

***Esposizione professionale a campi  
elettromagnetici a frequenza elevata ed  
intermedia: considerazioni sul campo  
elettrico interno***

Simona Valbonesi  
Ermanno Papotti  
Andrea Vanore

## Obiettivi del lavoro

- Definire una **procedura semplificata** per il calcolo del campo elettrico interno.
- Valutare l'aumento di temperatura a **carico dell'organo profondo** (p.es. per applicazioni di ipertermia oncologica).
- Valutare l'aumento di temperatura a **carico del cervello** per effetto della esposizione a campi di frequenza 2.45 GHz.
- Valutare, in funzione della frequenza, in quali strati di tessuto si ha il maggior **surriscaldamento**.
- Valutare l'**errore commesso** utilizzando il valore del campo elettrico **esterno** invece del campo elettrico **interno** nel confronto con i valori limite della Direttiva 2013/35/UE.

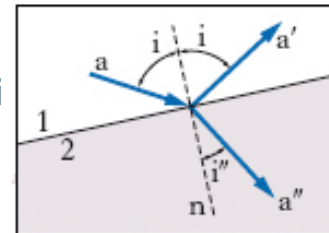
## La Direttiva 2013/35/UE

Vengono forniti distinti	- valori limite di esposizione (VLE)	Su base ICNIRP
	- livelli di azione (LA)	
Vengono distinti gli effetti	- di natura <b>sanitaria</b>	
	- di natura <b>sensoriale</b>	
Campi tra 1 Hz e 10 MHz	i valori limite per gli effetti sanitari vengono espressi in funzione del <b>campo elettrico interno</b>	Valore di picco per il corpo del soggetto esposto.
<p><i>Dato che molti valori limite sono espressi in funzione di campo elettrico interno, occorre effettuare studi specifici su questa quantità dosimetrica.</i></p>		

## Calcolo del campo elettrico interno

- Il modello utilizzato si basa sulla propagazione ed assorbimento del campo elettrico in materiali non conduttori.

- Quando un'onda elettromagnetica incide sull'interfaccia tra due mezzi materiali con caratteristiche elettromagnetiche diverse, una parte dell'energia viene **riflessa** mentre l'altra è **trasmessa** al mezzo successivo.



- I tessuti biologici presentano proprietà dielettriche **differenti** dipendenti dalle proprietà strutturali (architetture cellulari, presenza di membrane, contenuto di acqua, dimensioni molecolari). La propagazione del campo elettrico all'interno del corpo umano può essere trattata come studio sull'interfaccia tra mezzi differenti.
- Nel range 1Hz - 300 GHz l'interazione dei CEM **non può ionizzare** i sistemi biologici in quanto il valore del salto energetico è di gran lunga superiore all'energia dei fotoni.
- La trattazione è di tipo **classico** in cui l'energia del campo e quella del sistema materiale possono assumere livelli comunque vicini tra di loro.

## Approssimazioni

- Per il calcolo matematico del campo elettrico interno si presuppone una interazione con onda piana.
- Questa approssimazione è valida solo se il raggio di curvatura delle varie parti del corpo è grande nei confronti della lunghezza d'onda.
- Pertanto, il calcolo effettuato con questa approssimazione, per frequenze inferiori al GHz fornisce una idea puramente orientativa da verificare mediante confronto con situazioni note (es: ipertemia oncologica).

## Considerazioni fisiche

- L'onda propagandosi nel mezzo cede energia e si attenua.
- Partendo dalla potenza si calcola il campo elettrico interno

$$S = S_0 e^{-2\frac{z}{\delta}} \quad \longrightarrow \quad E = E_0 e^{-\frac{z}{\delta}}$$

dove  $z$  è la distanza percorsa all'interno del mezzo

$$\delta = \frac{c}{\omega \sqrt{\frac{\epsilon_r}{2} \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\sigma}{\omega \epsilon_r \epsilon_0} \right)^2} - 1 \right)}} \quad \text{Spessore di penetrazione}$$

Ricavato quindi lo spessore di penetrazione per via numerica, noto il campo elettrico esterno per via strumentale è possibile calcolare il campo elettrico interno nei vari substrati.

