo di frequenza	Intensità del campo elettrico (V/m)	Intensità del campo magnetico (A/m)	Induzione magnetica (μ T)	Densità di potenza dell'onda piana equivalente S_{eq} (W/m^2)
fino a 1 Hz	-	$3,2 \times 10^4$	4×10^4	-
1-8 Hz	10.000	$3,2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^4/f^2$	-
8-25 Hz	10.000	$4.000/f$	$5.000/f$	-
0,025-0,8 kHz	$250/f$	$4/f$	$5/f$	-
0,8-3 kHz	$250/f$	5	$6,25$	-
3-150 kHz	87	5	6,25	-
0,15-1 MHz	87	$0,73/f$	$0,92/f$	-
1-10 MHz	$87/f^{1/2}$	$0,73/f$	$0,92/f$	-
10-400 MHz	28	0,073	0,092	2
400-2000 MHz	$1,375f^{1/2}$	$0,0037f^{1/2}$	$0,0046f^{1/2}$	$f/200$
2-300 GHz	61	0,16	0,20	10

Ruoli



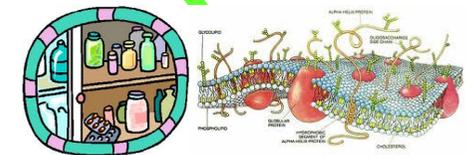
Normativa



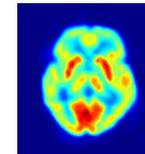
Progettazione caratterizzazione e
validazione dei sistemi di esposizione



Biologo



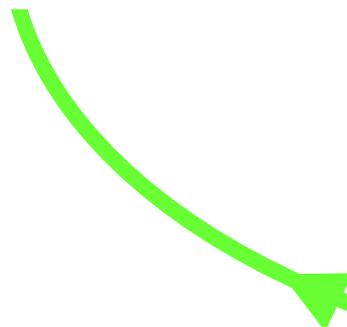
Terapia Meccanismi



Diagnostica



Protezionistica



Perché interazione?

Radiazioni non ionizzanti NIR (Nonionizing Radiation)
BASSA ENERGIA associata ad un quanto

Radiazioni ionizzanti (UV, raggi X)
ALTA ENERGIA associata ad un quanto
 $E=h\nu$ in eV (1 eV = $1.59 \cdot 10^{-19}$ J)

Nome di radiazione o applicazione	Frequenza [Hz]	Lunghezza d'onda [m]	Quanto di radiazione [eV]
UHF TV	$7 \cdot 10^8$	0.43	$2.88 \cdot 10^{-6}$
RADAR a microonde	10^{10}	$3 \cdot 10^{-2}$	$4.12 \cdot 10^{-5}$
Onde millimetriche	$3 \cdot 10^{11}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1.24 \cdot 10^{-3}$
Luce visibile	$6 \cdot 10^{14}$	$5 \cdot 10^{-7}$	2.47
UV ionizzanti	10^{16}	$3 \cdot 10^{-8}$	41.2
Raggi X soft	10^{18}	$3 \cdot 10^{-10}$	4120
Raggi X penetranti	10^{20}	$3 \cdot 10^{-12}$	$4.12 \cdot 10^6$

Ionizzazione: estrazione di un elettrone dall'orbita più esterna dell'atomo
Potenziale di ionizzazione = 10 eV

Idrogeno = 13.6 eV

Sodio gassoso = 5.1 eV

Non sempre si è in presenza di radiazione (campi statici, correnti, quasi statici, ELF)
per questa ragione si parla di **Interazione Bioelettromagnetica**

Meccanismi di interazione

- Meccanismo di interazione per effetti termici: Sistema termoregolazione e soluzione termica
- Meccanismi di interazione per effetti non termici: Meccanismi biofisici e meccanismi su modelli fisiologici

Il campo elettromagnetico

$$\nabla \times \mathbf{E}(t) = -\frac{\partial \mathbf{B}(t)}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{H}(t) = \frac{\partial \mathbf{D}(t)}{\partial t} + \mathbf{J}(t)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D}(t) = \rho(t)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B}(t) = 0$$

$$\mathbf{D}(t) = \epsilon \mathbf{E}(t)$$

$$\mathbf{B}(t) = \mu \mathbf{H}(t)$$

$$\mathbf{J}(t) = \sigma \mathbf{E}(t)$$

\mathbf{E} campo elettrico [volt/m]

\mathbf{B} flusso magnetico [weber/m²]

\mathbf{H} campo magnetico [ampere/m]

\mathbf{D} densità di spostamento elettrico [coulomb/m²]

\mathbf{J} densità di corrente elettrica [ampere/m²]

ρ densità di carica elettrica [coulomb/m³]

ϵ Permittività dielettrica [Farad/m]

μ Permittività magnetica [H/m]

σ Conducibilità elettrica [S/m]

Azioni su particelle elementari

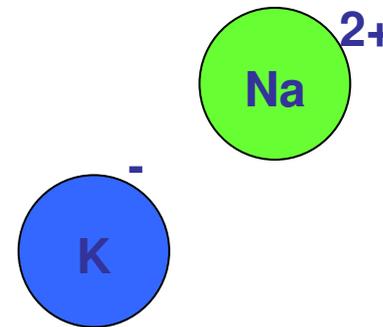
Interazioni con monopoli (ioni):

$$\begin{cases} \mathbf{F} = q\mathbf{E} \\ \mathbf{F} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \end{cases}$$

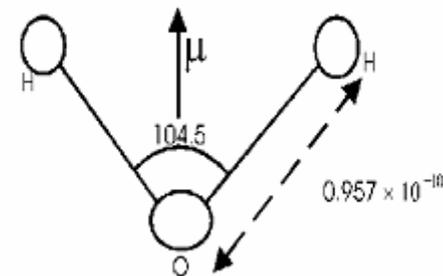
Interazioni con dipoli (molecole):

$$\begin{cases} \mathbf{T} = \mathbf{m}_e \times \mathbf{E} \\ \mathbf{T} = \mathbf{m}_m \times \mathbf{B} \\ \mathbf{F} = \nabla(\mathbf{m}_e \cdot \mathbf{E})_{\theta=\text{costante}} \end{cases}$$

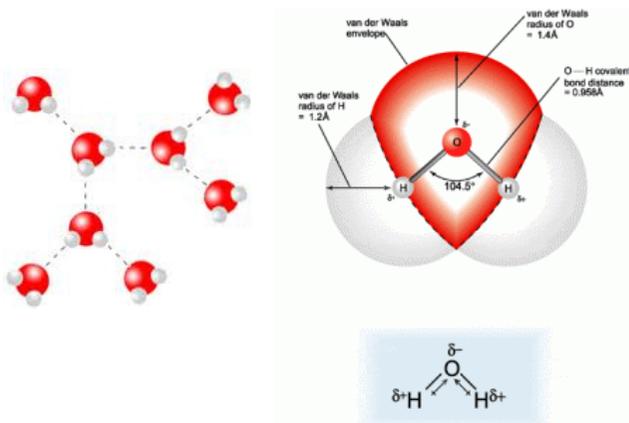
Cariche che si spostano



Cariche legate che oscillano



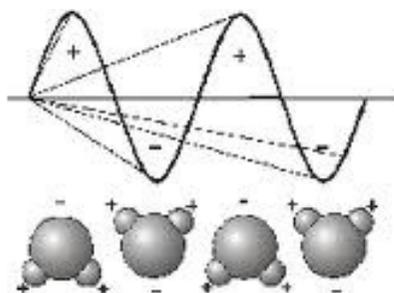
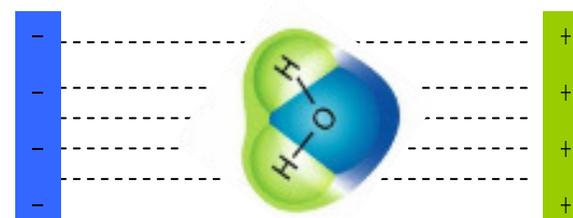
Acqua nei sistemi bio



- 97% meduse
- 65 ÷ 70% uomo
 - 84% tessuti nervosi
 - 30% tessuti adiposi

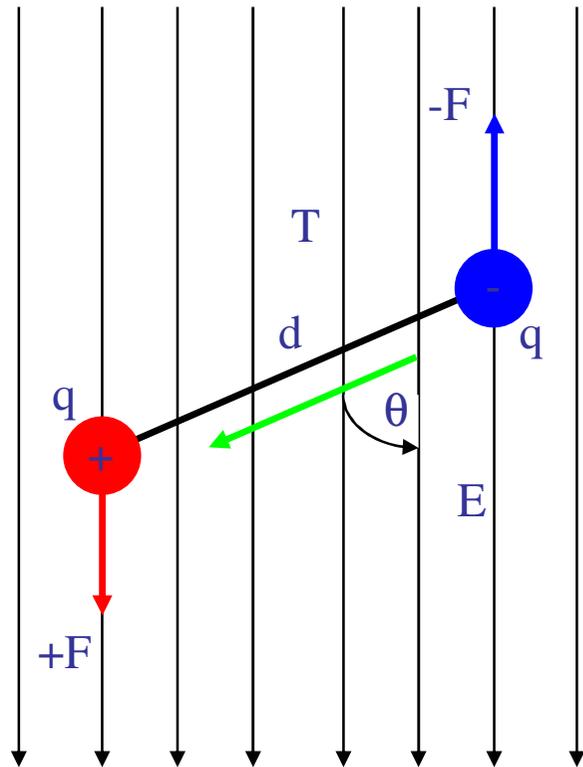
La molecola d'acqua, a causa dei legami e della sua geometria risulta una molecola polarizzata

Quando una molecola polarizzata viene immersa in un campo elettrico essa si orienta esponendo il suo terminale negativo verso il polo "+", mentre il terminale positivo punta verso il polo "-".



Se il campo elettrico viene ripetutamente invertito, la molecola d'acqua è costretta a riposizionarsi a ogni inversione del campo.

Dipolo elettrico in un campo elettrico

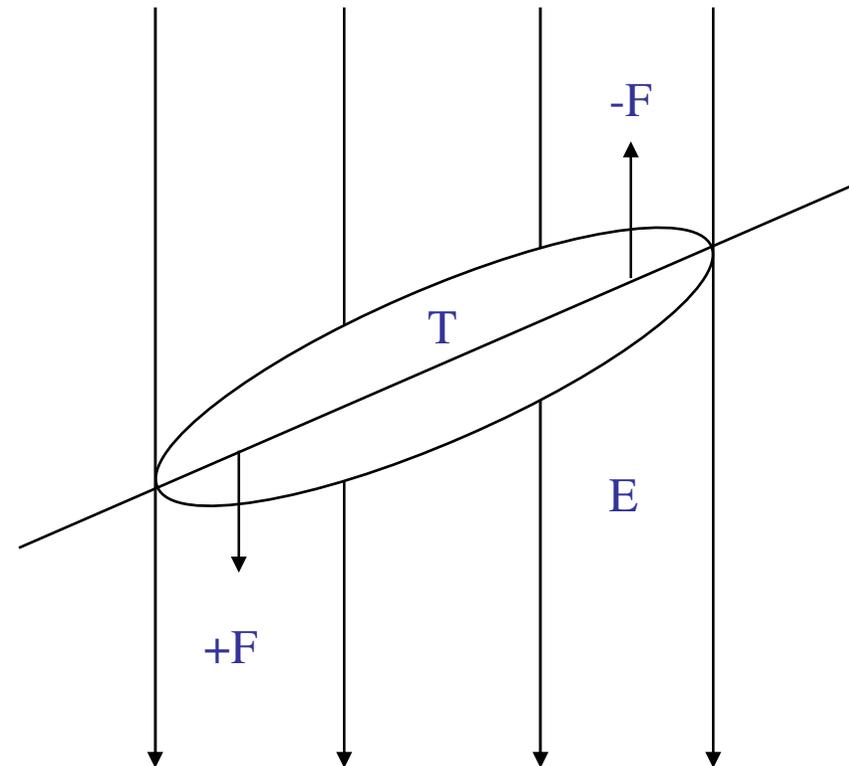
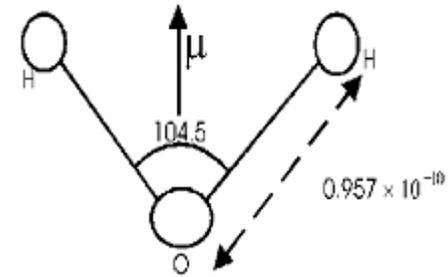


momento di dipolo
momento torcente
forza

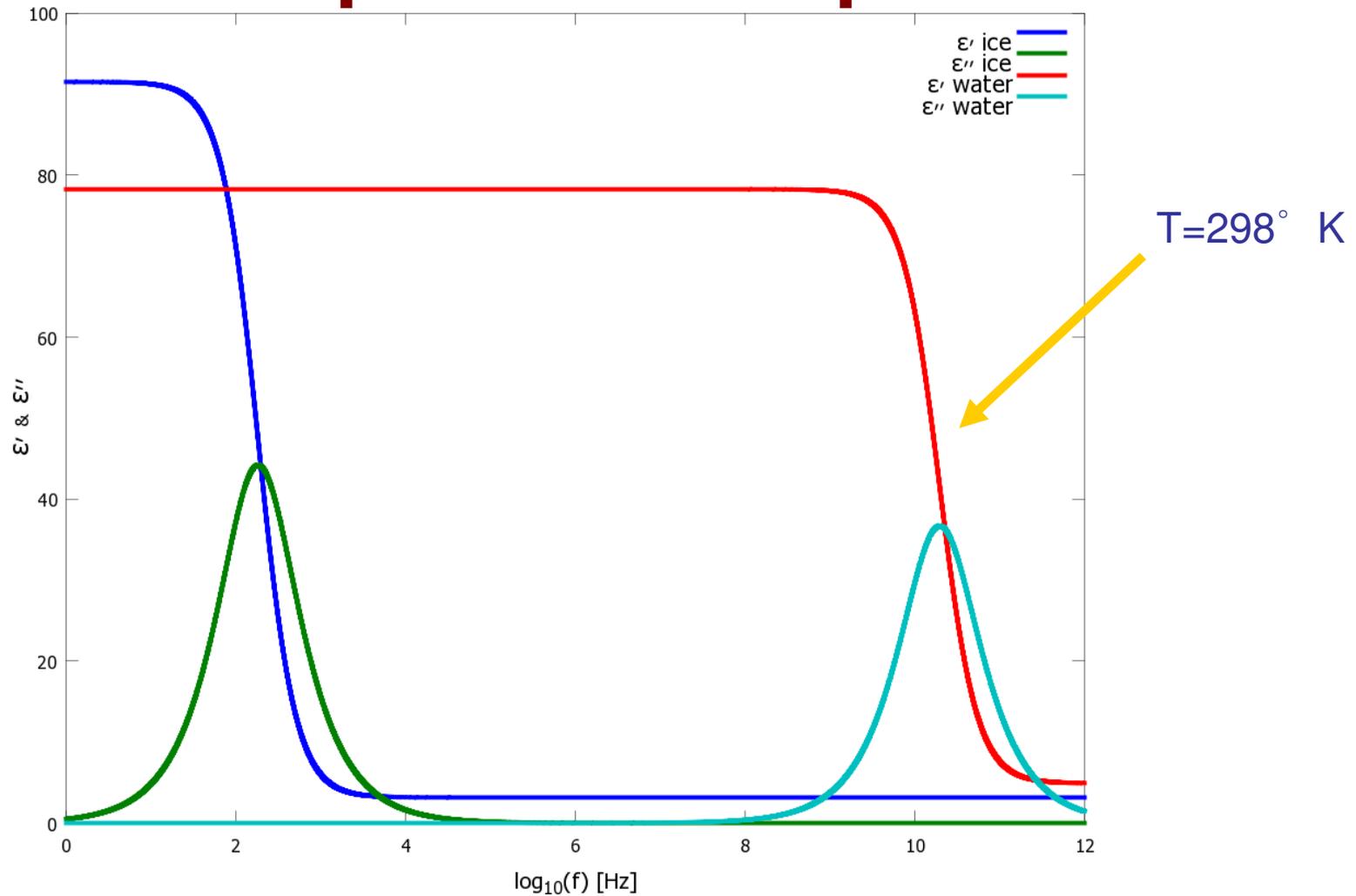
$$\mathbf{m}_e = q\mathbf{d}$$

$$\mathbf{T} = \mathbf{m}_e \times \mathbf{E}$$

$$\mathbf{F} = \nabla(\mathbf{m}_e \cdot \mathbf{E})_{\theta=\text{costante}}$$



Dipendenza della costante dielettrica dalla frequenza e temperatura

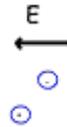


Temperatura più bassa => frequenza di rilassamento più bassa

Tessuti biologici e regioni di dispersione

Conducibilità DC

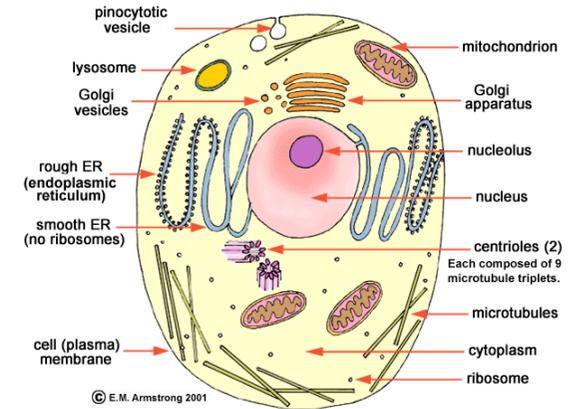
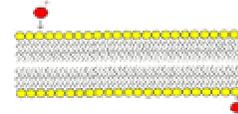
-ioni liberi



