

# Ipertermia oncologica: valutazione del rischio per esposizioni a campi elettromagnetici

Papotti E., Vaccari S., Valbonesi S., Vanore A.

Servizio di Fisica Sanitaria, Università di Parma  
Servizio di Fisica Sanitaria, Università di Parma  
Consorzio Elettra 2000, Via Celestini 1, Pontecchio Marconi (BO), simona@mail.elettra2000.it  
Servizio di Prevenzione e Sicurezza Ambienti di Lavoro, AUSL Reggio Emilia

## Abstract

*In ambito oncologico l'ipertermia è una modalità terapeutica che consiste nella somministrazione selettiva di calore ad un tessuto tumorale al fine di portare a necrosi le cellule neoplastiche innalzando la temperatura loco-regionale fino a 42-45°C. Caratterizzata da bassa invasività, viene utilizzata in combinazione alle classiche tecniche di chemio e radioterapia per il trattamento di tumori profondi a carico di fegato, polmone, cervello, pancreas ed apparato genitale femminile. Il sistema consiste in un generatore di onde a radiofrequenza dotato di applicatori ad uso differenziato corrispondenti a diverse situazioni di utilizzo e dimensioni di organi o superfici da trattare. La pratica dell'ipertermia pone problemi di esposizione professionale a campi elettromagnetici per il personale medico o infermieristico.*

*Il lavoro in oggetto ha come scopo la valutazione della esposizione a carico del personale operante presso le strutture per ipertermia oncologica attraverso misure di campo elettrico, magnetico, correnti indotte attraverso gli arti ed infine valutazioni di SAR.*

*I livelli misurati e le successive valutazioni numeriche effettuate sono stati messi a confronto con i relativi limiti riportati nel DLgs. 81/2008. I risultati hanno messo in evidenza notevoli superamenti dei valori di azione sia per il campo elettrico che per il campo magnetico in un intorno dell'applicatore di raggio circa 1 metro ed un superamento dei limiti definiti per SAR a corpo intero.*

## Introduzione

L'ipertermia oncologica è un trattamento consistente nell'innalzare selettivamente la temperatura interna di un tessuto neoplastico fino a raggiungere valori di 42-45 °C. Viene utilizzato, in supporto alla terapia oncologica tradizionale, per il trattamento specifico di tumori profondi a carico del fegato, del cervello, del pancreas e dell'apparato genitale femminile. La combinazione tra ipertemia e trattamento oncologico standard porta ad una maggior efficacia del trattamento chemioterapico a parità di dosaggio senza provocare effetti collaterali.

L'apparato è costituito da un generatore di radiofrequenze tipicamente a 13.56 MHz con potenze dell'ordine di qualche centinaio di Watt, dotato un set di piastre ad uso differenziato che corrispondono a differenti situazioni di utilizzo e dimensioni di organi o superfici da trattare. Lo schema caratterizzante l'apparato è descritto nella figura sottostante;

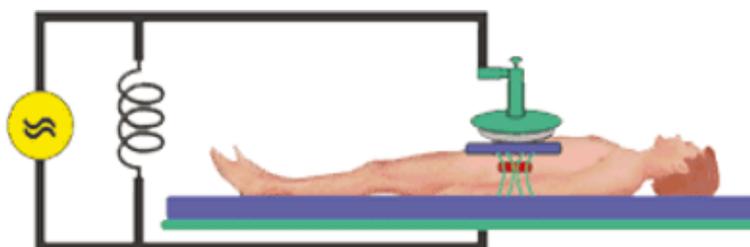


Fig. 1 – Apparato per ipertermia oncologica

La radiofrequenza viene generata all'interno di una cabina in cui si trovano sia il generatore, sia l'elettronica di controllo ed il calore prodotto viene diffuso attraverso le piastre nel corpo del paziente.

Dal punto un punto di vista protezionistico, va sottolineato che l'esposizione al campo a radiofrequenza non è limitata alla zona bersaglio; il campo diffuso dalla piastra può provocare livelli di esposizione anche elevata negli operatori che si vengano a trovare nelle immediate vicinanze dell'apparato.

