

**LE RADIAZIONI ELETTROMAGNETICHE
NON IONIZZANTI
ELEMENTI PER LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO-BENEFICIO
(NON-IONISING ELECTROMAGNETIC RADIATION
ELEMENTS FOR RISK-BENEFIT EVALUATION)**

Sommario: nella presente relazione vengono esaminati gli elementi che sono necessari per la valutazione del rapporto rischio-beneficio. Dopo una prima analisi in merito alle caratteristiche dei dispositivi che utilizzano campi elettromagnetici vengono fornite indicazioni sulle caratteristiche delle sorgenti nonché le modalità per una corretta valutazione del rischio.

Abstract: in the present paper, the Authors consider the elements for a correct evaluation of the risk-benefit ratio, in the field of the non-ionising radiation utilisation. After analysing the characteristics of the apparatus, which utilise the non-ionising electromagnetic fields, the Authors examine the methodology for a correct risk evaluation.

GENERALITA'

In qualunque settore volgiamo la nostra attenzione, sia esso industria, sia medicina e sia ricerca, troviamo dispositivi il cui funzionamento è legato all'uso di energia elettrica per cui ci si pone l'interrogativo se questo uso può comportare un rischio e se lo si può quantizzare al fine di poter effettuare una correlazione fra rischio e beneficio.

In merito occorre richiamare alcuni concetti che si possono riassumere nei seguenti punti:

1. ad ogni dispositivo elettrico (cioè che per funzionare ha bisogno di energia elettrica) è associato sia un campo elettrico che un campo magnetico;

2. ogni dispositivo elettrico può, a sua volta, generare onde elettromagnetiche denominate anche radiazioni ionizzanti o non ionizzanti a seconda della frequenza associata all'onda;

3. le onde generate appartengono ad uno spettro elettromagnetico che comprende tutte le radiazioni elettromagnetiche dalla frequenza di 0 Hz (campi statici) alla frequenza di 10^{22} Hz (corrispondente ai raggi γ di alta energia e quindi alle radiazioni ionizzanti);

4. il confine fra le radiazioni ionizzanti e quelle non ionizzanti in termini di energia è stato posto, per

convenzione, al valore di 12,6 eV, che corrisponde all'energia di ionizzazione dell'elemento più semplice presente in natura, cioè l'atomo di idrogeno;

-per radiazioni non ionizzanti (NIR) si intendono generalmente i campi e le radiazioni elettromagnetiche, che non hanno energia sufficiente a produrre la ionizzazione del mezzo che attraversano o con il quale interagiscono;

5. ad ogni onda elettromagnetica può essere associata

-una lunghezza d'onda λ

-una frequenza ν

-una energia E

in quanto lo spettro elettromagnetico è anche rappresentato dalle due equazioni

$$C = \lambda \nu \gg 300.000 \text{ km/s} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$E = h \nu$$

$$\text{da cui: } \lambda = c / \nu = c h / E$$

$$\nu = c / \lambda = c E / h$$

per cui: maggiore è la frequenza, più corta è la lunghezza d'onda e maggiore è l'energia associata al campo.

6. I campi statici rappresentano l'estremo inferiore dello spettro delle radiazioni elettromagnetiche, ed entrano generalmente nella categoria delle radiazioni non ionizzanti;

7. Un'altra categoria di radiazioni incluse fra le radiazioni non ionizzanti sono le radiazioni LASER, radiazioni comprese fra l'infrarosso, il visibile, e l'ultravioletto;

8. L'intervallo delle basse frequenze include anche i campi connessi alle linee elettriche ad alta tensione (50 Hz), che sono attualmente di rilevante interesse, per il problema della possibile induzione di cancro.

Gli effetti biologici in questo range di frequenza sono da considerarsi di natura non termica.

9. I campi ad alta frequenza hanno invece energia sufficiente a provocare il riscaldamento dei tessuti che attraversano

Questi effetti termici sono presi come della maggior parte degli standard di sicurezza proposti in questo intervallo di frequenza.

Comunque sono in fase di indagine e di studio anche gli effetti non termici che si possono presentare alle alte frequenze.

10. C'è da evidenziare che la suddivisione dello spettro elettromagnetico delle radiazioni non ionizzanti nei termini di campi statici, campi ELF, campi a radiofrequenza (RF) è relativa alla vecchia convenzione internazionale.

Oggi i nuovi standard e le nuove raccomandazioni protezionistiche sono riferiti alla suddivisione dello spettro in due gruppi fondamentali:

- Le basse frequenze che comprendono il range da 0 a 10 kHz secondo alcuni, e da 0 Hz a 300 Hz secondo altri (fra cui la WHO);

- Le alte frequenze che comprendono il range da 10 kHz a 300 GHz (oppure da 300 Hz a 300 GHz).

Pur tuttavia, date le caratteristiche specifiche di interazione dei campi elettromagnetici con la materia vivente, che dipendono da numerosi parametri, fra cui fortemente dalla frequenza della radiazione incidente, si preferisce continuare a riportare la classificazione basata sulla vecchia terminologia.

Studi scientifici hanno dimostrato, anche se non ancora con certezza scientifica ben definita, che per l'esposizione a certi livelli di soglia (che per alcuni effetti sono ancora da determinare) non solo sono rilevabili effetti biologici, ma anche dei potenziali danni

alla salute.

Detti studi però hanno ancora delle indeterminazioni scientifiche e pertanto è necessario continuare le ricerche, al fine di determinare quale sia e se esiste il livello di soglia.

Osservazione: *eccetto che per la luce visibile, i livelli di NIR generalmente incontrati nel nostro ambiente di vita sono impercettibili ai nostri sensi, fino a quando l'intensità dei campi è sotto ai livelli di soglia mentre se si supera una certa soglia, può essere rilevato come calore oppure sotto forma di altra stimolazione fisica o biologica a seconda della frequenza di interazione.*

Le radiazioni non ionizzanti vengono altresì denominate - nell'ambito internazionale - NIR ed includono:

- i campi elettrici e magnetici,

- i campi elettromagnetici e le radiazioni con frequenze comprese nell'intervallo compreso fra 0 e 300 GHz,

- le radiazioni ottiche (infrarosse, visibili ed ultraviolette)

- e per convenzione anche gli ultrasuoni (frequenze maggiori di 16 kHz), anche se la propagazione di questi ultimi è di natura meccanica e non elettromagnetica.

In particolare la fondamentale distinzione fra i campi elettromagnetici e gli ultrasuoni è che questi ultimi per propagarsi hanno bisogno di un mezzo materiale (essendo le onde di natura meccanica), e pertanto non si propagano nel vuoto, come le radiazioni elettromagnetiche.

GRANDEZZE DOSIMETRICHE

L'esposizione a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici variabili nel tempo provoca all'interno dell'organismo esposto la generazione di correnti interne nel corpo ed un assorbimento di energia nei tessuti, a seconda dei meccanismi di accoppiamento e della frequenza.

Poiché è l'entità di queste grandezze a provocare gli effetti biologici e sanitari, le stesse sono state scelte come quantità dosimetriche, e sono usate, come limiti di base negli standard, che stabiliscono i limiti di

esposizione ai campi elettromagnetici variabili.

In particolare, a seconda della frequenza, le quantità dosimetriche utilizzate sono:

1. La densità di corrente (in A/m^2) per le frequenze da 1 Hz a 10 MHz: questa grandezza è definita come la corrente che fluisce attraverso una sezione unitaria di superficie perpendicolare alla sua direzione, in un volume di un conduttore, quale il corpo umano o parte di esso;

2. La corrente per frequenze da 1 Hz a 100 MHz

3. Il SAR (il tasso di assorbimento specifico in W/kg) per frequenze da 100 kHz a 10 GHz: rappresenta l'energia assorbita dall'unità di massa di tessuto nell'unità di tempo;

4. L'assorbimento specifico SA (in J/kg) per campi pulsati di frequenza fra 100 MHz e 10 GHz e rappresenta l'energia assorbita per unità di massa di tessuto biologico,

5. La densità di potenza (in W/m^2) per le frequenze da 10 GHz a 300 GHz.

La quantità di energia assorbita da un organismo esposto a campi elettromagnetici variabili nel tempo dipende da numerosi fattori, relativi sia alle caratteristiche tipiche del campo incidente, sia alle caratteristiche specifiche dell'organismo irradiato, fra cui si sottolineano l'altezza ed il peso dell'individuo, la sua posizione ed orientazione, rispetto al campo incidente, la sua distanza dalla sorgente radiante, etc.

In particolare, una persona di 1,75 m di altezza, se non ha un buon contatto a terra, assorbe la massima energia a radiofrequenza a frequenze prossime a 80 MHz, mentre individui più bassi ed i bambini assorbono la maggior parte dell'energia a RF a frequenze prossime a 100 MHz e superiori.

