

Ipertermia oncologica:

valutazione della esposizione degli arti a campi a RF per diverse tipologie di tessuto

Simona Valbonesi⁽¹⁾, Marina Barbiroli⁽²⁾, Mario Frullone⁽¹⁾, Ermanno Papotti⁽³⁾, Silvia Vaccari⁽³⁾, and Andrea Vanore⁽⁴⁾

⁽¹⁾Consorzio Elettra 2000, Pontecchio Marconi, Italy

⁽²⁾Department of Electronics, Computer Sciences and Systems – DEIS – University of Bologna, Bologna, Italy

⁽³⁾Health Physics Service, University of Parma, Parma, Italy,

⁽⁴⁾Arcispedale Santa Maria Nuova, Reggio Emilia, Italy

Introduzione

L'ipertermia è un trattamento clinico utilizzato a supporto della terapia oncologica tradizionale per la cura di tumori profondi, a carico di fegato, polmone, cervello, pancreas e apparato genitale femminile. Consiste in una somministrazione selettiva di calore attraverso l'impiego di un campo a radiofrequenza (RF) a 13.56 MHz. Si vuole raggiungere una temperatura all'interno del tessuto tumorale di 42-45°C: tale temperatura facilita soprattutto un processo di apoptosi delle cellule maligne.

L'apparato è costituito da un generatore di radiofrequenze a 13.56 MHz con potenze che possono arrivare anche a 400 W, il calore viene somministrato attraverso applicatori di dimensioni diverse in funzione delle caratteristiche dell'organo sede di trattamento.

Il campo a radiofrequenza diffuso nel corpo del paziente da un'antenna opportunamente sagomata (piastra), produce calore per effetto della rotazione imposta alle molecole d'acqua.

Naturalmente, l'esposizione al campo a radiofrequenza non è limitata alla regione bersaglio. La presenza di campi diffusi porta al rischio di sovraesposizione del personale medico operante nella sala trattamenti e ad eventuali accompagnatori del paziente.

Obiettivo di questo lavoro è la valutazione, in condizioni di massima esposizione, di SAR a corpo intero e SAR localizzato agli arti, tenendo conto delle differenti caratteristiche dei tessuti biologici.

Materiali e metodi

Le misure e le valutazioni sono state effettuate su due apparati per ipertermia oncologica operanti rispettivamente con potenze di 150 e 400 W. Il protocollo prevedeva la misurazione del campo elettrico E e della corrente indotta attraverso gli arti per differenti aree della sala trattamento, lungo un percorso diagonale dalla piastra all'ingresso della stanza, in condizioni di massima esposizione, corrispondente al funzionamento dell'apparato con la piastra a maggior potenza.

Per le misure di campo a radiofrequenza è stato utilizzato il misuratore a larga banda PMM8053 A equipaggiato con la sonda EP330 in grado di rilevare campi RF nel range 100 kHz – 3 GHz, lineare nel range 10 – 300 MHz, con sensibilità 0.3 V/m e risoluzione pari a 0.01 V/m. Le misure di campo elettrico sono state effettuate a tre diverse altezze (110-150-190 cm) come indicato nelle Norme CEI 211-7 [1], ponendo lo strumento in modalità min-Max RMS per un tempo pari a 6 minuti, così come prescritto nelle Linee Guida. Alle tre altezze standard è stata aggiunta un'indagine con misure a 10 cm da terra, finalizzata all'esposizione delle caviglie degli operatori.

Le registrazioni hanno permesso di ottenere oltre ai valori RMS di campo elettrico ponderati su 6 minuti, i valori di picco e l'andamento del segnale atto a verificare

l'eventuale presenza di spikes ad elevata intensità e brevissima durata.

La misura dell'intensità di corrente indotta attraverso gli arti invece è stata effettuata utilizzando un analizzatore HOLADAY HI-4416 System con sonda a bracciale ETS-LINDGREN Clamp-on induced Current Meter HI-3702 collegati da una fibra ottica H-491106-02.

Il primo passo del lavoro prevedeva la caratterizzazione del campo elettrico attraverso i seguenti passaggi:

- a) studio dell'andamento di E lungo la diagonale di spostamento per quattro diverse altezze di misura;
- b) valutazione dei livelli di campo E in punti strategici adiacenti alla sala trattamenti
- c) analisi della forma del segnale a radiofrequenza

Tutti questi passaggi sono da considerarsi preparatori al calcolo del SAR a corpo intero e del SAR localizzato agli arti che rappresentano la finalità del lavoro. I valori di SAR, calcolati su modello matematico semplificato sono stati messi a confronto con i limiti di esposizione presentati nella Tabella 1 dell'allegato XXXVI del Testo Unico [2]. Sulla base dei valori di SAR vengono poi effettuate classificazioni degli ambienti di terapia in "safety"/"no safety" zones.

