



**ISTITUTO SUPERIORE DI SANITA'**

**Linee guida e limiti di esposizione  
a campi elettromagnetici a radiofrequenza raccomandati dall'IRPA  
nell'intervallo di frequenze da 100 kHz a 300 GHz**

a cura di M. Grandolfo\* e L. Raganella\*\*

*(\*) Laboratorio di Fisica, Istituto Superiore di Sanità, Roma*  
*(\*\*) ENEA, Direzione Sicurezza Nucleare e Protezione Sanitaria,  
Divisione Sorveglianza Fisica della Protezione (DISP. ESE-PRO), Roma*

**RIASSUNTO.** - Il Comitato Internazionale per le Radiazioni Non Ionizzanti dell'Associazione Internazionale per le Protezioni Radiologiche (IRPA/INIRC) si è assunto il compito di redigere documenti relativi ai criteri di protezione per le radiazioni non ionizzanti. Questi criteri forniscono poi la base di dati scientifici utilizzata per lo sviluppo, da parte dell'IRPA/INIRC, di linee guida sui limiti di esposizione. Nel 1984 l'IRPA/INIRC ha pubblicato alcune linee guida temporanee relative ai limiti di esposizione a campi elettromagnetici a radiofrequenza, ma successivamente alla loro pubblicazione sono stati fatti importanti progressi nella ricerca sugli effetti biologici della radiazione, particolarmente nel campo della dosimetria. Di conseguenza, il Comitato concluse che le linee guida del 1984 dovessero essere aggiornate e questo rapporto presenta la traduzione ufficiosa della versione aggiornata, pubblicata nel 1988.

*Parole chiave:* Campi elettromagnetici, microonde, radiazioni non ionizzanti, radiofrequenze.

**SUMMARY** (Guidelines on limits of exposure to radiofrequency electromagnetic fields recommended by IRPA (International Radiation Protection Association) in the frequency range from 100 kHz to 300 GHz). - The International Non-Ionizing Radiation Committee of the International Radiation Protection Association (IRPA/INIRC) has undertaken responsibility for the development of health criteria documents on non-ionizing radiation. These criteria then became the scientific data base for the development of IRPA/INIRC guidelines on exposure limits. In 1984, IRPA/INIRC developed interim guidelines on limits of exposure to radiofrequency electromagnetic fields but following their publication important advances have been made in biological radiation research, particularly in the field of dosimetry. The Committee concluded that the 1984 guidelines should be amended, and this report presents the unofficial Italian translation of the revised text, which was published in 1988.

*Key words:* Electromagnetic fields, microwave, non-ionizing radiation, radiofrequency.

Questa traduzione è pubblicata con l'assenso dell'IRPA che mantiene comunque i diritti d'autore relativi al manoscritto originale.

Il Comitato Internazionale delle Radiazioni Non Ionizzanti è finanziato dalla Associazione Internazionale per le Protezioni Radiologiche. Si è grati per la fattiva collaborazione fornita dall'Organizzazione Mondiale della Sanità, dal Programma Ambientale delle Nazioni Unite, dall'Ufficio Internazionale del Lavoro e dalla Commissione delle Comunità Europee.

## INTRODUZIONE

Negli ultimi anni, sulla base del lavoro tecnico svolto dall'International Non Ionizing Radiation Committee (INIRC), l'International Radiation Protection Association (IRPA) ha pubblicato una serie di linee guida valide per alcuni comparti di frequenza all'interno dell'intervallo spettrale che caratterizza le radiazioni non ionizzanti.

Nel 1987 venne curata dal Laboratorio di Fisica dell'Istituto Superiore di Sanita' una raccolta di traduzioni di queste linee guida (Rapporto ISTISAN 87/21), intesa quale utile strumento per tutti gli operatori sanitari interessati ad estendere al settore delle radiazioni non ionizzanti il proprio ambito professionale.

Nell'introduzione del Rapporto Istisan 87/21 si faceva notare come le linee guida relative al settore dei campi elettromagnetici a radiofrequenza fossero, gia' nel titolo del lavoro originale, espressamente indicate come temporanee. In effetti, nel gennaio del 1988, e' apparso su Health Physics il lavoro "Guidelines on Limits of Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields in the Frequency Range from 100 kHz to 300 GHz", versione definitiva delle linee guida proposte dall'IRPA per limitare le esposizioni di lavoratori e popolazione a campi elettromagnetici nell'intervallo di frequenze comprese fra 100 kHz e 300 GHz.

Tenuto conto dell'ampio utilizzo che campi elettromagnetici a queste frequenze hanno oggi in diversi settori di attivita', si e' ritenuto utile presentare una

traduzione italiana, sia pure non ufficiale, anche di questa versione aggiornata delle raccomandazioni IRPA.

L'interesse di queste linee guida e' poi ulteriormente accresciuto se calate in un contesto quale quello del nostro paese che, pur avendo sviluppato in alto grado il dibattito sulle relazioni esistenti fra qualita' dell'ambiente e sviluppo, non e' ancora riuscito a portare a conclusione il lungo iter di definizione di una normativa nazionale nel settore, con tutti i problemi che da questo vuoto legislativo non possono che risultare amplificati, talvolta anche in misura ingiustificata.

M. Grandolfo

L. Raganella

LINEE GUIDA RELATIVE AI LIMITI DI ESPOSIZIONE A CAMPI  
ELETTROMAGNETICI A RADIOFREQUENZA NELL'INTERVALLO  
DI FREQUENZE DA 100 kHz a 300 GHz  
(Health Physics 54, pp. 115-123, 1988)

PREFAZIONE

Le applicazioni dell'energia elettromagnetica a RF sono numerose ed in aumento. Le apparecchiature che utilizzano questa forma di energia vengono applicate nell'industria, nel commercio, nella medicina, nella ricerca e nelle abitazioni. A livelli di potenza sufficientemente elevati, l'esposizione a campi elettromagnetici a RF può causare diversi effetti nocivi alla salute. Tali effetti includono la cataratta negli occhi, il sovraccarico del sistema di termoregolazione, lesioni termiche, quadri comportamentali alterati, convulsioni ed una minore capacità di resistenza alla fatica. Limiti di esposizione sono quindi necessari per la protezione dagli effetti nocivi causati da esposizioni a radiazioni a RF.

L'International Non Ionizing Radiation Committee dell'International Radiation Protection Association (IRPA/INIRC), in collaborazione con l'Environmental Health Division dell'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS), si è assunto il compito di redigere documenti relativi ai

criteri di protezione sanitaria per le radiazioni non ionizzanti (NIR). Questi documenti fanno parte dell'Environmental Health Criteria Programme dell'OMS, che e' finanziato dall'United Nations Environment Programme (UNEP). I documenti includono una panoramica delle caratteristiche fisiche, delle misure e della strumentazione, delle sorgenti e delle applicazioni delle NIR, una completa rassegna degli standard disponibili e delle loro basi scientifiche e le valutazioni dei rischi sanitari derivanti dall'esposizione dell'uomo alle NIR. Questi criteri forniscono poi la base di dati scientifici utilizzata per lo sviluppo, da parte dell'IRPA/INIRC, di linee guida sui limiti di esposizione e di rapporti tecnici sulla sicurezza e igiene nei luoghi di lavoro, quest'ultimi sviluppati in collaborazione con l'Ufficio Internazionale del Lavoro.

Nel 1981 e' stato pubblicato un documento intitolato "Environmental Health Criteria 16, Radiofrequency and Microwave" (UNEP/WHO/IRPA 1981). Il documento contiene una rassegna degli effetti biologici associati all'esposizione a campi elettromagnetici a radiofrequenza ed e' stato utilizzato come base scientifica per lo sviluppo delle *Linee guida temporanee relative ai limiti di esposizione a campi elettromagnetici a RF nell'intervallo di frequenza da 100 kHz a 300 GHz* dell'IRPA/INIRC, pubblicate nel 1984 (IRPA/INIRC 1984).

Successivamente alla pubblicazione di queste linee guida, avvenuta nell'aprile del 1984, sono stati fatti importanti progressi nella ricerca sugli effetti biologici della radiazione a RF, particolarmente nel campo della dosimetria. Durante la sua riunione annuale del 1985, il Comitato concluse che le linee guida del 1984 dovevano essere aggiornate. La versione aggiornata del testo e' stata approvata dal Consiglio Esecutivo dell'IRPA il 2 giugno 1987.

