

Campi elettromagnetici: definizioni, proprietà, esposizione delle persone, metodi di misura

Ing. Andrea Mariscotti⁽¹⁾
Ing. Mario Santini⁽²⁾

III Edizione: Settembre 2002

SOMMARIO

1.	CAMPI ELETTROMAGNETICI	2
1.1.	DEFINIZIONI	2
	Bassa frequenza	2
	Alta frequenza	2
1.2.	ESEMPI DI SORGENTI	2
1.3.	TIPO DI RADIAZIONI E SORGENTI	3
	1.3.1. Radiazioni ionizzanti (Raggi X e Raggi gamma)	3
	1.3.2. Radiazioni ottiche	4
	1.3.3. Radiazioni non ionizzanti	4
2.	MISURA DI CAMPI ELETTROMAGNETICI	5
2.1.	METODI E STRUMENTI DI MISURA	5
2.2.	MODALITÀ DI MISURA	6
3.	EFFETTI BIOLOGICI PRODOTTI DA CAMPI ELETTROMAGNETICI	7
3.1.	EFFETTI BIOLOGICI PRODOTTI DA CAMPI ELETTROMAGNETICI A FREQUENZA INDUSTRIALE (50Hz)	7
3.2.	EFFETTI BIOLOGICI PRODOTTI DA CAMPI ELETTROMAGNETICI A RADIOFREQUENZA E MICROONDE	8
	3.2.1. Effetti termici	9
	3.2.2. Effetti non termici	9
3.3.	CONCLUSIONI	9
4.	NORMATIVA E LEGISLAZIONE	10
5.	CONTROMISURE ED INTERVENTI	13

⁽¹⁾ Dip. Ing. Elettrica – Univ. di Genova (misura di campi elettromagnetici e verifica di EMC)

⁽²⁾ Consulente Tecnico di Ufficio del Tribunale di Genova, Associazione EUROACADEMY

1. CAMPI ELETTROMAGNETICI

1.1. Definizioni

Sono campi elettromagnetici in generale:

- campo elettrico E;
- campo magnetico H;
- manifestazione congiunta di campo elettrico e magnetico con meccanismo di propagazione.

Dal punto di vista del comportamento locale dei campi elettromagnetici distinguiamo gli intervalli di frequenza:

Bassa frequenza	0 – 10 kHz	E e H misurati separatamente
Media frequenza	10 kHz – 1 MHz	dipende da caratteristiche della sorgente e del sito
Alta frequenza	> 1 MHz	E e H misurati congiuntamente

Bassa frequenza

Valgono le leggi dell'elettrostatica e della magnetostatica

Alta frequenza

$$|H| = \frac{|E|}{Z_w}$$

$$Z_w = \begin{cases} Z_{mezzo} & \text{campo lontano} \\ > Z_{mezzo} & \text{sorgente elettrica} \\ \neq Z_{mezzo} & \text{campo vicino} \\ < Z_{mezzo} & \text{sorgente magnetica} \end{cases}$$

Z_w impedenza d'onda

$$Z_{mezzo} \cong \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$$

dove:

- μ permeabilità magnetica
- ϵ costante dielettrica

1.2. Esempi di sorgenti

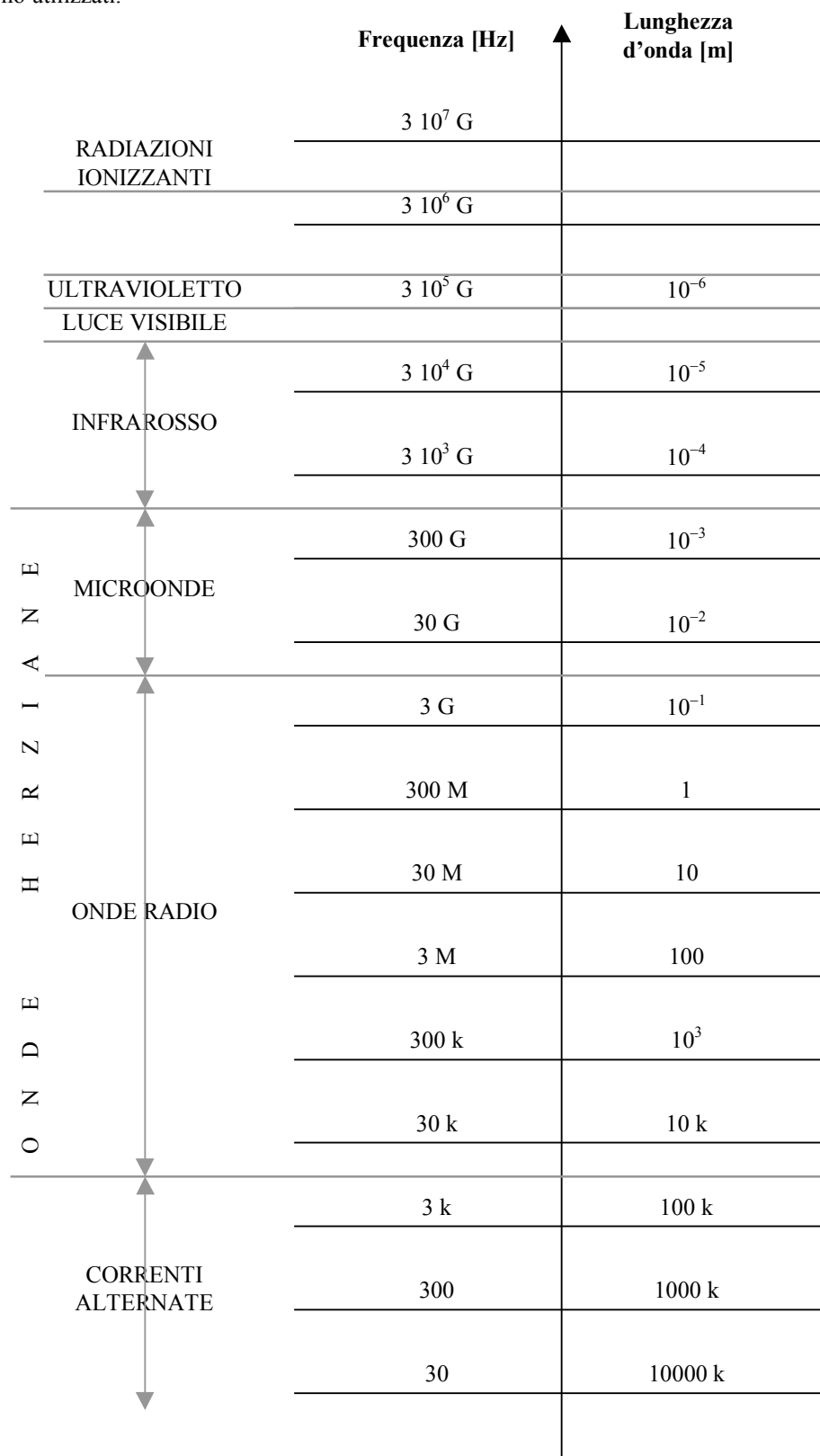
<p>Ambiente industriale</p> <ul style="list-style-type: none"> riscaldamento ad induzione saldatura vetro-metallo sigillatura contenitori plastici lavorazioni metalli preziosi forni ad arco trasformatori 	<p>Ambiente esterno</p> <ul style="list-style-type: none"> elettrodotti antenne telefonia e televisive altre antenne tx dati e dedicate sistemi di rilevazione elettromagnetica sistemi di trasporto (ferrovia, filobus, metropolitana, ...) 	<p>Ambiente domestico</p> <ul style="list-style-type: none"> televisore telefoni portatili (TACS, GSM, radiotelefoni) elettrodomestici (forno a microonde, lavastoviglie, asciugacapelli, rasoio)
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Alcuni valori ...