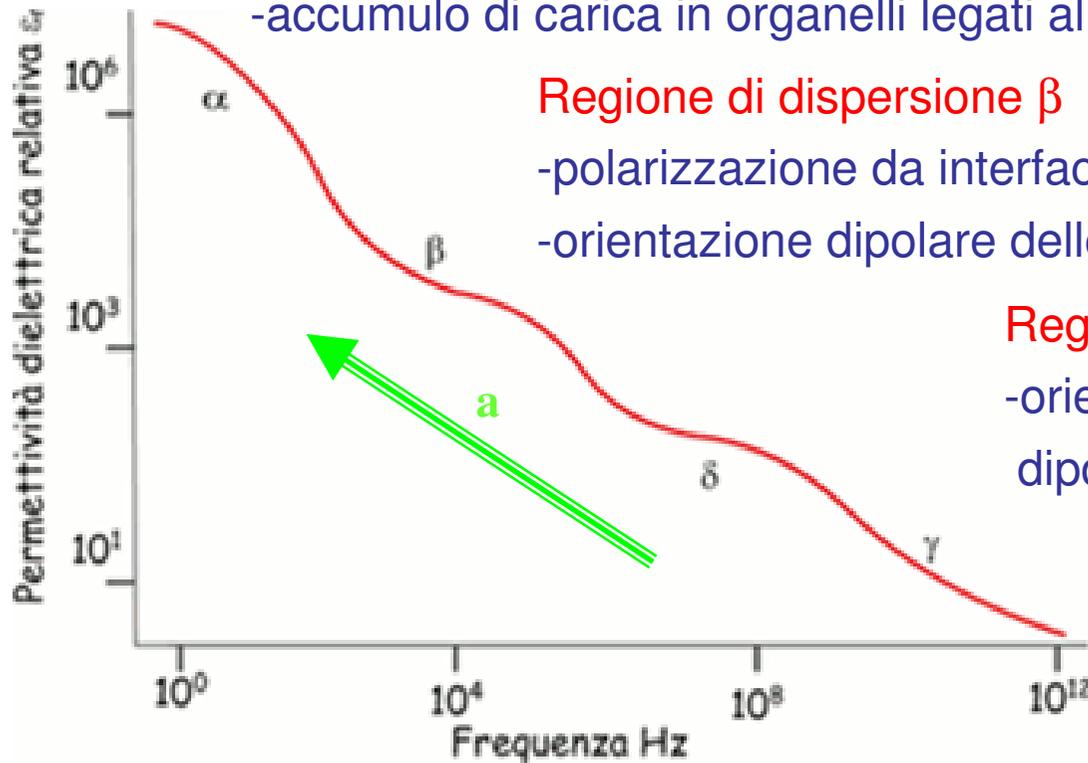
Regione di dispersione α

-polarizzazione da controioni

-accumulo di carica in organelli legati alla membrana



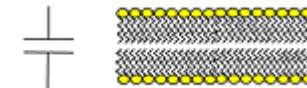
© E.M. Armstrong 2001



Regione di dispersione β

-polarizzazione da interfaccia della membrana

-orientazione dipolare delle proteine nella cellula



Regione di dispersione δ

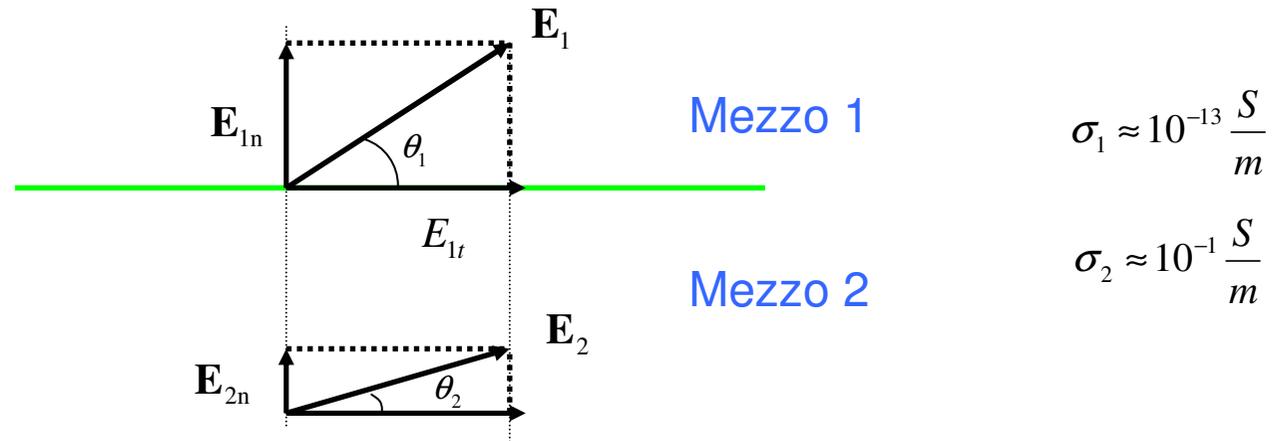
-orientazione delle molecole
dipolari dell'acqua legata



Regione di dispersione γ

-orientazione delle molecole
dipolari dell'acqua

Il mezzo biologico



$$\mathbf{E}_{1t} = \mathbf{E}_{2t}$$

$$\mathbf{D}_{1n} = \mathbf{D}_{2n}$$

$$\mathbf{J}_{1n} = \mathbf{J}_{2n}$$

$$\mathbf{B}_{1n} = \mathbf{B}_{2n}$$

$$\mathbf{H}_{1t} = \mathbf{H}_{2t}$$

$$\sigma_1 \mathbf{E}_{1n} = \sigma_2 \mathbf{E}_{2n}$$

DC, ELF e ... (frequenza < 10MHz)

Altro (frequenza > 10MHz)

All'aumentare della frequenza diventa prevalente l'assorbimento di energia nei tessuti attraverso il rapido movimento oscillatorio di ioni e molecole di acqua: a frequenze superiori a circa 10 MHz questo effetto è l'unico a permanere (**SAR**)

II SAR

- Misura della dose di campo elettromagnetico assorbito da un tessuto biologico
- La grandezza associata a questa misura è chiamata SAR: Specific Absorption Rate
- Il SAR è l'energia assorbita per unità di tempo e per unità di massa da un elemento di tessuto biologico investito da radiazione elettromagnetica (non ionizzante)

$$\text{Densità di potenza} = \mathbf{P} = \mathbf{JE} = \sigma \mathbf{EE} = \sigma \mathbf{E}^2$$

$$SAR = \frac{\text{Potenza assorbita nel volume } V}{\text{massa del volume } V} = \frac{W}{kg}$$

$$SAR = \frac{1}{\rho} \sigma \mathbf{E}^2$$

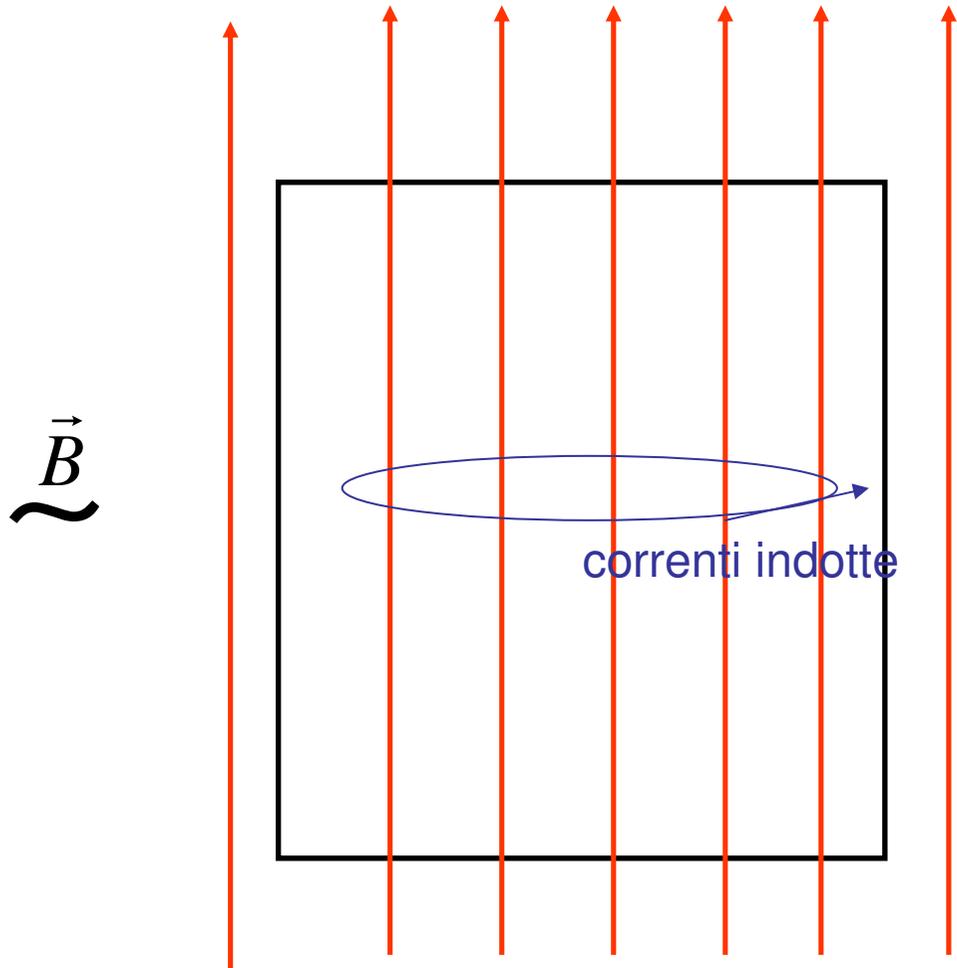
σ conducibilità del tessuto

ρ è la densità di massa del tessuto

Principali fattori che determinano la distribuzione di SAR

- Proprietà dielettriche del tessuto (ϵ and σ)
- Radiazione incidente (frequenza, f)
- Geometria
- Orientazione dell'onda

Campo magnetico



Il Campo Magnetico attraversa indisturbato un corpo non magnetico ($\mu_r \cong 1$)

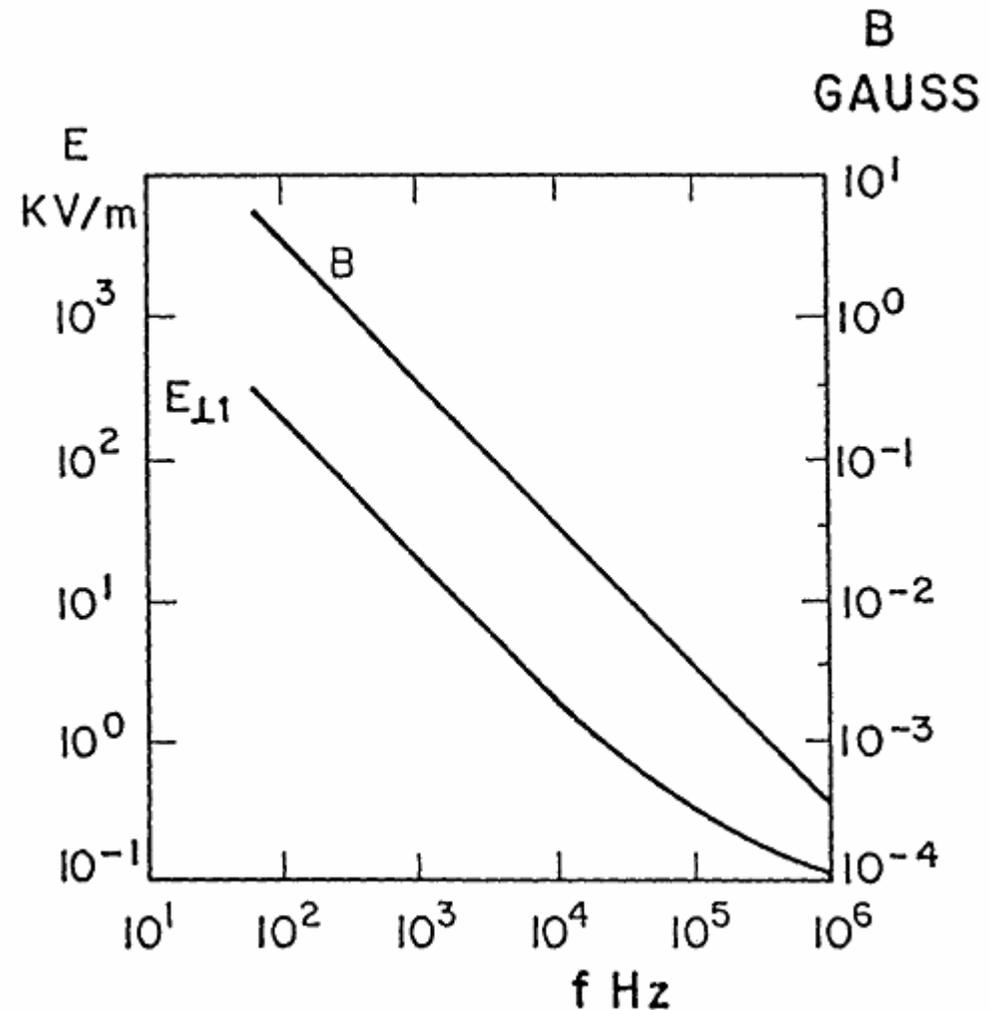
Le correnti indotte sono anche chiamate correnti parassite

Questa situazione si verifica per tutti i tessuti umani, dove $\mu_r \cong 1$

Confronto tra campo elettrico e magnetico in un mezzo biologico

Campi elettrici e magnetici **esterni** necessari per ottenere un campo elettrico **interno** di 10mV/m (conducibilità σ e permittività ϵ_r di muscolo di forma cilindrica a raggio 10 centimetri)

Nei sistemi cellulari il potenziale di trasmembrana di 10 ÷ 1000mV/m



**Progettazione caratterizzazione e
validazione dei sistemi di
esposizione**

Metodi

Soluzioni analitiche

Modello sferico

Omogeneo

Modello sferico

multistrato

Ellissoide prolato

...

Soluzioni numeriche

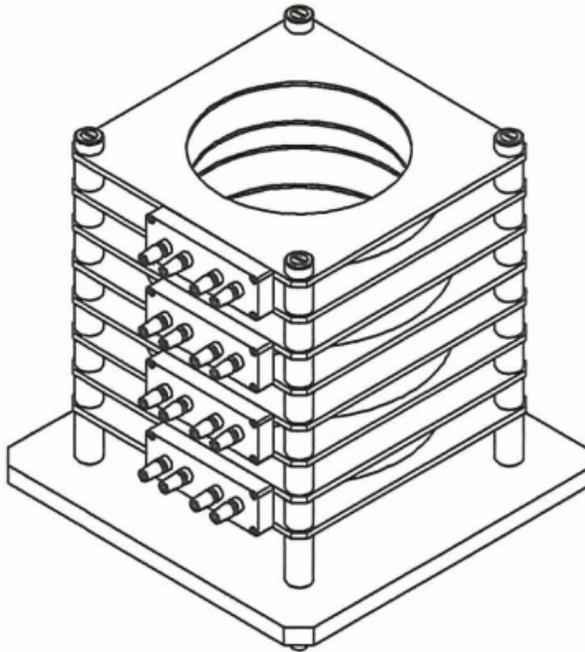
Metodo FDTD

Metodo MOM

Metodo FEM

...