Per quanto riguarda la valutazione del SAR occorre tenere presente che alla frequenza di 13.56 MHz gli effetti predominanti sono di natura termica [3],[4]; 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 σ è la conducibilità elettrica del corpo esposto e dipende dalla quantità di acqua contenuta nei 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

σ è la conducibilità elettrica del tessuto biologico

ρ è la densità del tessuto biologico

Entrambi i parametri σ e ρ sono dipendenti dal tipo di tessuto oggetto di indagine, di conseguenza, preliminarmente alla valutazione della grandezza dosimetrica SAR occorre effettuare una valutazione. Infatti il comportamento del parametro σ varia al variare della frequenza del segnale somministrato al campione e al variare della composizione, in particolare in relazione al contenuto di acqua.

I valori di σ alla frequenza caratterizzante sono stati estrapolati tramite il modulo interattivo sviluppato dall'IFAC CNR [5] sulla base del modello parametrico per il calcolo delle proprietà dielettriche dei tessuti biologici sviluppato da Gabriel [6].

I valori del parametro ρ sono stati scelti facendo riferimento al fantoccio matematico Golem [7] sviluppato al GSF da Zankl; un modello a voxel di maschio adulto con 122 tessuti ed organi distinti che rappresenta il punto di riferimento per questo genere di valutazioni.

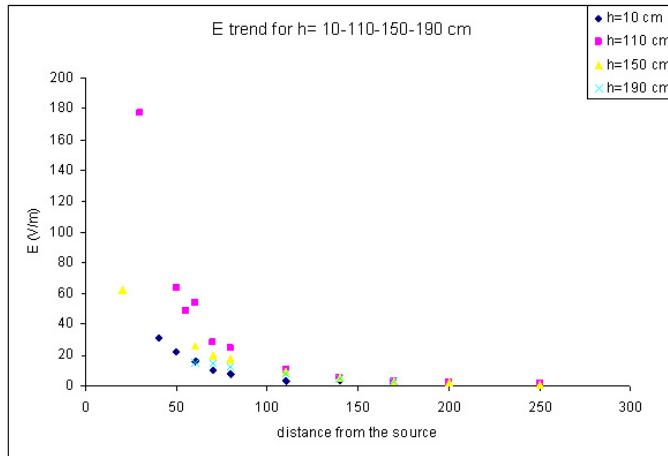


Figura 1. Andamento di E a diverse altezze

Per il calcolo del SAR a corpo intero (Whole Body SAR), il corpo umano è stato approssimato ad un cilindro costituito di due tessuti ad elevato contenuto in acqua (tessuto muscolare e tessuto molle), trascurando tutte le anisotropie biologiche al fine di massimizzare la grandezza dosimetrica. Nell'espressione (2) sono stati inseriti i valori di campo elettrico misurati a 110 cm dal piano di calpestio; tale altezza è stata scelta in

quanto, come si evince dal grafico in Figura 1, a parità di distanza dalla sorgente il campo elettrico presenta i valori più elevati.

Per il calcolo del SAR localizzato, l'arto è stato approssimato ad una serie di cilindri concentrici di cui il primo, più interno, costituito da midollo osseo rosso, un secondo più sottile costituito di tessuto osseo spugnoso, ed infine un terzo, più esterno costituito di tessuto muscolare. I valori utilizzati sono riportati in tabella 1.

Tessuto	σ (S/m)	ρ (g/cm ³)
Muscolo	0.628	1.050
Midollo osseo rosso	0.129	1.030
Osso spugnoso	0.013	1.920

Per la valutazione delle proprietà dielettriche e delle densità tissutali sono stati utilizzati ancora una volta il modello sviluppato da Gabriel ed il fantoccio matematico Golem.

Tabella I. Proprietà tissutali a 13.56 MHz

Per la valutazione del SAR a livello di arti superiori sono stati utilizzati i valori di campo elettrico misurati ad una altezza di 110 cm, per la valutazione del SAR a livello di arti inferiori sono stati invece utilizzati i valori di campo elettrico misurati ad una altezza di 10 cm, corrispondente alla posizione delle caviglie di un individuo adulto.

Risultati

I valori di SAR a corpo intero calcolati utilizzando il modello matematico semplificato a partire dalle misure effettuate in loco sono riportati in figura 2. Nella rappresentazione logaritmica proposta la linea rossa rappresenta il limite di 0.40 W/kg per le esposizioni professionali riportato nel Testo Unico. Come si può evincere dal grafico, fino ad una distanza di circa 65 cm dal centro dell'applicatore il limite per il SAR a corpo intero risulta ampiamente superato. Questa zona dovrebbe essere segnalata tramite una linea tracciata sul pavimento ed interdetta sia al pubblico sia agli operatori.