A causa della loro altezza, alla frequenza di 900 MHz, ad esempio, adulti e bambini assorbono solo il 50% dell'energia a RF incidente.

CAMPI STATICI

I campi elettrici ed i campi magnetici statici (frequenza di 0 Hz) non hanno componenti radiative e sono completamente legati alla causa che li genera:

- il campo elettrico alla presenza di una carica elettrica,

- il campo magnetico alla presenza di una carica elettrica in movimento, cioè ad un flusso di corrente continua.

Le grandezze fisiche che li caratterizzano, anche in termini protezionistici, sono:

a) Il vettore intensità di campo elettrico **E**, il cui modulo è misurato in V/m

b) Il vettore intensità di campo magnetico **H**, il cui modulo è misurato in A/m , e rappresenta la forza con cui il campo agisce su un elemento di corrente, situato in un particolare punto;

c) Il vettore densità di flusso magnetico (o equivalentemente l'induzione magnetica) **B**, il cui modulo è misurato in T (tesla), e descrive il campo magnetico, generato da una corrente presente in un conduttore. Spesso viene utilizzata come unità di misura anche il gauss G, che è collegato al tesla dalla seguente $1 T = 10^4 G$.

Le due quantità vettoriali H e B sono correlate dalla seguente equazione scalare:

$$B = \mu \cdot H$$

dove μ rappresenta la permeabilità magnetica e dipende dalle caratteristiche proprie della materia.

Per la maggior parte dei tessuti biologici, che sono quelli interessati alle ragioni protezionistiche il valore di μ coincide con la permeabilità magnetica del vuoto μ_0 .

Nel settore protezionistico i valori limiti delle grandezze considerate si riferiscono ai campi esterni, ed il prodotto integrato del valore di campo misurato per il tempo di esposizione è considerato come il valore di dose. Ma questo è solo un tentativo, in quanto sono ancora in corso studi per scegliere il concetto di dose più appropriato per questo tipo di agente di rischio.

Comunque anche se sono noti molti meccanismi di interazione dei campi magnetici statici con i tessuti biologici, i valori di densità di flusso richiesti per produrre effetti dannosi sono molti alti.

CAMPI A FREQUENZA ESTREMA-MENTE BASSA

Fanno parte di questa categoria, secondo la WHO, i campi con frequenza > 0 Hz a frequenza $f=300$ Hz. Data la così bassissima frequenza dei campi elettrici e magnetici, la loro componente radiativa si può considerare quasi nulla e sicuramente non ha energia sufficiente a rompere i complessi legami macromolecolari.

La più nota applicazione di questi campi è la generazione, la distribuzione e l'uso dell'elettricità, alla frequenza di 50 Hz (60 Hz nel nord America).

L'energia elettrica, generata nelle centrali, è distribuita alle utenze (domestiche ed industriali) attraverso le linee di distribuzione ad alta tensione.

Stazioni di trasformazione sono utilizzate per abbassare la tensione e per l'utilizzo finale dell'energia stessa.

La lunghezza d'onda collegata alla frequenza di 50 Hz è pari a 6000 km, e poiché a questi valori di frequenza e lunghezza d'onda non è possibile stabilire una relazione matematica fra i due campi (elettrico e magnetico), trasportati dall'onda stessa, che risultano quindi indipendenti fra loro, per caratterizzare l'esposizione ad un campo ELF è necessario misurare entrambi i valori: quello del campo elettrico E e quello del campo magnetico H (o equivalentemente dell'induzione magnetica B)

Un'importante proprietà dei campi a bassa frequenza è che le due componenti di questi campi, quella elettrica e quella magnetica, devono essere considerate separatamente: le intensità relative delle componenti possono variare enormemente, a seconda della tipologia dell'impianto considerato.

In relazione alle sorgenti dei campi a bassa frequenza, si può considerare la seguente semplice regola:

· Un campo elettrico è sempre presente quando c'è una differenza di potenziale, cioè una tensione (ad esempio un qualunque apparecchio elettrico collegato alla rete, anche se spento);

· Un campo magnetico è prodotto dalla presenza di una corrente (ad esempio lo stesso apparecchio, collegato alla rete ed acceso), in quest'ultimo caso il campo magnetico si aggiunge al campo elettrico.

Un'importante differenza fra il campo elettrico

e quello magnetico è rappresentata dal fatto che il campo elettrico può essere facilmente schermato (e quindi ridotto) dalla presenza di oggetti conduttori, come alberi, edifici, veicoli e la pelle dell'uomo. Questo vuol dire che il campo elettrico all'interno di un oggetto può essere di intensità di parecchi ordini di grandezza inferiore rispetto al campo elettrico esterno, in cui lo stesso oggetto è immerso. Il campo magnetico invece può attraversare diversi oggetti senza subire una sensibile riduzione. Questo avviene generalmente con l'organismo umano, che è trasparente al campo magnetico e per questa ragione esso viene considerato molto più pericoloso del campo elettrico.

Il solo meccanismo stabilito di interazione dei campi ELF con gli organismi biologici è quello dell'induzione di corrente. Il valore delle correnti endogene, che sono normalmente presenti all'interno dell'organismo per i propri processi vitali, è generalmente comparabile a quello delle correnti indotte dai campi elettrici e magnetici esterni nel range di queste frequenze per stabilire se gli effetti sanitari sono probabili. I risultati di ricerche, studi e valutazioni dei campi generati dalle linee ad alta tensione hanno dimostrato però che i livelli di questi campi presenti nell'ambiente sono così bassi, che il meccanismo della corrente indotta non è sufficiente a spiegare la possibilità dell'insorgenza dei tumori o di altri effetti dannosi e pertanto sono stati proposti altri possibili meccanismi di interazione, che sono tuttora in fase di studio e i risultati attualmente disponibili non confermano la loro esistenza.

CAMPI A RADIOFREQUENZA (RF) O AD ALTA FREQUENZA

Come già detto, secondo alcuni il limite inferiore dell'intervallo di frequenza di questi campi può essere stabilito in 300 Hz o in 10 kHz. Anche in questo caso l'energia dei campi radiativi è molto bassa per rompere qualsiasi tipo di legame biologico.

Ma questo non vuol dire che non ci sono interazioni biologiche, in quanto essendo l'energia collegata a questi campi via via crescente, in funzione della frequenza, i meccanismi di interazione, sono strettamente connessi con l'energia che il campo porta con sé all'interno dell'organismo e quanta di questa energia viene ceduta all'organismo stesso. Pertanto diversi sono gli effetti che si possono generare per

interazione di questi campi con la materia vivente, a seconda delle caratteristiche sia della radiazione considerata, sia del soggetto esposto, sia del tipo di sorgente, sia del punto in cui avviene l'esposizione, ecc.

Fra gli effetti più noti, quello ad oggi sicuramente accertato e per il quale è stato anche determinato un valore soglia di energia assorbita, almeno nel range da 10 MHz in su è l'effetto termico, cioè l'innalzamento della temperatura del tessuto. È proprio per questo motivo i cosiddetti effetti termici sono stati presi come base di quasi tutti gli standard di sicurezza a tutt'oggi raccomandati. Naturalmente l'aumento di temperatura nella zona biologica interessata può essere più o meno dannoso a seconda del tempo in cui tale innalzamento rimane in loco, se la zona interessata può o non smaltire il calore accumulato e con quale velocità e così via.

Comunque non sono stati esclusi effetti di altra natura, cioè i cosiddetti effetti non termici che sono a tutt'oggi in fase di studio, e che incominciano ad essere considerati.

RADIAZIONE OTTICA

Solo per dovere di completezza si riportano i range di frequenza, corrispondenti a questo tipo di radiazione, in quanto esula da questo incontro la trattazione della radiazione ottica.

Le lunghezze d'onda che definiscono l'intervallo di appartenenza delle radiazioni ottiche vanno da 1 mm a 100 nm e comprendono:

- La radiazione infrarossa da 1 mm (300 GHz) a 760 nm, che a sua volta si suddivide nelle seguenti parti:

- *IRA (vicino infrarosso) da 780 nm a 1400 nm

- *IRB (medio infrarosso) da 1,4 μm a 3 μm

- *IRC (lontano infrarosso) da μm ad 1 mm

- La radiazione visibile (o luce) da 760 nm, a 400 nm;

- La radiazione ultravioletta da 400 nm a 100 nm, che a sua volta si suddivide nelle seguenti parti:

- *UVA (vicino ultravioletto) da 400 nm a 315 nm

- *UVB (ultravioletto medio) da 315 nm a 280 nm

- *UVC (lontano ultravioletto) da 280 nm a 100 nm

Il limite di 100 nm corrisponde a circa 12 eV, cioè all'energia di ionizzazione dell'atomo di idrogeno,

che rappresenta il confine fra le radiazioni ionizzanti e quelle non ionizzanti.