## Strati considerati

- Epidermide:  $z = 0,00008$  m all'interno dell'epidermide,
- Derma:  $z = 0,002$  m all'interno del derma,
- Adipe:  $z = 0,01$  m all'interno dello strato adiposo,
- Muscolo  $z = 0,01$  m all'interno di tessuto muscolare.

Sono stati aggiunti anche:

- Fegato:  $z = 0,02$  m all'interno del fegato,
- Tessuto osseo:  $z = 0,007$  m all'interno dell'osso cranico,
- Encefalo  $z = 0,01$  m all'interno del cervello – materia bianca.

Il calcolo è stato fatto per frequenze comprese tra 10 kHz e 40 GHz per intensità del campo elettrico variabile da 0.5 V/m a 500 V/m.

## E interno vs E esterno: considerazioni (campi inferiori a 10 MHz)

Frequenza	Trasmissione di E profondità 2 cm	Trasmissione profonda
10 kHz	$E_{\text{int}} = 0,997 E_o$	$E_{\text{ext}} = E_{\text{int}}$
50 kHz – 100 kHz	$E_{\text{int}} = 0,991 E_o$	$E_{\text{ext}} = E_{\text{int}}$ errore < 1%
500 kHz – 1 MHz	$E_{\text{int}} = 0,980 E_o$	$E_{\text{ext}} = E_{\text{int}}$ errore < 2%



# Considerazioni su campo elettrico interno

## Applicazioni mediche

Frequenza	Trasmissione di E	Trasmissione profonda
<b>13.56 MHz</b> (Ipertermia oncologica)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1% bloccato dal derma</li> <li>• 2% dall'adip</li> <li>• 12% dagli st</li> </ul>	
<b>126 MHz</b> (MRI)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3% bloccato derma</li> <li>• 5 % a livello</li> </ul>	
<b>433 MHz</b> (Diatermia)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 4% bloccato derma</li> <li>• 7% a livello</li> </ul>	

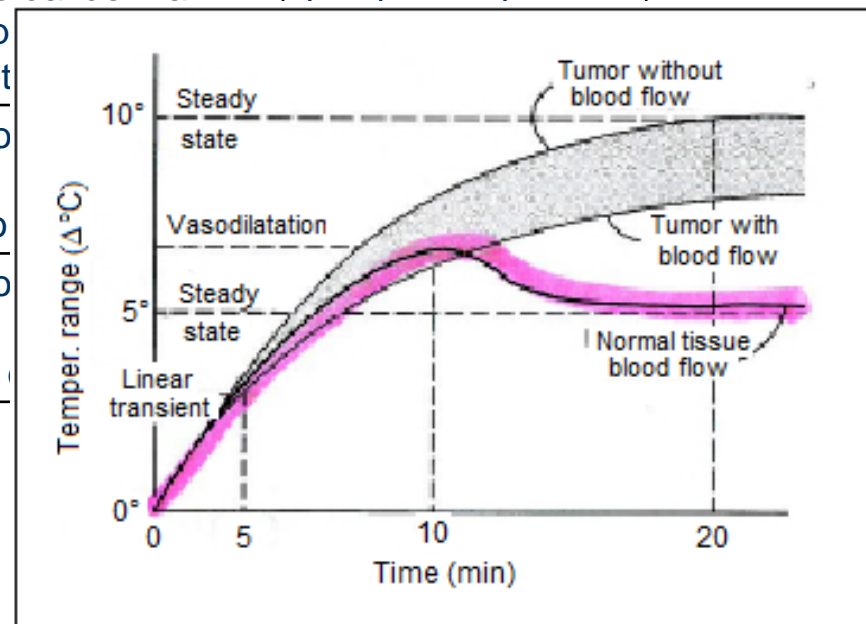


Immagine tratta da:  
Bernes, Greenebaum  
"Biological and Medical Aspects of Electromagnetic fields"  
Third Edition – CRC press – pg. 416

