

CAPITOLO 1

SORGENTI DI CAMPI ELETTROMAGNETICI NATURALI E ARTIFICIALI

1.1 Aspetti generali

1.2 Campi elettromagnetici di sorgenti naturali

1.3 Campi elettromagnetici di sorgenti artificiali

1.4 Radiazioni ionizzanti e non ionizzanti

1.5 Effetti dell'esposizione del corpo umano ai campi elettromagnetici

1.6 Dipolo elettrico elementare

1.7 Il decibel e le unità tipiche della compatibilità elettromagnetica

Appendice: mode e truffe in Elettromagnetismo

Sommario

I campi elettromagnetici esistono da sempre in natura, ma la mano dell'uomo ha introdotto sorgenti artificiali che hanno alterato il cosiddetto "fondo naturale". In questo capitolo, dopo aver passato in rapida rassegna le sorgenti naturali ed artificiali di campo, si introdurrà la fondamentale distinzione tra radiazioni ionizzanti e non ionizzanti. Infine, verrà discusso il campo prodotto dalla più semplice sorgente intenzionale, vale a dire il dipolo elettrico elementare.

1.1 Aspetti generali

Spesso si ritiene, erroneamente, che le emissioni elettromagnetiche siano un fenomeno prodotto delle diverse tecnologie introdotte dall'uomo, figlie del progresso che si è avuto negli ultimi anni. In realtà, i campi elettromagnetici esistono da sempre in natura e l'opera dell'uomo ha contribuito sicuramente, e contribuisce sempre più, all'innalzamento dei livelli del campo elettromagnetico rispetto al cosiddetto "fondo naturale".

La parola elettricità deriva dal greco *electron*, che significa ambra. Al tempo degli antichi greci, gli studiosi notarono che lo strofinamento di una listella d'ambra sui tessuti, ad esempio la lana, produceva un fenomeno che le conferiva la capacità di attirare a sé piccole particelle di polvere o schegge: il fenomeno appena descritto viene generato da un particolare campo elettromagnetico, detto *campo elettrostatico* e si tratta, dunque, di un fenomeno naturale. In natura, poi, esistono alcuni materiali che generano campi magnetici statici, come le calamite, e, pertanto, anche il *campo magnetostatico* ha un'origine naturale.

Campi elettrici e magnetici impulsivi, intesi come campi di breve durata ed elevata intensità, che arrivano persino a 100 kV/m, si generano naturalmente durante le fulminazioni atmosferiche.

Esistono altri campi elettromagnetici di origine naturale che sono sostenuti dalla radiazione solare, dal magnetismo terrestre, dal campo statico presente nell'atmosfera, e campi di origine artificiale che sono generati da un qualsiasi dispositivo elettrico oppure elettronico. Con la moderna tecnologia si riescono a produrre emissioni artificiali d'altissima frequenza, fino a miliardi di hertz, vale a dire fino a miliardi d'oscillazioni al secondo.

La radiazione elettromagnetica del fondo naturale è inferiore, tranne che per i fulmini per i quali la densità di potenza può raggiungere valori molto elevati, di

alcuni ordini di grandezza a quella a cui è esposta la popolazione a seguito di emissioni prodotte dalle sorgenti artificiali. Queste ultime si suddividono in *emittenti intenzionali*, se l'emissione dei campi è effetto diretto rispetto allo scopo per il quale sono realizzati, ed *emittenti non intenzionali*, se l'emissione dei campi è effetto secondario. Emittenti intenzionali sono gli apparati per telecomunicazioni, in quanto sfruttano l'ambiente per la trasmissione delle onde elettromagnetiche; radiatori non intenzionali sono le linee elettriche, i forni a microonde, i riscaldatori a radiofrequenza oppure ad induzione, le superfici riflettenti.

Porre in relazione le sorgenti con l'inquinamento elettromagnetico significa avere una conoscenza degli apparati e dei sistemi operanti rispetto a tutte le attività dell'uomo. Tipici settori applicativi riguardano i processi produttivi artigianali ed industriali, le attività domestiche, le telecomunicazioni, la radiolocalizzazione ed il telerilevamento, le attività medicali terapeutiche e diagnostiche, le attività di ricerca.

1.2 Campi elettromagnetici di sorgenti naturali

L'insieme di tutti i campi elettromagnetici di origine naturale costituisce il *fondo elettromagnetico naturale*, che rappresenta una grandezza misurabile e quantificabile con i moderni strumenti di misura. I campi di origine naturale si manifestano in svariati modi: se ne riporta una breve panoramica.

Le *scariche atmosferiche*, che rappresentano la principale sorgente dei campi elettrici naturali rilevabili sulla superficie terrestre, sono fenomeni di natura elettrostatica. In seguito all'accumulo di altissime concentrazioni di carica elettrica nelle nubi, si sviluppano elevatissime differenze di potenziale elettrico tra nuvola e superficie terrestre; questi campi elettrici, la cui intensità è di

centinaia di migliaia di volt, possono raggiungere livelli talmente elevati da riuscire a perforare il dielettrico tra le nubi ed un punto della superficie terrestre, normalmente sopraelevato come tralicci, alberi, formando il fulmine. Durante la scarica si genera un intensissimo passaggio di cariche elettriche negative dalle nubi al terreno, che produce una corrente impulsiva ed ha come conseguenza il manifestarsi di intensi campi elettromagnetici in un ampio spettro di frequenze, tipicamente dell'ordine di qualche megahertz.

La *scarica elettrostatica*, fatte le dovute proporzioni, è un fenomeno naturale perfettamente equivalente alle scariche atmosferiche e può essere assimilata ad un piccolo fulmine. Essa si presenta come una scossa che l'uomo percepisce se si presentano una serie di circostanze, quali giornate particolarmente secche o quando si indossano abiti sintetici e calzature con la suola di gomma e si toccano grandi superfici metalliche, come la carrozzeria dell'auto. In questo caso, le cariche elettriche si accumulano sugli indumenti e non vengono scaricate fin quando non si entra in contatto con una superficie ad un potenziale elettrico diverso, vale a dire con la terra, che si trova convenzionalmente a potenziale elettrico nullo.

Il *campo magnetico terrestre* è un esempio di campo magnetico naturale, essendo il globo terrestre paragonabile ad un grosso magnete permanente. Questo campo magnetico ha una componente statica, la cui intensità media è di circa $50 \mu\text{T}$, con intensità maggiore in corrispondenza dei poli: è questa componente del campo magnetico terrestre che consente sia all'ago della bussola di orientarsi lungo le sue linee di flusso, sia ad alcune specie di animali, che hanno la possibilità di percepirlo, orientandosi nei loro lunghi spostamenti, ed è dovuta alle correnti che fluiscono dal nucleo della terra alla superficie. È presente anche una componente variabile, dovuta alle attività del sole, della luna ed ai temporali, la cui intensità è di circa 0.03 mT con frequenza variabile da pochi hertz a qualche megahertz. Durante un forte temporale, l'intensità della parte variabile del campo magnetico aumenta fino ad arrivare a circa 0.5 mT .

La più importante sorgente naturale di radiazioni che interessa la superficie terrestre è il Sole. Infatti, oltre a fornire calore e luce, *il Sole è fonte di radiazioni elettromagnetiche* in un ampio spettro di frequenze: addirittura, durante le tempeste solari si registrano interferenze alle radio-telecomunicazioni sulla superficie terrestre dovute alle onde generate dall'attività solare. Quantitativamente lo spettro dei campi elettromagnetici naturali è sintetizzato nella Tabella 1.1.

Tipo di campo elettromagnetico	Frequenza (Hz)	Intensità
Campo elettrico statico al suolo durante un temporale	0	30 kV/m
Campo elettrico statico – livello medio sulla superficie terrestre	0	130 V/m
Campo elettrico naturale a 50 Hz	50	10^{-4} V/m
Campo magnetico terrestre (componente statica)	0	50 mT
Campo magnetico terrestre (componente variabile)	$1 - 10^7$	0.03 mT
Campo elettrico statico che genera una scarica elettrostatica	0	(5 – 20) kV/m
Densità di potenza del campo elettromagnetico solare	Tutto lo spettro $0 - 300 \cdot 10^9$	$10^{-3} \mu\text{W}/\text{cm}^2$

Tabella 1.1: valori dello spettro dei campi elettromagnetici di origine naturale.

1.3 Campi elettromagnetici di sorgenti artificiali

L'inizio dell'era delle telecomunicazioni è coinciso con il primo esperimento di Marconi, nel 1901, di trasmissione di segnali radio da una parte all'altra dell'oceano Atlantico. Da quell'esperimento, il progresso nel campo delle telecomunicazioni ha avuto sviluppi enormi nel campo delle trasmissioni radio-TV, della telefonia mobile, delle tecnologie satellitari, tanto che la Terra, oggi, è completamente "circondata" da segnali elettromagnetici, indispensabili per comunicare da un punto ad un altro del pianeta. Altra fonte di campi elettromagnetici, dalla seconda metà dell'Ottocento, è l'impiego dell'elettricità su larga scala in tutti i settori della vita quotidiana: trasporti, trazione, abitazioni e macchine industriali. È, pertanto, di primaria importanza tecnologica ed ambientale il problema della generazione, conversione, trasporto e distribuzione dell'energia elettrica in tutti i settori. L'elettricità in ambito industriale è la forma d'energia utilizzata da quasi tutti i macchinari, che sono mossi da motori elettrici d'elevata potenza. Quindi, in ambienti relativamente ristretti, vi è la disponibilità di grossi quantitativi d'energia elettrica, con conseguente generazione localizzata di campi magnetici di intensità rilevante.

Gli enormi sviluppi tecnologici che si sono avuti nel campo dell'elettronica e delle tecnologie dell'informazione hanno fatto sì che tutti i settori tecnologici ed i processi produttivi siano oramai indiscibilmente legati all'elettronica ed all'automazione.

La conversione, il trasporto e la distribuzione dell'energia elettrica sono problematiche di grande importanza legate, soprattutto, alla crescente richiesta di grandi quantitativi di energia. In quest'ambito, i grandi elettrodotti che attraversano i paesi sono fonti di campi elettromagnetici che, localmente, innalzano il fondo elettromagnetico naturale. Solo in Italia esistono in totale circa 10^6 km d'elettrodotti, equivalenti a più di 25 volte il giro del mondo. Il

campo elettrico in una zona in prossimità di una linea trifase è la somma dei campi dovuti alle tre fasi, sfasati tra loro di 120° , ed è un vettore che giace sul piano passante per il punto considerato ed ortogonale all'asse della linea. La presenza di corpi distorce il campo elettrico; in particolare, questo campo diventa perpendicolare alla superficie equipotenziale di corpi conduttori, soprattutto in prossimità del suolo. La presenza d'ostacoli, come ad esempio le pareti di un edificio, riduce di molto il livello di campo elettrico all'interno della costruzione, risultando, in ogni caso, difficilissimo stimare l'andamento del campo elettrico all'interno di un edificio collocato sotto una campata di un elettrodotto. La corrente di ognuna delle tre fasi del sistema trifase sostiene una componente di campo ed il campo magnetico risultante dipende, ovviamente, dall'intensità della corrente e dalla distanza dai conduttori. Diversamente dal campo elettrico, il campo magnetico non ha deformazioni particolari in corrispondenza del suolo e non è schermato dalle pareti degli edifici. Il valore d'induzione magnetica al suolo, in condizione di massimo carico, nel punto centrale della campata ad una distanza di 6.5 m dal conduttore più basso è circa 7 mT. Il campo magnetico è inversamente proporzionale alla distanza dai conduttori e, pertanto, nota questa distanza dai conduttori, si può stimare il valore del campo magnetico per estrapolazione dai dati calcolati.