- > 1 mT a d=10 cm da una bobina sigillatrice a 50 Hz
- > 3 mT a d=qualche cm da apertura crogiolo per metalli preziosi a 3.3 kHz
- ~700 μ T a d=10 cm da rasoio elettrico a 50 Hz
- ~170 μ T a d=12 cm da radiosveglia a 50 Hz
- ~280 μ T a d=10 cm da frullatore ad immersione a 50 Hz
- ~320 μ T a d=10 cm da spremiagrumi a 50 Hz
- ~1000 V/m a d=20 cm da schermo videogioco a 50 Hz
- ~qualche μ T a d=10 cm da monitor PC alla freq. di aggiornamento schermo
- ~30 V/m a d=5 cm da cellulare GSM (900 MHz)

1.3. Tipo di radiazioni e sorgenti

In figura è riportato lo spettro di frequenza delle onde elettromagnetiche, cioè gli intervalli di frequenze ed i settori in cui questi vengono utilizzati.



1.3.1. Radiazioni ionizzanti (Raggi X e Raggi gamma)

Sono costituite da frequenze superiori all'ultravioletto e prendono questo nome perchè interagiscono con gli atomi espellendo elettroni e dando così luogo alla formazione di ioni. Queste radiazioni mettono in gioco densità di energie molto alte ed inoltre possono modificare la struttura interna e le proprietà chimico-fisiche dei materiali che ne vengono colpiti. La loro azione è dovuta al fatto che, per le piccolissime lunghezze d'onda ad esse relative (1 micron), si vengono

a creare campi elettromagnetici di elevata intensità fra punti a distanze interatomiche. Le sorgenti di tali radiazioni sono le sostanze radioattive.

1.3.2. Radiazioni ottiche

Sono costituite da frequenze alle quali l'occhio umano è sensibile ed interagiscono direttamente con la materia vivente eccitando le molecole. Gli effetti sull'uomo consistono prevalentemente in variazioni cutanee e iperpigmentazione.

1.3.3. Radiazioni non ionizzanti

Sono costituite da frequenze che vanno da qualche Hz fino all'infrarosso. Le applicazioni e gli effetti delle radiazioni non ionizzanti sono diverse a seconda della frequenza. Occorre quindi distinguere tre intervalli:

- a) Frequenze industriali (0 - 50 Hz)
- b) Campi elettromagnetici a bassa frequenza (50/60 Hz - 10 kHz)
- c) Campi elettromagnetici ad alta frequenza (10 kHz - 300 GHz)

Le applicazioni delle radiazioni non ionizzanti sono molto diverse a seconda della frequenza, per cui occorre considerare tre intervalli:

- a) Frequenze industriali (0 - 50 Hz):
sono utilizzate nelle linee elettriche (per il trasporto a distanza e la distribuzione dell'energia elettrica) e per il funzionamento di motori elettrici, trasformatori e svariati elettrodomestici di uso comune (TV, forni, lavatrici, computers, asciugacapelli, vasche idromassaggio, radiosvegliare, rasoi elettrici, ...);
- b) Basse frequenze (50/60 Hz – 10kHz):
sono utilizzate nella telefonia, nelle trasmissioni radio intercontinentali ed in quelle via cavo; accompagnano anche il funzionamento dei carichi non lineari (convertitori statici) allacciati alle reti di distribuzione di energia elettrica;
- c) Alte Frequenze (10kHz - 300GHz):
con riferimento a sistemi non diffusivi (con inquinamento elettromagnetico locale limitato alle persona in vicinanza), si distinguono le seguenti applicazioni:
 - industria alimentare (forni a microonde, sterilizzatori, forni di precottura, distruzione di insetti e larve nei cereali e nel tabacco, ...) dove la banda di frequenza è quella delle microonde e la potenza dei generatori è compresa tra 1 e 100 kW. In particolare, i forni a microonde, ampiamente utilizzati anche per usi domestici, hanno frequenza di lavoro di 2.45 GHz (la banda ISM permessa per queste operazioni) e potenza generalmente inferiore a 2kW;
 - industria elettronica (raffinazione di semiconduttori, produzione di fibre ottiche, saldatura);
 - industria della carta (essiccamento);
 - industria del legno (incollaggio, stagionatura, fabbricazione del legno compensato), in cui sono utilizzate potenze compresa tra pochi kW e qualche centinaio di kW;
 - industria siderurgica (tempera superficiale, stampaggio a caldo, saldature), dove la potenza dei generatori varia fra 1 kW e molte centinaia di kW;
 - industria delle materie plastiche (riscaldamento delle resine termoindurenti, accelerazione della formazione di polimeri, ...);
 - applicazioni mediche (diatermia, stimolazione della osteogenesi, diagnostica con tecniche raffiguranti (RMN), marconiterapia); nel caso della marconiterapia, i generatori lavorano alle frequenze di 27.12 o 40.68 o 433.92 MHz con una potenza trasferita ai trasduttori di circa qualche centinaio di W (in relazione al tipo di terapia ed alla regione da trattare i trasduttori sono bobine o condensatori con diversa geometria);
 - sistemi di comunicazione portatili, quali walkie-talkie (nelle bande CB e VHF, ovvero 27 e 144 MHz), cellulari (ETACS, GSM e DCS, ovvero nelle bande 450, 900 e 1800 MHz).

Le applicazioni con inquinamento diffuso sono invece le seguenti:

- sistemi di comunicazione (diffusione radiotelevisiva, collegamenti punto-punto in ponte radio, collegamenti via satellite, stazioni per servizi radiomobile e telefonia cellulare) i quali rappresentano fonte di esposizione per la popolazione specialmente nelle aree ad alta densità abitativa;
- sistemi radar (radionavigazione, radiolocalizzazione e telerilevamento), caratterizzati da un funzionamento generalmente pulsato (in alcuni casi continuo) con elevatissime potenze di picco (da alcuni kW ad alcuni MW).

I contributi maggiori all'inquinamento elettromagnetico alle alte frequenze diffuso sul territorio sono forniti dagli apparati radar, dai trasmettitori radio (con potenze di alcune decine o centinaio di kW), dai trasmettitori degli impianti televisivi (di potenza normalmente compresa tra qualche centinaio di W e qualche kW), dalle antenne delle stazioni radio base (SRB) della telefonia cellulare, le cui potenze sono inferiori e si attestano su valori dell'ordine di qualche decina e al massimo un centinaio di W.

2. MISURA DI CAMPI ELETTROMAGNETICI

2.1. Metodi e strumenti di misura

Le tipologie di misura dei valori del campo elettromagnetico sono due:

Misure a larga banda: vengono realizzate tramite strumenti che forniscono l'indicazione del risultato di misura indipendentemente dal numero, dalla tipologia e dalla collocazione in frequenza delle sorgenti elettromagnetiche. Tali strumenti sono caratterizzati da sensori larga banda operanti su diverse decadi di frequenza, dall'assenza di filtri passa-banda selettivi o blocchi di demodulazione o mixer e dalla successiva rivelazione del valore efficace totale, per mezzo di rivelazione di involuppo o misura degli effetti termici (bolometro).

Misure selettive: vengono realizzate con strumenti che consentono di valutare il contributo di ciascuna sorgente alle specifiche frequenze di emissione; si distinguono analizzatori di spettro e ricevitori, che per lo scopo delle nostre misure possono essere assimilati indifferentemente ad un apparecchio costituito da un filtro pre-selettore di ingresso con attenuazione regolabile, un mixer locale, un filtro passa-banda sulla IF ("frequenza intermedia") in uscita dal mixer (che stabilisce la larghezza di banda di rivelazione) e il rivelatore di uscita (che determina la modalità di rivelazione, valore medio, picco o quasi-picco e le relative costanti di tempo).

Non essendoci suscettività specifica del corpo umano a frequenze particolari e non essendo perciò necessaria una elevata risoluzione in frequenza è utilizzata generalmente la metodologia a larga banda; è possibile successivamente ricorrere a misure selettive nei punti ove i valori riscontrati con il metodo a larga banda sono prossimi ai limiti di riferimento secondo un margine cautelativo, in modo da distinguere il contributo di ciascuna sorgente e la severità del contributo, in base alla frequenza di emissione e anche della direzione (utilizzando antenne direttive orientabili).

Sensori

Bassa frequenza

Campo E come caduta di potenziale V su distanza d nota
(attenzione a Z_{in} strumento di misura che "shunta" il campo sotto esame)

Campo H come forza elettromotrice su spira di misura
(incremento numero spire con attenzione a capacità parassita a freq. più alte;
resistenza ohmica conduttore spira limita risposta alle freq. più basse)

Campo B come effetto Hall
(problemi di sensibilità su sonde effetto Hall)

Media frequenza

Campo E per mezzo di antenna a dipolo "de-tuned"
(attenzione ad accoppiamenti capacitivi con ambiente circostante e piano di massa antenna)

Campo H per mezzo di antenna a loop

Alta frequenza

Campo E (ed H) per mezzo di antenne diverse:
dipoli "tuned", antenne filari (log-periodiche, biconiche, Yagi),
antenne a superficie (per microonde), dipoli "de-tuned"

Sistemi di lettura

(1) Analizzatore di spettro

Filtro passa-banda selettivo all'uscita di un mixer pilotato da un oscillatore locale;
rivelazione a valle con metodi di raddrizzamento

