

Esposizione professionali a forni industriali: considerazioni radiometriche e dosimetriche

S. Valbonesi⁽¹⁾, L. Giordani⁽¹⁾, E. Papotti⁽²⁾, M. Sassanelli⁽³⁾, S. Vaccari⁽²⁾, A. Vanore⁽⁴⁾

⁽¹⁾Consorzio Elettra 2000, Pontecchio Marconi, Italy

⁽²⁾Health Physics Service, University of Parma, Parma, Italy,

⁽³⁾Safety Manager, RSPP, Parma, Italy

⁽⁴⁾Prevention and Protection Office – Arcispedale Santa Maria Nuova, Reggio Emilia, Italy

1. Obiettivi

Negli ultimi anni in Italia si è registrato un crescente utilizzo a livello industriale di tecnologie elettrotermiche a radio frequenza e a microonde, si stima che il numero di apparati esistenti sul territorio nazionale sia superiore alle diecimila unità.

Tali macchine si basano sulla trasformazione in calore dell'energia elettromagnetica assorbita dal materiale oggetto di trattamento.

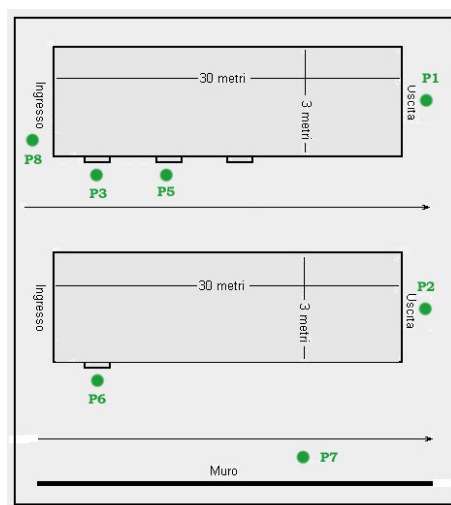
Le applicazioni industriali dei forni a microonde e a radiofrequenza sono molteplici, e, per quanto concerne l'industria alimentare, riguardano soprattutto la post cottura di biscotti e prodotti farinacei a crosta sottile, lo scongelamento, il preriscaldamento di prodotti lievitanti e l'essiccazione della pasta.

Tali forni utilizzano nei processi di lavorazione frequenze autorizzate: nello specifico 13.56, 26.12 e 40.68 MHz per i forni a radiofrequenza, 915 MHz e 2.45 GHz per quelli a microonde.

La diffusione a livello di industria alimentare e le notevoli potenze impiegate comportano la necessità di una serie di valutazioni sulla esposizione dei lavoratori addetti a questi processi, valutazioni che spesso possono essere corredate da misurazioni in loco e da simulazioni numeriche.

Obiettivo di questo lavoro è la valutazione della esposizione professionale da un punto di vista radiometrico e dosimetrico, con particolare riferimento agli effetti di surriscaldamento e di penetrazione della radiazione elettromagnetica all'interno dei tessuti.

2. Materiali e metodi



In collaborazione con il Servizio di Fisica Sanitaria dell'Università di Parma è stata effettuata una campagna di misure nelle adiacenze di due array di forni a microonde per essiccazione, funzionanti alla frequenza di 2.45 GHz. Questi forni, che impegnano ciascuno una potenza di 250 kW, presentano lunghezze fino a 30 metri con un diametro di quasi 3. Oblò posti lateralmente permettono il controllo da parte di personale specializzato sul regolare funzionamento della catena di cottura ed essiccamento del prodotto. Tali oblò rimangono normalmente chiusi; vengono aperti soltanto periodicamente quando si rende necessaria una ispezione interna.

Figura 1. piantina

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 elettrici nel range 100 kHz – 3 GHz, lineare nel range 1 – 300 MHz, con sensibilità 0.3 V/m, risoluzione pari a 0.01 V/m e valore di fondo scala raggiungibile per campi superiori ai 600 V/m.

Lo strumento è stato posizionato su un apposito cavalletto dielettrico per tutta la durata della misura e, per non introdurre perturbazioni i tecnici sono stati allontanati.

