

Laurea in scienze ambientali e naturali

Fisica Applicata all'Ambiente

Radiazioni non ionizzanti

<http://www.ge.infn.it/~prati>

Riferimenti Bibliografici

CEI 211-6 Guida per la misura e la valutazione dei campi elettrici e magnetici nell'intervallo di frequenza 0 Hz - 10 KHz, con riferimento all'esposizione umana

(ARPAL/Ingegneria)

CEI 221-7 Guida per la misura e la valutazione dei campi elettromagnetici nell'intervallo di frequenza 10 KHz - 300 GHz, con riferimento all'esposizione umana

(ARPAL/Ingegneria)

CEI 221-4 Guida ai metodi di calcolo dei campi elettrici e magnetici generati da linee elettriche

(ARPAL/Ingegneria)

<http://www.arpa.veneto.it/agf/cem.htm>

(ARPAV)

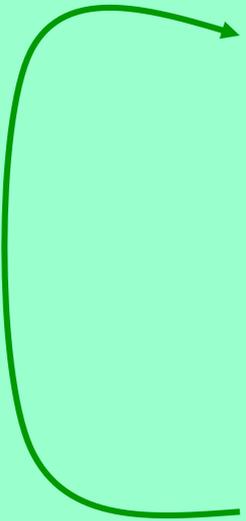
Spettro di frequenze delle onde e.m.

N
I
R

ν (Hz)	λ (m)	Sorgenti
10^0	$3 \cdot 10^8$	Linee elettriche, macchine industriali e domestiche, Trasporto, diagnosi e terapia.
10^1	$3 \cdot 10^7$	
10^2	$3 \cdot 10^6$	
10^3	$3 \cdot 10^5$	
10^4	$3 \cdot 10^4$	
10^5	$3 \cdot 10^3$	Ripetitori radio e TV, Walkie talkie.
10^6	$3 \cdot 10^2$	
10^7	$3 \cdot 10^1$	
10^8	$3 \cdot 10^0$	
10^9	$3 \cdot 10^{-1}$	Radar, cellulari, Satelliti, processi a microonde, radioastronomia
10^{10}	$3 \cdot 10^{-2}$	
10^{11}	$3 \cdot 10^{-3}$	
10^{12}	$3 \cdot 10^{-4}$	
10^{13}	$3 \cdot 10^{-5}$	Infrarosso, applicazioni laser
10^{14}	$3 \cdot 10^{-6}$	

Spettro di frequenze delle onde e.m.

ν (Hz)	λ (m)	Sorgenti
10^{15}	$3 \cdot 10^{-7}$	luce
10^{16}	$3 \cdot 10^{-8}$	visibile
10^{17}	$3 \cdot 10^{-9}$	UV
10^{18}	$3 \cdot 10^{-10}$	
10^{19}	$3 \cdot 10^{-11}$	
10^{20}	$3 \cdot 10^{-12}$	Raggi X
10^{21}	$3 \cdot 10^{-13}$	
10^{22}	$3 \cdot 10^{-14}$	Raggi γ



Radiazioni Ionizzanti

Bande dello spettro e.m.

L'International Telecommunication Union (ITU) ha diviso la parte dello spettro e.m. normalmente utilizzata in “bande”:

Banda	ν	λ	Denominazione
ELF	< 100 Hz	> 33 Mm	
SLF	0.1- 10 kHz	33 –0.03 Mm	
VLF	10 kHz-30 KHz	33-10 km	
LF	30 –300 kHz	10 – 1 km	Chilometriche
MF	300-3000 kHz	1-0.1 km	Ettometriche
HF	3-30 MHz	100 – 10 m	Decametriche
VHF	30-300 MHz	10- 1 m	Metriche
UHF	300-3000MHz	1-0.1 m	Decimetriche
SHF	3-30 GHz	10-1 cm	Centimetriche
EHF	30-300 GHz	10-1 mm	Millimetriche

RF

radiofrequenza

MW

microonde

Effetti biologici delle NIR 1

Convenzionalmente si assume che una radiazione con energia < 12 eV (corrispondente a 100 nm e $3 \cdot 10^{15}$ Hz nel vuoto) non sia in grado di ionizzare un atomo:

Fenomeno	Energia di attivazione (eV)	Frequenza corrispondente (Hz)
Rottura legame H	$8 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{13}$ (IR)
Cambio reversibile di conformazione delle proteine	$4 \cdot 10^{-1}$	10^{14} (IR)
Rottura del legame covalente	5	$1.2 \cdot 10^{15}$ (UV)
Ionizzazione	12	$3 \cdot 10^{15}$ (UV)
Moto browniano	$2.6 \cdot 10^{-2}$	$6.3 \cdot 10^{12}$ (IR)
Energia quanto e.m. a 300 GHz	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{11}$ (MW)

Effetti biologici delle NIR 2

A frequenza < 300 GHz si possono attivare stati traslazionali, vibrazionali, oscillazioni di dipoli e/o di cariche spaziali con ritorno allo stato iniziale sostanzialmente per dissipazione termica. Il meccanismo di interazione è classico tra il campo e.m. e cariche libere e dipoli con la induzione di correnti elettriche e fenomeni di polarizzazione. Gli effetti biologici sono pertanto legati a grandezze interne al corpo umano: campo elettrico e densità di corrente.

La componente magnetica può trasferire direttamente energia al tessuto biologico solo se questo contiene un numero sufficiente di dipoli magnetici. In questo caso l'allineamento con il campo esterno genera calore per fenomeni di attrito. Questo meccanismo è solitamente trascurabile perché il numero di dipoli magnetici nel tessuto è molto piccolo. Più importante è l'induzione nel tessuto di un campo elettrico variabile con i conseguenti effetti indiretti di tipo elettrico.

Per campi magnetici nella regione ELF (in particolare a 50 – 60 Hz) sono stati supposti effetti risonanti che inibirebbero la produzione della Melatonina che ha effetti di prevenzione della cancerogenesi. Non esistono al momento dati certi a riguardo così come per tutti gli effetti cancerogeni o genetici non direttamente legati a fenomeni termici.

Sorgenti e fondo naturale

La densità di potenza del campo e.m. “naturale” varia nel pianeta ma si mantiene nell’ordine dei pW/cm^3 . Le sorgenti artificiali hanno intensità che localmente può superare il fondo fino a 12 OdG → anche se in gran parte ancora non compreso, specie per quanto riguarda gli effetti delle esposizioni prolungate ad intensità medio/piccole, il problema esiste.

Alcuni esempi:

Sorgente	Frequenza	Potenza
Forni a μ onde	1 –2.5 GHz	600 W
Cellulari GSM	1 GHz	0.1 W
Antenne TV	30 kHz- 3 GHz	10-100 kW
Telepass	5.7 GHz	0.1 W
Antenne GSM	1 GHz	100W