Dal punto di vista del danno diretto, il limite di 200 nm è spesso considerato come limite inferiore dell'intervallo delle lunghezze d'onda che definiscono la radiazione ultravioletta, in quanto gli ultravioletti a lunghezza d'onda inferiore hanno bisogno del vuoto per propagarsi e sono facilmente attenuati dall'aria.

CAMPI MAGNETICI STATICI Sorgenti e corrispondenti livelli di esposizione

L'uomo è naturalmente immerso nel campo magnetico statico naturale, che rappresenta la somma di un campo interno dovuto all'azione della Terra, che è un magnete permanente, e di un campo esterno, generato nell'ambiente da fenomeni quali, ad esempio, l'attività del sole, quella dell'atmosfera, etc. Il campo magnetico interno della Terra è generato dalle correnti elettriche, che fluiscono sullo strato superiore del nucleo terrestre. Il suo valore è variabile in funzione della latitudine e varia da circa 28 A/m all'equatore (valore che corrisponde ad una densità di flusso magnetico pari a 35 μT in un materiale non magnetico come l'aria), dove è massima la componente orizzontale, e circa 56 A/m ai poli geomagnetici (corrispondenti a circa 70 mT in aria), dove è massima la componente verticale. Alla nostra latitudine il valore della densità di flusso del campo magnetico statico è di circa 50 μT .

I campi generati nelle applicazioni umane sono più intensi di quelli naturali di molti ordini di grandezza. Le sorgenti artificiali di campi magnetici statici sono tutti dispositivi costituiti da fili che trasportano corrente. Nelle linee di trasmissione a corrente continua, il campo magnetico è prodotto da cariche in movimento in una linea a due fili. Ad esempio il valore della densità del flusso di campo magnetico statico al livello del terreno, è minore di 10 μT .

Attualmente, la più alta esposizione di individui della popolazione a campi magnetici statici si ha per i pazienti sottoposti ad esami di risonanza magnetica nucleare.

Infatti in questo caso, nelle procedure per la formazione dell'immagine, l'induzione magnetica può variare da 0,15 a 2 T, e l'esposizione del paziente

dura al massimo mezz'ora. Oltre al personale addetto agli apparati di risonanza magnetica nel settore medico, poche altre attività lavorative sono associate ad esposizione a campi magnetici elevati.

MECCANISMI DI INTERAZIONE

Quando un organismo biologico (per esempio un individuo) si trova in un campo elettrico o in un campo magnetico, si determina un'interazione tra le forze dei campi e le cariche e le correnti elettriche presenti nei tessuti dell'organismo che sono in linea di massima dei buoni conduttori.

La conseguenza di questa interazione è sempre e comunque una cessione di energia da parte dei campi incidenti all'organismo biologico, all'interno del quale vengono indotte grandezze fisiche (campo elettrico, campo magnetico, densità di corrente), che dipendono dalla intensità e dalla frequenza del campo incidente, dalle caratteristiche dell'organismo e dalle modalità di esposizione.

L'energia ceduta nell'interazione provoca comunque un effetto, inteso come deviazione dalle condizioni di equilibrio del tessuto, interessato dall'interazione, presenti prima dell'esposizione al campo elettromagnetico.

Quando i normali meccanismi di compensazione, di cui ogni organismo dispone, intervengono e annullano la perturbazione intervenuta, ripristinando le condizioni di equilibrio, l'effetto provocato dall'interazione con i campi esterni viene individuato come effetto indifferente.

Se invece non viene ripristinata la condizione di equilibrio, l'effetto diventa manifesto, e può essere benefico, se procura un vantaggio all'organismo oppure dannoso se gli procura un danno.

Se questo danno persiste anche quando è stata rimossa la causa (cioè l'esposizione al campo elettromagnetico) allora lo stesso sarà un danno permanente.

INTERAZIONI FISICHE (meccanismo di interazione)

Il corpo umano è relativamente trasparente al campo magnetico statico ed al campo magnetico variabile ed un organismo vivente, immerso in un campo magnetico non distorce, in maniera sensibile,

le sue linee di forza.

Questo praticamente vuol dire che mentre l'intensità del campo elettrico statico all'interno dell'organismo è di molti ordini di grandezza inferiore, rispetto a quello esterno, in cui lo stesso organismo è immerso, l'intensità del campo magnetico statico è praticamente la stessa all'interno e all'esterno dell'organismo.

Tali campi interagiscono direttamente con i materiali magneticamente anisotropi e con le cariche in movimento.

A livello di macromolecole e di strutture più complesse, le interazioni fra il campo magnetico statico con i sistemi biologici possono essere caratterizzati come effetti di natura elettrodinamica o magnetomeccanica.

Gli effetti elettrodinamici si originano dall'interazione dei campi magnetici con elettroliti in movimento, a seguito della quale si verifica l'induzione di potenziali elettrici e di correnti:

*I campi statici esercitano forze di Lorentz sui portatori di cariche ioniche in moto (correnti ioniche) e danno luogo a campi elettrici e correnti indotte. Questa interazione è alla base dei potenziali indotti magneticamente nel flusso sanguigno, che sono stati studiati sia con i campi statici, che con i campi variabili a frequenze estremamente basse (ELF).

*I campi magnetici variabili inducono correnti nei tessuti viventi, secondo la legge di induzione di Faraday. Questo meccanismo può agire anche nel caso di campi magnetici statici a causa dei movimenti degli individui in aree in cui questi campi sono presenti.

I fenomeni magnetomeccanici includono effetti di orientazione sulle strutture macromolecolari, immerse in un campo omogeneo, e moti traslazionali in materiali paramagnetici e ferromagnetici, se esposti ad intensi gradienti di campo.

*Il magnetorientamento consiste in una torsione subita dalle molecole diamagnetiche e paramagnetiche, immerse in un campo magnetico statico; questa torsione tende ad orientare le molecole secondo una configurazione che minimizza la loro energia libera nel campo. Questo effetto è stato studiato per complessi di macromolecole diamagnetiche con differenti suscettibilità magnetiche lungo gli assi di simmetria principali. Questa classe di macromolecole comprende le matrici di fotopigmenti nelle membrane discoidi dei bastoncelli della retina e gli eritrociti falciformi. Sono soggetti a rischio, quindi,

rispetto a questo particolare effetto, i soggetti affetti da anemia falciforme.

*La traslazione magnetomeccanica è l'effetto che i campi magnetici statici producono sui materiali paramagnetici e ferromagnetici. A seguito di questa interazione viene sviluppata una forza che dà luogo a moti traslatori. A causa della scarsa quantità di sostanze magnetiche presenti nella maggior parte degli esseri viventi, l'influenza di questo effetto sulle funzioni biologiche può considerarsi trascurabile.

A livello atomico e subatomico, è stato dimostrato che esistono parecchi tipi di interazioni fra il campo magnetico ed i sistemi biologici.

Due di queste interazioni sono:

- la risonanza magnetica dei nuclei nei tessuti viventi;

- gli effetti sugli stati di spin elettronico e la loro rilevanza in certe classi di reazioni chimiche, che coinvolgono stati intermedi degli elettroni radicali: E' probabile però che la normale vita media degli stati elettronici intermedi di rilevanza biologica sia sufficientemente breve da far sì che l'interazione con il campo magnetico eserciti solo una piccola, e probabilmente trascurabile, influenza sul rendimento della reazione chimica.

RISULTATI DI STUDI BIOLOGICI

Per quanto riguarda i campi magnetici, i risultati di ricerche in vivo ed in vitro hanno dimostrato una serie di effetti, che si riportano in sintesi.

Alcuni organismi inferiori ed alcuni mammiferi acquatici, grazie alla presenza di particolari ricettori, sono sensibili ai campi magnetici statici di bassa intensità (dell'ordine di quello terrestre 0,5 G, pari a 0,05 mT). I fenomeni rilevati in questo caso sono stati:

- direzionalità di elasmobranchi di pesci;
- orientazione della direzione di nuoto di batteri magnetotattici;
- movimento cinetico di molluschi;
- percorsi migratori di uccelli;
- i movimenti di danza delle api.

Alcuni studi in vitro hanno poi dimostrato variazioni nell'orientamento magnetico in complessi di macromolecole, compresi i segmenti esterni dei bastoncelli della retina, fibre muscolari, sistemi

fotosintetici, membrane di halobacteria e vari cristalli liquidi e gel sintetici.

Alcune classi di reazioni chimiche, che coinvolgono stati intermedi degli elettroni dei radicali, possono essere influenzati da campi magnetici anche di modesta intensità (dell'ordine fino ai 10 mT).