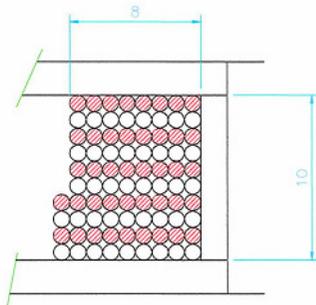
Caratterizzazione di un espositore per colture cellulari a 50 Hz



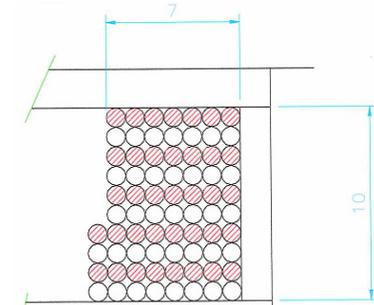
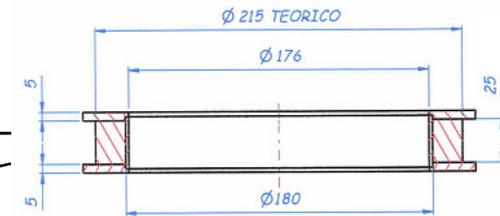
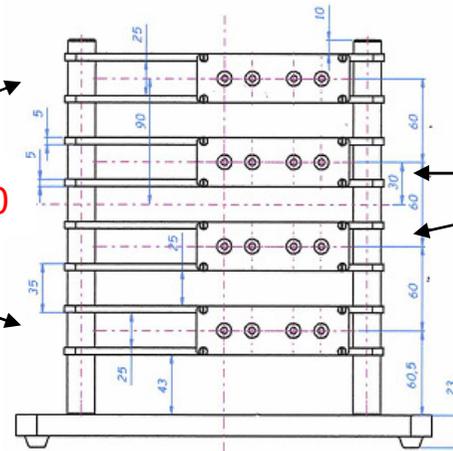
ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Prof Ferdinando Bersani
Dipartimento di Fisica
Università di Bologna, Bologna

Caratterizzazione espositore



Piano x-y = 0



Soluzione analitica

$$\vec{B}_r = \sum_{i=1}^4 \frac{\mu_0 I N_i}{2\pi} \frac{z - b_i}{r \sqrt{(a_i + r)^2 + (z - b_i)^2}} \times \left[-K(k) + \frac{a_i^2 + r^2 + (z - b_i)^2}{(a_i - r)^2 + (z - b_i)^2} E(k) \right]$$

$$\vec{B}_{\text{tot}} = \vec{B}_r + \vec{B}_z$$

$$\vec{B}_z = \sum_{i=1}^4 \frac{\mu_0 I N_i}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{(a_i + r)^2 + (z - b_i)^2}} \times \left[K(k) + \frac{(z - b_i)^2 - a_i^2 - r^2}{(a_i - r)^2 + (z - b_i)^2} E(k) \right]$$

Parametri:

$N = n^\circ$ avvolgimenti

I = corrente

a_i = raggio della bobina

b_i = distanza bobina dal piano $x-y = 0$

r = raggio del dominio di calcolo

z = altezza del dominio di calcolo

$$K(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\alpha}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \alpha}}$$

$$E(k) = \int_0^{\pi/2} \left(\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \alpha} \right) d\alpha$$

$$k \equiv \sqrt{\frac{4ra}{z^2 + (r+a)^2}}$$

Soluzione numerica

Metodo agli Elementi Finiti

- codice di calcolo: Comsol Multiphysics

Equazioni

- assumiamo corrente e campi nel caso AC per una frequenza f di 50Hz
- il potenziale vettore \mathbf{A} deve soddisfare l'equazione:

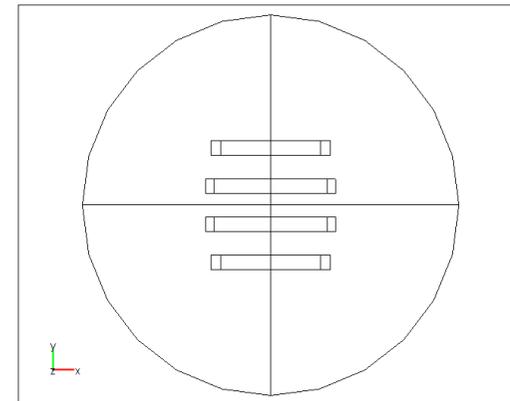
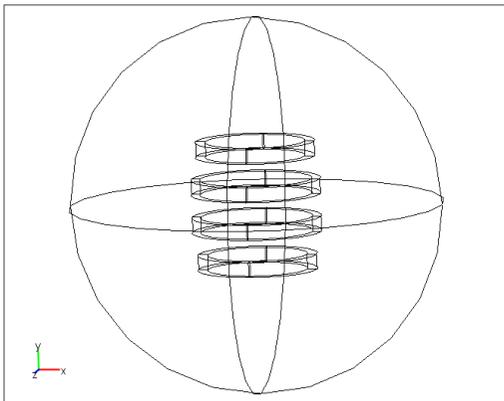
$$j\omega\sigma\mathbf{A} + \nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J}_e$$

\mathbf{J}_e è la densità di corrente applicata

Relazioni tra campo e potenziale:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$

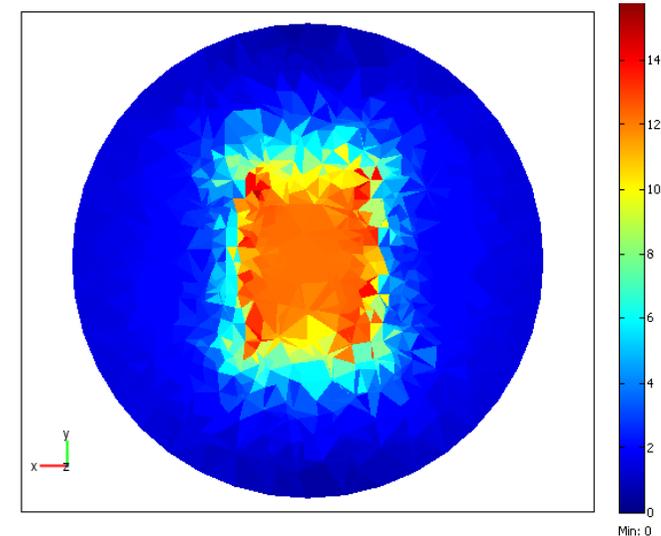
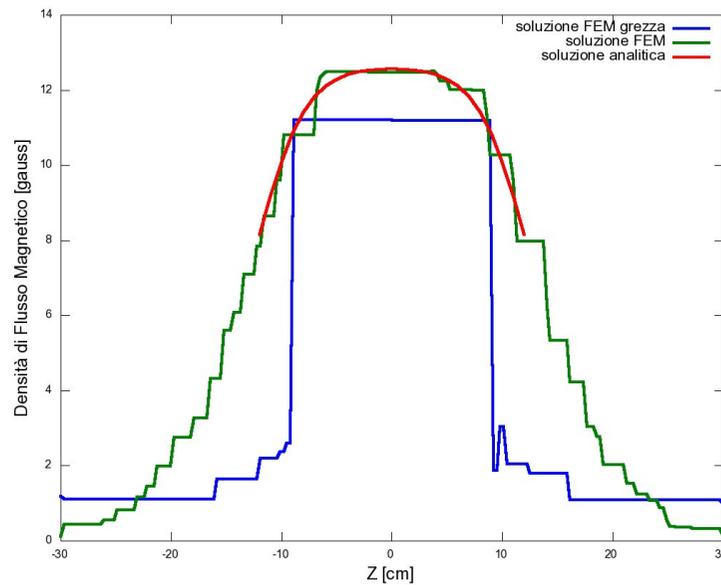
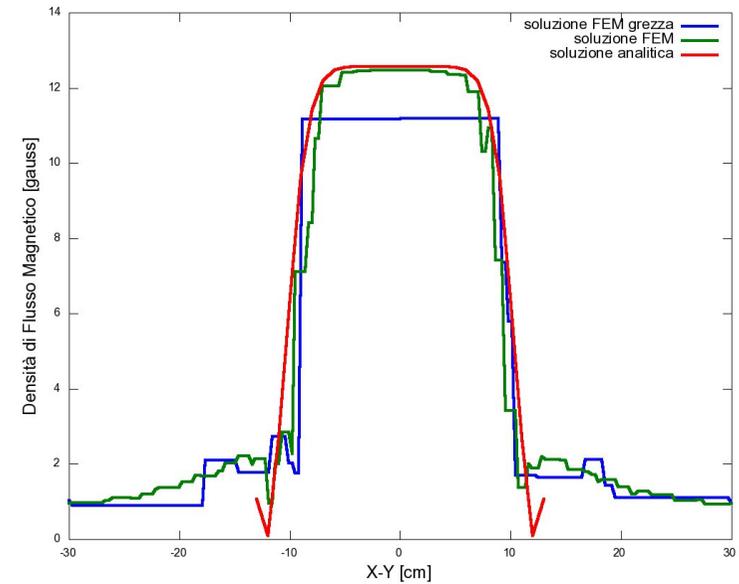
$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu}$$



Confronto soluzioni

Ogni soluzione numerica presenterà degli errori

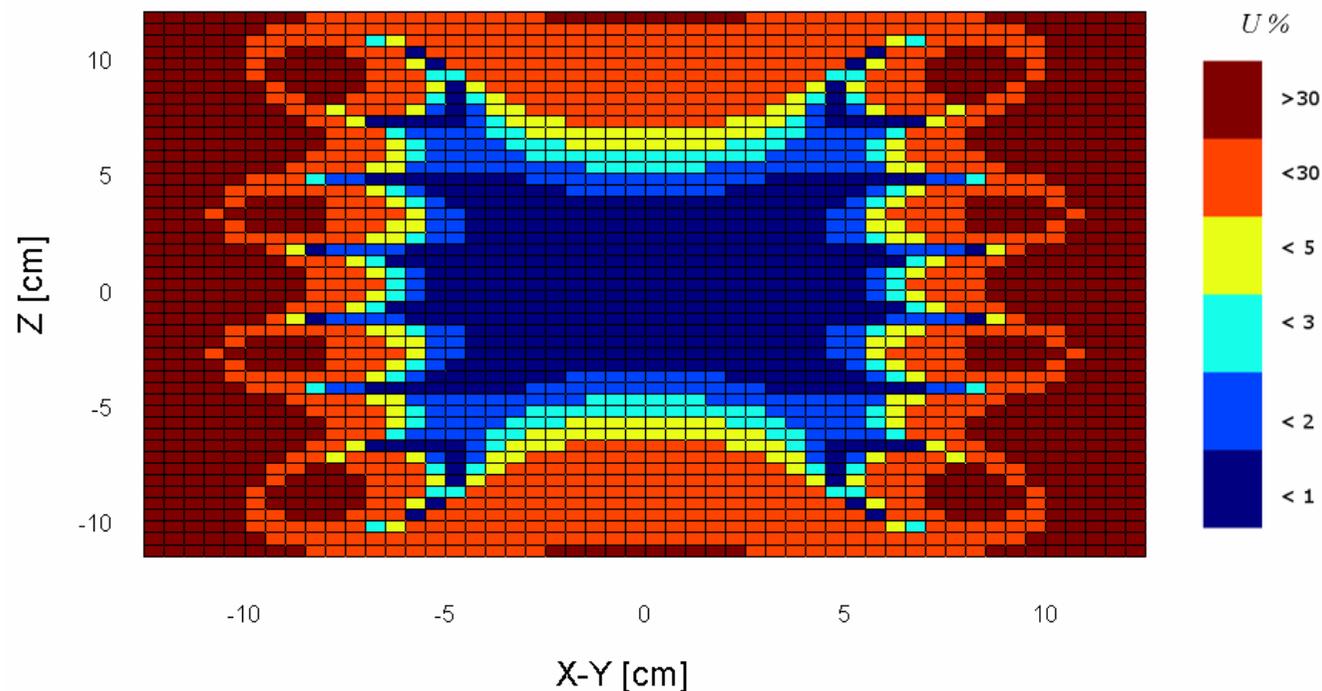
- errori del modello (approssimazione della realtà)
- errori di troncamento (dovuti alla discretizzazione)
- errori di roundoff (dovuti alla precisione finita del computer)



Uniformità del campo magnetico

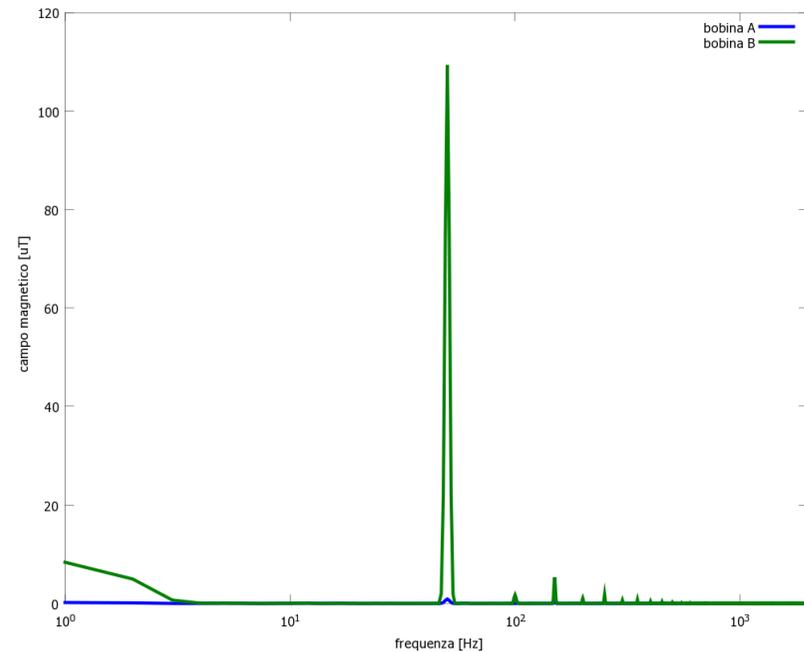
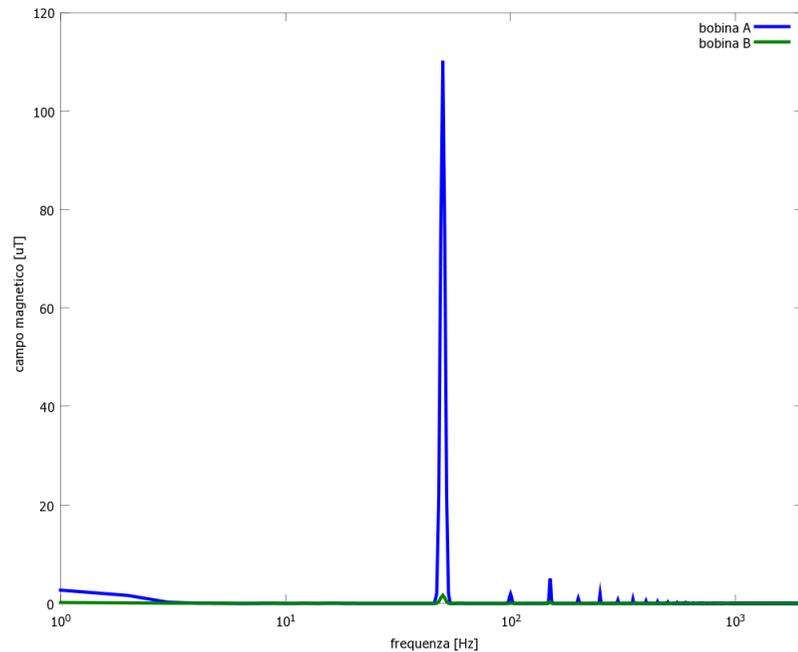
L'uniformità di campo all'interno della bobina è descritta utilizzando il campo magnetico $B_o = B_t(0,0)$ come punto di riferimento e la definizione di uniformità U come:

$$U = \frac{|B - B_o|}{B_o} \cdot 100$$



L'uniformità è migliore del 3% nell'ambito di una regione cilindrica descritta da:
 $r' = 5.5 \text{ cm}$ e $z' = 12 \text{ cm} (\pm 6 \text{ cm})$