Per la stesura delle originali linee guida temporanee furono consultate con continuita' le singole Societa' nazionali affiliate all'IRPA; alcune istituzioni e singoli esperti hanno fornito utili suggerimenti per la versione attuale e si ringraziano per la collaborazione fornita.

Durante la preparazione di questo documento, la composizione dell'IRPA/INIRC era la seguente:

- H.P. Jammet,\* Presidente (Francia)
- J. Bernhardt (Repubblica Federale di Germania)
- B.F.M. Bosnjakovic (Olanda)
- P. Czerski (USA)
- M. Grandolfo (Italia)
- D. Harder (Repubblica Federale di Germania)
- B. Knave (Svezia)
- J. Marshall (Gran Bretagna)
- M.H. Repacholi (Australia)
- D.H. Sliney (U.S.A.)



J.A.J. Stolwijk (U.S.A.)

Segreteria Scientifica: A.S. Duchêne\* (Francia)

### FINALITA' E CAMPO DI APPLICAZIONE

Scopo di queste linee guida e' quello di trattare i principi di base della protezione dalla radiazione elettromagnetica nel campo delle radiofrequenze, cosi' che possano servire da guida alle diverse istituzioni internazionali e nazionali ed ai singoli esperti responsabili dello sviluppo di regolamenti, raccomandazioni o guide tecniche atte a proteggere i lavoratori e la popolazione dai potenziali effetti nocivi della radiazione a radiofrequenza. Questo documento fornisce una guida sui limiti di esposizione alle radiazioni ed ai campi elettromagnetici nell'intervallo di frequenza da 100 kHz a 300 GHz, basati sulla nostra conoscenza degli effetti biologici e sulla valutazione dei rischi sanitari.

La parte di spettro caratterizzata da frequenze comprese tra 300 MHz e 300 GHz viene spesso indicata con il termine di radiazione a microonde (MW).

---

\* Institut de Protection et de Sûreté Nucleaire. Département de Protection Sanitaire, B.P. 6, 92265 Fontenay-aux-Roses Cedex, France.

Queste linee guida non si applicano nel caso di esposizioni intenzionali di pazienti sotto trattamento medico o per esposizioni a scopo diagnostico.

Il Comitato e' consapevole del fatto che quando si vogliono stabilire dei limiti di esposizione si devono formulare dei giudizi di merito. Deve essere verificata la validita' dei lavori scientifici e devono essere eseguite estrapolazioni dagli esperimenti animali agli effetti sull'uomo. Sono necessarie analisi costo-beneficio che includano l'impatto economico dei controlli. I limiti raccomandati in queste linee guida sono stati basati su dati scientifici e l'impatto economico, o altre priorita' non scientifiche, non sono stati presi in considerazione. Tuttavia, sulla base delle attuali conoscenze, i limiti dovrebbero assicurare, in tutte le normali condizioni, un ambiente di lavoro e di vita sicuro nei riguardi di esposizioni a radiazione a RF.

#### GRANDEZZE ED UNITA'

Le grandezze fisiche mediante le quali sono espressi i limiti di esposizione alla radiazione elettromagnetica a radiofrequenza possono riferirsi ad una situazione in cui un oggetto fisico e' presente nell'area considerata o ad una situazione in cui nessun oggetto fisico e' presente. Nel

primo caso la distribuzione dell'energia elettromagnetica nello spazio risulta alterata dalla presenza di un oggetto fisico e questo caso viene indicato con i termini di "situazione perturbata" o "situazione con presenza di corpo". Nel secondo, la distribuzione del campo elettromagnetico non e' perturbata e questo caso viene indicato con il termine di "situazione con assenza di corpo" (IRPA/INIRC 1985).

In queste linee guida, i *limiti base* di esposizione formulati per frequenze maggiori di, o uguali a, 10 MHz sono espressi mediante la grandezza *rateo di assorbimento specifico* (SAR). Il rateo di assorbimento specifico e' la potenza assorbita nell'unita' di massa. L'unita' SI del rateo di assorbimento specifico e' il watt a chilogrammo (W/kg). Il SAR puo' essere mediato, spazialmente, sulla massa totale del corpo esposto o su sue parti e, temporalmente, su un dato tempo di esposizione, o su un singolo impulso, o su un periodo di modulazione della radiazione. Il SAR si riferisce ad una situazione perturbata. L'assorbimento di energia a RF e i metodi con i quali il SAR puo' essere misurato, o calcolato, in fantocci corpo-equivalenti sono mostrati in dettaglio in Polk e Postow 1986, Durney et al. 1978, e Durney et al. 1986.

In queste linee guida sono forniti, per scopi pratici e di confronto, anche i *limiti derivati* di esposizione. Questi sono espressi in termini di densita' di potenza (densita' di

flusso d'energia) nel caso di una situazione imperturbata. La densita' di potenza e' la potenza radiante incidente su di una piccola sfera divisa per l'area della sezione della sfera stessa. L'unita' SI della densita' di potenza e' il  $W/m^2$ .

Nel *campo lontano* di un'antenna o di una sorgente (onda piana) le intensita' del campo elettrico e del campo magnetico e la densita' di potenza sono fra loro legate e la determinazione di uno qualsiasi di questi parametri definisce gli altri due.

Il vettore di Poynting,  $S$ , e' la grandezza vettoriale uguale al prodotto vettore fra i vettori campo elettrico e magnetico e rappresenta il modulo e la direzione della densita' di potenza elettromagnetica (densita' di flusso d'energia).

Se  $S$  e' espresso in  $W/m^2$ ,  $E$  in  $V/m$  e  $H$  in  $A/m$  sono valide le relazioni:

$$S = E^2/120\pi = 120\pi H^2$$

In *campo vicino*, o nel campo dovuto a diverse sorgenti, deve essere misurata sia l'intensita' del campo elettrico che quella del campo magnetico. Nella maggior parte dei casi tali misure sono richieste per frequenze inferiori a 100 MHz. In situazioni in cui e' presente una complessa relazione di fase, come in campo vicino, e' stato introdotto

il concetto di *densità di potenza equivalente all'onda piana*,  $P_{eq}$ , espressa in  $W/m^2$  (National Council on Radiation Protection and Measurements 1981).

Per frequenze inferiori a 10 MHz, il concetto di SAR acquista un significato limitato poiché gli effetti biologici risultanti dall'esposizione dell'uomo sono, in linea di principio, meglio correlati con la densità di corrente indotta nel corpo. Le relazioni esistenti tra i campi elettrici e magnetici esterni al corpo e le loro intensità efficaci nel tessuto biologico o la densità di corrente nel tessuto non sono state ben sviluppate per frequenze comprese tra 0,1 e 10 MHz. Quindi, per frequenze inferiori a 10 MHz, i limiti base sono espressi in termini dei valori efficaci di campo elettrico,  $E_{eff}$ , e di campo magnetico,  $H_{eff}$ , incidenti (esterni al corpo). Poiché in campo vicino non è generalmente nota la relazione di fase esistente tra le componenti di un campo, il valore efficace del campo è ottenuto sommando i quadrati delle componenti verticali e orizzontali ed estraendo la radice quadrata di questa somma. In relazione al tempo, viene utilizzato il valore quadratico medio (VQM) di ogni componente. Le unità SI di  $E_{eff}$  e  $H_{eff}$  sono rispettivamente il V/m e l'A/m.

## LIMITI DI ESPOSIZIONE

*(a) Ambiente di lavoro*

L'esposizione dei lavoratori a radiazioni a RF aventi frequenze inferiori, o uguali, a 10 MHz non deve superare i livelli del VQM dell'intensita' del campo elettrico e magnetico imperturbato dati nella Tabella 1, essendo stati mediati i quadrati dell'intensita' del campo elettrico e magnetico su qualsiasi intervallo di 6 minuti durante la giornata lavorativa, ma a condizione che la corrente che fluisce nel corpo verso terra non superi 200 mA e che sia stato eliminato qualsiasi pericolo di bruciature a RF in accordo con le raccomandazioni in seguito illustrate (vedere (c)). Un approccio conservativo consiste nel limitare le intensita' del campo elettrico e magnetico pulsati, mediate sulla larghezza dell'impulso, a 32 volte i valori dati nella Tabella 1.

