

Corso di Antenne e propagazione wireless

AA 2016-17

M. Santagiustina

Principi di radioprotezione

Le politiche di protezione

La diffusione della telefonia cellulare è stata estremamente estesa e rapidissima.

Si pone un problema di protezione?

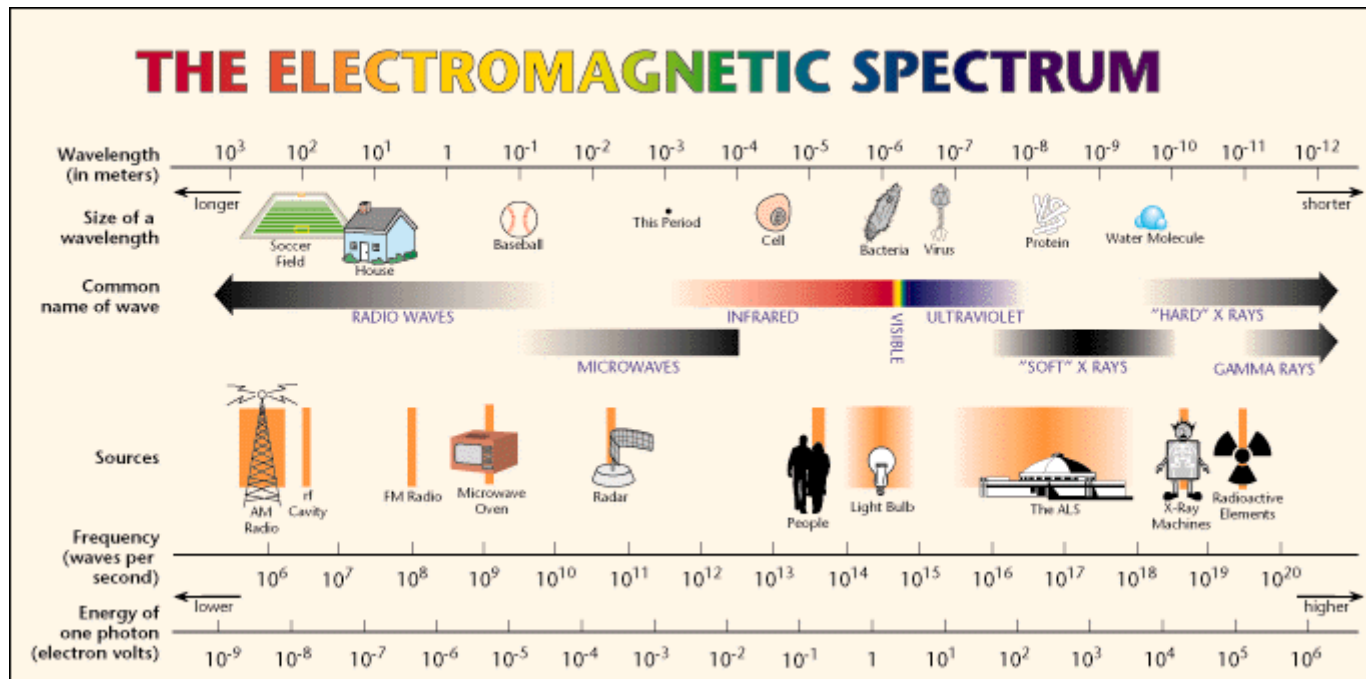


Innanzitutto bisogna distinguere le radiazioni elettromagnetiche ionizzanti (UV, X, Gamma) da quelle non ionizzanti (LF, RF, MW, IR, VIS).

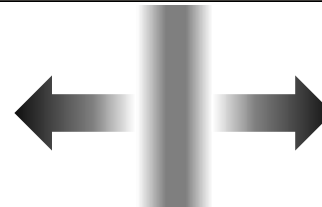
La ionizzazione è un fenomeno fisico (separazione dell'elettrone dall'atomo) che avviene quando l'energia del quanto elettromagnetico ($E = h f$) supera certi valori e si traduce in un effetto cancerogeno (es: rottura certa del DNA).

Fenomeno	Energia di attivazione (eV)	Frequenza corrispondente (Hz)
Rottura del legame idrogeno	$0.08 \div 0.2$	$23 \times 10^{13} \div 4.8 \times 10^{13}$ (IR)
Cambio reversibile di conformazione nelle proteine	0.4	10^{14} (IR)
Rottura del legame covalente	5	1.2×10^{15} (UV)
Ionizzazione	10	2.4×10^{15} (UV)

Tabella 2-3 Valori dell'energia di attivazione molecolare per alcuni fenomeni tipici



Non Ionizzanti



Ionizzanti

Gli effetti biologici

L'interazione fra materia vivente e campi elettromagnetici (bioelettromagnetismo) è una disciplina estremamente complessa.

Gli studi sono costosi, spesso non ripetibili (dato che i parametri degli esperimenti sono moltissimi) ed a volte difficilmente interpretabili.



STUDI EPIDEMIOLOGICI (sugli esseri umani)

- Studi statistici che cercano di individuare una correlazione tra due fenomeni.
- Sono studi statistici e quindi con i piccoli numeri l'errore può essere elevato.
- La correlazione con la dosimetria (esposizione ai campi elettromagnetici durante la vita del soggetto) è difficile (tipicamente auto-valutazione del numero di ore).
- Fattori confondenti (altre possibili con-cause non identificate)
- La **correlazione non implica una relazione di causa-effetto.**

STUDI EPIDEMIOLOGICI (sugli esseri umani)

	Malati	Non Malati
Esposti	a	b
Non Esposti	c	d

Il fattore di rischio assoluto (RA) e relativo (RR):

$$RA = a / (a+b)$$

$$RR = [a / (a+b)] / [c / (c+d)]$$

RR>1 indica un rischio maggiore di contrarre la patologia in esame.

NB: statisticamente RR indica una correlazione significativa se maggiore di 2 o 3 (ad esempio nel caso del fumo di sigaretta RR vale circa 30).

Intervallo di confidenza (CI, confidence interval) è un intervallo all'interno del quale ricade con una certa probabilità (solitamente 95%) la stima del parametro.

STUDI SPERIMENTALI (in-vitro e più raramente in-vivo)

- Sono studi costosi
- I parametri degli esperimenti sono molto variabili e quindi gli esperimenti sono spesso poco riproducibili
- La quantificazione dosimetrica è assai difficile
- Le competenze scientifiche necessarie sono multidisciplinari (biologi, medici, matematici-statistici, fisici-ingegneri) e quindi spesso il team di ricerca non è completo
- Nel caso dei CEM alcuni studi indicano alcuni effetti sul materiale biologico e su cavie con effetti cancerogeni (in genere non CEM da soli ma insieme ad altri fattori), ma altri studi (in maggior numero) nessun effetto.

“The International Agency for Research on Cancer (IARC) is the specialized cancer agency of the World Health Organization. The objective of the IARC is to promote international collaboration in cancer research. The Agency is inter-disciplinary, bringing together skills in epidemiology, laboratory sciences and biostatistics to identify the causes of cancer so that preventive measures may be adopted and the burden of disease and associated suffering reduced. A significant feature of the IARC is its expertise in coordinating research across countries and organizations; its independent role as an international organization facilitates this activity.”

L'IARC studia la cancerogenicità di varie sostanze le cataloga in **5 gruppi**.

*“These categories **refer only to the strength of the evidence** that an exposure is carcinogenic and not to the extent of its carcinogenic activity (potency). A classification may change as new information becomes available.”*

[IARC “Preamble to the IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans,” 2015]

Classificazione IARC

Classificazione IARC	Descrizione (sommaria)	Esempi
Gruppo 1. L'agente è cancerogeno per gli umani.	Agenti per i quali vi sono sufficienti evidenze di cancerogenicità negli umani.	Amianto, fumo, benzene, bevande alcoliche, cloruro vinile, papilloma virus (vari tipi), radiazioni ionizzanti , materiali nucleari radioattivi, carne lavorata, radiazione solare, radiazione UV
Gruppo 2A. L'agente è probabilmente cancerogeno per gli umani.	Agenti per i quali vi sono limitate evidenze di cancerogenicità negli umani e sufficienti evidenze di cancerogenicità negli animali; oppure per i quali vi sono inadeguate evidenze di cancerogenicità negli umani e sufficienti evidenze di cancerogenicità negli animali.	DDT, tetrafluoroetilene (TFE), papilloma virus (tipo 68), carne rossa ...
Gruppo 2B. L'agente è possibilmente cancerogeno per gli umani.	Agenti per i quali vi sono limitate evidenze di cancerogenicità negli umani e meno che sufficienti evidenze di cancerogenicità negli animali; oppure per i quali vi sono inadeguate evidenze di cancerogenicità negli umani e sufficienti evidenze di cancerogenicità negli animali.	Caffè, isoprene, naftalina, campi elettromagnetici a radiofrequenza (2013) , campi magnetici a bassissima frequenza (2002) ...
Gruppo 3. L'agente non è classificabile in merito alla sua cancerogenicità per gli umani.	Agenti per i quali vi sono inadeguate evidenze di cancerogenicità negli umani e inadeguate o limitate evidenze di cancerogenicità negli animali; oppure per i quali le evidenze di cancerogenicità sono inadeguate negli umani ma sufficienti negli animali, però ci sono forti evidenze che il meccanismo di cancerogenicità non si applica agli umani). Agenti che non rientrano nelle altre categorie.	Lana di vetro, paracetamolo, saccarina, solfiti, campi magnetici statici (2002) ...
Gruppo 4. L'agente è probabilmente non cancerogeno per gli umani.	Agenti per i quali vi sono evidenze scientifiche di non-cancerogenicità negli umani e negli animali.	Caprolattame (l'unico in questa categoria!)

IARC: Cancerogenicità dei campi RF (30 kHz – 3 GHz)

Considerazioni generali

[IARC "Non-ionizing radiation (Part 2)," Monograph vol. 102, 2002]

- La popolazione in generale riceve la maggiore esposizione dall'uso di dispositivi portatili (cellulari, ecc.); la maggior parte di energia RF è depositata nel cervello.
- A causa della minore distanza tra la sorgente e il cervello ed alla maggiore conducibilità dei tessuti rispetto agli adulti, nei bambini l'energia RF depositata è fino al doppio nel cervello e fino a 10 volte nel midollo osseo della scatola cranica.
- Si stima che l'esposizione del cervello da antenne radio-base e ripetitori radio e TV sia diversi ordini di grandezza inferiore a quella dovuta ai GSM. Il DECT irradia circa 5 volte meno dei GSM. Gli UMTS (3G) irradiano circa 100 volte meno dei GSM.
- Uno dei lavori sul quale si è maggiormente basata l'IARC (INTERPHONE) ha preso in considerazione l'uso dei GSM (perché i 3G non erano ancora diffusi).
- Il riscaldamento dei tessuti è il meccanismo più consolidato di effetto dei campi RF sui tessuti.
- E' possibile ("*it is likely*") che vi siano altri meccanismi non ancora scoperti.
- L'uso di sperimentazione in-vitro ed in-vivo è critica (forma, dimensioni, modalità di esposizione).