Misure di campo



Tutti i valori di campo sono inferiori a 10μT ad eccezione dei 50Hz

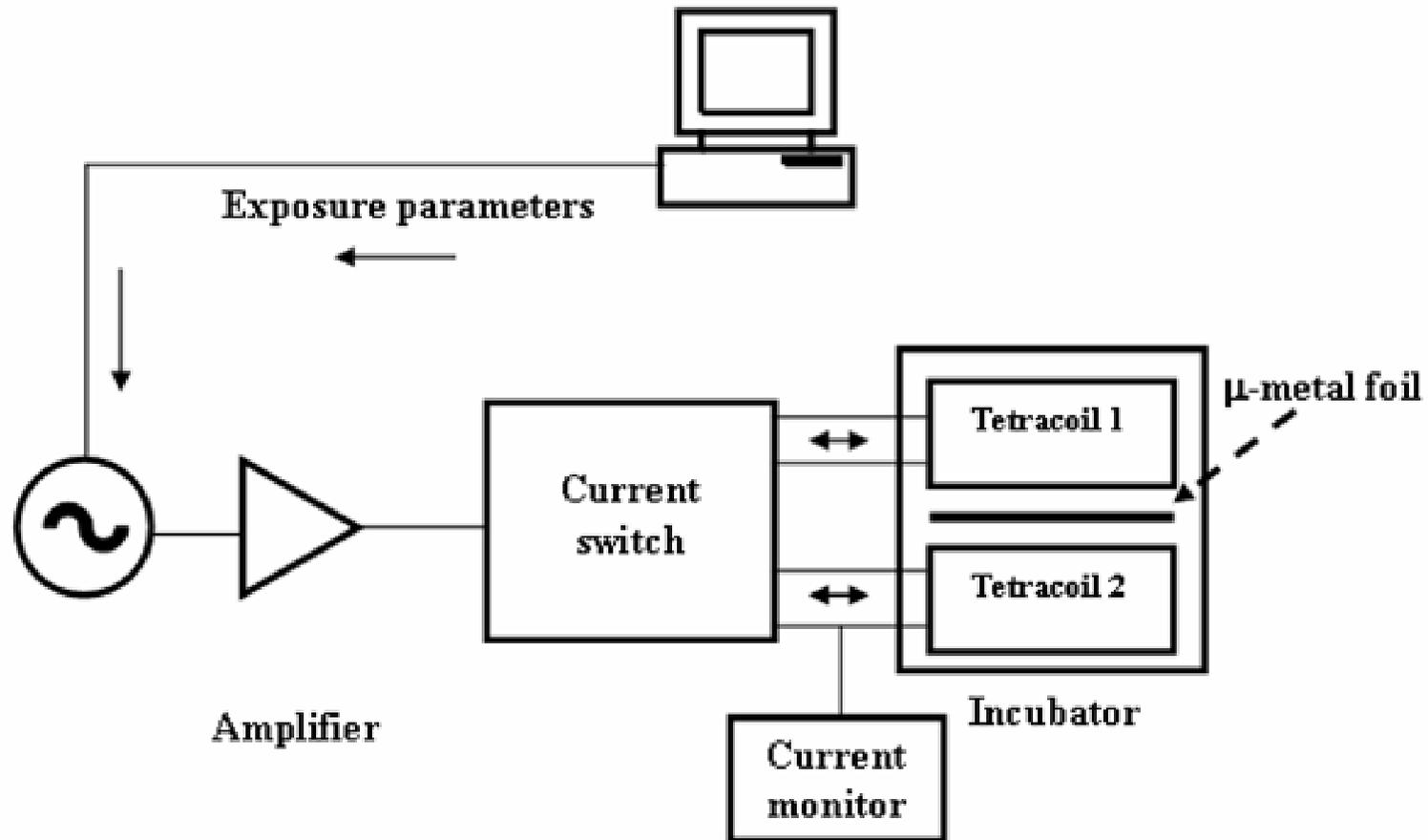
Il valori a 50Hz per la bobina A = 110.22μT

Il valori a 50Hz per la bobina B = 0.89μT

Il valori a 50Hz per la bobina B = 1.67μT

Il valori a 50Hz per la bobina A = 109.36μT

Sistema di esposizione ELF



Sistema di esposizione ELF

foglio di μ -metal



Applicazioni numeriche nella ricostruzione ossea



Ing Bruno Bisceglia

Ingegneria dell'Informazione e Ingegneria Elettrica

Prof Michele Pappalardo

Prof Nicola Cappetti

Ing Giovanni F Solitro

Ingegneria Meccanica

Università di Salerno, Fisciano (SA)



Ing Assunta De Vita,

Dipartimento di Ingegneria

Università degli Studi del Sannio, Benevento



Dr Ruggero Cadossi,

Dr Stefania Setti

Laboratorio di Biofisica Clinica

IGEA, Carpi (MO)

Metodi impiegati per favorire l'osteogenesi

❖ Corrente elettrica applicata direttamente : sistemi faradici

Lo stimolo e' una corrente continua generata da elettrodi metallici di varia natura infissi nell'osso. Valori della corrente elettrica che variano tra 2 a $20\mu\text{A}/\text{cm}^2$ sono sufficienti per stimolare la ricostruzione ossea

❖ Corrente elettrica alternata indotta da campi magnetici: sistemi induttivi

Nella stimolazione di tipo induttivo l'attivita' biologica puo' avvenire sia per mezzo di componenti magnetiche variabili nel tempo sia per mezzo del campo elettrico indotto. Il contenuto spettrale dei segnali considerati varia da poche decine a qualche centinaia di Hz.

❖ Corrente elettrica alternata indotta da campi elettrici: sistemi capacitivi

Nella stimolazione di tipo capacitivo una coppia di elettrodi vengono posti sulla superficie esterna del tessuto trattato e un campo elettrico tempo variante penetra all'interno del tessuto. La tensione applicata varia tra 1 e 10V a frequenze comprese tra 20 e 200KHz.

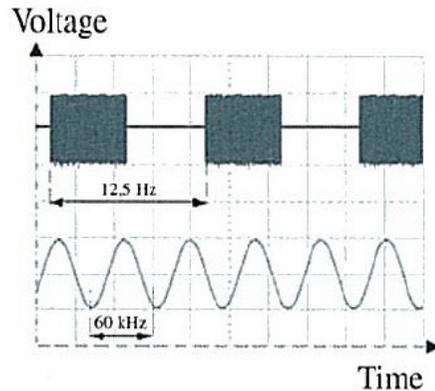
❖ Vibrazioni meccaniche indotte da ultrasuoni: sistemi ultrasonici

La vibrazione meccanica a frequenza maggiore di 20 KHz si propaga attraverso il mezzo a causa dell'interazione mutua delle particelle. La componente minerale delle ossa, in risposta ad una vibrazione di tipo meccanico, genera un segnale elettrico che favorisce l'osteogenesi.

Sistemi capacitivi

....sviluppato originariamente da Brighton et al.
(1985)¹

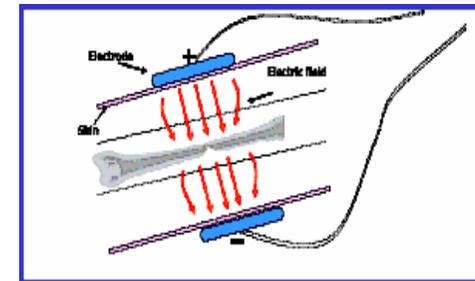
Efficacia della tecnica dimostrata su un gran numero di pazienti affetti da fratture non unite



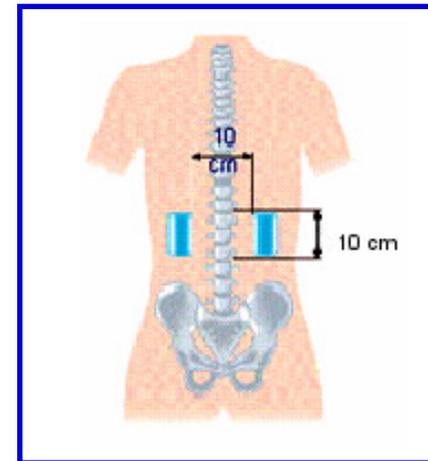
Segnale applicato agli elettrodi

Bersagli studiati:

- ❖ Avambraccio
- ❖ Rachide



Avambraccio



Rachide

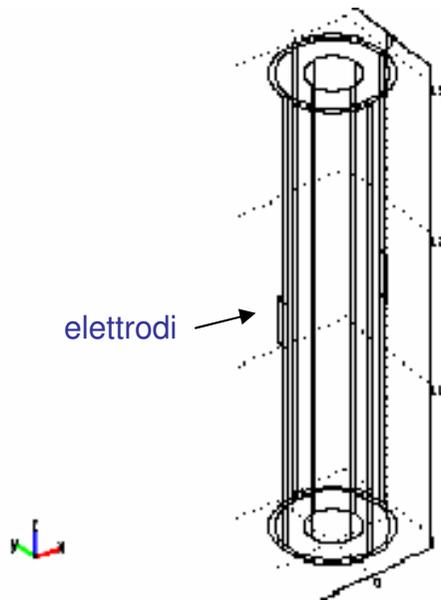
¹ Brighton et al.: *Fracture healing in the rabbit fibula when subjected to various capacitively coupled electrical fields*. J. Orthop. Res. 331-340, 1985.

Approccio numerico

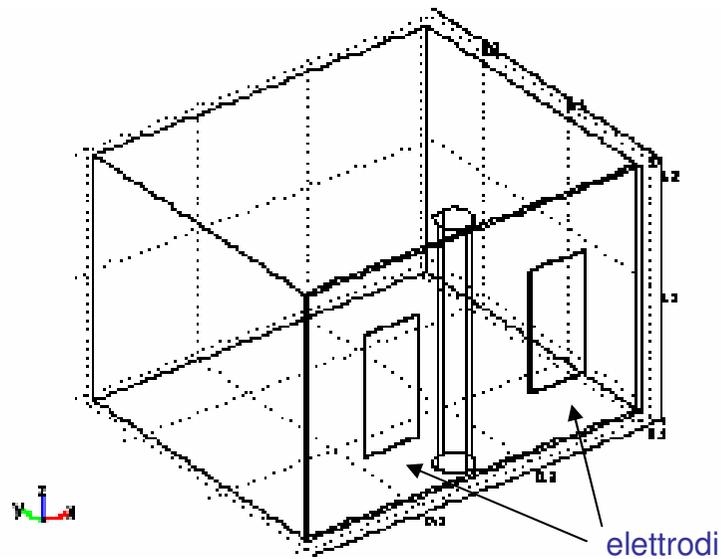
Metodo agli Elementi Finiti

- codice di calcolo: Comsol Multiphysics

Approssimazione quasi statica: $(\sigma_i + j\omega\varepsilon_i)\nabla^2\phi_i = 0$..i-esimo tessuto



Modello semplificato di avambraccio

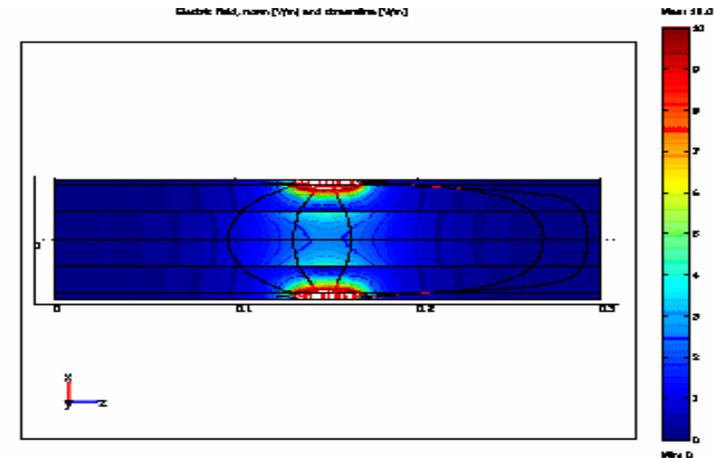
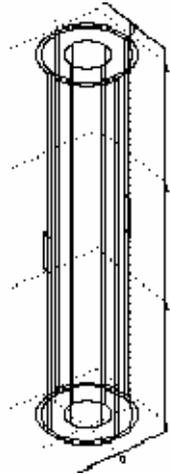


Modello semplificato di rachide

Risultati numerici

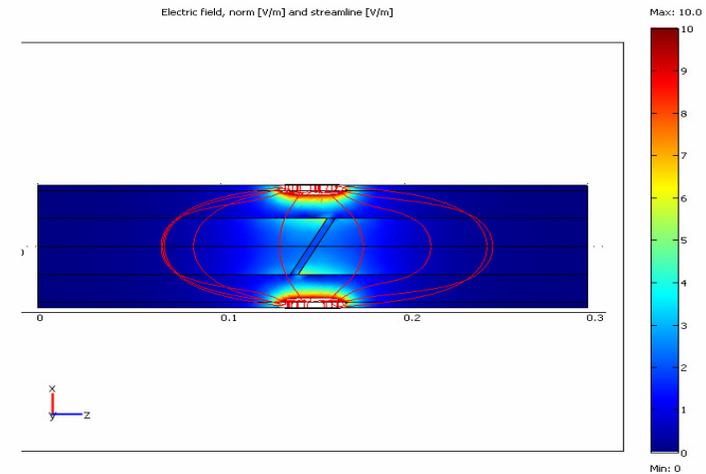
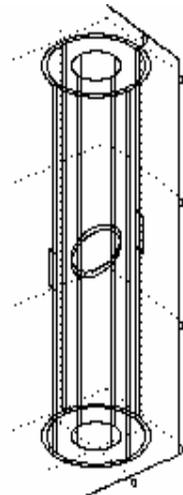
Campo elettrico [V/m] nel piano xz

	Radius [cm]	Height [cm]	σ [S/m]	ϵ_r
Skin dry	4.4 ÷ 4	30	0.00030121	1125
Muscle	4 ÷ 2	30	0.35381	9480
Electrodes (Copper)	3 × 1 × 0.08		5.998e7	1
Bone Cancellous	2 ÷ 0	30	0.083531	568
Fracture (Blood)	2 ÷ 0	0.2	0.70113	5183



Avambraccio senza frattura

	E field [V/m]		Current density [A·m ⁻²]	
	Healthy	Fractured	Healthy	Fractured
Bone Cancellous	1.17	1.10	0.10	0.09
Muscle	1.06	1.02	0.38	0.36
Skin Dry	33.39	33.36	0.13	0.13
Fracture (Blood)	4.34	3.05	0.36	2.14
Measure	0.1-10		0.005-0.5	

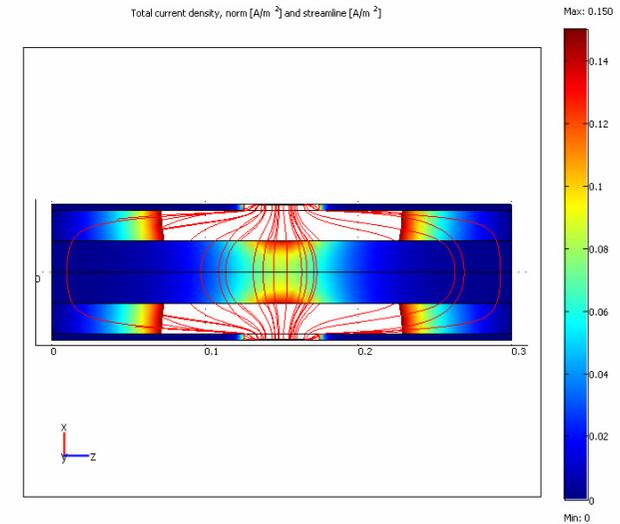
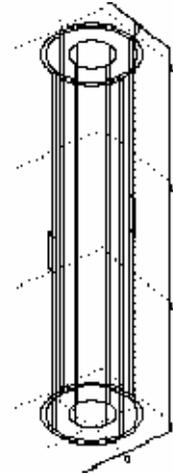


Avambraccio con frattura

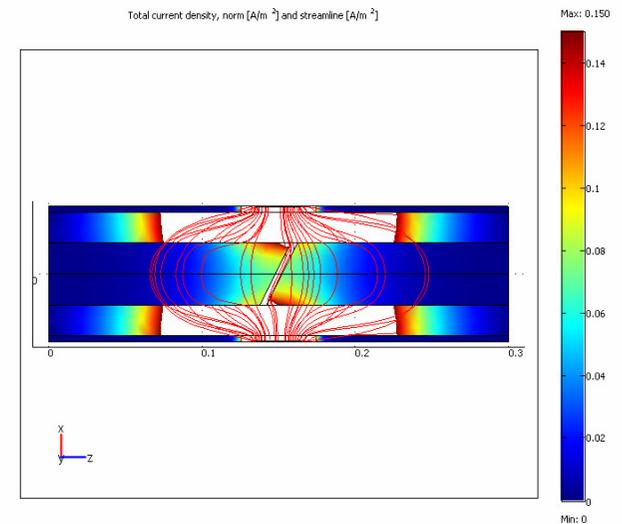
Risultati numerici

Densità di corrente [A/m²] nel xz

	Radius [cm]	Height [cm]	σ [S/m]	ϵ_r
Skin dry	4.4 ÷ 4	30	0.00030121	1125
Muscle	4 ÷ 2	30	0.35381	9480
Electrodes (Copper)	3 × 1 × 0.08		5.998e7	1
Bone Cancellous	2 ÷ 0	30	0.083531	568
Fracture (Blood)	2 ÷ 0	0.2	0.70113	

