

d-BA 2018

I rischi fisici nei luoghi di lavoro

Atti a cura di:
S. Goldoni, P. Nataletti, N. Della Vecchia

Bologna, 17 ottobre 2018

The logo consists of a stylized lowercase 'd' with horizontal lines above it, followed by a hyphen and an uppercase 'A', and the year '2018' to the right.

I rischi fisici nei luoghi di lavoro

SVILUPPO ED UTILIZZO DI UNO STRUMENTO WEB PER L'ELABORAZIONE DELLE MISURE DI ESPOSIZIONE AL CAMPO MAGNETICO DI BASSA FREQUENZA E LA DETERMINAZIONE DELL'INDICE DI PICCO PONDERATO

Daniele Andreuccetti (1), Moreno Comelli (1), Simona D'Agostino (2), Rosaria Falsaperla (2), Nicola Zoppetti (1)

(1) IFAC-CNR, via Madonna del Piano 10, 50019 Sesto Fiorentino (FI)

(2) INAIL-DiMEILA, via Fontana Candida 1, 00078 Monte Porzio C. (RM)

1 – INTRODUZIONE

Nel giugno 2017 - nell'ambito di una ricerca in collaborazione affidata da INAIL all'IFAC - ha preso l'avvio un progetto mirato a sviluppare e raccogliere in una piattaforma web (chiamata "WebNir") una serie di strumenti operativi, pensati per dare supporto agli operatori della prevenzione pubblici e privati, nell'attività di valutazione e riduzione del rischio da esposizione ai campi elettromagnetici (CEM) e alle radiazioni ottiche artificiali (ROA). Sulla piattaforma (posta all'indirizzo <http://webnir.ifac.cnr.it>) sono stati inseriti numerosi contenuti pertinenti la normativa protezionistica e le sorgenti CEM e sono stati resi disponibili, pur se in forma di prototipo e quindi suscettibili di perfezionamenti, alcuni applicativi web. Uno di questi consente di elaborare le misure di induzione magnetica relative all'esposizione ai campi di gradiente in risonanza magnetica.

In questo lavoro viene mostrato un esempio di utilizzo di quest'ultima applicazione, in relazione ai dati acquisiti nel corso di una campagna di misure eseguita congiuntamente dall'IFAC e dall'INAIL con la collaborazione di un'unità operativa ENEA e del personale della struttura ospitante.

2 – MISURA DEI CAMPI DI GRADIENTE IN RISONANZA MAGNETICA

L'IFAC e l'INAIL hanno una lunga esperienza in tema di valutazione dell'esposizione occupazionale ai campi elettromagnetici negli impianti di diagnostica per immagini a risonanza magnetica (MRI), maturata a partire dal 2008 in una serie di progetti di ricerca in comune. Nell'ambito di questi progetti, sono state svolte numerose campagne di misura finalizzate alla valutazione dell'esposizione degli operatori sanitari, con la collaborazione di una unità operativa ENEA e il supporto dei fisici sanitari e dei tecnici di radiologia delle strutture ospedaliere coinvolte, in cui erano in funzione tomografi da 1.5 T, 3 T e 7 T.

Nel caso dei campi magnetici di gradiente, sono state prese in considerazione sessioni di esame con le "sequenze" di uso più comune di volta in volta indicate dagli operatori. Il campo è stato rilevato in punti di particolare interesse all'interno della sala-magnete, utilizzando una catena di misura sviluppata *ad hoc* (Figura 1), comprendente una sonda Narda ELT-400, un acquisitore-digitalizzatore Agilent U2531A e un personal computer con un programma di gestione dedicato, sviluppato presso l'ENEA e realizzato in ambiente LabVIEW.

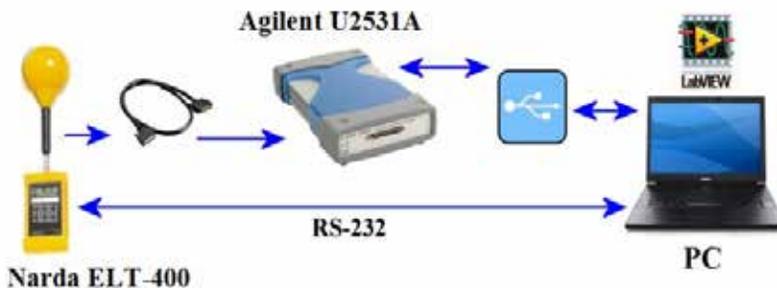


Figura 1 – Catena strumentale per la misura dei campi di gradiente in MRI.

