

Zeitschrift: Archi : rivista svizzera di architettura, ingegneria e urbanistica = Swiss review of architecture, engineering and urban planning

Band: - (2001)

Heft: 2

Artikel: I campi elettromagnetici

Autor: Andreuccetti, Daniele

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-132190>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 18.10.2024

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

I campi elettromagnetici

Daniele Andreuccetti, fisico
IROE-CNR, Firenze

Sommario

La relazione inizierà presentando i concetti fisici di base. Con linguaggio semplice verrà illustrato il significato di termini quali *campo elettrico*, *campo magnetico*, *campo elettromagnetico*, *onda elettromagnetica*, *radiazione elettromagnetica*, spesso utilizzati in modo confuso dai mezzi di informazione di massa. Si farà vedere come tali termini identifichino grandezze fisiche con proprietà diverse, a cui corrispondono differenti modalità di interazione con gli organismi biologici.

Il *campo elettrico* è la grandezza fisica attraverso la quale descriviamo una regione di spazio le cui proprietà sono perturbate dalla presenza di una distribuzione di *carica elettrica*. Il modo più evidente con cui questa perturbazione si manifesta è attraverso la forza che viene sperimentata da una qualunque altra carica introdotta nel campo stesso. Analogamente, attraverso il concetto di *campo magnetico* descriviamo la perturbazione delle proprietà dello spazio determinata dalla presenza di una distribuzione di *corrente elettrica*, perturbazione che si manifesta con una forza che agisce su qualunque altra corrente elettrica introdotta nel campo. Carica elettrica e corrente elettrica sono dunque le *sorgenti materiali* rispettivamente del campo elettrico e del campo magnetico.

Se tutto finisse qui, non esisterebbero né campo elettromagnetico né onde elettromagnetiche. Invece, risulta che un campo elettrico può essere generato, oltre che da una distribuzione di carica elettrica, anche da un *campo magnetico variabile nel tempo*; analogamente, un campo magnetico può essere generato, oltre che da una distribuzione di corrente elettrica, anche da un *campo elettrico variabile nel tempo*. In altre parole, quando si è in regime variabile nel tempo, campo elettrico e campo magnetico divengono uno la sorgente (cioè la «causa») dell'altro.

Grazie a questa interdipendenza, il campo elettrico ed il campo magnetico possono in quel caso essere considerati come due aspetti di un'unica grandezza fisica (il *campo elettromagnetico*) in grado di propagarsi a distanza indefinita dalla sorgente,

un fenomeno indicato anche col termine *radiazione elettromagnetica*. In molti casi importanti, risulta che l'ampiezza del campo elettromagnetico radiato varia in modo oscillatorio sinusoidale tanto nel tempo quanto nello spazio: si parla allora di *onda elettromagnetica*.

Una analisi della struttura del campo in funzione della distanza dalla sorgente mostra che in prossimità prevalgono il campo elettrico ed il campo magnetico prodotti dalle sorgenti materiali presenti su di essa, mentre per distanze maggiori di circa una lunghezza d'onda diviene prevalente il campo elettromagnetico dovuto alla mutua generazione, cioè alla radiazione.

La relazione affronterà poi il tema della tanto dibattuta «*pericolosità*» dei campi elettromagnetici, iniziando con una breve introduzione storica che ripercorrerà, per linee molto generali, anche le tappe dello sviluppo delle normative nel settore. La questione, emersa nel secondo dopoguerra soprattutto come conseguenza dello sviluppo dei primi impieghi militari di questo agente fisico (radar e telecomunicazioni), è esplosa successivamente con la diffusione nei Paesi industrializzati delle applicazioni civili dei campi elettromagnetici.

I primi effetti dannosi riportati come conseguenza dell'esposizione ad intensi campi elettromagnetici (cataratta e sterilità maschile temporanea) erano indiscutibilmente *di tipo termico*; questo portò i Paesi occidentali ad adottare normative tese ad evitare tali effetti termici eclatanti.

Successivamente, nei Paesi dell'est europeo, si cominciò a dare credito all'esistenza di una multifforme casistica di effetti non termici, consistenti principalmente in disturbi più o meno soggettivi, che venivano ricondotti ad alterazioni del sistema nervoso conseguenti (almeno apparentemente) ad una esposizione prolungata (cronica) a campi elettromagnetici di livello anche molto basso. Questo approccio conduceva a fissare soglie di sicurezza notevolmente più basse di quelle termiche (anche 1000 volte, in termini di potenza).

Non essendo stato possibile accertare e descrivere quantitativamente gli effetti segnalati, di questa

seconda impostazione non è rimasta praticamente più traccia e le norme di sicurezza emanate dalle varie istituzioni internazionali si fondano oggi sulla prevenzione dei soli effetti acuti, gli unici scientificamente accertati. La conoscenza di tali effetti si è nel frattempo approfondita, essendo stati ben chiariti sia gli effetti comportamentali conseguenti ad un moderato riscaldamento sistemico sia gli effetti acuti non termici causati dalle esposizioni ad intensi campi di frequenza inferiore a un centinaio di chilohertz circa. Questo approfondimento ha portato ad una revisione verso il basso dei limiti di sicurezza, determinando di fatto un riavvicinamento ai limiti fissati in base ai presunti effetti cronici.