Scopo del lavoro è la valutazione, attraverso misure in loco e calcoli numerici della esposizione a carico del personale operante su questa tipologia di apparati, e di definire, all'interno della sala trattamenti aree a diverso impatto espositivo.

## Materiali e metodi

Ai fini della valutazione dell'esposizione a campi elettromagnetici a radiofrequenza, secondo quanto stabilito dalla normativa vigente; D.Lgs. n. 81/08 – Capo I, sono state effettuate misure di:

- analisi di spettro delle frequenze impegnate (dati ottenuti da indicazioni del costruttore);
- intensità campo elettrico  $E$  (V/m), del campo magnetico  $H$  (A/m), della densità di potenza di onda piana  $S_{eq}$  (W/mq)

Per le misure di campo a radiofrequenza è stato utilizzato il misuratore a larga banda PMM8053A equipaggiato con sonda EP330 in grado di rilevare l'intensità di campi elettromagnetici nel range 100 kHz – 3 GHz, lineare tra 10 e 300 MHz, con sensibilità 0.3 V/m e risoluzione pari a 0.01 V/m. Lo strumento, durante la sessione di misura è stato posto su un apposito cavalletto dielettrico, così da non generare accoppiamenti del tipo sonda-sorgente. Le misure sono state effettuate seguendo le indicazioni riportati nelle linee guida CEI 211-7 "*Guida per la misura e la valutazione dei campi elettromagnetici nell'intervallo di frequenza 10 kHz – 300 GHz, con riferimento all'esposizione umana*" [1]. Gli stessi tecnici incaricati di eseguire le misure si sono mantenuti a debita distanza dalla sonda per non creare interferenze entro il campo elettrico  $E$ .

Sono stati registrati i valori medi di campo elettrico e magnetico su un periodo di 6 minuti, i valori massimi ed è stato effettuata un'analisi sulla forma dei segnali finali al fine di verificare l'eventuale presenze nel segnale di spikes.

L'indagine è stata condotta prevedendo la registrazione dei livelli di campo elettrico e di corrente indotta attraverso gli arti, in una serie di punti rappresentativi della reale esposizione per i lavoratori, sia all'interno della sala trattamenti che in permanenze significative. Gli stessi punti, con interasse di 10 cm, vanno ad unire una linea di percorso che unisce il centro dell'applicatore alla porta di ingresso, attraversando gran parte della stanza.

La sessione di misura si è svolta nel corso di una terapia su torace in paziente di sesso maschile con i seguenti parametri clinici impostati:

- Potenza applicata: 470 W
- Durata del trattamento: 75 minuti
- Altezza antenna applicatore rispetto al pavimento: 100 cm
- Temperatura ambientale: 27 °C

Le misure di campo elettrico sono state effettuate ad una altezza di 100 e 150 cm, ponendo lo strumento in modalità min-Max RMS per un tempo pari a 6 minuti, così come prescritto nelle Linee Guida CEI 211-7. I dati rilevati dallo strumento sono stati salvati in formato testo ed elaborati tramite foglio elettronico al fine di ottenere: valore medio del campo elettrico su sei minuti, valori di picco, andamento del segnale atto a verificare l'eventuale presenza di spikes ad elevata intensità e brevissima durata

## Parametri radiometrici e dosimetrici valutati

Per caratterizzare la sorgente, sono stati inizialmente misurati i livelli di campo elettrico e magnetico separatamente, effettuando registrazioni strumentali di 6 minuti ciascuna e considerando il valore medio sul tempo di misura. Successivamente si è provveduto a misurare i livelli di corrente indotta attraverso gli arti ed infine a valutare i parametri dosimetrici relativi alla tipologia di esposizione.

Nello specifico si è proceduto con:

- analisi della forma del segnale a radiofrequenza;
- andamento del campo E e del campo H lungo la diagonale di spostamento;
- valutazione dei livelli di campo E e campo H presso le due postazioni VDT occupate rispettivamente da medico ed infermiera;
- valutazione del SAR a corpo intero;
- valutazione del SAR a livello degli arti inferiori e superiori.

Tutti i valori misurati sono stati confrontati con i valori di azione riportati nella tabella 2 dell' allegato XXXVI del D.Lgs. n. 81/08 [2].