Alla frequenza di 2.45 GHz corrisponde una lunghezza d'onda di 12.2 cm, di conseguenza si può già ipotizzare che, ad una distanza superiore ai 50 cm, la propagazione avvenga con caratteristiche di onda piana uniforme in cui il campo elettrico ed il campo magnetico sono in fase e le relative ampiezze sono legate dalla relazione:

$$\frac{E}{H} = 377\Omega \quad (1)$$

Questo rende possibile la misurazione di una sola componente, elettrica o magnetica, dal momento che l'altra è deducibile direttamente per via matematica dall'espressione (1); si è quindi ritenuto opportuno procedere quindi con la valutazione strumentale del solo campo elettrico.

Le misure sono state effettuate anche in corrispondenza degli oblò, ponendo lo strumento ad una altezza di 150 cm dal piano del pavimento. Altri rilievi sono stati effettuati nel corridoio tra due array, ad una distanza di 130 cm da entrambi i forni, nello spazio tra il secondo forno ed il muro. All'uscita dei forni le misure sono state fatte tenendo conto delle possibili situazioni: gabbia di Faraday chiusa, gabbia aperta, apertura interna per scarico del prodotto. Anche in questi casi i rilievi sono stati fatti ponendo lo strumento ad una altezza di 150 cm dal piano di calpestio. In tabella 1 sono riportati i punti in cui sono state effettuate le misure:

Tabella 1: posizionamento punti di misura

Misura	Descrizione	Distanza sorgente (cm)	Grandezza misurata
1	Uscita forno 1 (aperto/chiuso)	50	E (V/m)
2	Uscita forno 2	50	E (V/m)
3	Primo oblò forno 2 (guasto)	20	E (V/m)
4	Corridoio tra i due forni	100	E (V/m)
5	Spazio tra due oblò forno 2	20	E (V/m)
6	Primo oblò forno 1 (a tenuta)	20	E (V/m)
7	Spazio forno 1 – muro	100	E (V/m)
8	Primo oblò forno 2 (misura 6 minuti)	20	E (V/m)

Ai fini di una valutazione il più esaustiva possibile della esposizione e della validazione dei tre modelli dosimetrici che verranno presentati, sono state presi in considerazione le seguenti quantità fisiche e dosimetriche:

- a) andamento del campo E
- b) valutazione del campo elettrico efficace
- c) valutazione del campo elettrico efficace nei vari casi per i punti 1 e 2
- d) valutazione del campo elettrico massimo
- e) valutazione del SAR a corpo intero attraverso due metodologie operative distinte e conservative
- f) valutazione specifiche del SAR riferito a vari tessuti considerando le anisotropie dell'interfaccia
- g) valutazione della profondità di penetrazione del segnale in oggetto.

2.1 Valutazione del SAR a corpo intero

Oggetto di indagine sono i campi a radiofrequenza di 2.45 GHz. A queste frequenze gli effetti predominanti sono di natura termica [1],[2]; i meccanismi di interazione sono noti e gli effetti biologici sono correlati con la densità di potenza assorbita P, oppure in modo del tutto equivalente, con la densità di corrente J:

$$J = \sqrt{\sigma P} \quad (2)$$

La valutazione dosimetrica viene effettuata attraverso il calcolo del SAR (Specific Absorption Rate), che esprime la potenza assorbita per unità di massa e può essere definito come:

$$SAR = \frac{\sigma E^2}{2\rho} \quad (3)$$

Dove:

- E è il valore del campo elettrico misurato in V/m
- σ è la conducibilità elettrica del tessuto biologico
- ρ è la densità del tessuto biologico

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 attenta valutazione.

Per la valutazione in prima istanza del SAR, abbiamo approssimato il corpo intero ad un cilindro composto unicamente da tessuto a medio alto contenuto di acqua, quale il tessuto muscolare; in questa tipologia di approssimazione, già utilizzata in altri lavori [3] il SAR viene calcolato all'interfaccia dello strato aria/muscolo, trascurando tutte le anisotropie dovute al passaggio del campo attraverso i tessuti che precedono il muscolo; questo, ai fini di una valutazione preliminare e conservativa può essere considerato formalmente corretto in quanto sicuramente tende a massimizzarne il valore.

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

I valori del parametro ρ 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 2.

