

ISTITUTO NAZIONALE DI FISICA NUCLEARE
Laboratori Nazionali di Frascati

LNF-87/10(P)
24 Marzo 1987

A. Righi:
RISCHIO DA CAMPI MAGNETICI STATICI: I LIMITI DI ESPOSIZIONE

Presentato al XIV Congresso Nazionale Ambiente e Risorse,
Università di Padova, (Bressanone, 8-11 Settembre 1986)

RISCHIO DA CAMPI MAGNETICI STATICI: I LIMITI DI ESPOSIZIONE

E. Righi

I.N.F.N. - Frascati

INTRODUZIONE

Limiti di esposizione per campi magnetici statici sono stati stabiliti per la prima volta nel 1967 nell'Unione Sovietica, sotto forma di linee guida (raccomandazioni non ufficiali), in seguito all'osservazione di eventi patologici insorti in lavoratori addetti alla fabbricazione di magneti permanenti⁽³⁴⁾.

Tali limiti, in parte modificati, hanno assunto forza vincolante con la promulgazione nel 1978 di una apposita legge. Questo provvedimento legislativo rappresenta a tutt'oggi l'unico esempio di adempimento obbligatorio nello specifico settore protezionistico⁽³²⁾ (nel 1985 il Ministero della Sanità sovietico ha promulgato una legge anche per i "livelli massimi ammissibili" relativi ai campi magnetici con frequenza di 50 Hz)⁽³³⁾.

Nel contempo, lo sviluppo delle macchine acceleratrici (fisica delle alte energie), la ricerca nel campo della fusione nucleare controllata, la sperimentazione sui sistemi di levitazione magnetica nei trasporti e, più recentemente, l'impiego in medicina della risonanza magnetica nucleare, hanno posto con maggiore insistenza la necessità di poter disporre di standard protezionistici.

Negli Stati Uniti vengono stabilite linee guida nel 1970 dallo Stanford Linear Accelerator Centre (SLAC)⁽²⁸⁾ e nel 1979 dal Department of Energy (DOE)⁽²⁾ e dal Fermi National Accelerator Laboratory (FNAL)⁽¹²⁾.

Anche il Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) ha adottato nel 1985 limiti di esposizione per campi magnetici statici, utilizzando

criteri innovativi rispetto alle scelte precedenti(19).

Nell'ambito delle applicazioni diagnostiche della risonanza magnetica nucleare, sono state elaborate normative per la protezione del paziente dal Bureau of Radiological Health, National Center for Devices and Radiological Health, U.S. Dept. of Health and Human Service (BRH, NCDRH, DHHS, 1982)(10), dal Federal Health Office (FHO, FRG, 1984)(6) e dal National Radiological Protection Board (NRPB, 1984) U.K.(22).

Quest'ultima istituzione ha previsto limiti di esposizione anche per gli operatori sanitari.

Per quanto riguarda le caratteristiche del rischio connesso all'esposizione professionale ai campi magnetici statici, si ricorda che presso le macchine acceleratrici sono operanti magneti per la guida e la deflessione dei fasci e magneti per la rivelazione delle particelle elementari (camere a bolle, spettrometri, calorimetri adronici)(26). L'esposizione ai campi magnetici statici può avvenire nelle seguenti condizioni:

1. messa a punto e taratura del magnete;
2. esercizio della macchina con "magnete in funzione";
3. accesso all'interno di magneti in funzione (in genere si tende, per esigenze sperimentali, a non "spegnere" il magnete, in quanto ciò risulterebbe scomodo a causa del fenomeno dell'isteresi, cioè della cosiddetta "inerzia magnetica");
4. attrazione magnetica di oggetti metallici.

Nell'ambito della ricerca sulla fusione nucleare controllata, presso apparati del tipo Tokamak è in funzione un campo magnetico toroidale, integrato da un campo magnetico poloidale, capace di confinare quale "scatola magnetica" il plasma, cioè gas ionizzato portato ad altissime temperature (milioni di gradi), temperature alle quali nessun contenimento materiale può essere ovviamente adottato.

Negli altri settori, campi magnetici statici sono utilizzati o sono comunque presenti nella trasmissione di energia in corrente continua (trazione elettrica), nella fabbricazione ed uso industriale di elettromagneti, nelle industrie elettrochimiche.

Per quanto riguarda la risonanza magnetica nucleare, gli apparati in esercizio nel mondo erano circa 150 nel 1984 e circa 200 nel 1985 con una previsione di sviluppo di circa 1500 installazioni nei prossimi 3-5 anni(7, 23).

Gli apparati attualmente in funzione in Italia sono circa 10.

Nella risonanza magnetica nucleare viene a realizzarsi una esposizione combinata al campo magnetico statico, al campo magnetico dinamico ed alla radiofrequenza(23).

CENNI SUGLI STANDARD DI SICUREZZA

I limiti di esposizione fanno parte degli standard di sicurezza, cioè di quell'insieme di regole e di valori di riferimento atti a promuovere e ad assicurare la sicurezza di un individuo o di un gruppo di persone (25). La scelta di tali limiti è la risultante del bilancio rischi/benefici.

In analogia a quanto avviene in altri ambiti protezionistici (radio-protezione), l'analisi del rischio deve prevedere la possibilità di insorgenza sia di effetti graduati, che di effetti senza soglia^(15, 16).

In particolare, gli effetti graduati (non stocastici, non casuali, deterministici) presentano le seguenti caratteristiche:

- compaiono soltanto al superamento di una soglia (peculiare di ogni effetto);
- il superamento della soglia comporta, sia pure nell'ambito della variabilità individuale, l'insorgenza dell'effetto in tutti gli esposti, talché è possibile la previsione empirica dell'effetto stesso in ogni singolo individuo;
- il periodo di latenza è solitamente breve;
- generalmente la gravità dell'effetto aumenta con l'aumentare dell'entità di esposizione (va precisato al riguardo che, a differenza di quanto avviene per altre noxae, dai dati sperimentali sembra risultare che al di sopra della soglia l'effetto non aumenterebbe proporzionalmente all'intensità del campo magnetico)⁽³⁾.