(2) Ricevitore RF

Analogo all'analizzatore di spettro

(3) Rivelazione senza scanning

Rivelazione con metodi di raddrizzamento senza operazioni di scanning (semplice limitazione della banda del segnale di ingresso)

(4) Acquisizione nel tempo

Acquisizione per mezzo di sistema di acquisizione o oscilloscopio e calcolo dello spettro per mezzo di analisi di Fourier

Tempo-frequenza

(1,2) Risoluzione in frequenza dipende da scelta del passo e larghezza di banda del filtro

(1,2) Attenzione all'impostazione dei metodi di rivelazione (picco, quasi-picco, costanti tempo)

(3) Impossibile indagare selettivamente una sorgente

(3) Metodo rapido e facile

(4) Valido alle basse frequenze (calcoli onerosi)

2.2. Modalità di misura

Quando possibile, ovvero quando si è a conoscenza delle caratteristiche delle sorgenti, è opportuno fare delle previsioni di massima dei valori di campo elettromagnetico attesi. Da queste previsioni si ricavano le prime indicazioni per la scelta dello strumento e dei sensori da utilizzare.

Sulla carta planimetrica dei luoghi da controllare (siano essi aree non edificate, strade e aree cittadine, edifici e parti di essi) si determinano i punti di riferimento per i quali si realizzeranno previsioni di campo dettagliate.

I valori vanno rilevati nei punti individuati e, nel caso di misure a larga banda, il sensore va collocato evitando la presenza di condizioni che possono, in qualche modo, perturbare la misura. Tra queste ricordiamo la presenza in prossimità del sensore di superfici metalliche (ringhiere, recinzioni, gli stessi tondini del cemento armato), possibilità di riflessioni e fenomeni di onde stazionarie, l'influenza dell'operatore (il sensore è sostenuto con una mano o è troppo vicino al corpo dell'operatore).

Le misure vanno eseguite con le sorgenti in diverse condizioni di esercizio, tenendo conto delle condizioni più severe e della porzione di tempo allocabile a ciascuna delle condizioni.

3. EFFETTI BIOLOGICI PRODOTTI DA CAMPI ELETTROMAGNETICI

Prima di esaminare alcuni casi in merito agli effetti biologici e alle possibili associazioni tra esposizione e insorgenza di patologie, occorre sottolineare quali possano essere gli atteggiamenti nell'esame dei problemi di indagine causale in epidemiologia ambientale, considerando in particolare la natura multifattoriale della maggior parte delle malattie non trasmissibili, le difficoltà di valutazione dell'esposizione ed il carattere osservazionale (non sperimentale) degli studi.

Un primo tipo di approccio valorizza le indicazioni emerse dagli studi epidemiologici, anche in assenza di conoscenze sui meccanismi biologici sottesi ai fenomeni in esame; fra i criteri di causalità normalmente considerati, viene attribuito un ruolo preminente all'associazione e alla riproducibilità. Si riconosce agli studi epidemiologici un particolare significato per quanto riguarda l'identificazione di fattori di rischi non precedentemente riconosciuti.

Un secondo tipo di approccio è basato su un'approfondita conoscenza dei meccanismi patogenetici degli agenti presi in esame.

Gli effetti dei campi elettromagnetici sulla salute umana indagati finora si differenziano a seconda della frequenza del campo incidente.

3.1. Effetti biologici prodotti da campi elettromagnetici a frequenza industriale (50Hz)

Tutti i ricercatori concordano sul fatto che gli effetti dei campi elettromagnetici sulla salute umana vanno investigati considerando la componente magnetica del campo, in quanto la componente elettrica viene schermata dai muri delle case e da altri ostacoli come, per esempio, alberi, siepi e recinzioni. Inoltre, l'intensità di un campo elettrico esterno si riduce notevolmente all'interno del corpo umano (con caratteristiche di conduttore anch'esso), mentre l'intensità del campo magnetico non cambia in quanto il corpo umano non ha caratteristiche magnetiche.

L'effetto diretto sul corpo umano di campi magnetici a frequenza industriale consiste nell'induzione di correnti circolanti. Il valore delle correnti endogene (generate internamente) nel corpo umano è dell'ordine dei 10 mA/mq. L'IRPA/INIRC raccomanda che l'ampiezza delle correnti indotte non superi detto valore. Al di sopra di tale soglia, fino a 100mA/mq, si possono manifestare disturbi al sistema visivo e al sistema nervoso centrale; tra 100mA/mq e a 1000mA/mq, possono insorgere rischi sanitari per la stimolazione dei tessuti eccitabili ed infine, oltre i 1000mA/mq, si può avere la fibrillazione ventricolare.

Questa analisi è alla base della valutazione del rischio per effetti acuti (vedi standard ENV 50166-1).

Per quanto riguarda gli effetti cumulativi e a lungo termine, un'ipotesi interpretativa suggerisce che il campo magnetico perturbi il sistema endocrino, attraverso un'azione sull'ipofisi, abbassando il livello di melatonina (ormone prodotto dalla ghiandola pineale, situata nel cervello, che regola il ciclo giorno-notte del corpo umano), che sembra avere un ruolo importante nel controllo dell'insorgenza e/o dello sviluppo di neoplasie.

L'Istituto Superiore di Sanità ha prodotto il rapporto [Grandolfo et al., 1989] "Linee ad alta tensione: modalità di esposizione e valutazione del rischio sanitario". Le conclusioni presentate sono state:

1. esistono elementi per ritenere che l'esposizione a campi ELF possa accrescere il rischio di neoplasia, anche se questa relazione non è per ora dimostrata in termini convincenti;
2. qualora si stabilisca un nesso causale fra l'esposizione a campi ELF e l'insorgenza di neoplasie, risulterà esposto a rischio non solo chi abita in prossimità di linee ad alta tensione ma anche l'utente di energia elettrica a livello domestico;
3. le ricerche in corso in diversi paesi europei, negli USA e in Canada porteranno nel giro di qualche anno a fornire risposte esaurienti ai quesiti aperti;
4. tenuto conto delle attuali incertezze e del fatto che gli studi di laboratorio hanno finora fornito scarsi elementi a sostegno dell'ipotesi che i campi ELF possano essere associati ad un aumento di incidenza dei tumori, si ritiene che i dati epidemiologici oggi disponibili non possano essere assunti a base di processi decisionali e misure di sanità pubblica.