L'esposizione dei lavoratori a frequenze maggiori di 10 MHz non deve superare un SAR di 0,4 W/kg mediato su un qualsiasi intervallo di 6 minuti e sull'intero corpo, a condizione che non sia superato il valore di 2 W per 0,1 kg nelle estremita' (mani, polsi, piedi e caviglie) e quello di 1 W per 0,1 kg in qualsiasi altra parte del corpo.

I valori di esposizione per i lavoratori forniti in Tabella 1 per le frequenze comprese tra 10 MHz e 300 GHz sono i limiti operativi derivati dal valore di SAR di 0,4

W/kg. Essi rappresentano un'approssimazione pratica della densita' di potenza dell'onda piana incidente necessaria per produrre, nel corpo intero, un rateo di assorbimento specifico medio di 0,4 W/kg e tengono conto della suddivisione in intervalli spettrali indicata in Appendice 1 per la radiofrequenza. Questi limiti si applicano all'esposizione del corpo intero a campi elettromagnetici continui, o modulati, dovuti ad una o piu' sorgenti, mediati su qualsiasi intervallo di 6 minuti durante la giornata lavorativa (8 ore ogni 24 ore).

Per quanto siano disponibili, al momento, solo poche informazioni sulla relazione esistente fra effetti biologici e valori di picco dei campi pulsati, si suggerisce che la densita' di potenza equivalente all'onda piana, mediata sulla larghezza dell'impulso, non superi 1000 volte i limiti di  $P_{eq}$  indicati nella Tabella 1 per le rispettive frequenze, a condizione che non siano superati i limiti di esposizione dei lavoratori mediati su ogni intervallo di 6 minuti.

Nel caso di campo vicino, in cui esiste una complessa relazione di fase fra le componenti del campo elettrico e magnetico, e' possibile che l'esposizione possa essere dovuta in modo predominante ad una o all'altra componente e, in situazioni estreme, al solo campo magnetico o al solo campo elettrico. I limiti delle intensita' di campo magnetico ed elettrico indicati nella Tabella 1 per

frequenze maggiori di 10 MHz possono essere superati, nelle esposizioni in campo vicino, se e' soddisfatta la relazione:

$$5/6(E^2/120\pi) + 1/6(120\pi H^2) < P_{eq}$$

in cui E e' l'intensita' del campo elettrico (V/m), H e' l'intensita' del campo magnetico (A/m) e  $P_{eq}$  e' la densita' di potenza equivalente all'onda piana ( $W/m^2$ ), indicati in Tabella 1, e se contemporaneamente non sono superati i limiti di SAR previsti per l'esposizione dei lavoratori, mediati su ogni intervallo di 6 minuti. La precedente formula puo' essere utilizzata in situazioni reali di campo vicino nell'intervallo di frequenza da 10 a 30 MHz e, solo in rari casi, fino a 100 MHz.

I limiti derivati indicati nella Tabella 1 per frequenze maggiori di 10 MHz possono essere occasionalmente superati a condizione che sia possibile dimostrare che il SAR risultante da particolari condizioni di esposizione e mediato su qualsiasi intervallo di 6 minuti, sul corpo intero e su ogni 0,1 kg di tessuto, non superi i limiti di base indicati per lo stesso SAR in precedenza.

(b) *Popolazione.*

L'esposizione a radiazione a RF della popolazione a frequenze inferiori o uguali a 10 MHz non deve superare i livelli del valore quadratico medio dell'intensita' del



Tabella 1. Limiti di esposizione per i lavoratori a campi elettromagnetici a radiofrequenza

Intervallo di frequenza f (MHz)	Intensita' di campo elettrico perturbato (valore efficace) E (V/m)	Intensita' di campo magnetico perturbato (valore efficace) H (A/m)	Densita' di potenza dell'onda piana equivalente P <sub>eq</sub> (W/m <sup>2</sup> ) P <sub>eq</sub> (mW/cm <sup>2</sup> )	
0,1-1	614	1,6/f	-	-
>1-10	614/f	1,6/f	-	-
>10-400	61	0,16	10	1
>400-2000	3f <sup>0,5</sup>	0,008f <sup>0,5</sup>	f/40	f/400
>2000-300000	137	0,36	50	5

Nota: I pericoli di bruciature a RF dovrebbero essere eliminati attraverso la limitazione delle correnti da contatto con oggetti metallici (vedere (c)). Nella maggior parte delle situazioni cio' puo' essere ottenuto con la riduzione del valore di E da 614 a 194 V/m, nell'intervallo di frequenza da 0,1 a 1 MHz, e da 614/f a 194/f<sup>0,5</sup> nell'intervallo da 1 a 10 MHz, 1 MHz escluso.

campo elettrico e magnetico perturbato dati nella Tabella 2, a condizione che in accordo con le raccomandazioni illustrate di seguito (vedere (c)) sia eliminato qualsiasi pericolo di bruciature a RF.

L'esposizione della popolazione a frequenze maggiori di 10 MHz non deve superare un SAR di 0,08 W/kg mediato sul corpo intero e su qualsiasi intervallo di 6 minuti.

Tabella 2. Limiti di esposizione per la popolazione a campi elettromagnetici a radiofrequenza

Intervallo di frequenza f (MHz)	Intensita' di campo elettrico imperturbato (valore efficace) E (V/m)	Intensita' di campo magnetico imperturbato (valore efficace) H (A/m)	Densita' di potenza dell'onda piana equivalente P <sub>eq</sub> (W/m <sup>2</sup> ) P <sub>eq</sub> (mW/cm <sup>2</sup> )	
0,1-1	87	$0,23/f^{0,5}$	-	-
>1-10	$87/f^{0,5}$	$0,23/f^{0,5}$	-	-
>10-400	27,5	0,073	2	0,2
>400-2000	$1,375f^{0,5}$	$0,0037f^{0,5}$	f/200	f/2000
>2000-300000	61	0,16	10	1

I limiti di esposizione a RF per la popolazione, dati nella Tabella 2 per frequenze comprese tra 10 MHz e 300 GHz, sono i limiti operativi derivati da un valore di SAR di 0,08 W/kg. Essi rappresentano una pratica approssimazione della densita' di potenza in onda piana incidente necessaria per produrre, sul corpo intero, un valore di SAR di 0,08 W/kg, e tengono conto della suddivisione dell'intervallo di radiazione a RF suggerita in Appendice 1. Questi limiti si applicano all'esposizione del corpo intero a campi elettromagnetici continui, o modulati, dovuti a una o piu' sorgenti, mediati su ogni intervallo di 6 minuti durante le 24 ore della giornata.

Per quanto sia scarsa l'informazione disponibile sulla relazione esistente fra effetti biologici e valori di picco dei campi pulsati, si suggerisce che la densita' di potenza equivalente all'onda piana, mediata sulla larghezza dell'impulso, non deve superare piu' di 1000 volte i limiti di  $P_{eq}$  o l'intensita' di campo non deve superare piu' di 32 volte i limiti di campo dati nella Tabella 2 per le rispettive frequenze, a condizione che non siano superati i limiti di esposizione della popolazione mediati su ogni intervallo di 6 minuti e che siano stati eliminati i pericoli di bruciature a radiofrequenza.

*(c) Scosse e bruciature a RF*

Scosse e bruciature a RF possono generarsi toccando oggetti metallici non posti a terra che si siano caricati per effetto di un campo esterno o al contatto di un uomo carico con un oggetto metallico posto a terra. Vi e' rischio di bruciature se la corrente al punto di contatto supera 50 mA.

L'intensita' della corrente circolante nel corpo dipende fortemente dalle dimensioni dell'oggetto ed e' funzione del campo a RF e dell'impedenza verso terra dell'oggetto stesso. In ambiente di lavoro sono sufficienti semplici misure elettriche per valutare il rischio ed e' possibile mettere in atto misure protettive. In generale, le

bruciature a RF non si verificano se le correnti nel punto di contatto sono uguali o inferiori a 50 mA.

*(d) Considerazioni aggiuntive*

A causa delle limitate conoscenze sui valori di soglia per tutti gli effetti biologici, deve essere minimizzata qualsiasi esposizione indebita.

Le misure di esposizione eseguite per determinare il rispetto delle linee guida devono essere effettuate nelle posizioni normalmente occupate dalle persone.