Sulla base di quanto emerso dalle valutazioni strumentali e numeriche verranno identificate nella sala trattamenti e nelle zone adiacenti quattro aree distinte, delimitate da quattro diversi colori:

- VERDE o *Safety zone* : zona in cui i valori di campo elettrico e di corrente indotta risultano essere inferiori ai valori di azione, quella tutela della salute dei lavoratori. (VA)
- GIALLA o *Yellow zone*: zona in cui c'è superamento dei valori di azione ma non dei valori limite di esposizione (VL), quelli a tutela della salute dei lavoratori. Per accedere a questa zona occorre avere ricevuto la necessaria formazione
- ROSSA o *Red zone* zona in cui si verifica il superamento dei valori limite di esposizione occupazionale. L'accesso a questa zona deve essere segnalato e autorizzato previa specifica procedura di lavoro al fine di limitare gli effetti a breve sulla salute
- BIANCA o *Safety*: zona in cui non vengono superati i limiti di esposizione, quelli riferiti alla popolazione e riportati nel DPCM 8 luglio 2003 [3].

## Valutazione numerica del SAR

L'apparato genera campi a radiofrequenza a 13.56 MHz; a questa frequenza gli effetti predominanti sono di natura termica, i meccanismi di interazione sono noti e gli effetti biologici sono correlati con la densità di potenza assorbita, oppure, in modo del tutto equivalente, con la densità di corrente:

$$J = \sqrt{\sigma P} \quad (1)$$

dove  $\sigma$  è la conducibilità elettrica del corpo esposto dipendente dalla quantità di acqua contenuta nei singoli tessuti biologici, dalle architetture cellulari e dalla frequenza del segnale somministrato. La valutazione dosimetrica viene effettuata attraverso il calcolo del SAR, che esprime la potenza assorbita per unità di massa ed è definito come:

$$SAR = \frac{\sigma E^2}{2\rho} \quad (2)$$

Dove:

$E$  è il valore di picco del campo elettrico misurato in V/m

$\sigma$  è la conducibilità elettrica del tessuto biologico

$\rho$  è la densità del tessuto biologico

Entrambi i parametri  $\sigma$  e  $\rho$  sono dipendenti dal tipo di tessuto oggetto di indagine, di conseguenza, preliminarmente alla valutazione della grandezza dosimetrica SAR occorre effettuare una valutazione sia della conducibilità elettrica che della densità tissutale.

Per la valutazione della conducibilità elettrica abbiamo approssimato il corpo intero ad un tessuto ad alto contenuto di acqua, quale il tessuto muscolare; questa tipologia di approssimazione in una valutazione preliminare del SAR può essere considerata corretta in quanto sicuramente tende a massimizzarne il valore, oltre a questo poi verranno effettuate valutazioni tessuto-dipendenti.

I valori di  $\sigma$  alle frequenze oggetto di indagine sono stati estrapolati tramite il modulo interattivo sviluppato dall'IFAC CNR [4] sulla base del modello parametrico per il calcolo delle proprietà dielettriche dei tessuti biologici sviluppato da Gabriel [5]

$$\sigma_{13.56} = 0.628 \text{ S/m}$$

Il valore del parametro  $\rho$  invece varia al variare della tipologia di tessuto. Ai fini della valutazione della grandezza dosimetrica SAR i valori di suddetto parametro sono stati scelti facendo riferimento al fantoccio matematico GOLEM [6] sviluppato al GSF da M. Zankl; un modello a voxel di maschio adulto con 122 organi e tessuti distinti. Le composizioni e densità tissutali tipicamente considerate nel GOLEM sono riportati in tabella 1.