L'identificazione della soglia avviene comunemente sulla base dei dati relativi alle osservazioni sull'uomo, sugli animali e sui sistemi biologici alternativi, e deve comportare peraltro un'attenta valutazione dell'estrapolazione all'uomo dei dati sperimentali.

L'applicazione di un opportuno fattore di sicurezza alla soglia pre-scelta consentirà di assicurare la prevenzione degli effetti graduati.

Per contro, i cosiddetti effetti senza soglia (stocastici, casuali, probabilistici, statistici, differiti) sono caratterizzati dai seguenti aspetti:

- soltanto la probabilità di accadimento, e non la gravità, è funzione dell'entità di esposizione ed inoltre è cautelativamente esclusa l'esistenza di una soglia;
- gli effetti di questo tipo sono condizionati all'accumulo dei fenomeni indotti da bassi livelli di esposizione (mutagenesi, cancerogenesi);
- si manifestano tardivamente (dopo anni, talora decenni);
- sono a carattere probabilistico ed hanno una frequenza di comparsa piccola o piccolissima sull'insieme delle persone esposte;

- la loro dimostrazione può avvenire attraverso il confronto statistico tra gruppi esposti e gruppi di controllo;
- l'attribuzione dell'effetto nel singolo caso può essere stimata su base probabilistica.

Per i cosiddetti effetti senza soglia non è pertanto attuabile una prevenzione vera e propria, mentre è possibile realizzare interventi protezionistici atti a limitarne la frequenza.

In radioprotezione è stato formulato il principio ALARA ("as low as readily achievable"), secondo il quale l'entità dell'esposizione, nel range dei limiti di dose, deve essere tenuta tanto bassa quanto è concretamente ottenibile(14).

E' evidente il carattere generale di questo principio e l'importanza della sua applicazione, per scopi primari e derivati, anche negli altri ambiti protezionistici.

Richiamati sinteticamente alcuni aspetti fondamentali che regolano la formulazione degli standard di sicurezza, va sottolineato che la letteratura scientifica su cui sono state effettuate le scelte dei limiti di esposizione ai campi magnetici statici da parte delle varie Istituzioni, manca spesso di informazioni indispensabili, o comunque utili, per una completa valutazione dei dati riportati.

Le carenze o le imprecisioni più frequentemente rilevate al riguardo sono le seguenti:

- le osservazioni si riferiscono in genere ad un numero limitato di individui e sono state effettuate per tempi non lunghi;
- la fenomenologia considerata presenta spesso una notevole componente soggettiva e la sua validazione è stata affidata in qualche caso al principio della "bona fide";
- non sempre sono riportati la densità di flusso o l'intensità del campo, il gradiente, il tempo di esposizione, la posizione del soggetto nel campo, l'eventuale esistenza dei controlli;
- le unità di misura sono utilizzate indifferentemente (Tab. I).

A tale proposito si ricorderà che

$$B = \mu H$$

dove

B = densità di flusso o induzione magnetica espressa in G o in T
(1T = 10⁴ G)

μ = permeabilità magnetica del mezzo (è uguale a 1 nel vuoto e praticamente anche nell'aria; è spesso variabile nell'ambito dello stesso campione; non è sempre nota)

H = intensità del campo espressa in Oe.

TAB. I - Unità di misura del campo magnetico

| Termini | Sistema cgs | Sistema SI | Equivalenze |
|-----------------------|--------------|---------------------------|-------------------|
| Densità di flusso B | gauss (G) | tesla (T) | 1 T = 10^4 G |
| Intensità del campo H | oersted (Oe) | ampere-spira/metro (As/m) | 1 Oe = 79,85 As/m |

Nella Tab. II sono riportati sinteticamente i dati più significativi della letteratura sugli effetti sull'uomo dei campi magnetici statici, ordinati progressivamente in funzione dell'entità del campo (normalizzato in T)(24).

Alcune recenti ricerche a carattere epidemiologico condotte su lavoratori e popolazioni, suggeriscono una associazione tra insorgenza di tumori (in particolare di leucemia mieloide acuta) e l'esposizione prolungata a campi magnetici variabili(13, 24, 25).

Analoghe considerazioni sono state effettuate nei riguardi di possibili effetti genetici(13).

Va precisato al riguardo che le indagini epidemiologiche sinora condotte appaiono discutibili o per la scarsa rappresentatività del campione considerato, o per l'assenza di un adeguato rilevamento dell'entità dell'esposizione, o per la mancanza di un adatto gruppo di controllo(13).

Si aggiunga inoltre che i lavori pubblicati fino ad oggi mostrano nel complesso un notevole grado di contraddittorietà(25).

Per contro, al momento attuale non esistono dati epidemiologici che indichino in qualche modo l'esistenza di problemi analoghi per i campi magnetici statici(19, 25).

Sono comunque disponibili ipotesi e dati sperimentali che richiedono un'opportuna considerazione. Tra questi merita citare i seguenti:

- nella classificazione degli effetti biomagnetici proposta da J.M. Barnothy(3) viene ipotizzata l'esistenza di un "genetic code group", nel quale vanno ricondotti gli effetti causati probabilmente da meccanismi perturbativi del tunneling dei protoni a livello dei ponti di idrogeno che legano le basi dei nucleotidi del DNA durante la duplicazione del DNA stesso, con possibili errori nel codice genetico.
- le molecole del DNA sono potenzialmente sensibili ai campi magnetici (notevole anisotropia magnetica).
- l'effetto di polarizzazione del DNA in tutte le parti del corpo può non avere un trascurabile significato biologico (è stato osservato