Il funzionamento dei *sistemi per telecomunicazione* si basa sulla diffusione e trasmissione a distanza di onde elettromagnetiche, generate da antenne opportunamente progettate e realizzate. I campi elettromagnetici generati dai sistemi per telecomunicazione sono caratterizzati da un'onda portante, ad una data intensità e frequenza, e non rimangono localizzati in prossimità delle sorgenti, come accade per i campi rilevati in prossimità degli elettrodotti, ma si propagano nello spazio. Ogni stazione trasmittente, che sia per trasmissioni radio o televisive o di telefonia cellulare, assicura una certa area di copertura del segnale trasmesso: entro tale area i dispositivi atti alla ricezione dei segnali riescono a captare il segnale. Quanto più potente è la stazione trasmittente, tanto

più potente è il segnale trasmesso e, quindi, il segnale sarà captabile molto più lontano; pertanto, l'area di copertura è maggiore ed in prossimità del sistema trasmittente il livello di campo elettromagnetico misurabile è più elevato. Per le telecomunicazioni, le antenne utilizzate sono di svariati tipi, ma tutte sono caratterizzate dal proprio diagramma di radiazione, che consiste nella descrizione numerica della forma assunta dal fascio d'onde elettromagnetiche trasmesse dall'antenna. In base alla forma assunta dai diagrammi di radiazione, i segnali elettromagnetici trasmessi si concentrano in determinate zone, piuttosto che in altre, cosa che dipende, appunto, dalle proprietà trasmittenti dell'antenna che si vuole utilizzare.

Facendo riferimento ad una radiazione particolare, la luce visibile all'occhio umano, si riesce a comprendere la fisica della propagazione delle onde elettromagnetiche. Ad esempio, il fascio luminoso emesso da un faro per segnalazioni marittime ha una forma particolare in cui è concentrata la luce ed è tale da essere visibile a grande distanza, ma solo in una particolare direzione; si parla, in tal caso, di fascio di radiazione direttivo con riferimento alle antenne. La luce emessa da una lampada nello spazio aperto, senza nessun tipo d'ostacolo, ha una diffusione isotropica nello spazio, essendo, in buona sostanza, visibile in tutte le direzioni. Il fascio di radiazione delle antenne utilizzate per la diffusione dei segnali radiotelevisivi e per la telefonia cellulare ha una forma assimilabile ad una grossa ciambella, centrata proprio sull'impianto trasmittente, ed è tale da assicurare la copertura in un'area a 360°.

Anche le apparecchiature elettriche ed elettroniche, di uso residenziale, industriale o individuale, sono, seppure in misure diverse, sorgenti di emissioni elettromagnetiche. In generale, considerando campi magnetici di bassa frequenza, le emissioni sono tanto più elevate quanto maggiore è la potenza elettrica impegnata dall'apparecchiatura; inoltre, quanto minore è la frequenza del campo prodotto, tanto più bassa è la capacità del campo di allontanarsi dalla sorgente. Si dice, sinteticamente, che alle basse frequenze i campi sono

localizzati in prossimità della sorgente. Apparecchiature che lavorano a frequenze più elevate sono i sistemi di trasmissione di segnali per telecomunicazioni, atte proprio a permettere alle onde elettromagnetiche da essi generate di allontanarsi di molto.

Esistono, poi, dispositivi, come le apparecchiature per la risonanza magnetica, per la magneto-terapia, per la marconiterapia, che utilizzano la generazione localizzata di campi elettromagnetici per scopi diagnostici e terapeutici.

I piccoli elettrodomestici utilizzati in ambiente domestico, come i frullatori, gli asciugacapelli, le lavatrici, l'aspirapolvere, sono dotati di piccoli, ma potenti, motori elettrici che hanno un assorbimento più o meno elevato di corrente, generando nelle immediate vicinanze campi magnetici relativamente intensi. Si può affermare che l'ambiente domestico è elettromagneticamente inquinato, ma, per fortuna, così come capita per il campo generato dagli elettrodotti, tali campi rimangono localizzati solo nelle vicinanze della sorgente, dato che la loro intensità decresce rapidamente allontanandosi dall'apparecchiatura. Tranne casi particolari, come le coperte elettriche, nelle vicinanze di apparecchi elettrici, circa 30 cm, il campo elettrico non supera 60 V/m ed alla distanza di circa 1 m è mediamente inferiore a 5 V/m. Anche quando gli apparecchi elettrici sono spenti, ma allacciati alla rete elettrica, in tutti gli ambienti domestici esistono deboli campi generati dagli impianti e dai circuiti di alimentazione. Il campo elettrico è proporzionale alla tensione della sorgente cui l'apparecchio è collegato, è sostenuto dalle cariche elettriche e deriva dai conduttori inseriti nelle prese; di conseguenza è comunque presente, anche quando l'apparecchio spento è collegato alla rete.

Il campo magnetico è prodotto dal moto delle cariche e si manifesta quando l'apparecchio è in funzione. Anche in ambiente domestico esiste un campo magnetico di fondo determinato dalla presenza di corrente elettrica nei fili dell'impianto elettrico generale e dall'ambiente esterno.

Per gli elettrodotti, nei conduttori aerei sostenuti dai tralicci fluisce una corrente elettrica alternata alla frequenza di 50 Hz con sistema trifase che genera sia un campo elettrico, sia un campo magnetico. L'intensità del campo elettrico aumenta con la tensione della linea, che generalmente è costante per un dato valore nominale; quindi, il campo elettrico è costante nel tempo in un dato punto. All'aumentare della distanza dal conduttore e della sua altezza, l'intensità del campo elettrico dal suolo diminuisce, pertanto si può affermare che il campo al centro della campata tra due tralicci è più alto che vicino a ciascuno dei due. In ogni caso, questo campo elettrico è facilmente schermabile da oggetti, quali legno, metallo, alberi e edifici, con riduzione anche di un fattore 100 tra l'interno e l'esterno di un edificio. Generalmente nelle abitazioni poste in prossimità di elettrodotti si riscontrano intensità di campo elettrico tra 1 V/m e 5 V/m. Per quanto riguarda il campo magnetico, la sua intensità dipende soprattutto dall'intensità delle correnti che fluiscono attraverso i conduttori, che generalmente varia molto durante la giornata in base alla richiesta di energia da parte degli utenti, minima la notte, e diminuisce con l'aumento della distanza dalla linea; esso dipende anche dall'altezza della linea e dalla disposizione spaziale dei conduttori. A differenza del campo elettrico, il campo magnetico non è schermabile dalla maggior parte dei materiali d'uso comune e, pertanto, risulta praticamente invariato tra interno ed esterno degli edifici. In genere, il campo magnetico nelle abitazioni che rispettano le distanze dagli elettrodotti stabilite dalla normativa risulta inferiore al limite di 100 μ T imposto per la prevenzione degli effetti acuti immediati, ma spesso è superiore al limite di 0.2 μ T, indicato da alcuni studi epidemiologici quale riferimento per la prevenzione degli effetti a lungo termine. Bisogna, inoltre, sottolineare che si tratta d'esposizioni continue, diversamente da quelle dovute agli apparecchi elettrici domestici che sono per lo più sporadiche. La soluzione di interrare i cavi conduttori non è sempre risolutiva sia perché si riduce la distanza dalla linea, sia perché il campo non è adeguatamente schermato dal terreno. L'avvicinamento

dei conduttori interrati nei sistemi trifase consente sì una notevole riduzione dell'intensità del campo, ma comporta un aumento dei costi d'impianto dovendo impiegare costose soluzioni per l'isolamento elettrico dei cavi. Relativamente agli impianti ad alta frequenza, nell'ambiente esterno (sistemi per telecomunicazioni, radar, ponti radio, antenne per telefonia cellulare) e nell'ambiente domestico (forni a microonde, babyphon), per i soli sistemi di telecomunicazione esiste una normativa che impone il rispetto di precisi limiti di campo elettrico e magnetico in funzione della frequenza utilizzata. I ponti radio, infatti, essendo di sistemi direttivi, non danno problemi di sicurezza per il pubblico, ma ci possono essere rischi per i manutentori. A causa della diffusione sempre crescente della telefonia cellulare, è in continuo aumento il numero delle antenne per telefonia cellulare: le misure indicano livelli molto inferiori ai limiti per la popolazione stabiliti per la prevenzione d'effetti acuti a distanza d'alcuni metri, generalmente si tratta di zone non accessibili al pubblico, con valori confrontabili col fondo elettromagnetico naturale ad una distanza di qualche decina di metri. Il telefono cellulare è un dispositivo che comprende un ricetrasmittitore ed un'antenna, funziona a 900 MHz, sistema GSM, oppure a 1800 MHz, sistema DCS; esso riceve segnali dalle antenne delle stazioni radio-base che fanno da ponte per le conversazioni, irradiando potenze basse. La densità di potenza emessa dall'antenna diminuisce rapidamente con la distanza: a circa una decina di centimetri è trascurabile ed una parte della potenza irradiata è assorbita dal capo dell'utilizzatore, valore che aumenta se l'antenna non è estraibile. I forni domestici a microonde danno problemi solo a seguito del cattivo funzionamento ed usura dei sistemi di schermatura dello sportello.

In definitiva, per l'ambiente domestico, il principale contributo ai campi elettromagnetici è dato dagli elettrodotti e per le radiofrequenze dai ripetitori radiotelevisivi e dagli impianti per telecomunicazioni. Gli impianti per telefonia mobile danno esposizioni ancora inferiori, essendo caratterizzati da minor potenza.

Alle esposizioni in ambienti domestici, urbani ed extraurbani, cui si è sottoposti come popolazione, bisogna aggiungere gli impieghi professionali in campo industriale, commerciale, artigianale, sanitario: si pensi alle attività lavorative connesse all'uso dei computer, degli impianti industriali, degli elettrodotti, dei sistemi di radiotrasmissione, degli apparecchi che fanno uso d'onde e campi elettromagnetici per il trattamento dei materiali. Infatti, sono molte le apparecchiature ed i componenti d'uso comune e diffuso negli ambienti lavorativi che sono sorgenti di campi elettromagnetici; ciò determina un macroscopico aumento del fondo elettromagnetico provocato dall'azione dell'uomo, stimato in circa un milione di volte superiore al fondo naturale.

Per questi motivi è utile analizzare le varie sorgenti di campi elettromagnetici in ambiente di lavoro.

Energia elettromagnetica a *radiofrequenze* (300 kHz – 300 MHz) e *microonde* (300 MHz – 300 GHz) è utilizzata in impieghi particolari quali la trasmissione a distanza di un segnale attraverso antenne e ripetitori nel settore delle telecomunicazioni, dei trasporti, delle trasmissioni con livelli anche elevati nelle immediate vicinanze di antenne RF e di sistemi radar. L'energia può essere, ancora, impiegata attraverso sonde particolari per generare calore in metallurgia e meccanica (forni ad induzione per la fusione dei metalli, riscaldamento capacitivo o dielettrico per incollaggio del legno della plastica), forni a microonde industriali nel settore alimentare, ma anche nella produzione di laser. In queste situazioni l'intervento manuale dell'operatore sulle sorgenti può determinare esposizioni significative alle mani ed al corpo in modo disomogeneo: vicino agli apparati possono manifestarsi valori superiori a decine di watt per ogni metro quadrato di superficie illuminata.

In pratica *i sistemi di radiotrasmissione* coprono tutto lo spettro dei campi, dato che sfruttano, le basse frequenze per le telecomunicazioni con sottomarini, le frequenze medie per le telecomunicazioni radio-televisive, infine arrivano alle

alte frequenze per le comunicazioni via satellite, con i radar per la navigazione marittima ed aerea e con i ponti radio.

Le *macchine per riscaldamento* sono le più comuni applicazioni in campo industriale e generalmente operano con frequenze che variano da pochi megahertz a centinaia di megahertz. Attraverso tali macchine si trasforma in modo rapido e con cicli prestabiliti l'energia elettrica, magnetica ed elettromagnetica assorbita in calore localizzato all'interno del materiale trattato. I riscaldatori si differenziano per le caratteristiche elettroniche (frequenza, tipo di applicatore, campo generatore) e secondo le specifiche applicazioni.

I riscaldatori a perdite dielettriche sono impegnati nell'industria del legno (incollaggi, laminazione, piegatura a caldo), della plastica (saldatura, preriscaldamento di resine termoindurenti per stampaggi), nell'industria tessile (essiccatori, riscaldamento di filati di lana in balle). La frequenza di funzionamento e le relative tolleranze sono assegnate secondo una convenzione internazionale. Queste macchine sono adoperate per trattare materiali con proprietà elettromagnetiche tali da poterli considerare simili ad un dielettrico con conducibilità diversa da zero. I riscaldatori sono composti da un generatore, con potenza che varia da qualche centinaio di watt a decine di chilowatt, che produce energia elettrica a tensione e frequenza più elevata di quella di rete. L'energia ad alta frequenza prodotta è prima trasferita, mediante un collegamento elettrico, ad un applicatore a condensatore e poi all'oggetto da trattare. Nella zona dove è posto il materiale da riscaldare vengono prodotti intensi campi elettrici, che provocano inquinamento elettromagnetico nello spazio libero circostante l'apparecchio; invece, il campo magnetico rimane limitato alla zona limitrofa alle strisce di collegamento tra generatore ed applicatore, laddove sono localizzate le correnti ad alta frequenza. Un'installazione a regola d'arte, un'adeguata messa a terra e una buona schermatura dell'impianto possono presentare un decadimento molto rapido del

campo elettrico con la distanza dal bordo dell'applicatore, confinando il rischio nelle immediate vicinanze dell'impianto.