Le basi scientifiche dei limiti sono illustrate in Appendice 1. In Appendice 2 sono fornite le misure da adottare per proteggere i lavoratori e la popolazione da eccessive, o inutili, esposizioni a radiazione a RF.

#### ESPOSIZIONE A DIVERSE SORGENTI

Per ogni intervallo di frequenza contenuto nelle Tabelle 1 e 2, in situazioni in cui l'esposizione sia dovuta a radiazioni emesse da sorgenti simultaneamente presenti ed operanti a frequenze diverse, ma con almeno una frequenza maggiore di 10 MHz, il valore di esposizione misurato ad ogni frequenza deve essere diviso per il valore limite di densita' di potenza, o per il limite in termini di quadrato

dell'intensita' del campo elettrico o magnetico. La somma di queste frazioni non deve quindi essere maggiore di 1.

Il limite base, al di sopra di 10 MHz (0,4 W/kg per esposizioni dei lavoratori o 0,08 W/kg per esposizioni della popolazione), protegge dai potenziali pericoli termici. In situazioni in cui l'esposizione sia prodotta da diverse sorgenti, si possono avere contributi al riscaldamento di specifiche parti del corpo da sorgenti operanti sotto 10 MHz. E' per questo che, per fornire un'adeguata protezione dall'effetto termico, le esposizioni da tutte le sorgenti devono essere combinate fra loro come indicato in precedenza.

Se tutte le sorgenti operano sotto 10 MHz, l'esposizione deve essere misurata per ogni frequenza ed essere espressa come frazione del limite di intensita' del campo elettrico o magnetico. La somma di queste frazioni non deve, quindi, essere maggiore di 1.

#### ESENZIONI

L'esposizione a radiazione a radiofrequenza emessa da dispositivi di bassa potenza, come le radio nella banda cittadina, le trasmissioni mobili di terra e di mare ed i *walkie-talkies* puo' essere esclusa dalle considerazioni atte a verificare l'applicazione dei prescritti limiti se la

potenza di uscita a radiofrequenza di questi apparati e' minore di, o uguale a, 7 W. Tali dispositivi generano solo campi molto localizzati.

#### STANDARD DI EMISSIONE

Gli standard di funzionamento o di emissione, volti ad assicurare la protezione sanitaria attraverso la limitazione dell'emissione di radiazione in specifiche condizioni di collaudo, devono essere derivati dai limiti di esposizione. I loro valori numerici possono differire dai limiti di esposizione in relazione a fattori quali le condizioni operative o il previsto uso del prodotto stesso.

#### NOTE CONCLUSIVE

Queste linee guida saranno oggetto di periodiche revisioni ed emendamenti con il progredire delle conoscenze e con l'identificazione di effetti associati a particolari frequenze e/o modalita' di generazione.

## APPENDICE 1

## BASI SCIENTIFICHE DEI LIMITI DI ESPOSIZIONE

L'obiettivo di queste linee guida e' quello di proteggere la salute dell'uomo dai potenziali effetti nocivi dell'esposizione a radiazione elettromagnetica a radiofrequenza.

## POPOLAZIONE

Il primo passo per stabilire i limiti di esposizione (EL) e' quello di definire la popolazione che si vuole proteggere. I limiti di esposizione possono riferirsi alla popolazione nella sua interezza o a suoi gruppi particolari. Questi gruppi possono essere ritenuti piu' o meno sensibili agli effetti nocivi indotti da RF e possono, o meno, essere sottoposti a sorveglianza medica.

La popolazione esposta per motivi professionali consiste di adulti esposti in condizioni controllate, istruiti ad essere consapevoli dei potenziali rischi ed a prendere le appropriate precauzioni. La durata delle esposizioni occupazionali e' limitata alla giornata lavorativa, o a turni nell'arco delle 24 ore, per l'intera durata della vita lavorativa.

La popolazione, presa nella sua totalita', comprende individui di tutte le eta' ed in diverse condizioni di

salute. Alle frequenze piu' alte i bambini, per le loro minori dimensioni, presentano un SAR maggiore degli adulti. L'intervallo delle frequenze di risonanza e' differente e tale e' anche la distribuzione dell'energia assorbita a RF nelle varie parti del corpo. Individui, o gruppi, aventi particolare sensibilita' possono essere inclusi in quest'ultima classe.

In molte situazioni gli individui della popolazione non sono consapevoli di essere esposti e potrebbero non voler correre alcun rischio (per quanto piccolo) associato all'esposizione. La popolazione puo' essere esposta 24 ore al giorno e per l'intera durata della vita. Infine, non ci si puo' ragionevolmente aspettare che la popolazione si premunisca contro bruciature e scosse a RF.

Le precedenti considerazioni hanno portato a consigliare limiti di esposizione di base (e derivati) piu' bassi, per la popolazione, di quelli indicati per i lavoratori.

#### INTERVALLI DI FREQUENZA

Sulla base delle caratteristiche di assorbimento, l'intervallo RF puo' essere suddiviso in quattro regioni (Schwan 1982a).



(a) L'intervallo sotto la risonanza, caratterizzato da frequenze minori di 30 MHz, in cui l'assorbimento superficiale prevale nel tronco, ma non nel collo e nelle gambe, e l'assorbimento di energia decresce rapidamente al diminuire della frequenza.

(b) L'intervallo di risonanza, che si estende da 30 MHz a circa 300 MHz per il corpo intero, e fino a circa 400 MHz se si considera la risonanza di solo parti del corpo (cranio). Sono possibili alti assorbimenti in particolari sezioni trasverse ed i limiti di esposizione devono essere posti a valori piu' bassi, in modo da tenere conto del caso peggiore.

(c) L'intervallo dei "punti caldi", che si estende da circa 400 MHz a 2000 MHz, o anche a 3000 MHz, in cui ci si possono aspettare significativi assorbimenti d'energia localizzati per densita' di potenza incidenti di circa 100 W/m<sup>2</sup>. L'estensione dei punti caldi varia da diversi centimetri, a 915 MHz, fino a circa 1 centimetro a 3000 MHz. I punti caldi sono causati dalla risonanza o dalla focalizzazione quasi ottica dei campi incidenti. Il primo meccanismo prevale alle frequenze piu' basse, il secondo a quelle piu' alte (Foster et al. 1978, Schwan 1982a). Per il cranio umano l'intervallo dei punti caldi si estende da 300 MHz a 2000 MHz (Foster et al. 1978).

(d) Intervallo dell'assorbimento superficiale.

Per frequenze maggiori di 10 MHz, quale grandezza per stabilire i limiti di esposizione di base (EL) e' stato scelto il SAR medio a corpo intero (WBA-SAR) e sono stati adottati valori diversi per la protezione della popolazione e dei lavoratori. I valori mostrati nelle Tabelle 1 e 2 sono stati derivati tenendo principalmente conto della dipendenza dalla frequenza del WBA-SAR (Durney et al. 1978, Durney et al. 1986) e sono stati modificati sulla base di considerazioni sulla non uniformita' della deposizione di energia a RF nelle varie parti del corpo, per esempio del SAR di picco nello spazio. Il SAR e' una grandezza utile per valutare gli effetti biologici che dipendono dall'aumento della temperatura associata con l'assorbimento di energia a RF. Tuttavia, poiche' il SAR dipende dall'intensita' del campo elettrico interno, puo' anche essere utilizzato per valutare gli effetti che dipendono direttamente dall'intensita' del campo elettrico nei tessuti. Quindi, sebbene le linee guida siano basate principalmente su considerazioni termiche, si e' tenuta in conto anche la protezione dagli effetti non termici. Un altro obiettivo e' stato quello di ridurre i pericoli di bruciature e scosse a RF.