A distanza di alcuni anni è apparso opportuno effettuare una nuova valutazione della letteratura scientifica disponibile e formulare alcune considerazioni di sanità pubblica. Le ricerche in corso di cui al punto 3 hanno portato a pubblicazioni nel biennio 1993-1994:

Soggetto di studio	Valutazione dell'esposizione	Conclusioni
[Olsen et al., 1993] Casi di tumore linfo-emopoietico e cerebrale, per età comprese tra 0 e 15 anni, risultanti da analisi in Danimarca anni 1968-1986.	Olsen, Nielsen and Schulgen, "Residence near high voltage facilities and risk of cancer in children", Br. Med. J., v. 307, pp. 891-895. Stima di B in base a: caratteristiche linee elettriche; distanza delle abitazioni.	Aumento del rischio di tumori per residenti in abitazioni con livelli di B >0.4 μ T.
[Feychting and Ahlbom., 1993] Casi di linfomi, leucemie e tumori del sistema nervoso centrale, per bambini con abitazione a meno di 300 m da linee di alta tensione, risultanti da analisi in Svezia anni 1960-1985.	Feychting and Ahlbom, "Magnetic fields and cancer in children residing near Swedish high-voltage power lines", Am. J. Epidemiem., v. 138, pp. 467-481. Misura di B nelle abitazioni. Stima di B nel corso del tempo in base a: caratteristiche linee elettriche; distanza delle abitazioni.	Aumento del rischio per residenti in abitazioni con livelli di B >0.2 μ T.
[Verkasalo et al., 1993] Bambini con abitazione a meno di 500 m da linee di alta tensione, risultanti da analisi in Finlandia anni 1970-1989.	Verkasalo et al., "Risk of cancer in Finnish children living close to power lines", Br. med. J., v. 307, pp. 895-899. Stima di B in base a: caratteristiche linee elettriche; distanza delle abitazioni.	No associazioni significative. Aumento di incidenza di tumori cerebrali per residenti in abitazioni con livelli di B >0.2 μ T.
[Schreiber et al., 1993] Popolazione con abitazione a meno di 100 m da linee di alta tensione, nel quartiere di Maastricht, anni 1956-1981.	Schreiber et al. "Cancer mortality and residence near electricity transmission equipment: a retrospective cohort study", Int. J. Epidem., v. 22, pp. 9-15. Misura di B nelle abitazioni. Stima di B in base a: caratteristiche linee elettriche; distanza delle abitazioni.	Aumento di mortalità per: malattie circolatorie negli uomini; linfoma di Hodgkin nelle donne.

In queste pubblicazioni è indicato un incremento di rischio di malattie neoplastiche (tranne che in Schreiber) in relazione ad esposizione a livelli di induzione magnetica superiori a 0.2/0.4 μ T.

Per contro, [Sahl et al., 1993] riportano di non aver osservato significative associazioni tra esposizione a campi magnetici e insorgenza di leucemie, linfomi e tumori per i dipendenti di una società elettrica americana. Anche [Savitz e Loomis, 1995] non confermano relazioni tra esposizione a campi magnetici e leucemia, mentre sottolineato un incremento di tumori cerebrali in funzione dell'esposizione cumulativa, in uno studio relativo a cinque società elettriche americane.

Non bisogna dimenticare che per i livelli di esposizione prossimi a quelli incontrati negli ambienti residenziali e lavorativi, il fattore di rischio è decisamente trascurabile rispetto ad altri agenti, quali abitudini alimentari e di vita (apporto di proteine e grassi, uso di alcolici, caffeina, tabacco, etc.), inquinamento chimico ambientale, contatto con sostanze tossiche (solventi, benzine, particolari materie plastiche, etc.), la cui influenza rende lo studio delle correlazioni a bassi livelli di esposizione piuttosto difficile ed esposta ad errori di valutazione.

3.2. Effetti biologici prodotti da campi elettromagnetici a radiofrequenza e microonde

L'analisi degli effetti delle radiazioni elettromagnetiche a radiofrequenza e microonde sui tessuti biologici consiste nel valutare come il campo elettromagnetico interagisce con il corpo e quali fenomeni fisio-patologici può eventualmente scatenare accelerando processi naturali o creando alterazioni.

I campi elettromagnetici possono provocare sui sistemi biologici effetti di due tipi: termici e non termici.

I primi sono quelli che provocano un aumento (generale o localizzato) della temperatura corporea stabile e/o transitorio (compensato dalla termoregolazione). I secondi, prodotti da una dispersione di energia bassa rispetto a quella prodotta per metabolismo, non possono essere classificati con una sola definizione.

Più esattamente un effetto viene considerato termico quando si verifica un aumento di temperatura totale maggiore di 0.5 gradi C, non termico nel caso opposto.

3.2.1. Effetti termici

Quando un'onda elettromagnetica incontra un corpo materiale, parte della sua energia viene riflessa e parte viene trasmessa all'interno del corpo investito; la percentuale di energia che penetra nella materia dà luogo ad un progressivo riscaldamento causato dal meccanismo dell'assorbimento. I fattori che influenzano l'assorbimento dell'energia elettromagnetica sono i seguenti:

- caratteristiche elettromagnetiche della struttura irradiata;
- dimensioni del corpo rispetto alla lunghezza d'onda;
- forma dell'oggetto irradiato e suo orientamento rispetto alla polarizzazione della radiazione incidente;
- caratteristiche fisiche della radiazione elettromagnetica nel tempo (onda continua o impulsata);
- percentuale del contenuto d'acqua nella struttura irradiata.