TAB. II - Effetti biologici sull'uomo del campo magnetico statico

| <u>Campo (T)</u> | <u>Tempo di esposizione</u> | <u>Effetti</u> | <u>Rif. bibliografici</u> |
|------------------|-----------------------------|---|----------------------------|
| Non indicato | Non indicato (*) | Disturbi soggettivi, bradicardia, tachicardia, prurito, senso di scottatura, ecc. | Beischer e Reno (1971) |
| 0.25 | Non indicato | Non disturbi soggettivi, non modificazioni della frequenza del polso o della respirazione | Peterson e Kennelly (1892) |
| 0.5 | 3 giorni/anno-uomo | Assenza di effetti | Beischer (1962) |
| 1.5 | Non indicato | Sensazione gustativa se il soggetto muoveva la testa | Beischer (1962) |
| 2.0 | 15 min | Sensazione dolorosa in denti con otturazioni se il soggetto muoveva la testa | Beischer (1962) |
| 2.5 | Non indicato | Assenza di effetti a carico della testa posta tra i magneti | Drinker e Thompson (1921) |
| 10 | Breve | Freddo intenso, dolori ossei e formicolio a carico delle mani. | Beischer e Reno (1971) |

(*) Lavoratori sovietici addetti alla fabbricazione di magneti permanenti

(da Ketchen et al (17), modificato da Repacholi, (24))

sperimentalmente che a livello di 0,65 T molecole di DNA sospese in un liquido si allineano perpendicolarmente al campo magnetico^(20, 23).

- cellule di ovaio di hamster cinese (CHO) sottoposte per 4 ore a campi di 0,35 T da NMR non hanno mostrato la comparsa di aberrazioni cromosomiche e di sister chromatid exchanges (SCE)⁽³⁵⁾.
- linfociti umani sottoposti a campi di 0,5-1 T da NMR non hanno presentato lesioni grossolane e comparsa di SCE⁽⁹⁾.
- il test di mutagenesi HGPRT è risultato negativo dopo 24 ore di esposizione a campi superiori a quelli della "NMR imaging"⁽²⁷⁾.

In un precedente studio⁽²⁶⁾ sono state poste, tra l'altro, analogie tra le grandezze che definiscono il campo magnetico statico ed i parame-

etri dosimetrici della radioprotezione, quale contributo ad una prospettiva unitaria della protezione contro gli agenti lesivi di natura fisica.

I parametri così derivati, e opportunamente aggiornati, possono essere riassunti come segue:

$$B = \mu_0 H$$

DOSE MAGNETICA DI ESPOSIZIONE

dove μ_0 = permeabilità nel vuoto
ed in aria.

$$B = \mu_{\text{body}} H$$

DOSE MAGNETICA ASSORBITA

fattore di permeabilità (μ)

fattore temporale

$$B = \mu H$$

fattore spaziale

fattore gradiente

fattore di accumulo

EQUIVALENTE DI DOSE MAGNETICA

Mutagenesi (?)

Cancerogenesi (?)

EQUIVALENTE DI DOSE MAGNETICA

EFFICACE

Questa impostazione, al momento di esclusivo valore speculativo, può rappresentare un momento di riflessione nella valutazione degli effetti magnetoindotti, come anche nella elaborazione di linee protezionistiche, qualora si vogliano evitare incompletezze o inutili divaricazioni.

IL "RATIONALE" DEI LIMITI DI ESPOSIZIONE

I limiti di esposizione adottati dalle varie Istituzioni, sia come linee guida che come norma di legge, sono state giustificate da una serie di motivazioni di ordine sperimentale e clinico ("rationale"), peraltro non sempre coincidenti tra di loro.

Altre Istituzioni hanno acquisito tali parametri motivando a loro volta le scelte effettuate.

Nella Tab. III e nella Tab. IV sono indicati i limiti di esposizione a campi magnetici statici per l'esposizione professionale, opportunamente distinti in funzione del fattore temporale e spaziale.

Il "rationale" che è alla base di questi limiti può essere così riassunto.

a) URSS rationale

Le linee guida adottate inizialmente nell'Unione Sovietica (1967) prendono avvio per merito di Vyalov dall'osservazione di patologie insorte in lavoratori (circa 1500) addetti alla fabbricazione di magneti permanenti.

La sintomatologia, mediata da più pubblicazioni(5, 21, 34), era rappresentata da: irritabilità, stancabilità, cefalea, inappetenza, bradicardia, tachicardia, ipotensione o ipertensione arteriosa, alterazioni EEG, diminuzione dei globuli bianchi, malattie cardiovascolari organiche, stenocardia, malattie endocrine, disturbi organici del sistema nervoso centrale e periferico. A carico delle mani venivano rilevate sensazioni di prurito, di scottatura, di intorpidimento associate ad aumento della temperatura cutanea, edema sottocutaneo, iperidrosi e desquamazione in sede palmare, aspetto variegato della cute.

I livelli di esposizione riscontrati erano superiori a 0,10-0,15 T con valori di gradiente maggiori di 0,05-0,2 T/m.

In seguito all'introduzione di linee guida, i lavoratori venivano anche dotati di pinze di legno e di altri mezzi remotizzati per operare al di sotto dei limiti raccomandati.

Merita anche precisare che i lavoratori sovietici erano esposti contemporaneamente, oltre che ai campi magnetici, a polveri metalliche, a emulsioni varie, ad agenti sgrassanti e ad alte temperature(23).

Nel 1977 il Ministro della Sanità dell'Unione Sovietica promulgava limiti di esposizione al campo magnetico statico come norma di legge, con pubblicazione dell'atto legislativo nel 1978(32).

In questa norma il limite è ridotto rispetto ai precedenti e viene riferito soltanto al corpo intero, ed inoltre non si tiene più conto del gradiente (Tab. III).