Tabella 2 – Valori di ρ per differenti tessuti

Tessuto	ρ (g/cm ³)
Polmoni	0.260
Osso	1.920
Midollo osseo rosso	1.030
Tessuti molli	1.050
Muscolo	1.050
Pelle	1.105
Midollo osseo giallo	0.980
Adipe	0.950

Nella valutazione, coerentemente al modello sviluppato, sono stati scelti come riferimenti per la conducibilità elettrica il tessuto muscolare e il tessuto molle per i quali $\rho = 1.050$ g/cm³.

Inizialmente si è introdotto nella (2) il valore di picco del campo elettrico, in una successiva elaborazione, data la forma specifica dei segnali si è scelto, per i punti di maggior interesse, di calcolare il SAR partendo dal valore efficace di E.

2.2 Valutazione del SAR specifico di substrato

Il calcolo in prima approssimazione del SAR, effettuato secondo il modello descritto in 2.1, porta ad una sovrastima della grandezza dosimetrica in quanto relativo unicamente all' intorno infinitesimo dello strato superficiale del muscolo che si considera investito direttamente dal campo. Infatti non tiene in considerazione la presenza di altri strati di tessuto, con proprietà specifiche, che vengono via via attraversate dal campo prima di rilasciare energia al muscolo.

Arrivando dall'esterno, l'onda incontra vari tipi di tessuti, più o meno spessi a seconda della regione anatomica e delle caratteristiche individuali: tipicamente si hanno in successione: pelle, grasso, muscolo ed eventualmente tessuto osseo. Assorbimenti di energia negli strati che si susseguono comportano diminuzione di intensità del campo. In corrispondenza delle varie interfaccia si possono verificare anche riflessioni.

Al modello base devono quindi essere aggiunti strati e le relative interfacce, nelle quali poi valutare campo elettrico interno e SAR conseguente.

Scopo di questa parte del lavoro è il calcolo del SAR locale relativo ai vari strati ed il confronto con il valore ottenuto per il tessuto muscolare dalla semplice applicazione della (2). Il SAR verrà calcolato per lo strato immediatamente sotto all'area di passaggio tra un substrato tissutale e l'altro.

Nella interazione con il mezzo materiale, il campo elettromagnetico, mentre si attenua, diminuisce la propria frequenza. La nuova frequenza e la lunghezza d'onda nel mezzo dipendono dalle caratteristiche del campo e del mezzo da questo attraversato secondo la formula:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\frac{\epsilon_r}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon_r \epsilon_0} \right)^2} + 1 \right)}} \quad (3)$$

Dove λ_0 è la lunghezza d'onda nello spazio vuoto.

Tenendo in considerazione i valori della conducibilità elettrica e della costante dielettrica relativa ϵ_r caratterizzanti i tessuti biologici è possibile ottenere in prima approssimazione l'espressione che lega la lunghezza d'onda nel mezzo alla lunghezza d'onda nel vuoto per la frequenza di interesse:

$$\lambda = \lambda_0 \sqrt{\epsilon_r} \quad (4)$$

Questa approssimazione è possibile unicamente per frequenze a partire dal centinaio di MHz in quanto a tali frequenze il comportamento dei tessuti dipende unicamente dalle proprietà di dispersione delle molecole di acqua e dalla conducibilità degli elettroliti, e, in misura minore dalle architetture cellulari, gli altri meccanismi di polarizzazione risultano inattivi.

Viene a cadere unicamente nel caso di tessuti ad elevatissimo contenuto di acqua, quali il sangue ed il liquido interno dell'occhio. Nel nostro caso, trattandosi di tessuti a medio o basso contenuto di acqua (pelle, grasso e muscolo) l'approssimazione indicata in (4) risulta applicabile. Come bersaglio viene considerata la zona del tronco; in questo caso è possibile infatti affermare che la geometria del sistema

è tale che il raggio di curvatura del bersaglio è maggiore della lunghezza d'onda del campo originario incidente, condizione necessaria per l'applicazione del modello descritto.

Quando un'onda elettromagnetica incide sull'interfaccia tra due mezzi materiali, una parte dell'energia viene riflessa, mentre una parte viene trasmessa all'interno del mezzo. Se i mezzi sono costituiti da materiale con possibilità di perdite, l'onda cede parte della sua energia e si attenua mentre si propaga.