Inizialmente si era assunto che il SAR di picco locale non dovesse eccedere il WBA-SAR per piu' di un fattore 20 (National Council on Radiation Protection and Measurements

1981). Tuttavia, dati dosimetrici piu' recenti (Gandhi et al. 1985, Gandhi 1985, Guy e Chou 1985, Stuchly et al. 1985, S.S. Stuchly et al. 1986, M.A. Stuchly et al. 1986) indicano che in certe condizioni il SAR locale nelle estremita', particolarmente nei polsi e nelle caviglie, puo' eccedere di circa un fattore 300 il WBA-SAR per alcune frequenze comprese negli intervalli di risonanza e subrisonanza. Per questo motivo, nella sezione relativa ai limiti di esposizione per i lavoratori si e' introdotta una condizione aggiuntiva, volta a limitare il SAR locale nelle estremita'. Sebbene i dati sperimentali sulla distribuzione di energia a RF ed i modelli disponibili non derivino dettagliatamente dall'intero intervallo di frequenza di interesse (Elder e Cahill 1984, Gandhi 1985, Guy e Chou 1985, Polk e Postow 1986, Spiegel 1984a, Spiegel 1984b, M.A. Stuchly et al. 1986), il Comitato ha ritenuto che queste linee guida siano in grado di fornire adeguata protezione da un'eccessiva deposizione localizzata di energia a RF.

Considerando i meccanismi di interazione che sono alla base degli effetti biologici potenzialmente nocivi, devono essere prese in considerazione sia la frequenza che l'intensita'. Gli effetti che dipendono dalla temperatura sono ben conosciuti e possono essere usati come base per la definizione di limiti di esposizione. L'emergente evidenza di meccanismi non termici alla base degli effetti biologici non puo' essere ignorata e deve essere considerata nello

stabilire limiti di esposizione (American National Standards Institute 1982, Czerski 1986, Illinger 1981, Schwan 1982b).

Date l'insufficiente comprensione della biofisica dei sistemi viventi e le controversie riguardanti le interazioni non termiche dei campi elettromagnetici, non e' possibile formulare, su considerazioni non termiche, alcuna teoria dotata di capacita' previsionali (Illinger 1981). Devono essere usati dati empirici per stabilire limiti di esposizione. Secondo Schwan (1982b) gli effetti non termici possono giocare un ruolo significativo a frequenze minori di 0,1 MHz. Non esiste alcun dato adeguato sugli effetti biologici a queste frequenze, eccetto che per l'intervallo delle frequenze estremamente basse, che deve essere considerato separatamente (UNEP/WHO/IRPA 1982). Sembra, quindi, prudente limitare a 0,1 MHz la frequenza inferiore di queste linee guida.

Nell'intervallo di frequenze 0,1-10 MHz, i limiti per l'intensita' di campo magnetico imperturbato sono meno restrittivi di quelli relativi all'intensita' di campo elettrico, poiche' il campo magnetico non contribuisce al rischio di bruciature e scosse a RF, che sono il principale motivo per la limitazione dell'intensita' di campo elettrico nelle esposizioni dei lavoratori.

Se esistono forti ragioni pratiche (vaste applicazioni in corrispondenza di specifiche frequenze), sulla base di studi sperimentali puo' essere stabilito un limite per una

stretta banda di frequenze o per un particolare dispositivo (standard di emissione) operante a frequenze inferiori a 100 kHz.

Ci si aspetta che gli effetti non termici siano dipendenti dalla frequenza (Illinger 1981) e possano mostrare complesse relazioni dose-effetto, comprese finestre di intensita' (UNEP/WHO/IRPA 1981), sia ad alte (sopra i 30000 MHz) che a basse frequenze (Grundler et al. 1982, Schwan 1982b). Non esistono dati di soglia per gli effetti nocivi per l'uomo nell'intero intervallo di frequenza e per tutti i possibili tipi di modulazione. La maggior parte dei dati biologici attuali proviene dall'intervallo di frequenze comprese fra 900 MHz e 10000 MHz. Quindi, dove i dati sono insufficienti, devono essere fatte ipotesi sui possibili effetti sanitari. Queste si fondano sulle attuali conoscenze della biofisica dell'assorbimento della radiazione elettromagnetica, su modelli analitici o sperimentali, e su limitati dati epidemiologici. L'estrapolazione dei limiti all'intervallo da 10 MHz a 300 GHz e' fondata sulla dipendenza dalla frequenza dell'assorbimento di energia negli esseri umani. Questo permette di considerare gli effetti termici ma non permette alcuna previsione sugli effetti non termici.

## ASSORBIMENTO DI ENERGIA

La quantita' totale, la distribuzione ed il rateo di assorbimento dell'energia elettromagnetica in un sistema vivente dipendono da numerosi fattori (National Council on Radiation Protection and Measurements 1981, Polk e Postow 1986). Le grandezze intensita' del campo elettrico interno (V/m), corrente indotta nel corpo (A), densita' di corrente indotta (A/m<sup>2</sup>) e rateo d'assorbimento specifico (W/kg) sono fra loro correlate. Il rateo di assorbimento specifico (SAR) e' comunemente usato per confrontare gli effetti biologici rilevati in diverse condizioni di esposizione. Il SAR, in varie condizioni di esposizione (Polk e Postow 1986), puo' essere calcolato o, in qualche caso, determinato sperimentalmente.

Il SAR puo' essere usato per determinare la distribuzione interna dell'energia (assorbita). Con alcune restrizioni, il SAR puo' essere anche usato per valutare la velocita' di variazione della temperatura (National Council on Radiation Protection and Measurements 1981) a patto che si conoscano le caratteristiche di conduzione del calore dell'organismo considerato, inclusa la risposta del sistema di termoregolazione. Una piu' dettagliata discussione del SAR puo' essere trovata in UNEP/WHO/IRPA (1981), National Council on Radiation Protection and Measurements (1981). Il SAR puo' essere usato per calcolare la dose totale

(integrale) d'energia assorbita durante il tempo di esposizione, o l'assorbimento specifico (SA) espresso in J/kg. Così il SAR può essere considerato come il rateo di dose di energia assorbita e, dalla durata dell'esposizione, può essere determinata la dose di energia assorbita.

Il SAR può essere usato per confrontare gli effetti di esposizioni di diversa durata solo se, di ognuna di queste, è specificata la durata stessa. Per la valutazione degli effetti a lungo termine, o di ripetute esposizioni intermittenti, devono essere specificate la durata di ogni esposizione e la loro distribuzione nel tempo. Ne segue che il SAR, essendo un rateo di dose, è una grandezza avente maggiore significatività se si tiene conto del fattore tempo.

Il SAR è proporzionale al quadrato dell'intensità del campo elettrico interno (in situ). Il SAR medio è proporzionale alla media dei valori istantanei dei quadrati di questi campi. Il SAR medio e la sua distribuzione possono essere calcolati, o determinati sperimentalmente, con il metodo calorimetrico, nel caso di SAR medio a corpo intero, con la termografia, nel caso del SAR medio e della sua distribuzione, e con sonde impiantabili, nel caso di SAR locali. Il valore di picco del SAR è il valore massimo di un SAR locale. Il SAR dipende da:

(a) I parametri del campo incidente: frequenza, intensita', polarizzazione e geometria del sistema sorgente-oggetto (campo lontano e vicino).

(b) Le caratteristiche del corpo esposto: dimensioni, geometria interna ed esterna, proprieta' dielettriche dei vari strati di tessuto in un soggetto a molti strati non omogeneo (come un uomo o un animale).

(c) Gli effetti di terra e quelli di riflessione da altri oggetti presenti nel campo, quali le superfici metalliche vicine al corpo esposto.

Quando l'asse maggiore del corpo umano e' parallelo al vettore campo elettrico,  $E$ , i ratei di assorbimento di energia elettromagnetica a corpo intero raggiungono i valori massimi. La quantita' di energia assorbita dipende da numerosi fattori, inclusa la taglia della persona esposta. L'uomo standard (altezza 1,74 m), se non e' connesso a terra, ha un assorbimento risonante d'energia ad una frequenza vicina a 70 MHz. Persone di taglia inferiore, ragazzi e bambini, presentano assorbimenti risonanti a frequenze superiori ai 100 MHz. Persone piu' alte hanno un assorbimento risonante a frequenze inferiori a 70 MHz.

A 2450 MHz, l'uomo standard assorbe circa il 50% dell'energia elettromagnetica incidente. Per fornire un'idea dell'importanza della regione di assorbimento d'energia risonante, ricordiamo che l'esposizione di un uomo standard a 70 MHz, in condizioni che producono il massimo di



assorbimento, da' luogo ad un assorbimento sette volte piu' grande di quello presente in un campo a 2450 MHz. I valori dei limiti di esposizione sono, quindi, basati sulla dipendenza dalla frequenza dell'assorbimento nell'uomo, nell'intero intervallo di frequenze e per tutte le taglie del corpo.