In molte industrie il principio dell'induzione elettromagnetica è sfruttato per il trattamento termico dei metalli. I *riscaldatori ad induzione magnetica*, impegnati sia nell'industria siderurgica sia in quell'elettronica, fatte le dovute proporzioni, hanno un principio di funzionamento assimilabile a quello dei forni a microonde domestici. Queste macchine sono costituite da un generatore ad alta frequenza, che può essere di qualche centinaio di chilohertz o qualche megahertz, a seconda del tipo di utilizzo, con potenze che vanno dalle centinaia di chilowatt, per la tempera ad induzione, fino a migliaia di chilowatt, per la saldatura di tubi, e da un induttore che rappresenta l'applicatore. L'energia prodotta dal generatore è trasferita mediante l'induttore al materiale da riscaldare attraverso intensi campi magnetici generati dalle correnti indotte in esso circolanti e circondate nella zona da riscaldare. I campi magnetici che si disperdono restano confinati nelle vicinanze dell'induttore e decadono rapidamente. Nelle vicinanze degli applicatori, in ogni caso, si generano anche dei campi elettrici che non sono trascurabili, con linee di forza fino ai poli dell'applicatore.

I riscaldatori a microonde sono impiegati nell'industria cartiera per l'essiccamento della pasta cellulosa, nell'industria alimentare per la preparazione di precotti e la sterilizzazione di granaglie, nell'industria chimica per l'essiccamento di laminati o fili di plastica. I riscaldatori funzionano a frequenze che vanno da 915 MHz a 2.45 GHz con potenze da qualche chilowatt a centinaia di chilowatt. Per garantire un buon grado di sicurezza per gli utilizzatori è necessaria un'efficiente schermatura e l'assenza di fessure nelle guarnizioni degli sportelli di carico e scarico dei materiali. Le norme di riferimento sono le stesse per i forni a microonde domestici.

Di *radar ad impulsi* per impieghi terrestri, navali ed aerei nei sistemi di rilevamento ve ne sono una grande varietà. Questi radar funzionano irradiando impulsi in un intervallo di frequenze che va da qualche centinaia di megahertz a qualche decina di gigahertz. Per il telerilevamento esistono i *radar Doppler*: sono utilizzati soprattutto per il controllo della velocità veicolare su strada ad una frequenza di lavoro di circa 10 GHz. Ci sono gli apparecchi telepass per il telerilevamento in entrata ed in uscita dei veicoli sulle autostrade, che funzionano ad una frequenza di circa 5.7 GHz.

Nel campo sanitario i campi elettromagnetici sono impiegati per scopi diagnostici e terapeutici sia alle basse frequenze, sia alle alte. Le applicazioni di impiego sono la ipertermia, la marconiterapia e la radarterapia, esse sfruttano la proprietà dei campi elettromagnetici di riscaldare i tessuti. Gli operatori addetti ad apparecchi per la diagnostica a *risonanza magnetica* (NMR) con impiego di campi a radiofrequenza e campi magnetici statici che arrivano fino a 2 T sono soggetti ad un'esposizione praticamente nulla in quanto l'emissione delle radiazioni avviene all'interno di un locale schermato in cui è presente solo il paziente. Le microonde, inoltre, sono utilizzate in chirurgia per la sterilizzazione e per il trattamento del sangue.

I monitor dei computer ed i videoterminali contengono tubi a raggi catodici intorno ai quali si possono misurare, anche se con intensità molto basse, radiazioni elettromagnetiche.

La Tabella 1.2, estratta dalla norma italiana CEI 211-7, illustra i livelli di emissione di alcune apparecchiature elettriche ed elettroniche e per le telecomunicazioni in diversi intervalli di frequenza (definiti in dettaglio nel seguito)

C campo di frequenze

S tipo di sorgente

- F frequenza di lavoro
P potenze tipiche della sorgente
D distanza di riferimento della sorgente
V valori tipici dei campi elettromagnetici o della densità di potenza

C	S	F	P	D	V	
VLF	Saldatrici elettriche	10 kHz		(30 – 70) cm		2000 μ T 60 μ T
	Saldatrici elettriche	25 kHz		(0.1 – 1) m		

LF	Riscaldatori ad induzione	100 kHz		0.1 m		1 mT
	Schermi video	400 kHz		0.5 m	1 V/m	0.1 μ T

MF	Trasmettitori radio in AM	(525 - 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

HF	Incollatrici della plastica	27.12 MHz	10 kW	5 m	??	??
	Presse dielettriche	27.12 MHz	1.5 kW	0.5 m	200 V/m	
	Induratrici ad induzione	27.12 MHz		0.5 m		0.5 A/m
	CB, Walkie Talkies	27.12 MHz	5 kW	0.2 m	100 V/m	0.2 A/m
	Diatermia	27.12 MHz		0.5 m	<500 V/m	

VHF	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	

UHF	Trasmettitori TV-UHF	(470 - 862) MHz	10 kW	100 m	<50 V/m	
	Stazione Radio Base GSM	(890 - 960) MHz (1.71 - 1.88) GHz	50 W/canale	20 m	3 V/m	
			10 W/canale	20 m	0.5 V/m	
	Apparecchi mobili GSM		2 W	0.1 m	10-30 V/m	
	Stazioni satellitari, sistemi di sicurezza	(1.5 - 1.8) GHz		In direzione del fascio principale	8 W/m ²	
Forni a microonde	2.45 GHz		(0.05 - 0.3) m	(0.06 - 0.6) W/m ²		

SHF	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	(0.2-20) kW	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	

EHF	Segnali video analogici e trasmissioni digitali	(30 - 55) GHz			Massima potenza di uscita prima dell'antenna: 1 W	
-----	---	---------------	--	--	--	--

Tabella 1.2: livelli di emissioni di alcune apparecchiature in diversi intervalli di frequenza.

La Tabella 1.3, estratta dalla guida CEI 211-6, riporta alcuni livelli tipici di induzione magnetica alla frequenza di 50 Hz generati da apparecchiature elettriche ed elettroniche di utilizzo sia domestico, sia industriale.

Sorgente	B (μT)	Distanza riferimento
Rasoio elettrico	(150 – 240)	sul viso
Asciugacapelli	(13 – 1)	10 - 20 cm
Frullatore	0.9	40 cm
Lampada alogena 12 V, 20W	0.5	30 cm
Apparecchio per 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 600W	2	sul busto
Saldatore 100W	14.5	sul busto
Mola 22W	0.8	40 cm
Compressore elettrico 1100W	8.2	40 cm
Saldatrice ad arco 2150W	23.2	40 cm
Forno ad arco 75 MW, (55-65) kA, 150t	(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
-----------------------------	-----	-------

Tabella 1.3: livelli tipici di induzione magnetica a frequenza industriale.

A questo punto sorge spontanea una domanda: come si comportano i campi elettromagnetici in prossimità delle sorgenti? Ebbene, si comportano, ad esempio, come le onde che si generano quando viene lanciato un sasso in uno stagno: l'intensità del campo, ovvero l'ampiezza delle onde, si riduce man mano che ci si allontana dalla sorgente. In particolare, quanto più bassa è la frequenza, tanto più rapidamente il campo si riduce allontanandosi dalla sorgente. Per quanto riguarda la dipendenza dei campi a bassa frequenza, i campi vicini, dalla distanza dalla sorgente, si osserva che

- per sistemi costituiti da un solo conduttore elettrico, come l'antenna trasmittente o la trazione ferroviaria, il campo decresce in modo inversamente proporzionale alla distanza;
- per i sistemi costituiti da due o più conduttori elettrici, ad esempio gli elettrodotti, il campo decresce in modo inversamente al quadrato della distanza;
- per i sistemi costituiti dai motori elettrici o avvolgimenti elettrici, ad esempio i motori dei piccoli elettrodomestici, il campo elettromagnetico decresce in modo inversamente proporzionale al cubo della distanza.

1.4 Radiazioni ionizzanti e non ionizzanti

Il concetto di campo elettromagnetico e di onde ad esso associate è, dunque, molto più familiare di quanto non si creda: basta pensare alla luce solare, forma

di energia elettromagnetica fondamentale a tutte le forme di vita, ai campi elettromagnetici generati dai fulmini, oppure al campo magnetico terrestre. Ma a questo 'fondo' naturale di campi elettromagnetici si sovrappongono quelli dovuti alle sorgenti artificiali, come gli elettrodotti e le antenne TV, come discusso nel paragrafo precedente. È lecito allora chiedersi se tutto questo proliferare di impianti costituisce vero 'elettrosmog', con effetti dannosi sugli esseri viventi, oppure non ha particolare significato. In questi ultimi anni è entrata nell'uso comune la parola 'elettrosmog' per indicare un inquinamento dell'ambiente dovuto a campi elettromagnetici. Certamente, come si è detto, il nostro ambiente è pieno di campi elettromagnetici di origine artificiale: *elettrodotti*, cioè le linee elettriche, basate su tralicci o campate di conduttori, *stazioni e sottostazioni elettriche*, se ne vedono ai margini ed anche dentro le città presso le stazioni ferroviarie, *rete elettrica casalinga*, *elettrodomestici*, *antenne radio e TV*, e chi più ne ha più ne metta. La parola 'elettrosmog', nata da qualche anno, si riferisce proprio alla possibilità che il campo elettromagnetico, diffuso nell'ambiente da varie fonti, sia un inquinante, una specie di smog invisibile. 'Smog' è un termine anglosassone, letteralmente inventato qualche decennio fa, e in senso stretto si riferisce all'inquinamento ambientale causato, in particolare a Londra, dalla nefasta combinazione di fumo (smoke) e nebbia (fog). Questo termine è usato per designare un qualunque tipo di inquinamento diffuso nel territorio, ed in tal senso si parla di 'elettrosmog' o 'smog elettromagnetico', cioè di inquinamento ambientale dovuto a campi elettromagnetici di origine artificiale. L'inquinamento da onde elettromagnetiche ha, pertanto, assunto particolare importanza nell'ambito di quei problemi connessi alla salute dell'uomo, di cui si cerca di studiare gli effetti e di prevenire i danni. Nel campo delle radiofrequenze l'ambiente nel quale ci siamo evoluti è profondamente mutato; in Italia oggi ci sono più di 30 milioni di telefoni portatili e 60.000 antenne, frutto di 4 gestori di telefonia mobile, 700 reti televisive e 2400 stazioni radiofoniche. Ciò comporta valori di campo elettromagnetico da un milione a un miliardo di volte più elevati rispetto al

fondo naturale, se si considera che la Terra emette ad una densità di potenza di circa 70 nW/cm^2 in un ampio intervallo di frequenze. Il Parlamento Europeo, nella seduta del 10 marzo 1999, ha evidenziato come non possano essere ignorati gli effetti che diversi studi hanno attribuito all'esposizione della popolazione all'elettrosmog, sottolineando la necessità che le regolamentazioni rispettino due principi guida:

- 1) il principio di *precauzione* (minimizzazione);
- 2) il principio *ALARA* (*As Low As Reasonably Achievable*, l'esposizione deve essere mantenuta al livello ragionevolmente più basso possibile).

Nell'attuale situazione di incertezza, si sta tendendo ad una graduale riduzione delle esposizioni, allo scopo di regolamentarle, valutando l'opportunità in termini di costi e benefici di nuove installazioni ed intervenendo su quelle esistenti, seguendo il principio cautelativo, volto a tutelare la popolazione dagli eventuali effetti a lungo termine.