**Tabella 1.** Valori di  $\rho$  per differenti tessuti

<b>Tessuto</b>	<b><math>\rho</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Polmoni	0.260
Osso	1.920
Midollo osseo rosso	1.030
Tessuti molli	1.050
Muscolo	1.050
Midollo osseo giallo	0.980
Adipe	0.950

Nella valutazione, coerentemente al modello sviluppato, finalizzato alla massimizzazione della grandezza dosimetrica SAR, sono stati scelti come riferimenti per la conducibilità elettrica il tessuto muscolare e il tessuto molle per i quali  $\rho = 1.050 \text{ g/cm}^3$

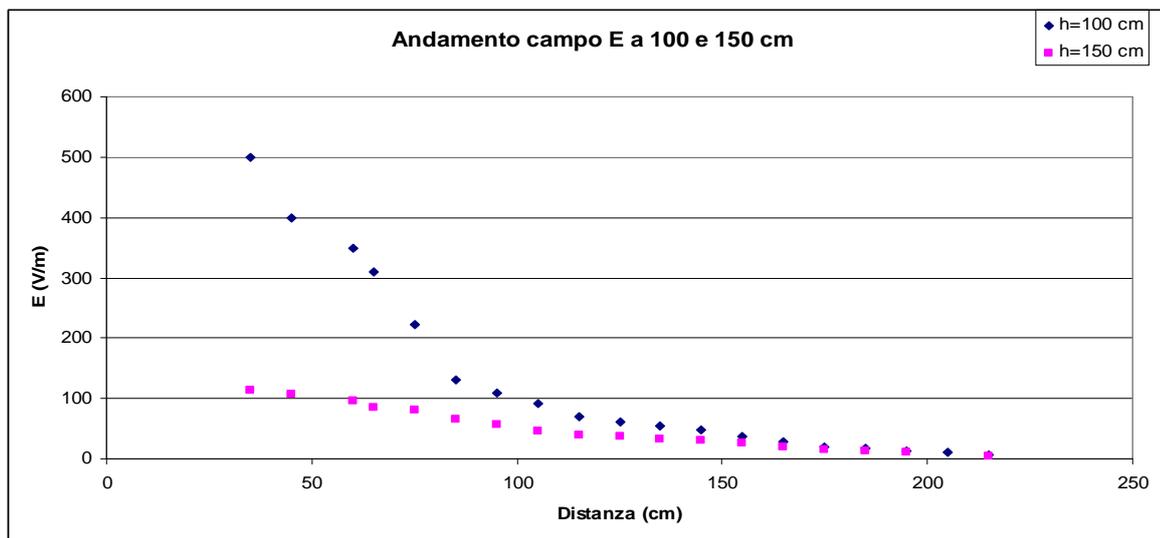
Il calcolo del SAR è stato effettuato utilizzando la formula riportata in (2), nella quale sono stati inseriti i due parametri  $\sigma$  e  $\rho$  ricavati tramite i fantocci numerici e i valori di campo elettrico misurati ad una altezza di 100 e 150 cm dal piano di calpestio. Il calcolo del SAR agli arti è stato effettuato inserendo nella relazione (2) i valori di  $\sigma$  e  $\rho$  corrispondenti alle tipologie di tessuto che compongono un arto; nella fattispecie tessuto muscolare, tessuto osseo spugnoso e midollo osseo rosso.

## Risultati

Il campo elettrico è stato misurato partendo da una distanza minima di 40 cm dal centro dell'antenna utilizzata per il trattamento in ipertermia. Non è stato possibile effettuare misure a distanze inferiori a 40 cm a causa del verificarsi di una situazione di over range strumentale. I

valori di campo elettrico sono stati pertanto dedotti attraverso uno studio in regressione logaritmica.

Le misure strumentali sono state effettuate lungo una direzione diagonale con interasse di 10 cm e fino a 215 cm dalla sorgente corrispondenti alla porta di accesso alla sala trattamenti, oltre a queste misure sono stati fatti rilievi anche in particolari pertinenze (postazioni VDT, accettazione, spogliatoi, ecc). I valori numerici ottenuti tramite misurazione diretta sono riportati in figura 2.