Per valutare quindi l'effetto termico di un campo elettromagnetico occorre conoscere la capacità termica e la conduttività termica di ogni tessuto interessato dal campo.

La dissipazione del calore è molto buona nei tessuti vascolarizzati a causa del flusso del sangue, pertanto gli effetti termici a carico degli occhi e delle gonadi, per l'assenza di vascolarizzazione, sono particolarmente temibili (cataratta e sterilità maschile). A carico del sistema nervoso, invece, i campi elettromagnetici possono provocare cefalea, perdita di memoria, insonnia, affaticamento e faticabilità, anoressia e diminuzione della capacità sessuale.

Anche la percentuale del contenuto d'acqua nella struttura irradiata è importante per l'assorbimento delle onde elettromagnetiche. Infatti i tessuti più ricchi d'acqua (sangue, cervello) assorbono molta più energia rispetto agli altri (tessuto adiposo, osseo, cartilagineo).

Un altro fattore che influenza pesantemente il meccanismo di assorbimento dell'energia elettromagnetica è il rapporto tra dimensione del corpo irradiato e lunghezza d'onda della radiazione stessa. Alle alte frequenze, quando la lunghezza d'onda è molto piccola rispetto alle dimensioni del corpo umano, si verificano condizioni di sovra-risonanza con conseguente deposizione di energia confinata alla superficie del corpo stesso. A frequenze più basse, quando la lunghezza d'onda diviene confrontabile con le dimensioni del corpo investito, l'assorbimento di energia aumenta considerevolmente perchè il corpo umano si comporta, nei confronti dell'onda elettromagnetica, come un'antenna a $(\lambda)/2$ ed assorbe il massimo dell'energia elettromagnetica. Quindi, per esempio, il massimo assorbimento di energia elettromagnetica si verifica, per un persona di corporatura media del peso di 70 Kg ed altezza di 1.75 m, alla frequenza di circa 70MHz nel senso dell'altezza e a circa 400/600 MHz nel senso della larghezza e della profondità. In tale circostanza l'energia elettromagnetica non si deposita uniformemente sul tutto il corpo ma si localizza in determinati distretti corporei indicati con il termine di "punti caldi elettromagnetici".

3.2.2. Effetti non termici

Ancora oggi i meccanismi di interazione del campo elettromagnetico a livello microscopico sono ben lungi dall'essere spiegati. Il dibattito è dunque tuttora aperto, anche se i ricercatori di tutto il mondo sembrano concordi nel ritenere la membrana cellulare il principale sito dell'interazione.

La membrana cellulare rappresenta l'interfaccia tra l'interno della cellula ed il fluido extracellulare e, in quanto tale, è responsabile della comunicazione della cellula con il mondo esterno. Tale comunicazione avviene attraverso svariati meccanismi, che implicano comunque il passaggio di ioni o molecole attraverso la membrana cellulare. E' possibile infatti distinguere nella membrana cellulare delle strutture proteiche che, variando la loro conformazione, sono in grado di generare canali di comunicazione tra esterno ed interno (con direzione preferenziale) della cellula. Questi canali sono sensibili a particolari composti chimici o a differenze di potenziale; il risultato è comunque l'apertura del canale e lo spostamento degli ioni sulla base del gradiente di concentrazione corrispondente. Ciò che i recenti studi hanno evidenziato è proprio un'alterazione del fenomeno di trasporto dei suddetti ioni attraverso la membrana cellulare. Gli effetti non termici sono oggi i più studiati e temuti, per l'intrinseco potenziale di rischio che presentano.

3.3. Conclusioni

Dunque, per prevenire eventuali effetti dannosi sulle persone esposte è necessario predisporre tutta una serie di accorgimenti riguardanti sia gli apparati irradianti sia le zone di esposizione atte ad assicurare quel Principio Cautelativo che, sia in ambito nazionale che internazionale, si è decisi di istituire.

Vengono classificate come tecniche di "protezione attiva" quelle tecniche messe in atto sulle sorgenti di campo al fine di diminuire i campi elettromagnetici dispersi. Invece, con il termine "protezione passiva" si intendono tutte le tecniche di misura e di allarme messe in atto sugli ambienti in cui si possono trovare persone esposte, nonché le tecniche di protezione personale.

Bisogna sottolineare che la necessità di tecniche di protezione risulta solo in rari casi, dove i livelli di esposizione sono molto al di sopra della media.

4. NORMATIVA E LEGISLAZIONE

Le normative sulla protezione dalle radiazioni non ionizzanti (alla frequenza industriale, a radiofrequenza e a microonde) sono, sia nel nostro paese sia a livello internazionale, molteplici e ancora lontane dal raggiungimento di un'unificazione. Negli ultimi decenni la comunità scientifica internazionale e, con essa, l'opinione pubblica ha mostrato un crescente interesse sui possibili rischi sanitari derivanti dall'esposizione a radiazioni elettromagnetiche. In Italia esistono fondamentalmente due leggi nazionali:

DPCM del 23.4.1992 (G.U. n. 104 del 6.5.1992) "Limiti massimi di esposizione ai campi elettrico e magnetico generati alla frequenza industriale nominale (50 Hz) negli ambienti abitativi e nell'ambiente esterno"

Decreto Ministero dell'Ambiente 10.9.1998, n. 381 (G.U. n. 257 del 3.11.1998) "Regolamento recante norme per la determinazione dei tetti di radiofrequenza compatibili con la salute umana"

oltre ad una serie di leggi regionali introdotte dalle regioni Piemonte, Lazio, Abruzzo e Veneto tutte improntate alla tutela da esposizioni a radiofrequenza e a microonde.