Il campo elettromagnetico è un fenomeno fisico che consiste, in pratica, nella esistenza contemporanea di un campo elettrico e di un campo magnetico, diffusi nell'ambiente. Qualsiasi corpo su cui si trovano cariche elettriche crea intorno a sé un campo elettrico; se tale campo fosse visibile all'occhio umano apparirebbe come un insieme di linee che partono da un corpo carico positivamente e terminano in uno carico negativamente. Il campo magnetico, invece, è generato invece da cariche, di solito elettroni, in movimento. In ogni punto dello spazio campo elettrico e campo magnetico oscillano secondo modalità che dipendono dal tipo di sorgente e si propagano sotto forma di onde, descritte qualitativamente nell'appendice di questo capitolo.

Il numero di oscillazioni al secondo è detto frequenza (f) ed è misurata in hertz (Hz). Nel caso della rete di distribuzione dell'elettricità, elettrodotti, rete elettrica domestica, elettrodomestici, le oscillazioni sono relativamente lente:

l'utenza domestica ed industriale fissa le oscillazioni al numero di 50 al secondo.

Ci sono due tipologie principali di **sorgenti di campi elettromagnetici**, per quanto riguarda possibili problemi ambientali: quelle **a bassa frequenza**, cioè l'insieme degli elettrodotti, centrali elettriche sottostazioni con tutto quel che deriva, cioè rete elettrica casalinga, elettrodomestici, macchine operatrici industriali; quelle **ad alta frequenza**, che interessano le telecomunicazioni (radio, TV, telefonia cellulare), come per esempio le onde radio in modulazione di frequenza che usano onde con frequenze dell'ordine di 100 milioni di hertz (o 100 MHz). Nel caso dei telefoni cellulari, le frequenze sono ancora più alte: siamo tra 1 GHz e 2 GHz.

I motivi per cui si usano frequenze così alte per la telefonia cellulare sono complessi; c'è dietro a tutto questo una lunga storia. Uno dei motivi deriva dal fatto che mentre ci sono apparecchiature, come quelle per la distribuzione della energia elettrica o anche come i 'normali' telefoni fissi, le quali utilizzano, come supporto per la trasmissione del campo, dei conduttori metallici (cavi elettrici degli elettrodotti, cavetti tripolari per le macchine elettriche, coppie di fili negli impianti in casa, filo telefonico), la radio, la TV, la telefonia cellulare, usano la trasmissione del campo in aria, senza supporto di fili. In tal caso un'antenna trasmittente proietta, per così dire, il campo in aria, e questo viene 'raccolto' a una certa distanza dalle antenne riceventi. Ora, esiste una regola generale, ben nota agli specialisti: per mandare un segnale, per mezzo di onde elettromagnetiche, nello spazio circostante all'antenna trasmittente, occorre fornire al campo un certo contenuto energetico, una *potenza*, che è tanto più bassa quanto più alta è la frequenza. Alzare la frequenza permette di trasmettere le onde elettromagnetiche senza dover generare potenze altissime. In altri termini, si devono distinguere nettamente 'basse frequenze' e 'alte frequenze', anche perché le caratteristiche dei campi e quindi i loro effetti biologici e sanitari sono molto diversi nei due casi.

In linea generale più alta è la frequenza e più le onde elettromagnetiche tendono a propagarsi secondo linee rette. I telefoni cellulari usano frequenze tra circa 1 GHz e 2 GHz e, quindi, anche i campi elettromagnetici caratteristici della telefonia cellulare procedono, in ciascuna direzione, abbastanza rettilineamente. Così se un fascio di onde di questo tipo incontra un grosso ostacolo, come una collina, praticamente non 'ci passa sopra' come fanno invece le onde usate ad esempio nella radio AM, che usa frequenze notevolmente più basse, ma in parte viene assorbito ed in parte riflesso.

Le emissioni elettromagnetiche in oggetto sono contenute nell'intervallo di frequenze delle cosiddette *radiazioni non ionizzanti* (**NIR**, Non Ionizing Radiation), all'interno delle quali sono stati individuati due principali tipi di radiazioni: alle basse frequenze, fino a 30 kHz, ed alle alte frequenze, nell'intervallo che va da 300 kHz a 3 GHz. Non vengono esaminate le frequenze comprese tra questi due intervalli e vagamente indicate col termine 'frequenze intermedie', che sono state oggetto di studi certamente non confrontabili, per numero e dimensioni, con quelli che hanno interessato le basse e le alte frequenze, per la quasi totale assenza di sorgenti di un certo rilievo.

L'intervallo di frequenze entro il quale le radiazioni elettromagnetiche sono oggetto di applicazioni è estremamente ampio, essendo compreso fra qualche migliaio di hertz e 10^{22} Hz (ed oltre, se si considerano i raggi cosmici), mentre, alle bassissime frequenze, la componente magnetica e quella elettrica sono distinte e si parla, in tal caso, di campo elettrico e induzione magnetica.

Il tipo di radiazioni che vengono analizzate sono dette *non ionizzanti*, per distinguerle da quelle *ionizzanti* (**IR**). Il termine radiazione non ionizzante è usato per caratterizzare tutte quelle forme di radiazione il cui meccanismo primario di interazione con la materia non è la ionizzazione, ovvero la rottura dei legami strutturali a livello atomico e molecolare, con alterazione delle caratteristiche chimico-fisiche. La frequenza e la lunghezza d'onda in

corrispondenza delle quali si ha il passaggio dalle radiazioni non ionizzanti a quelle ionizzanti sono indicate in Figura 1.1.

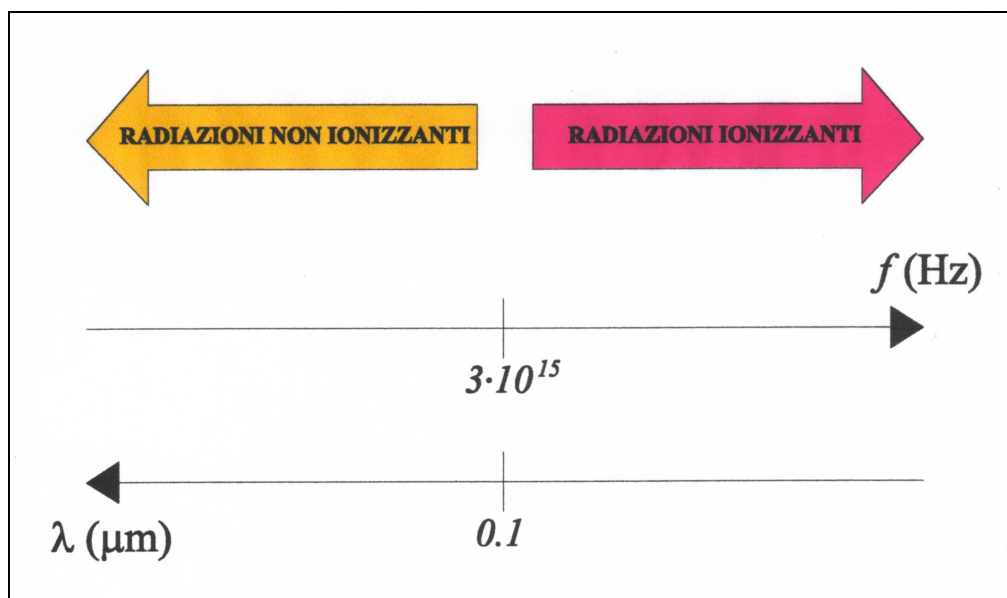


Figura 1.1: valori dei parametri nel passaggio da NIR a IR.

Si ricordi che il periodo temporale T e quello spaziale λ dell'onda elettromagnetica sono legati dalla relazione

$$\frac{\lambda}{T} = \lambda f = v,$$

dove la velocità di propagazione v dell'onda, nel vuoto, è pari a circa 3×10^8 m/s (velocità della luce nel vuoto) e risulta indipendente dalla frequenza.

Le frequenze e le lunghezze d'onda delle radiazioni elettromagnetiche nella regione tra NIR ed IR sono riportate in Figura 1.2.

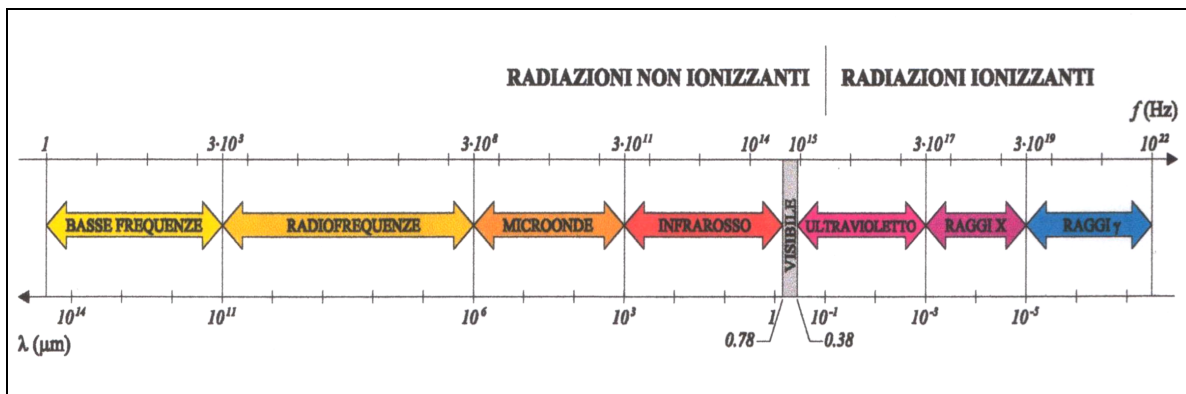


Figura 1.2: spettro elettromagnetico nella regione tra NIR ed IR.

Come si nota, la luce è costituita da onde elettromagnetiche, che il nostro occhio è in grado di osservare con diverso colore quando la loro lunghezza d'onda è compresa approssimativamente tra 0.38 μm e 0.78 μm (visibile).

Le onde elettromagnetiche, in base alla frequenza d'emissione, sono classificate, in campo internazionale secondo il seguente schema:

- Power Frequency (PF) (0.05 ÷ 1) kHz;
- Extremely Low Frequency (ELF) (0.003 ÷ 3) kHz;
- Very Low Frequency (VLF) (0.003 ÷ 0.03) MHz;
- Low Frequency (LF) (0.03 ÷ 0.3) MHz;
- High Frequency (HF) (3 ÷ 30) MHz;
- Very High Frequency (VHF) (30 ÷ 300) MHz;
- Ultra High Frequency (UHF) (0.3 ÷ 3) GHz;
- Super high frequency (SHF) (3 ÷ 30) GHz;
- Extremely High Frequency (EHF) (30 ÷ 300) GHz.

Da alcuni anni è sempre più viva nella popolazione la preoccupazione per i possibili rischi per la salute in seguito all'esposizione ai campi elettromagnetici. Tuttavia, essa avverte in maniera differente questo problema: basti pensare al diverso atteggiamento che la maggior parte delle persone ha nei confronti dei

campi elettromagnetici nel caso in cui, ad esempio, debba considerare le linee ad alta tensione o le stazioni radiobase nei pressi della propria abitazione, e quando, invece, usa quotidianamente, in tutta tranquillità, apparecchi elettrici, come il rasoio o l'asciugacapelli, che la espongono a radiazioni di intensità ben più elevata, anche se per un tempo limitato. Secondo un sondaggio effettuato nell'ottobre 1999 dall'ISPO (Istituto per gli Studi sulla Pubblica Opinione), il forno elettrico e l'asciugacapelli vengono considerati potenzialmente dannosi, rispettivamente, dal 5.6% e dal 5.2% degli intervistati, mentre il 63.9% ritiene dannoso per la salute il telefono cellulare.

Per comprendere la percezione del rischio da parte della popolazione occorre, innanzitutto, distinguere tra *pericolo per la salute* e *rischio per la salute*: un pericolo è rappresentato da un oggetto, da un insieme di circostanze, dalle proprietà intrinseche di un materiale, di un'attrezzatura, di una metodica di lavoro, di una tecnologia, potenzialmente in grado di danneggiare la salute di una persona; il rischio è la probabilità che sia raggiunto il limite potenziale di danno, nelle condizioni di impiego o di esposizione. Ad esempio, una finestra aperta priva di parapetto rappresenta un pericolo, che può diventare rischio se non si prende alcun provvedimento. Se, invece, metto una transenna riduco il rischio poiché ho una barriera che ostacola chi volesse avvicinarsi. Da quanto detto è chiaro che il pericolo è una realtà che continua ad esserci, mentre il rischio può essere ridotto.

Per una valutazione qualitativa si deve tener conto, da un lato, della probabilità che si manifesti un pericolo, dall'altro, dell'entità del danno conseguente. Il rischio, quindi, si può interpretare come una funzione della probabilità di accadimento e della gravità del danno.