La catena strumentale, la procedura operativa e alcuni dei risultati delle campagne di misura sono stati oggetto di precedenti pubblicazioni [1,2,3,4]. In questo lavoro i dati di campo magnetico di gradiente acquisiti durante una campagna di misura su un tomografo da 7 T sono stati elaborati allo scopo di validare uno specifico strumento web sviluppato presso l'IFAC e pubblicato sulla piattaforma WebNir, verificandone al contempo la praticità d'uso dell'interfaccia utente e l'accettabilità dei tempi di caricamento dei dati e di calcolo dei parametri radioprotezionistici.

3 – PIATTAFORMA WEBNIR

La piattaforma WebNir è articolata in tre sezioni, di cui una (“Sezione pubblica”) è ad accesso libero, mentre l’accesso alle altre (dedicate alla gestione del progetto e allo sviluppo delle applicazioni) è controllato tramite credenziali. La sezione pubblica si articola a sua volta in tre aree tematiche, rispettivamente dedicate ai campi elettromagnetici (CEM), alle radiazioni ottiche artificiali (ROA) e alle problematiche dei dispositivi medici impiantabili attivi (DMIA).

L’area CEM dà accesso agli strumenti web per la valutazione dell’esposizione, che possono essere selezionati sia ricercandoli per tipologia di strumento, sia passando attraverso un elenco strutturato di sorgenti occupazionali di campi elettromagnetici, per ciascuna delle quali sono indicati gli strumenti applicabili.

Sono attualmente disponibili, sotto forma di prototipi perfettibili ma completamente operativi, gli strumenti web che consentono di:

- disporre di procedure di intervento standardizzate per alcune classi di sorgenti occupazionali di CEM;
- analizzare le normative del settore, visualizzare l’andamento dei relativi valori limite in funzione della frequenza e calcolarne il valore esatto ad una frequenza specificata;
- riportare in grafico e confrontare tra loro gli andamenti in funzione della frequenza di due o più limiti normativi, relativi a grandezze omogenee;
- determinare la distanza di rispetto da una sorgente CEM tramite interpolazione dei dati misurati lungo una linea retta, a distanze progressivamente crescenti;
- elaborare una sequenza di misure di campo magnetico percepito nel caso di movimento di un soggetto in un campo magnetostatico e determinare i pertinenti indici radioprotezionistici;
- analizzare nel dominio del tempo una forma d’onda a frequenza bassa o intermedia opportunamente campionata e calcolare gli indici di picco ponderato relativi alle normative applicabili.

Tutti questi strumenti dispongono di un’interfaccia utente realizzata per mezzo di una pagina web, mentre il carico computazionale è suddiviso tra il computer utilizzato dall’utente e la piattaforma server che distribuisce le applicazioni.

4 – APPLICATIVO PER IL CALCOLO DELL’INDICE DI PICCO PONDERATO

In questo lavoro, lo strumento della piattaforma WebNir che implementa il metodo del picco ponderato nel dominio del tempo è stato applicato alle misure di campo magnetico di gradiente in MRI.

Com'è noto, il metodo del picco ponderato è adatto alla elaborazione delle forme d'onda complesse, ovvero il cui spettro contiene contributi a varie frequenze, come avviene appunto per i campi di gradiente. Esso consiste nel calcolare un indice di esposizione (che nel seguito indicheremo con la sigla I_{WP} dall'inglese *weighted peak*) attraverso una elaborazione che tiene conto sia delle ampiezze dei contributi spettrali presenti nel segnale considerato (rapportate ai valori di riferimento normativi alle frequenze corrispondenti), sia delle rispettive fasi. Un valore di questo indice inferiore a 1 – o 100% su base percentuale – indica conformità con la normativa presa a riferimento.

L'applicazione attualmente disponibile si adatta solo allo specifico formato di file-dati prodotto dalla catena hardware e software descritta al par. 2; tuttavia, ne è in corso di sviluppo una versione più avanzata, nella quale il formato accettato viene il più possibile generalizzato.