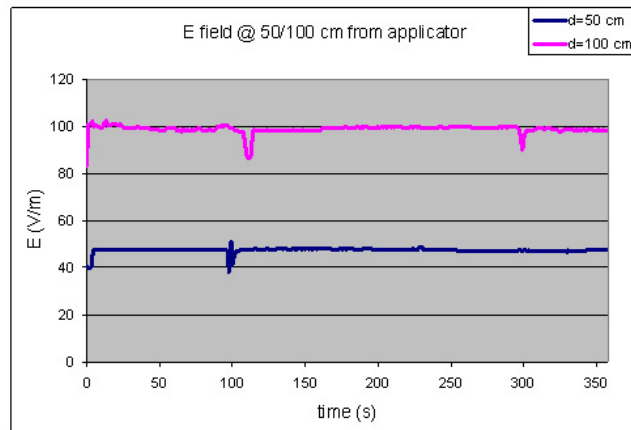
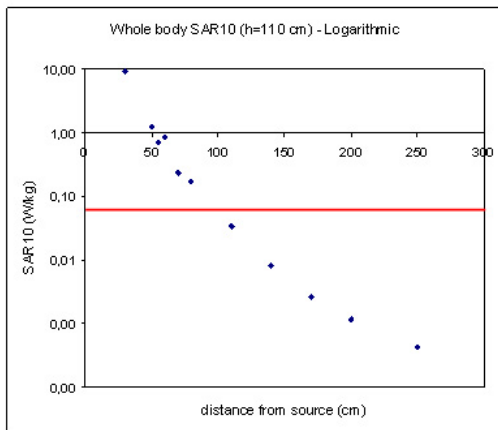


Figura 2. SAR in funzione della distanza Figura 3. Andamento del campo E su 6 min

I risultati relativi alla valutazione SAR a livello di arti superiori, in funzione della distanza dall'applicatore sono riportati in Tabella II.

Distanza da antenna	E_{mis} (V/m)	SAR_{10} musc	SAR_{10} midollo	SAR_{10} osso
30 cm	177.0	9.37 W/kg	1,96 W/kg	0.105 W/kg
50 cm	64.20	1.23 W/kg	0,26 W/kg	0.014 W/kg
55 cm	48.77	0.71 W/kg	0,15 W/kg	0.008 W/kg
60 cm	54.03	0.87 W/kg	0.18 W/kg	0.01 W/kg
70 cm	28.27	0.23 W/kg	0.05 W/kg	0.003 W/kg
80 cm	24.10	0.17 W/kg	0.036 W/kg	0.0019 W/kg
110 cm	10.55	0.03 W/kg	0.007 W/kg	$3.7 \cdot 10^{-4}$ W/kg
140 cm	5.26	0.008 W/kg	0.002 W/kg	$9.3 \cdot 10^{-5}$ W/kg
170 cm	2.96	0.003 W/kg	0.0005 W/kg	$2.9 \cdot 10^{-5}$ W/kg
200 cm	1.96	0.001 W/kg	$2.4 \cdot 10^{-4}$ W/kg	$1,3 \cdot 10^{-5}$ W/kg
250 cm	1.20	0.0004 W/kg	$9 \cdot 10^{-5}$ W/kg	$4.8 \cdot 10^{-6}$ W/kg

Tabella II. SAR localizzato agli arti superiori

I valori non superano mai il limite di 10 W/kg riportato nel Testo Unico. A livello del solo tessuto muscolare potrebbe verificarsi un superamento dei limiti nel momento in cui l'operatore, per effettuare manovre sul paziente ad apparato funzionante, ponesse l'arto ad una distanza inferiore a 25 cm dalla piastra. In tale situazione, dalla estrapolazione dei livelli di campo elettrico, si valuta un SAR locale pari a 15 W/kg. Per quanto concerne gli arti inferiori, è possibile concludere che non si verificano superamenti, nemmeno considerando le estrapolazioni al valore di campo elettrico nei punti sottostanti la piastra. I risultati sono riportati in Tabella III.