Praticamente ad ogni attività umana è associato un rischio, ma diversi fattori, quali età, sesso, grado di istruzione e basi culturali, influenzano il modo in cui esso viene recepito. In genere, le persone percepiscono i rischi come trascurabili,

accettabili, tollerabili oppure inaccettabili e li confrontano con i benefici, che li dovrebbero sopravanzare, con un apprezzabile margine. Nel caso dei campi elettromagnetici, essi possono essere potenzialmente pericolosi ed il livello di esposizione di un individuo, per una data frequenza, ne determina il rischio per la salute. La valutazione del livello di esposizione deve essere fondamentalmente di tipo strumentale; se ciò non fosse possibile, può essere effettuata una stima teorica su basi oggettive.

La percezione del rischio è senza dubbio maggiore quando si è soggetti ad un'esposizione non voluta, come nel caso di abitazioni nei pressi di linee ad alta tensione o di stazioni radiobase, rispetto all'utilizzo volontario, ad esempio, di un telefono cellulare. La stessa differenza nella percezione del rischio c'è tra fumatori e non fumatori. Il fumatore ha una minore comprensione del rischio di tumore al polmone, poiché ha scelto volontariamente di fumare, mentre il non fumatore ne ha una percezione molto più elevata, in quanto il fumo gli viene imposto e non è una sua scelta.

Occorre, inoltre considerare anche il fattore estetico, in quanto un'antenna radiotelevisiva o un traliccio per l'alta tensione, essendo tra l'altro oggettivamente brutti, sono facilmente individuabili come potenziali fonti di pericolo e, quindi, più colpevolizzabili di quanto non lo siano gli elettrodomestici. I campi elettromagnetici sono percepiti come rischiosi proprio perché sono invisibili, impercettibili e, quindi, non controllabili direttamente dall'uomo. Questo diverso atteggiamento dipende molto dalle esperienze personali e dal grado di cultura di ogni individuo.

Alla distorta percezione del rischio si riconduce anche il fenomeno della cosiddetta ipersensibilità ai campi elettromagnetici, indagato da un gruppo di studio istituito dalla Commissione dell'Unione Europea. Lo studio ha analizzato il problema di eventuali sintomi di natura soggettiva, quali cefalee, insonnia, astenia, debolezza sessuale, depressione ed altri sintomi neurastenici, attribuibili

all'esposizione ai campi elettromagnetici e lamentati sia da lavoratori professionalmente esposti a campi elettromagnetici di intensità relativamente elevate sia da individui della popolazione residenti in prossimità di sorgenti, quali linee ad alta tensione, antenne radiotelevisive o stazioni radiobase per la telefonia cellulare. Secondo le conclusioni del rapporto, i disturbi lamentati non sono imputabili all'esposizione ai campi elettromagnetici; in particolare, non esistono prove convincenti di un'ipersensibilità a tali campi, cioè di una particolare suscettibilità di alcuni individui ai campi elettromagnetici, anche di piccola intensità. Vi sono, invece, evidenze scientifiche che tali disturbi siano frutto di suggestione oppure abbiano un'origine di natura psicosomatica e che esista una correlazione tra la prevalenza di sintomi soggettivi ed il grado di preoccupazione nei confronti dei campi elettromagnetici.

La mancanza di una corretta ed adeguata comunicazione di informazioni in materia, da parte degli addetti ai lavori, crea una distorsione ulteriore nella percezione del rischio. Infatti, si percepisce più facilmente come ostile ciò che non si conosce o di cui si ha solo qualche nozione, magari incompleta e distorta, acquisita dai giornali o dalla televisione; nel caso, poi, dei campi elettromagnetici, è la materia stessa che si presta poco a semplificazioni, per cui si hanno notevoli difficoltà ad informare correttamente la popolazione. Per cercare di superare queste difficoltà, almeno nei luoghi di lavoro, la Commissione Europea ha proposto e sostenuto il progetto, di durata quinquennale (gennaio 1996-dicembre 2000), SAFE E.M.C. (Safety Actions for Europe Electromagnetic Compatibility). Gli obiettivi del progetto, presso le aziende che hanno aderito ad esso e in collaborazione con i lavoratori delle stesse, sono stati:

- informare e formare le aziende ed i lavoratori sulla legislazione, comunitaria e nazionale, e sulle norme tecniche in materia di sicurezza sui rischi elettrici e di compatibilità elettromagnetica;
- informare e formare le aziende ed i lavoratori sui metodi di esecuzione delle prove di sicurezza elettrica e di compatibilità elettromagnetica inerenti la determinazione di detti rischi;
- informare e formare le aziende ed i lavoratori sui rischi per la salute in seguito all'esposizione a campi elettromagnetici;
- assistere le aziende in fase di progettazione e di verifica delle macchine e delle apparecchiature elettriche, al fine di trovare soluzioni tecniche per migliorare la prevenzione e la protezione dei lavoratori dai rischi elettrici ed elettromagnetici;
- studiare gli effetti relativi all'esposizione dei lavoratori a campi elettromagnetici, al fine di fornire dati utili relativamente ai limiti attualmente previsti dalle norme sperimentali europee.

La difficoltà a dire una parola definitiva sulla pericolosità o meno dell'esposizione ai campi elettromagnetici genera ancor più apprensione, così come il fraintendimento dei risultati scientifici oppure i pareri, spesso discordanti, di rappresentanti di organi istituzionali in sede di confronto tra operatori e cittadini.

Una corretta informazione è fondamentale per ridurre le tensioni sociali provocate da polemiche esasperate e dalla fobia verso le sorgenti di campi elettromagnetici. In questo contesto è diventato fondamentale il ruolo degli operatori del settore nel fornire informazioni di base e comunicare pareri e risultati di misure alle pubbliche amministrazioni, ai mezzi di informazione ed al pubblico. Purtroppo, come spesso accade quando si devono riportare notizie di

carattere scientifico, anche nel caso dei campi elettromagnetici i mezzi di comunicazione non sono riusciti a fornire un'informazione sufficientemente chiara, ma hanno enfatizzato, con approssimazione ed incompetenza, solo alcuni aspetti delle ricerche, in genere i dati più negativi, inducendo distorsioni nella percezione, prospettando pericoli esagerati, se non addirittura inesistenti, e creando confusione e allarmismo. Questo avviene perché non sempre nelle redazioni dei giornali si possiedono le competenze specifiche e spesso, un giornalista viene mandato a un convegno oppure a commentare uno studio sui campi elettromagnetici senza saper nulla in materia. Si crea, così, una barriera tra il mondo scientifico ed il primo mediatore verso l'esterno, ovvero il giornalista, in quanto i ricercatori si esprimono in un linguaggio settoriale, molto tecnico, che il giornalista non è in grado di comprendere e trasmettere in modo chiaro ed efficace alla popolazione. Anche se il giornalista è provvisto di una cultura scientifica di base ed è in grado di valutare quello che gli viene comunicato dal ricercatore, esiste il problema della traduzione da una lingua, il gergo scientifico, ad un'altra, meno elaborata, che è il linguaggio comune. Si tratta di un passaggio molto delicato, in quanto, per poter semplificare dei concetti, è necessario conoscerli a fondo. Molto spesso gli scienziati non hanno le competenze interdisciplinari, la sensibilità e la capacità di comunicare, mentre i giornalisti non riescono ad abbinare la loro capacità di comunicare al rigore del metodo e alla profondità della conoscenza. A complicare ulteriormente le cose, interviene un altro fattore: se è vero che, negli ultimi anni, è cresciuto l'interesse, da parte della popolazione, nei confronti della ricerca sui rischi per la salute dell'esposizione ai campi elettromagnetici, è anche vero che ad esso non sembra corrispondere una adeguata 'alfabetizzazione scientifica', nel senso che, seppure si è in possesso delle nozioni scientifiche, non si è in grado di associare ad esse dei concetti e non è chiaro come esse si collochino nel contesto fisico, biologico e medico.

1.5 Effetti dell'esposizione del corpo umano ai campi elettromagnetici

L'uomo risente dell'esposizione ai campi elettromagnetici. La recente letteratura sostiene che esiste una certa influenza dei campi elettromagnetici sui processi fisiologici delle cellule umane. Essi non hanno energia sufficiente a determinare la ionizzazione delle molecole, perciò per lungo tempo i ricercatori hanno considerato le radiazioni non ionizzanti incapaci di danneggiare o di interagire con il corpo umano, se non attraverso il riscaldamento localizzato dei tessuti e l'induzione di correnti e piccole scariche elettriche. Tale riscaldamento, però, avviene in maniera diversa rispetto al semplice contatto con un corpo a temperatura più elevata. Il calore prodotto dalle microonde penetra, infatti, in misura rilevante nei tessuti interni, scavalcando i meccanismi naturali d'allarme costituiti dai ricettori termici che si trovano sull'epidermide del nostro corpo. Pertanto, sono possibili innalzamenti di temperatura delle parti interne del nostro corpo senza che la persona esposta ne abbia la percezione. Questi innalzamenti di temperatura, si traducono in disturbi ed alterazioni a livello fisiologico, ampiamente documentati.

Altri effetti a breve termine più facilmente evidenziabili, dovuti all'accoppiamento tra un campo elettrico o magnetico ed il corpo umano, sono la stimolazione delle cellule nervose e muscolari, il formicolio della pelle, la vibrazione dei peli dovuti all'induzione di cariche superficiali, le scariche elettriche e le bruciature dovute al contatto di oggetti conduttori immersi in forti campi elettromagnetici.

Infine, l'esposizione ad un intenso campo magnetico statico, può causare vertigini o nausea e, per campi elettromagnetici di tipo pulsato, come quelli generati dai radar, si possono avere fastidiose percezioni uditive di impulsi.

Questi effetti sono tanto più frequenti ed evidenti quanto più è elevata l'energia assorbita dal nostro corpo. In generale, l'attività di ricerca per gli effetti a lungo termine, si articola secondo due linee direttrici principali:

1. lo studio degli effetti su categorie di individui particolarmente esposti per professione o per vicinanza ad impianti emittenti, basati sullo studio "sul campo" delle caratteristiche degli individui interessati e sulle misure dei livelli di esposizione all'interno delle zone interessate;
2. lo studio in laboratorio, basato sull'esposizione di colture cellulari o cavie a campi elettromagnetici di varia intensità e frequenza.

Gli studi condotti non hanno ancora portato a risultati conclusivi sugli effetti a lungo termine dell'esposizione del corpo umano ai campi elettromagnetici.

1.6 Dipolo elettrico elementare

In un sistema di riferimento cartesiano si consideri un elemento di corrente $I d\ell$, posto in corrispondenza del centro degli assi: si tratta di una corrente I che percorre un elemento di lunghezza elementare $d\ell$. Si definisce **dipolo elettrico elementare** un tratto infinitesimo di circuito, di lunghezza $d\ell$, a cui è associato un elemento di corrente I , costante in modulo e fase lungo tutti i punti dell'elemento stesso: in Figura 1.3 è mostrata la schematizzazione del dipolo elettrico.

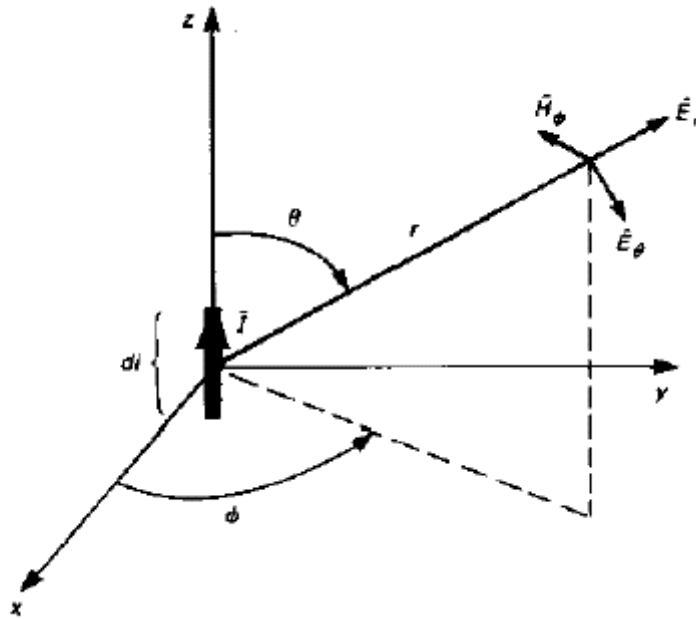


Figura 1.3: schematizzazione di un dipolo elettrico elementare.