TAB. III - Limiti di esposizione professionale per campi magnetici statici

| Fonti | Campo o gradiente di campo | Periodo di esposizione | Sede corporea | Note |
|---|-----------------------------------|--|---|--|
| Vyalov (1967) URSS | 0.03 T 0.07 T | 8 ore " | corpo intero mani | raccomandazioni non ufficiali per esposizione professionale |
| | 0.05-0.2 T/m 0.1-0.2 T/m | " " | corpo intero mani | |
| URSS (1978) | 0.01 T | " | corpo intero | legge promulgata dal Ministro della Sanità |
| Stanford Linear Accelerator Center (1970) | 0.02 T 0.2 T 0.2 T 2.0 T | prolungato (ore) breve (minuti) prolungato (ore) breve (minuti) | corpo intero " braccia, mani " | |
| U.S. Dept of Energy (DOE) (1979) (Tenforde, 1983) | 0.01 T 0.1 T 0.5 T | 8 ore 1 ora o meno 10 min o meno | corpo intero " " | raccomandato ai "contrattori" del DOE |
| | 0.1 T 1.0 T 2.0 T | 8 ore 1 ora o meno 10 min o meno | braccia, mani " " | |
| Fermi National Accelerator Laboratory (1979) | 1 T 0.5-1 T 0.1-0.5 T | non specificato fino a 1 ora esposizione più breve possibile | corpo intero " " | esposizioni superiori a 1 T soltanto se autorizzate dal Radiation Safety Officer |
| Lawrance Livermore National Laboratory (1985) | - | - | - | Vedi Tab. IV |

(da Repacholi (25), modificata)

b) SLAC rationale

Presso lo Stanford Linear Accelerator Center (SLAC), California, i limiti di esposizione per campi magnetici statici sono stati stabiliti nel 1970 sulla base della letteratura fino allora disponibile, ed in particolare sulle osservazioni effettuate da Beischer^(4, 29) (Tab. III).

Questo studioso, in occasione di una indagine effettuata negli Stati Uniti presso Laboratori di Fisica nucleare su casi di esposizione accidentale a campi magnetici fino a 2 T, aveva rilevato che, al di là di modeste sensazioni gustative e di odontalgie in portatori di otturazioni metalliche, non si erano manifestati altri effetti, durante o dopo l'esposizione, ascrivibili a campo magnetico.

Beischer stabiliva che 2 T possono essere tollerati dall'uomo in esposizioni per brevi periodi al corpo intero o a parti di esso, ritenendo inoltre non esserci effetti da esposizioni cumulative a campi di 0.5 T per un totale di 3 giorni per anno per uomo.

Questa indagine, effettuata sostanzialmente secondo il principio della "bona fide", ha portato a concludere dunque per l'assenza di controindicazioni all'esposizione dell'uomo a campi magnetici inferiori a 2 T per brevi periodi di tempo (minuti).

Va anche rilevato che il limite adottato dallo SLAC per l'esposizione prolungata al corpo intero (0,02 T) è inferiore a quello raccomandato in URSS nel 1967 (0,03 T), ma è superiore al corrispondente limite di legge stabilito nel 1978 sempre nell'Unione Sovietica (0,01 T). Per contro, nell'esposizione prolungata delle mani il limite dello SLAC (0,2 T) è superiore al limite raccomandato nel 1967 nell'URSS (0,07 T).

L'orientamento più cautelativo adottato nelle raccomandazioni sovietiche può essere ricondotto alla presenza di lesioni alle mani osservate da Vyalov nei lavoratori addetti alla fabbricazione dei magneti permanenti.

Il limite di 2 T alle mani per esposizioni brevi consente di effettuare il cambio dei film nelle camere a bolle.

c) DOE rationale

L'U.S. Department of Energy (DOE) ha istituito un comitato ad hoc, l'Alpen Committee, con i seguenti compiti⁽²⁾:

- rassegna delle tecnologie che utilizzano i campi magnetici;
- rassegna della letteratura scientifica sugli effetti biologici dei campi magnetici;
- formulazione di linee guida per campi magnetici statici, gradienti e campi magnetici alternati.

L'Alpen Committee formulava le sue raccomandazioni nel 1979, indicando i limiti di esposizione riportati nella Tab. III (per l'esposizione prolungata al corpo intero il limite è inferiore di un fattore 2 rispetto al limite SLAC).

Inoltre, veniva precisato che non erano necessarie linee guida per i campi magnetici alternati poiché al momento non erano sviluppate e non erano in via di sviluppo tecnologie che comportassero in maniera significativa l'impiego di tali campi.

L'Alpen Committee non riferiva peraltro le motivazioni che avevano determinato la scelta delle linee guida per i campi magnetici statici.

Tuttavia, la scelta del limite di 0,01 T per esposizione continua al corpo intero risulta sia stata effettuata in funzione della soglia di induzione dei magnetofosfeni, mentre quella delle altre linee guida per il corpo intero è stata decisa in relazione ai potenziali indotti nel S.N.C.(30).

d) FERMI NAL rationale

I limiti di esposizione adottati presso il Fermi National Accelerator Laboratory, Illinois (Tab. III) presentano le seguenti caratteristiche (12):

- non viene specificato il tempo di esposizione per i livelli di 1 T al corpo intero;
- per livelli superiori a 1 T è richiesta l'autorizzazione del Radiation Safety Officer;
- è consentita una esposizione superiore a 1 T per soli 15 minuti per il cambio del film nelle camere a bolle;
- per livelli da 0,5 a 1 T i tempi di esposizione non devono essere superiori ad 1 ora.

e) LLNL rationale

I limiti adottati nel 1985 presso il Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), California, (Tab. IV) sono stati elaborati sulla base di presupposti innovativi rispetto ai limiti precedenti, considerando come "organo bersaglio" il sistema cardiovascolare ed utilizzando criteri di esposizione propri dell'igiene industriale, quali "time-weighted average exposure" (TWA), "short term or ceiling exposure"(19).

Inoltre, nell'analisi del rischio, il riferimento fondamentale è rappresentato dal voltaggio magnetoidrodinamico (MHD), cioè dal voltaggio creato dal movimento di un conduttore (sangue) in un campo magnetico statico.

Come è noto, il flusso del sangue perpendicolare al campo magnetico statico crea un potenziale attraverso il diametro del vaso sanguigno proporzionale alla densità del flusso magnetico ed alla velocità del sangue stesso (principio della flussometria elettromagnetica).