La potenza trasportata dall'onda decresce esponenzialmente secondo la legge:

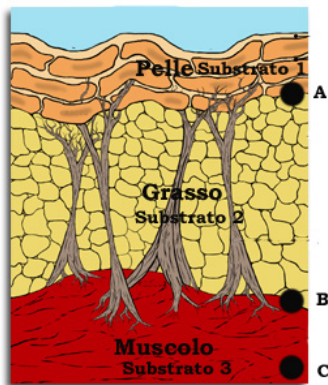
$$S = S_0 e^{-2\frac{z}{\delta}} \quad (5)$$

ed il campo elettrico all'interno del mezzo può essere, di conseguenza, scritto come:

$$E = E_0 e^{-\frac{z}{\delta}} \quad (6)$$

Dove z è la distanza percorsa all'interno del mezzo e δ lo spessore di penetrazione, legato alla conducibilità elettrica del mezzo, alla costante dielettrica relativa ed alla frequenza del campo incidente dalla relazione:

$$\delta = \frac{c}{\omega \sqrt{\frac{\epsilon_r}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon_r \epsilon_0} \right)^2} - 1 \right)}} \quad (7)$$



Ne consegue che, ricavato per via numerica il valore di δ [4], noto, attraverso misura strumentale, il livello del campo elettrico presente nel punto dello spazio a cui si vuole riferire l'indagine, è possibile calcolare, attraverso l'applicazione delle relazioni in (3), (6), (7) il valore efficace, o analogamente il valore massimo, del campo elettrico interno nei seguenti punti di interesse:

- a) strato immediatamente sotto pelle
- b) substrato pelle/grasso
- c) substrato grasso/tessuto muscolare

ed i relativi valori di SAR.

Fig. 2. Substrati

Risultati

Le figure 3, 4 e 5 illustrano gli andamenti del campo elettrico in punti del laboratorio di essiccazione ritenuti di maggiore interesse.

La figura 2 riporta l'andamento del campo elettrico per un ciclo chiusura/apertura/chiusura dell'imboccatura del forno 2. I valori sono stati ottenuti ponendo lo strumento ad una distanza di circa 50 cm dall'apertura ed attendendo il completamento del ciclo. Come si può facilmente evincere i livelli di campo elettrico in corrispondenza dell'apertura completa del portellone sono elevati.

Occorre però sottolineare, ai fini della protezione dei soggetti professionalmente esposti, che nessuna figura professionale in condizioni operative standard si trova posizionata nel punto in oggetto.

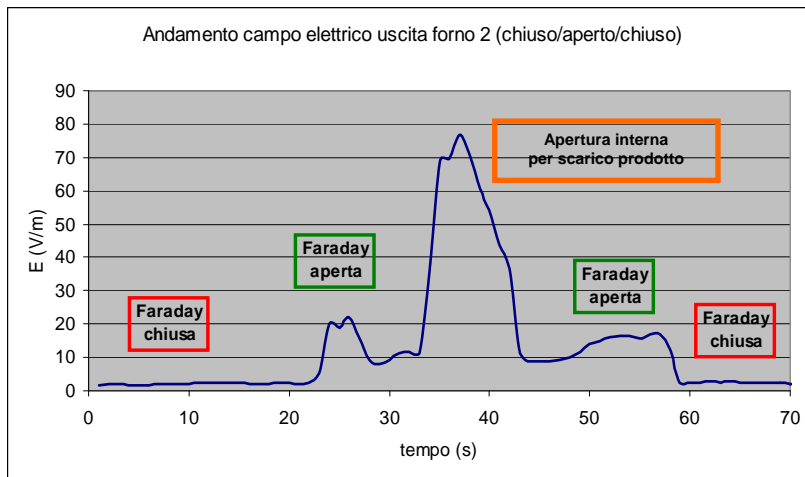


Fig. 3. Andamento campo elettrico per ciclo chiusura/apertura/chiusura

La figura 4 riporta l'andamento del campo elettrico in prossimità di un oblò che viene aperto per verificare il funzionamento della catena di cottura, con maggiore frequenza rispetto ad altri. In corrispondenza di questo oblò il campo elettrico misurato risulta molto più elevato rispetto ai valori trovati in corrispondenza di altri oblò analoghi (figura 5) meno utilizzati.