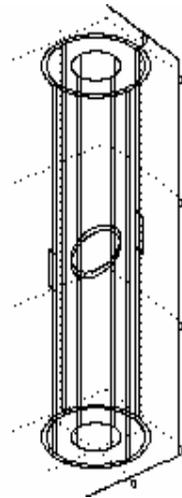


Avambraccio senza frattura



Avambraccio con frattura

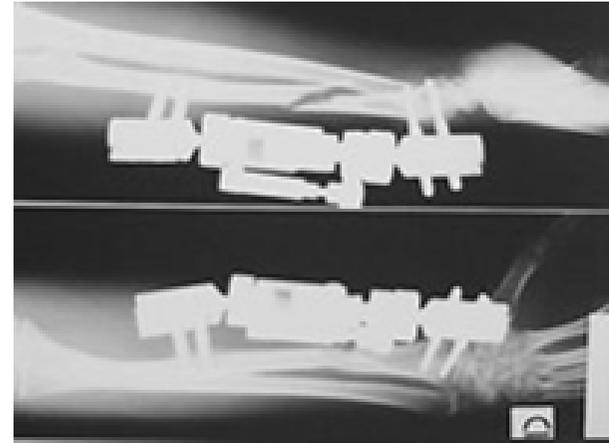
	E field [V/m]		Current density [A·m ⁻²]	
	Healthy	Fractured	Healthy	Fractured
Bone Cancellous	1.17	1.10	0.10	0.09
Muscle	1.06	1.02	0.38	0.36
Skin Dry	33.39	33.36	0.13	0.13
Fracture (Blood)	4.34	3.05	0.36	2.14
Measure	0.1-10		0.005-0.5	



Risultati clinici



Incidente stradale
Frattura chiusa



Inizio trattamento a
4 mesi dalla frattura



Rimozione fissatore esterno a 5 mesi dalla
frattura e dopo il primo mese di applicazione
(tempo totale di applicazione 2 mesi)



Guarigione radiografica a 7 mesi dalla frattura e
1 mese dalla fine dell'applicazione

Risultati numerici in progress

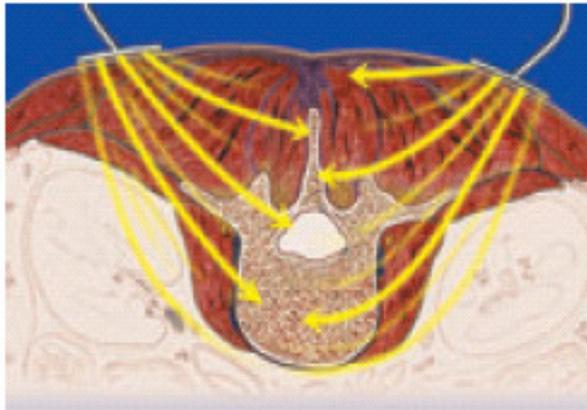
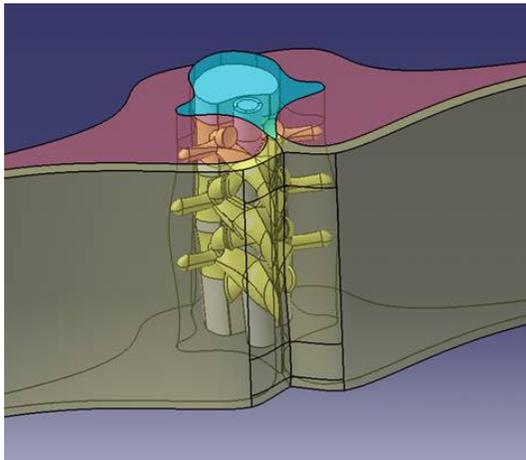
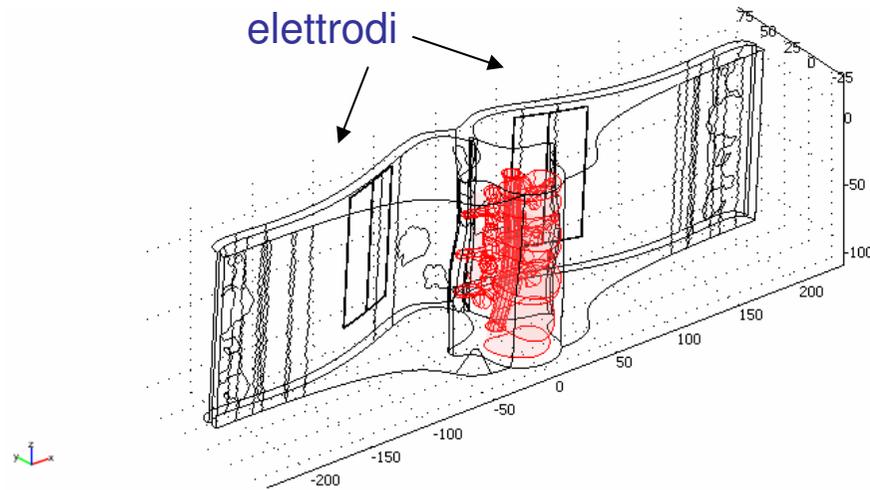


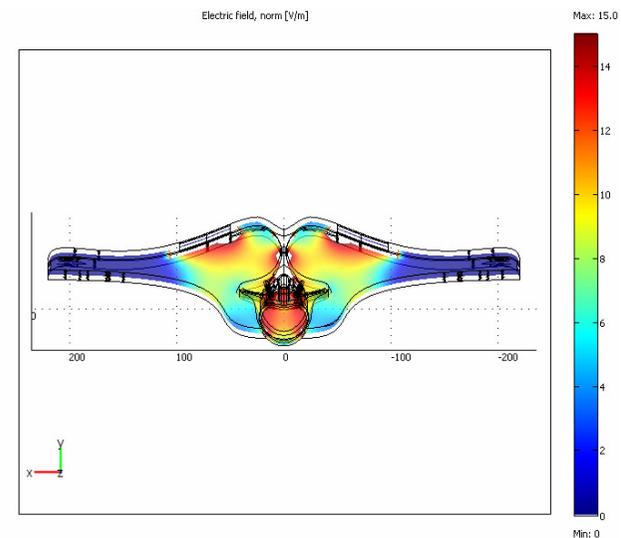
Immagine di una sezione del rachide



Modello CAD del rachide



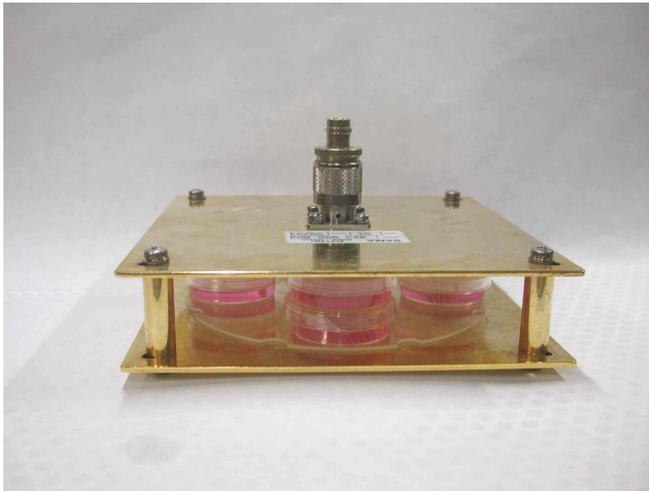
Modello del rachide in Comsol



Electric field [V/m] in the xy plane

Caratterizzazione di un espositore per colture cellulari a 900 MHz

Wire Patch Cell (WPC)



WPC a 900 MHz



Dr Giorgio A. Lovisolo

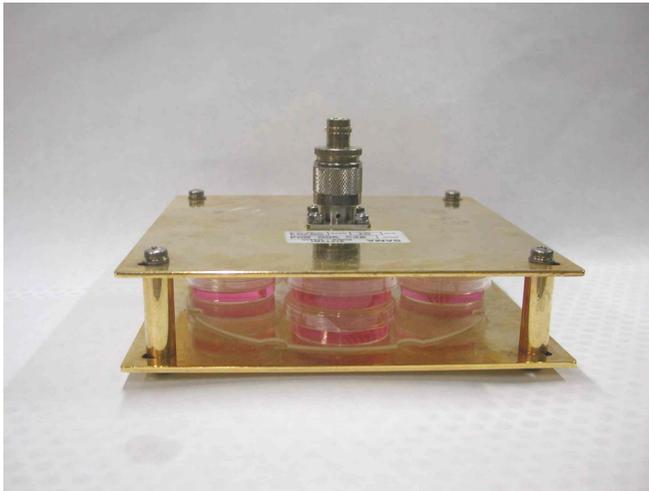
Ing Rosanna Pinto

Sezione di Tossicologia e Scienze Biomediche

ENEA-C.R.Casaccia, Roma

Espositore per colture cellulari

Wire Patch Cell (WPC)



WPC a 900 MHz

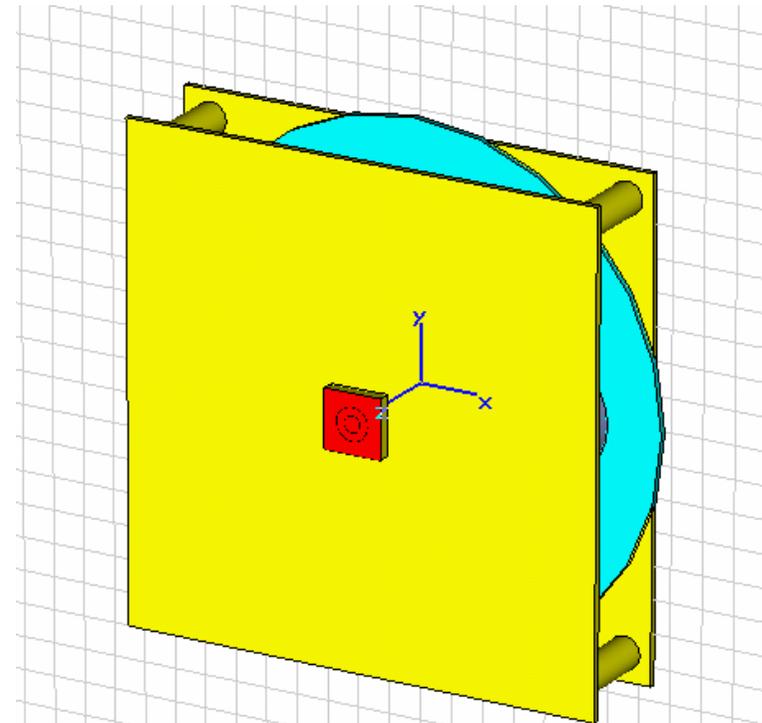
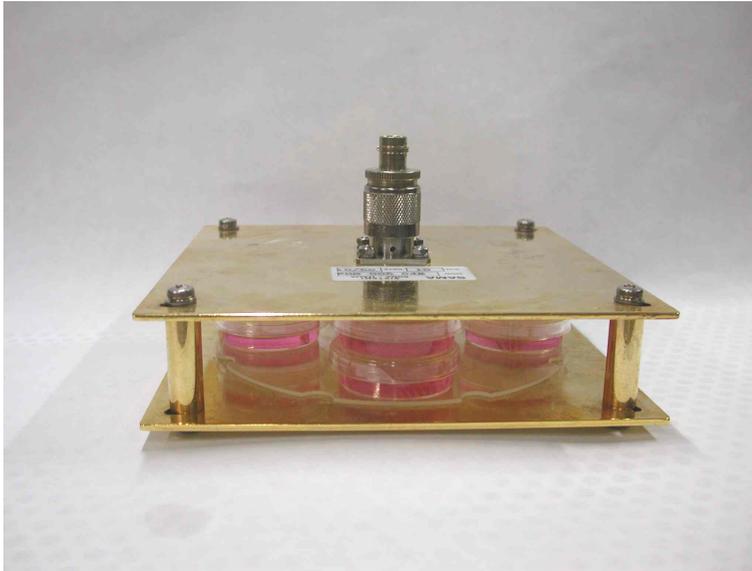
L'espositore è costituito da due piatti paralleli, cortocircuitati ai bordi da quattro distanziatori

Dimensioni (15x15x2.9cm³)

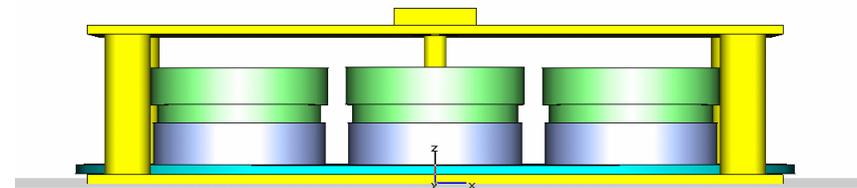
Si posiziona agevolmente in un incubatore standard dove le condizioni ambientali sono controllate

Esposizione simultanea di quattro Petri (Φ 3.4 cm) nelle stesse condizioni

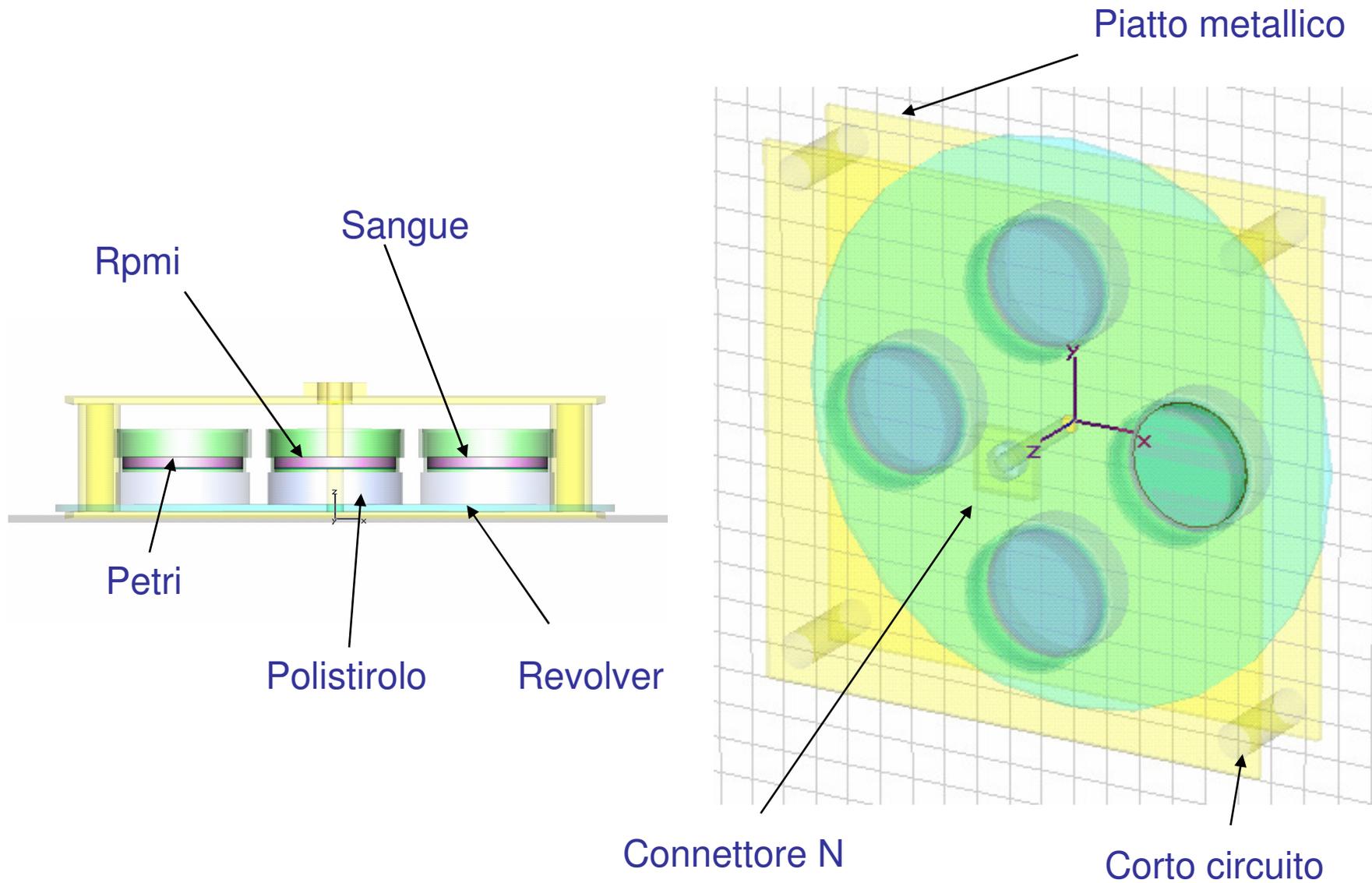
Disegno struttura



Disegno la struttura radiante in tutti i suoi componenti cercando di renderla quanto più veritiera possibile

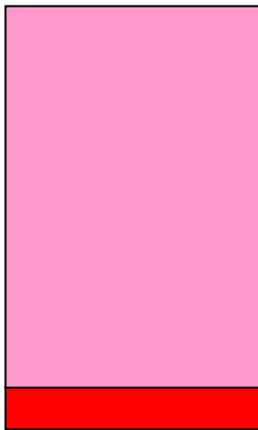


Disegno struttura



Parametri

Mezzo	ϵ_r	σ [S/m]	ρ	Volume [ml] = [cm ³]	area \times h cm ² \times cm
rpmi+fcs+lg glutamina+pha+penstrep	76	1.9	1000	2.7	9.079 \times 0.297
sangue intero: rossi, leucociti e siero	61	1.54	1060	0.3	9.079 \times 0.033
petri	2.6	0			
teflon	2.08	0			
revolver	2.6	0			
vuoto	1				
ottone		1.57e7			