Studi epidemiologici: glioma al cervello per esposizione ai dispositivi portatili

[IARC "Non-ionizing radiation (Part 2)," Monograph vol. 102, 2002]

- Studio danese (2011) sull'intera popolazione nazionale. Glioma correlato al fatto di aver sottoscritto un contratto di telefonia mobile: RR=1 (scartato da IARC per mancanza di analisi dosimetrica).
- Studio **INTERPHONE** (1990 e 2000) uso del cellulare (GSM); 2708 casi di glioma e 2972 "controlli" (con percentuali di partecipazione del 64% e 53% rispettivamente).

Uso cumulativo (ore)	RR	CI 95%
< 1640	< 1	
> 1640	1.4	1.03 – 1.89

- Studio svedese (2011) uso cellulare e cordless. Lo studio ha incluso 1148 casi di glioma e 2438 "controlli".

Uso cumulativo (ore)	OR	CI 95%
1 – 1000	1.2	0.98 – 1.4
1001 – 2000	1.5	1.1 – 2.1
>2000	2.5	1.8 – 3.5

Conclusioni

[IARC "Non-ionizing radiation (Part 2)," Monograph vol. 102, 2002]

- Lo studio INTERPHONE e lo studio svedese hanno evidenziato una correlazione debole tra glioma e neuroma acustico e l'uso di cellulari e cordless.
- Tuttavia gli studi non sono scevri da bias.
- Inoltre le conclusioni dei due studi sono in parte inconsistenti.
- Una minoranza dei membri del "working group" ha osservato la mancanza di un significativo aumento di incidenza dei tumori al cervello in risposta all'aumento della diffusione ed uso dei cellulari.
- L'IARC ritiene che vi siano *limitate evidenze* di associazione tra esposizione ai campi RF e glioma e neuroma acustico (gruppo 2B).

Nota

- I produttori di cellulari hanno interessi "economici" a ridurre l'emissione dei cellulari, perché ciò garantisce una maggiore durata della batteria.
- I gestori di rete hanno interessi "economici" a diminuire le dimensioni delle celle per aumentare il numero di utenti gestibili; questo però richiede necessariamente di abbassare la potenza irradiata dalle stazioni radio base.

Attualmente i limiti ai valori di campo elettrico e magnetico e di densità di potenza sono quindi definiti solo in base agli effetti fisici, ovvero il riscaldamento dei tessuti.

Vari enti hanno definito delle linee guida per la definizione dei limiti:

- 1) ICNIRP – Commissione Internazionale per la Protezione dalle Radiazioni Non-Ionizzanti
- 2) ANSI - American National Standard Institute (IEEE standard)
- 3) CENELEC - Comitato Europeo di Normalizzazione Elettrotecnica (ente standardizzazione riconosciuto dalla Commissione Europea)

Campo elettromagnetico nei tessuti biologici

L'interazione campo elettromagnetico-materia si basa sul modello dipolare (valido per frequenze del campo inferiori a quella di ionizzazione).

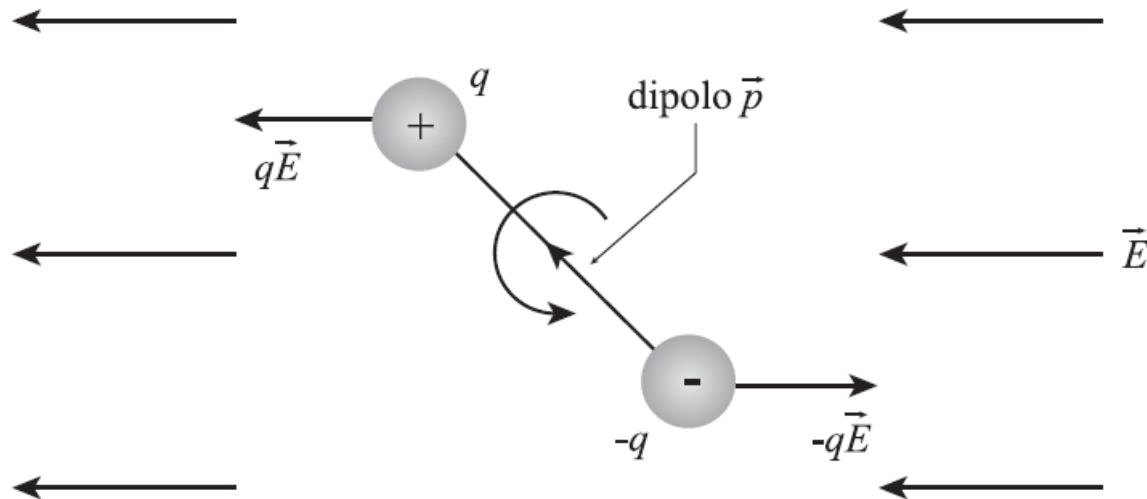


Figura 2-1 Coppia di forze che orientano un dipolo in un campo elettrico

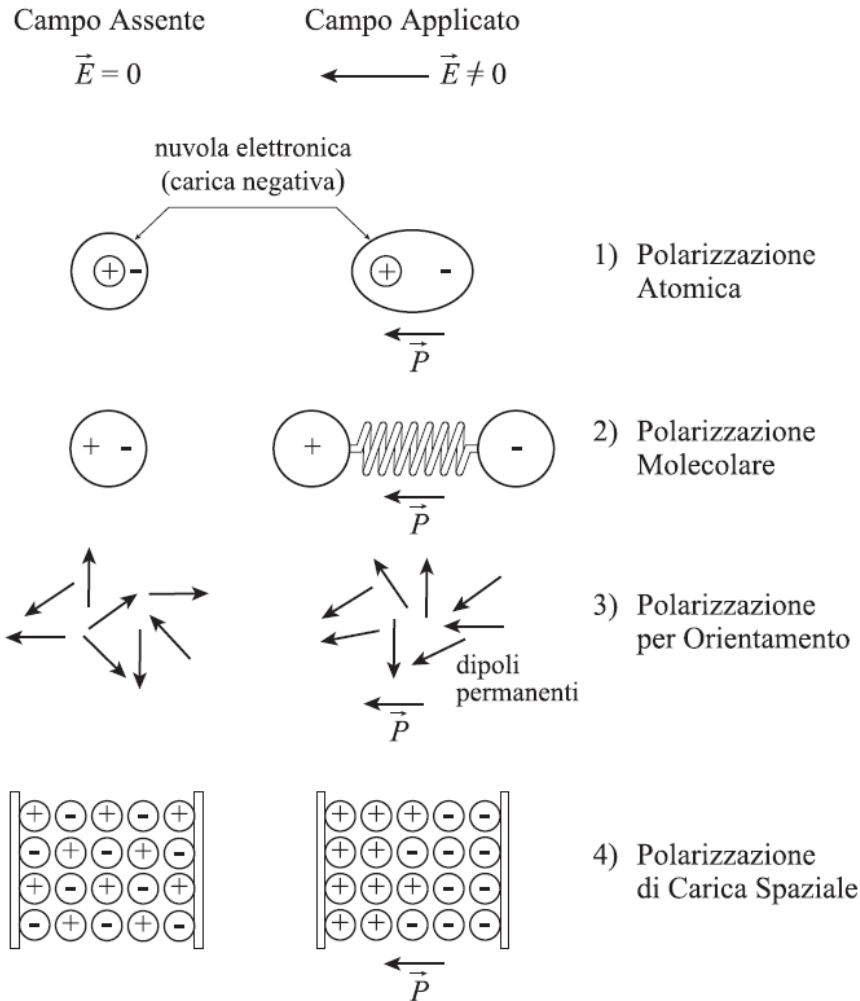


Figura 2-2 Meccanismi di polarizzazione

$$\vec{d} = \epsilon \vec{e} = \epsilon_0 \vec{e} + \vec{p}$$

Dove \vec{p} è la polarizzazione del mezzo.

Se la risposta del mezzo è lineare:

$$\vec{p} = \epsilon_0 \chi_e^{(1)} \vec{e}$$

dove $\chi_e^{(1)}$ è detta suscettività elettrica del mezzo.

$$\begin{aligned} \vec{d} &= \epsilon_0 (1 + \chi_e^{(1)}) \vec{e} = \\ &= \epsilon_0 \epsilon_r \vec{e} = \epsilon \vec{e} \end{aligned}$$

$\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0$ è detta costante di permittività dielettrica relativa (al vuoto).

Analogamente per il campo magnetico, $\bar{b} = \mu \bar{h} = \mu_0 \bar{h} + \bar{m}$

dove \bar{m} è la magnetizzazione del mezzo.

Se la risposta del mezzo è lineare: $\bar{m} = \mu_0 \chi_m^{(1)} \bar{h}$

dove $\chi_m^{(1)}$ è detta suscettività magnetica del mezzo.

$$\bar{b} = \mu_0 (1 + \chi_m^{(1)}) \bar{h} = \mu_0 \mu_r \bar{h} = \mu \bar{h}$$

$\mu_r = \mu / \mu_0$ è detta costante di permeabilità magnetica relativa (al vuoto).

Diamagnetici $\chi_m^{(1)} < 0 \text{ (} - 10^{-4} \text{)}$

Paramagnetici $\chi_m^{(1)} > 0 \text{ (} + 10^{-6} \text{)}$

Ferromagnetici $\chi_m^{(1)} \gg 1 \text{ (} 10 \div 10^5 \text{)}$

Ad eccezione dei ferromagnetici, $\mu \approx \mu_0$, tali mezzi si definiscono **dielettrici**.

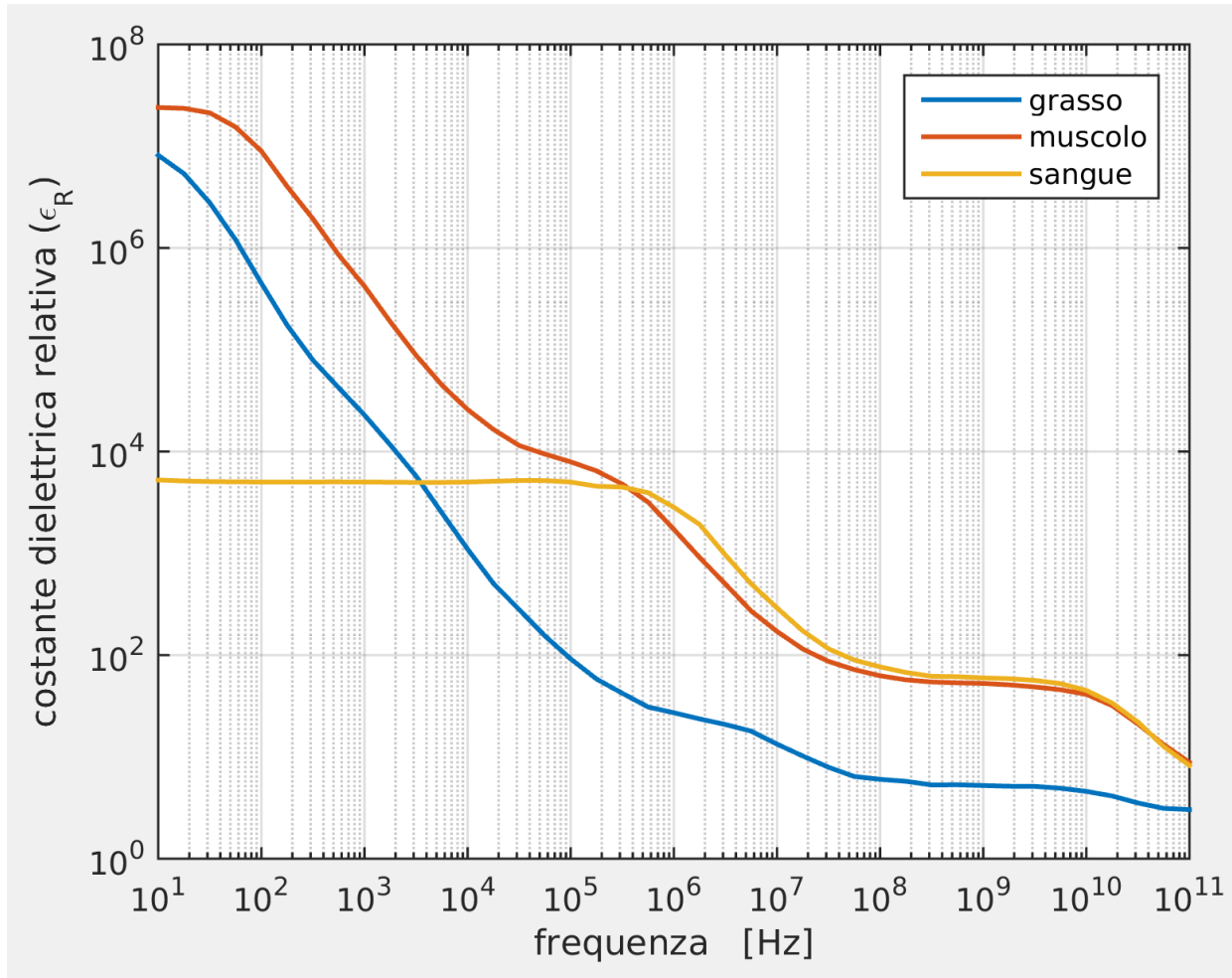
Accanto a questi possono esserci fenomeni di conduzione di cariche elettriche, esemplificati dalla legge di Ohm:

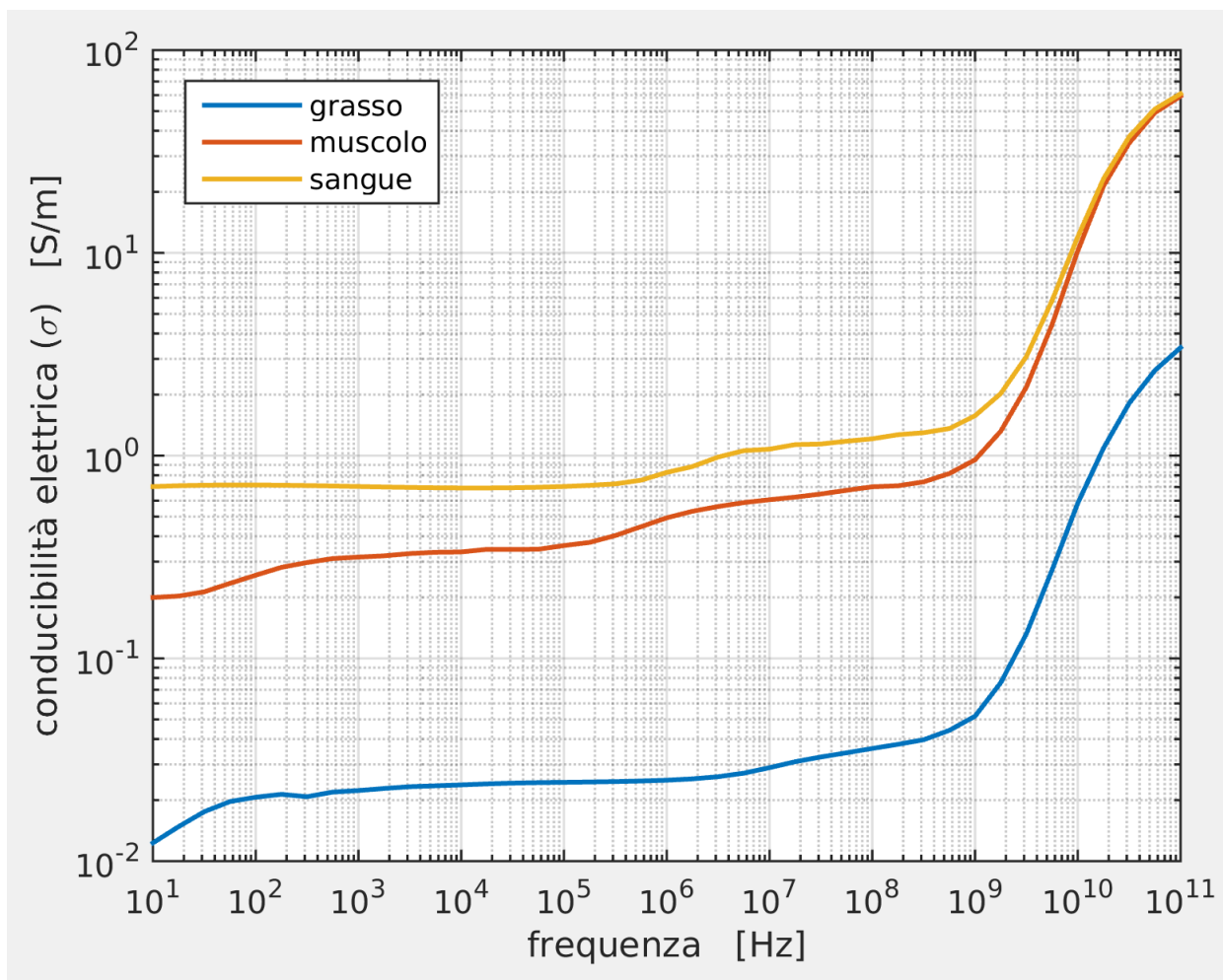
$$\bar{J}_{cond} = \sigma \bar{e}$$

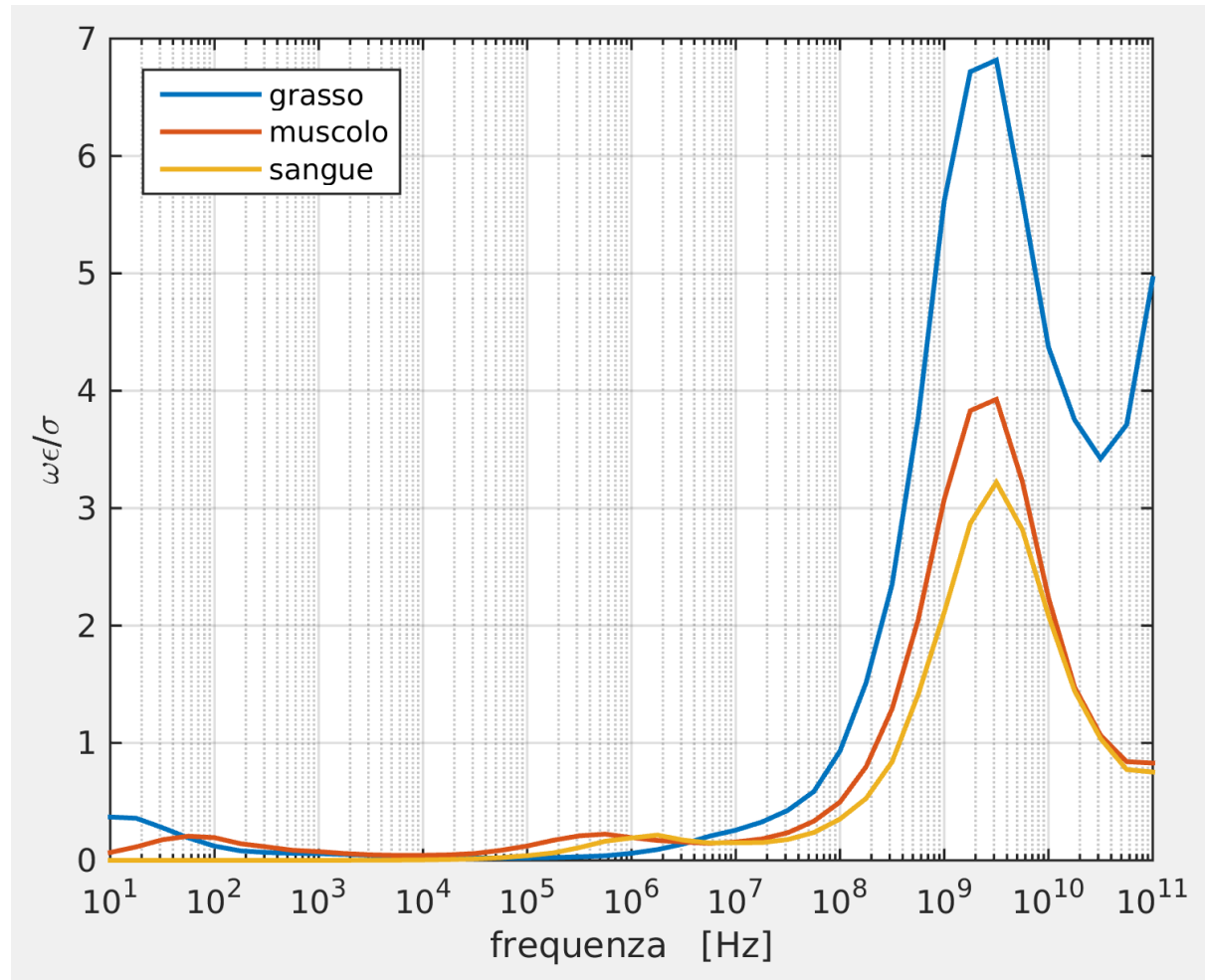
Per frequenze elevate i meccanismi di orientazione dei dipoli iniziano a non essere efficaci (inerzia delle molecole).

A partire dall'infrarosso l'interazione è dominata da altri fenomeni (assorbimento ed emissione degli atomi).

