

## **Giornata di Studio per docenti**

# **LO SPETTRO DELLE ONDE ELETTROMAGNETICHE**

*SUPSI – Trevano, Aula Magna – 6952 Canobbio (CH)*

*12 ottobre 2005*

**Campi elettromagnetici dalle  
bassissime frequenze alle microonde**

*Daniele Andreuccetti - IFAC-CNR, Firenze*

# Sommario

## 1. L'inquinamento elettromagnetico

- a. Definizioni
- b. Cenni storici
- c. Problematiche attuali

## 2. Dall'interazione alla normativa

- a. Concetti di interazione, effetto, rischio, danno
- b. Effetti termici e non
- c. Effetti acuti e cronici
- d. Fondamenti delle normative
- e. Limiti di base e limiti di riferimento

## 3. La sorveglianza fisica dei campi elettromagnetici

- a. Ruolo delle misure e delle valutazioni teoriche
- b. Procedure e protocolli
- c. Criteri generali di selezione della strumentazione

# **INQUINAMENTO ELETTROMAGNETICO**

## Inquinamento “classico”

- Inquinamento in senso classico (*chimico, fisico, biologico*): una sorgente di origine antropica (*una ciminiera, uno scarico industriale, un reattore nucleare in avaria*) immette nell’ambiente una sostanza nociva, fastidiosa o indesiderata (*un composto tossico, un isotopo radioattivo, un organismo patogeno*) che dopo l’immissione diviene **indipendente dalla sorgente stessa** e quindi:
  - Si disperde nell’ambiente in modo incontrollato.
  - È soggetta all’azione degli agenti atmosferici.
  - Può accumularsi negli organismi vegetali o animali, arrivando ad interessare vari livelli della catena alimentare.

# Inquinamento elettromagnetico?

- Inquinamento **elettromagnetico**: l'agente immesso nell'ambiente:
  - resta sempre sotto il controllo della sorgente;
  - non è soggetto all'azione degli agenti atmosferici e meteorologici;
  - non dà luogo ad accumulo negli organismi a qualunque livello.
- Pur non potendo parlare a rigore di “inquinamento elettromagnetico”, la presenza di campi elettromagnetici nell'ambiente deve comunque essere tenuta sotto controllo per tre ordini di motivi.

## Motivi di attenzione nei confronti dei campi elettromagnetici

1. L'esposizione di organismi biologici, anche per brevi periodi, a campi **molto intensi** può provocare conseguenze sanitarie negative: **da questa evenienza siamo completamente tutelati dalle normative.**
2. Esiste la possibilità che campi elettromagnetici anche di modesta intensità possano disturbare il funzionamento di apparecchiature elettroniche, il cui disservizio può causare un danno, un rischio o un disagio. **Anche nei confronti di questi rischi esistono specifiche normative.**
3. Esiste il sospetto che esposizioni prolungate anche a livelli inferiori a quelli ammessi dalle normative possano costituire un fattore di rischio per alcune gravi patologie. **Lo strumento di tutela nei confronti di questo rischio ipotetico consiste nelle cosiddette *politiche cautelative*.**

## **Motivi di attenzione nei confronti dei campi elettromagnetici**

- Nell'ambiente non si riscontrano mai livelli paragonabili alle soglie degli effetti accertati ed i limiti di sicurezza sono quasi sempre rispettati senza particolari difficoltà.
- Questo non è vero nei luoghi di lavoro: alcune tecnologie comportano esposizioni superiori anche ai limiti occupazionali, sebbene questi siano meno restrittivi di quelli applicati alla popolazione in genere.

## Motivi di attenzione nei confronti dei campi elettromagnetici

- I sospetti sulla possibile cancerogenicità dei campi elettromagnetici a radiofrequenza e microonde (“alte frequenze”) non hanno oggi un fondamento concreto sul piano scientifico.
- Invece, nella regione delle frequenze industriali (50/60 Hz), un grande numero di studi epidemiologici (in parte controversi) sembra evidenziare l'esistenza di una debole associazione tra esposizione al campo magnetico oltre  $0,4 \mu\text{T}$  e insorgenza di leucemie infantili.
- Solo in quest'ultimo caso, quindi, può essere scientificamente motivato il ricorso alle **politiche cautelative**.



# Cenni storici – 1

## I primi allarmi

- Sebbene già negli ultimi anni '30 vi siano state alcune segnalazioni in merito al riscaldamento provocato dell'energia elettromagnetica emessa dai grandi trasmettitori radio, è consuetudine far risalire la questione della possibile pericolosità dei campi elettromagnetici a radiofrequenza e microonde agli anni del **secondo dopoguerra**, come conseguenza dello sviluppo delle applicazioni di grande potenza di questo agente fisico al RADAR ed alle telecomunicazioni in ambito militare.

## Cenni storici – 2

### I primi limiti di sicurezza

- I primi effetti dannosi riportati come conseguenza dell'esposizione a campi molto intensi (cataratta, sterilità) erano di tipo indiscutibilmente termico, essendo imputabili al surriscaldamento di alcuni organi bersaglio particolarmente vulnerabili (cristallino, gonadi).
- Ciò portò ad adottare un limite di esposizione ( **$100 \text{ W/m}^2 = 10 \text{ mW/cm}^2$** , equivalenti a circa  **$200 \text{ V/m}$** ) basato unicamente su questi **effetti termici** eclatanti, le cui soglie (situate oltre  **$1000 \text{ W/m}^2$** ) furono identificate mediante sperimentazione su animali.

## Cenni storici – 3

### Effetti non termici?

- Nello stesso periodo, nei paesi dell'est europeo fu dato credito all'esistenza di una multiforme casistica di **effetti non termici**, consistenti in disturbi soggettivi, che venivano ricondotti ad alterazioni del sistema nervoso apparentemente conseguenti ad una esposizione prolungata a campi elettromagnetici di **livello molto basso**. Questo approccio conduceva a fissare soglie di sicurezza anche **1000 volte più basse** (in termini di potenza) di quelle termiche.
- Negli anni successivi, non essendo stato possibile accertare e descrivere quantitativamente tali effetti “**di basso livello**”, di questa impostazione è stata abbandonata e le norme di sicurezza emanate dalle istituzioni internazionali si fondano oggi sulla prevenzione dei soli effetti **acuti** “**di alto livello**”, gli unici scientificamente accertati.

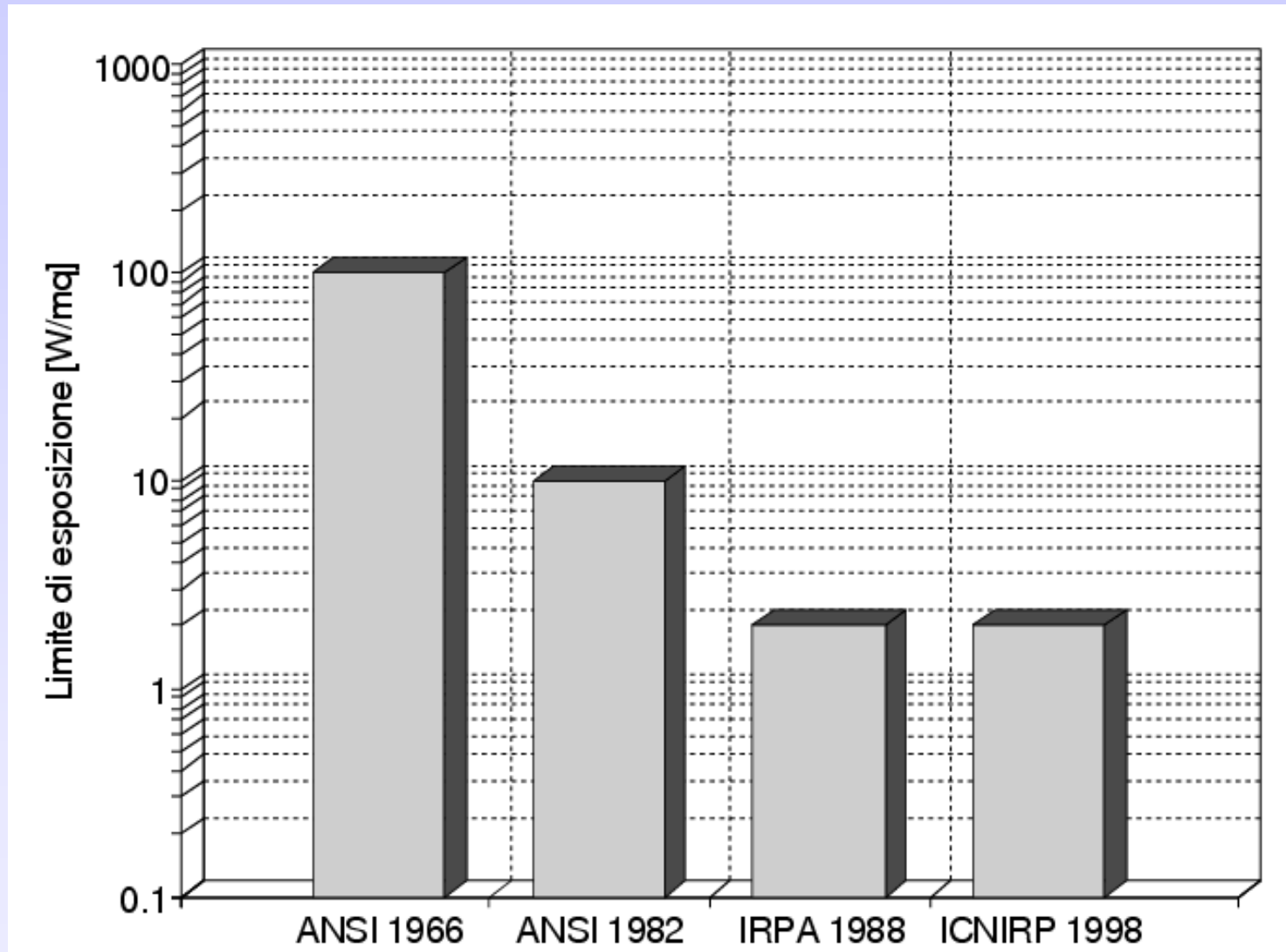
## Cenni storici – 4

### Verso la definizione di un quadro unitario

- La conoscenza di tali effetti si è nel frattempo approfondita. Grazie alla sperimentazione su volontari ed animali, sono stati infatti ben chiariti sia gli effetti comportamentali conseguenti ad un **moderato e prolungato riscaldamento sistemico** sia gli effetti **acuti non termici** causati dalle esposizioni ad intensi campi di frequenza inferiore a un centinaio di kilohertz circa.
- Questo approfondimento ha portato ad una **revisione verso il basso dei limiti di sicurezza**, determinando di fatto un riavvicinamento ai limiti fissati in base ai presunti effetti di basso livello.