Le informazioni sperimentali attualmente disponibili su animali da laboratorio ed anche su quelli domestici, dimostrano che l'esposizione a campi magnetici statici ed a campi magnetici ELF generano tre effetti fondamentali, che possono essere considerati come risultati delle interazioni:

1. l'induzione di potenziale elettrico all'interno del sistema circolatorio;

2. l'induzione di magnetofosfene da campi magnetici pulsati e da campi ELF, con un rate di variazione superiore a 1,3 T/s e con intensità di campo da 2 a 10 mT (a seconda della frequenza);

3. l'induzione di alcuni tipi di alterazioni cellulari e di tessuti, prodotte da campi variabili nel tempo, quando la densità della corrente indotta supera i 10 mA/m². Molti di questi fenomeni appaiono essere i risultati delle interazioni con le componenti di membrane cellulari.

Per campi magnetici statici di intensità minore di 2 T esiste tutta una serie di dati sperimentali che dimostra l'assenza di effetti significativi o comunque irreversibili su molti parametri dello sviluppo, del comportamento e fisiologici. Studi su topi non hanno dimostrato alcun effetto dannoso sul feto da esposizioni a campi magnetici fino ad 1 T.

In particolare risulta, anche da studi su mammiferi (inclusi due primati), che per livelli di campo fino a 2T le seguenti nove funzioni biologiche non sembrano significativamente affette da esposizione ai campi magnetici statici:

- la crescita cellulare;
- la riproduzione;
- lo sviluppo pre e post-natale
- l'attività bioelettrica di neuroni isolati;
- il comportamento;
- le funzioni cardiovascolari
- il sistema emopoietico ed il sangue
- le funzioni del sistema immunitario;
- il sistema di regolazione fisiologica ed i ritmi circadiani.

In base a considerazioni teoriche, effetti magnetoidrodinamici potrebbero contrastare il flusso sanguigno, se un organismo è immerso in un intenso campo magnetico e produrre così un aumento della pressione sanguigna. I valori teorici individuati sarebbero di campi magnetici di 5 T, che provocherebbero al massimo una riduzione del flusso di poche unità percentuali, ma questo non è stato osservato né nell'uomo a 1,5 T (valore massimo degli esami NMR), né su fantocci a 4,7 T.

STUDI SULL'UOMO

Alcuni studi su lavoratori addetti alla produzione di magneti permanenti, in Russia, hanno fatto rilevare la presenza di una sintomatologia soggettiva varia e di disturbi funzionali: irritabilità, stanchezza, cefalea, inappetenza, bradicardia, tachicardia, ipotensione, alterazione nell'elettroencefalogramma, prurito, bruciore ed intorpidimento. Comunque la mancanza di qualsiasi analisi statistica o di una valutazione dell'impatto di rischi di natura fisica o chimica sull'ambiente di lavoro riduce notevolmente il valore scientifico di questa indagine e ne rende difficile la valutazione.

Detti studi, però, anche se non conclusivi, suggeriscono che, se si verificano effetti a lungo termine, questi sono molto subdoli, in quanto non sono mai stati evidenziati effetti cumulativi.

È stato riportato che individui esposti ad induzioni magnetiche di 4T potrebbero avvertire effetti associati a spostamenti nel campo, come vertigine, sensazione di nausea, un gusto metallico e magnetofosfene durante rapidi movimenti della testa.

Due indagini epidemiologiche in USA non sono riuscite a rivelare alcun effetto sanitario significativo associabile all'esposizione cronica a campi magnetici statici. Marsch et al. (1982) hanno studiato i dati sanitari di 320 lavoratori di impianti che utilizzavano grandi celle elettrolitiche per separazione chimica, in cui il livello medio del campo magnetico statico nell'ambiente di lavoro era di 7,6 mT ed il massimo era di 14,6 mT. I risultati di detto studio hanno fatto rilevare leggeri cambiamenti (rientranti comunque nell'intervallo di normalità) nel quadro dei globuli bianchi degli individui esposti, rispetto a quelli di controllo (un campione di 186 individui). Nessuno delle variazioni temporanee osservate nella pressione sanguigna o nei parametri ematologici è stata considerata indicativa

di un significativo effetto dannoso associato all'esposizione al campo magnetico.

Un altro studio è stato eseguito sempre negli USA, su 792 lavoratori dei Laboratori Nazionali degli Stati Uniti, esposti professionalmente a campi magnetici statici, per rilevare presenza di malattie. Il gruppo di controllo consisteva in 792 lavoratori non esposti, accoppiati per età, razza e livello socioeconomico. I valori dei campi magnetici cui i lavoratori erano esposti variavano da 0,5 mT, nel caso di esposizione di lunga durata, a 2 T per periodi di esposizioni di qualche ora.

I risultati dello studio non hanno dimostrato alcun significativo aumento o diminuzione nella prevalenza di 19 malattie nel gruppo degli esposti, rispetto a quello di controllo. Non è stata inoltre trovata alcuna differenza nella prevalenza delle malattie in un sottogruppo di 198 individui, che avevano sperimentato esposizione di 0,3 T o più, per periodi di 1 ora o oltre, rispetto al resto della popolazione esposta o ai controlli.

L'osservazione di lavoratori esposti a forti campi magnetici statici nell'industria dell'alluminio ha fatto rilevare in essi un elevato tasso di mortalità per leucemia. Sebbene questo studio epidemiologico riporti un aumento nel rischio di cancro per soggetti direttamente coinvolti nella produzione dell'alluminio, dove i lavoratori sono esposti ad intensi campi magnetici statici, non vi è al momento alcuna chiara evidenza, che indichi i fattori responsabili della carcinogenesi entro questo ambiente di lavoro. [Il procedimento usato per la riduzione dell'alluminio produce catrame, particelle volatili, fluoruri gassosi, ossidi di zolfo ed anidride carbonica. La presenza di particolari idrocarburi, e forse di altri contaminanti ambientali, deve essere tenuta in considerazione in ogni tentativo di collegare l'esposizione al campo magnetico e l'incremento di rischio di cancro nei lavoratori dell'industria dell'alluminio.] In un altro studio successivo (1987) su lavoratori dell'alluminio in Francia, si è trovato che la mortalità per cancro e quella per tutte le cause di morte non differivano significativamente da quelle osservate per la popolazione maschile in genere in Francia.

Nel 1985 un altro studio di coorte è stato condotto su lavoratori di un impianto per cloruri di metalli alcalini, dove le correnti continue di 100 kA, usate per la produzione elettrolitica di cloro, davano luogo ad induzioni magnetiche statiche nelle postazioni di

lavoro, che variavano da 4 a 29 mT. L'incidenza dei tumori osservati in questi lavoratori, nell'arco di un periodo di 25 anni, non differiva significativamente da quella attesa.

I risultati di alcuni studi che riportavano variazioni della temperatura corporea dopo esposizione a campi magnetici fino ad 8T non sono stati confermati da studi successivi.

Sulla base dei dati esistenti, nel 1987, l'Organizzazione Mondiale della Sanità, in cooperazione con la UNEP (United Nations Environment Programme) e con l'IRPA/INIRC concludeva che non c'erano sufficienti risultati sperimentali che convalidassero la presenza di effetti dannosi alla salute umana, dovuti all'esposizione di breve durata, a campi magnetici statici di intensità fino a 2 T, e che non era possibile prendere alcuna decisione sulla sicurezza o sui rischi associati ad esposizioni a campi superiori a 2 T. Calcoli teorici suggerivano che il flusso sanguigno aortico negli esseri umani potrebbe essere ridotto in un campo magnetico statico di intensità superiore a 5 T, ma questi calcoli non sono stati confermati da dati sperimentali.

Attualmente sulla base delle conoscenze del momento sugli effetti biologici dei campi magnetici statici, parecchie aree chiave per future ricerche possono essere identificate per consentire un'agevole comprensione degli effetti delle esposizioni ai campi magnetici. Fra gli altri sono estremamente necessari studi su:

1. le alterazioni funzionali nel sistema nervoso e cardiocircolatorio dovute ad esposizioni a lungo termine
2. la sensibilità delle reazioni enzimatiche, che includono gli stati dei radicali intermedi;
3. la risposta delle cellule, dei tessuti e degli animali stessi ad esposizioni a campi superiori a 2 T, come utilizzati nella spettroscopia clinica ad NMR.

CAMPI MAGNETICI VARIABILI

In accordo con la legge di induzione di Faraday, l'esposizione di ogni corpo conduttore a campi magnetici variabili induce negli stessi una corrente. Il valore della densità di corrente indotta nel corpo conduttore sarà dato da:

$$J = E\sigma = \frac{\pi r^2}{2\pi r} \frac{dB}{dt} \times \sigma = \frac{r}{2} \frac{dB}{dt} \times \sigma$$

dove: J è la densità di corrente in A/m²
E è il potenziale indotto in V/m
r è il raggio della spira di induzione in m
σ è la conduttività del tessuto in S/m
dB/dt è la variazione temporale della densità di flusso magnetico in T/s

Lo stesso fenomeno si verifica in un organismo biologico, essendo questo un corpo conduttore.