Per frequenze maggiori di 10 MHz, per cui i limiti di intensita' di campo elettrico e magnetico sono stati derivati da un limite di base espresso in termini di WBA-SAR, e' possibile considerare separatamente il contributo al WBA-SAR delle componenti elettrica e magnetica. Tale analisi puo' essere effettuata utilizzando le curve, contenute nel *Radiofrequency Dosimetry Handbook* (Durney et al. 1978), relative alla dipendenza dalla frequenza del WBA-SAR. Nel caso peggiore, il trasferimento di energia per polarizzazione di tipo E si deve in misura predominante al campo elettrico ed il WBA-SAR raggiunge un massimo pari a circa  $1,2 \times 10^{-2}$  W/kg a 20 MHz per un adulto longilineo esposto a  $10$  W/m<sup>2</sup>. Nel caso di polarizzazione K il massimo valore di SAR possibile e' dovuto principalmente al contributo del campo magnetico e, per una persona grassa a 20 MHz e' di circa  $2 \times 10^{-3}$  W/kg, cioe' un fattore circa sei volte minore. Il trasferimento di energia dovuto al contributo del solo campo magnetico non puo' eccedere questo livello di SAR. E' possibile, quindi, modificare i limiti operativi derivati per le intensita' dei campi magnetici ed

elettrici nei casi in cui l'esposizione e' dominata dalla componente magnetica o da quella elettrica, o quando addirittura una sola di queste e' presente, a condizione che valga la relazione:

$$5/6 (E^2/120\pi) + 1/6 (120\pi H^2) < P_{eq}$$

dove E e' l'intensita' di campo elettrico (V/m), H e' l'intensita' di campo magnetico (A/m) e  $P_{eq}$  e' il limite della densita' di potenza equivalente in onda piana ( $W/m^2$ ). Cio' si applica, in pratica, ad esposizioni in campo vicino nell'intervallo di frequenza da 10 a 30 MHz e, solo in rari casi, fino a 100 MHz.

Le risposte biologiche ad esposizioni a campi a RF non dipendono semplicemente dall'intensita' dei campi esterni al corpo, ma dai campi al suo interno, legati al SAR medio a corpo intero ed alla sua distribuzione entro il corpo stesso. Le esposizioni ad un campo elettromagnetico uniforme (onda piana) frequentemente causano nel corpo una deposizione ed una distribuzione di energia altamente disuniforme.

Solo recentemente sono stati sviluppati metodi atti a determinare l'assorbimento di energia elettromagnetica in condizioni di esposizione realistiche, considerando le esposizioni da campo vicino, gli effetti di terra e quelli di riflessione (Gandhi et al. 1977, Gandhi 1982). Il SAR

spaziale medio, sebbene abbia molte limitazioni (UNEP/WHO/IRPA 1981), e' attualmente un utile parametro per quantificare la relazione esistente tra effetti biologici ed esposizioni a RF, e per fare il confronto tra gli effetti prodotti in diverse condizioni di esposizione. L'estrapolazione tra specie deve anche tenere conto delle differenze biologiche esistenti tra le specie confrontate. Anche entro la stessa specie le differenze individuali, determinate geneticamente, influenzano le risposte. La risposta del sistema di termoregolazione e' diversa nelle varie specie. La previsione dell'ampiezza degli aumenti di temperatura corporei in specie diverse, conseguenti ad esposizioni confrontabili e con SAR a corpo intero equivalenti, devono tenere conto sia delle differenze fisiologiche, sia delle possibilita' di evocare risposte generali tramite riscaldamento localizzato dei centri di termoregolazione nell'area ipotalamica. Parametri di esposizione, o SAR, equivalenti negli animali e nell'uomo non comportano necessariamente risposte biologiche equivalenti.

#### IMPLICAZIONI SANITARIE

E' stata pubblicata (UNEP/WHO/IRPA 1981) una dettagliata rassegna, comprendente la valutazione della

letteratura scientifica, su cui sono stati fondati questi limiti di esposizione.

L'American National Standards Institute (ANSI) ha eseguito una rassegna della letteratura (ANSI 1982) e scelto solo quei lavori che presentavano risultati positivi, riproducibili e accompagnati da un'adeguata informazione dosimetrica. Di questi rapporti selezionati e' stata fatta una valutazione tale da definire se, o meno, gli effetti biologici riportati costituissero un rischio per la salute. Il comportamento negli animali da laboratorio e' risultato il piu' sensibile indicatore di un effetto nocivo alla salute (per esempio attivita' convulsiva, interruzione del lavoro, diminuzione dell'attivita' lavorativa, diminuzione della resistenza, percezione dell'esposizione al campo e comportamento avversivo (Justesen 1979)). Sulla base della sua rassegna, l'ANSI ha concluso che l'esposizione acuta (minore di un'ora) ad energia elettromagnetica depositata nel corpo intero al livello di un SAR medio minore di 4 W/kg non produce effetti nocivi negli animali da laboratorio. Tuttavia, poiche' le esposizioni prolungate (giorni e settimane) possono causare danni, e' stata decisa la riduzione di un fattore dieci del SAR ammesso (cioe' 0,4 W/kg).

Due successive rassegne di vasta portata (Elder e Cahill 1984, National Council on Radiation Protection and Measurements 1986) hanno portato alla conclusione che

possono evidenziarsi effetti indesiderati anche a livelli piu' bassi, suggerendo un valore del WBA-SAR di soglia per gli effetti sanitari pari a 1 W/kg (Elder e Cahill 1984). L'esperienza clinica accumulata nella tomografia a risonanza magnetica mostra che l'esposizione a breve termine a 2 W/kg o a 1 W/kg puo' creare problemi a persone aventi una compromessa capacita' di termoregolazione (Budinger et al. 1985). Un attento esame critico dei dati disponibili non ha portato a ritenere necessaria la modifica dei limiti di base di WBA-SAR precedentemente adottati. Il Comitato ha concluso che non esistono adeguate basi scientifiche per una formulazione dei limiti di base in termini di SAR mediato su ogni grammo di tessuto ed ha, invece, introdotto un limite per i lavoratori di 2 W per 0,1 kg per polsi e caviglie e di 1 W per 0,1 kg per tutti gli altri tessuti. Il WBA-SAR di 0,4 W/kg da' luogo ad un limite di esposizione a corpo intero di 28 W di potenza assorbita da un uomo di 70 kg. Questo limite e' ancora eccessivo se concentrato in una piccola regione ed e', quindi, necessario avere un limite aggiuntivo mediato su una minore quantita' di tessuto. La massa di 0,1 kg, su cui effettuare la media, e' stata scelta in quanto corrispondente ad un volume all'interno del quale non dovrebbero stabilirsi eccessivi gradienti di temperatura e nella deposizione di energia. E' necessario scegliere il volume di 100 ml in modo tale da corrispondere nel migliore dei modi alla regione in cui avviene l'assorbimento di

energia. Per esposizioni a frequenze maggiori di 1000 MHz diviene necessario descrivere la zona di integrazione in termini di un volume piatto costituito da pelle e tessuto sottocutaneo, fino allo spessore di penetrazione. Questa forma di valutazione permette una ragionevole transizione ai limiti di esposizione adottati per la radiazione infrarossa. Inoltre, la limitazione a 200 mA della corrente che fluisce verso terra attraverso il corpo umano permette di evitare l'eccessivo riscaldamento dei polsi o delle caviglie che può verificarsi in particolari situazioni (Gandhi et al. 1985, Gandhi 1985, Guy e Chou 1985). Sulla base dei dati attualmente disponibili, questa limitazione, unitamente ai limiti di esposizione, dovrebbe essere sufficiente a prevenire eccessive deposizioni di energia a RF in qualsiasi parte del corpo. I limiti derivati raccomandati per l'esposizione della popolazione dovrebbero, inoltre, essere sufficienti a fornire adeguata protezione nella maggior parte delle situazioni normalmente incontrate in pratica.

Molti effetti biologici osservati sembrano dipendere dai tassi di deposizione di energia. Per esempio, è stata dimostrata l'esistenza di relazioni tra l'energia assorbita e gli innalzamenti di temperatura. Queste relazioni dipendono dai meccanismi di termoregolazione e di adattamento nelle diverse condizioni ambientali. Queste modificano la relazione tra l'energia assorbita e il generalizzato innalzamento della temperatura corporea.