Il voltaggio magnetoidrodinamico (Ψ) generato da fluidi allo stato ionico che attraversano un campo magnetico statico è espresso dalla funzione matematica

$$\Psi = B \cdot v \cdot d \cdot \sin\theta$$

dove

B = densità di flusso magnetico (T)

v = velocità del sangue (m/s)

d = diametro del vaso sanguigno (m)

θ = angolo del flusso ematico in rapporto al flusso magnetico

Considerando nell'uomo una velocità di picco del sangue nell'aorta di 0,63 m/s ed un diametro aortico di 0,025 m, e assumendo $\theta = 90^\circ$ in rapporto ad una densità di flusso magnetico di 1 T si ottiene

$$\Psi = 1 \times 0,63 \times 0,025 \times 1 = 0,01575V = 15,75mV$$

Questo valore, arrotondato a 16 mV/T, se confrontato con la soglia di depolarizzazione del miocardio, pari a circa 40 mV, acquisisce in tal modo un preciso significato protezionistico⁽²³⁾.

Infatti, il voltaggio MHD può esercitare sull'"organo bersaglio", cioè il cuore, alcuni effetti biologici che possono estrinsecarsi sia come depolarizzazione miocardica, sia attraverso un aumento dell'ampiezza dell'onda T (ratto e macaco), sia come aumento della pressione arteriosa⁽³¹⁾.

Quest'ultimo effetto può essere descritto dalla seguente funzione matematica

$$PA_{MHD} = P_0 \left(1 + \frac{(Ha^2)}{4} \right)$$

dove

PA_{MHD} = pressione arteriosa all'intensità di campo magnetico statico considerata;

P_0 = pressione arteriosa alla condizione basale ("zero") del campo magnetico in esame

Ha = numero di Hartmann, definito da $Ha = \left(\frac{Bd}{2} \right) \left(\frac{\sigma}{n} \right)^{1/2}$

dove

B = densità di flusso magnetico
d = diametro del vaso sanguigno
 σ = conduttività elettrica del sangue
n = viscosità cinematica del sangue

Da quanto sopra indicato si deduce che l'aumento della pressione arteriosa è proporzionale al quadrato dell'incremento della densità di flusso magnetico.

Nella Tab. V sono riportati percentualmente gli aumenti della pressione arteriosa in funzione della densità di flusso magnetico⁽¹⁹⁾.

Si precisa inoltre che il limite di esposizione TWA di 60 mT (Tab. IV) è correlato al voltaggio MHD medio di 1 mV (in accordo con 16 mV/T).

Le linee guida del LLNL prevedono, per le zone con campi superiori a 1 mT, l'esclusione dell'accesso ai portatori di pacemakers, di presidi metallici (clips vascolari), di grandi protesi metalliche (anche, cranio), di presidi elettronici.

Per campi superiori a 50 mT deve essere precluso l'accesso alle persone affette da anemia falciforme.

Per campi intorno a 0,05 T ed oltre deve essere previsto un controllo del movimento di utensili magnetizzabili.

TAB. IV - Linee guida del LLNL per i campi magnetici statici

| | |
|---------------------------|---|
| ESPOSIZIONE MASSIMA: | non oltre i 2 T indipendentemente dalla durata dell'esposizione e della parte del corpo esposta (valore ceiling). |
| CAMPI CON PICCO < 500 mT: | livello medio di campo fino a 60 mT al tronco o fino a 600 mT alle estremità come massimo per settimana. |
| CAMPI CON PICCO > 500 mT: | livello medio di campo fino a 60 mT al tronco o fino a 600 mT alle estremità come massimo al giorno (TWA). |

(da LLNL (19))

f) ORNL rationale

Ketchen E.E., Porter W.E. e Bolton N.E. dell'Oak Ridge National Laboratory (ORNL), sulla base della rassegna della letteratura scientifica, rilevano che dati sperimentali sugli animali porterebbero a scegliere limiti di esposizione di 0,008-0,01 T. Questi livelli, infatti, non de-

terminano in caso di esposizione continua alterazioni EEG nel coniglio; queste alterazioni compaiono invece per esposizioni di 1-3 minuti a 0,02-0,1 T.

Questi studiosi ritengono tuttavia che possano essere consentiti limiti più elevati, considerando che i limiti di esposizione rappresentano dei livelli ai quali quasi tutti i lavoratori possano essere esposti giorno dopo giorno senza effetti nocivi.

Nella sostanza concordano con i limiti di esposizione proposti da Beischer e Reno⁽⁵⁾, corrispondenti a quelli adottati presso lo SLAC (Tab. III), con la raccomandazione aggiuntiva di escludere dall'esposizione

- persone con storia di disturbi psichici;
- portatori di presidi medici elettronici;
- donne gestanti;
- persone con alcune patologie croniche, quali turbe cardiache ed anemia falciforme.

g) CERN rationale

L'orientamento prescelto presso il CERN è quello di una concordanza con i limiti di esposizione dello SLAC, con la raccomandazione aggiuntiva di escludere dall'esposizione⁽¹¹⁾

- donne gestanti;
- portatori di protesi metalliche;
- portatori di pacemakers;
- persone con affezioni cardiovascolari (fibrillazione atriale permanente);
- persone con affezioni del S.N.C..

h) ACGIH rationale

Il Comitato dell'American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) per i TLV degli Agenti Fisici, sulla base della letteratura disponibile, non ritiene che ci siano attualmente sufficienti informazioni per proporre TLV per campi magnetici pulsati e continui (1985-1986)⁽¹⁾.

I LIMITI DI ESPOSIZIONE PER LA NMR

I livelli dei campi magnetici (statici e dinamici), che con la radiofrequenza (1 T → 42,3 MHz) realizzano nella NMR una particolare condizione di esposizione combinata, possono essere schematicamente riassunti come segue (7, 23):

| | |
|--------------------------------|-------------------------------------|
| | magnete resistivo 0,1 T (Mx 0,15 T) |
| | magnete core Fe ~ 0,3 T |
| <u>campo magnetico statico</u> | magnete superconduttore: |
| | - NMR spettroscopia chimica ~ 10 T |
| | - NMR spettroscopia in vivo 1,5 T |
| | - NMR imaging 0,5 T |

campo magnetico dinamico: 1 T/s (borderline con la soglia dei magnetofosfeni).