Propagazione campi e.m. nei tessuti

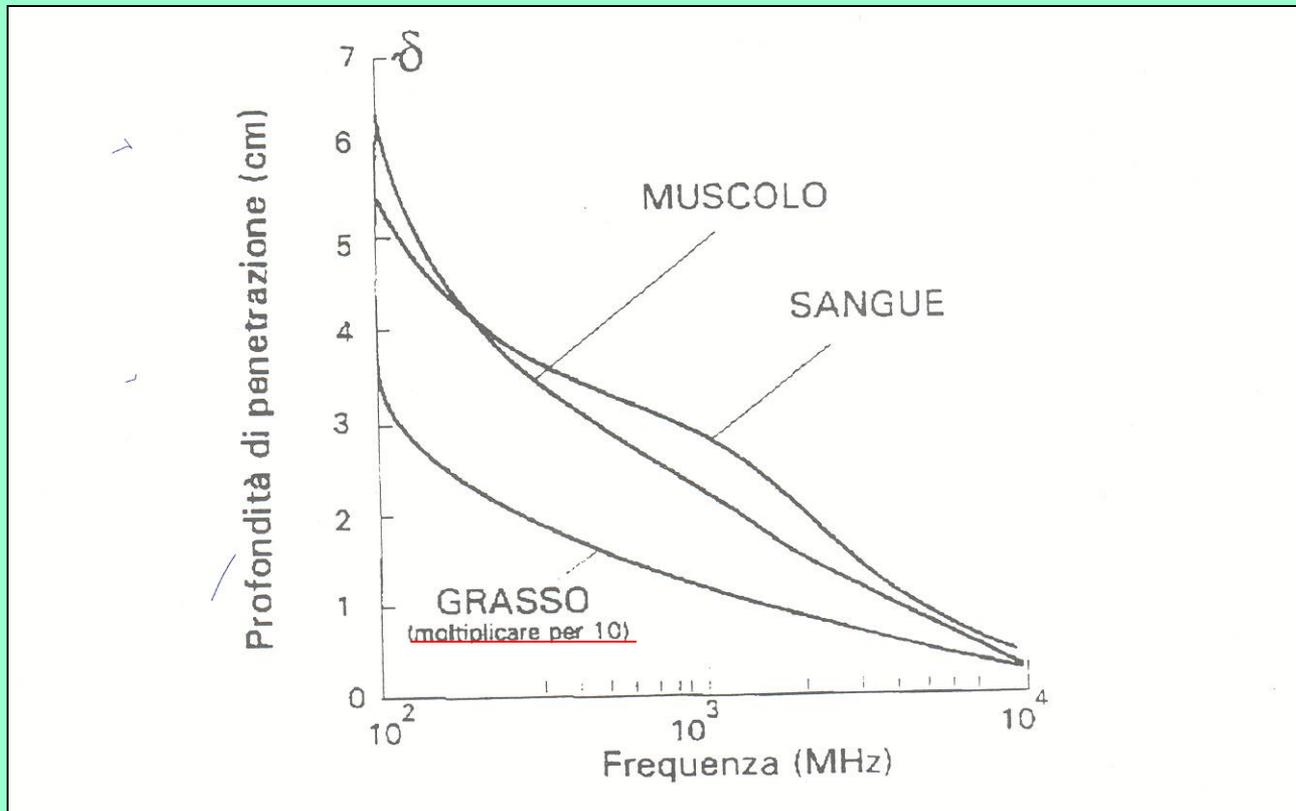
Quando un'onda e.m. attraversa la superficie di separazione tra due mezzi con ϵ, σ, μ , diversi parte dell'energia viene riflessa e quella trasmessa si attenua nel secondo mezzo secondo la:

$$S(z) = S_0 e^{-2\alpha z} \quad (\text{vettore di Poynting})$$

Dove α è funzione crescente della ν . Il reciproco di α , δ rappresenta la profondità alla quale la densità di potenza si è ridotta del 86%:

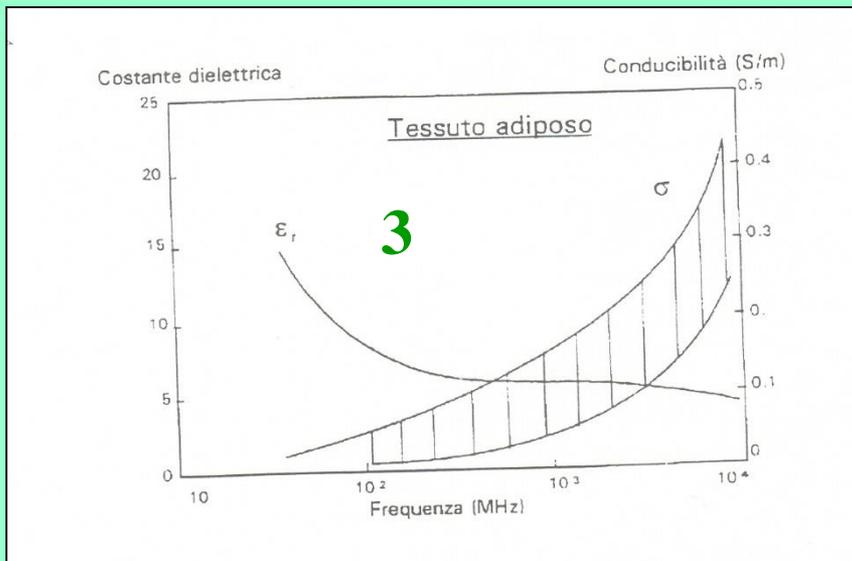
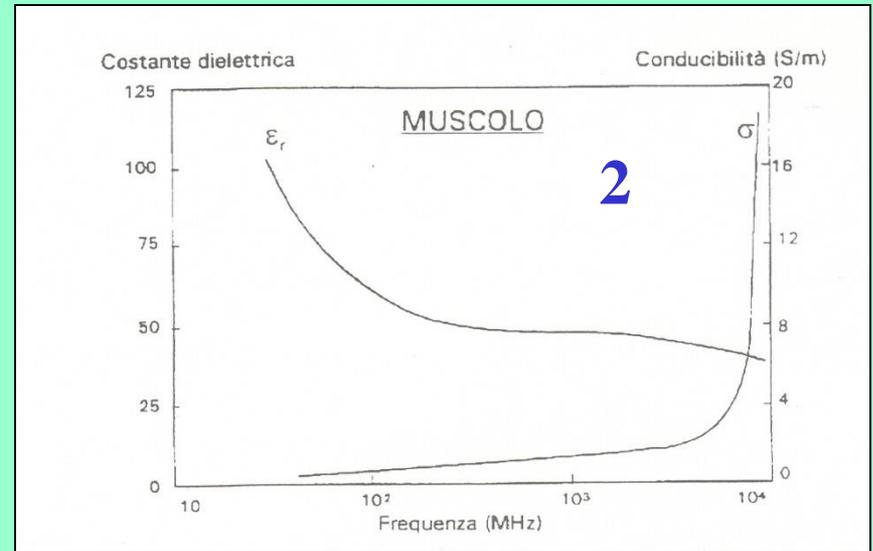
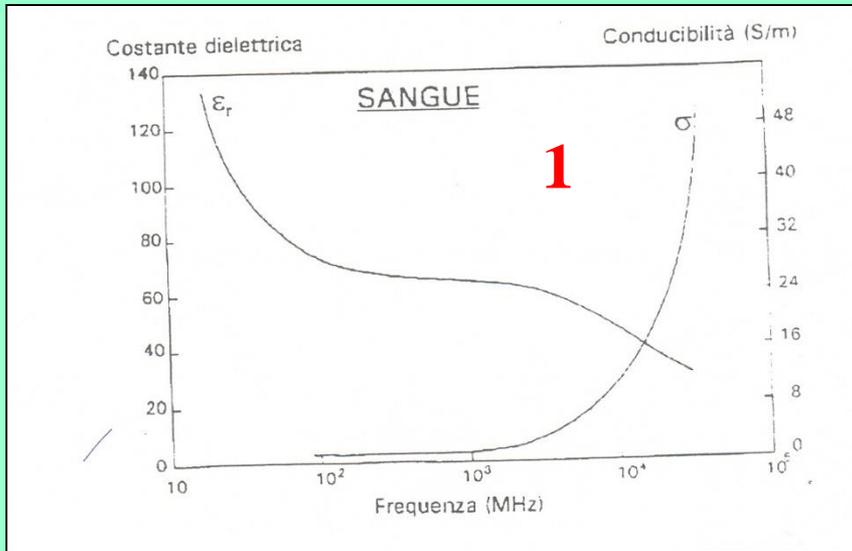
$$\delta = \frac{c}{\omega \left\{ \frac{\epsilon_r}{2} \left[\left(1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon_r^2 \epsilon_0^2} \right)^{1/2} - 1 \right] \right\}^{1/2}}$$