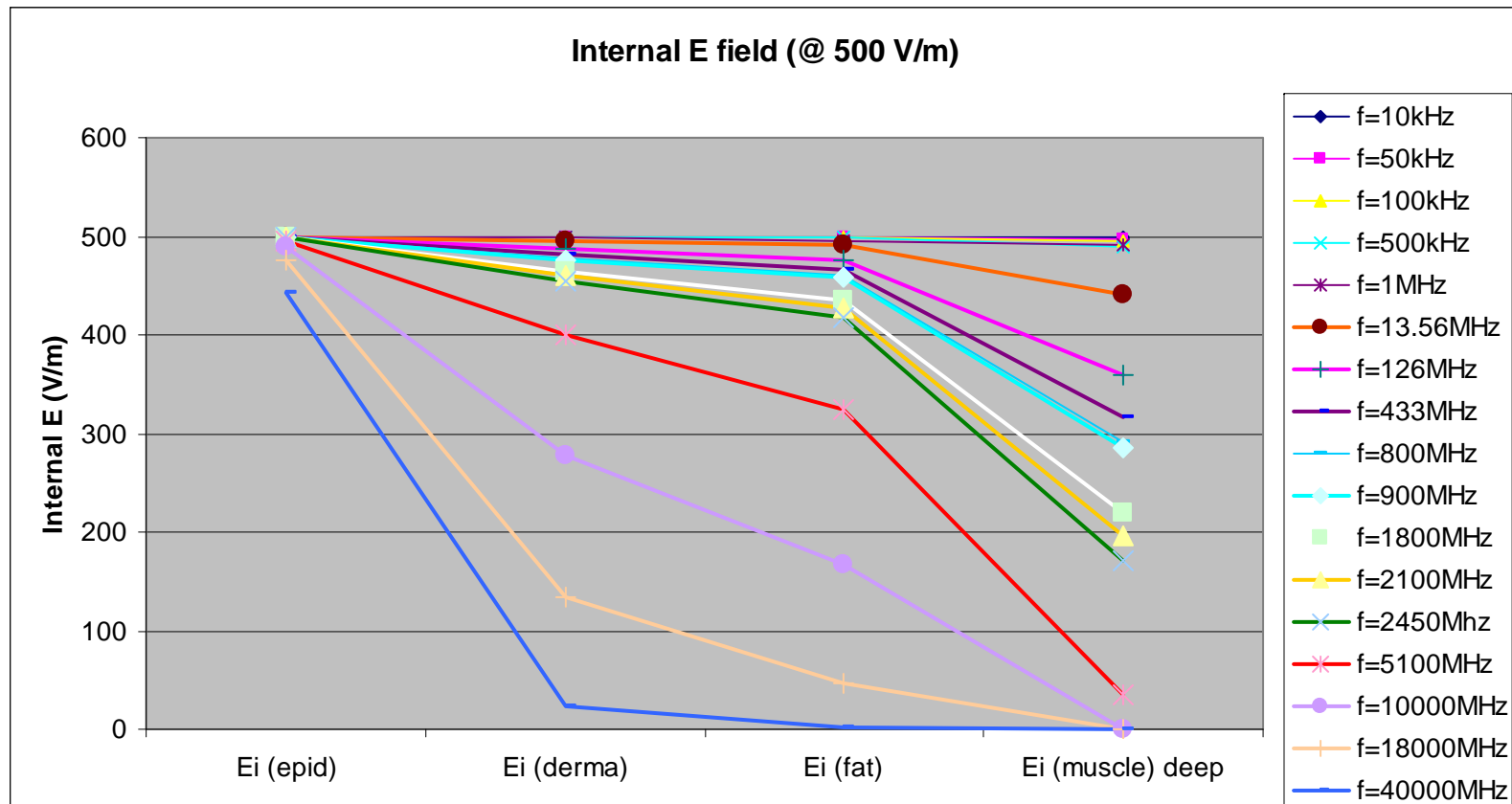
## Considerazioni su campo elettrico interno Applicazioni telefoniche

Frequenza	Trasmissione di E	Trasmissione profonda
<b>900 MHz</b> (Telefonia GSM)	<ul style="list-style-type: none"><li>• 5% bloccato a livello di derma</li><li>• 9% a livello di adipe</li></ul>	43% a livello di strati muscolari profondi
<b>1800 MHz</b> (Telefonia GSM)	<ul style="list-style-type: none"><li>• 8% bloccato a livello di derma</li><li>• 13 % a livello di adipe</li></ul>	56% negli strati muscolari profondi
<b>2100 MHz</b> (Telefonia UMTS)	<ul style="list-style-type: none"><li>• 8% bloccato a livello di derma</li><li>• 14% a livello di adipe</li></ul>	61 % a livello di muscolo