Le linee guida per l'esposizione a NMR per scopi clinici sono indicate nella Tab. VI. Anche questi limiti sono giustificati dalle varie Istituzioni che li hanno introdotti attraverso l'elaborazione di un "rationale".

TAB. V - Aumento percentuale della pressione arteriosa (PA) in funzione del campo magnetico statico

| Campo magnetico statico (T) | % di aumento della PA |
|-----------------------------|-----------------------|
| 2 | 1 |
| 3 | 3 |
| 4 | 5 |
| 5 | 7 |
| 6 | 10 |

(da LLNL (19))

A) NCDRH, DHHS/NMR rationale

Negli Stati Uniti, limiti di esposizione per la NMR vengono stabiliti nel 1982 dal National Center for Device and Radiological Health, Department of Health and Human Service (NCDRH, DHHS) (Tab. VI)⁽¹⁰⁾.

La scelta è avvenuta attraverso la rassegna della letteratura sugli effetti biomagnetici e sull'analisi dei meccanismi noti di interazione dei campi magnetici con i sistemi biologici⁽⁸⁾.

In questa valutazione si conclude che non dovrebbero essere attesi per campi statici inferiori a 2T effetti dannosi sull'uomo, nonché effetti biochimici, genetici o riproduttivi (2T corrispondono a 32 mV, la soglia di depolarizzazione del miocardio è intorno a 40 mV)⁽²³⁾.

Per quanto riguarda i campi magnetici dinamici, il limite di 3 T/s corrisponde ad una densità di corrente di $3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Questo dato va confrontato in senso protezionistico con la soglia per la fibrillazione ventricolare che è intorno a $300 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ⁽²³⁾.

Queste linee guida valgono soltanto per i pazienti e non sono "ceiling". L'eventuale superamento dei limiti deve essere deciso su base individuale.

B) NRPB/NMR rationale

Linee guida per la NMR vengono introdotte nel Regno Unito nel 1984 da parte del National Radiological Protection Board (NRPB) e prevedono limiti di esposizione, oltre che per il paziente, anche per gli operatori sanitari⁽²²⁾.

Per quanto riguarda l'esposizione professionale vengono adottati essenzialmente i limiti per i campi statici dello SLAC, rilevando che non sono state osservate sintomatologie nello staff che lavora presso l'acceleratore da quando tali limiti sono stati applicati (1970) (Tab. VI).

L'esposizione del corpo intero o delle mani e degli avambracci a livelli di campo previsti per tempi brevi (15 minuti), rispettivamente 0,2 T e 2 T, può essere ripetuta nello stesso giorno, a condizione che tra un'esposizione e l'altra sia rispettato un ragionevole intervallo (1 ora).

I limiti di esposizione del paziente ai campi magnetici statici sono stati stabiliti assumendo che la limitazione dell'esposizione del corpo intero o di gran parte di esso a livelli non superiori a 2,5 T (valore ceiling) rende improbabile l'insorgenza della fibrillazione cardiaca come effetto di potenziali indotti nei maggiori vasi sanguigni o nelle cavità cardiache.

Per quanto riguarda i campi magnetici variabili, il NRPB raccomanda limiti di esposizione basati sulla durata della densità di flusso (la soglia si alza con il diminuire della durata dell'impulso) (Tab. VI).

TAB. VI - Linee guida per esposizione a campi magnetici nella NMR per scopi clinici

| FONTI | CAMPI STATICI | CAMPI VARIABILI |
|---|---|--|
| NCDRH (1982) USA | <u>paziente</u> 2T per esposizione globale e parziale | <u>paziente</u> 3T/s per esposizione globale e parziale |
| Il superamento di questi limiti deve essere valutato su base individuale. | | |
| NRPB (1984) UK | <u>operatore</u> 0.02T (periodo prolungato; corpo intero) 0.2T (periodo prolungato; braccia, mani) 0.2T (15 min; corpo intero) 2.0T (15 min; braccia, mani) | <u>per tutti</u> 20T/s (r.m.s.) per impulsi di du- rata ≥ 10 ms $(dB/dt)^2 t < 4$ (r.m.s.) per durata dell'impulso < 10 ms, dove dB/dt è in T/s e t in s |
| | <u>paziente</u> 2.5T per esposizione globale e parziale | |
| FHO (1984) FRG | <u>paziente</u> 2T per esposizione globale e parziale | <u>paziente</u> esposizione globale e parziale: massima densità di corrente in- dotta 30 mA/m^2 o 0.3 V/m di intensità di campo elettrico per variazione del cam- po magnetico di durata ≥ 10 ms; massima densità di corrente in- dotta $(0,3 \text{ A/m}^2)/t$ o intensità di campo elettrico $(0,3\text{V/m})/t$ dove t è la durata della variazione del campo magne- tico. |

Al riguardo si precisa che il limite di 20 T/s corrisponde ad una densità di corrente indotta di $20 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Le linee guida per i campi magnetici variabili valgono sia per i pazienti, che per gli operatori sanitari.

C) FHO, FRG/NMR rationale

La scelta dei limiti di esposizione per i campi magnetici statici (Tab. VI) è stata effettuata dal "Bundesgesundheitsamt" della Germania Federale (Federal Health Office, Federal Republic of Germany: FHO, FRG) nell'ambito delle raccomandazioni sulla NMR pubblicate nel 1984, sulla base dei seguenti dati scientifici⁽⁶⁾:

- effetti di orientazione sono stati osservati in sistemi biologici, come il DNA, i bastoncelli della retina, le emazie falciformi, per campi superiori a 1-2 T;
- l'induzione di potenziali elettrici (MHD) per campi superiori a 0,03 T sono stati confermati mediante ECG in animali (onda T);
- tuttavia, non sono stati osservati effetti dannosi in animali esposti fino a 10 T;
- l'induzione di differenze di potenziale, come può avvenire nella contrazione cardiaca in un campo magnetico statico, può essere significativa nei casi in cui siano presenti anomalie della stimolazione o della conduzione dell'eccitazione e se il campo è superiore a 2 T.