Penetrazione nel tessuto biologico



Le differenze dipendono sostanzialmente dal contenuto d'acqua dei diversi tessuti

Proprietà dei tessuti



1 Contenuto H₂O >90% - Sangue, liquido cerebrospinale

2 Contenuto H₂O ≈ 80% - Pelle, muscolo, cervello, organi interni

3 Contenuto H₂O ≈ 50% - Grasso, tendini, ossa

Il S.A.R. 1

Il corpo umano è un sistema complesso e al suo interno, per la continua variazione delle proprietà elettriche si possono creare interferenze e risonanze con assorbimenti dell'energia e.m. in zone particolari dipendenti anche dalla polarizzazione del campo e dalle condizioni “ambientali”

E' quindi molto complicato correlare un campo e.m. con l'effettivo assorbimento di potenza e quindi con gli effetti biologici. La grandezza che attualmente si utilizza per valutare gli effetti biologici è l'Assorbimento Specifico (SA) = dE/dm e soprattutto il Tasso di Assorbimento Specifico (SAR= Specific Absorbition Rate) = dW/dm che si può calcolare con la:

$$SAR = \frac{\sigma E_{eff}^2}{\rho}$$

con ρ in kg/m^3 , σ in Siemens/m ed E in V/m

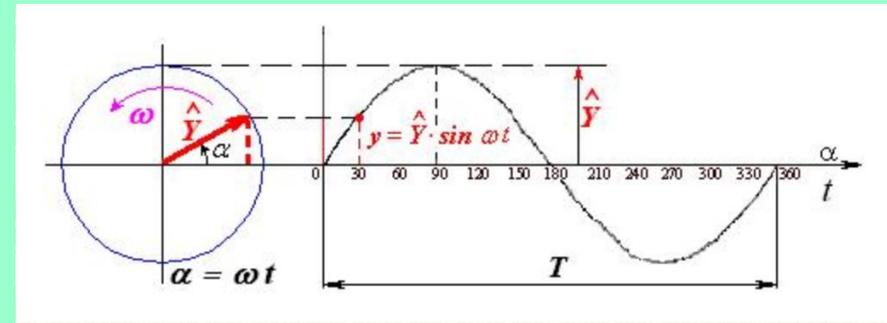
Sul significato del termine E^2_{eff}

Le grandezze «efficaci» (da cui il pedice «eff») sono introdotte tipicamente in elettrotecnica e comunque sono definite/riferite a grandezze il cui valore varia periodicamente nel tempo e al loro comportamento «medio».

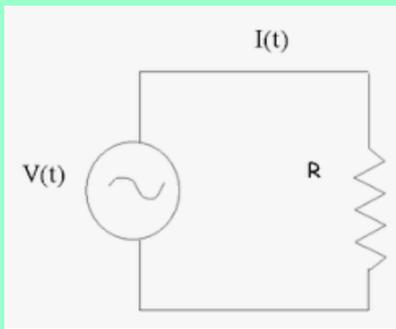
In generale consideriamo la grandezza generica $y = \sin(t)$

Per definizione:

$$\langle y \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin(t) dt = 0$$



Fin qui la matematica ma un fenomeno fisico caratterizzato da andamento periodico (ad esempio la propagazione di un'onda elettromagnetica) richiede una descrizione più approfondita. Consideriamo ad esempio un semplice circuito elettrico (in corrente «alternata»):



$$\text{Se } V(t) = V_0 \sin(\omega t) \rightarrow I(t) = \frac{V(t)}{R} = \frac{V_0 \sin(\omega t)}{R} = I_0 \sin(\omega t)$$

E chiaramente $\langle I(t) \rangle = 0$, indipendentemente dal valore di I_0

Sul significato del termine E_{eff}^2

Quindi nel circuito nella slide precedente il valor medio della corrente è sempre zero, sia che il generatore sia acceso o spento. Ma quello che succede nel circuito è ben diverso se I_0 è nulla o diversa da zero. Una grandezza che invece descrive l'effettivo «lavoro» compiuto dal generatore è la potenza elettrica erogata istante per istante e dissipata sulla resistenza; segue dalla legge di Ohm:

$$W(t) = V(t)I(t) = RI(t)^2 = V_0 \sin(\omega t) I_0 \sin(\omega t) = V_0 I_0 \sin^2(\omega t)$$

Quindi:

$$\langle W(t) \rangle = (V_0 I_0 \omega / 2\pi) \int_0^{2\pi/\omega} \sin^2(\omega t) dt = \frac{V_0 I_0}{2} = \frac{V_0}{\sqrt{2}} \frac{I_0}{\sqrt{2}} = V_{eff} I_{eff}$$

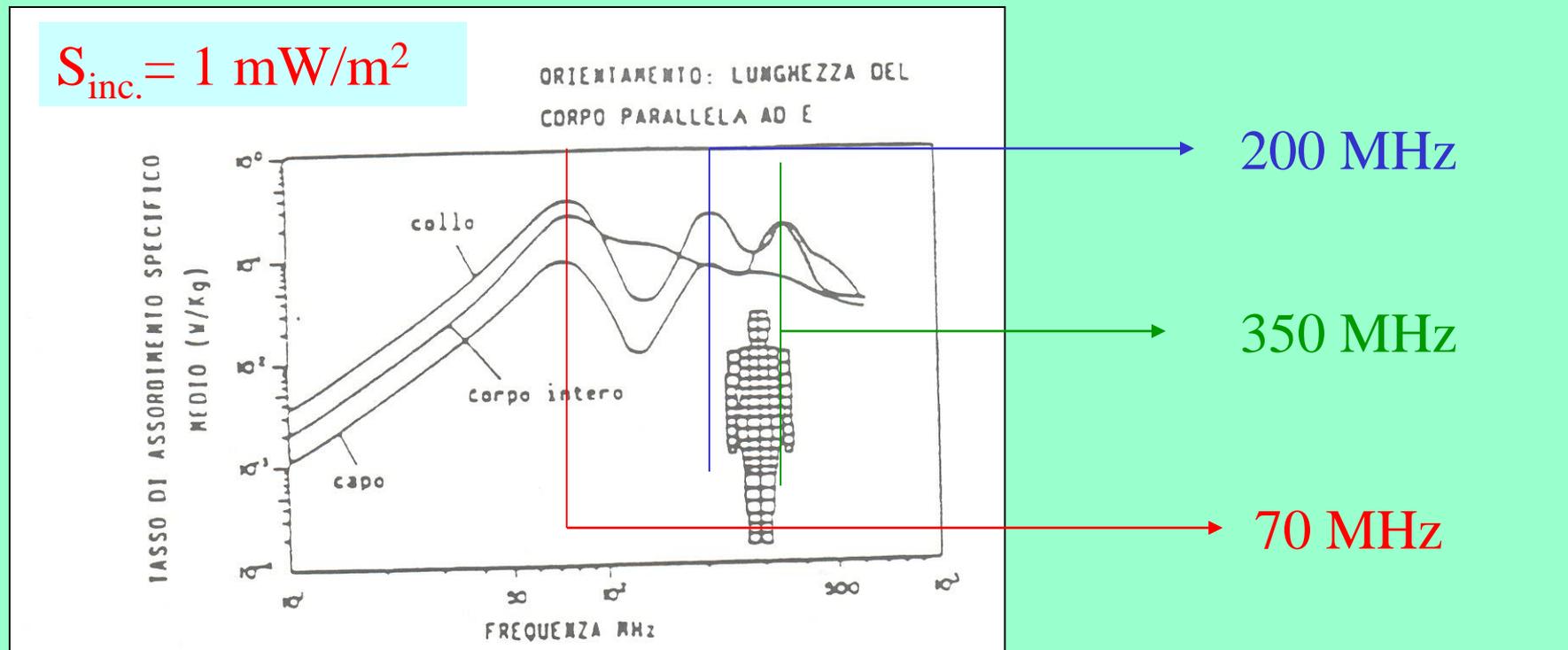
$$\text{Nota: } \int_0^{2\pi} \sin^2(x) dx = \int_0^{2\pi} \cos^2(x) dx = \pi$$

$$\text{Quindi nel caso di un'onda e.m.: } E_{eff}^2 = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \frac{E_0}{\sqrt{2}} \quad \text{con } E_0 = |\mathbf{E}|_{\max}$$

Nota: dal punto di vista matematico la definizione di «valore efficace» corrisponde al «valore quadratico medio».