Per mezzo di questo modello ideale si è soliti trattare il caso reale in cui una corrente che attraversa un filo sottile di lunghezza piccola rispetto alla lunghezza d'onda del segnale che lo attraversa, nell'ipotesi che la lunghezza considerata del filo sia tanto piccola da poter considerare costante la corrente. Ogni circuito fisico, ogni antenna attraversata da corrente, può essere considerato come costituito da un gran numero di questi elementi collegati in cascata. Noto il campo elettromagnetico prodotto dall'elemento infinitesimo di filo, è possibile determinare facilmente, per sovrapposizione, il campo elettromagnetico di ogni antenna reale, avente un'assegnata distribuzione di corrente.

Si consideri, allora, un elemento infinitesimo di corrente, lungo il quale la corrente abbia un andamento sinusoidalmente e sia rappresentata da

$$I dl e^{j\omega t}.$$

Volendo esaminare il comportamento delle antenne, a cominciare da questo semplice modello, detto dipolo hertziano, è comodo introdurre un sistema di coordinate sferiche (r, θ, φ) , come suggerito in Figura 1.2. Risolvendo le equazioni di Maxwell in tale riferimento, si deduce che il campo elettromagnetico in un punto generico $P(x, y, z)$, detto punto di osservazione o punto potenziato, individuato dalla generica terna (r, θ, φ) di coordinate sferiche, vale

$$\left\{ \begin{array}{l} H_r = 0 \\ H_\theta = 0 \\ H_\varphi = \frac{Idl \sin \theta}{4\pi} \left(j \frac{k}{r} + \frac{1}{r^2} \right) e^{-jkr} \end{array} \right. ; \quad \left\{ \begin{array}{l} E_r = \frac{Idl}{2\pi\omega\epsilon} \cos \theta \left(\frac{k}{r^2} - \frac{j}{r^3} \right) e^{-jkr} \\ E_\theta = \frac{Idl \sin \theta}{4\pi\omega\epsilon} \left(j \frac{k^2}{r} + \frac{k}{r^2} - \frac{j}{r^3} \right) e^{-jkr} \\ E_\varphi = 0 \end{array} \right.$$

Si osservi che il campo magnetico ha componente solo nella direzione φ , che dipende solo da θ e da r , non da φ . Il campo elettrico, invece, presenta una componente nella direzione radiale r ed una nella direzione θ . In generale, inoltre, la costante di propagazione nel mezzo considerato comprende sia una parte reale, sia una parte immaginaria, essendo

$$k = \beta - j\alpha.$$

La parte reale scompare solo se si ritengono nulle le perdite nel mezzo considerato ed nell'ipotesi, assumendo che il mezzo di propagazione sia il vuoto, si può scrivere che $\mu = \mu_0$ e $\epsilon = \epsilon_0$, ottenendo

$$k = k_0 = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}.$$

La rappresentazione del campo elettromagnetico, pertanto, diventa

$$\begin{cases} E_r = \frac{Idl}{2\pi\omega\epsilon_0} \cos\theta \left(\frac{k}{r^2} - \frac{j}{r^3} \right) e^{-jkr} \\ E_\theta = \frac{Idl \sin\theta}{4\pi\omega\epsilon_0} \left(j \frac{k^2}{r} + \frac{k}{r^2} - \frac{j}{r^3} \right) e^{-jkr} \\ H_\varphi = \frac{Idl \sin\theta}{4\pi} \left(j \frac{k}{r} + \frac{1}{r^2} \right) e^{-jkr} \end{cases}$$

Ricordando che l'impedenza caratteristica dello spazio vuoto è definita come

$$\zeta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi \Omega \cong 377 \Omega,$$

è possibile esprimere queste tre componenti in funzione dell'impedenza caratteristica dello spazio vuoto, per cui, tenendo conto che $\omega\epsilon_0\zeta_0 = k_0$, si può scrivere

$$\begin{cases} E_r = \frac{Idl \cos \theta}{2\pi} \zeta_0 k^2 \left(\frac{1}{(kr)^2} - \frac{j}{(kr)^3} \right) e^{-jkr} \\ E_\theta = \frac{Idl \sin \theta}{4\pi} \zeta_0 k^2 \left(j \frac{1}{kr} + \frac{1}{(kr)^2} - \frac{j}{(kr)^3} \right) e^{-jkr} \\ H_\phi = \frac{Idl \sin \theta}{4\pi} k^2 \left(j \frac{1}{kr} + \frac{1}{(kr)^2} \right) e^{-jkr} \end{cases}$$

Dalle espressioni sopra scritte si evince che i campi possono essere considerati funzioni della distanza elettrica dall'antenna e risulta

$$\begin{aligned} k &= \omega \epsilon_0 \mu_0 = 2\pi f \cdot \epsilon_0 \cdot 120\pi \cong 2\pi \cdot \frac{c}{\lambda} \cdot \frac{1}{36\pi \cdot 10^9} \cdot 120\pi = \\ &= 2\pi \cdot \frac{3 \cdot 10^8}{\lambda} \cdot \frac{1}{36\pi \cdot 10^9} \cdot 120\pi = \frac{2\pi}{\lambda}; \end{aligned}$$

vale a dire

$$kr = \frac{2\pi r}{\lambda},$$

dove λ è la lunghezza d'onda del segnale di corrente che interessa l'antenna.

Si consideri la componente lungo θ del campo elettrico

$$E_\theta = \frac{Idl \sin \theta}{4\pi} \zeta_0 k^2 \left[j \frac{1}{kr} + \frac{1}{(kr)^2} - \frac{j}{(kr)^3} \right] e^{-jkr}.$$

In essa sono presenti tre termini proporzionali rispettivamente ad $1/r$, $1/r^2$ ed $1/r^3$; i termini proporzionali ad $1/r^2$ ed $1/r^3$ predominano per piccole distanze dall'antenna, laddove si parla di *campo vicino* e l'espressione del campo elettrico si può approssimare come

$$E_{\theta, \text{NF}} \cong \frac{Id\ell \sin \theta}{4\pi} \zeta_0 k^2 \left(\frac{1}{(kr)^2} - \frac{j}{(kr)^3} \right) e^{-jkr}.$$

Invece, man mano che ci si allontana dall'antenna, è il termine $1/r$ a prevalere sempre di più sugli altri due, dando origine al cosiddetto *campo lontano*

$$E_{\theta, \text{FF}} \cong \frac{Id\ell \sin \theta}{4\pi} \zeta_0 k^2 \left(j \frac{1}{kr} \right) e^{-jkr}.$$

La distanza in cui i termini $1/r^2$ e $1/r^3$ diventano trascurabili rispetto al termine $1/r$ delimita il confine tra campo vicino e campo lontano. In particolare, per ricavare analiticamente questa distanza, si considera, convenzionalmente, l'uguaglianza

$$\left| j \frac{1}{kr} \right| = \left| \frac{1}{(kr)^2} \right|,$$

che, esplicitata, fornisce il valore

$$r = \frac{1}{k} = \frac{\lambda}{2\pi} \cong \frac{\lambda}{6}.$$

Il limite tra il campo vicino ed il campo lontano, per antenne diverse da quella in esame, non è semplicemente $\lambda/6$, ma va determinato caso per caso. La distanza ricavata non va immaginata come una precisa linea di demarcazione tra due regioni di spazio, ma indica semplicemente una regione in cui si ha sostanzialmente il passaggio da una struttura complicata di campo ad una più semplice. Un criterio generico per individuare tale limite è scegliere il massimo tra le quantità 3λ e $2D^2/\lambda$, dove D rappresenta la massima dimensione dell'antenna in questione: in genere, si opta per la prima scelta se ci si trova di fronte ad antenne di tipo filare, mentre si adotta la seconda per antenne a superficie, come le antenne paraboliche o le antenne a tromba.

Nel caso in cui le antenne sono usate per le telecomunicazioni, non si pone il problema di dover stabilire se l'antenna ricevente sia nel campo vicino oppure in quello lontano dell'antenna trasmittente, in quanto queste antenne sono utilizzate sempre per collegamenti su grandi distanze. Diversa, invece, è la situazione nei problemi di Compatibilità Elettromagnetica, dove il ricevitore, che può essere proprio l'antenna usata per verifiche di soddisfacimento delle norme, è generalmente posto nel campo vicino dell'antenna trasmittente, che può essere il dispositivo di cui si sta verificandone il soddisfacimento delle norme. Per esempio, nella misura delle emissioni radiate di un apparecchio di classe B, la normativa americana FCC prevede che l'antenna di misura sia posta a 3 metri dall'apparecchio e che le frequenze di misura siano da 30 MHz a 40 GHz; in corrispondenza di tali frequenze di lavoro, il limite tra campo vicino e campo lontano per l'antenna trasmittente si trova decisamente oltre 3 metri, per cui essendo le misure realizzate in campo vicino, è necessario tenerne conto.

Osservando l'espressione del campo magnetico, si nota che presenta solo la componente lungo φ , per cui è possibile definire il *campo di induzione*, vicino all'antenna trasmittente, ed il *campo di radiazione*, lontano dall'antenna trasmittente: per piccole distanze dal punto di irradiazione, vale a dire per piccoli valori di r , il termine $1/r^2$ predomina su $1/r$ e l'espressione del campo di induzione magnetica è

$$H_{\varphi, \text{induzione}} = H_{\varphi, \text{NF}} \equiv \frac{Id\ell \sin \theta}{4\pi} k^2 \left(\frac{1}{(kr)^2} \right) e^{-jkr} = \frac{Id\ell \sin \theta}{4\pi r^2} e^{-jkr}.$$

Per distanze sufficientemente elevate dal punto di irradiazione, il termine predominante è quello che va come $1/r$ e l'espressione del campo magnetico di radiazione si può scrivere come

$$H_{\varphi, \text{radiazione}} = H_{\varphi, \text{FF}} \cong \frac{Id\ell \sin \theta}{4\pi} k^2 \left(j \frac{1}{kr} \right) e^{-jkr} = j \frac{Id\ell \sin \theta}{4\pi r} k e^{-jkr}.$$

Analoghe considerazioni valgono ovviamente per il campo elettrico, che, per piccole distanze, vale

$$\text{campo elettrico vicino} \begin{cases} E_{r, \text{NF}} = \frac{Id\ell \cos \theta}{2\pi} \zeta_0 k^2 \left(\frac{1}{(kr)^2} - \frac{j}{(kr)^3} \right) e^{-jkr} \\ E_{\theta, \text{NF}} = \frac{Id\ell \sin \theta}{4\pi} k^2 \left(\frac{1}{(kr)^2} - \frac{j}{(kr)^3} \right) e^{-jkr} \end{cases} ;$$

mentre, per grandi distanze assume la forma

$$\text{campo elettrico lontano} \begin{cases} E_{r,FF} \cong 0 \\ E_{\theta,FF} \cong \frac{Idl \sin \theta}{4\pi} k^2 \left(j \frac{1}{kr} \right) e^{-jkr} = j \frac{Idl \sin \theta}{4\pi r} k e^{-jkr} . \end{cases}$$

La componente radiale del campo elettrico possiede un termine di induzione proporzionale ad $1/r^2$, mentre non è presente alcun termine di radiazione, proporzionale a $1/r$; ciò implica che il campo elettrico, oltre ad avere nulla la componente lungo φ , ha anche la componente radiale del campo elettrico lontano nulla. Si osserva, inoltre, la presenza di un fattore proporzionale ad $1/r^3$; questo termine indica l'esistenza, per la componente radiale del campo elettrico vicino, di un campo elettrostatico.

Per la componente del campo elettrico lungo θ , si osserva la presenza, per il campo elettrico vicino, sia del termine di induzione sia statico; infatti, i termini proporzionali ad $1/r^2$ ed $1/r^3$ non sono nulli e per il campo elettrico lontano il termine proporzionale ad $1/r$ è anch'esso diverso da zero, per cui è presente anche il campo di radiazione.