# Cenni storici – 5

## L'evoluzione storica del limite termico



## Cenni storici – 6

### Sospetti di cancerogenicità

- Esiste un'altra problematica che la ricerca scientifica non ha finora potuto chiarire definitivamente, anch'essa di vecchia data, ma che recentemente ha riscosso molto interesse nei media e nell'opinione pubblica: si tratta della possibilità che le **esposizioni croniche** ai campi elettromagnetici anche di basso livello possano favorire l'insorgere di alcune **patologie tumorali**.

## Cenni storici – 7

### Campo magnetico ELF e leucemia infantile

- La più dibattuta, perché supportata da un grande numero di indagini epidemiologiche più o meno controverse, è l'associazione tra esposizione al campo magnetico a 50 Hz (generato per esempio da elettrodotti ed elettrodomestici) e l'incidenza di alcune forme di **leucemia infantile**.
- Sebbene l'ipotesi di cancerogenicità dei campi elettromagnetici sia stata sottoposta ad una indagine scientifica serrata, non sono stati finora evidenziati elementi di consistenza tale da suggerire una revisione dei limiti di sicurezza vigenti.

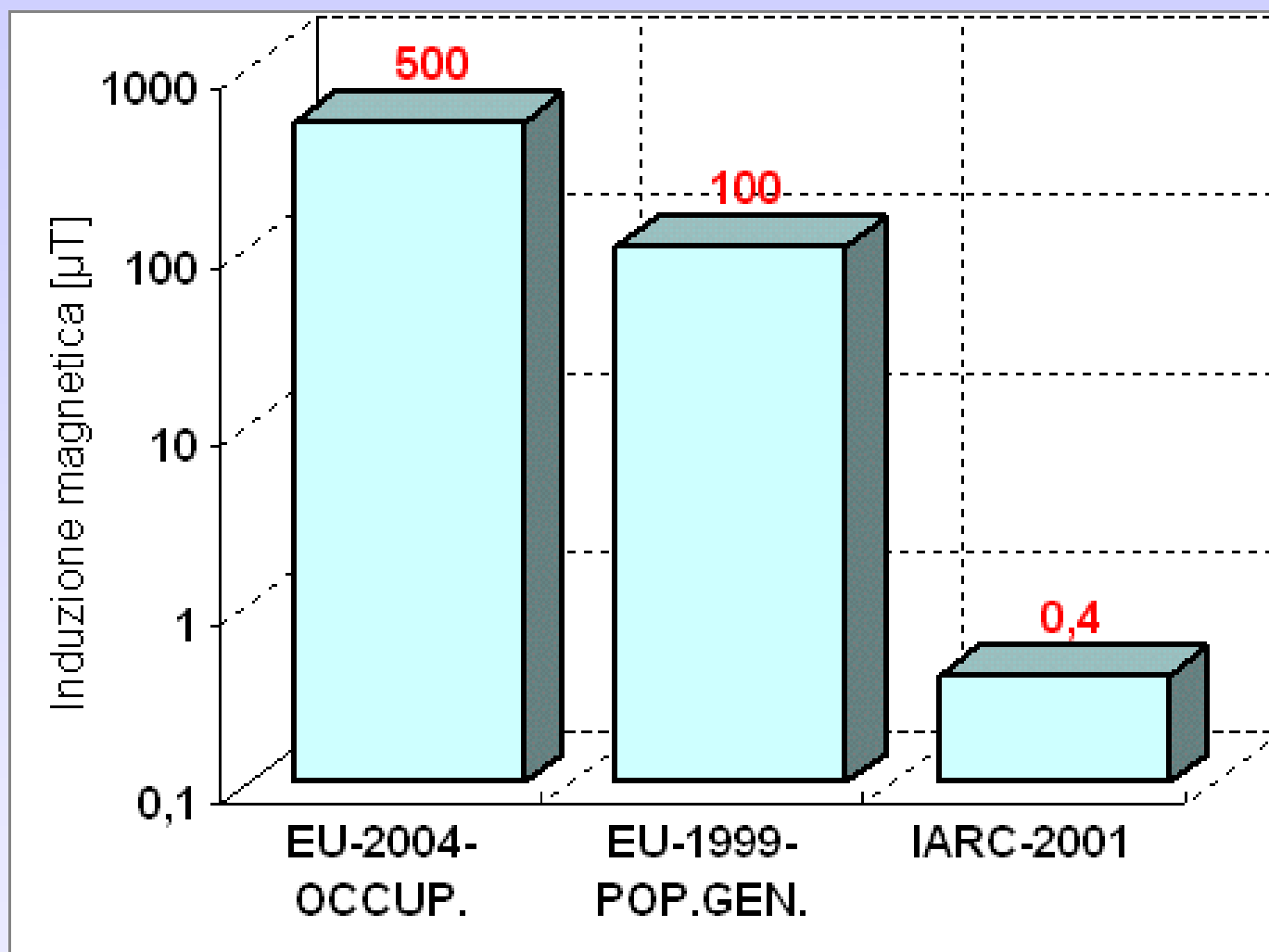
## Cenni storici – 8

### Il pronunciamento IARC e la posizione OMS

- Nel giugno 2001 lo **IARC**, tirando le fila di quasi un quarto di secolo di controversi studi epidemiologici, ha classificato il campo magnetico a bassissima frequenza come **possibile cancerogeno per l'uomo** (*Gruppo 2B*), unicamente in relazione ad un possibile **raddoppio del rischio di leucemia** per i bambini esposti in modo continuativo ad un livello di induzione magnetica **superiore a 0,4  $\mu$ T**.
- L'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) ritiene che la consistenza dei risultati epidemiologici non sia tale da imporre una revisione dei limiti di sicurezza vigenti e che quindi la situazione di **rischio ipotetico** evidenziata dallo IARC vada affrontata con strumenti **diversi**.
- Questi strumenti vanno sotto il nome comune di **politiche cautelative** e comprendono per esempio il *principio di precauzione*, il *principio ALARA*, la *Prudent Avoidance*.



# Normative per le bassissime frequenze



## L'applicazione di un principio cautelativo...

- ...non implica che si debba rinunciare ad una tecnologia sospetta fino a che non se ne sia dimostrata l'innocuità;
- ...non deve essere la giustificazione per ridurre i limiti di esposizione al di sotto dei valori fissati in base a considerazioni scientifiche;
- ...deve consistere essenzialmente in interventi che puntino a mantenere i livelli di esposizione ai più bassi valori possibili, quando questo sia possibile con costi economici contenuti e senza creare disagio sociale o compromettere lo sviluppo.

# **DALL'INTERAZIONE ALLA NORMATIVA**

# Interazione, effetto, danno

- Interazione

I fenomeni fisici indotti dal campo esterno nei tessuti di un organismo esposto provocano sempre una deviazione dalle condizioni di equilibrio elettrico a **livello molecolare**.

- Effetto

Per poter parlare propriamente di effetto biologico, si deve verificare una **variazione morfologica o funzionale** in strutture di livello superiore (**tessuti, organi, sistemi**).

- Danno

Un effetto biologico non costituisce necessariamente un danno; perché questo si verifichi, occorre che l'**effetto superi la capacità di compensazione di cui dispone l'organismo**, che dipende anche dalle condizioni ambientali.

# Effetti dei campi elettromagnetici

- **Effetti acuti di alto livello**, immediati ed oggettivi, indagati con sperimentazione diretta su volontari ed animali, sono la base delle normative internazionali.
- **Effetti soggettivi di basso livello**, quasi impossibili da indagare sperimentalmente e quindi mai dimostrati scientificamente.
- **Effetti cronici con patologie oggettive**, in relazione alle quali si tenta di stabilire, attraverso studi epidemiologici, il rapporto di causa-effetto (credibilità) e il fattore di rischio (consistenza).