Esiste un'altra problematica che la ricerca scientifica non ha finora potuto chiarire definitivamente, anch'essa di vecchia data, ma che recentemente ha riscosso molto interesse nei media e nell'opinione pubblica: si tratta della possibilità che le *esposizioni croniche* ai campi elettromagnetici anche di basso livello possano favorire l'insorgere di alcune *patologie tumorali*. La più dibattuta, perché supportata da un grande numero di indagini epidemiologiche più o meno controverse, è l'associazione tra esposizione al campo magnetico a 50 Hz (generato per esempio da elettrodotti ed elettrodomestici) e l'incidenza di alcune forme di *leucemia infantile*. Sebbene l'ipotesi di cancerogenicità dei campi elettromagnetici sia stata sottoposta ad una indagine scientifica serrata, non sono stati finora evidenziati elementi di consistenza tale da suggerire una revisione dei limiti di sicurezza vigenti.

Infine, la relazione presenterà una rapida panoramica delle principali sorgenti di campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici.

Le applicazioni dirette dei campi elettromagnetici e le altre tecnologie che portano a disperdere campi nell'ambiente investono numerosissimi settori della società. In ambito industriale e sanitario, si sfrutta soprattutto la possibilità di ottenere *riscaldamenti rapidi ed efficienti*. Nell'ambiente esterno, la presenza di elettrodotti, centrali e cabine elettriche rappresenta in assoluto la principale sorgente di campi elettrici e magnetici a bassissima frequenza, mentre gli impianti di telecomunicazione (diffusioni radio-TV e telefonia cellulare) e gli apparati ad essi assimilabili (come radar e radiofari) costituiscono le più comuni sorgenti di campi elettromagnetici a frequenza elevata. Nell'ambiente domestico, infine, le emissioni più significative sono i campi magnetici a bassissima frequenza dispersi dai cablaggi degli edifici e dalle apparecchiature elettriche.

Alcune di queste sorgenti verranno esaminate più

da vicino, mettendone in luce le caratteristiche e gli elementi di maggior interesse per la popolazione. Saranno così confrontate tra loro le emissioni degli elettrodotti *aerei* e delle linee elettriche *inter-rate*. Mentre i valori massimi di campo magnetico sono nei due casi dello stesso ordine di grandezza (qualche decina di microtesla), i campi dispersi dalle linee interrate decadono più rapidamente con la distanza, riducendosi a valori trascurabili (pochi decimi di microtesla) già a poche decine di metri, contro oltre un centinaio per gli elettrodotti in aria. Per quanto riguarda il campo magnetico a bassissima frequenza nelle abitazioni, saranno presentati i valori tipici del «fondo» e quelli dispersi da alcuni comuni *apparecchi di uso domestico*. I primi si attestano intorno ad un decimo di microtesla negli appartamenti cittadini ed a pochi centesimi di microtesla nelle abitazioni monofamiliari semirurali. I piccoli elettrodomestici producono invece campo assai intenso (centinaia di microtesla) in stretta prossimità, ma che si attenua rapidamente con la distanza.

Un ultimo approfondimento sarà dedicato infine alle *stazioni radiobase della telefonia cellulare* (con particolare riferimento a quelle del sistema GSM) allo scopo di chiarire le principali caratteristiche di intensità e di distribuzione spaziale e temporale del campo elettromagnetico da esse irradiato. Le antenne utilizzate in questi apparati generano una distribuzione di campo elettromagnetico che, nel piano verticale, risulta confinata in uno stretto cono (una decina di gradi nei casi più tipici) puntato in direzione anteriore alla stazione o leggermente verso il basso; per questo motivo, le abitazioni poste immediatamente sotto alla stazione ed intorno (ma più in basso) ad essa non sono di norma interessate da livelli di campo di particolare rilevanza protezionistica. Inoltre, gli accorgimenti tecnici messi in atto dai gestori per migliorare la qualità del servizio (riduzione dinamica della potenza, trasmissione discontinua) hanno anche l'effetto di ridurre considerevolmente la potenza media irradiata e quindi il livello dei campi prodotti. Anche il progressivo aumento del numero delle celle e la conseguente riduzione della loro estensione, motivata dall'esigenza commerciale di aumentare il traffico consentito, ha come conseguenza una riduzione dei livelli medi di campo elettromagnetico sul territorio.

Concetti fisici di base

Introduzione

Col termine «campo elettromagnetico» o «radiazione elettromagnetica» si intende il complesso di grandezze e fenomeni fisici governati da un insie-

me di equazioni che James Maxwell mise a punto nella seconda metà del XIX secolo, riprendendo e completando il lavoro sperimentale e teorico sull'elettricità ed il magnetismo compiuto da un grande numero di studiosi (come Galvani, Volta, Oersted, Laplace, Ampère, Faraday per citare solo i più noti) nei due secoli precedenti.

Semplificando al massimo, possiamo dire quanto segue.