Si consideri, poi, l'espressione del campo magnetico di induzione nel dominio del tempo

$$h_{\varphi, \text{induzione}}(r, \theta, t) = \text{Re} \left[H_{\varphi, \text{induzione}} e^{j\omega t} \right] = \frac{Idl \sin \theta}{4\pi r^2} \cos(\omega t - kr),$$

con riferimento all'argomento del coseno, si può scrivere come

$$\omega t - kr = \omega \left(t - \frac{k}{\omega} r \right) = \omega \left(t - \frac{r}{v_p} \right) = \omega t',$$

dove v_p è la velocità di fase dell'onda, in questo caso pari alla velocità della luce nel vuoto. Sostituendo quest'ultima posizione, l'espressione del campo diventa

$$h_{\varphi, \text{induzione}}(r, \theta, t) = \frac{Id\ell \sin \theta}{4\pi r^2} \cos(\omega t').$$

Lo stesso risultato si potrebbe ottenere utilizzando la legge di Biot-Savart, valida in magnetostatica, per la corrente che scorre nell'elemento $d\ell$ sostituendo il tempo con il tempo ritardato appena calcolato. Si osserva che il campo effettivo è una funzione di t' anziché di t , ciò è dovuto, chiaramente, al tempo finito di propagazione del campo dal *punto sorgente*, in cui si trova l'antenna trasmittente, al *punto di osservazione*. Ovviamente, nei punti particolarmente vicini all'elemento di corrente, vale a dire nei punti in cui predomina il campo di induzione, la quantità r/v_p è molto piccola e si può approssimare $t' \cong t$.

Riguardo il campo di radiazione, nel seguito si dimostrerà che è proprio il termine di radiazione che contribuisce al flusso di energia dalla sorgente all'utilizzatore, energia attiva, mentre invece il termine di induzione dà luogo solo ad una energia reattiva che viene immagazzinata e rilasciata dal campo ogni quarto di periodo.

Nella definizione del *campo lontano* si è visto che in punti sufficientemente lontani dal dipolo, quindi dalla sorgente, il campo elettromagnetico presenta solo due componenti, dette *componenti di campo lontano*, pari a

$$\begin{aligned} \vec{H}_{\text{FF}} &= H_{\varphi, \text{FF}} \cdot \vec{a}_{\varphi} \cong j \frac{Id\ell \sin \theta}{4\pi r} k e^{-jkr} \vec{a}_{\varphi} \\ \vec{E}_{\text{FF}} &= E_{\theta, \text{FF}} \cdot \vec{a}_{\theta} \cong j \frac{Id\ell \sin \theta}{4\pi r} \zeta_0 k e^{-jkr} \vec{a}_{\theta}. \end{aligned}$$

In generale, i campi sono classificati come *onde sferiche*, mentre localmente questi campi possono essere trattati come *onde piane uniformi*. Il campo elettromagnetico individuato da queste due componenti soddisfa molte delle proprietà tipiche delle onde piane uniformi:

- i campi sono proporzionali ai termini $1/r$, I (fasore), $d\ell$ e $\sin\theta$;
- il rapporto tra il modulo del campo elettrico ed il modulo del campo magnetico è pari all'impedenza caratteristica del vuoto

$$\frac{|\vec{E}_{FF}|}{|\vec{H}_{FF}|} = \zeta_0 = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon_0}}$$

- i due campi sono localmente ortogonali;
- il prodotto vettoriale tra i due campi dà origine ad un vettore diretto come il versore della direzione radiale: $\vec{H}_{FF} \times \vec{E}_{FF} \propto \vec{a}_r$;
- al termine di fase, e^{-jkr} , corrisponde ad un ritardo nel dominio del tempo.

Per questo motivo si può applicare la *stima dei campi per traslazione*, utilizzando la regola dell'*inverso della distanza*: i campi elettrici e magnetici calcolati alle distanze d_1 e d_2 , poste nella regione di campo lontano rispetto alla sorgente, sono legati dalle relazioni

$$|\vec{E}_{FF}(d_2)| = \frac{d_1}{d_2} |\vec{E}_{FF}(d_1)| \quad |\vec{H}_{FF}(d_2)| = \frac{d_1}{d_2} |\vec{H}_{FF}(d_1)|.$$

Pertanto, l'intensità dei campi decresce con l'inverso della distanza dalla sorgente. Se almeno uno dei due punti di osservazione si trova nella regione del campo vicino, allora la regola dell'inverso della distanza non può più essere applicata, in quanto questo significherebbe ignorare i contributi di campo proporzionali a $1/r^2$ e $1/r^3$, cioè i termini di campo vicino.

Analizzando la situazione da un punto di vista energetico, si darà una giustificazione analitica del fatto che il termine di radiazione del campo elettromagnetico è quello che contribuisce al flusso di energia dalla sorgente

all'utilizzatore, *energia attiva*, mentre il termine di induzione dà luogo solo ad una *energia reattiva*, che viene immagazzinata e rilasciata dal campo ogni quarto di periodo. Per dimostrarlo si cominci a calcolare il flusso di potenza per unità di superficie in un punto P individuato dalle coordinate sferiche (r,θ,φ), vale a dire il *vettore di Poynting* nel punto considerato. Operando nel dominio della frequenza, si ha che

$$\vec{P} = \frac{1}{2} \vec{E} \times \vec{H}^* = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} \vec{a}_r & \vec{a}_\theta & \vec{a}_\phi \\ E_r & E_\theta & E_\phi \\ H_r^* & H_\theta^* & H_\phi^* \end{vmatrix} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} \vec{a}_r & \vec{a}_\theta & \vec{a}_\phi \\ E_r & E_\theta & 0 \\ 0 & 0 & H_\phi^* \end{vmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} E_\theta H_\phi^* \\ -E_r H_\phi^* \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Si osserva che il flusso di potenza è non nullo lungo le direzioni r e θ, mentre è nullo lungo la direzione φ. Per conoscere la natura di questi flussi di potenza lungo tali direzioni, bisogna sostituire le espressioni delle componenti del campo elettromagnetico. Sostituendo lungo la direzione azimutale θ, si ricava ancora che

$$P_\theta = -\frac{1}{2} E_r H_\phi^* = \left(\frac{Id\ell}{4\pi} \right)^2 \frac{\sin\theta \cos\theta}{\omega \epsilon r^5} j(k^2 r^2 + 1).$$

P_θ è una *potenza reattiva*, essendo la sua espressione puramente immaginaria; ciò significa che lungo la direzione θ non vi è un flusso netto di potenza, la quale viene alternativamente assorbita a ceduta dal mezzo in cui l'onda si propaga.

Per quanto riguarda la direzione radiale, sostituendo ed eseguendo gli opportuni passaggi, si trova che

$$P_r = \frac{1}{2} E_\theta H_\phi^* = \frac{1}{2} \left(\frac{Id\ell \sin\theta}{4\pi} \right)^2 \zeta_0 k^4 \left(\frac{1}{(kr)^2} - \frac{j}{(kr)^5} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{Id\ell \sin\theta}{4\pi} \right)^2 \zeta_0 k^2 \left(\frac{1}{r^2} - \frac{j}{k^3 r^5} \right).$$

P_r possiede una parte reale ed una immaginaria; la parte immaginaria corrisponde ancora ad una potenza reattiva, mentre la parte reale indica che lungo la direzione radiale si ha un flusso netto di *potenza attiva*

$$P_{r,attiva} = \text{Re} \left\{ \frac{1}{2} E_\theta H_\phi^* \right\} = \frac{1}{2} \left(\frac{|I|d\ell \sin\theta}{4\pi} \right)^2 \zeta_0 \frac{k^2}{r^2} = \frac{1}{8} \left(\frac{|I|d\ell \sin\theta}{\lambda} \right)^2 \frac{\zeta_0}{r^2} = 15\pi \left(\frac{|I|d\ell \sin\theta}{\lambda} \right)^2 \frac{1}{r^2},$$

dove $|I|$ è il modulo del fasore della corrente nell'antenna. Compattando, si ricava l'espressione della potenza attiva, diretta lungo la direzione radiale

$$\vec{P}_{attiva} = \frac{1}{2} \text{Re} \left\{ \frac{1}{2} \vec{E} \times \vec{H}^* \right\} = 15\pi \left(\frac{|I|d\ell \sin\theta}{\lambda} \right)^2 \frac{1}{r^2} \vec{a}_r \quad \left[\frac{W}{m^2} \right].$$

Questa espressione, che coinvolge la *densità di potenza* misurata in W/m^2 , mette in evidenza che la potenza si diffonde nello spazio allontanandosi dalla sorgente, il che spiega il fenomeno della *radiazione*. Si osservi che a questa espressione della potenza si perviene ugualmente considerando, anziché le espressioni generali del campo, solo quelle relative al campo lontano, vale a dire solo le componenti E_θ ed H_ϕ e tenendo conto, per queste, solo dei termini proporzionali ad $1/r$. Questo dimostra perciò che solo i contributi di radiazione danno origine ad un trasferimento netto di potenza dalla sorgente all'utilizzatore. È opportuno sottolineare che, essendo i termini di radiazione dipendenti da $1/r$, sono sicuramente quelli prevalenti a grande distanza, visto che i termini statici e quelli di induzione dipendono, rispettivamente, da $1/r^3$ ed $1/r^2$. Tuttavia, non bisogna dimenticare che anche in prossimità dell'elemento di corrente, dove, in

effetti, predominano il campo statico e quello di induzione, sono comunque i termini proporzionali ad $1/r$, per quanto piccoli, a contribuire al flusso netto di potenza dalla sorgente verso l'utilizzatore.

Per calcolare la *potenza complessiva radiata* dall'elemento di corrente bisogna integrare la densità di potenza su una superficie sferica, di raggio r , centrata sull'elemento stesso. Ricordando allora la formula per l'integrazione su una superficie sferica in coordinate sferiche, si ha che

$$\begin{aligned} P_{\text{rad}} &= \oint_{\text{SUP}} \vec{P}_{\text{attiva}} \cdot d\vec{S} = \oint_{\text{SUP}} P_{\text{attiva}} dS = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi} P_{\text{attiva}} r^2 \sin\theta d\theta = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi} 15\pi \left(\frac{|I|d\ell \sin\theta}{\lambda} \right)^2 \frac{1}{r^2} r^2 \sin\theta d\theta = \\ &= (2\pi) \cdot \int_0^{\pi} 15\pi \left(\frac{|I|d\ell \sin\theta}{\lambda} \right)^2 \sin\theta d\theta = (2\pi) \cdot 15\pi \left(\frac{|I|d\ell}{\lambda} \right)^2 \int_0^{\pi} \sin^3\theta d\theta = (2\pi) \cdot 15\pi \left(\frac{|I|d\ell}{\lambda} \right)^2 \cdot \left(\frac{4}{3} \right) = \\ &= 40 \left(\frac{\pi \cdot |I|d\ell}{\lambda} \right)^2. \end{aligned}$$

Generalmente, il risultato appena ottenuto si scrive nella forma equivalente

$$P_{\text{rad}} = 80\pi^2 \left(\frac{d\ell}{\lambda} \right)^2 \frac{|I|^2}{2}.$$

Se si pensa a P_{rad} come la potenza dissipata da un resistore R_{rad} , per il momento incognito, si può scrivere che

$$P_{\text{rad}} = R \frac{|I|^2}{2},$$

dove evidentemente $\frac{|I|^2}{2}$ è il quadrato del valore efficace della suddetta corrente.

Uguagliando, dunque, con l'espressione di P_{rad} di sopra, si intuisce che

$$R_{\text{rad}} = 80\pi^2 \left(\frac{d\ell}{\lambda} \right)^2 \quad [\Omega].$$

Questa resistenza prende il nome di *resistenza di radiazione* dell'elemento di corrente considerato e si tratta, evidentemente, di una *resistenza fittizia* che dissipa tanta potenza quanta ne viene irradiata dal dipolo elettrico, a parità di valore efficace della corrente.

Da quanto esposto segue facilmente che il dipolo elettrico costituisce una sorgente di radiazioni elettromagnetiche a bassissima efficienza. Ad esempio, considerando un dipolo elementare di lunghezza pari ad 1 cm, operante ad una frequenza di 300 MHz, cui corrisponde una lunghezza d'onda di 3 m, si ottiene una resistenza di radiazione $R_{\text{rad}} = 79 \text{ m}\Omega$. Ciò significa che per irradiare una potenza di 1 W è necessario alimentare il dipolo con una corrente di 3.6 A, che è un valore decisamente elevato. Diminuendo la frequenza, ad esempio a 3 MHz, cui corrisponde una lunghezza d'onda di 100 m, la resistenza di radiazione scende a 7.9 m Ω , per cui la corrente necessaria ad irradiare 1 W di potenza sale addirittura a 356 A.