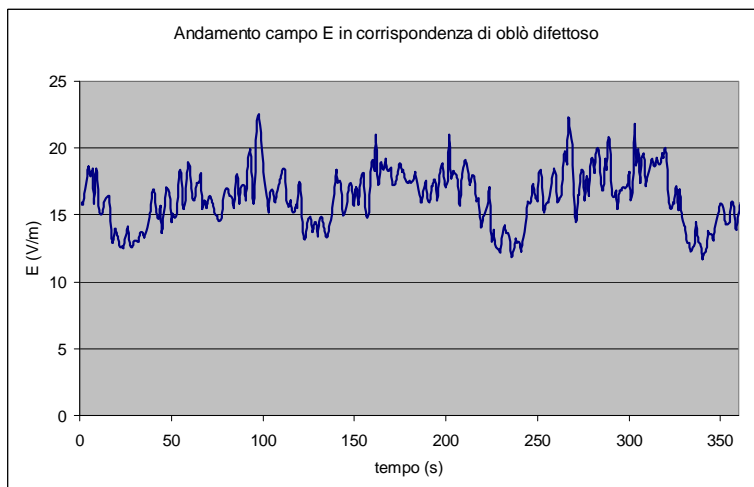


Fig. 4. Andamento campo elettrico in oblò maggiormente utilizzato

La causa dell'incremento di campo elettrico rinvenuto in corrispondenza di questo oblò può essere ricercata in un deterioramento della guarnizione protettiva.

I valori rilevati sono comunque al disotto dei valori di azione riportati nell'allegato XXXVI del Testo Unico [7]: in ogni caso la situazione relativa all'oblò in oggetto deve essere monitorata con periodicità e, se possibile, sarebbe consigliabile una operazione di risanamento della guarnizione usurata.

Un passaggio occasionale di qualche lavoratore potrebbe avvenire tra gli array di forni e il muro perimetrale (P7 di figura 1): qui il livello di campo elettrico misurato è dell'ordine di grandezza dei valori riportati nel DPCM 8 Luglio 2003[8] riferiti per la popolazione. Il SAR a corpo intero calcolato con il metodo conservativo è risultato inferiore ai limiti riportati nel Testo Unico, pertanto non si è ritenuto necessario procedere al calcolo dettagliato del campo elettrico interno e dei SAR relativi ai vari substrati biologici.

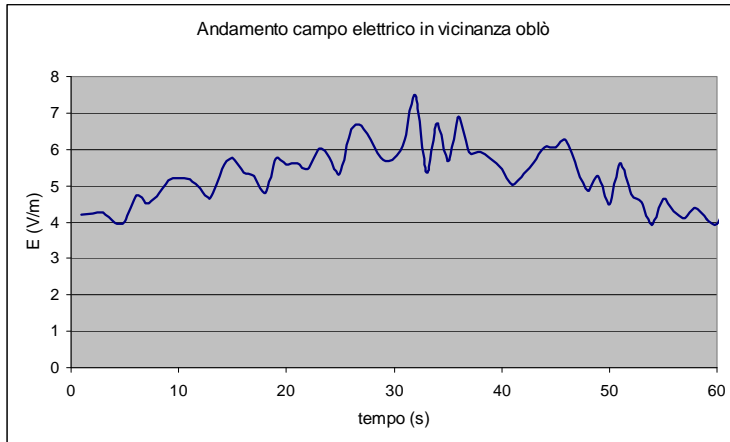


Fig. 5. Andamento campo elettrico in oblò con guarnizione integra

In tabella 3 sono riportati i risultati ottenuti calcolando il SAR attraverso il modello semplificato descritto in 2.1. Per il calcolo del SAR sono stati utilizzati sia il valore di picco del campo elettrico, sia il valore efficace, con la finalità di valutare la sovrastima introdotta considerando il valore di picco del campo esterno al posto del valore efficace.