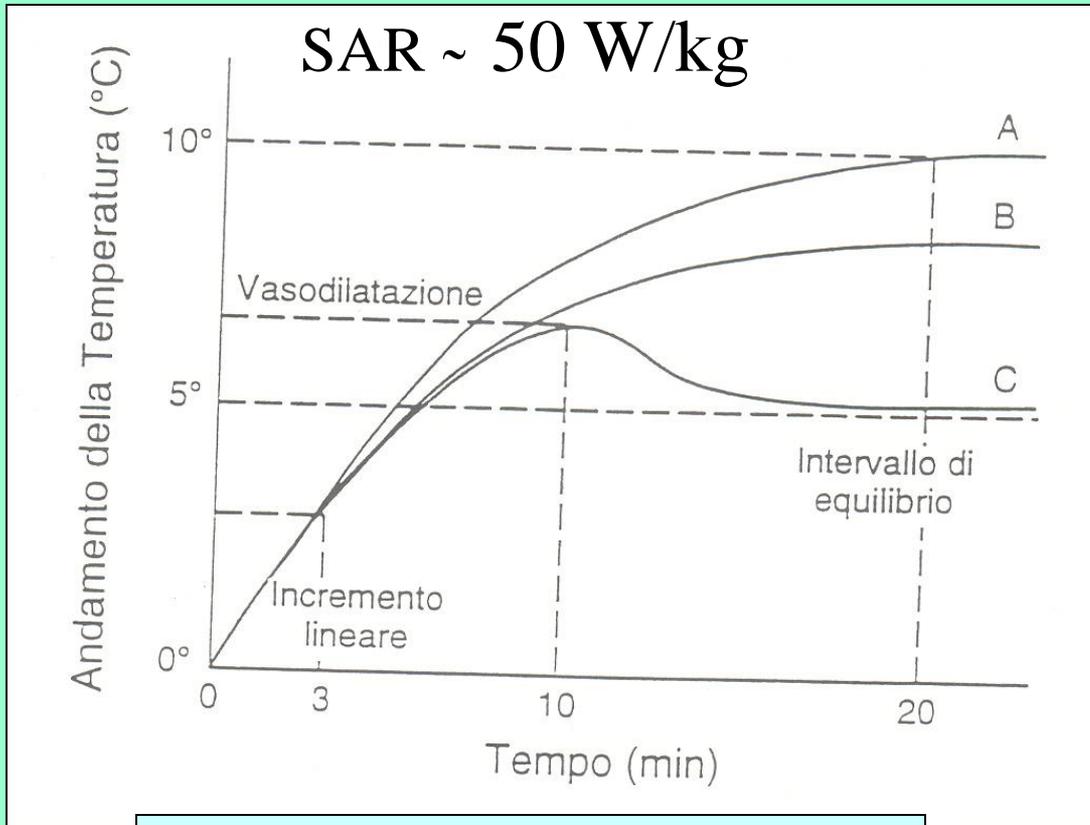
IL S.A.R. 2

Naturalmente il SAR può essere calcolato, con opportuni modelli, mediando sull'intero corpo o su singoli organi, il suo andamento in funzione della ν del campo e.m. presenta solitamente una risonanza legata alle dimensioni del corpo (o dell'organo)



$400 < \nu < 2000 \text{ MHz}$: regione dei “punti caldi”

Effetti termici



A: tessuti non vascolarizzati, **B:** poco vascolarizzati, **C:** ben vascolarizzati

Un aumento della temperatura corporea può alterare il metabolismo. Il sistema di termoregolazione dell'organismo ha una costante tempo di circa 6 minuti, quindi dopo alcuni minuti la temperatura si stabilizza... se l'esposizione è molto lunga o molto intensa l'aumento di temperatura può proseguire

Sull'uomo, aumenti della temperatura corporea di 1 grado, estrapolando da studi su animali, possono provocare danni (opacizzazione del cristallino, sterilità maschile)

Effetti termici e SAR

Per confronto

Metabolismo basale: 1.25 W/kg

Camminata rapida: 4 W/kg

Cataratta (nel coniglio): 100 W/kg per $t > 100$ minuti e $\nu = 2450$ MHz

10 W/kg nell'occhio umano $\rightarrow \Delta T = 1$ °C (calcolato !)

$SAR < 4$ W/kg $\rightarrow \Delta T < 1$ °C (nell'uomo, total body)

SAR suggerito dalla ICNRP: 0.4 W/kg total body per esposizioni professionali, 0.08 W/kg per la popolazione

Nota: per esposizione da cellulari il SAR dovrebbe essere mediato su una massa di 10 g (penetrazione nel cervello 2-3 cm...)

Limiti suggeriti

Exposure characteristics	Frequency range	Current density for head and trunk (mA m ⁻²) (rms)	Whole-body average SAR (W kg ⁻¹)	Localized SAR (head and trunk) (W kg ⁻¹)	Localized SAR (limbs) (W kg ⁻¹)
Occupational exposure	up to 1 Hz	40	—	—	—
	1–4 Hz	40/f	—	—	—
	4 Hz–1 kHz	10	—	—	—
	1–100 kHz	f/100	—	—	—
	100 kHz–10 MHz	f/100	0.4	10	20
General public exposure	10 MHz–10 GHz	—	0.4	10	20
	up to 1 Hz	8	—	—	—
	1–4 Hz	8/f	—	—	—
	4 Hz–1 kHz	2	—	—	—
	1–100 kHz	f/500	—	—	—
	100 kHz–10 MHz	f/500	0.08	2	4
	10 MHz–10 GHz	—	0.08	2	4

$\nu > 10 \text{ GHz} \rightarrow S < 50$ e 10 W/m^2 per lav. Esposti e popolaz.