Nonostante questa scarsissima efficienza di radiazione, il dipolo elettrico è comunque un valido strumento di studio, in quanto i campi lontani da esso prodotti sono sostanzialmente identici ai campi lontani da molte altre antenne di uso comune.

1.7 Il decibel e le unità tipiche della compatibilità elettromagnetica

I fenomeni di principale interesse in Compatibilità Elettromagnetica sono le emissioni condotte (tensioni espresse in V ed intensità di corrente in A) e le emissioni radiate (campi elettrici espressi in V/m e campi magnetici in A/m). A queste grandezze primarie sono associate la potenza, espressa in watt, oppure la densità di potenza in W/m². L'intervallo di valori possibili per tali grandezze può essere piuttosto ampio; per esempio, i campi elettrici possono assumere valori che variano da qualche $\mu\text{V/m}$ a 200 V/m, interessando quindi una

dinamica di più di otto ordini di grandezza. Poiché nell'ambito EMC si incontrano frequentemente tali ampie variazioni, le grandezze misurate sono solitamente espresse in *decibel* (dB). Infatti, l'utilizzo dei decibel permette di comprimere la dinamica dei dati: variazioni dell'ordine di 10^8 equivalgono a variazioni di 160 dB. È quindi necessario, per chi opera nel settore della compatibilità elettromagnetica, essere in grado di trattare grandezze che sono misurate in dB.

Appendice: mode e truffe in Elettromagnetismo

I fenomeni elettromagnetici e le loro interazioni con la materia organica hanno generato, negli anni, una serie di equivoci ed inganni, ad opera di pseudoscienziati, ma anche di ciarlatani, che hanno sfruttato l'ignoranza dei profani oppure il pregiudizio verso concetti matematici e fisici ritenuti non accessibili, e quindi del tutto inutili, spesso con risvolti economici non indifferenti. Nei secoli scorsi varie teorie pseudoscientifiche, mai dimostrate, e che sarebbero state subito sconfessate se sottoposte a seri controlli, hanno tentato di spiegare il rapporto tra elettromagnetismo e strutture biologiche.

Nel 1700, F. A. Mesmer, con la *teoria del magnetismo animale*, ipotizzò la presenza di un fluido magnetico in tutti gli organismi viventi, attraverso il quale avverrebbe la comunicazione verso tutte le altre energie dell'universo.

All'inizio del 1900, la teoria del magnetismo animale fu ripresa, con l'aggiunta di concetti importati dalla cultura orientale e di teorie innovative desunte dalla psicanalisi, da W. Reich, che elaborò la *teoria dell'energia orgonica*, basata sull'energia vitale, l'orgone, formata da particelle elementari, i bioni, che veicolerebbero l'energia nella materia organica e che sarebbero in risonanza con tutta l'energia dell'universo. Reich arrivò anche a costruire un accumulatore di energia orgonica, a suo dire molto utile nel trattamento terapeutico di varie malattie, fra le quali anche il cancro; il cosiddetto accumulatore di energia orgonica non era altro che un sistema di cavità, all'interno delle quali venivano disposti materiali isolanti e conduttori, che, sfruttando il principio della gabbia di Faraday, schermava il campo elettrico.

Non deve sorprendere che anche ai giorni nostri sia diffusa una teoria che di scientifico ha ben poco, ma viene accettata e seguita da molte persone, anche per la moda contemporanea delle 'culture alternative'; il riferimento è alla *teoria di Hartmann*, incentrata sull'esistenza di un reticolo che avvolge completamente il

globo. Hartmann, negli anni '50, effettuò una serie di studi empirici sui presunti effetti delle anomalie del campo magnetico terrestre sugli organismi viventi, ipotizzando che queste anomalie fossero dovute al flusso di acque sotterranee, in quanto conduttrici, ed alle cariche in moto che modificano i campi magnetici, e formulò un insieme di teorie, che pubblicò. La teoria afferma che, nei punti in cui il campo geomagnetico è particolarmente alto, si verificano una serie di effetti misurabili. Hartmann ipotizza che le anomalie del campo siano disposte secondo fasce, che compongono il reticolo, distanti 2.5 metri in longitudine e 2 metri in latitudine, e che solo le loro intersezioni, i cosiddetti nodi di Hartmann, siano misurabili, in genere con metodi empirici. Stare per lungo tempo su un nodo può avere effetti nefasti sulla salute, dai disturbi del sonno al cancro; pertanto, è importante non collocarvi sopra letti o poltrone. I gatti, inoltre, prediligerebbero i nodi, mentre i cani preferirebbero stare al centro delle celle formate dalle bande. Non esistono metodi semplici per rilevare i nodi, né si può calcolare esattamente la disposizione del reticolo, perché i nodi si spostano per effetto di cavità sotterranee, faglie telluriche, falde acquifere, oggetti metallici e, soprattutto, per effetto dell'inquinamento elettromagnetico, anche se non vengono fornite spiegazioni su come un campo oscillante possa modificare un campo magnetostatico; i campi generati dall'uomo, secondo la teoria, sarebbero in grado di potenziare l'intensità dei nodi o di attrarli su di sé.

In realtà, i nodi di Hartmann non sono facili da individuare perché si possono rilevare solo con il metodo dei raddomanti; ogni persona dotata di buon senso deduce da ciò che questi nodi non esistono, in quanto i raddomanti, una volta messi alla prova, cioè sotto un serio controllo, non si sono mai dimostrati capaci di trovare l'acqua, né tanto meno i nodi. La geometria dettagliata dei campi non è nota, in quanto non sono descritti da equazioni; Hartmann considera il campo magnetico uno scalare, per cui le anomalie ne modificano il valore assoluto, ed i geobiologi, seguaci di Hartmann, ritengono che i nodi siano campi uscenti radialmente dal suolo.

Originata e strettamente collegata alla teoria di Hartmann è la disciplina della *bioarchitettura* o *architettura geobiologica*, da non confondere con l'architettura bioclimatica, che si occupa dei fattori ambientali, energetici e meteorologici legati all'edificazione ed all'abitabilità di una costruzione. La bioarchitettura sostiene che i malanni di una persona siano dovuti alla cattiva disposizione dei mobili in ambiente domestico, disposizione che, invece, andrebbe effettuata evitando accuratamente di sistemare i letti in corrispondenza dei nodi di Hartmann, o, laddove questo non fosse possibile, utilizzando particolari dispositivi, come ad esempio una stuoia in fili di rame e carbonio, che permetterebbe di schermare e scaricare a terra la tensione in eccesso.

Gli equivoci legati all'elettromagnetismo si sono maggiormente diffusi negli ultimi anni, quando si è avuto un notevole aumento dell'utilizzo di apparecchiature elettroniche e del timore di possibili pericoli per la salute umana, ad esse collegati. Sono stati commercializzati vari dispositivi che, a detta dei produttori, dovrebbero proteggere l'utilizzatore, come, ad esempio, braccialetti e collanine magnetiche 'per allontanare l'energia negativa' e piastre metalliche, modificate a livello atomico, 'per essere in risonanza con l'energia positiva dell'universo'.

L'opportunità di nuovi guadagni, legati alla diffusione ed all'utilizzo sempre più frequente dei telefoni cellulari, non poteva certo sfuggire ai produttori di questi discutibili aggeggi. E così, in pochi anni, sono comparsi sul mercato articoli destinati, nelle intenzioni dei produttori, a proteggere dalle radiazioni elettromagnetiche emesse dalle antenne dei telefoni cellulari; tra i vari tipi proposti e messi in vendita, purtroppo anche in farmacia, attribuendo loro una valenza sanitaria che invece non hanno, c'è stato lo schermo costituito da una bustina in cui porre il telefono durante l'utilizzo, con l'avvertenza di lasciare fuoriuscire l'antenna per un miglior funzionamento!

Ultimamente, si è notevolmente diffuso l'utilizzo di un prodotto, noto come *coccinella*, da applicare in prossimità dell'antenna, e propagandato come 'scudo che protegge dalle onde elettromagnetiche nocive', che assorbirebbe l'energia elettromagnetica emessa dal telefono; riesce, però, difficile capire come il piccolo dispositivo, di cui non viene indicato il materiale, possa contribuire a diminuire l'energia irradiata.

Ultima arrivata nel bestiario degli strumenti di protezione, è la *farfalla* antiradiazione, Safety Butterfly, costruita in grafite e rivestita da un involucro di vetro e carbonio. Secondo quanto dichiarato dal produttore, la farfalla trasformerebbe le onde elettromagnetiche a 900 MHz ed a 1800 MHz in deboli ed innocui raggi infrarossi.

È superfluo sottolineare che l'utilizzo di tali aggeggi non solo è inutile, ma può essere, per certi versi, anche dannoso, in quanto, nel sistema di telefonia cellulare, qualsiasi interferenza nella propagazione del segnale, tra terminale mobile e stazione radiobase, comporta un incremento della potenza trasmessa dal terminale, col risultato di aumentare, invece che ridurre, l'assorbimento dell'energia elettromagnetica a radiofrequenze nel capo dell'utilizzatore.

Sorte migliore non sembra toccare ai rilevatori di onde, venduti per controllare e difendersi dall'elettrosmog in casa; uno di questi, Gt 700 della Gt Alarm, è stato provato presso il Laboratorio di Compatibilità Elettromagnetica della Camera di commercio di Torino con risultati per niente incoraggianti, in confronto ad un sensore professionale. L'apparecchio, infatti, si è dimostrato impreciso, soprattutto in presenza di segnali ad alta frequenza; alle basse frequenze, invece, sembra reagire correttamente all'aumento delle emissioni, ma ha comunque fornito misurazioni errate, con percentuali di errore, in alcuni casi, del 200%; infine, non è omnidirezionale e dà risultati diversi a seconda di come lo si orienti nello spazio.

L'ultimissima trovata è il letto-tana a baldacchino, presentato al Salone del Mobile di Milano, che, nelle intenzioni, dovrebbe 'mitigare gli effetti dannosi delle radiazioni elettromagnetiche'; il baldacchino, infatti, è realizzato in Tecnostan, un tessuto prodotto da Ageostan con trama in filo d'argento, che dovrebbe 'schermare il campo elettromagnetico'. In realtà, l'unico effetto individuato è un lieve abbassamento (una tacca) del campo di ricezione dei telefoni cellulari!

Dallo spazio, infine, arriva la tecnologia per incrementare le informazioni sulle emissioni di onde elettromagnetiche, ricorrendo allo stesso complesso sistema computerizzato usato per progettare le antenne dei satelliti per telecomunicazioni o le sonde spaziali che scrutano l'universo, come la sonda Cassini: il 6 giugno 2001, l'Alenia Spazio ha annunciato la costituzione del consorzio E-Green, il cui obiettivo sarà fornire dati completi ed attendibili per monitorare e gestire il fenomeno dell'elettrosmog nel nostro Paese. Grazie ad un'avanzata simulazione matematica, realizzata da supercomputer, il sistema è in grado di 'vedere' e localizzare un campo elettromagnetico, individuandone la sorgente (elettrodotto, ripetitore radio, antenne per cellulari, e così via) e calcolandone l'intensità di diffusione nell'ambiente e l'impatto rispetto ad edifici, strutture ed orografia del territorio implicato. Gli attuali sistemi di monitoraggio forniscono misurazioni limitate al raggio di azione delle centraline; E-Green, invece, fornisce parametri a 360°, in quanto è capace di registrare informazioni relative a tutto l'ambiente, strutture comprese, su cui agiscono le onde elettromagnetiche. Inoltre con E-Green si può arrivare anche ad un sistema di prevenzione controllata dell'elettrosmog, in quanto il sistema di simulazione consente di capire, prima di installare un'antenna oppure un elettrodotto, come si svilupperà l'impatto delle onde elettromagnetiche e, quindi, come gestire la tecnologia implicata; a volte, infatti, può bastare girare di qualche grado un'antenna, per risolvere il problema e non provocare danni all'ambiente ed alla salute dell'uomo. Su impianti già realizzati, E-Green

consente di valutare la corrispondenza tra il valore calcolato al computer ed il valore reale misurato. L'invio dei dati raccolti dalle centraline ai Centri di Simulazione e Controllo avverrà tramite Internet, via rete di terra e via satellite.