Per un campo sinusoidale di frequenza f la suddetta equazione diventa:

$$J = \pi r f \sigma B_0$$

dove B₀ è l'ampiezza della densità del flusso magnetico in T.

In particolare se si considera un valore medio di 0,2 S/m per la conduttività del tessuto, la densità di corrente al perimetro del dorso di un adulto è data approssimativamente da

$$J = 0,1f B_0$$

La massima densità di corrente indotta in un ambiente residenziale è pertanto dell'ordine del μA/m².

Così, ponendo un corpo all'interno di un sistema a Risonanza Magnetica e accendendo e spegnendo rapidamente la corrente all'interno delle bobine di gradiente, si ottengono contemporaneamente due risultati: la generazione dei gradienti di campo magnetico e la generazione di tensione (o corrente) all'interno del corpo umano (o di altro conduttore elettrico) posto nel nucleo del magnete.

Dall'esame della legge di Faraday scaturisce un'importante considerazione a livello biologico

Infatti essendo la densità di corrente proporzionale al raggio della spira, attraverso la quale si propaga il flusso magnetico, ne deriva che campi magnetici variabili di modesta entità indurranno correnti significative a livello macroscopico, ma sostanzialmente

NOTE

piccole correnti a livello cellulare.

Un altro importante fattore da considerare nell'esame degli effetti biologici dei campi magnetici variabili a basse frequenze è la forma d'onda del campo e quindi è importante conoscere il tempo di salita e di decadimento del campo, che determinano il massimo valore del rate di variazione temporale di B (cioè dB/dt), e quindi la massima densità di corrente istantanea, indotta nel tessuto. Questa corrente dipende anche dalla conduttività del tessuto, a sua volta dipendente dalla frequenza e diversa per ogni tipo di tessuto.

L'effetto fondamentale dei campi magnetici variabili è quello di generare correnti elettriche interne; ad esempio un campo magnetico variabile di 3

T/s può indurre all'interno di un organismo densità di correnti di circa $30 \mu\text{A}/\text{m}^2$, lungo il perimetro della testa umana. La densità di corrente indotta è il parametro utilizzato per lo studio degli effetti biologici dei campi magnetici variabili a livello cellulare.

Tale fenomeno è preso alla base dei concetti protezionistici nei confronti dei TVMF (Time-varying magnetic field).

Nella Tabella che segue sono riportati, come esempio, i valori di densità di corrente indotta a 50 Hz in alcune parti del corpo umano, dai campi magnetici, con la densità di flusso indicata, utilizzando un valore omogeneo di conduttività per ogni parte considerata, pari a 0,25 S/m.

In termini di valutazione del rischio sanitario, è

Densità di corrente (mA/m ²)	Densità di flusso magnetico (mT)		
	Tronco (r = 0,3 m)	Testa (r = 0,075 m)	Polsi/caviglie (r = 0,03 m)
10 - 100	0,6 - 6	2,5 - 25	6 - 60
1 - 10	0,06 - 0,6	0,25 - 2,5	0,6 - 6
< 1	< 0,06	< 0,25	< 0,6

difficile correlare la densità di corrente interna con l'intensità del campo magnetico esterno. Comunque assumendo le condizioni del caso peggiore, è possibile calcolare, almeno al primo ordine di grandezza, la densità di flusso magnetico che potrebbe generare livelli rischiosi di densità di corrente nei tessuti.

Le seguenti ipotesi possono essere fatte sugli intervalli di densità di corrente interna e delle correlate densità di flusso magnetico di un campo omogeneo sinusoidale, che possono provocare effetti biologici a seguito di una esposizione del corpo intero:

- Correnti fra 1 e 10 mA/m²

Sono indotte da campi compresi fra 0,5 e 5 mT alla frequenza di 50/60 Hz oppure compresi fra 10 e 100 mT a 3 Hz.

Per tali correnti si sono registrati fenomeni di piccole entità ed assolutamente non pericolosi.

- Correnti fra 10 e 100 mA/m²

Sono indotte da campi compresi fra 5 mT e 50 mT, alla frequenza di 50/60 Hz, oppure da campi superiori a 100 mT fino a 1000 mT a 3 Hz.

Si sono riscontrati effetti ben riconoscibili compresi fenomeni nervosi e visivi.

L'induzione di correnti di questa entità facilita il processo di ricomposizione delle fratture ossee.

- Correnti fra 100 e 1000 mA/m²

Sono indotte da campi superiori a 50 mT fino a 500 mT alla frequenza di 50/60 Hz oppure da campi da 1 a 10 T a 3 Hz.

In questo intervallo si sono osservate stimolazioni dei tessuti e si ipotizza un rischio per la salute.

- Correnti superiori a 1000 mA/m²

Sono prodotte da campi superiori a 500 mT a 50/60 Hz oppure superiori a 10 T a 3 Hz.

Sono state osservate extrasistoli e fibrillazioni ventricolari, cioè sono stati stabiliti danni acuti per la salute. Nella tabella seguente sono sintetizzati i dati sopra riportati.

sono molto più basse di quelle presenti nell'intero organismo, e questo comporta che campi magnetici più intensi sono più tollerabili nelle estremità, che non nel corpo intero.

Parecchi studi di laboratorio sono stati

Densità di corrente (mA/m ²)	Effetti
< 1	Non si ha presenza di effetti riscontrati
1 ÷ 10	Effetti biologici minori segnalati
10 ÷ 100	Presenza di effetti ben stabiliti; effetti sul sistema visivo (magnetofosfeni) e possibili effetti sul sistema nervoso; miglioramento nella saldatura di fratture ossee
100 ÷ 1000	Sono state stabilite variazioni nell'eccitabilità del sistema nervoso centrale; esiste una soglia di stimolazione; possibili rischi per la salute
> 1000	Possibilità di extrasistoli e fibrillazioni ventricolari; rischi per la salute ben definiti.

I campi magnetici variabili presenti nella tomografia a RMN hanno valori compresi fra 0,5 T/s e 50 T/s che sono anche valori in cui si è riscontrata la comparsa dei magnetofosfeni. Tale fenomeno è il più documentato ed accertato dovuto all'interazione dei campi magnetici variabili nel tempo con l'apparato visivo dell'uomo.

Esso può con certezza essere catalogato fra i fenomeni non pericolosi, anche perchè perfettamente reversibile al cessare dell'azione perturbatrice. Non è peraltro noto il danno prodotto sull'apparato visivo da una esposizione ai campi magnetici variabili tale da indurre magnetofosfeni, prolungata nel tempo (alcune ore).

Per forme d'onda non sinusoidale, che hanno impulsi di breve durata, è necessario conoscere la variazione nel tempo della densità di flusso magnetico (cioè il dB/dt). Nell'analisi di alcuni effetti biologici, specialmente la stimolazione di tessuti eccitabili, sono molto più importanti i valori della densità di corrente di picco, che non i valori quadratici medi. Inoltre bisogna considerare in questi casi anche gli effetti dovuti ai campi magnetici non omogenei, in quanto esistono forti gradienti di campo, in prossimità di intense sorgenti di campo magnetico. In questi casi l'induzione presente nelle estremità del corpo umano

condotti su soggetti umani volontari, esposti a campi magnetici variabili, con frequenze nel range delle ELF; ma nessuna di queste indagini ha fatto rilevare effetti clinici contrari o variazioni fisiologiche nei soggetti esposti. Il campo più intenso usato in questi studi è stato di 5 mT a 50 Hz, con un'esposizione continua dei soggetti di 4 ore.

In conclusione si può affermare che l'unico effetto riscontrato e ripetibile dovuto all'esposizione umana ai campi elettromagnetici variabili a bassa frequenza è l'induzione di magnetofosfeni. Detto fenomeno presenta una forte dipendenza dalla frequenza e la soglia di comparsa del fenomeno è fra 2 e 10 mT nel range di frequenza fra 10 e 100 Hz.

Campi molto più intensi sono necessari per stimolare direttamente i tessuti nervosi e muscolari; anche questi effetti sono dipendenti dalla frequenza con una soglia di 50 mT fra 10 e 100 Hz.

Numerose ricerche con campi magnetici ELF a forma sinusoidale, ad onda quadra e pulsati hanno fatto rilevare alterazioni in cellule, tessuti e sistemi animali per densità di corrente superiori a 10 mA/m².