- Il campo elettromagnetico è una forma di energia che può permeare lo spazio (anche vuoto) e può propagarsi in esso.
- Lo sviluppo tecnologico ha permesso di realizzare dispositivi in grado di generare campi elettromagnetici, di impiegarli in svariate applicazioni tra cui, prima fra tutte, la possibilità di inviarli nello spazio in modo controllato, utilizzandoli quale veicolo di trasporto di informazione, di riceverli e rivellarne la presenza nonché estrarne l'informazione trasportata ed infine di misurarne i parametri caratteristici.
- Le *onde elettromagnetiche* costituiscono una delle modalità più comuni ed importanti di propagazione del campo elettromagnetico. Esse sono caratterizzate dalla *intensità* (legata all'ampiezza dell'onda), dalla *frequenza* (numero di cicli d'onda completi che si susseguono nell'unità di tempo) e dalla *lunghezza d'onda* (distanza nello spazio tra due successive creste d'onda).
- Frequenza e lunghezza d'onda sono inversamente proporzionali, poiché la lunghezza d'onda non è altro che lo spazio percorso dall'onda in un tempo pari all'inverso della frequenza.
- La *frequenza* condiziona tutti gli aspetti teorici e tecnologici connessi con l'elettromagnetismo: le tecniche per generare campi elettromagnetici, i sistemi per rivellarli e misurarli, le modalità con cui essi si propagano ed interagiscono con la materia (e quindi con gli organismi biologici). Per questo motivo, anche gli effetti biologici dei campi elettromagnetici dipendono profondamente dalla frequenza, al punto che un campo elettrico di fissata intensità può essere pressoché insignificante o assai pericoloso, a seconda della sua frequenza: ciò spiega perché le norme di sicurezza specifichino sempre limiti massimi notevolmente variabili con la frequenza. Due sono gli aspetti significativi di questa questione.
- 1. La frequenza condiziona la struttura del campo elettromagnetico nell'intorno della sorgente, che si modifica notevolmente in funzione della distanza da essa, rapportata alla lunghezza d'onda del campo, passando - come vedremo - dalla zona dei campi reattivi a quella dei campi radiativi.

2. Il meccanismo di accoppiamento fisico tra campi ed oggetti biologici dipende in modo critico dal rapporto tra la dimensione dell'organismo esposto e la lunghezza d'onda del campo.

- L'*intensità* della radiazione indica l'effettiva ampiezza del campo e quindi delle forze che esso può esercitare. Essa rappresenta anche la quantità di energia trasportata per unità di tempo e di superficie ortogonale alla direzione di propagazione. Qualunque fenomeno di interazione si studi, esso - se si verifica - è normalmente tanto più evidente quanto più la radiazione è intensa.

$$1. \operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \text{ legge di Ampère}$$

$$2. \operatorname{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \text{ legge di Faraday}$$

$$3. \operatorname{div} \vec{D} = \rho, \text{ legge di Gauss}$$

$$4. \operatorname{div} \vec{B} = 0, \text{ non esistono cariche magnetiche}$$

Le equazioni di Maxwell

Dualismo onda/corpuscolo - Radiazioni ionizzanti e non

A seconda dei fenomeni studiati, la radiazione elettromagnetica può essere convenientemente descritta in termini *ondulatori* oppure *corpuscolari*. Nella descrizione corpuscolare, la frequenza costituisce una misura dell'energia trasportata da ogni singolo corpuscolo (detto *fotone*), in base alla nota relazione secondo la quale l'energia di ogni fotone è pari al prodotto della frequenza per la costante di Planck (il cui valore è $6,63 \cdot 10^{-34}$ joule.secondo) mentre ovviamente l'intensità è legata anche al numero di fotoni che transitano per unità di tempo attraverso l'unità di superficie ortogonale alla direzione di propagazione.

Si definiscono *radiazioni elettromagnetiche ionizzanti* quelle radiazioni in grado di ionizzare direttamente la materia *qualunque sia la loro intensità*. La ionizzazione è un tipico fenomeno corpuscolare, poiché consiste nell'assorbimento di un fotone da parte di un elettrone esterno di un atomo: l'elettrone acquisisce l'energia del fotone e, se questa è sufficiente (cioè se la frequenza della radiazione è abbastanza alta), abbandona l'atomo a cui appartiene, vincendone la forza elettrostatica che lo lega al nucleo. La ionizzazione, quando avviene (cioè se la frequenza è sufficiente), avviene per *qualunque intensità*: quello che cambia con l'intensità della radiazione è solo il numero di atomi che subiranno il processo, rapportato all'unità di tempo e di superficie esposta.

La distinzione tra radiazioni ionizzanti e non riveste una grande importanza anche per quel che

riguarda gli effetti biologici, poiché il meccanismo di ionizzazione può provocare nei tessuti alterazioni genetiche e tumori. *Le radiazioni ionizzanti sono pertanto cancerogene certi a qualunque livello di intensità.*

Nella tabella che segue sono riportate le energie necessarie per ionizzare alcuni tipi di atomi, dal cesio (che è il più disponibile a farsi strappare elettroni) all'elio (che invece è tra i meno disponibili), passando per i tipici componenti del materiale organico.