**Figura 2.** Andamento campo elettrico a 4 diverse altezze dal piano di calpestio

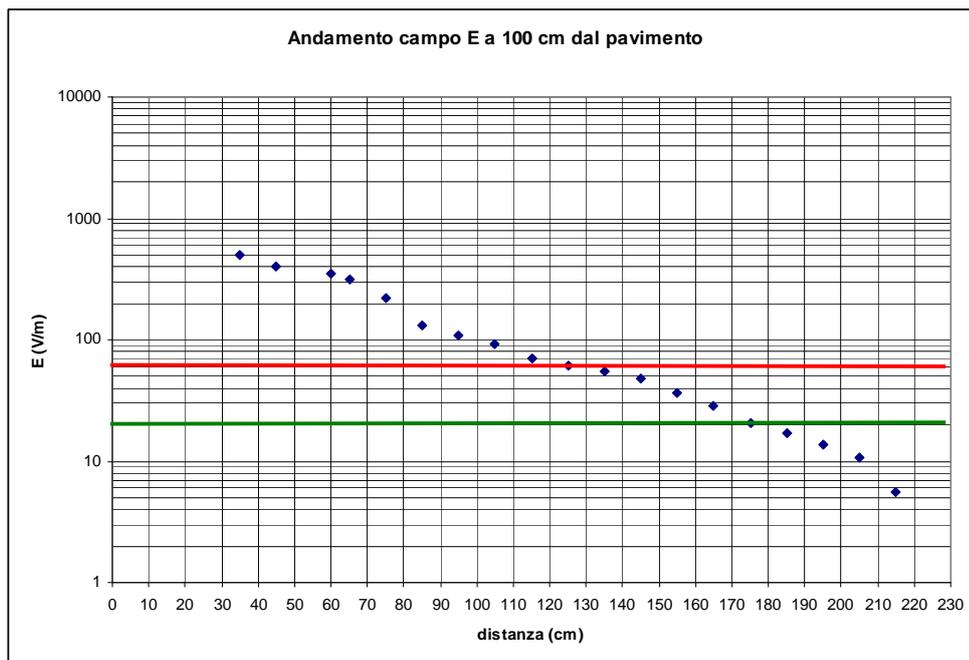
Per quanto riguarda i punti più vicini alla sorgente, per l'indagine a 100 cm di altezza si è resa necessaria una regressione logaritmica per estrapolare i valori a 35 – 45 – 60 cm dall'applicatore. I valori ottenuti sono riportati in tabella 2

**Tabella 2.** Valori di campo ottenuti da regressione logaritmica

Regressione Logaritmica		
Distanza da antenna	Altezza dal piano calpestio (cm)	E (V/m)
0 cm	100	1200
35 cm	100	500
45 cm	100	400
60 cm	100	380

Il campo elettrico, come atteso, decresce allontanandosi dall'applicatore lungo la diagonale; ad una distanza di circa 125 cm dal punto caldo i valori del campo E misurati risultano al disotto dei valori di azione citati nel D.Lgs. n. 81 pari a 61 V/m per campi di frequenza compresa nel range 10 -110 MHz. Risultano invece rispettati i limiti riferiti alla popolazione ad una distanza dall'applicatore pari a 180 cm. Il grafico in figura 3 mostra, in rappresentazione logaritmica i livelli di campo elettrico misurati e confrontati con i valori di azione riportati nel D.Lgs 81/2008 (linea rossa) e nel D.P.C.M 8 luglio 2003 (linea verde) a 100 cm di altezza dal piano di calpestio.

I valori ottenuti per il SAR a corpo intero relativi ad una altezza di 100 cm dal piano di calpestio sono riportati in tabella 3 e confrontati direttamente con il limite indicato nel Testo Unico (0.40 W/kg)