Inoltre, la deposizione di energia non e' uniforme e possono instaurarsi significativi gradienti localizzati di temperatura che rendono difficile la previsione di effetti. Per indicatori biologici quali il livello di catarattogenicit  nell'occhio e' stata stabilita una soglia durata di esposizione-intensit . Al di sopra di questa soglia e' stata osservata una relazione dose totale-effetto. Sono evidenti relazioni piu' complesse per gli effetti biologici per cui non esiste nessuna apparente relazione dose-effetto come, per esempio, effetti sul sistema immunitario o sull'efflusso di ioni calcio dal tessuto cerebrale, che sopravvengono in determinate finestre di frequenza o potenza (National Council on Radiation Protection and Measurements 1986).

Non esistono, per gli effetti biologici, condizioni di esposizione soglia che siano applicabili ad esseri umani esposti a tutti gli intervalli di frequenze ed a tutte le possibili frequenze di modulazione. Di conseguenza, nei limiti di esposizione devono essere incorporati fattori di sicurezza volti a tener conto non solo dell'insufficienza dei dati scientifici, ma di tutte le possibili condizioni nelle quali puo' realizzarsi l'esposizione. Le variabili considerate nello sviluppo dei fattori di sicurezza sono state:

(a) l'assorbimento di energia elettromagnetica da parte di individui aventi taglie diverse, con particolare

riferimento all'assorbimento risonante di energia del corpo intero o di sue parti (Grandolfo et al. 1983, Gandhi 1982, Gandhi e Chatterjee 1982, Gandhi et al. 1985, Gandhi 1985, Guy e Chou 1985, S.S. Stuchly et al. 1986, M.A. Stuchly et al. 1986).

(b) L'insufficiente conoscenza delle relazioni esistenti tra valore di picco del SAR ed effetti biologici osservati.

(c) Le condizioni ambientali: i limiti di esposizione devono essere efficaci anche in condizioni estreme di temperatura, umidità ed areazione (Mumford 1970, Tell e Harlen 1979).

(d) La riflessione, la focalizzazione e la diffusione dei campi incidenti aventi modalità tali da aumentare l'assorbimento (Gandhi 1977).

(e) La possibile risposta alterata di individui che assumono farmaci (National Council on Radiation Protection and Measurements 1986).

(f) I possibili effetti combinati dell'energia elettromagnetica a RF e di sostanze chimiche o altri agenti fisici presenti nell'ambiente (Czerski 1986).

(g) I possibili effetti sul sistema nervoso centrale di campi a microonde modulati e la possibile esistenza di finestre in "potenza" e "frequenza" per gli effetti stessi (National Council on Radiation Protection and Measurements 1986).



(h) I possibili effetti non termici (Illinger 1981, Schwan 1982a, Grundler et al. 1982, Grandolfo et al. 1983, National Council on Radiation Protection and Measurements 1986).

Attualmente le conoscenze relative ai punti (e), (f), (g) e, in particolare, (h) sono insufficienti a fornire una valutazione del rischio sanitario o a determinare se questi effetti presentino un potenziale interesse sanitario.

Per l'esposizione dei lavoratori e' stato scelto un intervallo di tempo di integrazione di 6 minuti e lo stesso intervallo e' consigliato per verificare l'applicazione dei limiti di esposizione per la popolazione.

Si e' considerato di fondamentale importanza che i limiti di esposizione dovessero proteggere tanto da pericoli fisici diretti quanto da effetti biologici nocivi. Anche se le scosse a RF causano normalmente effetti che possono andare da semplici inconvenienti a gravi bruciature del tessuto, potrebbero instaurarsi situazioni in cui tali scosse o bruciature potrebbero essere in grado di provocare incidenti dalle conseguenze piu' serie. Non e' possibile prevedere, o indicare, precise strategie di protezione dalle bruciature a RF poiche' molto dipende dalle reali configurazioni e condizioni.

La soglia per una bruciatura a RF per contatto di un dito con una superficie conduttrice e' di 200 mA (National Council on Radiation Protection and Measurements 1986).

Misure dirette della corrente che fluisce attraverso un soggetto verso terra o un oggetto, ottenute utilizzando un semplice amperometro, sono sufficienti a determinare la massima corrente che puo' generarsi in una particolare situazione. Correnti minori di 50 mA si possono considerare sicure.

Per l'esposizione della popolazione sotto 10 MHz, il Comitato ha ritenuto che i limiti di esposizione dovessero essere cosi' bassi da non provocare scosse a RF, poiche' sarebbe totalmente irragionevole richiedere alla popolazione stessa di prendere precauzioni atte ad evitare simili scosse.

Il Comitato ha considerato i recenti dati che correlano l'esposizione al campo elettrico e magnetico all'aumento di rischio di cancro o di anomalie congenite in diverse popolazioni esposte (vedere, per una rassegna, UNEP/WHO/IRPA 1987). I dati disponibili non sono conclusivi e non possono essere utilizzati per stabilire limiti di esposizione.

## APPENDICE 2

### MISURE DI PROTEZIONE

La responsabilita' della protezione dei lavoratori e della popolazione dai potenziali effetti nocivi derivanti da

esposizione ai campi a RF deve essere chiaramente assegnata ad un dipartimento, ad un'agenzia o ad un singolo individuo. Tale responsabilita', a livello nazionale, deve includere:

(a) Lo sviluppo e l'adozione di limiti di esposizione e l'attuazione di un programma di conformita'.

(b) Lo sviluppo di standard di funzionamento e di emissione limitanti l'esposizione da singoli apparati. Questi limiti di emissione devono derivare da quelli di esposizione. Deve anche essere effettuata una valutazione della protezione dalle emissioni da apparecchiature ed installazioni gia' esistenti o di nuova fabbricazione.

(c) Le sorgenti a RF possono essere classificate in termini di potenza in uscita e possono essere sviluppate linee guida per ogni particolare classe. Le sorgenti di bassa potenza, in cui i livelli di emissione non possono superare i limiti di esposizione, possono formare una classe "in esenzione", cioe' una classe per cui non e' necessaria alcuna precauzione.

(d) La richiesta che controlli di emissione siano incorporati nelle apparecchiature prodotte industrialmente, in modo da evitare che la sicurezza dipenda solo dalle istruzioni o dalle etichette. Un progetto delle apparecchiature che tenga conto dei problemi della sicurezza permette di ridurre al minimo l'uso di ulteriori mezzi di protezione.

(e) La stesura di linee guida, o guide tecniche, per gli utilizzatori o per gli operatori sull'uso corretto dell'energia elettromagnetica a RF.

(f) Lo sviluppo di procedure di misura e di tecniche di indagine standard.

(g) La corretta istruzione dei lavoratori e della popolazione sugli effetti dell'esposizione a radiazioni a radiofrequenza e sulle misure protettive da assumere.

A livello operativo devono essere svolte le seguenti azioni:

(a) Devono essere condotte indagini in tutte le installazioni e su tutti i dispositivi probabili emettitori di radiazione a RF eccedente i limiti accettati. Molte sorgenti di radiazione a RF emettono in modo non confinato (emissioni radio, TV, radar e simili) e le loro radiazioni si propagano su vaste aree. Prima di scegliere un sito sono necessari uno studio appropriato ed un'attenta analisi dell'impatto sanitario ed ambientale. Ad installazione effettuata, i valori calcolati della distribuzione dei campi elettromagnetici devono essere verificati mediante misure sperimentali. Per un'accurata selezione del sito e' necessario definire l'uso ed il tipo di occupazione delle aree circostanti. Puo' essere utile che le zone siano chiaramente definite mediante appropriati cartelli di avvertimento.

(b) I resoconti delle indagini devono essere conservati e devono includere tutti i dettagli delle condizioni di esposizione e, nei casi in cui fossero superati i limiti di esposizione, le indicazioni dei modi e dei mezzi atti a ridurre i livelli. Le raccomandazioni per la riduzione delle esposizioni a livelli accettabili devono essere messe in atto il piu' presto possibile.

(c) Richiedere che tutti i lavoratori nel campo delle radiazioni a RF familiarizzino con le procedure di sicurezza o con le guide tecniche locali.

(d) Assicurare che le procedure operative siano tali che l'uso di strumenti protettivi da parte del personale (occhiali speciali, caschi, tute) sia l'ultima risorsa.