Inoltre, il 30.11.1994, il CENELEC ha approvato due Norme Sperimentali:

ENV 50166-1, "Esposizione umana ai campi elettromagnetici a bassa frequenza (0 Hz - 10KHz)"

ENV 50166-2, "Esposizione umana ai campi elettromagnetici ad alta frequenza (10KHz - 300GHz)"

Queste due normative sono state tradotte e pubblicate dal CEI (Comitato Elettrotecnico Italiano) nel Maggio 1995 (CEI ENV 50166-1, CEI ENV 50166-2).

Per quanto riguarda i limiti di esposizione alle frequenze industriali, il DPCM del 23.4.1992 (G.U. n. 104 del 6.5.1992) all'art. 4 stabilisce:

5 kV/m e 0.1 mT, rispettivamente per l'intensità di campo elettrico e di induzione magnetica, in aree o ambienti in cui si possa ragionevolmente attendere che individui della popolazione trascorrono una parte significativa della giornata;

10 kV/m e 1 mT, rispettivamente per l'intensità di campo elettrico e di induzione magnetica, nel caso in cui l'esposizione sia ragionevolmente limitata a poche ore al giorno.

Per quanto riguarda le distanze di rispetto dagli elettrodotti, il DPCM del 23.4.1992 (G.U. n. 104 del 6.5.1992) all'art. 5 stabilisce:

con riferimento alle linee elettriche aeree esterne a 132 kV, 220 kV e 380 kV, si adottano, rispetto ai fabbricati adibiti ad abitazione o ad altra attività che comporta tempi di permanenza prolungati, le seguenti distanze da qualunque conduttore della linea:

linee a 132 KV: distanza maggiore o uguale a 10 metri;

linee a 220 KV: distanza maggiore o uguale a 18 metri;

linee a 380 KV: distanza maggiore o uguale a 28 metri.

Invece, per quanto riguarda i limiti di esposizione alla radiofrequenza ed alle microonde, il Decreto Ministero dell'Ambiente 10.9.1998, n. 381 (G.U. n. 257 del 3.11.1998), all'art. 3 stabilisce i valori in tabella:

Frequenza [MHz]	Campo elettrico E [V/m]	Campo magnetico H [A/m]
0.1 - 3	60	0.2
3 - 3000	20	0.05
3000 - 300000	40	0.1

ed all'art. 4 comma 2 precisa:

in corrispondenza di edifici edibiti a permanenze non inferiori a 4 ore, non devono essere superati i seguenti valori, indipendentemente dalla frequenza, mediati su un'area equivalente alla sezione verticale del corpo umano e su qualsiasi intervallo di 6 minuti:

6 V/m per il campo elettrico;

0.016 A/m per il campo magnetico;

intesi come valori efficaci e, per frequenze comprese tra 3MHz e 300GHz, 0.10 W/mq per la densità di potenza dell'onda piana equivalente.

I limiti di esposizione riportati nelle normative ENV 50166-1 e -2 sono fissati facendo riferimento alla prevenzione dagli effetti acuti dei campi elettromagnetici.

Limiti di esposizione dei lavoratori (bassa frequenza 0 - 10 kHz)

Frequenza [Hz]	Campo di induzione magnetica [mT]	Campo elettrico [kV/m]	Tempo [ore]
0 - 0.1	2000 ⁽¹⁾	42 ⁽⁴⁾	t < 112/E ⁽³⁾
0.1 - 0.23	1400 ⁽²⁾	30 ⁽⁴⁾	t < 80/E ⁽³⁾
0.23 - 1	320/f	1500/f	t < 80/E ⁽³⁾
1 - 4	320/f ²	1500/f	
4 - 1500	80/f (1.6 a 50 Hz)	1	
1500 - 10000	0.053		

(1): 0.2 T per la media temporale ponderata in un periodo di 8 ore
 (2): 0.14 T per la media temporale ponderata in un periodo di 8 ore (0.1 - 1.5 Hz)
 (3): limite di tempo t in un periodo di 8 ore per valori al di sopra del limite di campo E
 (4): nelle situazioni di campo E prevalentemente perpendicolare (anziché parallelo) i limiti possono essere superati

Limiti di esposizione della popolazione (bassa frequenza 0 - 10 kHz)

Frequenza [Hz]	Campo di induzione magnetica [mT]	Campo elettrico [kV/m]
0 - 0.1	40	14
0.1 - 1.15	28	10
1.15 - 1500	32/f (0.64 a 50 Hz)	600/f
1500 - 10000	0.021	0.4

Limiti di esposizione continui dei lavoratori (alta frequenza 10 kHz - 300 GHz)

Frequenza [MHz]	Campo elettrico [V/m]	Campo magnetico [A/m]
0.01 - 0.038	1000 ⁽¹⁾	42 ⁽¹⁾
0.038 - 0.61	1000 ⁽¹⁾	1.6/f ⁽¹⁾
0.61 - 10	614/f	
10 - 400	61.4	
400 - 2000	3.07 f ^{1/2}	
2000 - 150000	137	
150000 - 300000	0.354 f ^{1/2}	

(1): valori di riferimento per esposizioni a solo campo elettrico (E) o magnetico (H); l'esposizione ad entrambe le componenti da una singola sorgente deve essere valutata come irradiazione simultanea da sorgenti indipendenti

Limiti di esposizione continua della popolazione (alta frequenza 10 kHz - 300 GHz)

Frequenza [MHz]	Campo elettrico [V/m]	Campo magnetico [A/m]
0.01 - 0.042	400 ⁽¹⁾	16.8 ⁽¹⁾
0.042 - 0.68	400 ⁽¹⁾	0.7/f ⁽¹⁾
0.68 - 10	275/f	
10 - 400	27.5	
400 - 2000	1.37 f ^{1/2}	
2000 - 150000	61.4	
150000 - 300000	0.158 f ^{1/2}	