Gli effetti riscontrati includono alterazioni nel metabolismo cellulare e nella crescita cellulare, nell'espressione genica, nelle funzioni endocrine ed immunitarie ed effetti teratogeni e sullo sviluppo.

NOTE

Un notevole numero di studi di laboratorio su esposizione a campi magnetici pulsati ha fatto rilevare presenza di alterazioni nel metabolismo cellulare e nelle proprietà della crescita cellulare.

Comunque sono anche da evidenziare i numerosi effetti benefici di detti campi nelle applicazioni cliniche, come ad esempio la facilitazione delle saldature ossee, a seguito di fratture.(WHO)

E' stato stabilito che l'esposizione ai campi elettrico e magnetico genera all'interno dell'organismo biologico esposto campi elettrici e corrente, che possono agire sul sistema nervoso. Un valore di soglia di 10 mA/m^2 per la densità di corrente indotta, fra 10 Hz ed 1 kHz può essere considerato estremamente conservativo per gli effetti deboli sull'attività del sistema nervoso centrale.

Pochi studi sono stati esperiti su volontari umani ed i risultati di quelli effettuati hanno fatto rilevare che oltre all'evidente effetto della formazione di magnetofosfeni è presente anche una riduzione del ritmo cardiaco, durante e subito dopo l'esposizione; ma la debole entità del fenomeno e la sua transitorietà (scomparsa dell'effetto alla rimozione della causa) non lo fanno ritenere un rischio per la salute.

La maggior parte degli studi biologici suggerisce che l'esposizione a campi elettrici e magnetici a bassa frequenza non ha effetti significativi sullo sviluppo dei mammiferi.

Analogamente non ci sono evidenze significative sulla capacità dei campi a frequenze ELF di influenzare qualunque stadio di tumorale accertato: gli studi su animali in merito sono decisamente negativi. Gli effetti sulla iniziazione di uno stato tumorale sono molto incerti, nel senso che se effetti ci sono, questi potrebbero essere o a livello di promozione o di progressione.

Effetti percettivi dei campi elettrici e magnetici a frequenze basse sono rappresentati dalla vibrazione dei capelli e dei peli del corpo o dalle scariche che si avvertono al contatto con i vestiti.

Le soglie di percezione sono stabilite a 50 Hz fra 10 e 20 kV/m, mentre soltanto il 5 % delle persone riescono a rilevare campi di intensità minore da 3 a 5 kV/m.

Le soglie di percezione e di fastidio per la percezione della corrente di contatto e per le scariche (microshocks) sono relativamente basse.

Questi effetti sono dipendenti dalla frequenza.

Durante un esame a risonanza magnetica, ci sono numerosi gradienti di campi magnetici, che vengono accesi e spenti a velocità molto rapide, a frequenze variabili, per intervalli temporali variabili e a diverse ampiezze di picco dei gradienti.

SORGENTI DI CAMPI MAGNETICI VARIABILI NEL TEMPO

Sorgenti naturali

Le sorgenti esterne di campo magnetico consistono di molte componenti, che differiscono fra loro nelle caratteristiche spettrali e di energia. Le variazioni nei campi magnetici naturali sono in relazione con l'attività solare, particolarmente rispetto alle componenti ELF, che variano in tutto l'arco dell'anno e nel periodo di 27 giorni, con presenza anche di variazioni circadiane. Altre cause di variazione nei campi magnetici naturali sono i temporali, le variazioni atmosferiche e la ionizzazione dell'aria. Ad esempio si verificano circa 2000 temporali contemporaneamente sulla terra ed i lampi colpiscono la superficie della terra da 100 a 200 volte al secondo; la corrente coinvolta può raggiungere valori anche di $2 \times 100000 \text{ A}$, al livello terrestre. I campi elettromagnetici che si generano hanno un range di frequenza molto vasto (da pochi Hz a pochi MHz) e si propagano su lunghe distanze. Le caratteristiche dei campi magnetici naturali possono essere riassunte di seguito:

1. campi con ampiezza da $4 \cdot 10^{-2}$ a $8 \cdot 10^{-2} \text{ A/m}$ a frequenze variabili da 0,002 a 0,1 Hz;
2. pulsazioni geomagnetiche fino a 5 Hz di breve durata: possono durare da qualche minuto a qualche ora;
3. l'ampiezza dei campi diminuisce con l'aumentare della frequenza da $8 \cdot 10^{-6} \text{ A/m}$ per frequenze da 5 a 7 Hz fino a $8 \cdot 10^{-9} \text{ A/m}$ a 3 kHz;
4. alla frequenza di 50 Hz il campo magnetico naturale è di circa 10^{-9} mT .

Le caratteristiche del campo magnetico terrestre nel range delle ELF sono riportate nella seguente tabella.

NATURA ED ORIGINE	VARIAZIONI IN AMPIEZZA (A/M)	FREQUENZA (HZ)	TEMPO
Variazioni regolari nelle 24 ore relative alle correnti ionosferiche, dovute all'influenza solare e lunare	0,024 ÷ 0,040 (influenza solare) 0,004 ÷ 0,005 (influenza lunare) con aumento durante l'estate e all'equatore	-----	-----
Temporali magnetici irregolari, collegati ai <i>flares</i> solari	0,8 ÷ 2,4	Vari range di frequenze	-----
Fluttuazioni naturali (micropulsazioni), dipendenti dalle condizioni della ionosfera e della magnetosfera	$8 \cdot 10^{-5} \div 4 \cdot 10^{-2}$	0,001 ÷ 5	Durante il Giorno per ore

Altre sorgenti naturali di campo magnetico sono presenti nell'organismo umano.

Infatti il normale ritmo polmonare genera dei campi magnetici, così come l'attività del sistema nervoso crea segnali elettrici che interessano i muscoli o le funzioni ghiandolari.

Questi campi sono di un ordine di grandezza che varia da 1 nT nel polmone fino a 20 fT, a livello dell'attività evocata nel cervello.

Sorgenti artificiali

La sorgente artificiale primaria di campi elettromagnetici a frequenza ELF è rappresentata dalla generazione, distribuzione ed utilizzo dell'energia elettrica a frequenza di rete (50/60 Hz).

RISCHI E CRITERI PER LA PROTEZIONE

Generalmente i criteri per valutare il rischio di esposizione a qualsiasi tipo di agente nocivo, sia esso fisico, chimico, biologico, etc. e quindi stabilire le possibili azioni di protezione prevedono:

- lo studio e l'esame dei possibili effetti a livello della salute, come si ricavano da ricerche in vivo, in vitro, da studi epidemiologici, e le possibili relazioni dose-effetto;
- la fissazione dei valori limiti di esposizione o di assorbimento dell'agente di rischio;
- la misura dello stesso nell'ambiente o nell'organismo, a seconda delle caratteristiche dell'agente di rischio e delle sue modalità di interazione con la materia in generale e con gli organismi biologici in particolare;
- confronto dei valori misurati con quelli limite;
- eventuale bonifica dell'ambiente dall'agente valutato, al fine di ridurre al minimo tecnologicamente ottenibile il rischio per il lavoratore, la popolazione e l'ambiente;
- controlli periodici nel tempo, così da verificare la permanenza delle condizioni di sicurezza stabilite o l'eventuale miglioramento delle stesse sulla base del progresso tecnologico e delle conoscenze scientifiche;
- formazione ed informazione del lavoratore sull'agente di rischio, sulle modalità operative dei mezzi di sicurezza predisposti, sulle modalità di lavoro più sicure, sull'azione di protezione effettuata dai sistemi di sicurezza attuati.

Uno standard di sicurezza è un termine generale, che ingloba sia la legislazione in materia, che le linee guida, ed è definito come l'insieme delle specifiche o delle regole per promuovere la sicurezza di un individuo o di un gruppo di individui. Gli standard di sicurezza possono specificare i limiti massimi di esposizione ed altre regole di sicurezza per il personale esposto, o fornire dettagli sulla costruzione e progettazione degli ambienti e delle apparecchiature o sul loro funzionamento.

Per quanto riguarda le radiazioni elettromagnetiche non ionizzanti in generale ed i campi magnetici in particolare, le misure di protezione dei lavoratori, nell'uso scientifico ed industriale di dette sorgenti sono i controlli ingegneristici (quali ad esempio la corretta progettazione delle apparecchiature e dell'ambiente di lavoro, l'uso di idonei dispositivi di interlock) ed amministrativi, programmi di protezione del personale, la sorveglianza medica.

Un'altra generale categoria di misure per il controllo dei rischi è costituito dai dispositivi di protezione individuali, come ad esempio maschere, indumenti protettivi, etc, ma non esistono per i campi magnetici.