Tabella 3. SAR calcolati per differenti posizioni

Posizione	E_{max} (V/m)	E_{eff} (V/m)	WB SAR (W/Kg)	WB SAR _{max} (W/Kg)
Uscita forno 1 (aperto)	32.04	23	0.44	0.85
Uscita forno 2 (aperto)	76.7	53.88	2.4	4.87
Uscita forno 2 (chiuso)	2.36	2.06	0.003	0.004
Oblò (guarnizione difettosa)	22.57	16.45	0.22	0.42
Corridoio tra due forni	18.12	10.04	0.08	0.27
Spazio tra due oblò	9.33	6.39	0.03	NC
Corridoio forno/muro	7.49	4.49	0.01	NC

Posizione	E_{eff} (V/m)	WB SAR (W/Kg)
Uscita forno 1 (aperto)	23	0.44
Uscita forno 2 (aperto)	53.88	2.4
Uscita forno 2 (chiuso)	2.06	0.003
Oblò (guarnizione usurata)	16.45	0.22
Corridoio tra due forni	10.04	0.08
Spazio tra due oblò	6.39	0.03
Corridoio forno/muro	4.49	0.01

La misura del campo elettrico nella fase di apertura/chiusura del forno è stata effettuata ponendo lo strumento per 60 secondi in corrispondenza dell'apertura del forno ad una distanza di circa 50 cm da quest'ultima. In 60 secondi il forno esegue un ciclo completo chiusura/apertura/chiusura.

Il valore massimo del campo elettrico è stato calcolato su tutti i 60 secondi e corrisponde al valore di picco del campo elettrico sull'intero ciclo.

I valori efficaci sono stati calcolati nel seguente modo:

- E_{eff} a forno aperto – dal secondo 32 al secondo 42 di esposizione, corrispondente all'apertura del portello

- E_{eff} a forno chiuso – dal secondo 1 al secondo 20, corrispondente alla completa chiusura stagna del portello

Dai risultati emerge che l'utilizzo del valore di picco del campo elettrico al posto del valore efficace, in uno scenario come quello sopradescritto, porta ad una sovrastima del SAR pari al 50%.

Tramite l'applicazione delle relazioni (3),(4),(6) sono stati successivamente calcolati i valori di campo elettrico interno ed i SAR relativi al substrato sottopelle, al primo strato di adipe ed al tessuto muscolare del torso per la zona di uscita del forno 2, ipotizzando uno scenario conservativo di apertura continua dello sportello di accesso al forno. I risultati sono presentati in tabella 4

Tabella 4. calcolo SAR di substrato per punto massima esposizione

Susstrato	Spessore (m)	δ (m)	λ (m)	E_{int} (V/m)	Posizione	SAR (W/kg)
aria				53.88 ^{a,b}		2.40
aria/pelle	0.004	0.022	0.0185	44.02	sottocute	1.45
pelle/grasso	0.003	0.117	0.0426	47.77	strato grasso	1.01
grasso/muscolo	0.02	0.022	0.31	17.61	muscolo	0.26

^a si è scelto di utilizzare il valore efficace del campo elettrico, in quanto più rappresentativo del campo effettivo che interagisce in prima istanza con la pelle

^b il valore efficace del campo elettrico è stato ottenuto partendo dai risultati delle misure strumentali effettuate il cui andamento è riportato in figura 2.

La tabella 5 mette a confronto i valori di SAR calcolati e relativi ad un intorno infinitesimo di tessuto muscolare utilizzando le tre metodologie descritte nel lavoro:

Tabella 5. Metodologie a confronto

Metodo di calcolo	SAR (W/kg)
Approssimazione cilindrica – solo tessuto muscolare – E_{picco}	4.87
Approssimazione cilindrica – solo tessuto muscolare – E_{eff}	2.40
Approssimazione cilindrica – valutazione delle caratteristiche di substrato – E_{eff}	0.26

Discussione

Lo studio in oggetto è stato effettuato partendo dalla misurazione dei livelli di campo elettrico in corrispondenza di punti di interesse nelle immediate adiacenze di due forni per essiccazione funzionanti alla frequenza di 2.45 Gz con una potenza di 250 kW. In una ipotesi di campo lontano sono stati misurati i livelli di campo elettrico E e, partendo da questi, sono stati calcolati, utilizzando tre modelli teorici a crescente complessità, i SAR a livello di tessuto muscolare per tutte le posizioni giudicate di interesse dal punto di vista della esposizione professionale. Infine per il punto in cui l'esposizione è risultata maggiore sono stati calcolati i livelli di SAR relativi ai vari substrati del corpo attraversati dal campo prima di raggiungere il tessuto muscolare, tenendo in considerazione i parametri biologici e fisici dei singoli tessuti, quali la conducibilità elettrica e la densità.