L'applicazione consente di selezionare dal computer dell'utente i file-dati costituenti la misura (Figura 28), eventualmente disporli nella giusta sequenza mediante un semplice trascinamento tramite mouse, e inviarli al server per l'elaborazione. L'utente deve anche specificare il tipo di sensore collegato alla sonda ELT-400 (da 3 o da 100 cm²), l'impostazione di quest'ultima e la frequenza di campionamento utilizzata.

L'interfaccia utente dispone di una barra dinamica di avanzamento del caricamento dei dati sul server, utile per visualizzare lo stato dell'operazione in caso di *upload* di file di dimensioni considerevoli.

La procedura software lato server riceve i file di dati e li unisce in un'unica sequenza ordinata di campioni vettoriali, che vengono successivamente analizzati nel dominio del tempo – sulla base dei parametri operativi specificati – per calcolare l'ampiezza efficace e di picco del campo magnetico e determinare gli indici di picco ponderato relativi alle normative seguenti.

- Raccomandazione Europea 1999/519/CE [5] (limiti corrispondenti alle Linee Guida ICNIRP-1998 per la popolazione [6]).
- Direttiva Europea 2004/40/CE [7] (limiti corrispondenti alle Linee Guida ICNIRP-1998 per i lavoratori [6]).
- Valori di Azione inferiori introdotti dal D.Lgs. 159/2016 nel range 1 Hz-10 MHz [8] (corrispondenti ai livelli di riferimento delle Linee Guida ICNIRP-2010 per i lavoratori [9]).
- Valori di Azione superiori introdotti dal D.Lgs. 159/2016 nel range 1 Hz-10 MHz [8].

L'applicazione produce anche un grafico, in cui viene rappresentato l'andamento in funzione del tempo dell'indice riferito ai succitati valori di azione inferiori, in un intorno dell'istante in cui tale indice raggiunge il suo valore massimo. Un esempio dei risultati forniti è mostrato in Figura 29.

Narda ELT-400 con sonda da 100 cm²

Mode FS 320 μ T Range Low Mode FS 320 μ T Range High
 Mode FS 80 mT Range Low Mode FS 80 mT Range High

Narda ELT-400 con sonda da 3 cm²

Mode FS 320 μ T Range Low Mode FS 320 μ T Range High
 Mode FS 80 mT Range Low Mode FS 80 mT Range High

Frequenza di campionamento kHz ▼

File dati

PuntoA_X0Y0Z1_1.txt
 PuntoA_X0Y0Z1_2.txt
 PuntoA_X0Y0Z1_3.txt
 PuntoA_X0Y0Z1_4.txt
 PuntoA_X0Y0Z1_5.txt
 PuntoA_X0Y0Z1_6.txt
 PuntoA_X0Y0Z1_7.txt
 PuntoA_X0Y0Z1_8.txt
 PuntoA_X0Y0Z1_9.txt
 PuntoA_X0Y0Z1_10.txt

Dimensione totale dei file caricati: 33 MB

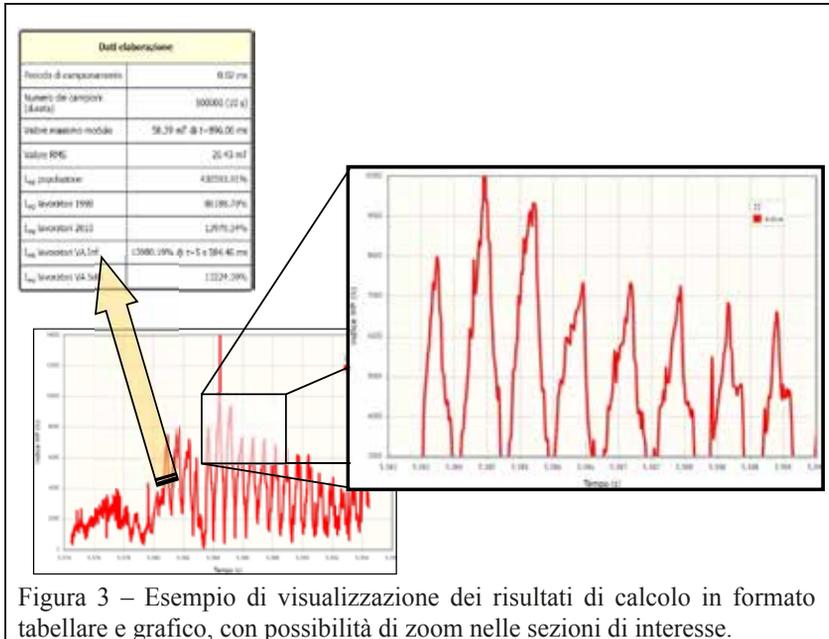
Elabora

Reset

Salva PNG

Caricati 26.54 MB su 34.74 MB in 2.32 s (76% completato).