Atomo	Energia di ionizzazione	Lunghezza d'onda equivalente
Cesio	3,9 eV	318 nm
Carbonio	11,3 eV	110 nm
Idrogeno	13,6 eV	91 nm
Ossigeno	13,6 eV	91 nm
Azoto	14,5 eV	86 nm
Elio	24,6 eV	50 nm

Energie di ionizzazione

Come si vede, la banda di radiazione interessata è sempre quella degli *ultravioletti*, che occupano l'intervallo di lunghezza d'onda compreso grosso modo tra 10 e 400 nm (1 nm è pari a un miliardesimo di metro). I campi elettromagnetici di cui ci occupiamo in questo documento rientrano pertanto tutti nell'ambito delle *radiazioni NON ionizzanti*, per le quali si farà nel seguito riferimento esclusivamente alla trattazione *ondulatoria*.

Campi elettrici, campi magnetici, campi elettromagnetici, onde elettromagnetiche

È bene avere presente che i termini *campo elettrico*, *campo elettromagnetico*, *onda elettromagnetica* NON sono sinonimi, ma rappresentano aspetti diversi dell'elettromagnetismo, da tenere distinti anche in considerazione delle diverse modalità di interazione con gli individui umani e quindi delle diverse eventuali conseguenze sanitarie.

Il *campo elettrico* è la grandezza fisica attraverso la quale descriviamo una regione di spazio le cui proprietà sono perturbate dalla presenza di una distribuzione di carica elettrica. Il modo più evidente con cui questa perturbazione si manifesta è attraverso la forza che viene sperimentata da una qualunque altra carica introdotta nel campo stesso. Il campo elettrico viene descritto mediante un vettore « \vec{E} » (detto vettore campo elettrico, o semplicemente campo elettrico) che in ogni punto della regione di spazio indica la direzione, l'intensità ed il verso della forza che agisce su una carica puntiforme unitaria positiva che venga posta in quel punto; l'intensità del campo elettrico si misura in volt al metro (V/m). Grazie alla forza che esercita sulle

cariche, il campo elettrico è in grado di provocare correnti elettriche nei materiali conduttori.

Voltaggio della linea elettrica	Campo elettrico al suolo [V/m]
380 kV	5000 ÷ 6000
220 kV	2000 ÷ 4000
132 kV ÷ 150 kV	1500 ÷ 3000
15 kV	100 ÷ 300

Linee elettriche e campi elettrici al suolo (50 Hz)

Analogamente, attraverso il concetto di *campo magnetico* descriviamo la perturbazione delle proprietà dello spazio determinata dalla presenza di una distribuzione di corrente elettrica, perturbazione che si manifesta con una forza che agisce su qualunque altra corrente elettrica introdotta nel campo. Il campo magnetico può essere descritto mediante un vettore « \vec{B} » (detto densità di flusso magnetico, o anche induzione magnetica) definito in maniera un po' complessa, ma in ogni caso riconducibile alla forza che in ogni punto della regione di spazio si manifesta su una corrente elementare che venga posta in quel punto; l'intensità dell'induzione magnetica si misura in tesla (T). Una delle caratteristiche più importanti del campo magnetico *variabile nel tempo*, almeno dal punto di vista sia della misura sia dell'interazione con organismi biologici, consiste nella sua capacità di provocare correnti elettriche all'interno di oggetti conduttori dove in assenza di campo esse non erano presenti.

Voltaggio [kV]	Induzione magnetica B [μ T]
110	11,9
220	9,1
330	8,7

L'intensità del campo magnetico sotto le linee di alta tensione (a metà del tracciato, 1 m sopra il suolo, 1 kA)

Carica elettrica e corrente elettrica sono dunque le sorgenti materiali rispettivamente del campo elettrico e del campo magnetico. Questa situazione è riassunta nella tabella che segue.

	Campo elettrico	Campo magnetico
Generato da	qualunque oggetto dotato di carica elettrica	qualunque oggetto percorso da corrente elettrica
È una regione di spazio nella quale si manifestano forze che agiscono su	altri oggetti dotati di carica elettrica	altri conduttori percorsi da corrente elettrica

Generazione e manifestazione dei campi

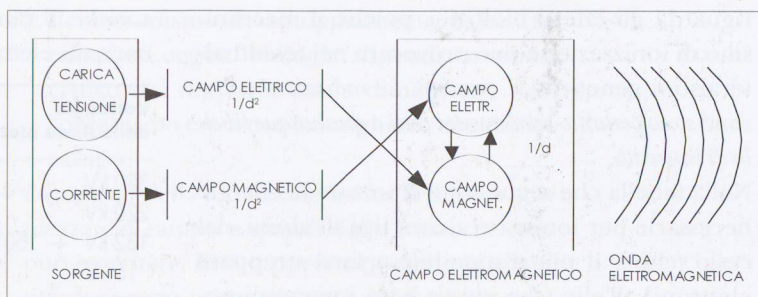
Se tutto finisse qui, non esisterebbero né campo elettromagnetico né onde elettromagnetiche. Invece, risulta che un campo elettrico può essere generato, oltre che da una distribuzione di carica elettrica, anche da un campo magnetico *variabile nel tempo*; analogamente, un campo magnetico può essere generato, oltre che da una distribuzione di corrente elettrica, anche da un campo elettrico *variabile nel tempo*. In altre parole, quando si è in regime variabile nel tempo, campo elettrico e campo magnetico divengono uno la sorgente (cioè la «causa») dell'altro.