Limiti primari suggeriti da ICNRP

Frequency range	E-field strength (V m ⁻¹)	H-field strength (A m ⁻¹)	B-field (μT)	Equivalent plane wave power density S_{eq} (W m ⁻²)
up to 1 Hz	—	1.63×10^5	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	500f	20/f	25/f	—
0.82–65 kHz	610	24.4	30.7	—
0.065–1 MHz	610	1.6f	2.0f	—
1–10 MHz	610f	1.6f	2.0f	—
10–400 MHz	61	0.16	0.2	10
400–2,000 MHz	$3f^{1/2}$	$0.008f^{1/2}$	$0.01f^{1/2}$	f/40
2–300 GHz	137	0.36	0.45	50

Limiti derivati per i lavoratori esposti

Frequency range	E-field strength (V m ⁻¹)	H-field strength (A m ⁻¹)	B-field (μT)	Equivalent plane wave power density S_{eq} (W m ⁻²)
up to 1 Hz	—	3.2×10^4	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	250f	4/f	5/f	—
0.8–3 kHz	250f	5	6.25	—
3–150 kHz	87	5	6.25	—
0.15–1 MHz	87	0.73f	0.92f	—
1–10 MHz	$87f^{1/2}$	0.73f	0.92f	—
10–400 MHz	28	0.073	0.092	2
400–2,000 MHz	$1.375f^{1/2}$	$0.0037f^{1/2}$	$0.0046f^{1/2}$	f/200
2–300 GHz	61	0.16	0.20	10

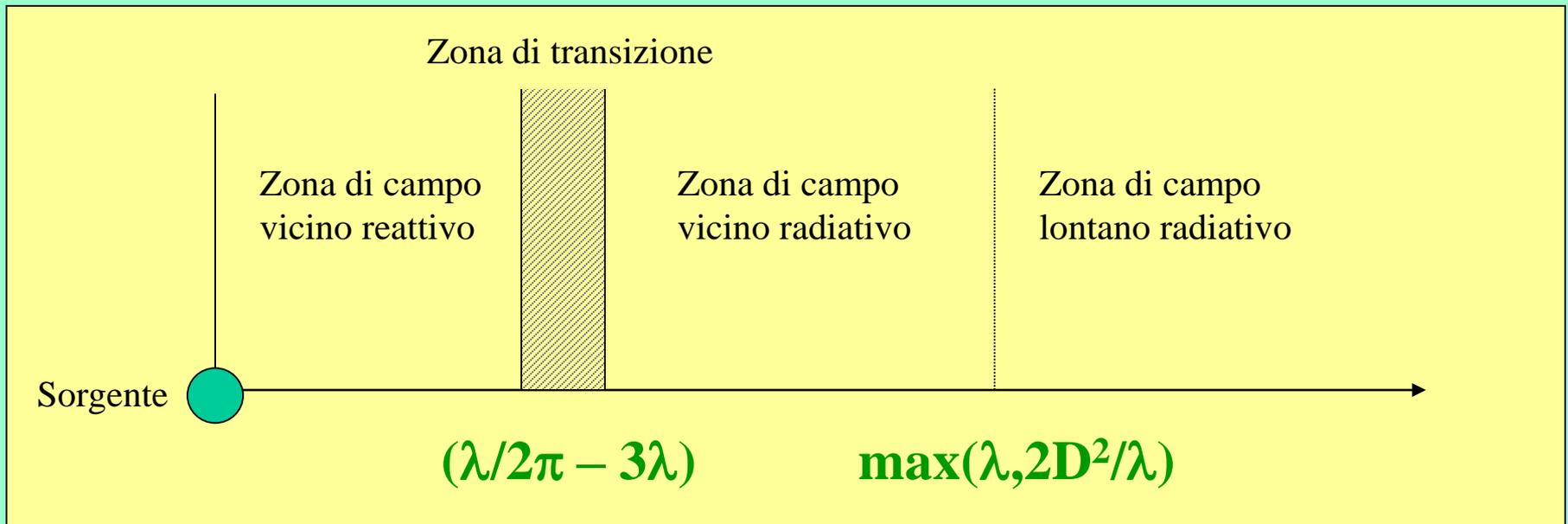
Limiti derivati per la popolazione

Normativa italiana

	$\nu < 10 \text{ KHz}$	$10 \text{ KHz} < \nu < 300 \text{ GHz}$	
limite	100 μT e 5 kV/m	60 < 3 MHz 20 V/m 3 MHz – 3 GHz 40 > 3 GHz	OGGI Diverse leggi nazionali e regionali
liv. attenzione	-----	6 V/m	
Obiettivo qualità	0.2 μT e kV/m	6 V/m	
limite	100 μT e ? kV/m	Come ora	
liv. attenzione	10 μT e ? kV/m	Come ora	DOMANI Valori “Attesi” nella imminente legge quadro.
Obiettivo qualità	3 μT e ? kV/m	Come ora (anche per aree aperte)	

Propagazione dei campi e.m.

Una sorgente di campo e.m. è sempre caratterizzata da una certa distribuzione di cariche e correnti elettriche. Nell'intorno della sorgente il comportamento del campo e.m. prodotto cambia sostanzialmente con la distanza:



Campo radiativo 1

Nella regione di campo radiativo (vicino e lontano) ha senso definire il concetto di densità di potenza elettromagnetica (S) e il campo si propaga come un'onda (che a rigore è piana solo nella zona di campo "lontano"). Quindi:

$$\mathbf{E} \oplus \mathbf{H} \quad \text{e} \quad E/H = Z_0 \quad \text{quindi}$$

$$S = E H \quad [\text{W/m}^2] \quad \text{e} \quad S = E^2/377 = 377 H^2$$

Nota 1: Specie nella zona di campo vicino è più conveniente ottenere S a partire da una misura di E che generalmente è più affidabile

Nota 2: Per usare la definizione di S la condizione di campo radiativo deve essere verificata per la sorgente ma anche per eventuali sorgenti secondarie (mezzi passivi, ostacoli, etc)

Campo radiativo 2

S (W/m ²)	E (V/m)	H (A/m)	B (μT)
0.1	6.14	0.016	0.0127
1.0	19.42	0.052	0.0413
10.0	61.40	0.163	0.129
50.0	137.30	0.364	0.289
100.0	194.16	0.515	0.409

Nota: in aria $1 \text{ A/m} \rightarrow 1.26 \text{ } \mu\text{T}$ ($H=B/\mu$)

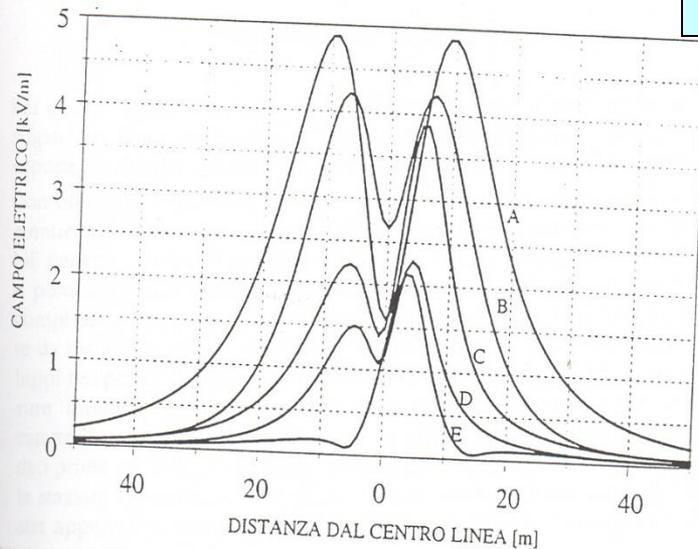
Le definizioni di “campo vicino” e “campo lontano” sono funzionali al calcolo/misura dei campi e.m.. Gli effetti biologici sono comunque sempre dipendenti dal SAR)

Elettrodotti

Fig. 7.1 Profili laterali del campo elettrico, a 1 m da terra, calcolato per cinque tipiche configurazioni di linee ad alta tensione nella sezione corrispondente ai più gravosi franchi minimi stabiliti dalla legislazione vigente

LEGENDA

- A: Semplice terna a 380 kV
- B: Doppia terna a 380 kV
- C: Semplice terna a 220 kV
- D: Semplice terna a 132 kV
- E: Semplice terna a 132 kV con disposizione orizzontale dei conduttori