Figura 2 – Interfaccia per la selezione delle impostazioni della catena strumentale e caricamento dei file di dati.



5 – IL GATEWAY VERSO PYTHON

Le applicazioni implementate sulla piattaforma WebNir necessitano di eseguire elaborazioni matematiche complesse. Per questo motivo, si è adottato Python come linguaggio di programmazione lato server, in modo da sfruttarne i vantaggi in termini di rapidità di sviluppo del codice, efficienza computazionale e disponibilità di estensioni progettate per l'utilizzo in ambito scientifico (si pensi ad esempio ai moduli NumPy e SciPy).

Per garantire l'interoperabilità tra ambiente web ed interprete Python si è fatto ricorso all'interfaccia standard WSGI (Web Server Gateway Interface).

È stato inoltre messo a punto un protocollo standardizzato (denominato Gateway to Python, GW2Py) per lo scambio dei dati nelle due direzioni tra pagine web e procedure Python, pensato con lo scopo di garantire uniformità di approccio, portabilità, e flessibilità nella suddivisione del lavoro tra più sviluppatori e nella ripartizione del carico computazionale tra computer utente e piattaforma server.

Il protocollo GW2Py rende disponibili a una procedura Python i dati inseriti in una pagina HTML e trasmessi sulla rete con protocollo HTTP. La pagina HTML può eventualmente essere realizzata con procedure PHP ed essere supportata da un database e da funzioni Javascript.

d-A2018

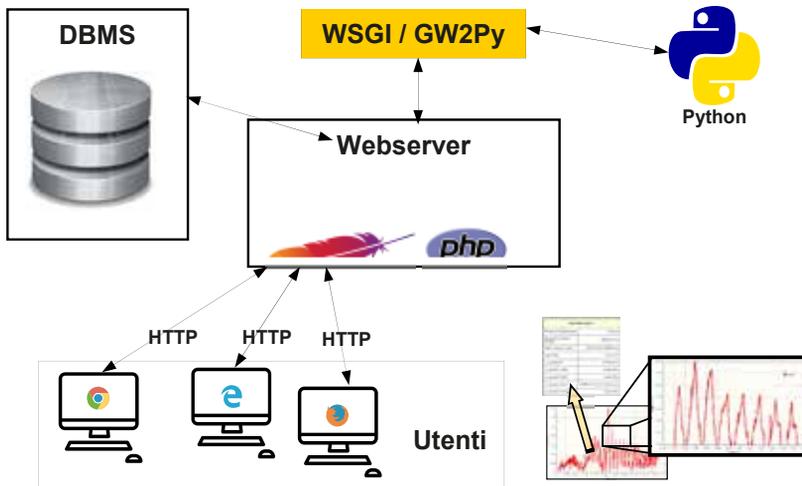


Figura 4 – Schema della struttura software della piattaforma WebNir e relazioni tra i vari moduli coinvolti.

Questo approccio consente sia di inviare al server dati di qualunque tipo inseriti in un classico “form” HTML (come valori alfanumerici scalari o vettoriali, oppure uno o più file di dati in modalità *upload*), sia di utilizzare procedure Javascript per costruire dinamicamente il set di dati da inviare, in base alle operazioni dell’utente e senza avvalersi della tradizionale struttura del “form”. I dati vengono inviati ad una specifica “funzione operativa” all’interno di un modulo Python, che si occuperà dell’elaborazione e della restituzione dei risultati.