**Come nasce una  
norma di sicurezza  
per i campi  
elettromagnetici**

*Tanto le soglie degli  
effetti quanto i limiti  
sono espressi in termini  
di grandezze primarie  
o di base, interne  
all'organismo esposto.*

Effetti biologici  
scientificamente  
accertati

Soglie effetti

Primo margine (~10)

Limiti di base per i  
*professionalmente  
esposti*

Secondo margine (~5)

Limiti di base per la  
*popolazione in  
genere*

# Grandezze di base, limiti di base

- Le normative sono basate sull'identificazione delle **soglie degli effetti** in funzione della frequenza.
- Le soglie sono espresse in termini di grandezze interne dette “**primarie**” o “**di base**”.
- Alle soglie accertate sperimentalmente si applicano opportuni **margini di sicurezza**, diversificati per:
  - ✓ *popolazione in genere;*
  - ✓ *lavoratori professionalmente esposti.*
- I limiti così individuati sono anch'essi espressi in termini di **grandezze di base** e prendono il nome di **limiti di base**.

# Margini di sicurezza

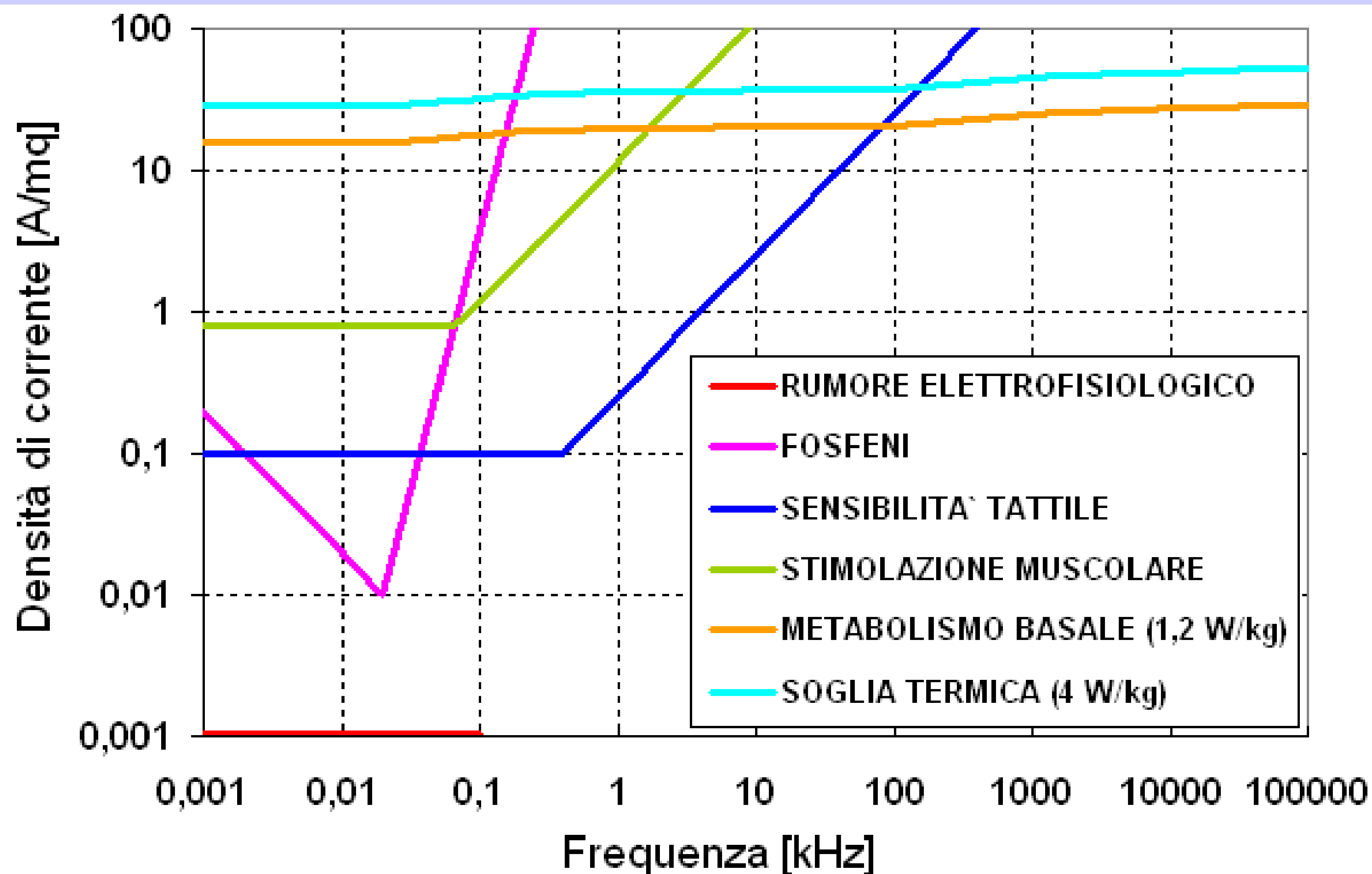
- Il **margin** di sicurezza per i lavoratori (tipicamente un fattore 10 in termini di potenza) tiene conto delle ipersensibilità individuali e degli errori di misura.
- L'**ulteriore margine per la popolazione** (tipicamente un fattore 5 in termini di potenza) tiene conto di una serie di elementi (età, stato di salute, coscienza dell'esposizione, grado di addestramento, sorveglianza sanitaria) che suggeriscono di adottare una maggior cautela per questa categoria.



# Grandezze di base, limiti di base

- La **densità di corrente indotta** nei tessuti alle basse frequenze e la **potenza assorbita per unità di massa** (detta **SAR** dall'inglese *Specific Absorption Rate*) oltre il centinaio di chiloherzt sono i parametri più significativi per descrivere e documentare gli **effetti accertati** dell'esposizione ai campi elettromagnetici.
- I **limiti di base** proposti dalle più autorevoli commissioni normative internazionali (cfr. ICNIRP 1998) sono espressi in termini di **densità di corrente indotta** e di **SAR**.

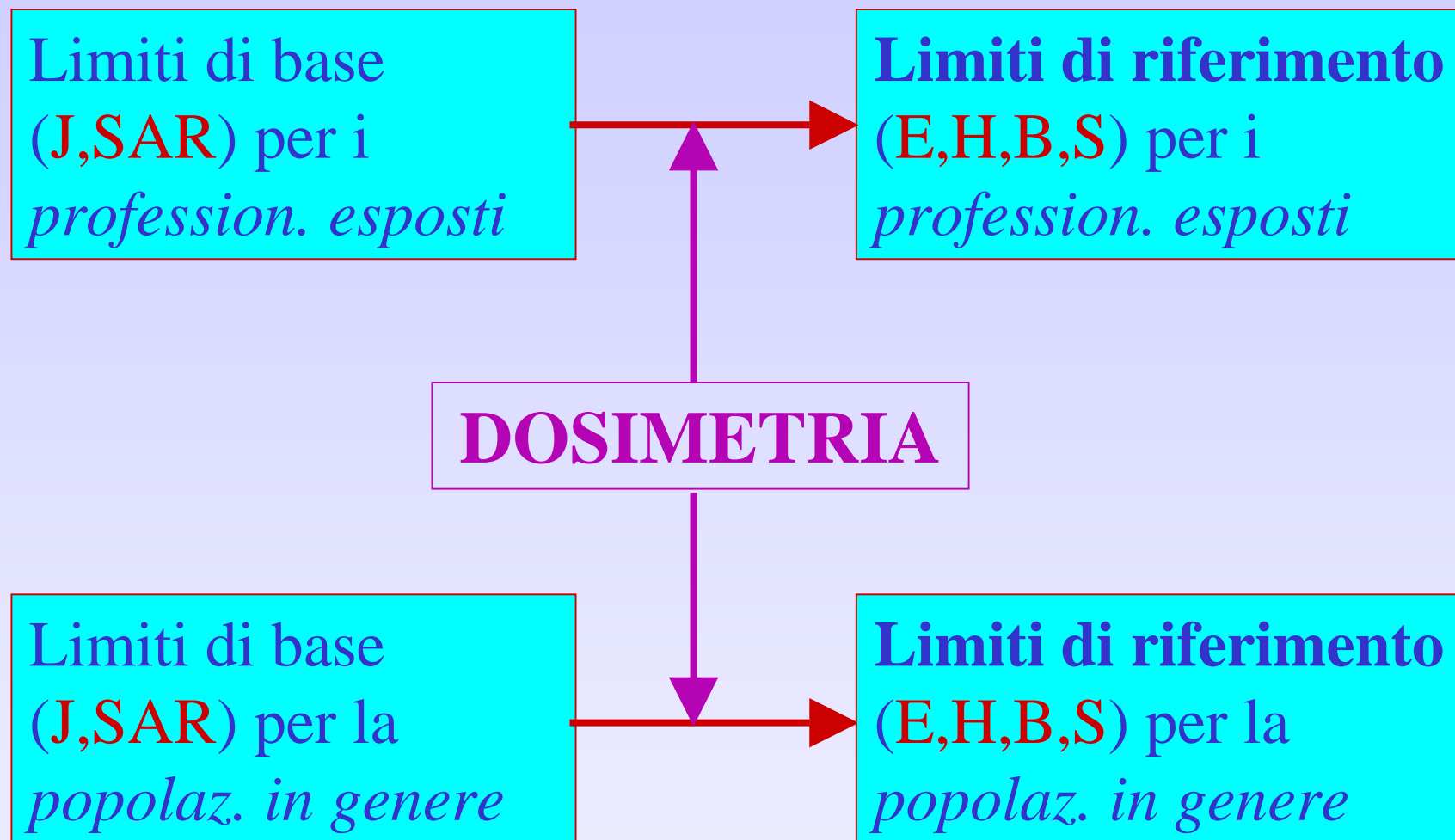
# Le soglie degli effetti acuti



## Limite di base per gli effetti termici

- La ricerca su volontari ed animali ha evidenziato che nessun effetto termico si manifesta per esposizioni che determinino una SAR di **4 W/kg** come valore medio su 6 minuti e sull'intero organismo.
- Questo ha portato a definire una soglia di esposizione di **0.4 W/kg** per i *lavoratori professionalmente esposti* e di **0,08 W/kg** per la *popolazione in genere*.