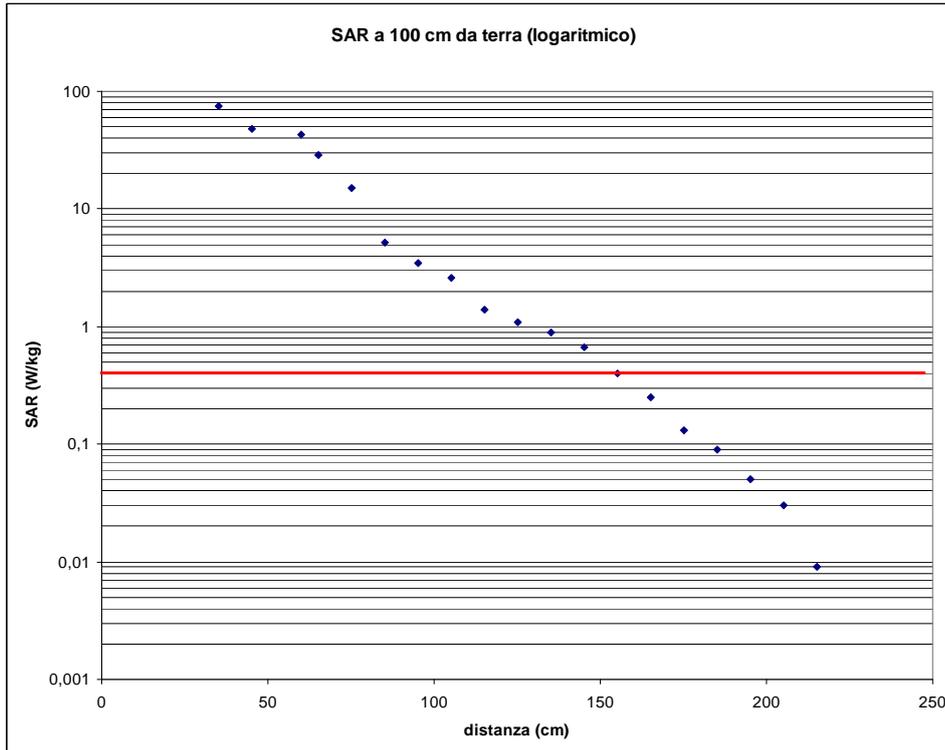


**Figura 3.** Livelli di campo elettrico confrontati con limiti e valori di azione

**Tabella 3.** SAR a corpo intero per posizioni interno sala (altezza 100 cm)

Distanza da antenna	$E_{mis}$ (V/m)	WB - SAR <sub>10</sub> (W/kg)	Confronto con limite
35 cm	500	74.8	Superiore fattore 200
45 cm	400	47.8	Superiore fattore 100
60 cm	380	43.2	Superiore fattore 100
65 cm	310	28.7	Superiore fattore 70
75 cm	223.40	14.9	Superiore fattore 40
85 cm	131.90	5.2	Superiore
95 cm	108.20	3.5	Superiore
105 cm	92.50	2.6	Superiore
115 cm	69.60	1.4	Superiore
125 cm	62.00	1.1	Superiore
135 cm	55.09	0.9	Superiore
145 cm	47.5	0.67	Superiore
155 cm	36.6	0.4	Comparabile
165 cm	28.8	0.25	Inferiore
175 cm	20.7	0.13	Inferiore
185 cm	17.2	0.09	Trascurabile
195 cm	13.5	0.05	Trascurabile
205 cm	10.8	0.03	Trascurabile
215 cm	5.5	0.009	Trascurabile

Il SAR calcolato è superiore ai limiti riportati nel Testo Unico fino ad una distanza di circa 155 cm dal punto caldo; tale zona dovrebbe essere segnalata tramite una linea tracciata sul pavimento ed essere resa non accessibile ad apparato acceso. Sono stati calcolati anche i valori di SAR a corpo intero relativi alle misure effettuate ad una altezza di 150 cm dal piano di calpestio; in questo caso i valori rimangono superiori ai limiti fino ad una distanza di 115 cm dall'antenna.



**Figura 4.** Andamento del SAR in funzione della distanza (rappresentazione logaritmica)

Per la valutazione del SAR a livello di arti superiori sono stati utilizzati i valori di campo elettrico ottenuti tramite misurazione ponendo lo strumento ad una altezza di 100 cm; i risultati ottenuti sono riportati in tabella 4

**Tabella 4.** SAR localizzato agli arti superiori

Distanza da antenna	$E_{mis}$ (V/m)	SAR <sub>muscolo</sub> (W/kg)	SAR <sub>midollo</sub> (W/kg)	SAR <sub>osso</sub> (W/kg)
35 cm	500	74.8	15.7	0.8
45 cm	400	47.8	10.02	0.5
60 cm	380	43.2	9.04	0.5
65 cm	310	28.7	6.02	0.3
75 cm	223.40	14.9	3.13	0.2
85 cm	131.90	5.2	1.09	0.06
95 cm	108.20	3.5	0.7	0.04
105 cm	92.50	2.6	0.5	0.03
115 cm	69.60	1.4	0.3	0.02
125 cm	62.00	1.1	0.2	0.02
135 cm	55.09	0.9	0.2	0.01
145 cm	47.5	0.67	0.14	0.01
155 cm	36.6	0.4	0.08	0.004
165 cm	28.8	0.25	0.05	0.003
175 cm	20.7	0.13	0.03	0.001
185 cm	17.2	0.09	0.02	0.001

A livello di tessuto muscolare, il SAR calcolato risulta superiore al limite di 20 W/kg riportato nel Testo Unico fino ad una distanza di circa 70 cm dall'antenna.