Proprietà dei tessuti biologici







Onda piana trasmessa – mezzo conduttore ($\theta_i = 0$)

In caso di incidenza normale risulta $\theta_t = 0$, quindi \mathbf{a}_t è parallelo a \mathbf{k}_t e l'onda trasmessa è sempre **uniforme**. Nel mezzo non buon conduttore risulta allora:

$$|\mathbf{a}_t|^2 = \frac{\beta_2^2}{2} \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_2}{\omega \epsilon_2} \right)^2} - 1 \right\}, \quad |\mathbf{k}_t|^2 = \frac{\beta_2^2}{2} \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_2}{\omega \epsilon_2} \right)^2} + 1 \right\}$$

Si definisce lo **spessore di penetrazione** δ come $1/|\mathbf{a}_t|$, per cui in questo caso si ottiene (riordinando i termini)

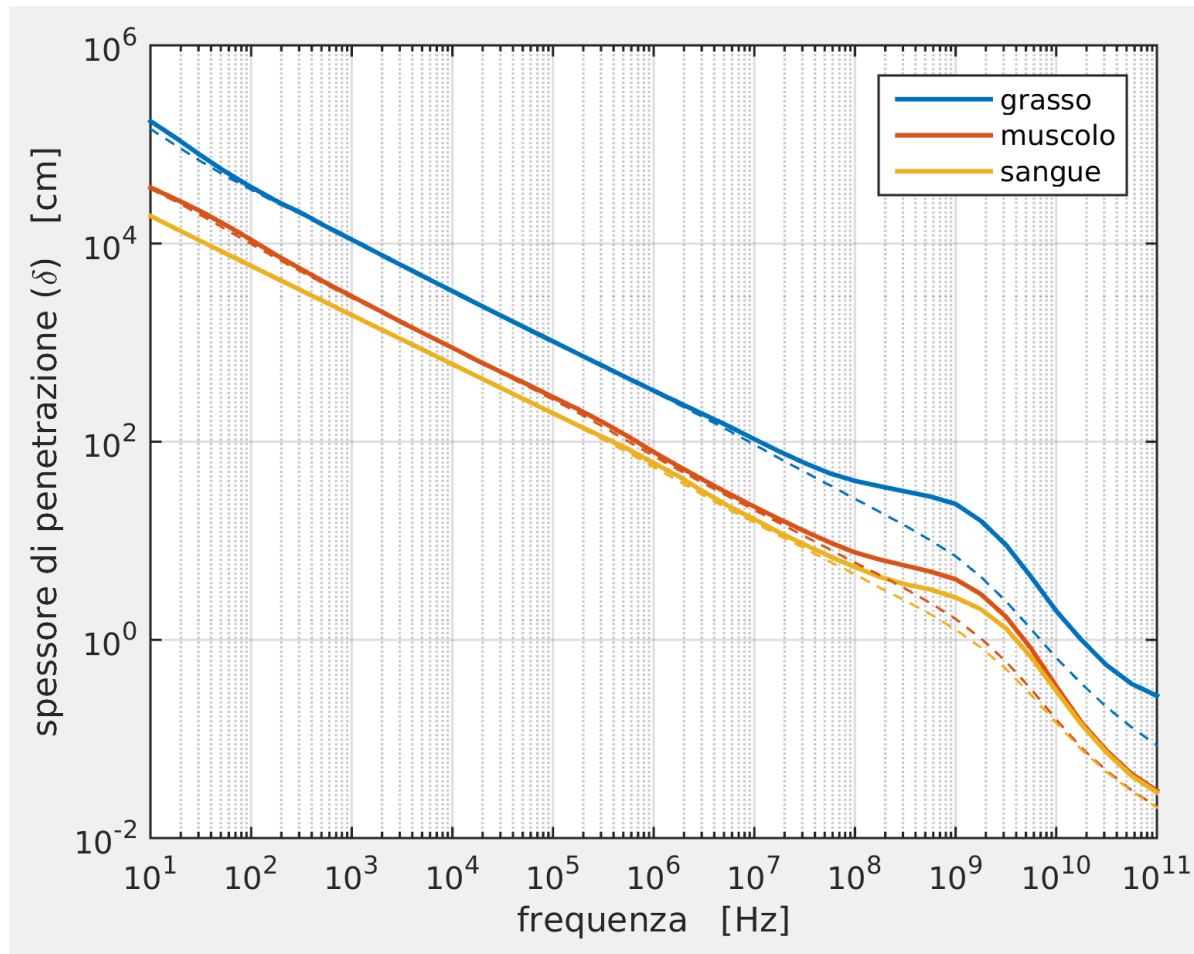
$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu_2 \sigma_2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega \epsilon_2}{\sigma_2} \right)^2} - \left(\frac{\omega \epsilon_2}{\sigma_2} \right)}}$$

L'impedenza d'onda è data dall'espressione generale per le onde piane uniformi:

$$\eta_t = j \frac{\omega \mu_2}{\mathbf{s}_t \cdot \hat{\mathbf{k}}_t} = j \frac{\omega \mu_2}{|\mathbf{a}_t| + j |\mathbf{k}_t|}$$

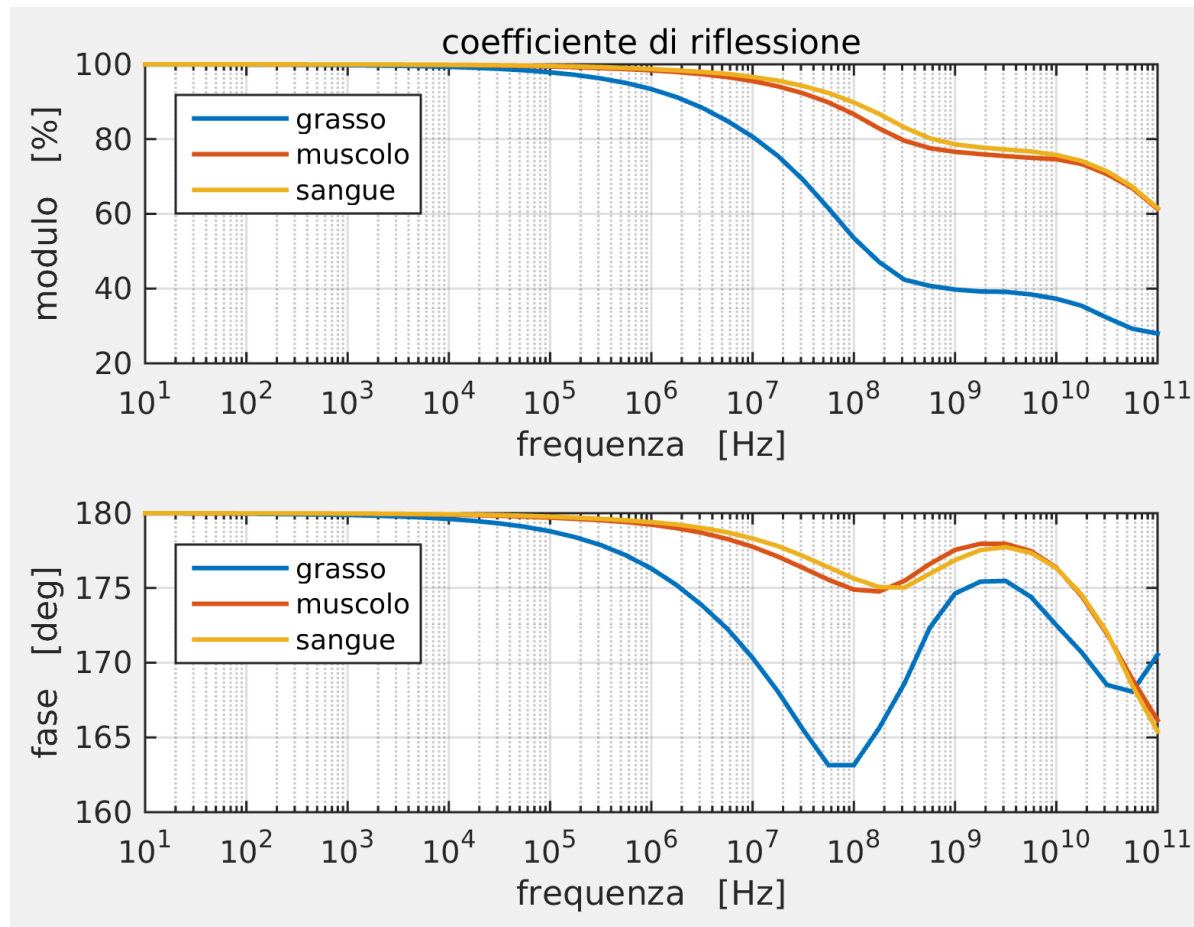
Il coefficiente di riflessione si valuta come al solito: $\rho = (\eta_t - \eta_i) / (\eta_t + \eta_i)$

Proprietà dei tessuti biologici



Calcolato per incidenza normale.

Le curve tratteggiate si riferiscono alla formula approssimata per i buoni conduttori



Coefficiente di riflessione del campo elettrico per incidenza normale.

Dosimetria degli effetti termici: lo Specific Absorption Rate (SAR)

Il SAR è una grandezza locale; per motivi pratici vengono definiti e valutati anche SAR "medi" su volumi arbitrari:

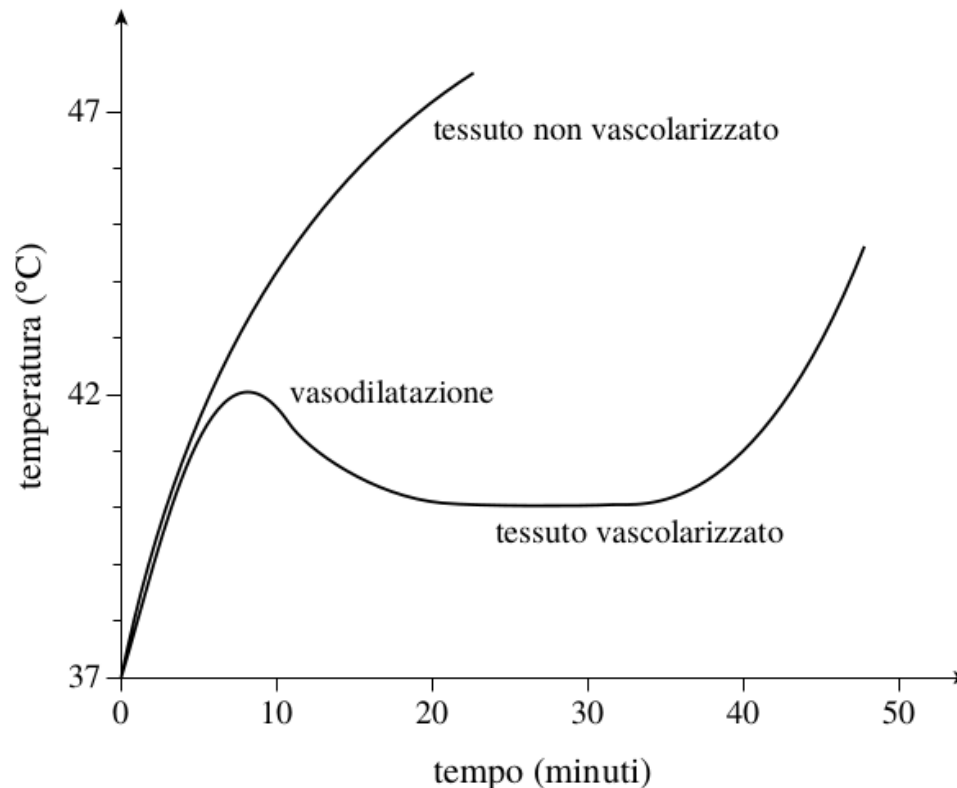
$$SAR_V = \frac{\int_V \frac{1}{2} \sigma(\mathbf{r}) |\mathbf{E}(\mathbf{r})|_{\text{rms}}^2 dV}{\int_V \rho_m(\mathbf{r}) dV} = \frac{\text{potenza EM assorbita nel volume } V}{\text{massa del volume } V} \quad [\text{W/kg}]$$

Tipici volumi di riferimento per la valutazione del SAR sono:

- Volumetti di 1g di massa (SAR_{1g})
- Volumetti di 10g di massa (SAR_{10g})
- La testa (SAR-head, SAR_H)
- Il corpo intero (SAR-whole-body, SAR_{WB})

Riscaldamento dei tessuti

- L'esposizione per 30 min di un essere umano a riposo ad un campo EM che produca un **SAR whole-body** di circa 1 – 4 W/kg, induce un aumento di temperatura corporea di meno di 1 °C.
- Il calore metabolico basale a riposo è di circa 1.3 W/kg ed aumenta fino ad un fattore 10 nel caso di intensa attività fisica.