3ml di mezzo biologico:

2.7 ml terreno (rpmi+fcs+lg glutamina+pha+penstrep)

0.3 ml **sangue intero**, nel tempo il sangue si stratifica, possiamo distinguere tre fasi: rossi(45%), leucociti(1%) e plasma(54%)

Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno si applicano sui 6 limiti del dominio di simulazione 3D:

X_{\min} , X_{\max} , Y_{\min} , Y_{\max} , Z_{\min} e Z_{\max})

Esempio:



Elettrico: conduttore elettrico perfetto PEC – il campo elettrico tangenziale e il flusso magnetico normale sono nulli



Magnetico: conduttore magnetico perfetto PMC – il campo magnetico tangenziale e il flusso elettrico normale sono nulli



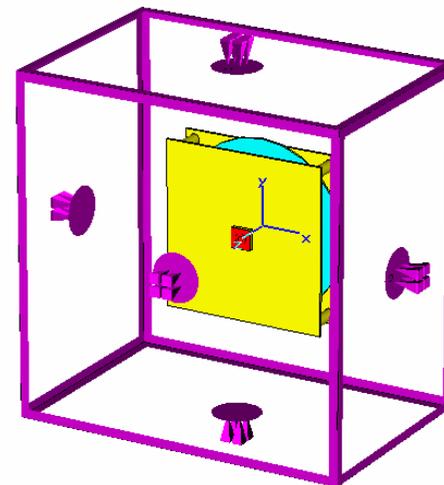
APERTO (PML): simula lo spazio libero – le onde passano questo contorno subendo una minima riflessione

Condizioni al bordo

$X_{\min} = X_{\max} \Rightarrow$ aperto

$Y_{\min} = Y_{\max} \Rightarrow$ aperto

$Z_{\min} = Z_{\max} \Rightarrow$ aperto

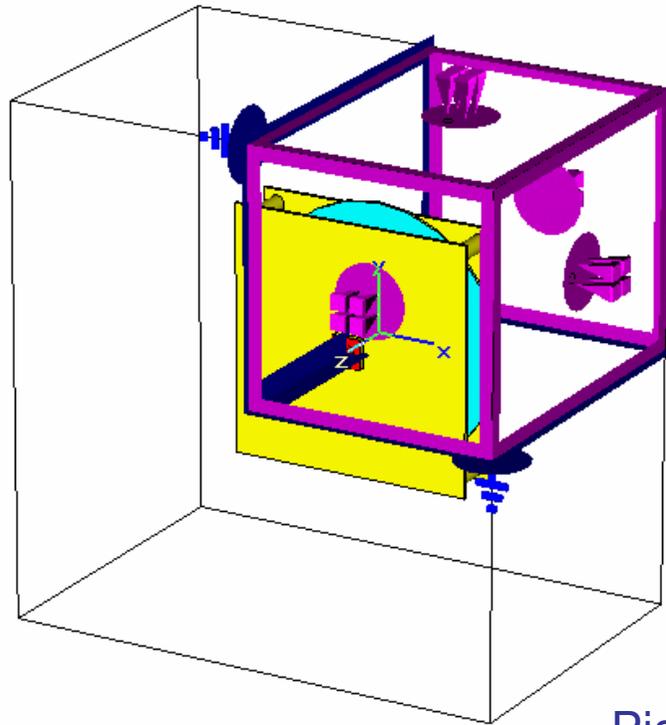


Condizioni al contorno

Se il modello è simmetrico è conveniente utilizzare i **piani di simmetria**

Per ogni piano di simmetria utilizzato si riduce il tempo di calcolo di un fattore 2

Le simmetrie possono essere elettriche o magnetiche



Condizioni al contorno

X_{\max} => aperto

Y_{\max} => aperto

Z_{\min} => aperto

Z_{\max} => aperto

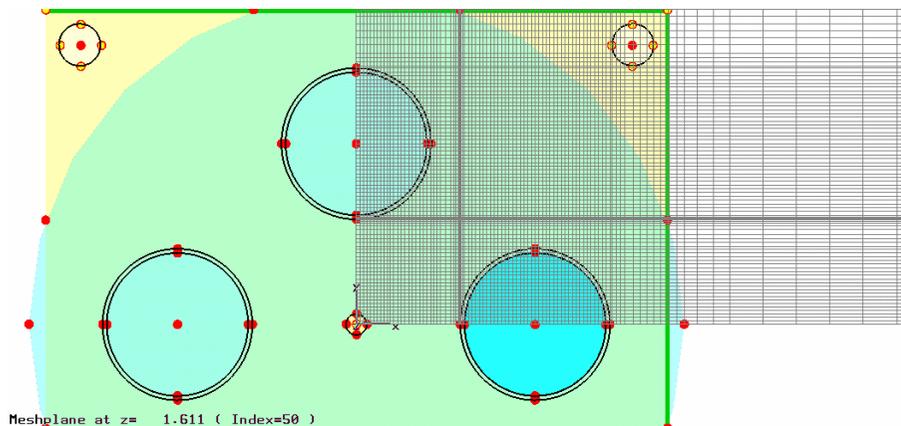
Piano XZ => magnetico ($H_t = 0$)

Piano YZ => magnetico ($H_t = 0$)

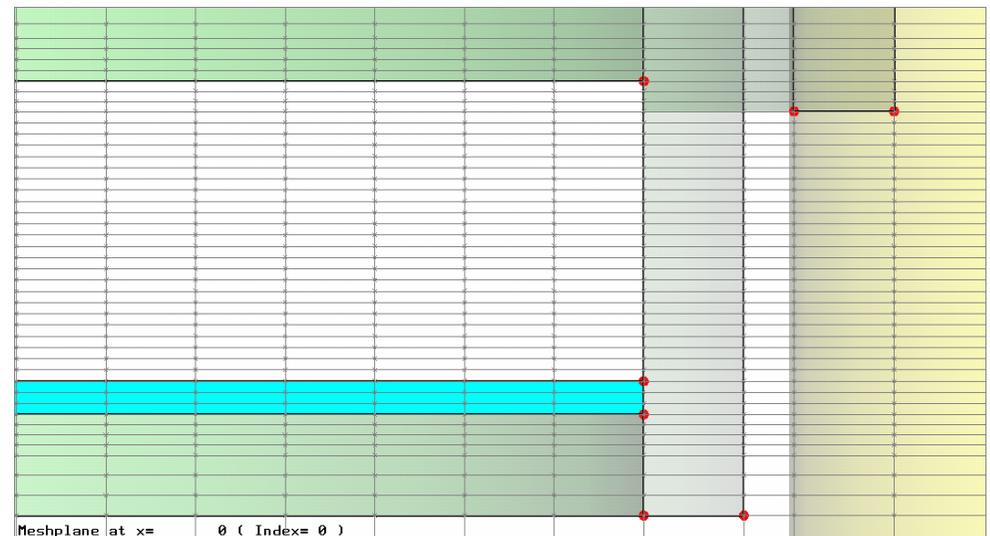
Piano XY => nessuno

Parametri della mesh

- La mia discretizzazione è pilotata dalla minima λ nel mezzo di interesse.
- Discretizzo a λ_{10} :
nel sangue intero a 900 MHz per $\epsilon_{\text{sangue}} = 67$, $\lambda = 37 \text{ mm}$ ($\lambda_{10} = 3.7 \text{ mm}$): questo è il valore minimo che possiamo utilizzare nella discretizzazione di un'elemento di interesse (sangue intero)
- Estendo il grigliato della simulazione a 2/4/6 linee di mesh dal bordo di interesse si evitano dei bruschi cambi della mesh al cambio della ϵ_r

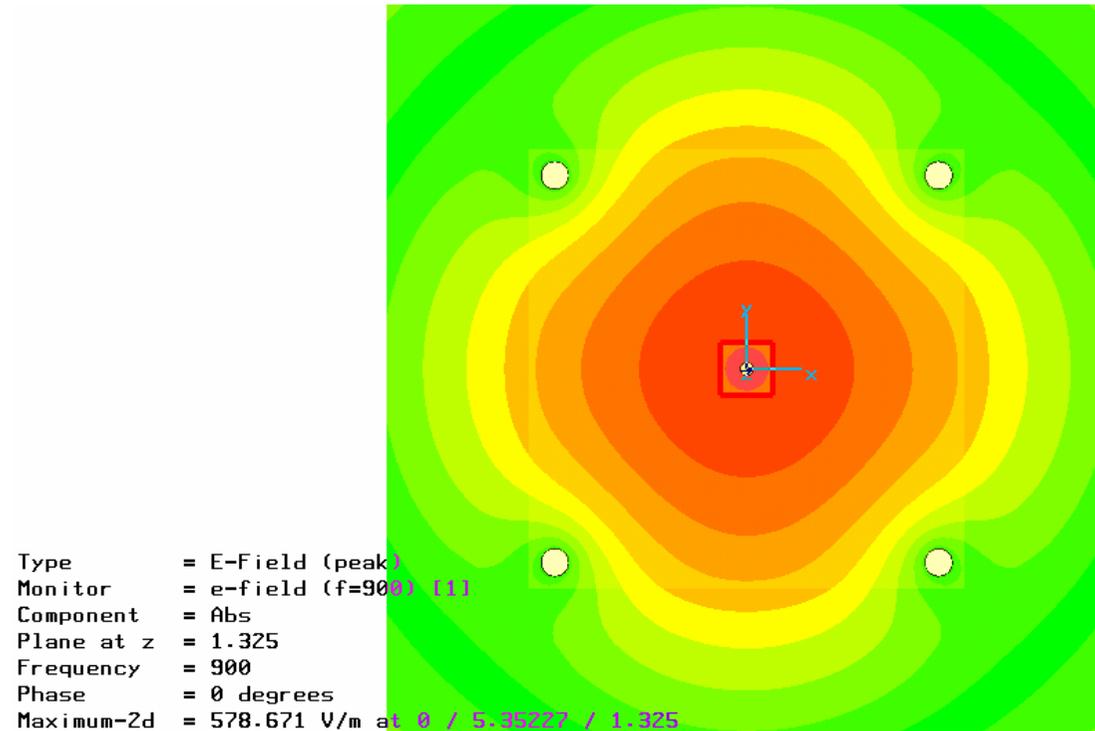


mesh nel campione biologico:
 $dx = dy = 1 \text{ mm}$
estensione del grigliato 4 mm

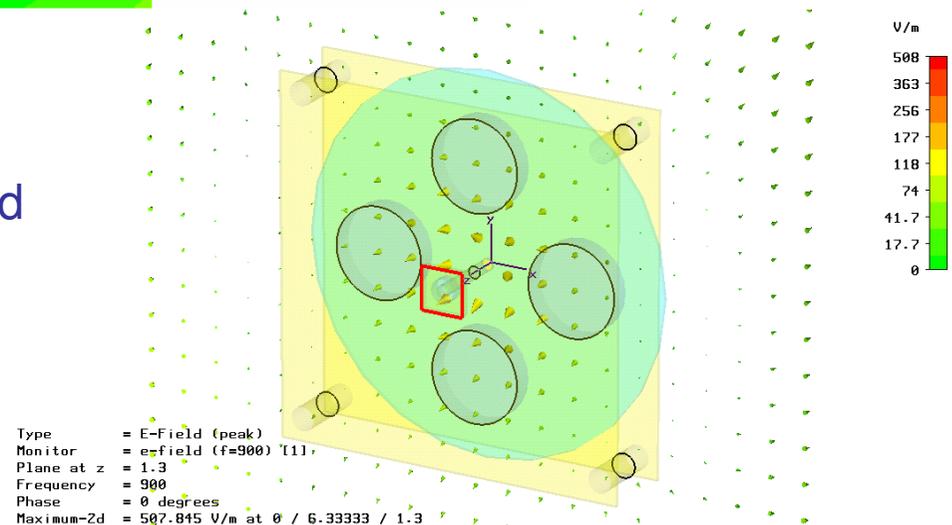


$dz = 0.1 \text{ mm}$
estensione del grigliato 0.4 mm

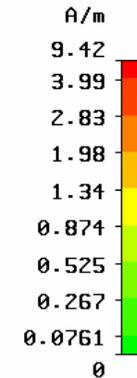
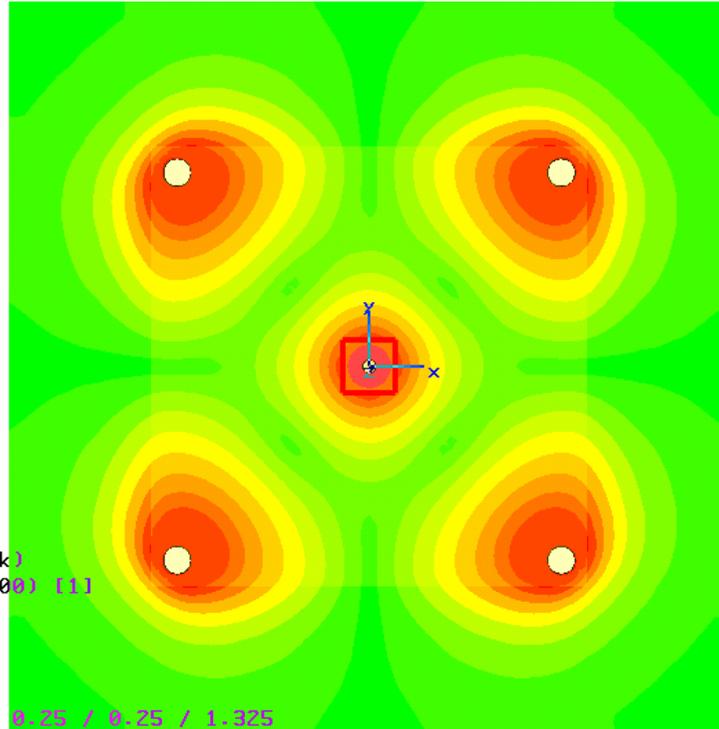
Campo Elettrico in WPC vuota



- Il campo E nel piano XY tende ad annullarsi
- Il campo E è massimo lungo l'asse z, ma tende ad annullarsi ai corto circuiti

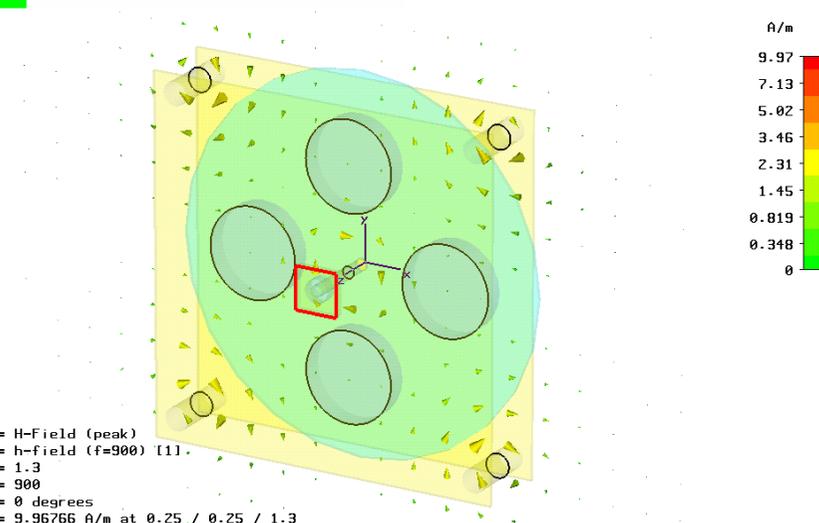


Campo Magnetico in WPC vuota



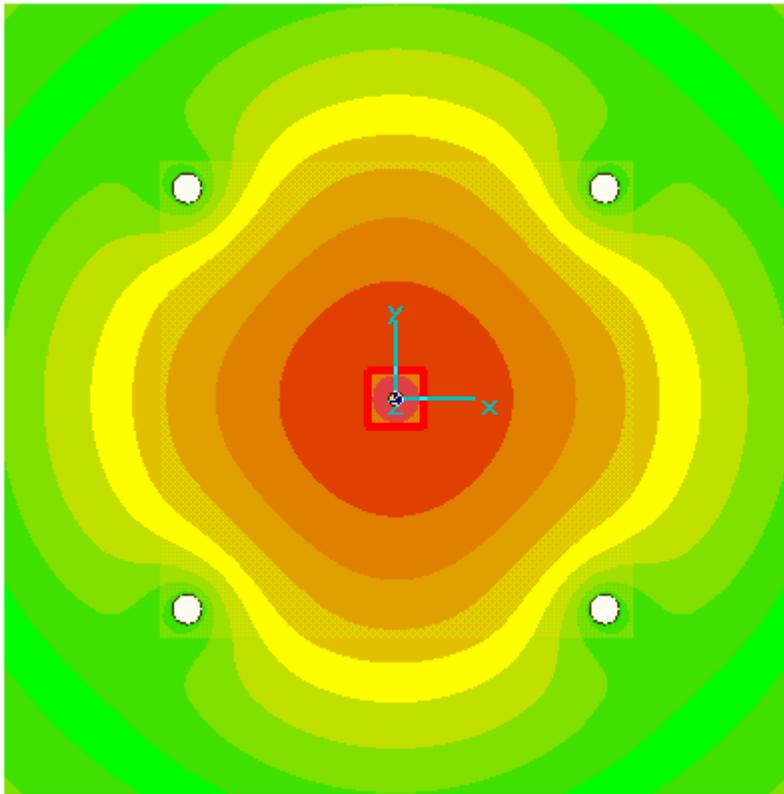
Type = H-Field (peak)
 Monitor = h-field (f=900) [1]
 Component = Abs
 Plane at z = 1.325
 Frequency = 900
 Phase = 0 degrees
 Maximum-Zd = 9.418 A/m at 0.25 / 0.25 / 1.325