# Dal limite di base al limite di riferimento



# Dal limite di base al limite di riferimento

- La **dosimetria** permette di legare le grandezze primarie con le intensità dei campi **esterni** (grandezze “**di riferimento**”: campo elettrico, campo magnetico, densità di potenza), più facilmente accessibili alla misura.
- Fa uso di metodi **sperimentali, analitici e numerici**.
- Il rapporto tra **grandezze di base** e **grandezze di riferimento** dipende da numerosi fattori tra cui:
  - ✓ la frequenza;
  - ✓ le modalità di esposizione;
  - ✓ la posizione dell'organismo;
  - ✓ la forma dell'organismo;
  - ✓ le proprietà elettromagnetiche dei tessuti.

# Le basi della dosimetria: i campi EM inducono correnti nei tessuti biologici

A bassa frequenza (fino alla decina di megahertz) le correnti indotte sono direttamente proporzionali alla frequenza.

$$J_E = k_E f E_e$$

$$J_B = k_B f B_e$$

- Valori tipici per la regione toracica:

- $k_E = 3 \times 10^{-9} \text{ (A/m}^2\text{)/Hz/(V/m)}$

- $k_B = 0.12 \text{ (A/m}^2\text{)/Hz/T}$

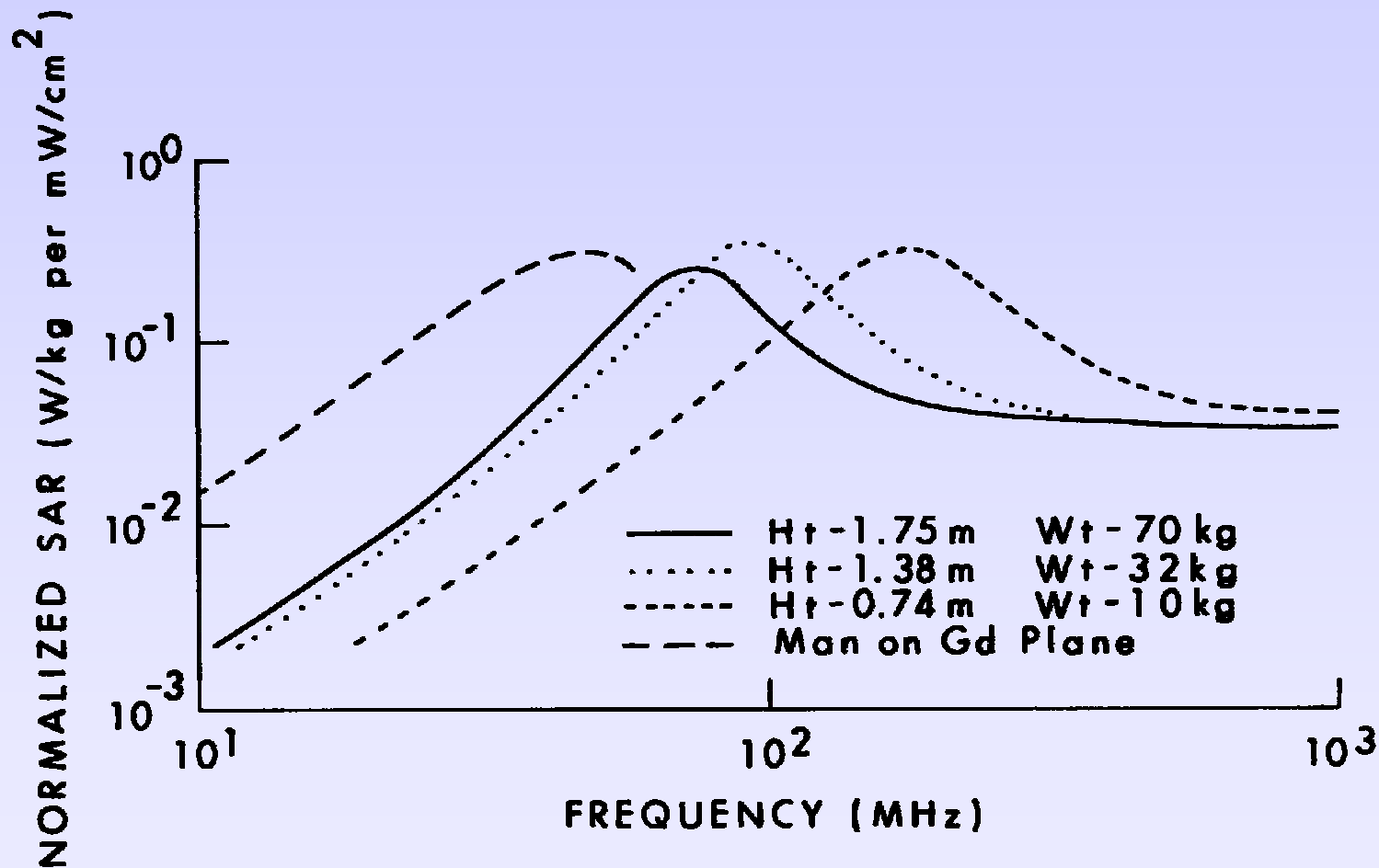
**A frequenze oltre la decina di megahertz, la SAR diviene il parametro più significativo**

- Il SAR **medio** nell'organismo  $SAR_{avg}$  [W/kg] è proporzionale alla **densità di potenza** della radiazione  $S_e$  [W/m<sup>2</sup>]

$$SAR_{avg} = k_S S_e$$

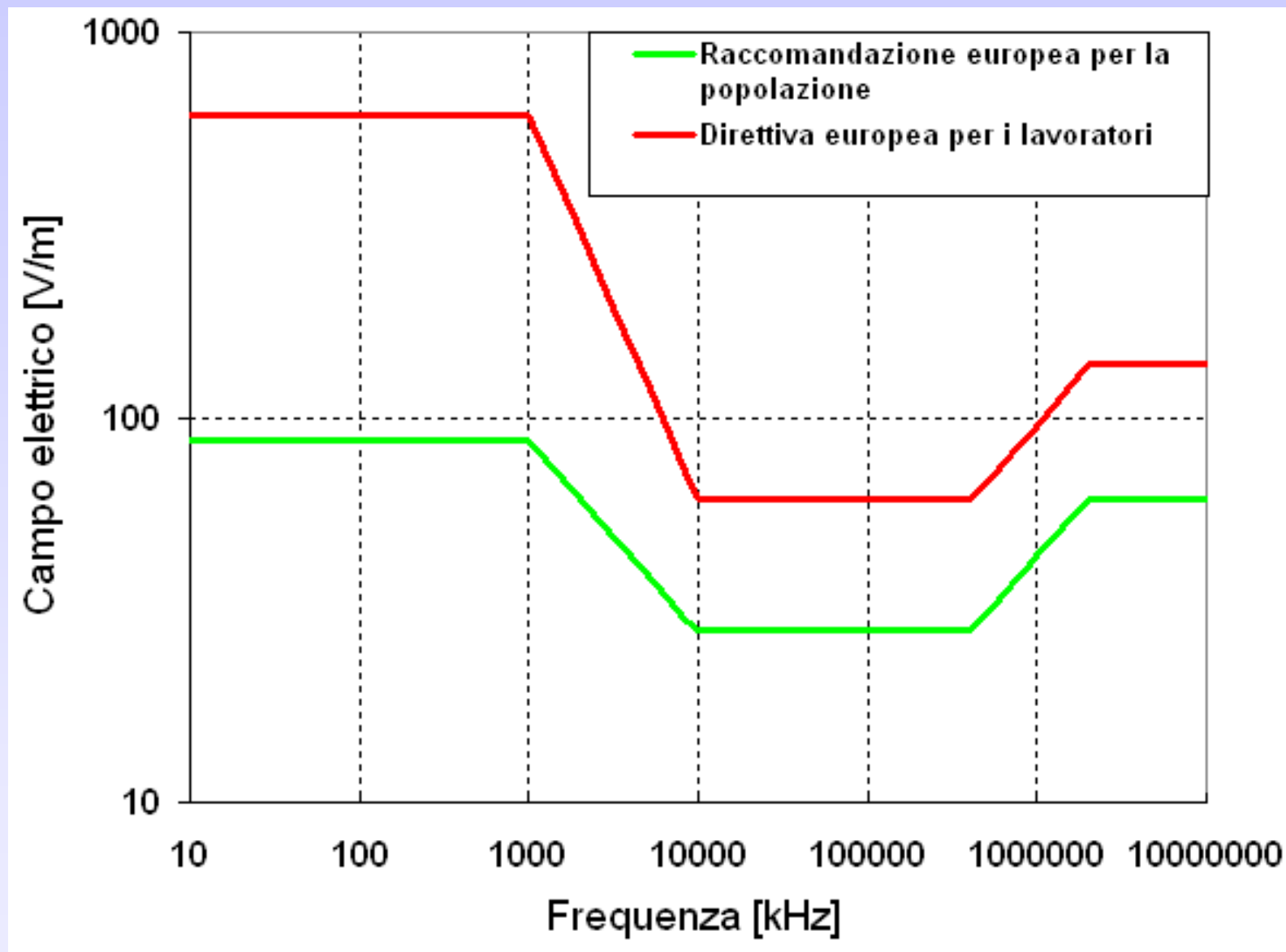
- In condizioni tipiche  $k_S = 40 \text{ (mW/kg)/(W/m}^2\text{)}$