Stima del SAR indotto

La stima del SAR indotto dall'esposizione a campi EM è un problema molto complesso, perché dipende da molti fattori come:

- Vicinanza alla sorgente
- Rapporto lunghezza d'onda/dimensione del corpo
- Polarizzazione del campo rispetto alla posizione del corpo
- Forma del corpo
- Posizione rispetto ad un piano di massa
- Proprietà elettromagnetiche dei tessuti
- Proprietà termiche/biologiche dei tessuti (ad esempio gli occhi sono poco vascolarizzati e quindi soggetti a più facile riscaldamento)

Modelli analitici

Si approssima il corpo con volumi omogenei di varia forma (sfere, sferoidi prolatti, ellissoidi, cilindri) e si calcola la potenza assorbita in ipotesi di irraggiamento da onda piana uniforme. Forniscono stime qualitative sulla dipendenza del fenomeno dai vari parametri.

Modelli numerici

Risolvono le eq. di Maxwell per il problema specifico e forniscono soluzioni "esatte". Sono applicabili solo a volumi "piccoli" (un corpo umano); non evidenziano facilmente la dipendenza dai parametri.

Stima del SAR indotto: onda piana incidente



Polarizzazione E

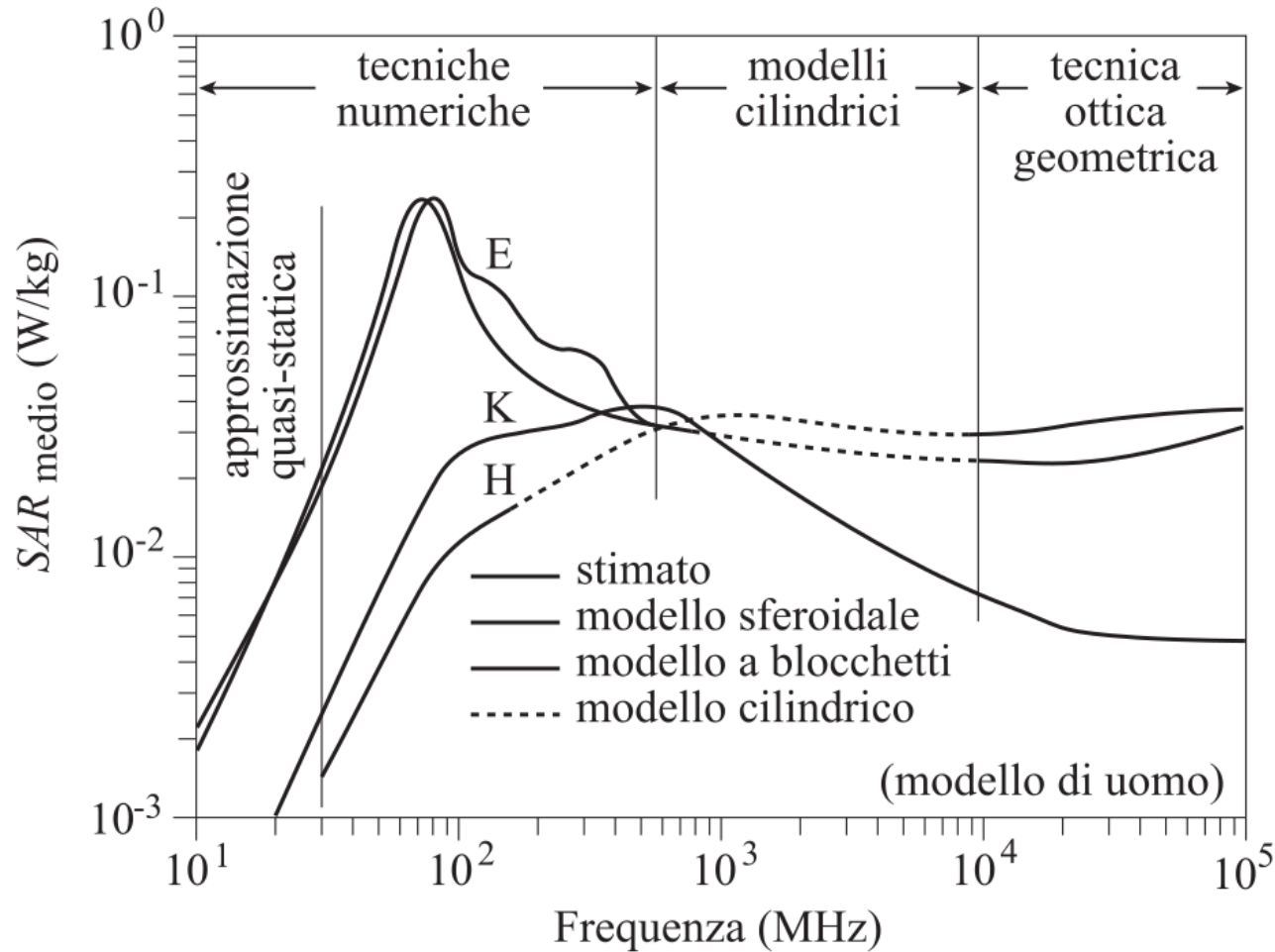


Polarizzazione H



Polarizzazione K

Altezza essere umano: 1.75 m – Peso: 70 kg – Potenza incidente: 1 mW/cm²



Il picco del SAR intorno a 100 MHz è di notevole importanza pratica.

L'essere umano come antenna

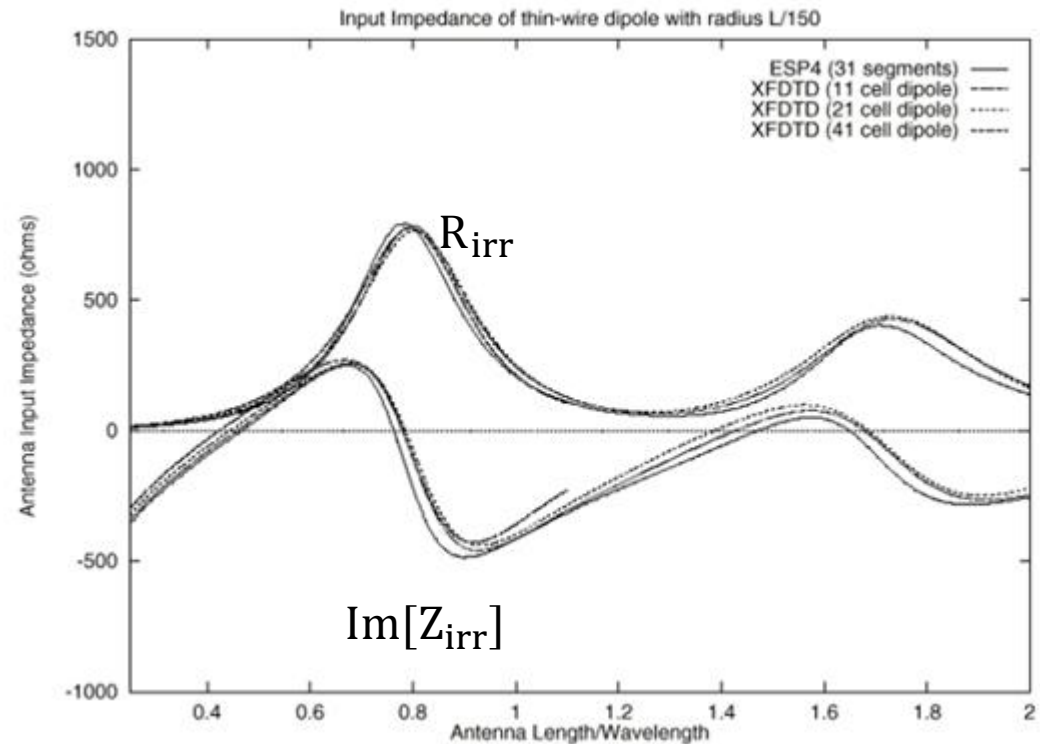
Potenza attiva irradiata

$$P_{\text{irr}} = \frac{1}{2} R_{\text{irr}} I_0^2$$

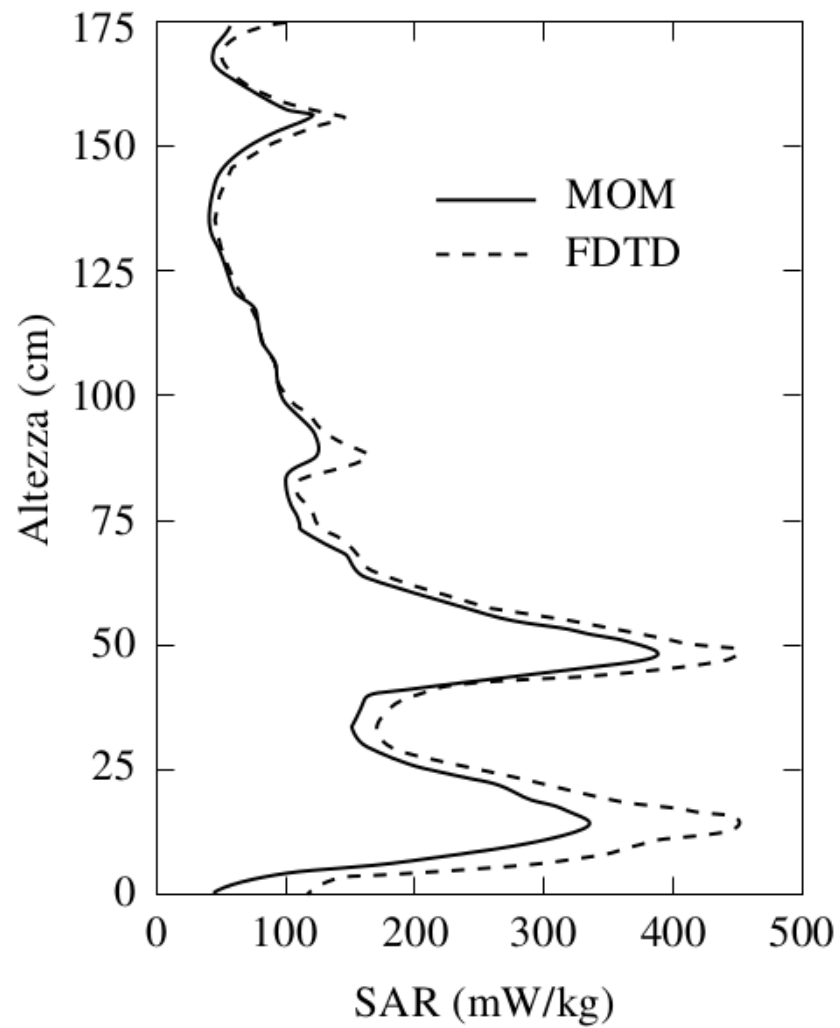
Il picco della resistenza di radiazione a circa 0.8λ indica una "risonanza" dell'antenna. Per il teorema di reciprocità, a questa corrisponde anche una aumentata capacità di ricezione.

$$\frac{L}{\lambda} \approx 0.8 \Rightarrow f_{\text{ris}} \approx \frac{0.8 c}{L}$$

Un essere umano di altezza A in piedi sul terreno si "comporta" elettromagneticamente come un'antenna di lunghezza $L = 2A$. Assumendo altezze tra 1.6 e 1.8 m si trovano frequenze di risonanza tra circa 65 e 75 MHz.