Grazie a questa interdipendenza, il campo elettrico ed il campo magnetico possono in quel caso essere considerati come due aspetti di un'unica grandezza fisica (il *campo elettromagnetico*) in grado di propagarsi a distanza indefinita dalla sorgente, un fenomeno indicato anche col termine *radiazione elettromagnetica*. In molti casi importanti, risulta che l'ampiezza del campo elettromagnetico radiato varia in modo oscillatorio sinusoidale tanto nel tempo quanto nello spazio: si parla allora di *onda elettromagnetica*.

Una analisi della struttura del campo in funzione della distanza dalla sorgente mostra che in prossimità prevalgono il *campo elettrico* ed il *campo magnetico* prodotti dalle sorgenti materiali presenti su di essa, mentre per distanze maggiori di circa una lunghezza d'onda diviene prevalente il *campo elettromagnetico* dovuto alla mutua generazione, cioè alla *radiazione*.

Riassumendo

- Nelle *immediate vicinanze* di una sorgente (antenna, apparato industriale a radiofrequenza, elettrodomestico), e fino a circa un decimo di lunghezza d'onda di distanza da essa, il campo elettrico ed il campo magnetico sono del tutto *indipendenti uno dall'altro*, essendo legati e determinati dalle rispettive «sorgenti fisiche» (cariche e correnti); essi perciò non possono essere ricavati uno dall'altro e devono essere valutati separatamente.
- A *distanze superiori*, la struttura dei campi inizia a risentire del fenomeno della *radiazione* (ovvero la «mutua generazione» tra campo elettrico e campo magnetico), che resta l'unico significativo per distanze dalla sorgente superiori a circa una lunghezza d'onda.
- Grazie a questa mutua generazione, i campi si propagano a distanza indefinita dalla sorgente, assumendo una struttura detta di tipo radiativo nella quale il campo elettrico ed il campo magnetico sono perpendicolari tra di loro ed alla direzione di propagazione.



Struttura dei campi in funzione della distanza

- In molti casi importanti le ampiezze dei campi radiativi variano in modo sinusoidale tanto nel tempo quanto nello spazio: si parla allora di *onda elettromagnetica*.
- Un'onda elettromagnetica trasporta energia; la densità di potenza (energia trasportata per unità di tempo e di superficie, espressa in watt al metro quadrato, W/m^2) risulta proporzionale al prodotto delle intensità del campo elettrico e del campo magnetico e costituisce un'altra grandezza accessibile di misura attraverso la quale caratterizzare l'intensità della radiazione.

I campi elettromagnetici sono pericolosi?

Introduzione

I campi elettromagnetici, se di sufficiente intensità, possono sicuramente risultare pericolosi per la salute o la sicurezza degli individui esposti. La sperimentazione su volontari ed animali ha permesso di identificare un insieme di effetti dannosi e di determinarne le soglie. La tipologia degli effetti ed i valori delle soglie dipendono in maniera determinante dalla frequenza del campo. A frequenze superiori a qualche centinaio di chiloherz, i rischi sono legati al riscaldamento dei tessuti. A frequenze più basse, i rischi hanno origine dalle interferenze tra le correnti indotte dai campi e le correnti elettrofisiologiche associate alla percezione sensoriale ed alla motilità muscolare.

Storicamente, la questione della possibile pericolosità dei campi elettromagnetici (CEM) a radiofrequenza (RF) e microonde (MW) è emersa nel secondo dopoguerra, come conseguenza dello sviluppo delle applicazioni di questo agente fisico, all'inizio soprattutto in ambito militare (radar e telecomunicazioni).

Successivamente, la diffusione nei Paesi industrializzati delle applicazioni civili dei CEM (telecomunicazioni, controllo del traffico aereo, processi industriali, diagnosi e terapia medica, per citarne solo alcune) e l'utilizzo di tecnologie che in qualche modo li producono e diffondono nell'ambiente (trasmissione dell'energia elettrica, per esempio) hanno determinato un significativo aumento della

loro presenza sul territorio, provocando ben presto una reazione di preoccupazione, quando non di vero e proprio allarme, nella popolazione esposta, anche a causa della diffusione non sempre corretta di informazioni da parte dei media.