## Considerazioni su campo elettrico interno WiFi ed altre applicazioni

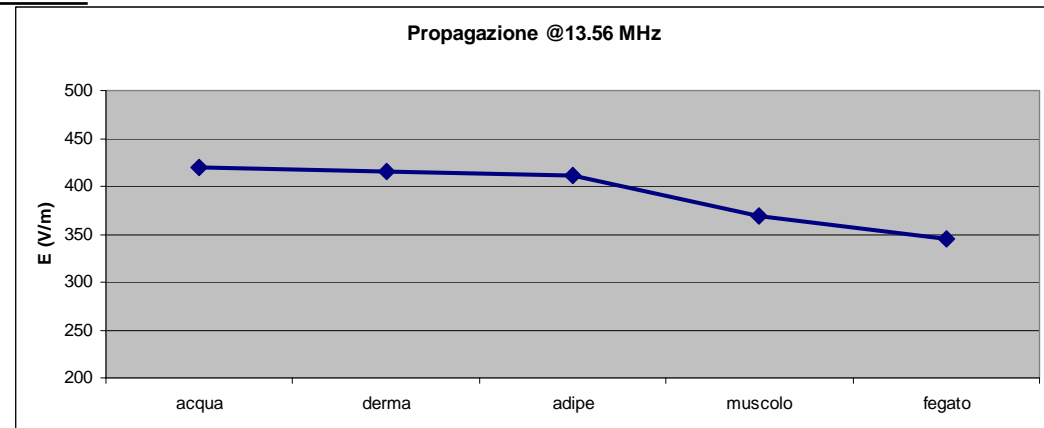
Frequenza	Trasmissione di E	Trasmissione profonda
<b>2450 MHz</b> (WiFi, diatermia, forni a microonde)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 10% bloccato a livello di derma</li> <li>• 17% a livello di adipe</li> </ul>	66% a livello di strati muscolari profondi
<b>5100 MHz</b> (WiFi)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1% bloccato a livello di epidermide</li> <li>• 20 % a livello di derma</li> </ul>	35% a livello di adipe
Da 5100 MHz la maggior parte del campo viene bloccato a livello dei primissimi strati tissutali (derma e adipe) dove provoca surriscaldamenti senza penetrare in profondità.		
<b>10 GHz</b> (Radar traffico aereo)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3% bloccato da epidermide</li> <li>• 45% bloccato dal derma</li> </ul>	il resto a livello di adipe
<b>18 GHz</b> (Radar militari)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 5 % bloccato da epidermide</li> </ul>	74 % a livello di derma
<b>40 GHz</b> (Radar militari)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 12 % bloccato da epidermide</li> </ul>	il resto a livello di derma. Il campo non penetra negli strati più profondi

## Risultati: campo elettrico interno singoli strati



## Applicazione: ipertermia oncologica su fegato

Strato	E (V/m)
Nulla	500,00
H <sub>2</sub> O (cuscino 2 cm)	419,21
Epidermide	419,13
Derma	415,93
Adipe	411,37
Muscolo (1)	369,71
Fegato (1)	344,89



(1) calcolato ad una profondità di 2 cm.

Ai fini di una verifica del valore di campo elettrico interno calcolato è stato valutato il tempo necessario per provocare innalzare la temperatura interna del fegato a 42 gradi come richiesto nelle applicazioni di ipertermia oncologica.

## Verifica del valore teorico

L'innalzamento infinitesimo di temperatura dovuto ad assorbimento di potenza EM nel tempo  $t$  è dato da:

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \frac{(SAR + P_m - P_c - P_s)}{c}$$

Con:

- $P_m$ : calore metabolico specifico
- $P_c$  e  $P_s$ : quantità di calore perdute a causa del flusso sanguigno
- $c$ : calore specifico dell'organo bersaglio

Se l'organo prima dell'esposizione si trova in condizioni di equilibrio si ha  **$P_m = P_c + P_s$**