Una piu' completa descrizione delle misure da adottare per la protezione dei lavoratori da radiazioni a RF e' fornita nella pubblicazione International Labour Office (1986). Non esistono specifiche indicazioni per la sorveglianza medica dei lavoratori a RF, per cui valgono le regole generali stabilite dall'ILO nella Convenzione 161 del 1985 sui servizi sanitari negli ambienti di lavoro.

## BIBLIOGRAFIA

- American National Standards Institute. American national standards safety levels with respect to human exposure to radiofrequency electro-magnetic fields, 300 kHz to 100 GHz. IEEE, New York, N.Y. 10017, ANSI C95-1-1982; 1982.
- Budinger, T.F.; Pavlicek, W.; Faul, D.D.; Guy, A.W. RF heating at 1.5 tesla and above in proton NMR imaging. Abstract from the 4th Annual Meeting of the Society of Magnetic Resonance in Medicine, 19-23 August 1985. London, United Kingdom; pp. 916-917. Available from: Society of Magnetic Resonance in Medicine, 15 Shattuck Square, # 204, Berkeley, CA 94704.
- Czerski, P. The development of biomedical approaches and concepts of radiofrequency radiation protection. J. Microwave Power 21:9-23;1986.
- Durney, C.H.; Johnson, C.C.; Barber, P.W.; Massoudi, H.; Iskander, M.F.; Lords, J.L.; Ryser, D.K.; Allen, S.J.; Mitchell, J.C. Radiofrequency radiation dosimetry handbook, 2nd ed. 141 p. Brooks AFB, TX: U.S. Air Force School of Aerospace Medicine Report No. SAM-TR-78-22; 1978.
- Durney, C.H.; Massoudi, H.; Iskander, M.F. Radiofrequency radiation dosimetry handobok, 4th ed. 510 p. Brooks AFB, TX: U.S. Air Force School of Aerospace Medicine; Report No. SAM-TR-85-73; 1986.

- Elder, J.A.; Cahill, D.F. Biological effects of radiofrequency radiation. United States Environmental Protection Agency. Research Triangle Park, NC; EPA-600/8-83/026F; 1984.
- Foster, K.R.; Kritikos, H.N.; Schwan, H.P. Effects of surface cooling and blood flow on the microwave heating of tissues. IEEE Trans. BME-27; 313-323; 1978
- Gandhi, O.P.; Hunt, E.L.; D'Andrea, J.A. Electromagnetic power deposition in man and animals with and without ground and reflector effects. Radio Sci. 12-6S:39-47; 1977.
- Gandhi, O.P. Electromagnetic radiation absorption in an inhomogeneous model of man for realistic exposure conditions. Bioelectromagnetics 3:81-90; 1982.
- Gandhi, O.P.; Chatterjee I. Radiofrequency hazards in the VLF to MF bands. Proc. I.E.E.E., 70:1462-1469; 1982.
- Gandhi, O.P.; Chatterjee I.; Wu, D.; Gu, Y.G. Likelihood of high rates of energy deposition in the human legs at the ANSI recommended 3-30 MHz RF safety levels. Proc. IEEE, 73:1145-47; 1985.
- Gandhi, O.P. The ANSI RF safety guideline; its rationale and some of its problems. In: Dutta, S.K.; Millis, R.M., eds. Biological effects of electropollution. Philadelphia, PA; Information Ventures; 1985; pp. 9-19.
- Grandolfo, M.; Michaelson, S.M.; Rindi, A. Biological effects and dosimetry of non-ionizing radiation.

- Radiofrequency and microwave energies. New York, N.Y.; Plenum Press. 669 p.; 1983.
- Grundler, W.; Keilmann, F.; Putterlik, V.; Strube, D. Resonant-like dependence of yeast growth rate on microwave frequencies. *Brit. J. Cancer* 45 (supp. V): 206-208; 1983.
- Guy, A.W.; Chou, C.K. Very low frequency hazard study. Final Report prepared for the USAF School of Aerospace Medicine, Brooks AFB, TX, Contract F33615-83-C-0625; 1985. Available from USAF School of Aerospace Medicine.
- Illinger, K.H. Biological effects of non-ionizing radiation. ACS Symposium Series No. 157, 342 pp. Washington, DC; American Chemical Society; 1981.
- International Labour Office. Protection of workers against radiofrequency and microwave radiation: a technical review. Occupational Safety and Health Series No 57, 72 pp. Geneva; ILO; 1986.
- International Radiation Protection Association/International Non-Ionizing Radiation Committee. Interim guidelines on limits of exposure to radiofrequency electromagnetic fields in the frequency range from 100 kHz to 300 GHz. *Health Phys.*, 46:975-984; 1984
- International Radiation Protection Association/International Non-Ionizing Radiation Committee. Review of concepts, quantities, units, and terminology for non-ionizing radiation protection. *Health Phys.* 49:1329-1362; 1985.



- Justesen, D.R. Behavioural and psychological effects of microwave radiation. Bull. N. Y. Acad. Med. 55:1058-1078; 1979.
- Mumford, W.W. Heat stress due to R.F. radiation. In: Cleary, S.F., ed. Biological effects and health implications of microwave radiation. U.S. Department of Health, Education and Welfare, Rockville, M.D; Publication BRH/DBE 70-2; 1970; pp. 21-34.
- National Council on Radiation Protection and Measurements. Radiofrequency electromagnetic fields: properties, quantities and units, biophysical interaction, and measurements. NCRP Report No. 67. 134 p. Bethesda, MD; NCRP; 1981.
- National Council on Radiation Protection and Measurements. Biological effects and exposure criteria for radiofrequency electromagnetic fields. NCRP Report No. 86. 382 p. Bethesda, MD; NCRP; 1986.
- Polk, C.; Postow, E. Handbook of biological effects of electromagnetic fields. 503 p. Boca Raton, FL; CRC Press; 1986.
- Schwan, H.P. Microwave and RF hazard standard considerations. J. Microwave Power 17:1-9; 1982(a).
- Schwan, H.P. Nonthermal cellular effects of electromagnetic fields: AC-field induced ponderomotoric forces. Brit. J. Cancer 45 (supp.V); 220-224; 1982(b).

- Spiegel, R.J. A review of numerical models for predicting the energy deposition and resultant thermal response of humans exposed to electromagnetic fields. IEEE Trans. Microwave Theory Tech. MTT-32:730-746; 1984(a).
- Stuchly, M.A.; Kraszewski, A.; Stuchly, S.S. Exposure of human models in the near and far field - A comparison. IEEE Trans., BME-32:609-616; 1985.
- Stuchly, S.S.; Stuchly, M.A.; Kraszewski, A.; Hartsgrove, G. Energy deposition in a model of man; frequency effects. IEEE Trans., BME-33:702-711; 1986.
- Stuchly, M.A.; Spiegel, R.J.; Stuchly, S S.; Kraszewski, A. Exposure of man in the near-field of a resonant dipole: comparison between theory and measurements. IEEE Trans., MTT-34; 26-31; 1986.
- Tell, R.A.; Harlen F. A review of selected biological effects and dosimetric data useful for development of radiofrequency safety standards for human exposure. J. Microwave Power 14:405-424; 1979
- United Nations Environment Programme/World Health Organization/International Radiation Protection Association. Environmental Health Criteria 16. Radiofrequency and microwaves. 134 p. Geneva: World Health Organization; 1981.
- United Nations Environment Programme/World Health Organization/International Radiation Protection

Association. Environmental Health Criteria 69 Magnetic fields. Geneva; World Health Organization; 1987.

*Direttore dell'Istituto Superiore di Sanità  
e Responsabile scientifico: Francesco Antonio Manzoli*

*Direttore responsabile: Vilma Alberani\**

*Stampato dal Servizio per le attività editoriali  
dell'Istituto Superiore di Sanità, Viale Regina Elena, 299 - 00161 ROMA*

*La riproduzione parziale o totale dei Rapporti e Congressi ISTISAN  
deve essere preventivamente autorizzata.*

*Reg. Stampa - Tribunale di Roma n. 131/88 del 1° marzo 1988*

*\* In attesa di registrazione al tribunale*

*© Istituto Superiore di Sanità*

*Roma, settembre 1989 (n.3) 5° Suppl.*