Per quanto riguarda i risultati relativi al solo tessuto muscolare, il lavoro ha evidenziato che il calcolo del SAR effettuato utilizzando il campo elettrico di picco in luogo del valore efficace porta ad una sovrastima del parametro di un fattore 2.

Il calcolo effettuato in prima approssimazione utilizzando il valore efficace del campo elettrico, ma trascurando gli effetti di propagazione del campo nei vari substrati biologici risulta fin troppo conservativo. Analizzando il comportamento del campo elettrico nel passaggio dall'aria, allo strato pelle, allo strato adipe, fino al tessuto muscolare si evidenziano attenuazioni successive. Infatti nel tessuto muscolare l'intensità è ridotta al 33% del valore efficace iniziale rilevato tramite misura

strumentale diretta. Questo si traduce in un valore di SAR dieci volte minore rispetto a quello ottenuto dal calcolo in prima approssimazione su un modello semplice composto di solo tessuto muscolare.

La maggiore attenuazione del campo elettrico la si ha a livello di tessuto muscolare, i valori di SAR più elevati invece si hanno a livello della pelle.

L'effetto globale della interazione, considerando il tessuto pelle equivalente, dovrebbe tradursi in un aumento della temperatura locale sottocutanea di 2 centesimi di grado per ogni minuto di esposizione.

Conclusioni

Per quanto riguarda l'esposizione professionale degli operatori addetti va rilevato che in nessun punto del reparto, in cui c'è passaggio di persone, si presentano situazioni di superamento dei valori limite di esposizione di capo e tronco ($SAR = 10 \text{ W/kg}$) o dei valori di azione ($E = 137 \text{ V/m}$) riportati nell'allegato XXXVI del Testo Unico.

La zona caratterizzata da campo elettrico più intenso si trova, come da attese all'uscita del forno nell'istante in cui si apre il portellone interno che permette lo scarico del materiale, se fosse contemporaneamente aperta anche la gabbia di Faraday.

In questa zona specifica i valori di SAR calcolati con i due metodi conservativi lascerebbero pensare ad un superamento elevato dei limiti riportati nel testo unico (vd. Tabella 5). Se si considera invece il calcolo effettuato tenendo in considerazione la propagazione del campo nei vari strati di tessuto, si ha un superamento del SAR a livello di superficie epidermica. Se, per un confronto, si considera il tessuto muscolare, il SAR calcolato da modello rientra al disotto dei limiti per corpo intero. Nessun problema di superamento in caso si faccia il confronto con i limiti a tronco ed arti. Va sottolineato comunque che nel reparto non ci sono posizioni occupate da personale nel corso della attività lavorativa standard. Tutte le altre zone possono essere ritenute sicure l'esposizione professionale. È bene programmare nel tempo un controllo sulla tenuta degli oblò in quanto l'uso ripetuto può comprometterla.

Bibliografia

- [1] World Health Organization Environmental Health Criteria Document 16 Radiofrequency and Microwaves; 1981
- [2] World Health Organization Environmental Health Criteria Document 16 (Revised version). Electromagnetic fields in the range of 300 Hz to 300 GHz; 1993
- [3] S. Valbonesi, M. Barbiroli, M. Frullone, E. Papotti, S. Vaccari, A. Vanore – “Oncological hyperthermia: working exposure assessment to RF field” - Presentato come full speech al “10th International Conference of the European Bioelectromagnetic Association – EBEA2011”, Roma, 2011
- [4] D. Andreuccetti, R. Fossi, C. Petrucci, Calculation of the Dielectric Properties of Body Tissues in the frequency range 10 Hz - 100 GHz, - Published in IFAC CNR website
- [5] C. Gabriel, S. Gabriel: "Compilation of the Dielectric Properties of Body Tissues at RF and Microwave Frequencies", - Internet document
- [6] M. Zankl, A. Wittman, The adult male voxel Golem segmented for whole body CT patient data, *Radiat. Environ. Biophys* **40**: 153-162; 2001
- [7] DECRETO LEGISLATIVO 9 aprile 2008 , n. 81 Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro.
- [8] Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 8 luglio 2003 e allegati - 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 generati a frequenze comprese tra 100 kHz e 300 GHz.