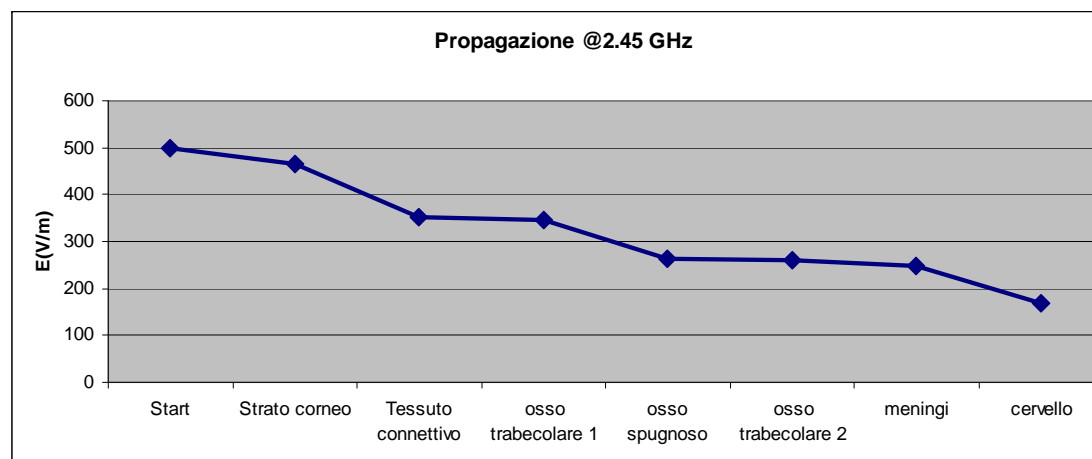
E di conseguenza:  $SAR = \frac{\sigma E^2}{\rho} = c \frac{\Delta T}{\Delta t}$  La capacità termica  
nel fegato ( $c$ ) è 3540 J/kg/grado

Con queste espressioni per i valori di campo interno si ottiene

**$t_{42} = 4$  minuti in caso di non applicazione del cuscino d'acqua,  
 $t_{42} = 5,5$  minuti in caso di applicazione del cuscino d'acqua,  
 $t_{42}$  da protocolli ipertermia 5 - 7 minuti,  
 $t_{44} = 8$  minuti in caso di applicazione del cuscino d'acqua,  
 $t_{44}$  da protocolli ipertermia 8 - 10 minuti.**

## Applicazione: calcolo incremento temperatura scatola cranica per esposizione a campi 2.45 GHz

Strato	E (V/m)
Start	500,00
Strato corneo	465,79
Tessuto connettivo	350,96
Osso trabecolare 1	347,14
Osso spugnoso	262,81
Osso trasecolare 2	259,96
Meningi	247,78
Encefalo (1)	169,83



(1)calcolato ad una profondità di 1 cm

Ai fini di una verifica della correttezza dei valori del campo elettrico interno calcolati è stato fatto un calcolo dell'incremento di temperatura a carico del cervello per esposizioni della durata di 30 minuti.

## Verifica del valore teorico

$E_0$ (V/m)	$E_{int}$ (V/m)	SAR (W/kg)	$\Delta T_{30}$
50	16,98	0,33	0,17
20	6,79	0,053	0,027
1	0,34	1,34E-04	6,70E-05

Con  $E_{int}$  si intende il campo elettrico interno all'encefalo calcolato utilizzando la procedura descritta con i seguenti parametri fisiologici:

$\sigma$	1,21 S/m
$\rho$	1046 kg/m <sup>3</sup>
CH	3583 J/kg/grado

Per una esposizione di 30 minuti ad un campo di intensità 20 V/m l'incremento di temperatura riscontrato è dell'ordine del centesimo di grado, come da letteratura



## Conclusioni

- Per campi fino ad 1 MHz è possibile effettuare nel confronto con i valori limite il **campo elettrico esterno** invece del **campo elettrico interno** commettendo un errore inferiore all'1%.
- A partire dai 5100 MHz il campo viene bloccato dai **prmissimi strati** di tessuto senza penetrare in profondità.
- Per verificare la consistenza del calcolo teorico effettuato sono stati fatti due confronti:
  - calcolo del tempo necessario per raggiungere la temperatura interna di 42 gradi nel fegato trattato con **ipertermia oncologica**. I tempi calcolati utilizzando i valori di campo elettrico interno ottenuti con la procedura presentata sono **compatibili** con quanto indicato nei protocolli
  - calcolo dell'aumento di temperatura a carico del cervello per esposizione di **30 minuti a campi di frequenza 2.45 GHz**. I risultati trovati sono **compatibili** con quanto trovato in letteratura.

[svalbonesi@elettra2000.it](mailto:svalbonesi@elettra2000.it)



*Grazie*