Distanza da antenna	E_{mis} (V/m)	SAR_{10} musc	SAR_{10} midollo	SAR_{10} osso
40 cm	31.5	0.3 W/kg	0.06 W/kg	0.003 W/kg
50 cm	22.04	0.15 W/kg	0,03 W/kg	0.0016 W/kg
60 cm	15.95	0.08 W/kg	0.02 W/kg	0.008 W/kg
70 cm	9.7	0.03 W/kg	0.006 W/kg	0.0003 W/kg
80 cm	7.66	0.02 W/kg	0.0037 W/kg	$1.9 \cdot 10^{-4}$ W/kg
110 cm	3.17	0.003 W/kg	0.0006 W/kg	$3.4 \cdot 10^{-5}$ W/kg
140 cm	3.2	0.003 W/kg	0.0006 W/kg	$3.4 \cdot 10^{-5}$ W/kg

Tabella III. SAR localizzato agli arti inferiori

Discussione

Al fine di valutare la reale esposizione dei lavoratori addetti all'ipertermia oncologica, sono state effettuate misure in una serie di punti che rappresentano i percorsi più probabili utilizzati dai sanitari durante le operazioni di assistenza al paziente. Il medico o l'infermiere infatti, potendo monitorare i pazienti a distanza dalla sala trattamenti, dopo l'impostazione dell'apparato escono dalla stanza ma rimangono reperibili attraverso un avvisatore acustico a disposizione del paziente. Si ha quindi esposizione solo ed esclusivamente nel momento in cui devono essere valutate da vicino le condizioni cliniche del paziente ovvero, durante l'avvio/interruzione del trattamento in prossimità della postazione con videoterminale.

L'applicazione del modello matematico proposto ai risultati delle misure effettuate a quattro diverse altezze hanno rilevato fino ad una distanza di circa 55-60 cm dall'apparato, il superamento dei limiti di esposizione per SAR a corpo intero riportati nel Testo Unico. Per quanto concerne il SAR localizzato agli arti, occorre fare una distinzione basata sulla struttura anisotropa dell'arto che presenta tre tipologie di tessuto distinte. Nessun problema sussiste per gli arti inferiori, protetti dalla distanza rispetto all'applicatore, per quanto concerne invece gli arti superiori, va segnalato un superamento del SAR localizzato unicamente al tessuto muscolare per distanze dell'arto dall'applicatore inferiori ai 25 cm.

In definitiva, gli operatori non dovrebbero trovarsi a meno di 60 cm dall'apparato quando questo è in funzione; lo stesso discorso vale a maggior ragione per gli eventuali accompagnatori che dovrebbero tenersi ad una distanza dall'apparato superiore a 100 cm.

Conclusioni

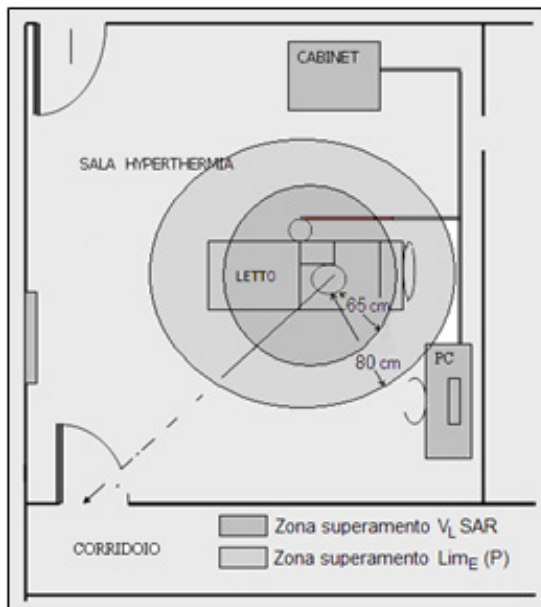


Figura 4. Mappatura ambiente

Ciò che emerge da questo lavoro è la possibilità di effettuare una suddivisione dell'ambiente specifico in safety/no safety zones, sulla base di questa valutazione in prima approssimazione del SAR.

La Figura 4 riporta una mappatura delle zone a rischio all'interno della sala trattamenti, sia per gli operatori sanitari, sia per eventuali accompagnatori ottenuta dalle valutazioni effettuate sulla base delle misure strumentali di campo elettrico e dal confronto con i valori limite e di azione riportati nel Testo Unico, nel DPCM 8 luglio 2003 e nelle Linee Guida ICNIRP [8]

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 - DLgs 81/08 - Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro.
- [3] World Health Organization Environmental Health Criteria Document 16 Radiofrequency and Microwaves; 1981
- [4] World Health Organization Environmental Health Criteria Document 16 (Revised version). Electromagnetic fields in the range of 300 Hz to 300 GHz; 1993
- [5] 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
- [6] Gabriel C, Gabriel S. Compilation of the Dielectric Properties of Body Tissues at RF and Micro- wave Frequencies, - Internet document
- [7] Zankl M, Wittman A 2001 The adult male voxel Golem segmented for whole body CT patient data *Radiat. Environ. Biophys* 40: 153-16
- [8] International Commission on Non Ionising Radiation Protection (ICNIRP) 1998 Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz) *Health Phys.* 74 494-522