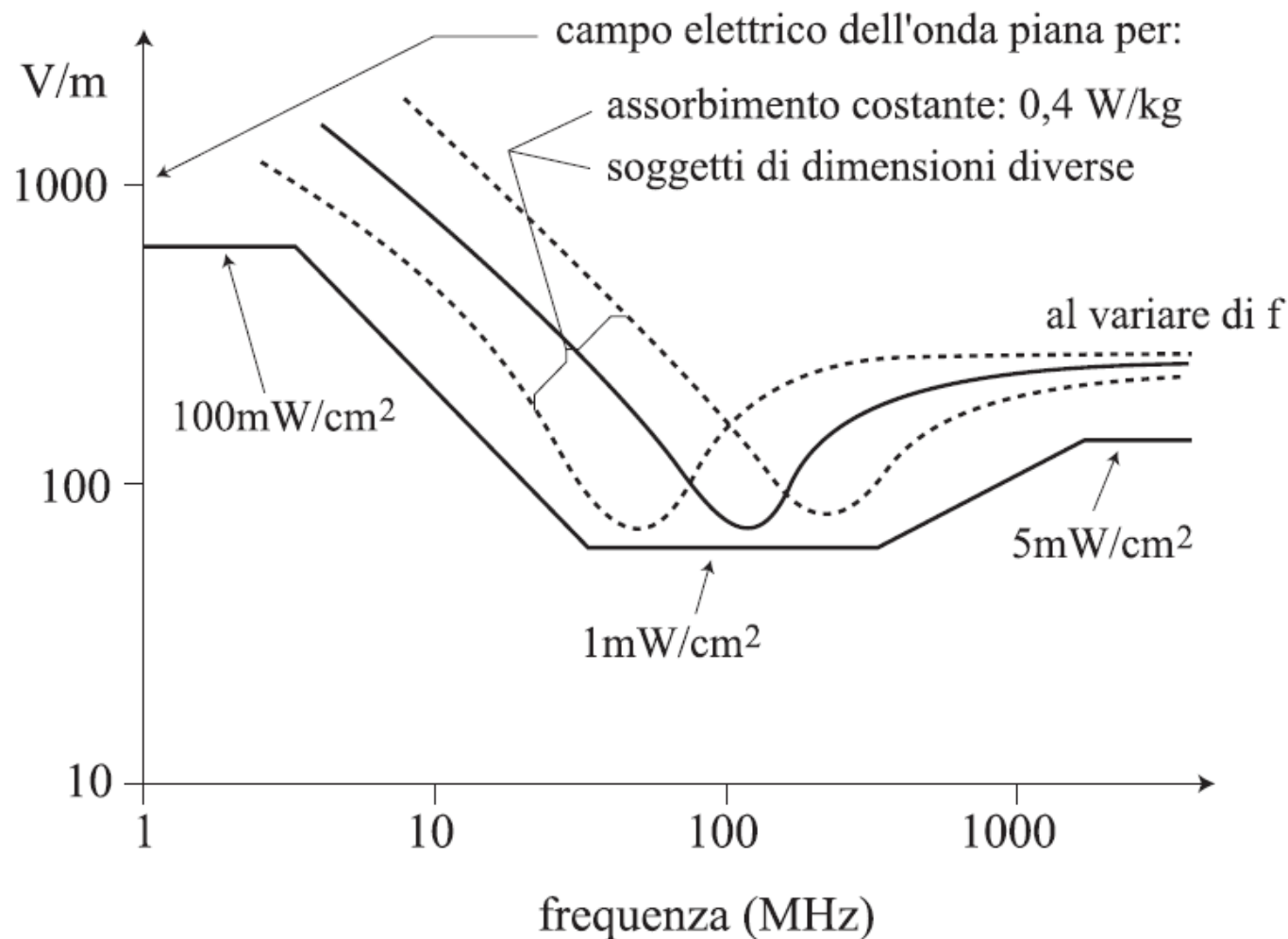


SAR localizzato

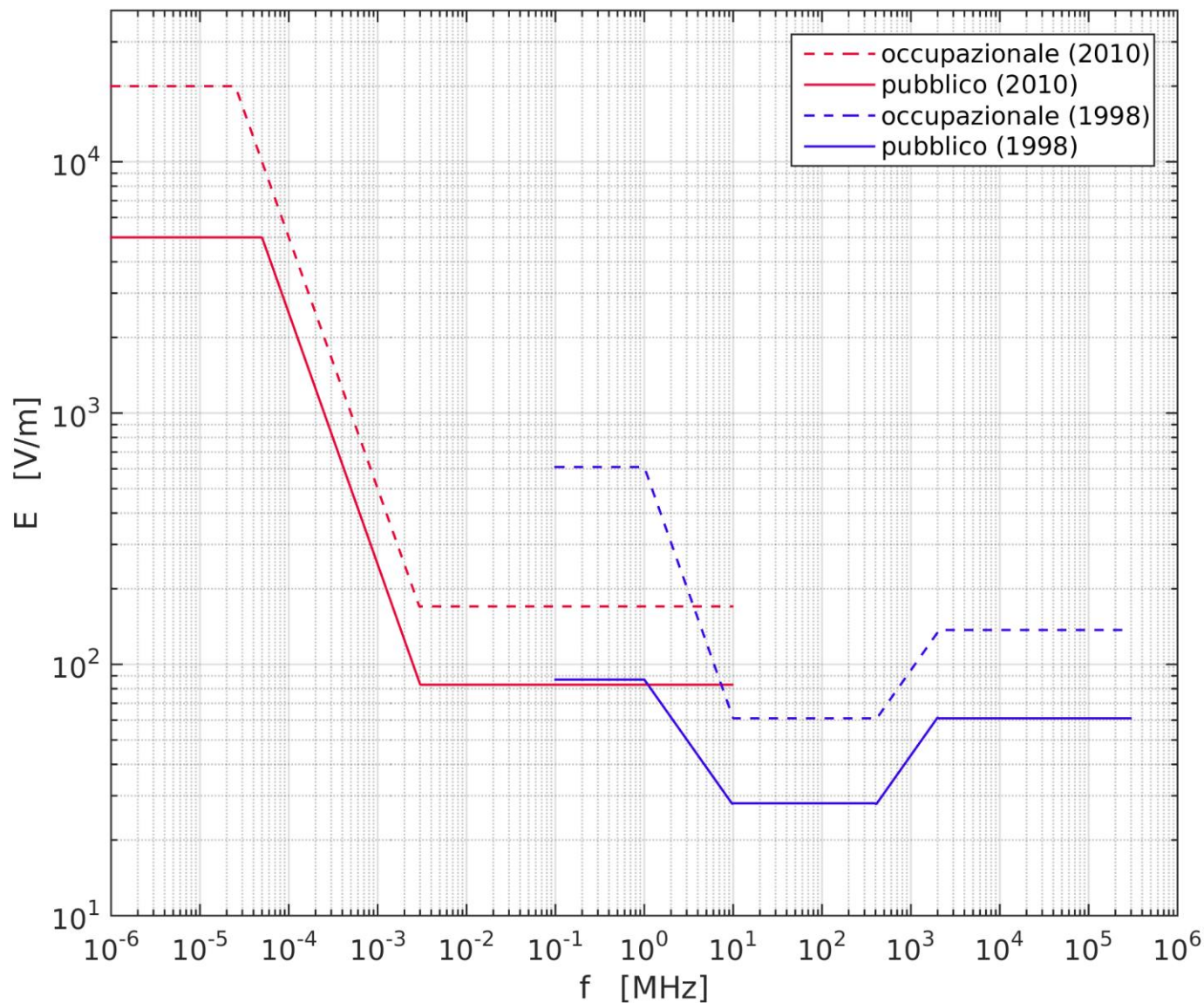


Passo 1: determinazione del campo elettrico (o densità di potenza) di un'onda piana che fornisca un SAR pari al valore del metabolismo basale (0.4W/kg).

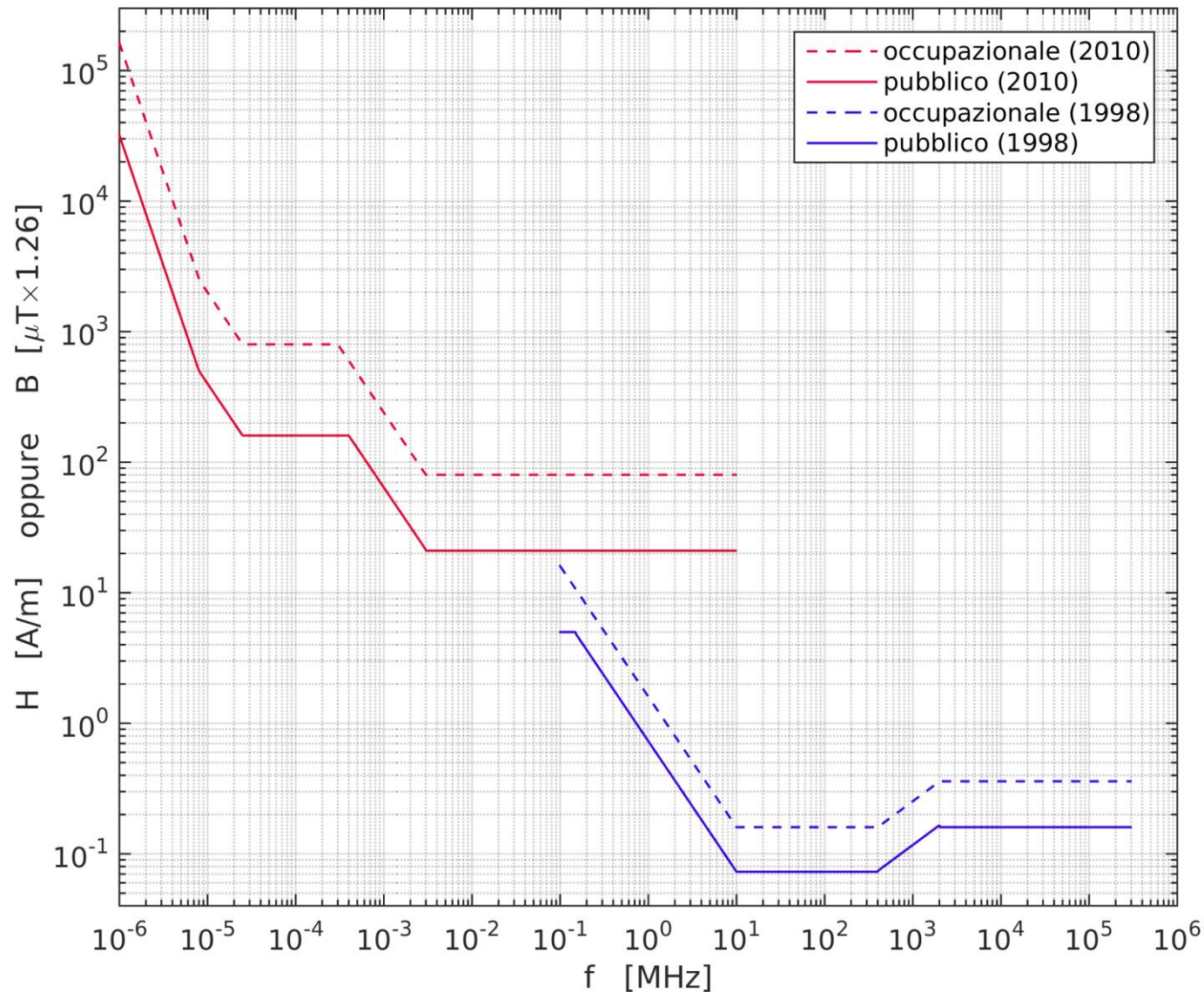
Passo 2: definizione di un margine rispetto al valore calcolato.