- Il campo H nel piano z tende ad annullarsi
- Il campo H è massimo ai corto circuiti
- Il campo E è più elevato dove il campo H tende ad annullarsi
- Ci poniamo nelle condizioni di massimo campo E e minimo di campo H

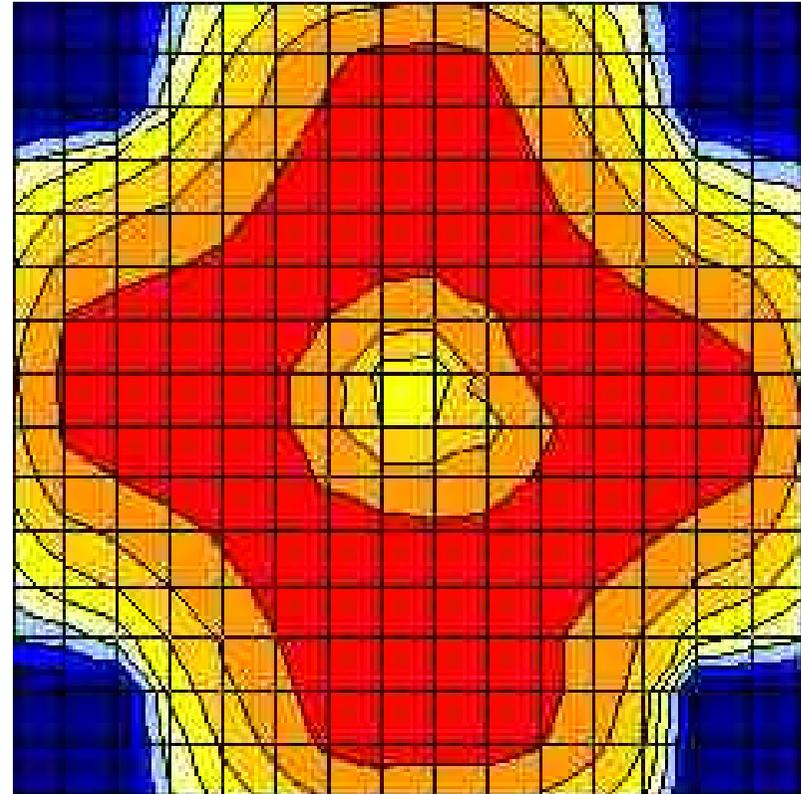


Type = H-Field (peak)
 Monitor = h-field (f=900) [1]
 Plane at z = 1.3
 Frequency = 900
 Phase = 0 degrees
 Maximum-Zd = 9.96766 A/m at 0.25 / 0.25 / 1.3

Confronto qualitativo Campo Elettrico



simulato

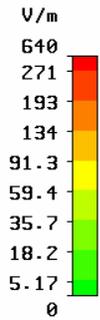
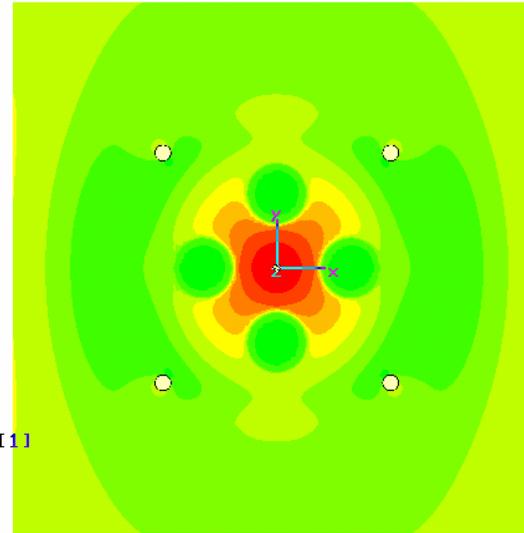


misurato

WPC carica

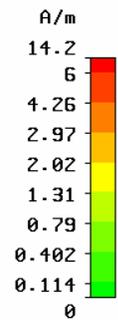
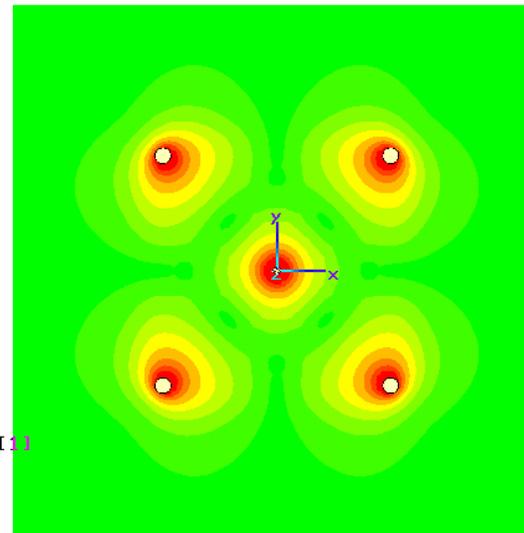
Campo Elettrico

Type = E-Field (peak)
Monitor = e-field (f=900) [1]
Component = Abs
Plane at z = 1.611
Frequency = 900
Phase = 0 degrees
Maximum-2d = 640.109 V/m at 0.0833333 / 0.25 / 1.611

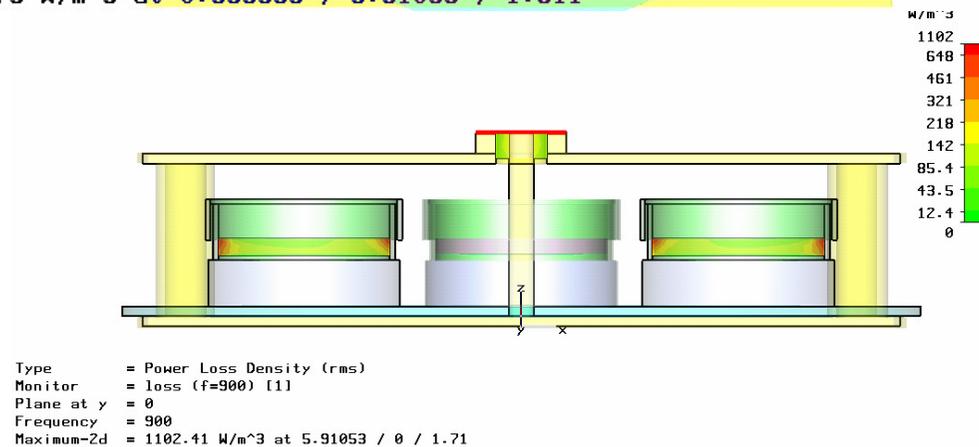
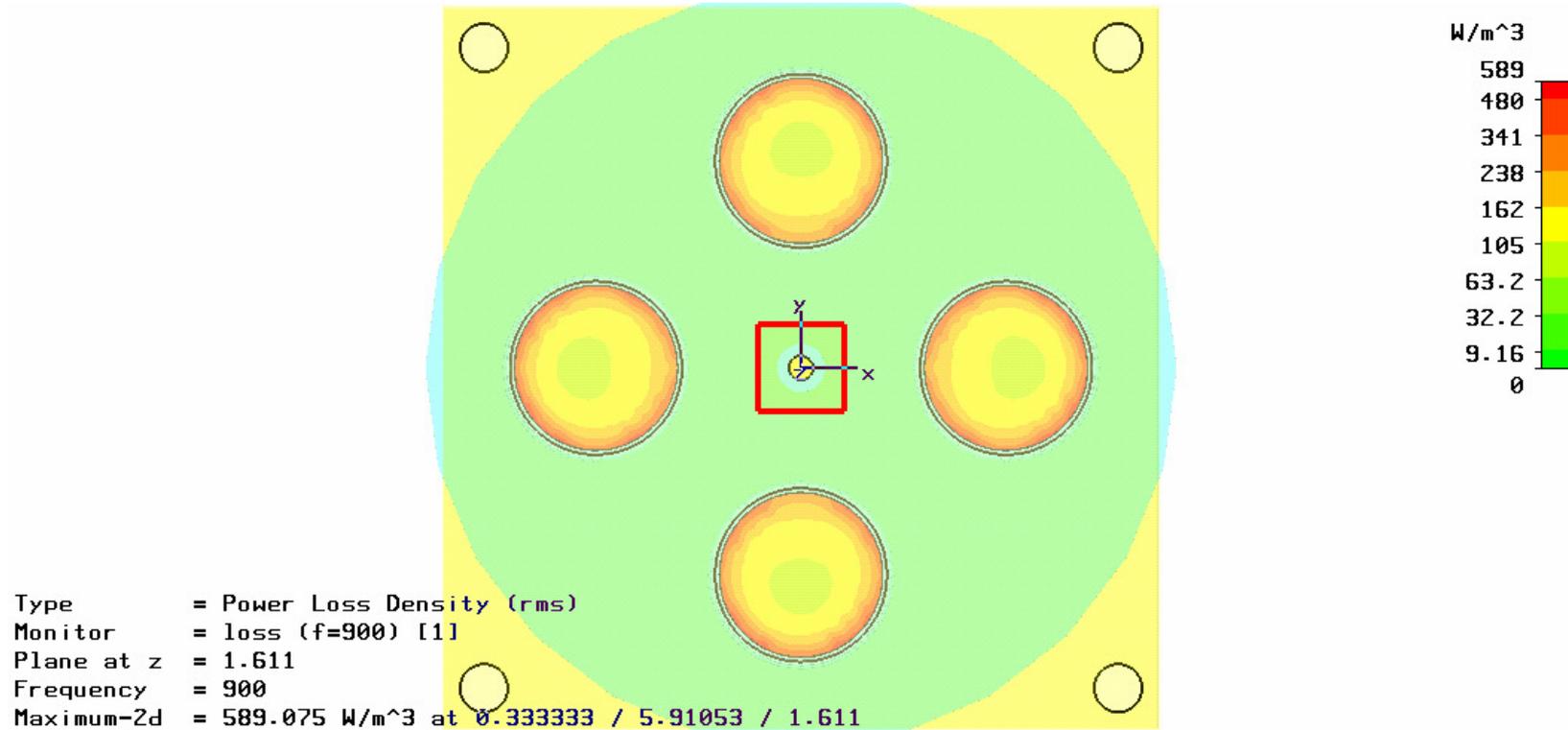


Campo Magnetico

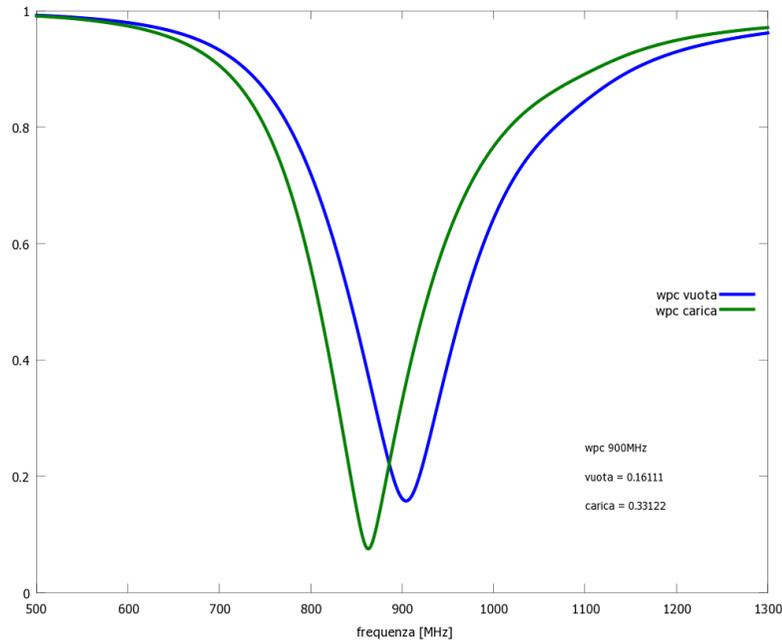
Type = H-Field (peak)
Monitor = h-field (f=900) [1]
Component = Abs
Plane at z = 1.611
Frequency = 900
Phase = 0 degrees
Maximum-2d = 14.1614 A/m at 0.166667 / 0.166667 / 1.611



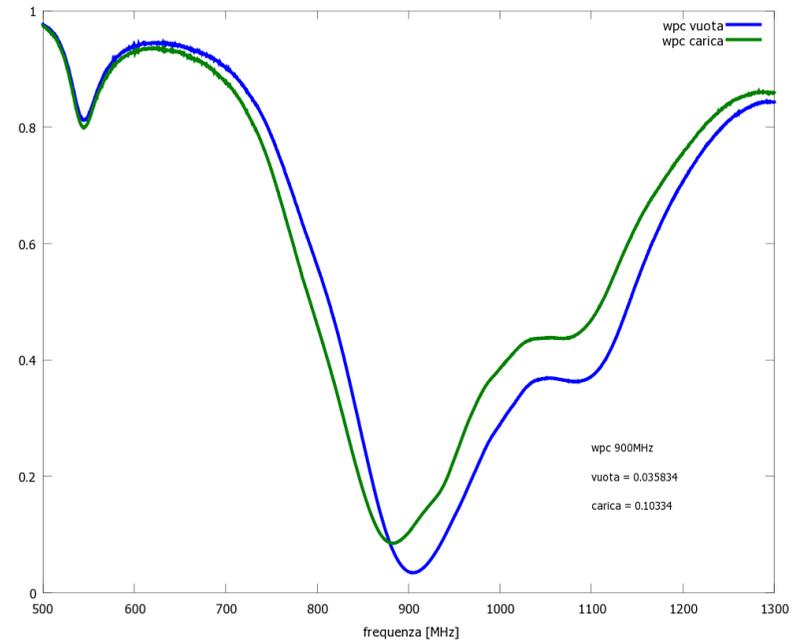
Densità di potenza assorbita



Confronto S11 WPC



simulazione



misure

Il parametro S_{11} mi serve per vedere quando ho la massima trasmissione in frequenza e quindi per calcolarmi la potenza netta spedita internamente alla struttura

$$P_{netta} = P_i - P_r = P_i \left(1 - \frac{P_r}{P_i} \right) = P_i (1 - S_{11}^2)$$

Dosimetria numerica

Effettuata la simulazione vado nel post processing e prendo in considerazione il solo campo elettrico e con questo mi calcolo il SAR

$$SAR = \frac{1}{2} \sigma \frac{E^2}{\rho}$$

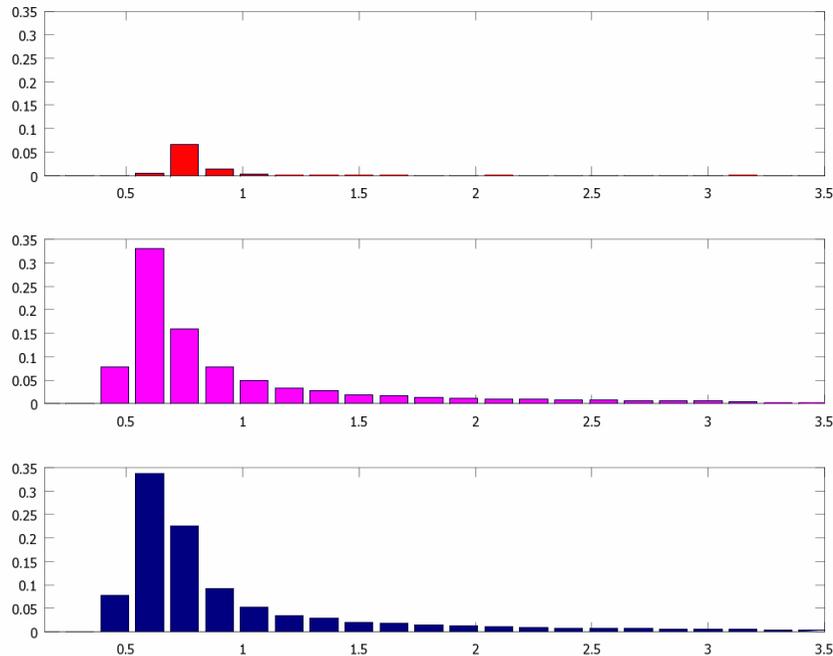
Calibro il sistema in relazione alla potenza netta unico parametro di controllo

$$\text{efficienza} = \frac{SAR_{medio}}{P_{netta}}$$

In un campione biologico stratificato mi calcolo il SAR in ogni strato e vedo quale è l'efficienza nello strato di interesse