# Il coefficiente dosimetrico $k_s$ dipende dalla frequenza e dalle dimensioni dell'organismo esposto





# Norme di sicurezza (estratto)



# Il quadro delle normative internazionali

- L'**International Commission for Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP)** ha rilasciato le sue autorevoli linee guida nell'aprile 1998.
- Nel luglio 1999, esse sono state incorporate – per la parte relativa alla *popolazione in genere* – in una **Raccomandazione del Consiglio Europeo**.
- La parte relativa alla *popolazione in genere* è entrata anche a fare parte dell'**Ordinanza sulla protezione dalle radiazioni non ionizzanti (ORNI)** del Consiglio federale svizzero (in vigore il 1° febbraio 2000), per quanto concerne i *valori limite d'immissione per le grandezze di campo*.
- Nell'aprile 2004, le linee guida ICNIRP sono state incorporate – per la parte relativa ai *lavoratori esposti per motivi occupazionali* – in una **Direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio**.

## **Normative internazionali: riferimenti bibliografici**

1. ICNIRP: “Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)”, Health Physics vol.74, n.4, April 1998.
2. Raccomandazione del Consiglio europeo del 12 luglio 1999 relativa alla limitazione dell'esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici da 0 Hz a 300 GHz. (1999/519/CE - 30.7.1999 - Gazzetta ufficiale delle Comunità europee - L 199/59).
3. Ordinanza del Consiglio federale svizzero del 23 dicembre 1999 sulla protezione dalle radiazioni non ionizzanti (ORNI, RS 814.710, entrata in vigore il 1° febbraio 2000).
4. Direttiva 2004/40/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 29 aprile 2004 sulle prescrizioni minime di sicurezza e di salute relative all'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dagli agenti fisici (campi elettromagnetici). (2004/40/CE - 24.5.2004 - Gazzetta ufficiale dell'Unione europea - L 184/1).

# **CAMPI ELETTROMAGNETICI NON IONIZZANTI: PRINCIPALI SORGENTI ED APPLICAZIONI**

# Sorgenti a bassa frequenza

Banda di frequenza	Sorgente	Tipo di emissione	Campi emessi
fino a 3 kHz	Produzione, trasporto e distribuzione dell'energia elettrica (centrali, stazioni, cabine, elettrodotti aerei ed interrati)	Accidentale	Elettrico e magnetico
	Utilizzo dell'energia elettrica (impianti elettrici ed apparecchi utilizzatori)		Magnetico
	Varchi magnetici (sistemi antifurto e per la rilevazione dei transiti)	Intenzionale localizzata	

## Sorgenti a frequenza intermedia

Banda di frequenza	Sorgente	Tipo di emissione	Campi emessi
da 3 kHz a 3 MHz	Sistemi domestici per la cottura ad induzione magnetica (frequenze tipiche 25 ÷ 50 kHz, potenze dell'ordine di qualche chilowatt)	Intenzionale localizzata	Magnetico
	Varchi magnetici (sistemi antifurto e per la rilevazione dei transiti)		
	Emittenti radiofoniche a onde medie	Intenzionale a diffusione	Elettrico e magnetico

## Sorgenti ad alta frequenza

Banda di frequenza	Sorgente	Tipo di emissione	Campi emessi
oltre 3 MHz	Varchi magnetici (sistemi antifurto e per la rilevazione dei transiti - fino a 10 MHz)	Intenzionale localizzata	Magnetico (ed elettrico)
	Emittenti radiofoniche a modulazione di frequenza (88 ÷ 108 MHz)	Intenzionale a diffusione	Elettromagnetico
	Emittenti televisive VHF e UHF (fino a circa 900 MHz)		
	Stazioni radiobase per la telefonia cellulare (900 MHz e 1800 MHz circa)		
	Ponti radio	Intenzionale focalizzata	
	Radioaiuti alla navigazione aerea (radar, radiofari)		

# Principali applicazioni termiche dei campi elettromagnetici

- **In ambito industriale**: processi produttivi che richiedono un riscaldamento rapido ed efficiente (tempra ed altre lavorazioni sui metalli, saldatura di materiali plastici e incollaggio del legno, disinfestazione di prodotti alimentari o manufatti artistici, cottura degli alimenti ed essiccazione di materiale ceramico).
- **In ambito sanitario**: la marconiterapia e la radarterapia sono note applicazioni terapeutiche basate sul riscaldamento indotto dai campi elettromagnetici.

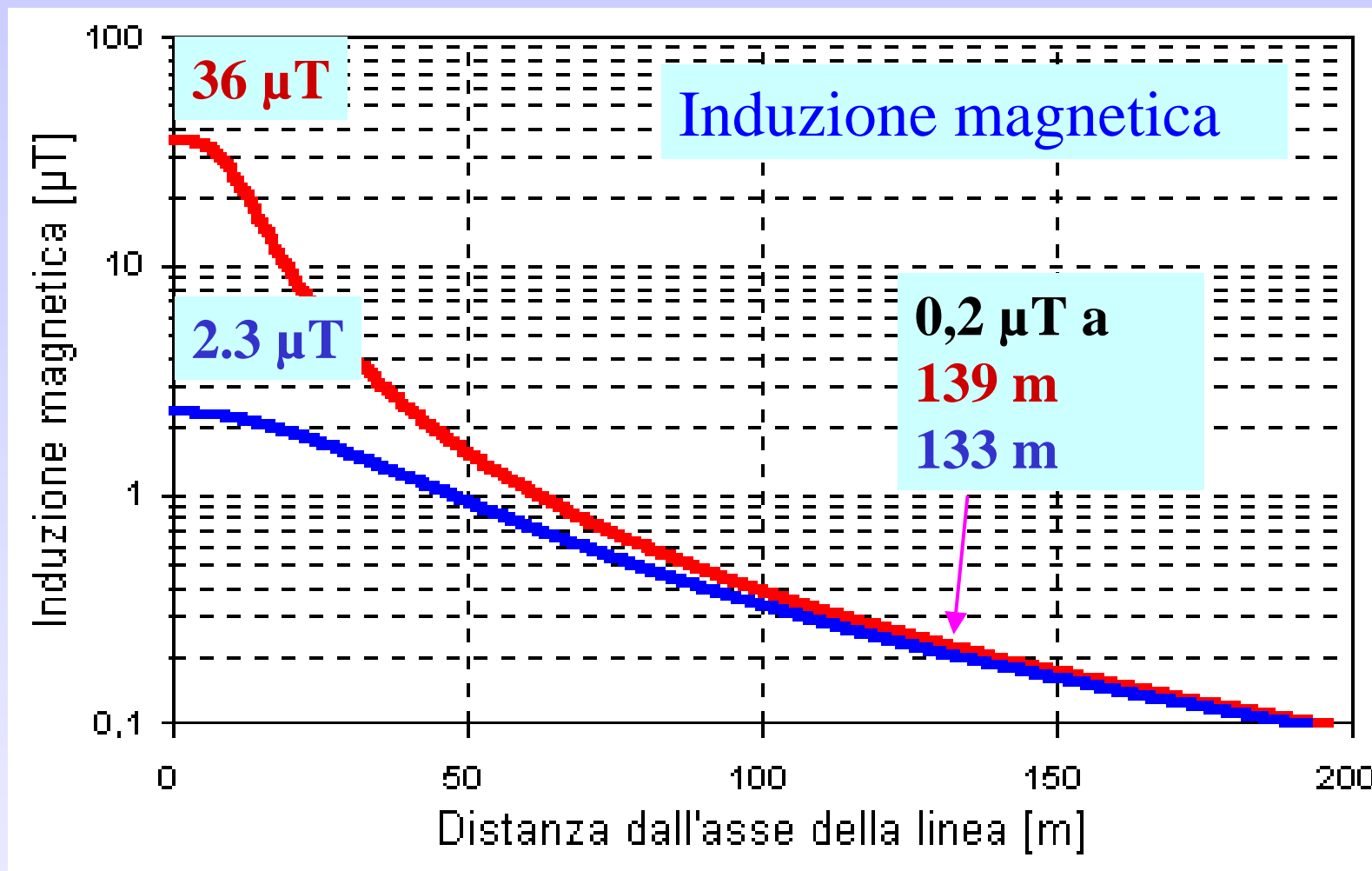


# Elettrodotti aerei: esempio

- Elettrodotto aereo 380 kV semplice terna 1000 MW (1500 A)
- Profilo laterale dell'induzione magnetica a 50 Hz al suolo, dall'asse della linea fino a 200 m di distanza