ICNIRP: livelli di riferimento, campo elettrico



ICNIRP: livelli di riferimento, campo magnetico



La legislazione europea

- La commissione europea è sensibile alla questione dei campi elettromagnetici, alla quale ha dedicato una sezione del suo sito Internet per spiegare alla popolazione quali azioni intraprende.
http://ec.europa.eu/health/electromagnetic_fields/policy/index_en.htm
- Sostanzialmente la politica della UE è indirizzata dalla Raccomandazione del Consiglio 1999/519/EC, che accoglie le indicazioni delle linee guida del 1998 dell'ICNIRP.
- A questa si ispirano una serie di **direttive** e **standard tecnici** che regolamentano l'esposizione ai campi EM e la commercializzazione e messa in opera di dispositivi che emettono campo EM.
- Il CENELEC (Comitato Europeo per la Standardizzazione Elettrotecnica, creato nel 1973 dalla Commissione Europea) produce gli standard tecnici conformi alle leggi europee ai quali devono sottostare produttori e/o distributori per ricevere il marchio CE e quindi commercializzare il prodotto sul suolo europeo.
- Su mandato della Commissione Europea, lo SCENIHR (Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks) revisiona periodicamente le linee guida dell'ICNIRP. Finora le ha sempre confermate.

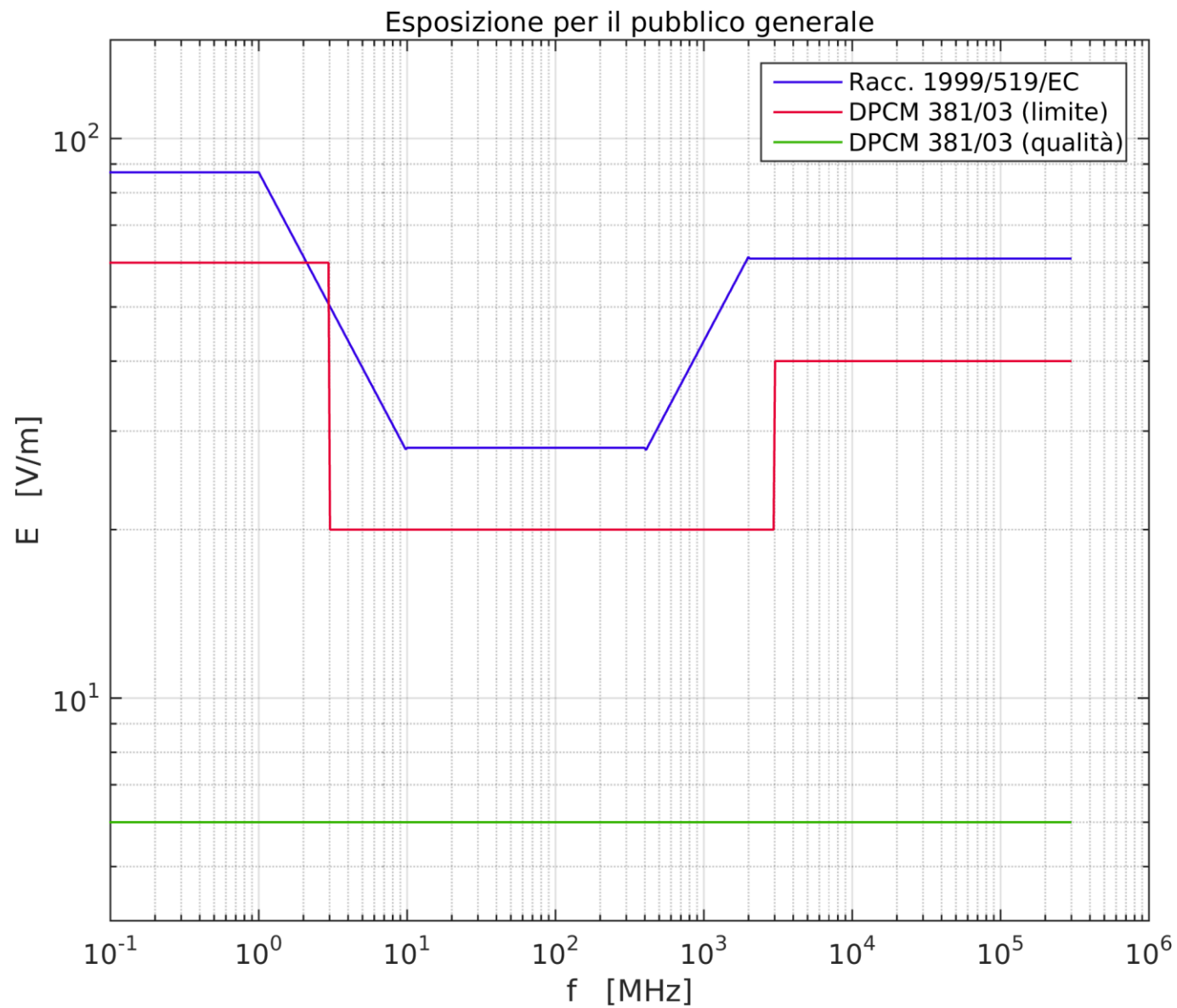
La legislazione italiana

La normativa italiana ha sostanzialmente recepito quella europea, abbassandone ulteriormente i livelli per quanto riguarda l'esposizione del pubblico generale.

- Decreto Ministeriale del 10 settembre 1998, n. 381 (DM 381/98).
Attualmente superato .
- Legge quadro 22 febbraio 2001 +
Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 8 luglio 2003 (DPCM 8.7.2003)
- Decreto Legislativo n. 257 del 19/11/2007 (DLgs 257/07).
Attualmente superato.
- Legge delega 123 del 3 agosto 2007 (L 123/07) +
Decreto Legislativo n. 81 del 9 aprile 2008 (DLgs 81/08)

	Limiti di Esposizione			Valori di cautela Obiettivi di qualità		
Frequenza [MHz]	E_{rms} [V/m]	H_{rms} [A/m]	S_{eq} [W/m ²]	E_{rms} [V/m]	H_{rms} [A/m]	S_{eq} [W/m ²]
0.1 – 3	60	0.2	-	6	0.016	-
>3 – 3000	20	0.05	1	6	0.016	0.1
>3000 – 300000	40	0.1	4	6	0.016	0.1

Art. 3, comma 2: *"A titolo di misura di cautela per la protezione da possibili effetti a lungo termine eventualmente connessi con le esposizioni ai campi generati alle suddette frequenze all'interno di edifici adibiti a permanenze non inferiori a quattro ore giornaliere, e loro pertinenze esterne, che siano fruibili come ambienti abitativi quali balconi, terrazzi e cortili esclusi i lastrici solari, si assumono i valori di attenzione indicati nella tabella 2 all'allegato B."*

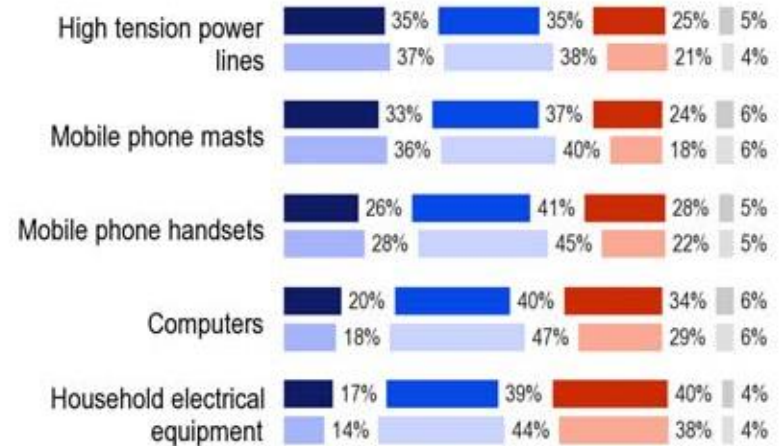
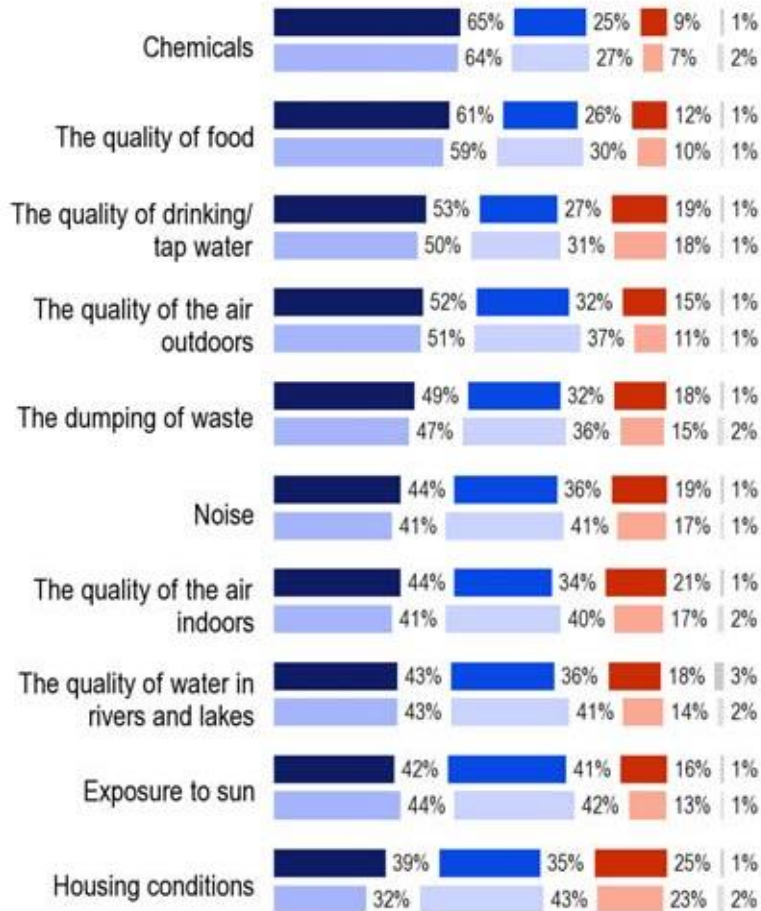


Percezione del rischio da esposizione ai campi EM

- Eurobarometer (<http://ec.europa.eu/COMMFrontOffice/PublicOpinion/>) è un servizio della Commissione Europea che effettua sondaggi sulla popolazione comunitaria in merito a diversi aspetti sociali.
- Nel 2010 è stato ripetuto un sondaggio (già fatto nel 2006) sui campi elettromagnetici (Eurobarometer 73.3) nel quale, in particolare, è stato valutato il rischio percepito per esposizione ai campi.
- Sono state intervistati faccia-a-faccia 26.602 cittadini europei.
- La percezione del rischio da esposizione ai campi è stata confrontata con altri effetti, per un totale di 15 voci.
- Le domande poste erano del tipo "in che misura pensi che *una certa cosa* influisca sulla tua salute?"