Questa l'efficienza che utilizzo per controllare le esposizioni

Dosimetria numerica



	media	rd
sangue	0.36	0.76
rpmi	0.39	0.75
sangue + rpmi	0.38	0.75

$$P_i = 40 \text{ W}$$

$$P_{\text{netta}} = P_i \times (1 - 0.33122^2) = P_i \times 0.89029$$

$$\text{Fattore segnale GSM} = 1/8$$

$$\text{Attenuazione cavo} = -1.62 \text{ dB} = 0.83$$

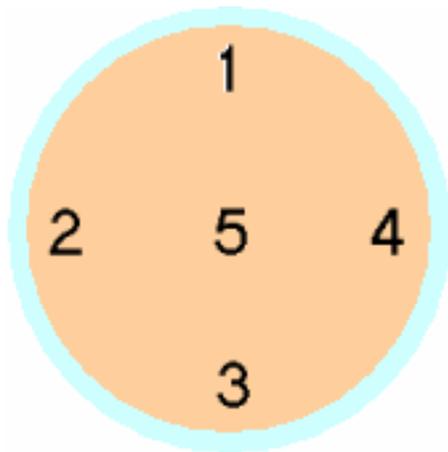
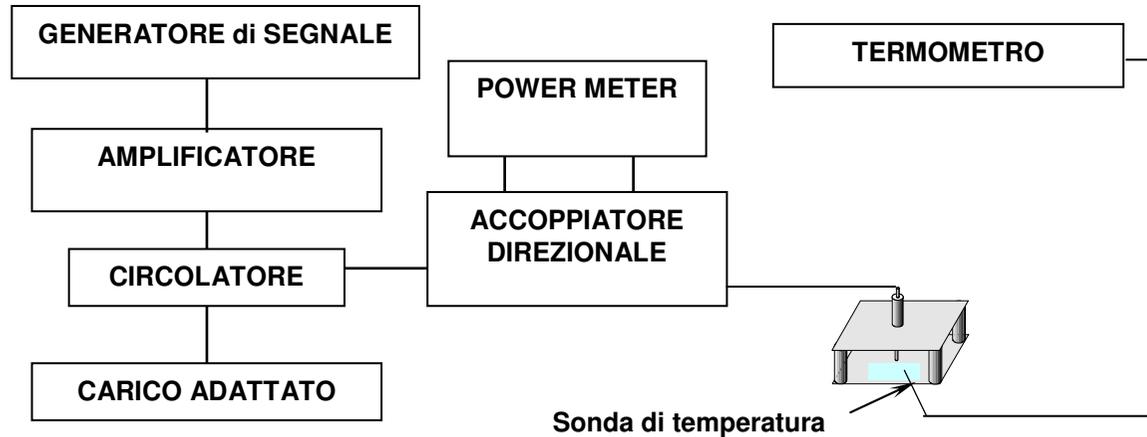
$$\text{SAR (sangue)} = 40 \times 0.89029 \times 0.36 \times 0.83 / 8 = 1.33 \text{ W/kg}$$

$$\text{SAR (rpmi)} = 40 \times 0.89029 \times 0.39 \times 0.83 / 8 = 1.44 \text{ W/kg}$$

$$\text{SAR (sangue + rpmi)} = 40 \times 0.89029 \times 0.38 \times 0.83 / 8 = 1.40 \text{ W/kg}$$

Dosimetria sperimentale

Setup di misura SAR



4 dischi di Petri vengono riempiti di 3 ml di rpmi e sono posizionati internamente alla WPC come dai risultati ottenuti dalla simulazione ed esposte ad un segnale CW a 900 MHz ad una potenza di circa 40W. L'aumento termico indotto viene misurato in cinque punti (1-5) interni alla petri. Il SAR medio è stato calcolato

Dosimetria sperimentale

Ci si pone nelle reali condizioni di esposizione e cioè quando il tessuto biologico ha raggiunto il suo equilibrio

La misura di SAR avviene indirettamente misurando l'incremento di temperatura del tessuto quando questo è soggetto a un campo elettromagnetico di interesse (900 MHz)

Misuro la temperatura in un punto fissato

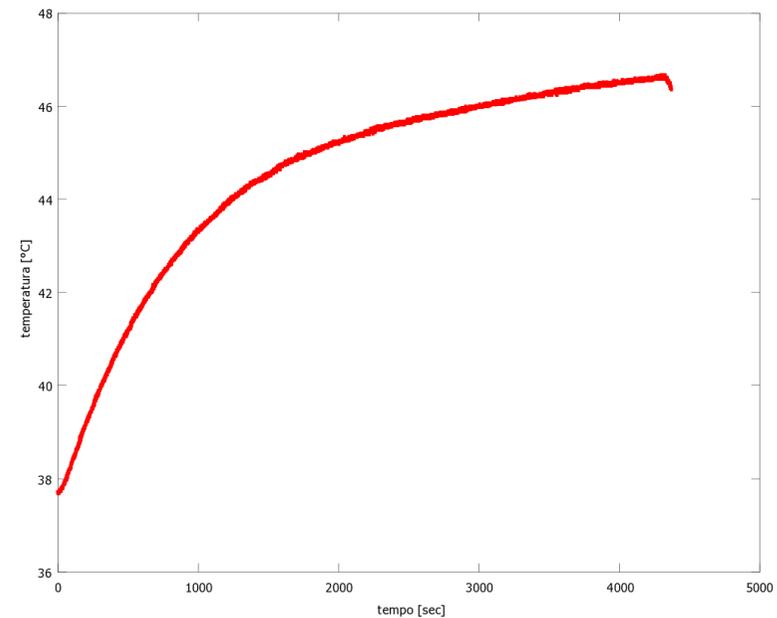
Calcolo la retta di regressione e prendo il coefficiente α della retta come riferimento

$$SAR = 4186 \cdot c \frac{dT}{dt} = 4186 \cdot c \alpha$$

c = calore specifico

1 caloria = 4186 J

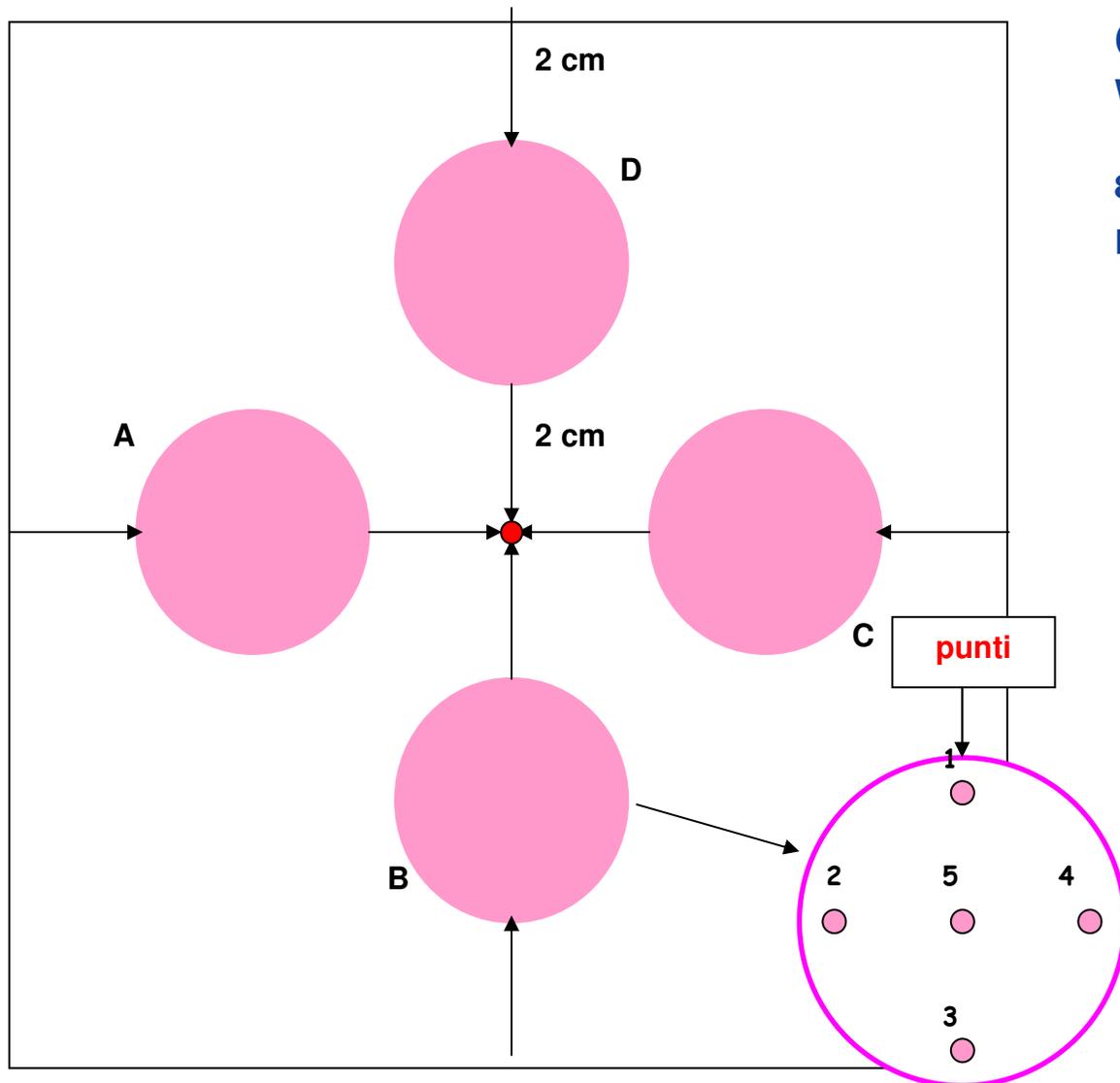
$$\text{efficienza} = \frac{SAR}{P_{netta}}$$



La potenza netta è quella fornita all'ingresso dell'utilizzatore (WPC)

Dosimetria sperimentale

Quattro Petri ($\Phi = 3.4 \text{ cm}$) sono riempite di 3 ml terreno di coltura completo



Cinque punti di misura per una WPC a 900 MHz

$\epsilon = 76$; $\sigma = 1.9 \text{ S/m}$; $c = 0.92 \text{ Cal}$;
 $r = 1000 \text{ kg/m}^3$

Posizione	SAR (W/kg)	Efficienza (W/kg/W)
B-1	19.26	0.46
B-1	12.84	0.30
B-2	25.67	0.61
B-2	19.26	0.45
B-2	25.68	0.61
B-3	19.26	0.46
B-4	17.12	0.40
B-4	12.84	0.30
B-4	16.05	0.38
B-5	16.05	0.38
B-5	9.63	0.23
B-5	12.84	0.31
B-5	17.12	0.44

efficienza = $0.41 \pm 0.12 \text{ W/kg/W}$

Schermatura WPC e controllo termico

Schermatura WPC

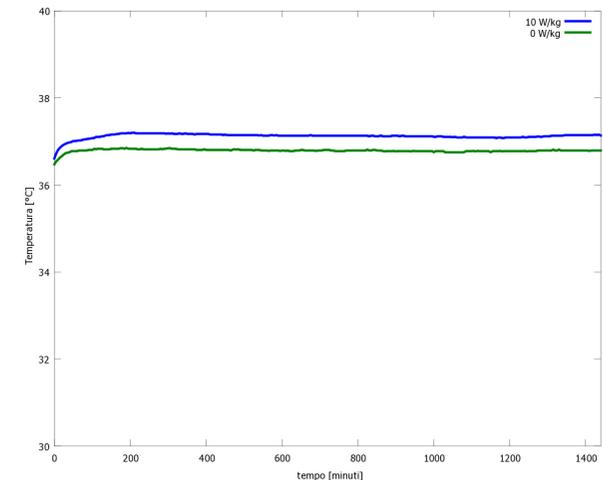
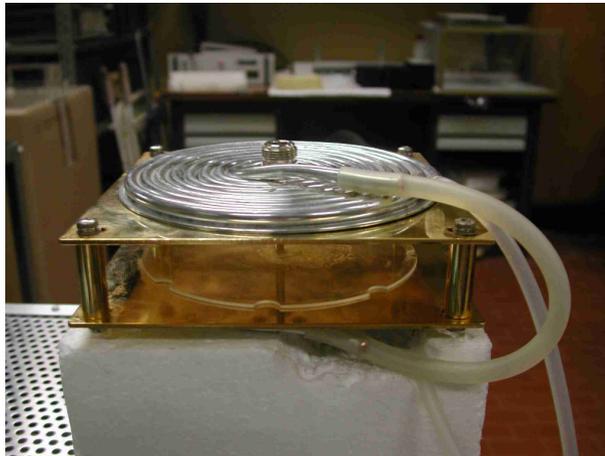
Per evitare interferenze tra la potenza radiata e i sistemi elettronici di controllo dell'incubatrice, la WPC viene posta internamente a una scatola a griglia metallica rivestita con materiale assorbente RF

Le condizioni ambientali (T° , CO_2 e umidità) sono valutate e monitorate

Controllo termico

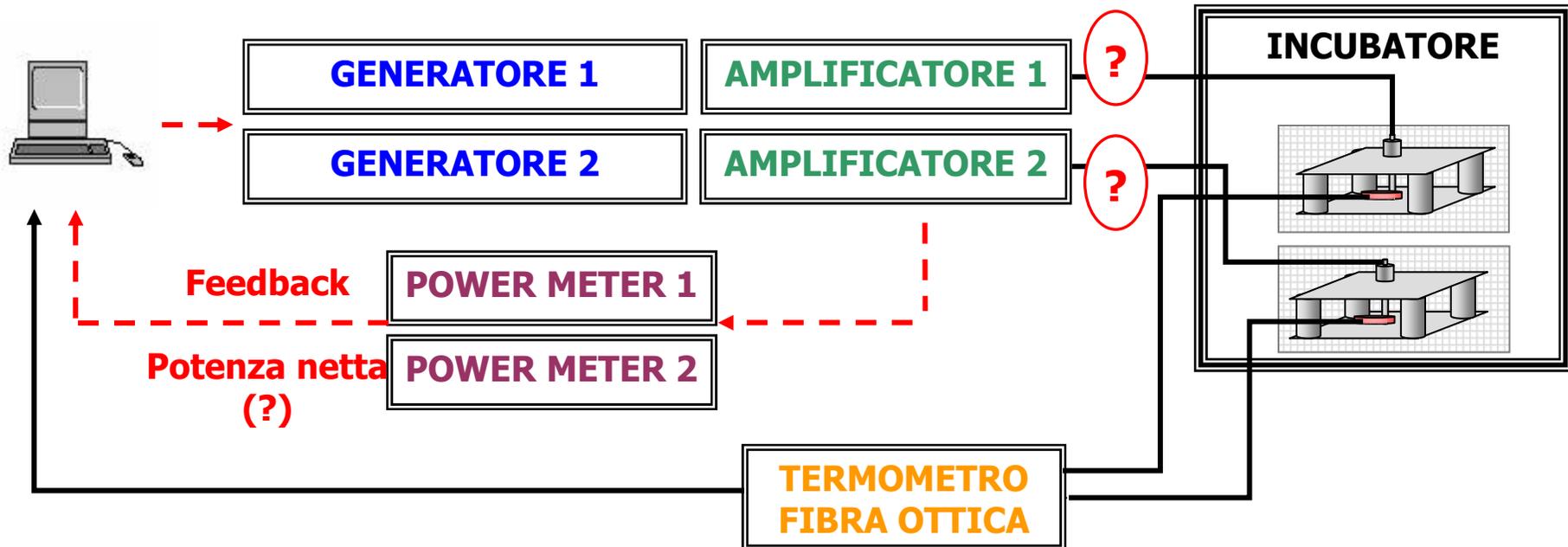
Due spirali metalliche in cui spira acqua a 36.6°C sono poste sulle facce esterne della WPC

T media all'interno delle piastre di Petri $\cong 36.8\text{-}37.1^\circ \text{C}$ per SAR di picco 0 e 10 W/kg



Set-up di esposizione

Schematizzazione di un sistema di esposizione a due canali interamente controllato da computer per esposizioni in doppio cieco



Grazie !