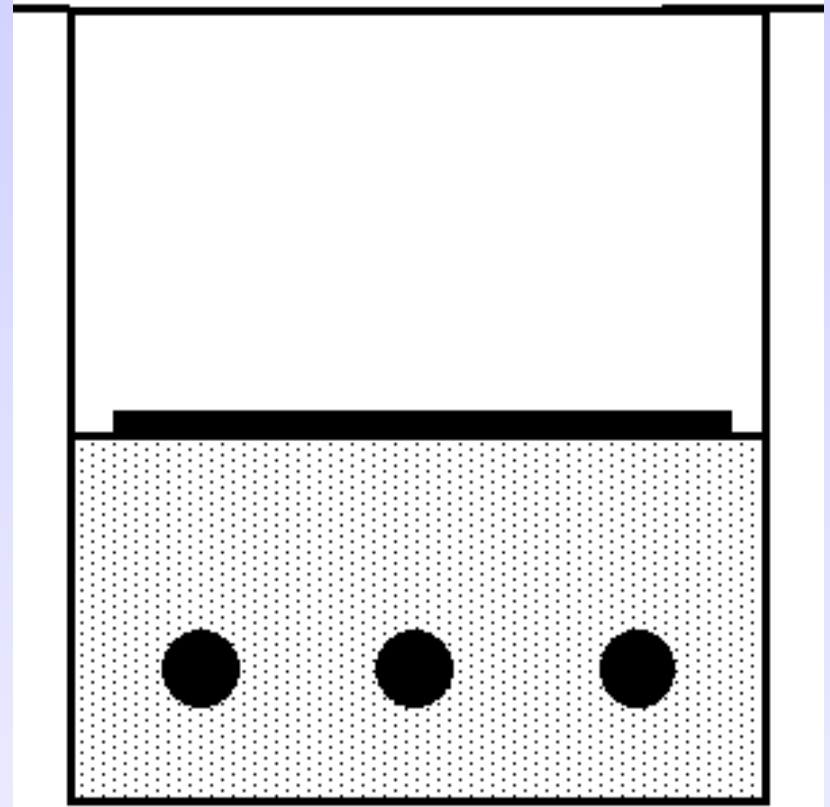
# Elettrodotti aerei: esempio



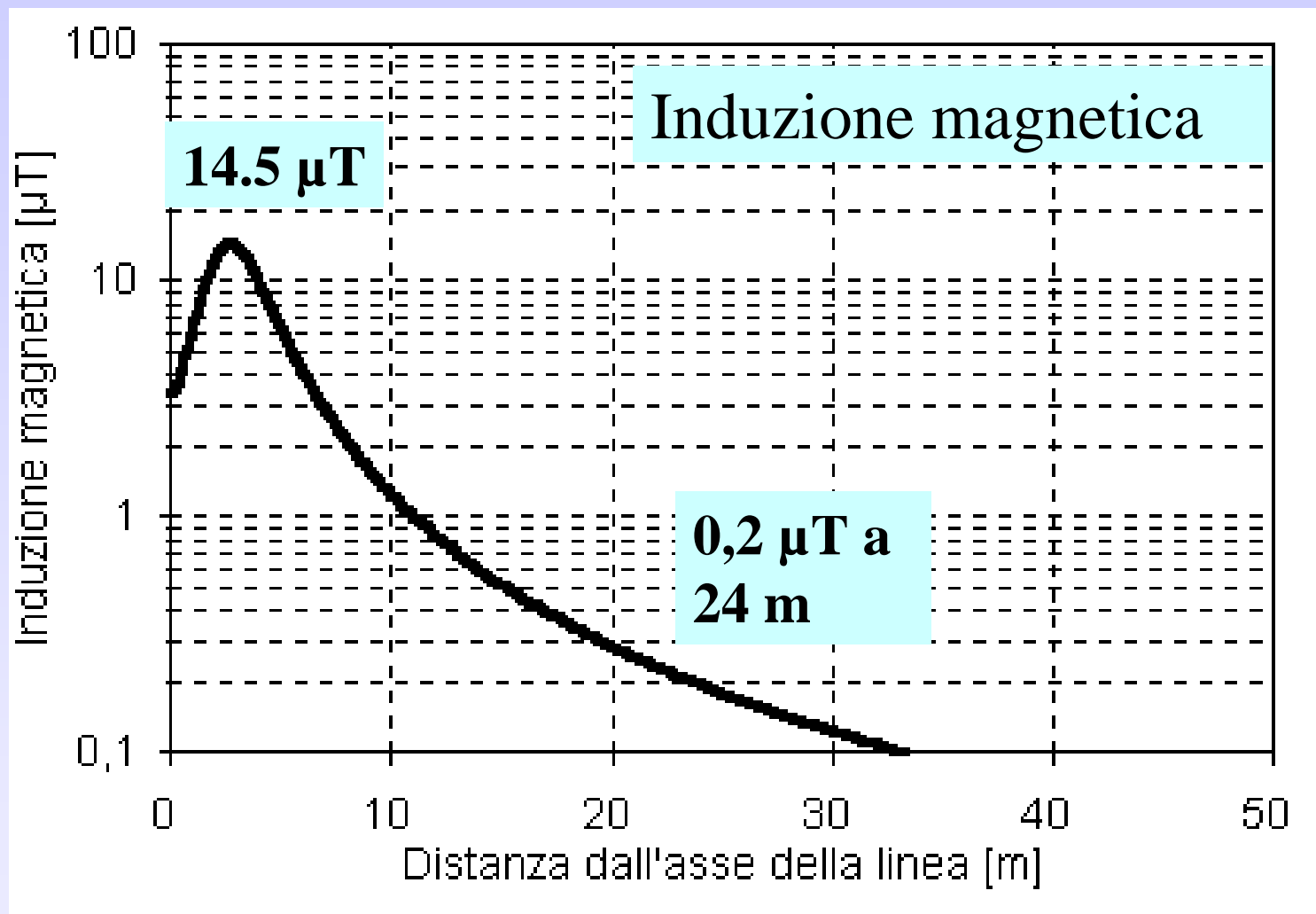
- Altezza da terra del conduttore più basso:  
7.78 m (linea rossa), 40 m (linea azzurra).

# Elettrodotti interrati: esempio

- Profilo laterale del campo magnetico generato al livello del suolo da un elettrodotto **380 kV doppia terna piana da 1000 MW** (790 A) interrato ad una profondità di 1.85 metri.



# Elettrodotti interrati: esempio



# Apparati per telecomunicazione: emittenti radiofoniche

Tipo	Frequenza	Potenza	Guadagno	EIRP
<b>Emittenti radio AM</b>	OL-LF (150 ÷ 285 kHz)	1 ÷ 500 kW	poche unità	1 ÷ 500 kW
	OM-MF (525 ÷ 1605 kHz)			
	OC-HF (2 ÷ 26 MHz)			
<b>Emittenti radio FM</b>	VHF (88 ÷ 108 MHz)	1 ÷ 12 kW	5 ÷ 50	10 ÷ 500 kW

# Apparati per telecomunicazione: emittenti televisive

Frequenza	Potenza	Guadagno	EIRP
VHF I-II (52.5 ÷ 88 MHz) VHF III (174 ÷ 223 MHz) UHF IV (470 ÷ 590 MHz) UHF V (614 ÷ 838 MHz)	0.1 ÷ 1 kW	1 ÷ 100	5 ÷ 100 kW



# Esempi di antenne per trasmissioni AM, FM e TV



# Apparati per telecomunicazione: stazioni radio base per la telefonia cellulare

Frequenza (downlink)	Potenza	Guadagno	EIRP
eTACS: 917 ÷ 950 MHz GSM: 925 ÷ 960 MHz DCS: 1805 ÷ 1880 MHz DECT: 1880 ÷ 1900 MHz UMTS: 2110 ÷ 2170 MHz	30 ÷ 300 W	3 ÷ 65	fino a 2 kW