Sul piano sanitario, i primi effetti dannosi riportati come conseguenza dell'esposizione ad intensi CEM (cataratta, sterilità) erano di tipo indiscutibilmente termico, essendo imputabili al surriscaldamento di alcuni organi bersaglio particolarmente vulnerabili (cristallino, gonadi). Dal punto di vista normativo, si delinearono ben presto due scuole di pensiero. La prima, tipica dei paesi occidentali, vedeva in questi effetti termici l'unico meccanismo di azione dei CEM e portava quindi a normative miranti a difendere gli esposti da eccessivo riscaldamento locale o sistemico; mediante sperimentazione su volontari ed animali, venne identificato il valore di 100 W/m^2 come limite di densità di potenza ritenuto sicuro per l'esposizione continuativa della popolazione. La seconda, diffusa nei paesi dell'est europeo, dava credito all'esistenza di una multiforme casistica di effetti non termici, consistenti principalmente in disturbi più o meno soggettivi, che venivano ricondotti ad alterazioni del sistema nervoso conseguenti (almeno apparentemente) ad una esposizione prolungata (cronica) a CEM di livelli anche molto bassi. Questo approccio conduceva a fissare soglie di sicurezza notevolmente più basse di quelle termiche (anche 1000 volte, in termini di potenza).

Non essendo stato possibile accertare e descrivere quantitativamente gli effetti segnalati, di questa seconda impostazione non è rimasta praticamente più traccia e le norme di sicurezza emanate dalle varie istituzioni internazionali si fondano oggi sulla prevenzione dei soli effetti acuti, gli unici scientificamente accertati. La conoscenza di tali effetti si è nel frattempo approfondita, essendo stati ben chiariti sia gli effetti comportamentali conseguenti ad un moderato e prolungato riscaldamento sistemico sia gli effetti acuti non termici causati dalle esposizioni ad intensi campi di frequenza inferiore a un centinaio di chilohertz circa. Questo approfondimento ha portato ad una revisione verso il basso dei limiti di sicurezza, determinando di fatto un riavvicinamento ai limiti fissati in base ai presunti effetti cronici.

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

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

Frequenza	Valore limite d'immissione per il valore efficace della	
	intensità del campo elettrico E (V/m)	densità del flusso magnetico B (μT)
< 1 Hz	—	40'000
1 - 8 Hz	10'000	40'000 / f^2
8 - 25 Hz	10'000	5'000 / f
0.025 - 0.8 kHz	250 / f	5 / f
0.8 - 3 kHz	250 / f	6.25
3 - 100 kHz	87	6.25
100 - 150 kHz	87	6.25
0.15 - 1 MHz	87	0.92 / f
1 - 10 MHz	$87 / \sqrt{f}$	0.92 / f
10 - 400 MHz	28	0.092
400 - 2000 MHz	$1.375 \cdot \sqrt{f}$	$0.0046 \cdot \sqrt{f}$
2 - 10 GHz	61	0.20
10 - 300 GHz	61	0.20

Normativa Svizzera (ORNI) - Ordinanza sulla protezione dalle radiazioni non ionizzanti (f è la frequenza espressa nell'unità di misura indicata nella prima colonna della tabella).

Questa situazione ha finito col generare nella popolazione una notevole apprensione per tutto quello che riguarda i campi elettromagnetici, riconducibile ad almeno tre diverse concause che può valer la pena elencare.

1. Esiste in alcuni casi un notevole differenziale tra i limiti di sicurezza previsti dalle normative vigenti e le soglie a cui sono associati alcuni effetti (gravi ma non del tutto accertati) legati alle esposizioni croniche; ciò genera evidentemente una sensazione di scarsa tutela.
2. Il campo elettromagnetico non può essere percepito sensorialmente; l'impossibilità di avvertire coscientemente l'esposizione genera un senso di disagio ed insicurezza.
3. Benché si riconoscano i vantaggi sociali delle applicazioni dei campi elettromagnetici, i soggetti esposti hanno l'impressione che si sia di fronte ad un caso di socializzazione del beneficio e distribuzione disuniforme del rischio.

Per far fronte a questa situazione, nella maggior parte dei Paesi industrializzati sono all'opera gruppi di ricerca e sono stati istituiti organi di sorveglianza con lo scopo di approfondire la conoscenza sulla pericolosità dei CEM e fornire tanto una adeguata tutela quanto appropriate informazioni alla popolazione esposta o comunque preoccupata del problema.

Tutti gli aspetti del problema sono stati e vengono sistematicamente indagati: dallo sviluppo di nuove strumentazioni e tecniche di misura e calibrazione alla messa a punto di metodi di valutazione teorica delle intensità dei campi, dall'indagine sui meccanismi fisici e biofisici di accoppiamento tra campi ed organismi esposti alle ricerche biomediche in vitro ed in vivo ed alle indagini epidemiologiche sulla popolazione, dall'esecuzione di campagne di controllo ambientale alla individuazione di metodiche di risanamento dove necessario. Si tratta quindi di un settore altamente attivo, nel quale vengono immesse considerevoli risorse e dal quale sono stati prodotti negli ultimi anni migliaia di articoli e testi scientifici di vario livello. Questo non ha però prodotto i frutti sperati sul versante del rapporto con la popolazione.

È opportuno precisare subito che il livello di apprensione che caratterizza l'attuale atteggiamento della popolazione e dei media nei confronti dei campi elettromagnetici appare in buona parte quanto meno sproporzionato, se raffrontato all'attenzione dedicata ad altre fonti di rischio sanitario o ambientale, alcune sicuramente più accertate e significative.