L’interfaccia di ritorno (da Python ad HTML/Javascript) provvede ad elaborare i dati forniti dalla “funzione operativa” e produrre i risultati da mostrare all’utente. Piuttosto che generare direttamente sul server il codice HTML comprensivo delle immagini, si è preferito adottare un approccio secondo il quale i dati sono restituiti dal server sempre come stringa alfanumerica JSON (JavaScript Object Notation, un semplice formato per lo scambio di dati). Nel computer dell’utente, questa stringa viene controllata, decodificata e infine utilizzata per preparare e mostrare all’operatore i risultati dell’elaborazione eseguita. Da essa si ricavano infatti tutti gli oggetti che popolano la pagina web mostrata all’utente: i valori numerici relativi ai risultati del calcolo (sotto forma di dati singoli o tabelle) e i grafici vettoriali con cui l’utente può eventualmente interagire.

In Figura 30 viene illustrata schematicamente la struttura software della piattaforma WebNir, con le relazioni tra i moduli impiegati.

6 – IL SISTEMA DI GENERAZIONE DEI GRAFICI

Una delle necessità che si sono presentate nel corso del progetto è stata la produzione di grafici con cui documentare i risultati delle elaborazioni scientifiche prodotte dalle applicazioni realizzate.

Dopo aver analizzato varie alternative (generazione lato server o sul computer dell'utente, formato vettoriale o bitmap, quantità di opzioni rese disponibili dalla libreria utilizzata), la scelta è caduta su jqPlot, un *plugin* Javascript basato sul *framework* jQuery (ampiamente utilizzato per la realizzazione di tutte le interfacce della piattaforma WebNir). Si tratta di una libreria *open source*, che fornisce un'ampia categoria di opzioni e supporta una vasta gamma di tipologie di grafico, delegandone interamente la generazione al computer utente. Questo aspetto è particolarmente importante se associato ad ulteriori considerazioni: i grafici prodotti sono di tipo vettoriale e l'utente ha la possibilità di interagire con essi (ad esempio disabilitando alcune delle serie visualizzate, spostando la legenda, interrogando il grafico tramite uno spostamento del cursore del mouse sugli oggetti in esso presenti, effettuando uno zoom) senza dover attendere una risposta da parte del server, in quanto tutti i dati sono già disponibili localmente.

Inoltre, trattandosi di una libreria Javascript, è stato possibile definire un approccio standardizzato tramite il quale, fornendo un oggetto Javascript ad una funzione appositamente creata, questa genera automaticamente una serie di grafici nella pagina web di destinazione. In questo modo, tutti i programmi che eseguono le elaborazioni e vogliono produrre un grafico, devono solo preparare ed inviare l'opportuno argomento alla funzione suddetta.



Figura 5 – Utilità di esportazione dei grafici in formato PNG, per diversi grafici presenti nella stessa pagina.

Un'ulteriore utilità sviluppata in quest'ambito è quella che permette di automatizzare l'esportazione in formato PNG di tutti i grafici presenti in una pagina. In Figura 31 viene mostrata la finestra di esportazione che si apre quando l'utente lancia l'esecuzione della procedura di esportazione. Oltre alle immagini, si noti la generazione automatizzata di grafici di tipo diverso.

7 – RISULTATI

L'applicazione per il calcolo dell'indice I_{WP} descritta al par. 4 è stata utilizzata per l'elaborazione dei dati di campo magnetico di gradiente acquisiti nel corso di una campagna di misure effettuata presso la Fondazione Imago 7 di Calambrone (Pisa), dove è presente un tomografo a corpo intero da 7 T General Electric Discovery MR950.

Le misure sono state effettuate in varie posizioni all'interno della sala magnetica, sia nei punti dove è effettivamente possibile che un operatore sanitario stazioni durante alcune procedure mediche, sia in punti rappresentativi di livelli di esposizione elevati al di fuori del *bore*.

Tali posizioni sono identificate come segue.

d-A2018

- Punto A - a destra del lettino paziente guardando verso il tomografo: 50 cm di distanza dal piano frontale del tomografo, 70 cm dall'asse mediano del lettino, due altezze dal pavimento, 120 e 170 cm.
- Punto B - a sinistra del lettino paziente guardando verso il tomografo: stesse coordinate del punto A.
- Punto C - sopra il lettino paziente: 50 cm dal piano frontale del tomografo, altezza 110 cm dal pavimento.