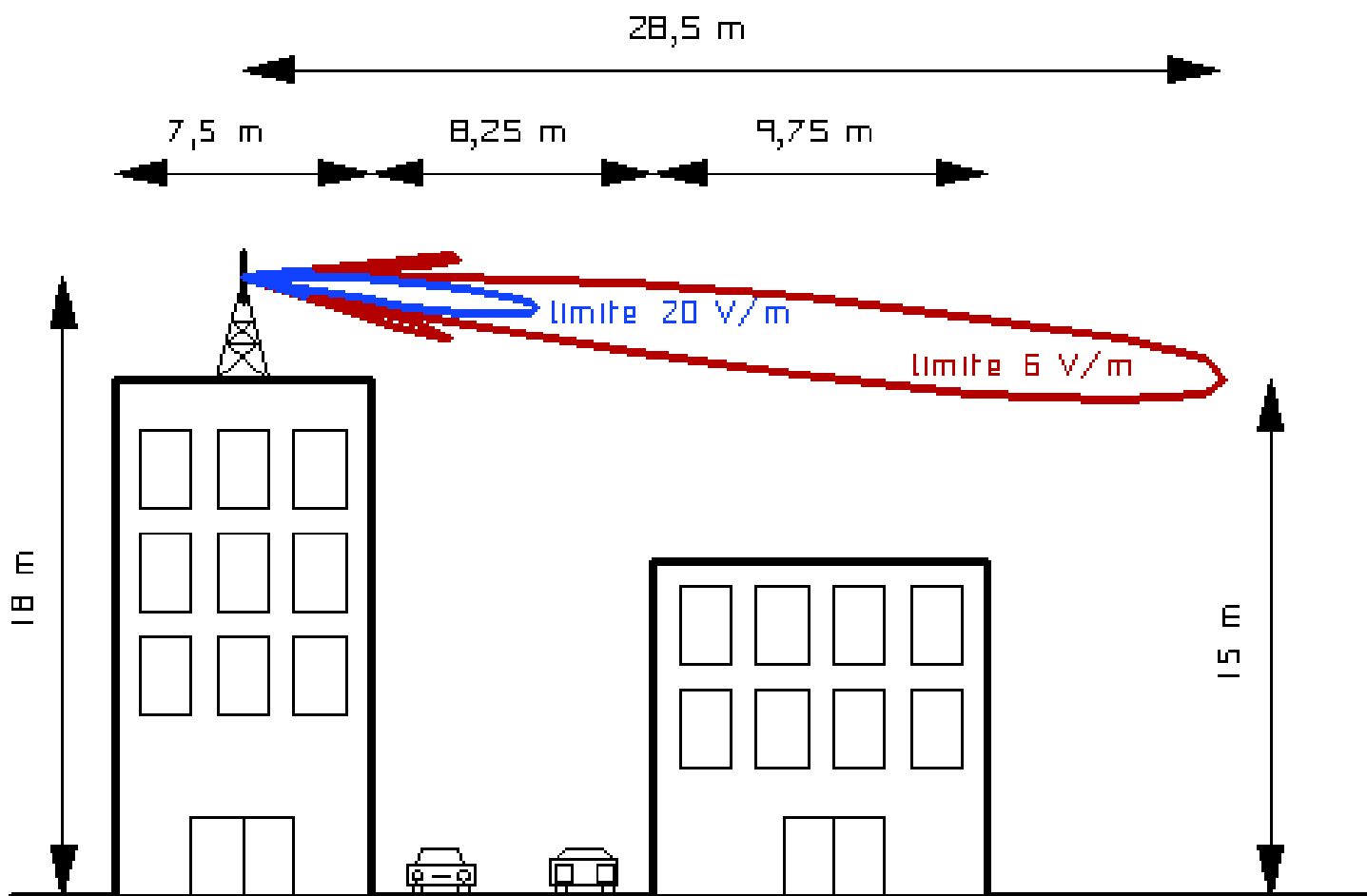


## Esempi di stazioni radio base



# Stazione radio base: esempio

Antenna K739494  
EIRP 1 kW



# **LA SORVEGLIANZA FISICA DEI CAMPI ELETTROMAGNETICI: CONCETTI GENERALI**

# La sorveglianza fisica delle sorgenti di campi elettromagnetici

## TRE APPROCCI

- Metodi analitici più o meno semplificati
- Metodi numerici più o meno raffinati
- Misure sul campo

*Le misure sono il più oneroso dei tre approcci, a causa dei costi connessi con la strumentazione (acquisizione e gestione), con la formazione del personale e con l'esecuzione delle campagne sul territorio*

# Procedura di intervento

- Acquisizione informazioni
- Valutazione preliminare a tavolino
- Sopralluogo e scelta dei siti di misura, allo scopo di:
  - puntare a delimitare l'area in cui i livelli di campo sono superiori ad un prefissato standard di sicurezza
  - accertare il livello di esposizione in zone dove è prevista la permanenza di individui
- Scelta e verifica della strumentazione
- Esecuzione delle misure (secondo un determinato **protocollo**)
- Nuova verifica della strumentazione
- Analisi critica dei risultati, anche per interconfronto con valutazioni indipendenti
- Raffronto con gli standard ed elaborazione delle conclusioni

## Protocollo di misura

Specifica in dettaglio come deve svolgersi la fase di misura vera a propria.

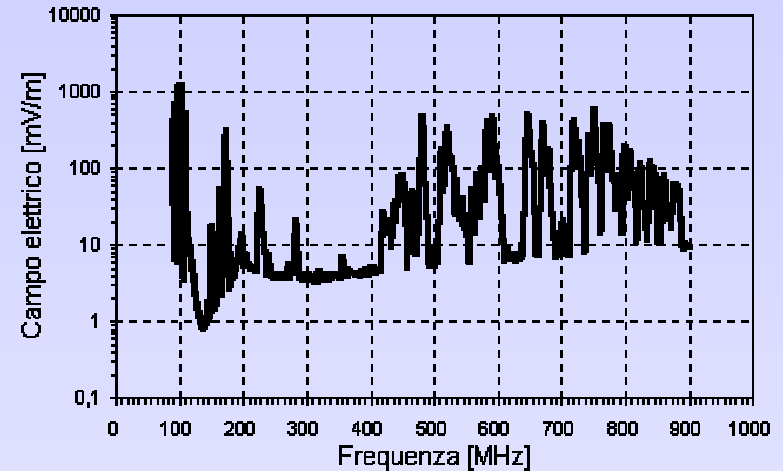
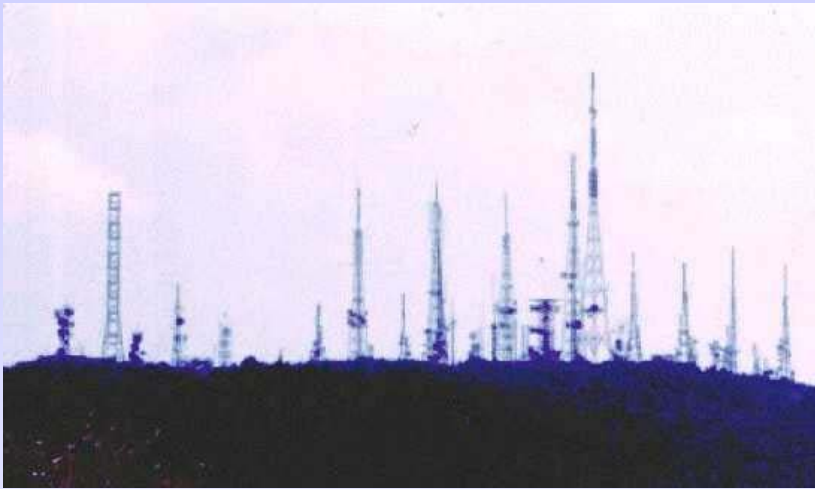
Punta a (1) conformare la misura alle prescrizioni di un dato standard di sicurezza, (2) permettere l'interconfronto tra misure eseguite da centri diversi e (3) aumentare la credibilità della misura nei confronti di osservatori esterni.

Esempi: standard IEEE, guide CEI 211-6 e 211-7, guida tecnica ANPA/CTN-AGF 1/2000.

## **Fattori che influenzano la selezione della strumentazione**

- Frequenza
- Modalità di misura (banda larga/stretta)
- Posizione del sito di misura rispetto alla sorgente (campo vicino/campo lontano)
- Grandezza da misurare (campo E/campo H)

# Modalità di misura: banda larga/banda stretta



- Banda larga: **un unico valore** indica il livello **complessivo** di campo elettromagnetico presente nel sito di misura
- Banda stretta: una misura **per ogni** sorgente



## Misure a banda larga

- + Sono più pratiche, semplici e veloci.
- + Richiedono strumentazione più economica, il cui utilizzo presuppone minori competenze.
- + Forniscono risultati più immediati e sintetici.
- L'operatore non ha il pieno controllo su cosa sta effettivamente misurando.

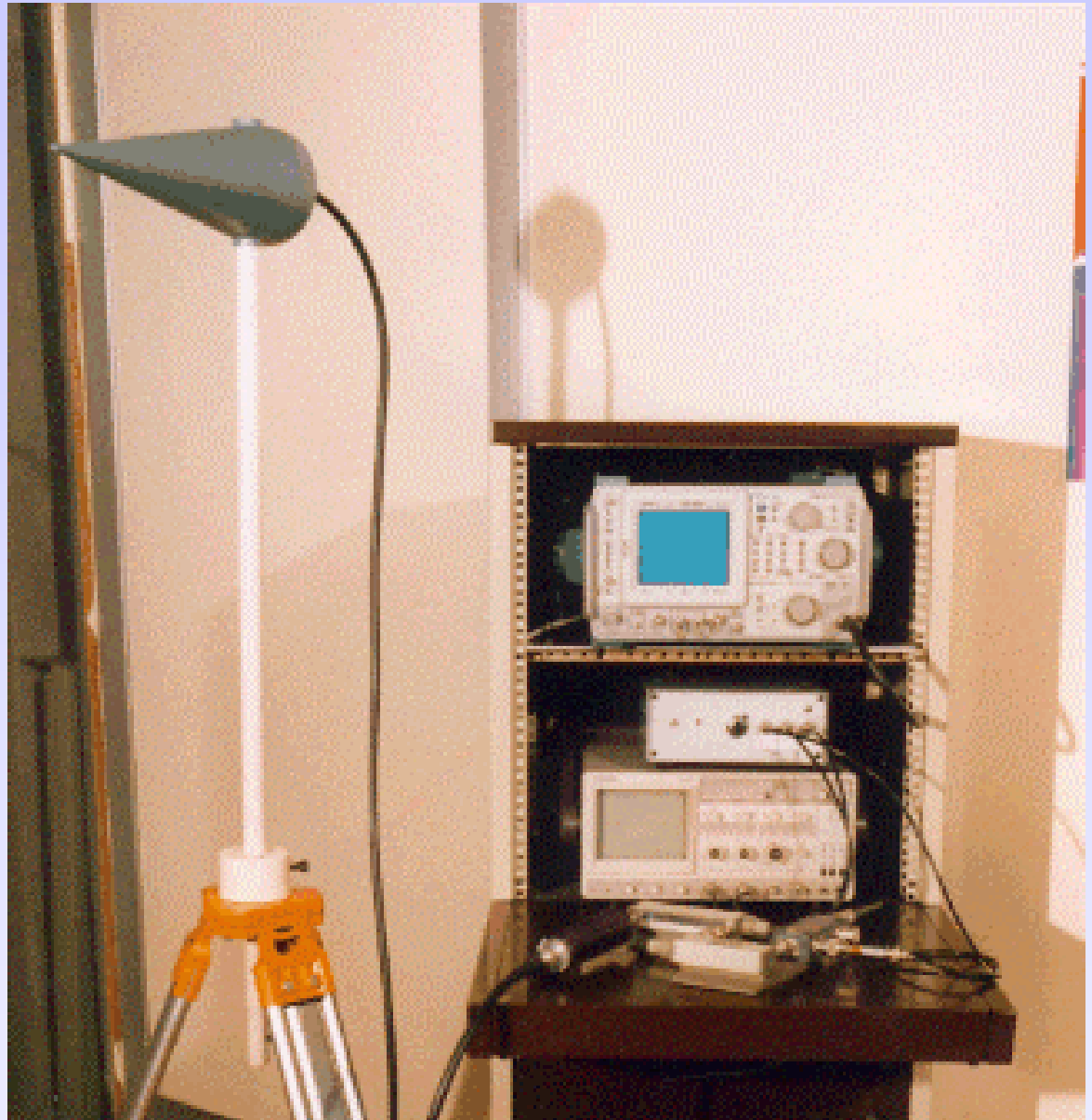
**Esempio di  
sensore di campo  
elettrico a banda  
larga (da 100 kHz  
a 3 GHz, da 1 a  
800 V/m)**