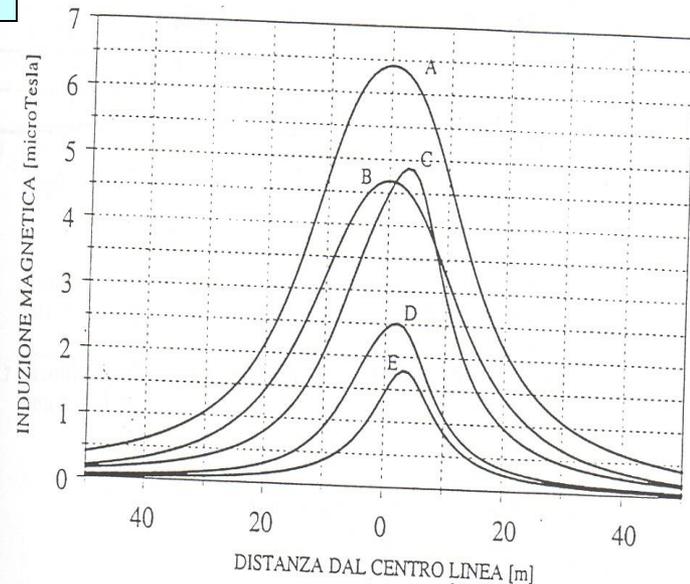
CEI 211-4

Fig. 7.4 Profili laterali dell'induzione magnetica, a 1 m da terra, calcolata per cinque tipiche configurazioni di linee ad alta tensione nella sezione corrispondente ai più gravosi franchi minimi stabiliti dalla legislazione vigente

LEGENDA

Condizioni di riferimento per il calcolo:

- A: Semplice terna a 380 kV, carico 400 A; B: doppia terna a 380 kV, carico 400 A
- C: Semplice terna a 220 kV, carico 200 A; D: semplice terna a 132 kV, carico 100 A
- E: Semplice terna a 132 kV con disposizione verticale dei conduttori, carico 100 A



Si ottiene dalla legge di Gauss nel caso di un conduttore di lunghezza infinita con densità lineare di carica costante

Si ottiene dalla legge di Biot-Savart nel caso di di lunghezza infinita.

Legge di Gauss ed elettrodotti

Esempio 3 Calcolare il campo elettrico in vicinanza di una sbarretta infinitamente lunga, uniformemente carica con densità lineare λ .

Naturalmente, nessuna sbarretta carica reale può essere infinitamente lunga. Avrà una certa lunghezza L e una carica totale $Q = \lambda L$. Se però misuriamo il campo vicino alla sbarretta a distanza $r \ll L$ e in punto vicino al centro della sbarra, possiamo adottare l'approssimazione che la stessa sia infinitamente lunga.

In tal caso possiamo assumere che il campo sia diretto radialmente verso l'esterno rispetto alla sbarra (se $\lambda > 0$) e che il suo modulo dipenda solo dalla distanza dalla sbarra. In effetti la distanza dalla sbarra è la sola distanza che ci sia nel problema, poiché le estremità sono infinitamente lontane. Inoltre, una qualsiasi componente, sia parallela alla sbarra E' che azimutale E'' , cambierebbe di direzione se ruotassimo la sbarra di 180° (Fig. 7-14) e quindi deve essere nulla.

Come superficie alla quale applicare la legge di Gauss scegliamo un cilindro di raggio r e lunghezza ℓ . Le due basi del cilindro non contribuiscono in quanto il campo è parallelo ad esse;

$$\int (\mathbf{E} \cdot d\mathbf{S}) = 0 \quad \text{sulle basi del cilindro}$$

Quindi l'integrale esteso alla superficie cilindrica è semplicemente

$$\int (\mathbf{E} \cdot d\mathbf{S}) = |\mathbf{E}(r)| \times (\text{area del cilindro})$$

poiché il campo ha ovunque lo stesso modulo ed è ortogonale alla superficie. Così,

$$\int_{\text{cilindro}} (\mathbf{E} \cdot d\mathbf{S}) = |\mathbf{E}(r)| 2\pi r \ell \quad (7-16)$$

L'integrale deve essere anche eguale alla carica totale *contenuta* nel cilindro, che è il prodotto della densità di carica λ per l'altezza ℓ del cilindro. Pertanto

$$\frac{\lambda \ell}{\epsilon_0} = 2\pi r \ell |\mathbf{E}(r)|$$

ovvero

$$\mathbf{E}(r) = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{r}$$

(7-17)

Notiamo che la nostra situazione [Eq. (7-17)] non è più valida se la distanza r diventa paragonabile alla lunghezza (finita) della sbarretta. Infatti non possiamo più dedurre che il campo deve essere radiale, perché girando la sbarretta la situazione cambia. Inoltre il campo può ora dipendere dalla distanza dalle estremità.

Si calcola per ciascun conduttore (compreso quelli immagine) dell'elettrodotto e poi si utilizza il principio di sovrapposizione

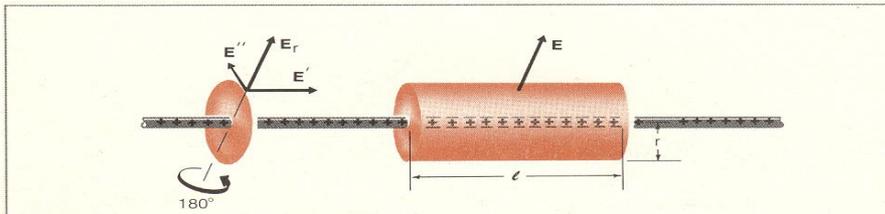


Figura 7-14 Calcolo del campo elettrico vicino a una lunga sbarretta carica.

Legge di Biot-Savart ed elettrodotti

1

Esempio 6 Calcolare il campo magnetico di un filo rettilineo, infinitamente lungo, usando la legge di Biot-Savart.

È chiaro che da questo calcolo dovremmo ottenere l'Eq. (10-2); ma tuttavia l'esercizio è utile perché aiuta a convincerci che la legge di Biot-Savart è veramente equivalente alle equazioni di Maxwell. Come possiamo vedere dalla Fig. 10-15, tutte le componenti $d\mathbf{B}$ nel punto P saranno parallele e dirette verso l'interno del foglio, poiché sia $d\mathbf{l}$ che \mathbf{r} stanno nel piano del disegno. Il modulo di $d\mathbf{B}$ sarà, secondo l'Eq. (10-24),

$$dB = |d\mathbf{B}| = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{|d\mathbf{l}| r \sin \alpha}{r^3} \quad (10-26)$$

Possiamo introdurre una coordinata x lungo il filo in modo che $x = 0$ sia il punto del filo più vicino al punto P . Allora $|d\mathbf{l}| = dx$ e abbiamo

$$\frac{\rho}{r} = \sin(\pi - \alpha) = \sin \alpha \quad (10-27a)$$

$$\frac{x}{r} = \cos(\pi - \alpha) = -\cos \alpha \quad (10-27b)$$

Da questa deduciamo che $x = -\rho \cot \alpha$ e quindi

$$|d\mathbf{l}| = dx = -\rho d(\cot \alpha) = \frac{\rho d\alpha}{\sin^2 \alpha}$$

Sostituendo questa nell'Eq. (10-26) e usando l'Eq. (10-27a) otteniamo

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{\rho d\alpha}{\sin^2 \alpha} \frac{\sin^2 \alpha}{\rho^2} \sin \alpha$$

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi \rho} \sin \alpha d\alpha$$

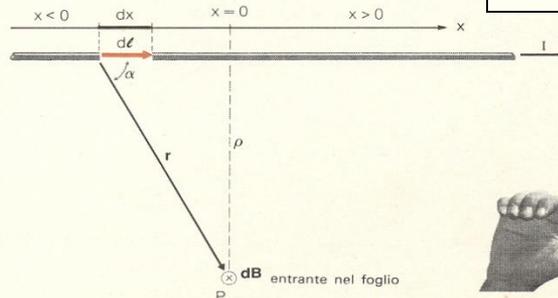


Figura 10-15 Esempio 6. Calcolo del campo magnetico di un filo rettilineo, usando la legge di Biot-Savart.