Vi sono due aspetti indipendenti da indagare quantitativamente quando si esegue un'indagine su un sospetto fattore di rischio sanitario o ambientale: stabilire la credibilità del rischio («quanto è credibile che esista un rischio associato all'esposizione?»), stabilirne l'entità in termini di impatto sanitario o ambientale («se il rischio esiste, che impatto ha sulla salute pubblica e sullo stato dell'ambiente?»). Nel caso dei campi elettromagnetici, anche riferendosi alla questione più conclamata della relazione tra campo magnetico a bassissima frequenza e leucemie infantili, *non è stato finora possibile stabilire con certezza la credibilità del rischio* mentre, dando questa per scontata, si è potuto dimostrare che *la sua entità è comunque molto piccola in termini di sanità pubblica*, se confrontata con quella associata ad altri rischi ambientali assai comuni. Ancora minori evidenze esistono a proposito di rischi sanitari connessi con le stazioni radio base per la telefonia cellulare.

Nessuna tecnologia, vecchia o nuova, è completamente esente da rischi. Anche se lo fosse, *non*

sarebbe comunque possibile dimostrarlo a priori; quello che possiamo fare, quando vengono evidenziati elementi di sospetto nei confronti di una tecnologia, è intensificare gli studi e le ricerche per far emergere l'eventuale esistenza di rischi concreti. Per i campi elettromagnetici questo è stato fatto e lo si continua a fare, ma nessuna evidenza è emersa con chiarezza; una situazione di «rassicurante incertezza», come qualcuno ha argutamente osservato: se un rischio concreto e significativo fosse presente, la mole di studi eseguiti a seguito dei primi sospetti avrebbe finito per evidenziarlo. Una situazione in ogni caso non ideale, ma con la quale è necessario confrontarsi per trarre le giuste indicazioni.

Interazione, effetto, danno

Nella letteratura che si occupa di protezione dai CEM compaiono spesso termini quali «interazione», «effetto biologico» «rischio» e «danno», usati talvolta impropriamente, specie nella stampa non specialistica. È pertanto opportuno spendere qualche parola per chiarire la terminologia.

Quando un organismo biologico (per esempio un individuo) si trova immerso in un campo elettromagnetico, ha inevitabilmente luogo una interazione tra le forze del campo e le cariche e le correnti elettriche presenti nei tessuti dell'organismo. Come conseguenza dell'interazione, all'interno dell'organismo vengono indotte grandezze fisiche (campo elettrico, campo magnetico, densità di corrente) legate alla intensità ed alla frequenza dei campi, alle caratteristiche dell'organismo ed alle modalità di esposizione.

Il risultato della interazione è sempre una «perturbazione» intesa come deviazione dalle condizioni di equilibrio elettrico a livello molecolare; per poter parlare propriamente di effetto biologico, si deve però verificare una variazione (morfologica o funzionale) in strutture di livello superiore (tessuti, organi, sistemi). Un effetto biologico non costituisce necessariamente un danno: perché questo si verifichi, occorre che l'effetto superi la capacità di compensazione di cui dispone l'organismo, che dipende ovviamente anche dalle condizioni ambientali.

Col termine rischio, infine, si vuole in genere indicare la probabilità di subire un danno: in linea di principio, le norme di sicurezza dovrebbero mirare proprio a proteggere gli individui dal rischio di subire un danno a causa dell'esposizione ad un campo elettromagnetico, il che in genere significa fissare dei valori limite di esposizione che siano sufficientemente al di sotto dei livelli che provocano effetti biologici accertati.

Possiamo tentare una classificazione sommaria degli effetti dei campi elettromagnetici sugli individui umani, basata sulla distinzione tra effetti acuti e cronici.

Effetti acuti – immediati ed oggettivi, accertabili sperimentalmente su volontari al di là di ogni possibile dubbio:

- a bassa frequenza: imputabili alla corrente indotta;
- ad alta frequenza: imputabili al riscaldamento dei tessuti.

Effetti sanitari a lungo termine – in cui è difficile accertare il rapporto causa effetto (indagini con metodi epidemiologici):

- con sintomi più o meno *soggettivi* (affaticamento, irritabilità, difficoltà di concentrazione, diminuzione della libido, cefalee, insonnia, impotenza etc);
- con sintomi *oggettivi ed in genere gravissimi* (tumori, malattie degenerative).

Il quadro degli effetti biologici è completato dagli effetti su colture cellulari, tessuti ed organi escissi (*effetti in vitro*) e da quelli su animali da laboratorio sottoposti ad esposizione forzata e controllata (*effetti in vivo*).

Effetti acuti e normative

Schematicamente, l'interazione tra un campo elettromagnetico ed un organismo può essere descritta iniziando dal meccanismo di accoppiamento fisico tra il campo ed il sistema biologico, a seguito del quale determinate grandezze fisiche (campi, cariche, correnti) vengono indotte nei tessuti dell'organismo esposto. Queste grandezze sono direttamente responsabili degli effetti acuti. Per frequenze fino ad almeno alcune centinaia di chilohertz, le più autorevoli normative internazionali di protezione dai campi elettromagnetici riconoscono nella densità di corrente indotta nei tessuti (misurata in A/m²) il principale parametro con cui correlare l'esposizione agli effetti biologici che si manifestano negli individui esposti. Tali effetti consistono in una «interferenza» delle correnti indotte con i meccanismi fisiologici della percezione sensoriale e della attivazione muscolare, per cui l'esposizione, se sufficientemente intensa, si manifesta con sensazioni tattili o visive spurie o disturbate o con contrazioni muscolari involontarie.