## Misure a banda stretta

- + Forniscono una caratterizzazione completa delle situazioni complesse, poiché permettono di determinare frequenza, ampiezza ed occupazione di banda di ciascuna sorgente presente.
- Richiedono strumentazione costosa e notevole competenza specifica.

**Esempio di  
apparato  
per misure a  
banda  
stretta  
(1- 10 GHz)**



# Analizzatore di spettro portatile

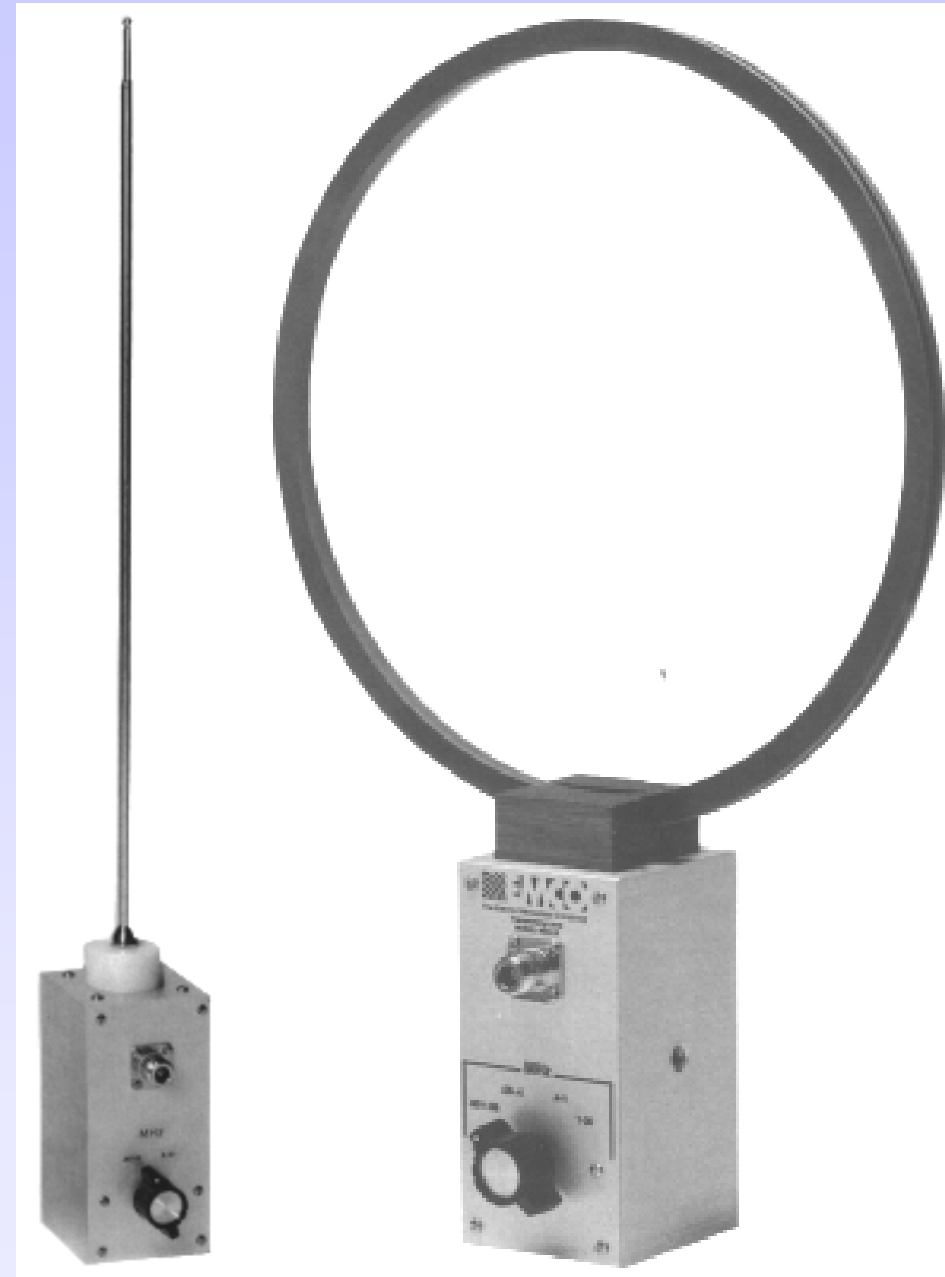


## Posizione del sito: campi reattivi

- I campi reattivi prevalgono in prossimità della sorgente, **fino a circa un decimo di lunghezza d'onda da essa**, e divengono trascurabili **oltre una lunghezza d'onda**.
- Nella regione dei campi reattivi, campo elettrico e campo magnetico sono indipendenti uno dall'altro e devono essere **misurati entrambi**, utilizzando **sensori specifici**.

# Sensori

- Sensore di campo elettrico “rod antenna”
- Sensore di campo magnetico “loop”
- 1 kHz - 30 MHz





# Campi radiativi

- I campi radiativi sono prevalenti a **partire da una distanza di circa una lunghezza d'onda** dalla sorgente.
- Nella regione dei campi radiativi, campo elettrico e campo magnetico sono correlati uno all'altro ed è quindi sufficiente **misurare solo uno dei due** e dedurre l'altro col calcolo:

$$\frac{E}{H} = \zeta_0 \approx 377 \, \Omega \text{ (nel vuoto)}$$

- Per vari motivi tecnici, tra cui la sensibilità del sensore, si preferisce misurare il **campo elettrico**.
- Nella regione dei *campi radiativi lontani* si possono usare le **antenne standard**.



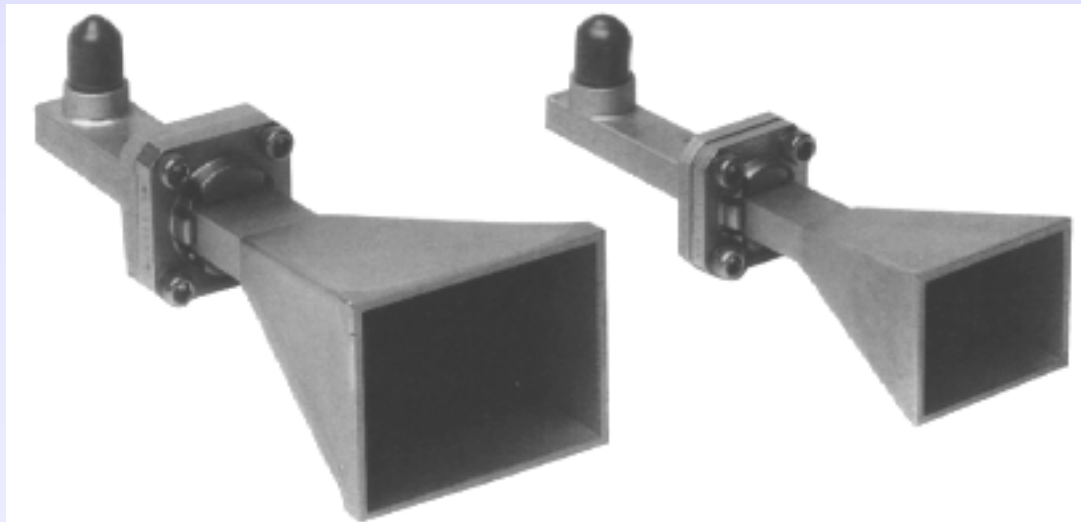
## Antenne standard



**Antenna biconica  
compatta, 80 MHz - 2.5  
GHz**



**Antenna CLS  
(a spirale conica  
logaritmica), 200 MHz  
- 1 GHz e 1 - 10 GHz**



**Antenne a tromba  
(oltre 3 GHz)**

## Giornata di Studio per docenti

**Campi elettromagnetici dalle  
bassissime frequenze alle microonde**

*Daniele Andreuccetti - IFAC-CNR, Firenze*

È tutto, grazie dell'attenzione!

Per approfondimenti:

<http://www.ifac.cnr.it/pcemni/divulg.php>