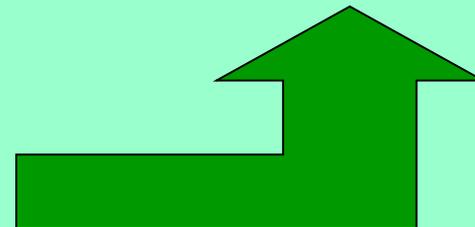
Più semplice, basta il principio di sovrapposizione

2

A $x = -\infty$ abbiamo $\alpha = 0$, e a $x = +\infty$ $\alpha = 180^\circ = \pi$; quindi, per ottenere il campo d'un filo rettilineo infinitamente lungo, dobbiamo calcolare

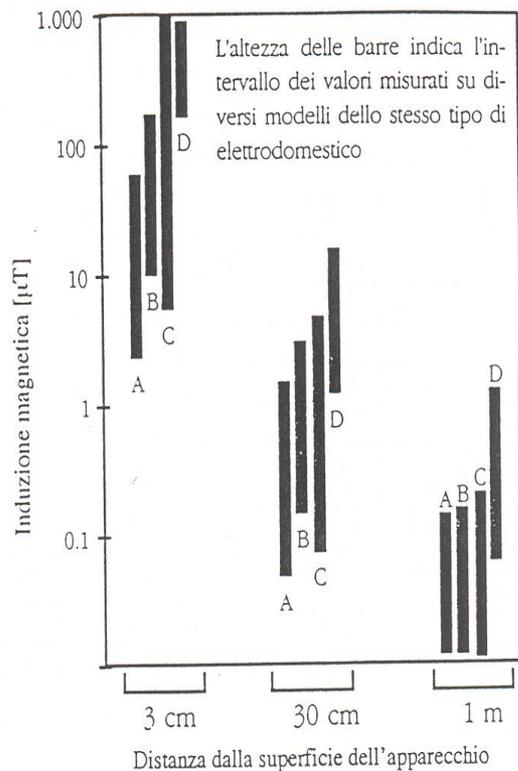
$$|B| = \frac{\mu_0 I}{4\pi \rho} \int_0^\pi \sin \alpha d\alpha = \frac{\mu_0 I}{2\pi \rho}$$

che è proprio esattamente lo stesso risultato dell'Eq. (10-2). Anche la direzione di \mathbf{B} – in Fig. 10-15 entrate nel foglio – è la stessa di quella che abbiamo ottenuto in precedenza usando la regola della mano destra.



Altre sorgenti di campi < 10 KHz

8 Risultati di misure di induzione magnetica effettuate a diverse distanze da: televisori (A); stufe elettriche (B); asciugacapelli (C); aspirapolvere (D) [11]



Tab. 7.1 Livelli di esposizione di sorgenti di campo magnetico a frequenza industriale

Sorgente	Induzione magnetica [µT]	Distanza
Rasoio elettrico	150-240	Sul viso
Asciugacapelli	13-1	10-20 cm
Frullatore	0,9	40 cm
Lampada alogena 12 V, 20 W	0,5	30 cm
Apparecchio aerosolterapia	50-20	20-30 cm
Coperta elettrica	2	A contatto
TV 21 pollici	0,3	50 cm
Lavabiancheria	3,4	50 cm
Lavastoviglie	0,05	50 cm
Forno elettrico	0,4	20 cm
Trapano 600 W	2	Sul busto
Saldatore 100 W	14,5	Sul busto
Mola 225 W	0,8	40 cm
Compressore 1100 W	8,2	40 cm
Saldatrice ad arco 2150 W	23,2	40 cm
Forno ad arco 75 MW, 55-65 kA, 150 t	100-270	In prossimità
Bisturi elettrico	2,9	In prossimità
Carica batterie	22,9	In prossimità
Ecografo	0,8	Posto operatore
Proiettore lavagna luminosa	2,3	20 cm

Campi ad alta ν (10 KHz- 300 GHz)

Tab. 7.2 Caratteristiche delle sorgenti nel campo di frequenze 10 kHz - 300 GHz

Campo di frequenza	Lunghezza d'onda	Sorgente	Frequenza di lavoro	Potenze tipiche della sorgente/ distanze di riferimento dalla sorgente	Valori tipici dei campi elettromagnetici o della densità di potenza
10 kHz - 30 kHz VLF (Very Low Frequency) Frequenze molto basse	33 km - 10 km	Saldatrici elettriche	10 kHz	30 cm 70 cm	2000 μ T 60 μ T
		Circuiti di riga TV	15 kHz		1-10 V/m 0,2 μ T
		Forni ad induzione	25 kHz	0,1 - 1 m	15 - 1250 μ T
30 kHz - 300 kHz LF (Low Frequency) Basse Frequenze	10 km - 1 km	Riscaldatori ad induzione	100 kHz	0,1 m	1 mT
		Schermi video	400 kHz	0,5 m	1 V/m 0,1 μ T
300 kHz - 3 MHz MF (Medium Frequency) Medie frequenze	1 km - 100 m	Trasmettitori radio in AM (OM)	525 kHz - 1605 kHz	2-600 kW 10-300 m	1-25 V/m
		Riscaldatori industriali ad induzione		0,1 - 1 m	0,2 - 12 A/m
3 MHz - 30 MHz HF (High Frequency) Alte frequenze	100 m - 10 m	Trasmettitori radio in AM (OC)	3,95 - 26,1 MHz	100 kW 100 m	< 20 V/m
		Incollatrici della plastica	27,12 MHz	10 kW 5 m	100 V/m 5 A/m
		Presse Dielettriche	27,12 MHz	1,5 kW 0,5 m	200 V/m
		Indurtrici ad Induzione	27,12 MHz	0,5 m	0,5 A/m
		Sistemi di processo tipo Wood	27,12 MHz	2 kW 0,5 m	170 V/m
		CB, Walkie - Talkies	27,12 MHz	5 W 0,2 m	100 V/m 0,2 A/m
		Diatermia	27,12 MHz	0,5 m sul corpo del paziente	< 500 V/m < 1000 V/m 1,6 A/m
30 MHz - 300 MHz VHF (Very High Frequency) Frequenze molto alte	10 m - 1 m	Trasmettitori TV VHF	47 - 230 MHz	5 kW 50 m	< 5 V/m
		Trasmettitori Radio in FM	87,5 - 108 MHz	10 kW 70 m	< 10 V/m
		Eurosegnali	87 MHz	2 kW	
300 MHz - 3 GHz UHF (Ultra High Frequency) Frequenze ultra alte	1 m - 100 cm	Telefonia Cittadina	470 MHz	100 W	
		Trasmettitori TV UHF	470 - 862 MHz	5 kW 100 m	< 50 V/m
		Stazioni radiobase analogiche	450 - 465 MHz	8 - 35 W per canale	
		Compagnie telefoniche	410 - 430 MHz	8 W	
		Diatermia	433 MHz	0,5 m	25 W/m ²
		Stazioni radiobase GSM	890 - 960 MHz 1710 - 1880 MHz	50 W/canale 20 m 10 W/canale 20 m	3 V/m 0,5 V/m
		Apparecchi mobili GSM	890 - 960 MHz 1710 - 1880 MHz	2 W 0,1 m	10 - 30 V/m
		Vulcanizzazioni dielettriche	915 - 2450 MHz	0,3 m	0,7 - 5 W/m ²
		Stazioni di terra satellitari (VSAT), maritime globali, sistemi di sicurezza e di protezione (GMDSS)	1,5 / 1,8 GHz	In direzione del fascio principale	8 W/m ²
		Diatermia	2,45 GHz	0,3 m	< 100 W/m ²
Forni a microonde	2,45 GHz	0,05 - 0,3 m	0,06 - 0,6 W/m ²		