In particolare le tecniche per minimizzare l'esposizione ad alte intensità di campo magnetico vicino grossi impianti industriali e di ricerca sono in generale di quattro tipi:

- la distanza ed il tempo (che devono essere rispettivamente la massima possibile dalla sorgente ed il minimo necessario per l'attività). Infatti, poichè l'intensità del campo magnetico diminuisce in funzione della distanza dalla sorgente, aumentare la distanza da questa è una fondamentale misura di protezione;
- la schermatura del campo: l'uso di materiali ferromagnetici restringe l'estensione spaziale delle linee di flusso esterne, provenienti da un dispositivo magnetico. Il rivestimento esterno con un materiale ferromagnetico può anche "catturare" le linee di flusso e ridurre la densità di flusso esterno. Comunque la schermatura di un campo magnetico appresenta una misura protettiva

molto costosa e spesso non facilmente utilizzabile per gli strumenti scientifici;

- il controllo dell'interferenza e della compatibilità elettromagnetica;
- le misure di natura amministrativa, fra cui si ricorda l'uso di idonea segnaletica acustica e visiva, la delimitazione delle zone di rischio, il controllo degli accessi in dette zone, la stesura di norme di comportamento corretto per lo svolgimento dell'attività lavorativa in sicurezza, etc.

Queste ultime tecniche di protezione, nel caso specifico dei campi magnetici, sono sicuramente preferibili alle eventuali possibili schermature, che possono rappresentare un costo eccessivo e nonostante tutto non essere di grande efficacia.

Per quanto riguarda poi le misure di protezione da adottare in caso di interferenza con apparati metallici impiantati, o con apparecchiature elettro-medicali, questo è uno specifico argomento degli aspetti sanitari del campo magnetico.

In ogni caso è necessario sempre e comunque prevedere e stabilire delle regole per prevenire:

- l'interferenza con dispositivi medici elettronici, inclusi i pacemakers cardiaci.
- la detonazione di dispositivi elettro-esplosivi;
- incendi ed esplosioni, che possono essere generati dall'ignizione di materiali infiammabili da parte di scintille generate da campi indotti, da correnti di contatto o da scariche elettriche.

Le stesse misure di protezione che si adottano per i lavoratori, possono essere applicate alla protezione della popolazione, qualora si verifichi un superamento dei limiti stabiliti per il pubblico, o comunque perchè questi siano rispettati.

Una misura generale di protezione è sicuramente quella di stabilire i valori limite di esposizione sia per i lavoratori che per la popolazione.

Generalmente le restrizioni sugli effetti dell'esposizione sono basate sugli effetti sanitari noti, determinati e stabiliti e sono chiamate "limiti di base" o all'inglese "basic restrictions".

A seconda della frequenza, i limiti di base per le radiazioni non ionizzanti sono espressi in termini di:

- **densità di corrente (A/m^2)**, per frequenze da 1 Hz a 10 MHz, per prevenire gli effetti sulle funzioni del sistema nervoso;
- **SAR (W/kg)**, per frequenze fra 100 kHz e 10 GHz, per prevenire lo stress da riscaldamento dell'intero organismo e l'eccessivo riscaldamento locale dei tessuti. Questo è consistente con la risposta tipica dell'organismo all'esposizione in questo range di frequenza, che è rappresentata dall'aumento della temperatura del corpo o di parte di esso, quando immerso in un campo elettromagnetico. In particolare nell'intervallo fra 100 kHz e 10 MHz sono dati sia i limiti di base in termini di densità di corrente che di SAR;
- **densità di potenza (W/m^2)** per frequenze fra 10 e 300 GHz per prevenire l'eccessivo riscaldamento nei tessuti superficiali o prossimi alla superficie del corpo.

Le misure di protezione contro gli effetti acuti richiedono che detti limiti di base non siano superati.

I cosiddetti “**livelli di riferimento**” sono un'altra categoria di limiti e sono relativi alle grandezze fisiche, che effettivamente si misurano. Il rispetto di detti livelli garantisce il non superamento dei limiti di base. Se i livelli di esposizione misurati sono maggiori dei livelli di riferimento non vuol dire che sono necessariamente superati i limiti di base, ed è necessario verificare che questi siano rispettati.

Quando è possibile i valori dei livelli di riferimento sono stati ottenuti dai limiti di base, per mezzo di modelli matematici e di estrapolazione di risultati di indagini di laboratorio a specifiche frequenze.

Essi sono relativi alla situazione di massimo accoppiamento del campo con l'individuo esposto, e forniscono quindi il massimo livello di protezione.

Nella definizione dei limiti per i lavoratori e la popolazione si tiene conto generalmente delle diverse caratteristiche sistemiche fra le due categorie di esposti.

La popolazione esposta per ragioni professionali è costituita da individui adulti, che sono generalmente esposti a situazioni note e controllate,

sono preparati al rischio cui possono essere esposti ed usano adeguate protezioni.

La popolazione nel suo insieme comprende invece individui di tutte le età e con diversi stati di salute e può includere gruppi o individui singoli di particolare sensibilità.

In molti casi poi la popolazione può ignorare di essere esposta ai campi elettromagnetici. Inoltre generalmente non ci si aspetta che i membri della popolazione possano prendere le dovute precauzioni per minimizzare od evitare i rischi, legati all'esposizione.

E' sulla base di queste generali considerazioni, che i limiti stabiliti e/o raccomandati per la popolazione nel suo insieme sono più restrittivi rispetto a quelli stabiliti per i lavoratori.

CRITERI GENERALI PER LA DETERMINAZIONE DEI LIMITI E DEI FATTORI DI SICUREZZA

Poichè non c'è ancora una sufficiente informazione sugli effetti biologici e sanitari dell'esposizione ai campi elettromagnetici della popolazione umana e degli animali da laboratorio, non è possibile stabilire basi rigorose per la determinazione dei fattori di sicurezza, sull'intero range di frequenza e per tutte le modulazioni di frequenza.

Inoltre alcune delle incertezze per stabilire detti fattori di sicurezza derivano anche dalla mancanza di conoscenza in merito all'appropriata dosimetria.

TABELLE DEI LIMITI

I limiti raccomandati dall'ICNIRP per le esposizioni dei lavoratori e della popolazione sono:

Tabella 1 - Limiti di esposizione a campi magnetici statici*

Caratteristiche dell'esposizione	Induzione magnetica
<i>Lavoratori</i>	
Giornata lavorativa (media pesata sul tempo)	200 mT
Valore mai superabile	2 T
Estremità	5 T
<i>Popolazione</i>	
Esposizione continua	40 mT

* Avvertenze:

- a) Le persone che abbiano impiantati stimolatori cardiaci (pacemaker) ed altri dispositivi azionati elettricamente, o che abbiano impianti di materiale ferromagnetico potrebbero non essere adeguatamente protetti dai limiti qui forniti. La maggior parte degli stimolatori cardiaci sono difficilmente influenzati dall'esposizione a campi di 0.5 mT. Le persone che abbiano impiantate protesi ferromagnetiche o apparati azionati elettricamente (diversi dai pacemaker) possono avere problemi con campi superiori a pochi mT.
- b) Quando l'induzione magnetica supera 3 mT, si devono prendere precauzioni per prevenire rischi dovuti a oggetti metallici messi dal campo in rapido movimento.
- c) Orologi metallici, carte di credito, nastri magnetici, dischi per calcolatori, ecc. possono essere danneggiati da esposizioni a 1 mT; ma ciò non è motivo di preoccupazione per la sicurezza degli individui.
- d) L'accesso occasionale di individui della popolazione a particolari locali in cui l'induzione magnetica superi i 40 mT può essere consentito in condizioni opportunamente controllate, purché non vengano superati i limiti prescritti per i lavoratori.