A frequenze superiori, il parametro più significativo è il riscaldamento dei tessuti, provocato dalla potenza assorbita per unità di massa, detta SAR e misurata in W/kg.

Nella tabella seguente sono riportate le soglie di densità di corrente e di SAR per i principali effetti

acuti: tra parentesi è indicata la banda di frequenza interessata; i termini «minimo» e «tipico» si riferiscono alla variazione da individuo ad individuo.

Soglia	Frequenza caratteristica	Effetto
1 mA/m ²	10 - 100 Hz	Rumore elettrofisiologico di fondo
10 mA/m ²	20 Hz	Valore minimo per la generazione di fosfeni (allucinazioni visive)
100 mA/m ²	10 - 400 Hz	Valore minimo per la stimolazione dei recettori nervosi periferici (percezioni di formicolii e sensazioni analoghe)
0.5 A/m ²	10 - 100 Hz	Valore tipico per la stimolazione di contrazioni nella muscolatura scheletrica
0.8 A/m ²		Valore minimo per l'eccitazione di extrasistole ventricolari
2 A/m ²		Soglia minima di innesco della fibrillazione ventricolare con tempi di stimolazione di almeno 1 secondo
0.08 W/kg	> 100 kHz	Limite di sicurezza per l'esposizione della popolazione secondo ICNIRP 1998
0.4 W/kg		Limite di sicurezza per le esposizioni professionali secondo ICNIRP 1998
1.2 W/kg		Valore tipico del calore prodotto spontaneamente da un organismo umano in condizioni di riposo (metabolismo basale)
4 W/kg		Valore minimo a cui sono stati evidenziati effetti sperimentali su volontari, in caso di riscaldamento sistemico
100 W/kg		Soglia tipica per danni termici su organi bersaglio (cataratta, sterilità)

I limiti specificati nelle norme di sicurezza non corrispondono direttamente alle soglie degli effetti acuti riportati nella tabella e nel grafico precedenti, ma ne sono inferiori di un margine di sicurezza (pari di solito a 10 dB), necessario a tenere conto di (1) eventuali ipersensibilità individuali; (2) incertezze sui modelli dosimetrici e (3) margini di errore della strumentazione impiegata per l'accertamento dell'esposizione.

I livelli così individuati costituiscono i limiti massimi per le *esposizioni professionali*, che si applicano cioè a coloro che hanno a che fare con campi elettromagnetici nell'ambito della propria attività lavorativa.

Per definire limiti validi per la «popolazione in genere», tutte le più autorevoli normative introducono un ulteriore margine di sicurezza (tipicamente circa 7 dB) per tenere conto di una serie di fattori (età, stato di salute, coscienza dell'esposizione, grado di addestramento, sorveglianza sanitaria) che suggeriscono l'adozione di maggiori cautele per questa categoria.

Poiché le soglie degli effetti acuti sono note in funzione dei valori della densità di corrente indotta e del SAR, queste ultime vengono considerate grandezze primarie dalle norme di sicurezza ed i loro rispettivi valori massimi ammissibili sono considerati *limiti primari*. Essendo però, di fatto, estremamente difficile misurare i valori delle *grandezze primarie* nelle condizioni reali di esposizione (è tutt'al più possibile calcolarli in condizioni standardizzate e semplificate), le norme di sicurezza specificano anche i cosiddetti *limiti derivati*, cioè i valori massimi ammissibili delle intensità dei campi in assenza dell'individuo esposti, grandezze più facilmente accessibili alla misura diretta. I *modelli dosimetrici* costituiscono gli strumenti fisico-matematici che permettono di risalire dalle grandezze derivate a quelle primarie, cioè di stabilire la distribuzione di

densità di corrente indotta o di SAR in un individuo esposto, una volta che siano note le condizioni di esposizione e le caratteristiche del campo elettromagnetico nel teatro espositivo.

Le più autorevoli tra le raccomandazioni costruite sulla base del procedimento illustrato sono quelle periodicamente emanate dall'International Commission for Non Ionising Radiation Protection (ICNIRP). In figura sono riportati i limiti di campo elettrico proposti nell'ultima revisione di queste raccomandazioni (pubblicata sulla rivista *Health Physics*, volume 74, numero 4, aprile 1998) e per confronto quelli previsti da un recente decreto del Ministero dell'ambiente (pubblicato sulla G.U. serie generale, numero 257, 3-11-1998).

Siti internet

www.icnirp.de
www.casasana.ch
www.admin.ch/buwal/
www.maisonsante.ch
www.antenne.ch
www.nrpb.org.uk
www.fgf.de
www.who.int/peh-emf
www.sirnet.it/onde.htm
www.area.fi.cur.it/arf/scuola.htm
www.iroe.fi.cnr.it/pcmni/