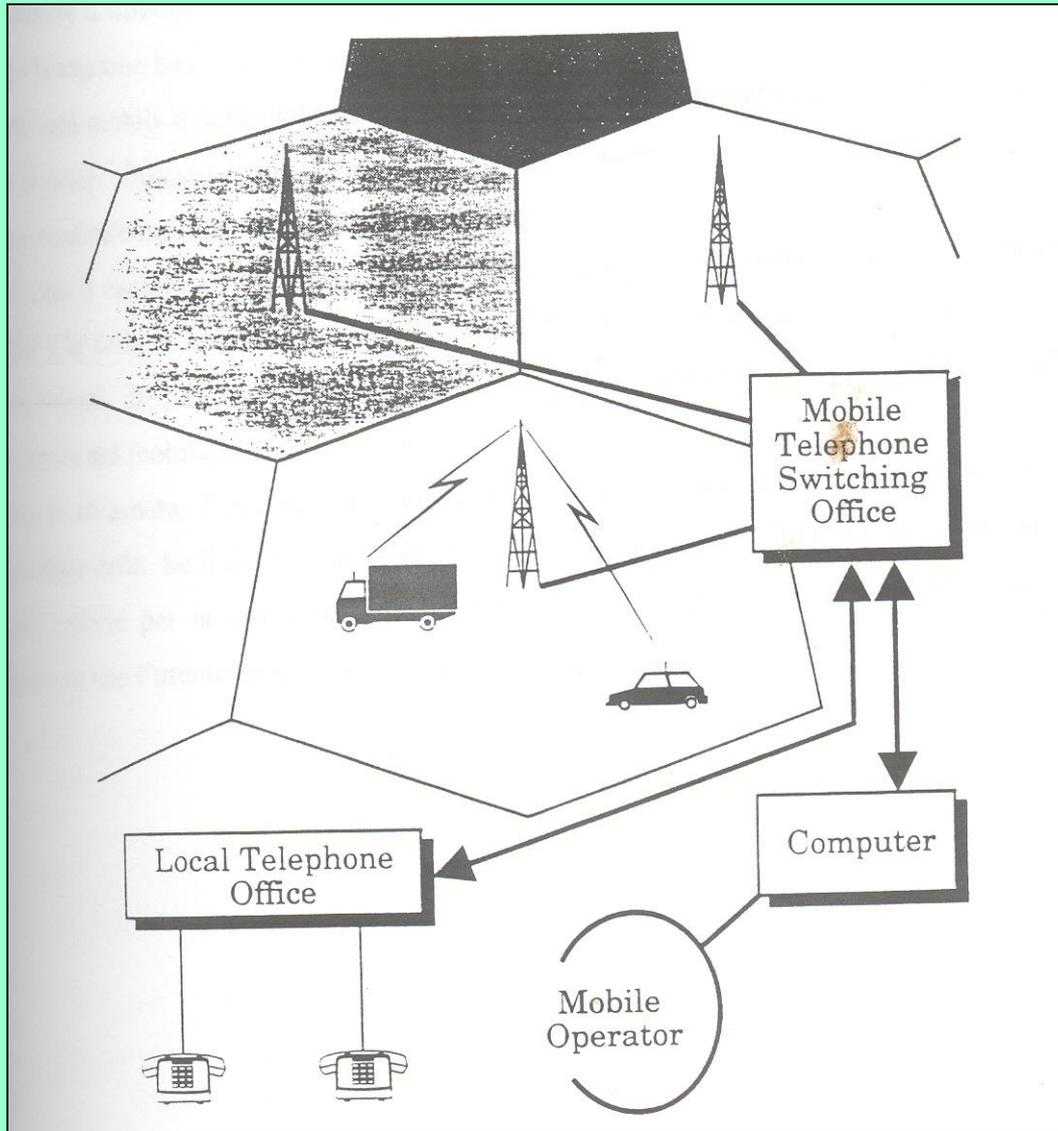
Continua

Campo di frequenza	Lunghezza d'onda	Sorgente	Frequenza di lavoro	Potenze tipiche della sorgente/ distanze di riferimento dalla sorgente	Valori tipici dei campi elettromagnetici o della densità di potenza
3 GHz - 30 GHz SHF (Super High Frequency) Frequenze super alte	100 cm - 10 cm	Sistemi di protezione antitaccheggio	0,9 - 10 GHz	In direzione del fascio principale	2 mW/m ²
		Sistemi per il controllo del traffico aereo	1 - 10 GHz	0,2 - 20kW 100 m	0,5 - 10 W/m ²
		Radar di puntamento	4 - 6 GHz	In direzione del fascio principale	4000 V/m 42000 W/m ²
		Stazioni di terra satellitari (VSAT)	4 - 6 GHz	In direzione del fascio principale	< 10 W/m ²
		Stazioni satellitari (SNG) e trasportabili (TES)	13-14 / 11-12 GHz	In direzione del fascio principale	< 10 W/m ²
		Radar per il controllo del traffico	9 - 35 GHz	100 mW 3 m 100 mW 10 m	< 2,5 W/m ² < 1 W/m ²
		Sistemi radio di comunicazione	10 - 20 GHz	0,5 W sul fascio principale 0,5 W 20 m sotto	0,4 mW/m ² 2 μ W/m ²
30 GHz - 300 GHz EHF (Extra high frequency) Frequenze extra alte	10 cm - 1 cm	Segnali video analogici e trasmissioni digitali	30 GHz / 55 GHz		Massima potenza di uscita prima dell'antenna: 1 W

Continua

Ai fini dell'applicazione...

La telefonia cellulare



Il territorio è diviso in celle ognuna con un trasmettitore a potenza relativamente bassa che gestisce un numero limitato di conversazioni. Una stessa frequenza è adottabile su aree vaste. Le dimensioni tipiche di una cella sono 1.5 – 20 km. La trasmissione è in FM. Il MTSO smista le telefonate e le inserisce nella rete telefonica.

Esercizi

Nella dosimetria dei campi elettromagnetici qual è la grandezza direttamente correlabile al danno biologico. Quale significato fisico ha?

La densità di potenza di un'onda e.m. che attraversa un materiale diminuisce del 80% in uno spessore di 2 mm. Se si deve usare lo stesso materiale per schermare da onde e.m. un locale in cui viene misurato un SAR 50 volte superiore ai limiti quale spessore di materiale sarà necessario?

Cosa è il tasso specifico di assorbimento (SAR) definito nell'ambito delle radiazioni non ionizzanti? Da quali grandezze dipende il suo valore e quali sono i limiti a protezione della salute umana?

Una lega metallica è caratterizzata da un parametro $\delta = 2$ cm (si ricorda che δ è la profondità alla quale la densità di potenza di un'onda elettromagnetica che attraversa un materiale si riduce dell'86%) a frequenze vicine al GHz. Se si vuole utilizzare questo materiale per costruire una schermatura intorno ad un'antenna per telefonia cellulare in modo da ridurre il SAR di un fattore 10, quale spessore sarà necessario?

A 5 m da una sorgente viene registrato un campo elettrico di 25 V/m con una frequenza di 1300 MHz. Qual è il valore del campo magnetico e della densità di potenza elettromagnetica?