Nel caso del midollo osseo rosso e dell'osso spugnoso, il valore limite non viene invece mai superato per nessuna distanza. Per quanto concerne gli arti inferiori le misure, effettuate ad una

altezza di 10 cm non hanno messo in evidenza superamenti, così come non sono stati evidenziati superamenti dei livelli di corrente indotta attraverso gli arti.

## Considerazioni

Al fine di valutare in modo rapido ed immediato l'esposizione dei lavoratori addetti all'ipertermia oncologica, sono state effettuate misure in una serie di punti a diverse distanze dall'applicatore. Queste posizioni, in genere durante lo svolgimento di sedute terapeutiche rimangono vuote, in quanto, in situazioni di routine medici ed infermieri si ritirano all'esterno della sala trattamenti. L'esposizione si ha quindi solo ed esclusivamente nel momento in cui il medico si avvicina all'apparato e lo accende e quando effettua lo spegnimento. Le misure effettuate a quattro diverse altezze hanno rilevato valori medi di campo elettrico che superano i valori di azione riportati nel Testo Unico fino ad una distanza di circa 130 cm dall'apparato; a questa distanza sono superati anche i limiti di esposizione calcolati sulla base del SAR. Sulla base dei dati rilevati e delle valutazioni numeriche è possibile individuare le seguenti zone:

- una zona verde o safety zone per i professionalmente esposti che si trova a circa 155 cm dall'applicatore. Al di là di questa zona non sono superati né i limiti né i valori di azione riportati nell'allegato XXXVI del Testo Unico.
- una zona rossa in cui sono superati sia i limiti sia i valori di azione riportati nell'allegato XXXVI del Testo Unico, descrivibile come un cerchio di raggio 155 cm centrato sull'applicatore. L'accesso a questa zona deve essere segnalato e autorizzato previa specifica procedura di lavoro al fine di limitare gli effetti a breve sulla salute
- la zona bianca in cui non vengono superati i limiti di esposizione per la popolazione generale riportati nel DPCM 8 luglio 2003 si trova a 175 cm di distanza dall'applicatore. Ne consegue che durante i trattamenti agli accompagnatori dovrebbe essere vietato l'accesso alla sala.
- Le pertinenze esterne sono da considerarsi sicure sia per i professionalmente esposti che per la popolazione generale

Se si considera il SAR riferito agli arti, un superamento potrebbe riguardare solo le operazioni di accensione/spegnimento dell'apparato o di manovre sul paziente, a macchina accesa, con inserimento delle mani in prossimità o a contatto con la piastra. Tutte le altre situazioni sono da considerarsi sicure.

## Bibliografia

- [1] Comitato Elettrotecnico Italiano Linee Guida 211-7 Guida per la misura e per la valutazione dei campi elettromagnetici nell'intervallo di frequenza 10 kHz - 300 GHz, con riferimento all'esposizione umana
- [2] Decreto Legislativo 9 aprile 2008 , n. 81 - Testo Unico - Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro.  
Il testo tiene conto delle modifiche apportate dal decreto legislativo 3 agosto 2009, n. 106.
- [3] DPCM 8 luglio 2003 Fissazione dei limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici generate a frequenze comprese tra 100 KHz e 300 GHz
- [4] Andreuccetti D, Fossi R, Petrucci C, Calculation of the Dielectric Properties of Body Tissues in the frequency range 10 Hz - 100 GHz, - Published in IFAC CNR website
- [5] Gabriel C, Gabriel S. Compilation of the Dielectric Properties of Body Tissues at RF and Microwave Frequencies, - Internet document
- [6] Zankl M, Wittman A 2001 The adult male voxel Golem segmented for whole body CT patient data *Radiat. Environ. Biophys* **40**: 153-162