I limiti di esposizione sono integrati dalla raccomandazione di sottoporre il paziente a controlli cardiologici qualora siano previste esposizioni a campi superiori a 2 T. Inoltre, devono essere effettuati controlli per verificare l'eventuale presenza nel corpo del paziente di materiali conduttori, rappresentati, ad esempio, da clips vascolari e da pacemakers.

Pazienti con pacemaker cardiaco non devono essere esposti a campi magnetici superiori a 0,5 mT, onde evitare disfunzioni di questo apparecchio.

I limiti di esposizione per campi magnetici variabili sono stati definiti dal FHO (Tab. VI) considerando sostanzialmente i seguenti aspetti:

- l'entità delle correnti elettriche indotte dipende dall'intensità del campo, dalla durata dell'impulso, dalla frequenza del campo magnetico;
- una densità di corrente indotta di $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ non provoca effetti apprezzabili sui neuroni;
- una densità di corrente indotta di $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ può indurre effetti che sono in stretto rapporto con la frequenza, ma non comporta rischi;
- una densità di corrente indotta superiore a $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ in vicinanza del cuore o campi elettrici di oltre 100 mV/cm possono causare fibrillazione ventricolare.

CONCLUSIONI

I limiti di esposizione fino ad oggi disponibili rappresentano indubbiamente utili riferimenti per preordinare ed attuare interventi protezionistici nei riguardi dell'esposizione ai campi magnetici statici.

Tuttavia, va rilevata la divaricazione esistente tra le Istituzioni che con varie modalità hanno affrontato questo specifico problema.

Un estremo di questo arco di scelte può essere rappresentato dalla legge promulgata in materia nel 1978 dall'Unione Sovietica.

L'altro estremo può coincidere con l'atteggiamento assunto dall'ACGIH, le cui direttive per gli anni 1985-1986 puntualizzano che al momento attuale non sono disponibili sufficienti informazioni per proporre TLV per campi magnetici continui (e pulsati).

Nel mezzo possono essere collocati i limiti di esposizione stabiliti negli Stati Uniti da alcuni Laboratori di Fisica (SLAC, Fermi NAL, LLNL) e dal DOE.

Al riguardo va anche precisato che il "rationale" scientifico che è di supporto alle scelte dei limiti stessi non è univoco e presenta non raramente aspetti controversi o contraddittori.

Talvolta, come nel caso dei limiti di esposizione introdotto dal DOE, il "rationale" non è ufficialmente dichiarato.

Anche tra i limiti proposti per la NMR dal NCDRH/DHHS, dal NRPB e dal FHO/FRG esiste un apprezzabile divario che investe livelli di esposizione e criteri cautelativi.

Ulteriori dati scientifici ed un'assidua revisione critica della materia contribuiranno certamente a superare quegli aspetti di disomogeneità che attualmente caratterizzano questo particolare capitolo protezionistico.

SOMMARIO

Lo sviluppo delle macchine acceleratrici (fisica delle alte energie), la ricerca nel campo della fusione nucleare controllata, la sperimentazione sui sistemi di levitazione magnetica nei trasporti e, più recentemente, l'impiego per scopi clinici della risonanza magnetica nucleare hanno posto con maggiore insistenza la necessità di poter disporre di standard protezionistici nell'esposizione ai campi magnetici.

Attualmente sono disponibili linee guida stabilite negli Stati Uniti da alcuni Laboratori di Fisica nucleare (SLAC, FNAL, LLNL) e dal Department of Energy (DOE).

A questi deve aggiungersi la normativa elaborata nell'Unione Sovietica, inizialmente come raccomandazioni non ufficiali e successivamente attraverso provvedimenti di legge.

Anche nell'impiego per scopi clinici della NMR sono state elaborate molto opportunamente linee guida per la protezione del paziente.

Il "rationale" che è alla base delle scelte dei criteri e dei limiti di esposizione effettuate dalle varie Istituzioni è per molti aspetti non univoco.

Tuttavia, questo capitolo protezionistico, per quanto ancora disomogeneo, contiene utili riferimenti per preordinare ed attuare interventi di tutela sanitaria nel campo dell'esposizione ai campi magnetici statici.

HAZARD FROM STATIC MAGNETIC FIELDS: THE LIMITS OF EXPOSURE

Summary

The development of high energy accelerators, the research on fusion reactors and on magnetic levitation systems for transportation and, recently, the widespread clinical use of MNR have emphasized the need for standards of protection against magnetic fields.

Presently just some guidelines have been established in USA for use in some research laboratories (SLAC, FNAL, LLNL) and in the DOE.

In USSR there exist a set of rules which, from unofficial guidelines have developed as mandatory standards.

Some general guidelines have been introduced for the protection of the patient in the clinical use of the NMR.

Unfortunately, the bases for the choice of the methods and limits utilized from the different Institutions are not unique.

However, all the information available in this new field of protection may already allow for some useful practical safety organization and intervention.