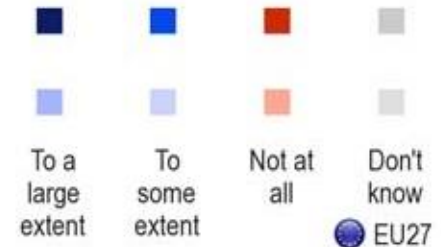
Percezione del rischio da esposizione ai campi EM

QC1. Please tell me to what extent you think each of the following affects your health.



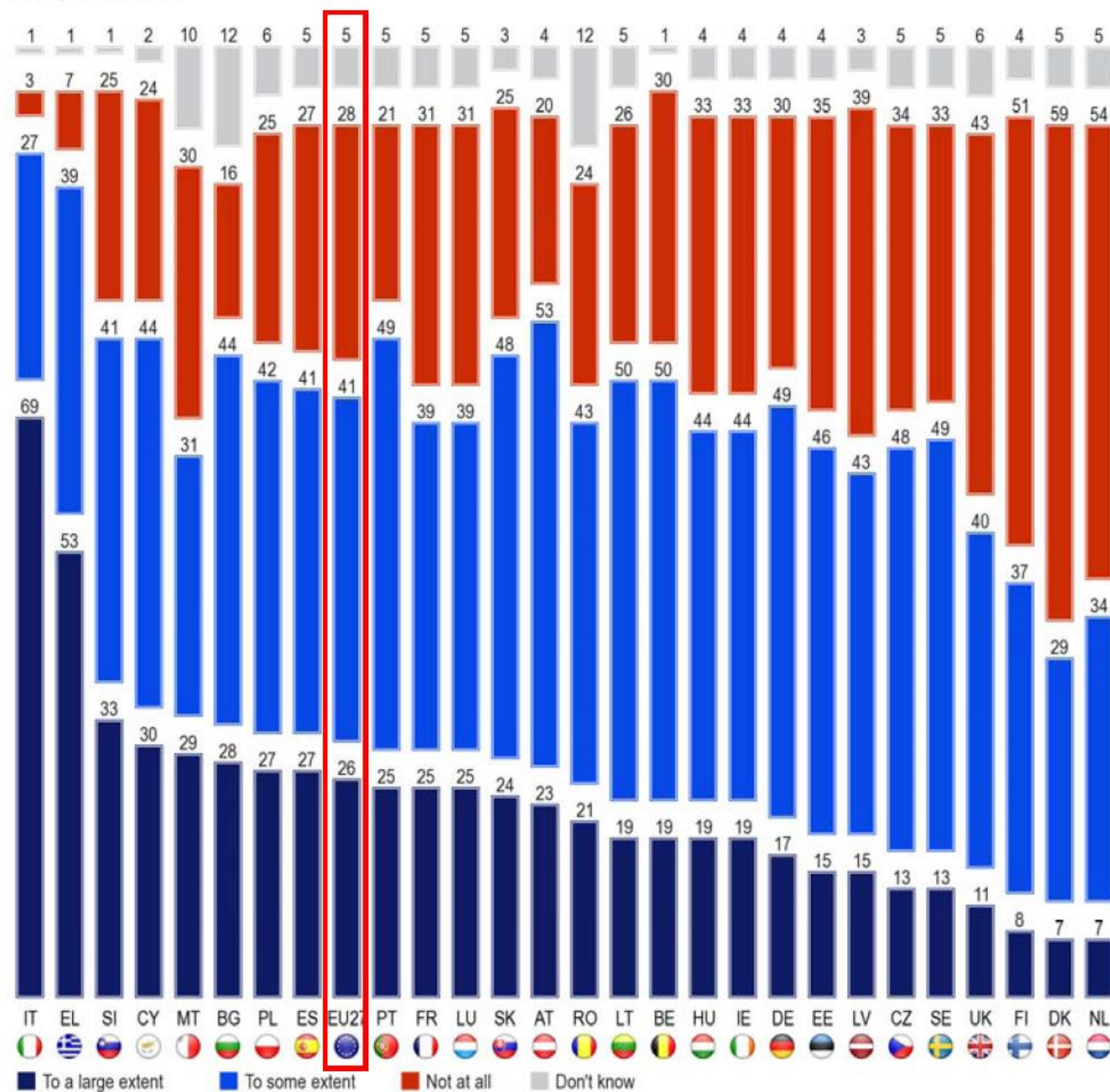
EB73.3,
03-04/2010

EB66.2,
10-11/2006



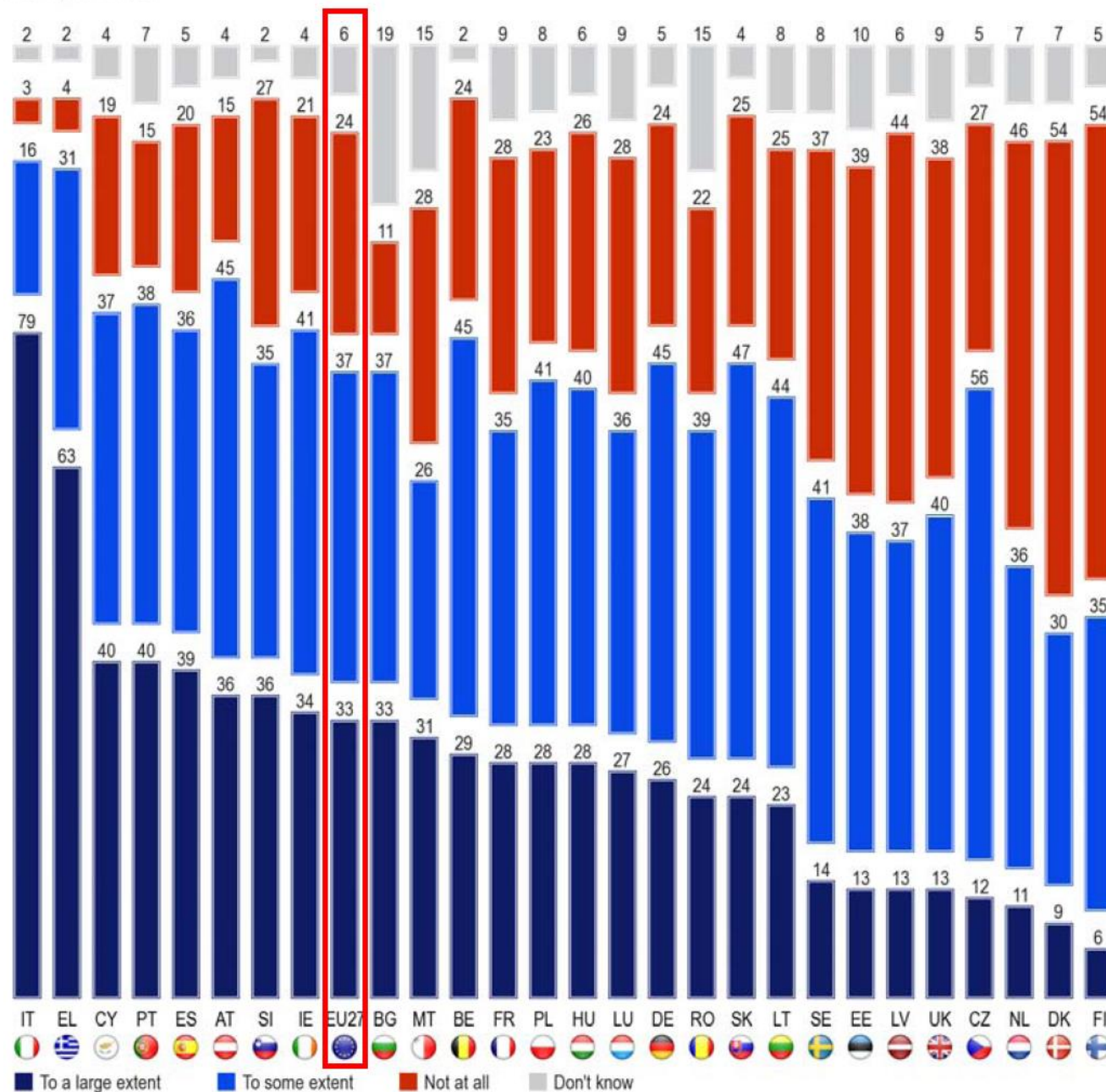
QC1.11. Please tell me to what extent you think each of the following affects your health.

Mobile phone handsets



QC1.12. Please tell me to what extent you think each of the following affects your health.

Mobile phone masts

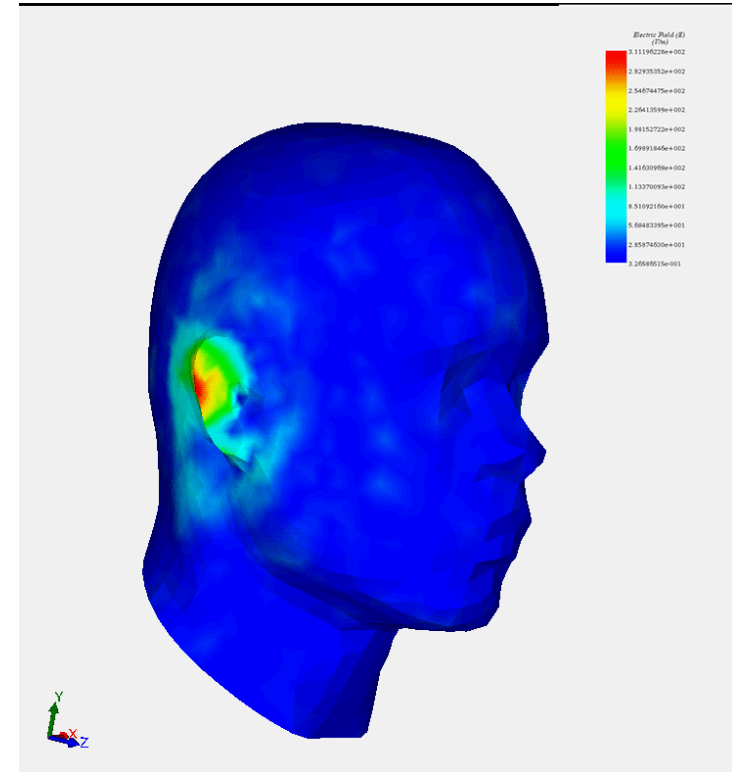


L'omologazione dei cellulari.

La valutazione del SAR per la testa umana non può basarsi sull'approssimazione di onda piana.

Essenzialmente si deve ricorrere a simulazioni numeriche con modelli il più possibile precisi della composizione della testa (in termini di ϵ e σ).

Si deve valutare un SAR locale.



L'FCC mette a disposizione degli utenti un sito internet (<https://www.fcc.gov/oet/ea/fccid>) dal quale si ha accesso a tutta la documentazione che le ditte devono presentare per dimostrare che i loro dispositivi (cellulari, router wi-fi, ecc.) rispettano ai limiti di SAR (limitatamente ai modelli più recenti).

Un analogo sistema per la gestione della documentazione dovrebbe diventare operativo anche in Europa entro il 2018.

Figure e tabelle da

D. Andreuccetti et al., PROTEZIONE DAI CAMPI ELETTROMAGNETICI NON IONIZZANTI, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Firenze 2001.

Pellegrini – Conciauro, Fondamenti di onde elettromagnetiche, McGraw-Hill 2003.

Eurobarometer (<http://ec.europa.eu/COMMFrontOffice/PublicOpinion/>)