(1): valori di riferimento per esposizioni a solo campo elettrico (E) o magnetico (H); l'esposizione ad entrambe le componenti da una singola sorgente deve essere valutata come irradiazione simultanea da sorgenti indipendenti

Rivestono infine un ruolo molto importante i seguenti rapporti dell'Istituto Superiore di Sanità che illustrano approfonditamente la problematica e mirano alla determinazione del Principio Cautelativo che è stato introdotto ufficialmente con il Decreto Ministero dell'Ambiente 10.9.1998, n. 381 (G.U. n. 257 del 3.11.1998):

Rapporto ISTISAN 87/37

Rapporto ISTISAN 89/29

Rapporto ISTISAN 95/29

Rapporto ISTISAN 96/28

che, nell'ambito delle frequenze industriali, fissano un limite cautelativo per l'insorgere di patologie, pari a 0.2 microTesla, molto più basso di quanto stabilito nel DPCM del 23.4.1992.

Nella seduta del 14 febbraio 2001, la Camera dei deputati ha approvato definitivamente, il disegno di legge sull'inquinamento elettromagnetico che era stato approvato lo scorso 24 gennaio dal Senato:

LEGGE QUADRO SULLA PROTEZIONE DALLE ESPOSIZIONI A CAMPI ELETTRICI, MAGNETICI ED ELETTROMAGNETICI

L'approvazione di questa legge pone l'Italia tra i primi paesi che hanno affrontato il problema. Obiettivo della legge è dare certezza di regole a tutti i cittadini, le imprese e gli enti locali su tutto il territorio nazionale.

Le nuove norme si propongono di tutelare la salute dei cittadini e il paesaggio e riguardano tutti gli impianti che generano campi elettromagnetici.

5. CONTROMISURE ED INTERVENTI

Gli interventi possono riguardare aree pubbliche (edifici pubblici, strutture sanitarie, territorio comunale), private (abitazioni, uffici, attività commerciali) o industriali.

La valutazione delle misure effettuate sul campo consiste essenzialmente nel confronto dei valori di campo elettrico E e magnetico H (spesso, al campo magnetico H (A/m) viene sostituito il vettore B (Tesla) induzione magnetica) rilevati alle rispettive frequenze con i valori limite di soglia dettati dalla normativa. Qualora i valori misurati fossero superiori a quelli limite, si procede alle delimitazioni delle aree di pericolo.

Se tale aree includono abitazioni o luoghi accessibili al pubblico, si intraprende lo studio di azioni di bonifica e l'adozione di misure immediate di sicurezza, non escludendo l'eventuale ricollocamento, decentramento o risanamento delle sorgenti inquinanti.

Per risolvere correttamente e radicalmente un problema di esposizione alle radiazioni non ionizzanti, occorre trovare un compromesso tra la necessità del servizio offerto dalla sorgente inquinante ed i rischi di esposizione per la popolazione mediante:

- accorgimenti progettuali;
- modifiche tecniche, geometriche ed architettoniche;
- schermature elettromagnetiche.

I primi due punti riguardano esclusivamente la possibilità di operare progettualmente e tecnicamente sulla sorgente.

Dall'efficacia dei risultati ottenuti, ne consegue una necessità residua più o meno urgente di adottare schermature.

Le schermature elettromagnetiche vengono realizzate impiegando schermi metallici che ostacolano la trasmissione di campi elettrici e magnetici mediante diversi meccanismi (in funzione della frequenza e della distanza della sorgente):

- attenuazione per riflessione alle due superfici di transizione (aria/metallo all'ingresso e metallo/aria all'uscita), nel caso di campi elettrici (ed onde elettromagnetiche ad alta frequenza);
- attenuazione per dissipazione di energia all'interno del metallo, nel caso di campi elettrici (ed onde elettromagnetiche ad alta frequenza);
- interposizione di una superficie equipotenziale (gabbia di Faraday), nel caso di campi elettrici a bassa e media frequenza;
- interposizione di schermi di corrente (per circolazione di correnti parassite in schermi conduttori), nel caso di campi magnetici a bassa e media frequenza;
- deformazione delle linee di flusso del campo magnetico, modificando la riluttanza del circuito magnetico mediante l'interposizione di materiali ferromagnetici, nel caso di campi elettrici a bassa e media frequenza.

Nel caso di campi elettrici ed onde elettromagnetiche ad alta frequenza, l'interposizione di schermi metallici anche di pochi decimi di mm di spessore, insieme ad una adeguata messa a terra a radiofrequenza, è in grado di fornire un'adeguata attenuazione. Pertanto i problemi di riduzione dell'esposizione si spostano alla presenza di aperture (per la ventilazione, l'osservazione, il passaggio dei materiali, di cavi elettrici, di condutture e segnali di controllo, ecc.) nella schermatura, che come noto influenzano direttamente la "shielding effectiveness" della schermatura. E' dimostrabile che qualunque apertura ha un comportamento passa alto a partire dalla frequenza la cui lunghezza d'onda è pari a 10 volte la massima dimensione dell'apertura: un'apertura rettangolare di 100x1 mm (per es. una fessura sul lato di un involucro metallico schermato) compromette la schermatura solo per frequenze superiori a $F=300/(10 \times 0.1)=300$ MHz, con una perdita di efficienza consistente alla frequenza di risonanza dell'apertura $FF=300/0.1=3$ GHz.

Da questo ragionamento risulta soddisfacente in molti casi la schermatura per mezzo di "chicken wire", ovvero di una griglia metallica elettrosaldata e convenientemente collegata al potenziale di riferimento, che può essere applicata a pareti, ringhiere, palizzate, etc.