BIBLIOGRAFIA

- 1) ACGIH: "TLVs Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents in Environment and Biological Exposure Indices with Intended Changes for 1985-1986".
- 2) Alpen E.L.: "Magnetic fields exposure guidelines" In Tenforde T.S. ed.: "Magnetic field effects on biological systems". Plenum Press, New York (1979) 25-32.
- 3) Barnothy M.F.: "Biological effects of magnetic fields". Plenum Press, New York (1964) vol. 1, 109.
- 4) Beischer D.E.: "Human tolerance to magnetic fields". *Astronautics* (1962) March issue, 24-25.
- 5) Beischer D.E., Reno V.R.: "Magnetic fields and man; where do we stand today?" In AGARD Conference Proceedings N95, Part. III pp. C-12-1, Special biophysical problems in aerospace medicine, A.M. Pfister (editor), France, Sept. 30-Oct. 1 (1971).
- 6) Bernhardt J.H., Kossel F.: "Recommendations for the safe use of NMR equipment". *Clin. Phys. Physiol. Meas.* (1985) 6, 65-74.
- 7) Biagini C.: "Indicazioni attuali della risonanza magnetica nucleare (RMN) per immagini". *Aggiornamento del Medico* (1985) 4, 191-199.
- 8) Budinger T.F.: "Nuclear magnetic resonance (NMR) in vivo studies: known thresholds for health effects". *J. Comp. Assist. Tomogr.* (1981) 5(6), 800-811.
- 9) Cooke P., Morris P.G.: "The effects of NMR exposure on living organisms". II A genetic study of human lymphocytes. *Br. J. Radiol.* (1981) 54, 622-625.
- 10) DHHS: "Guidelines for evaluating electromagnetic risk for trials of clinical NMR systems". Dept. Health and Human Services, National Center for Devices and Radiological Health, Rockville, MD20857, USA (1982).
- 11) Diss J.P.: "Effets biologiques des champs électriques e magnétiques". Essai de synthèse de quelques données actuelles. Conference contribution 26 Mai (1982), Berna. HS-ME-002/CF, CERN-HS-ME 002 CF.
- 12) Fermi National Accelerator Laboratory: "Interim standards for occupational exposure to magnetic fields". Illinois (1979).
- 13) Grandolfo M., Vecchia P.: "Problemi di protezione da campi elettromagnetici non ionizzanti". *Medicina* (1985), 5, 463-470.
- 14) ICRP: "Implications of Commission recommendations that doses be kept as low as readily achievable". International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 22, Pergamon Press, Oxford (1973).
- 15) ICRP: "Recommendations of the International Commission on Radiological Protection". ICRP Publication 26, Pergamon Press, Oxford (1977).
- 16) ICRP: "Nonstochastic effects of ionizing radiation". International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 41, Pergamon Press, Oxford (1984).

- 17) Ketchen E.E., Porter W.E., Bolton N.E.: "The biological effects of magnetic fields on man". Am. Ind. Hyg. Assoc. (1978), 39, 1-11.
- 18) Kholodov Ju.A., Alexandrovskaya M.M., Lukianova S.N., Udarova: "Investigations of the reactions of mammalian brain to static magnetic fields". In Biological Effects of Magnetic Fields. Plenum Press, New York (1969), vol. 2, 215.
- 19) LLNL: "Working in magnetic fields". Health and safety manual. Suppl. 26.12, revised June 27 (1985). Lawrence Livermore National Laboratory, University of California.
- 20) Mekshenkov M.I.: "An investigation of the structure and conformation of ribonucleic acids by method of birefringence in a magnetic field". Biofizika (1965), 10, 747.
- 21) Novitskii Y.J. et al: "Radiofrequencies and microwaves. Magnetic and electrical fields". NASA TTF-14.021 (1971).
- 22) NRPB: "Advice on acceptable limits of exposure to nuclear magnetic resonance clinical imaging". National Radiological Protection Board Publication, Chilton, Didcot, Oxon OX110RQ, January (1984).
- 23) Persson B., Stahlberg F.: "Health and safety of clinical-NMR". Radiation Physics Department, Lasarettet, s-221, 85 Lund, Sweden, April (1985).
- 24) Repacholi M.H.: "Health risk assessment of static and ELF electric and magnetic fields (0-300 Hz)". In Grandolfo M., Michaelson S., Rindi A. eds.: "Biological effects and dosimetry of non-ionizing radiation". Plenum Press, New York (1985), 635-665.
- 25) Repacholi M.H.: "Standards on static and ELF electric and magnetic fields and their scientific basis". In Grandolfo M., Michaelson S., Rindi A. eds.: "Biological effects and dosimetry of non-ionizing radiation". Plenum Press, New York (1985), 667-684.
- 26) Righi E., Di Pofi M.: "Il rischio da campo magnetico derivante da tecnologie nucleari: criteri di protezione sanitaria". Laboratori Nazionali di Frascati - INFN, LNF 79/3(R), 9 gennaio (1979).
- 27) Schwartz J.L., Crooks L.E.: "NMR imaging produces no observable mutations or cytotoxicity in mammalian cells. AJR (1982), 139, 583-585.
- 28) SLAC: "Limits on human exposure to static magnetic fields". Stanford Linear Accelerator Center, California, May (1970).
- 29) St. Lorant S.J.: "Biomagnetism: a review". SLAC-PUB-1984 (1977).
- 30) Tenforde T.S.: personal communication (1983). In Repacholi (25).
- 31) Tenforde T.S.: "Biological effects of stationary magnetic fields". In Grandolfo M., Michaelson S., Rindi A. eds.: "Biological effects and dosimetry of non-ionizing radiation". Plenum Press, New York (1985), 93-127.
- 32) USSR: "Union of Sovietic Socialist Republics: Maximum permissible levels of exposure to static magnetic fields at work with magnetic installations and magnetic materials". MZ SSR, No 1742-77, 16 August (1977), Moscow (1978) (In Russian).

- 33) USSR: "Union of Sovietic Socialist Republic Maximum permissible levels of magnetic fields of frequency of 50 Hz". Ministry of Health Protection, 17 January (1985).
- 34) Vyalov A.M.: "Magnetic fields as a factor in an industrial environment". Vestnik (1967), 8, 52-58.
- 35) Wolff S. et al.: "Tests for DNA and chromosomal damage induced by nuclear magnetic resonance imaging". Radiol. (1980), 136, 707-710.
- 36) IRPA-INIRC: "Environmental health criteria magnetic fields". Preparato dall'International Non-Ionizing Radiation Committee dell'International Radiation Protection Association per la Environmental Health Division della World Health Organization, Geneva (in corso di stampa, comunicazione personale da M. Grandolfo).