**Tabella 2 - Limiti di base per campi elettrici e magnetici variabili nel tempo
per frequenze fino a 10 GHz.**

Caratteristiche di esposizione	Intervallo di frequenza	Densità di corrente per la testa e il tronco (mA/m ²) (valore efficace)	SAR mediato sul corpo intero (W/kg)	SAR locale (testa e tronco) (W/kg)	SAR locale (arti) (W/kg)
Esposizione Occupazionale	Fino a 1 Hz	40	-	-	-
	1-4 Hz	40/f	-	-	-
	4 Hz- 1 kHz	10	-	-	-
	1-100 kHz	f/100	-	-	-
	100 kHz-10 MHz	f/100	0.4	10	20
	10 MHz-10 GHz	-	0.4	10	20
Esposizione della Popolazione	fino a 1 Hz	8	-	-	-
	1-4 Hz	8/f	-	-	-
	4 Hz- 1 kHz	2	-	-	-
	1-100 kHz	f/500	-	-	-
	100 kHz-10 MHz	f/500	0.08	2	4
	10 MHz-10 GHz	-	0.08	2	4

Note:

1. f è la frequenza in hertz.
2. A causa della disomogeneità elettrica del corpo, le densità di corrente dovrebbero essere mediate su una sezione di 1 cm² perpendicolare alla direzione della corrente.
3. Per frequenze fino a 100 kHz, i valori di picco della densità di corrente possono essere ottenuti moltiplicando il valore efficace per $\sqrt{2}$ (~1.414). Per impulsi di durata t_p la frequenza equivalente da applicare nei limiti di base dovrebbe essere calcolata come $f=1/(2t_p)$.
4. Per frequenze fino a 100 kHz e per campi magnetici pulsati, la densità di corrente massima associata con gli impulsi può essere calcolata dai tempi di salita/discesa e dalla massima derivata temporale dell'induzione magnetica. La densità di corrente indotta può quindi essere confrontata con l'appropriato limite di base.
5. Tutti i valori di SAR devono essere mediati su un qualunque intervallo di 6 minuti.
6. Il SAR locale va mediato su una qualunque massa di 10 g di tessuto contiguo; il SAR massimo ottenuto in tal modo dovrebbe essere il valore usato per la stima dell'esposizione.
7. Per impulsi di durata t_p la frequenza equivalente da applicare nei limiti di base dovrebbe essere calcolata come $f=1/(2t_p)$. Inoltre, per esposizioni pulsate, l'SA non dovrebbe eccedere 10 mJ/kg per i lavoratori e 2 mJ/kg per la popolazione.

NOTE

Tabella 3 - Limiti di base per la densità di potenza per frequenze comprese tra 10 e 300 GHz.

Caratteristiche di esposizione	Densità di potenza (W/m ²)
Esposizione occupazionale	50
Esposizione della popolazione	10

Note:

1. Le densità di potenza devono essere mediate su qualsiasi area esposta di 20 cm² e su qualsiasi intervallo temporale pari a $68/f^{1.05}$ minuti (dove f è in GHz) per compensare la progressiva diminuzione della profondità di penetrazione all'aumentare della frequenza.
2. Le densità di potenza massime spaziali, mediate su 1 cm², non dovrebbero eccedere più di 20 volte i valori in tabella.

NOTE

I corrispondenti livelli di riferimento sono indicati, nelle varie situazioni, nelle Tabelle 4. Si fa presente che queste ultime potrebbero subire piccole variazioni, ancora in discussione.

Tabella 4 - Livelli di riferimento per l'esposizione occupazionale a campi elettrici e magnetici variabili nel tempo (valori efficaci dei campi non perturbati)

Intervallo di frequenza	Intensità del campo elettrico (V/m)	Intensità del campo magnetico (A/m)	Induzione magnetica (μT)	Densità di potenza dell'onda piana equivalente P_{eq} (W/m ²)
Fino a 1 Hz	-	1.63×10^5	2×10^5	-
1-8 Hz	20.000	$1.63 \times 10^5 / f^2$	$2 \times 10^5 / f^2$	-
8-25 Hz	20.000	$2 \times 10^4 / f$	$2.5 \times 10^4 / f$	-
0.025-0.82 kHz	500/f	20/f	25/f	-
0.82-65 kHz	610	24.4	30.7	-
0.065-1 MHz	610	1.6/f	2.0/f	-
1-10 MHz	610/f	1.6/f	2.0/f	-
10-2000 MHz	61	0.16	0.2	10
400-2000 MHz	$3f^{1/2}$	$0.008f^{1/2}$	$0.01f^{1/2}$	f/40
2-300 GHz	137	0.36	0.45	50

Note:

1. f come indicato nella colonna relativa all'intervallo di frequenza.
2. Se i limiti di base sono rispettati e possono essere esclusi effetti avversi indiretti, i valori di intensità di campo possono essere superati.
3. Per frequenze comprese tra 100 kHz e 10 GHz, P_{eq} , E^2 , H^2 , e B^2 devono essere mediati su qualsiasi intervallo di 6 minuti.
4. Per valori di picco fino a 100 kHz si veda la Tabella 2, nota 3.
5. Per valori di picco compresi tra 100 kHz e 10 MHz, sono ancora in preparazione i grafici relativi. Per frequenze superiori a 10 MHz si suggerisce che il valore di picco della densità di potenza dell'onda piana equivalente, mediato sulla durata dell'impulso, non ecceda più di 1000 volte i limiti su P_{eq} , o che l'intensità di campo non ecceda più di 32 volte i livelli di esposizione relativi all'intensità di campo dati in tabella. Per frequenze comprese tra 0.3 e parecchi GHz, effetti di tipo uditivo attraverso espansione termoelastica sono limitati da questa procedura.
6. Per frequenze superiori a 10 GHz, P_{eq} , E^2 , H^2 , e B^2 devono essere mediati su qualsiasi intervallo temporale pari a $68/f^{1.05}$ minuti (f in GHz).
7. Nessun valore del campo elettrico è indicato per frequenze <1 Hz, trattandosi praticamente di campi elettrici statici. Scosse elettriche da sorgenti di bassa impedenza sono prevenute da procedure di sicurezza elettrica stabilite per tali apparati.

NOTE

Tabella 5 - Livelli di riferimento per l'esposizione della popolazione a campi elettrici e magnetici variabili nel tempo (valori efficaci dei campi non perturbati).

Intervallo di frequenza	Intensità del campo elettrico (V/m)	Intensità del campo magnetico (A/m)	Induzione magnetica (μT)	Densità di potenza dell'onda piana equivalente Peq (W/m ²)
fino a 1 Hz	-	3.2×10^4	4×10^4	-
1-8 Hz	10.000	$3.2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^4/f^2$	-
8-25 Hz	10.000	4000/f	5000/f	-
0.025-0.8 kHz	250/f	4/f	5/f	-
0.8-3 kHz	250/f	5	6.25	-
3-150 kHz	87	5	6.25	-
0.15-1 MHz	87	0.73/f	0.92/f	-
1-10 MHz	$87/f^{1/2}$	0.73/f	0.92/f	-
10-400 MHz	28	0.073	0.092	2
400-2000 MHz	$1.375f^{1/2}$	$0.0037f^{1/2}$	$0.0046f^{1/2}$	f/200
2-300 GHz	61	0.16	0.20	10

Note:

1. f come indicato nella colonna relativa all'intervallo di frequenza.
2. Per frequenze comprese tra 100 kHz e 10 GHz, Peq, E², H², e B² devono essere mediati su qualsiasi intervallo di 6 minuti.
3. Per valori di picco fino a 100 kHz si veda la Tabella 2, nota 3.
4. Per valori di picco compresi tra 100 kHz e 10 MHz, sono ancora in preparazione i grafici relativi.
5. Per frequenze superiori a 10 MHz si suggerisce che il valore di picco della densità di potenza dell'onda piana equivalente, mediato sulla durata dell'impulso, non ecceda più di 1000 volte i limiti su Peq, o che l'intensità di campo non ecceda più di 32 volte i livelli di esposizione relativi all'intensità di campo dati in tabella. Per frequenze comprese tra 0.3 e vari GHz, effetti di tipo uditivo attraverso espansione termoelastica sono limitati da questa procedura.
6. Per frequenze superiori a 10 GHz, Peq, E², H² e B² devono essere mediati su qualsiasi intervallo temporale pari a $68/f^{1.05}$ minuti (f in GHz).
7. Nessun valore del campo elettrico è indicato per frequenze <1Hz, trattandosi praticamente di campi elettrici statici. Per la maggior parte delle persone la fastidiosa percezione di cariche elettriche superficiali non si verifica ad intensità del campo inferiori a 25 kV/m. Scintille in grado di provocare stress o fastidio dovrebbero essere evitate.

NOTE

Tabella 6 - Livelli di riferimento per correnti di contatto variabili nel tempo da oggetti conduttori.

Caratteristiche di esposizione	Intervallo di frequenza	Corrente di contatto massima (mA)
Esposizione occupazionale	fino a 2.5 kHz	1.0
	2.5-100 kHz	0.4f
	100 kHz-110 MHz	40
Esposizione della popolazione	fino a 2.5 kHz	0.5
	2.5-100 kHz	0.2f
	100 kHz-110 MHz	20

Note: f è la frequenza in kHz.

Tabella 7 - Livelli di riferimento per la corrente indotta in un qualunque arto a frequenze comprese tra 10 e 110 MHz.

Caratteristiche di esposizione	Corrente (mA)
Esposizione occupazionale	100
Esposizione della popolazione	45

Note:

1. Il livello di riferimento per la popolazione è uguale al livello di riferimento occupazionale diviso per $\sqrt{5}$.
2. Per conformità con il limite di base sul SAR locale, la radice quadrata del valore mediato sul tempo del quadrato della corrente indotta su un qualsiasi intervallo di 6 minuti forma la base dei livelli di riferimento.

NOTE