Per le misure è stata impiegata la sonda ELT-400 con sensore da 100 cm², con i seguenti parametri operativi: modalità FS 320 μ T – Range Low (per il punto A) e High (per il punto C), frequenza di taglio di 30 Hz. La frequenza di campionamento adottata è stata di 50000 campioni al secondo, acquisendo segmenti temporali di 10 ÷ 20 s, con differenti configurazioni per il tomografo (“sequenze”), quali a titolo di esempio EPI01 (*EPI Assiale Gradient 128x128, 48 fette, asse T2, TR 3000ms*); DWI02 (*Diffusion Weighted Imaging Assiale 128x128, 64 fette, TR 8100 ms, B 1000, asse T2*).

I risultati delle elaborazioni hanno mostrato indici di picco ponderato molto bassi in tutte le prove realizzate, anche considerando gli scenari espositivi peggiori (*worst case*) in corrispondenza di sequenze estremamente veloci. Tutte le misure effettuate nel punto A (68 acquisizioni) hanno presentato valori dell'indice inferiori all'1%. Valori più elevati, ma comunque inferiori al 20%, sono stati calcolati nella posizione di misura C (13 acquisizioni). I bassi valori degli indici dipendono verosimilmente dalla tecnologia impiegata nei tomografi da 7 T, caratterizzati da un *bore* molto lungo, che comporta un sostanziale confinamento dei campi magnetici di gradiente al suo interno.

L'esposizione in dettaglio di tutti i risultati della campagna esula dagli scopi del presente lavoro, indirizzato alla verifica delle potenzialità dell'applicazione sviluppata.

La prima considerazione che si trae dal suo utilizzo riguarda i tempi di calcolo, che permettono di elaborare rapidamente una consistente quantità di dati. Anche la restituzione dei risultati è molto efficace, essendo strutturata in grafici e tabelle riepilogative delle elaborazioni. Nella Figura 6 è presentato un esempio dell'andamento nel tempo dell'indice di picco ponderato I_{WP} relativo ad una misura effettuata nel Punto A utilizzando come limiti i VA inferiori introdotti dal D.Lgs.159/2016.

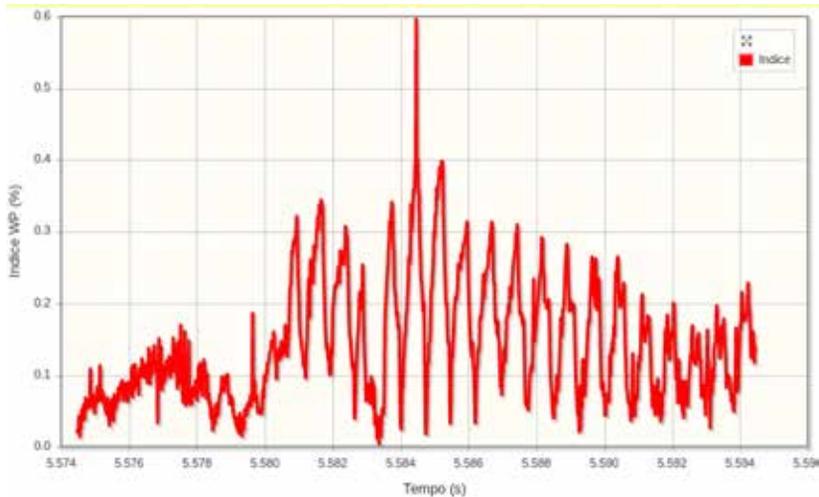


Figura 6 – Andamento nel tempo dell'indice di picco ponderato.

<i>Periodo di campionamento</i>	<i>0.02 ms</i>
<i>Numero dei campioni (durata)</i>	<i>500000 (10 s)</i>
<i>Valore massimo modulo</i>	<i>2.491 μT @ $t=0.9 s$</i>
<i>Valore RMS</i>	<i>0.9 μT</i>
<i>I_{WP} popolazione</i>	<i>18.37 %</i>
<i>I_{WP} lavoratori 1998</i>	<i>3.68 %</i>
<i>I_{WP} lavoratori 2010</i>	<i>0.60 %</i>
<i>I_{WP} lavoratori VA Inferiori</i>	<i>0.60% @ $t=5.584 s$</i>
<i>I_{WP} lavoratori VA Superiori</i>	<i>0.56%</i>

Tabella 4 – Riepilogo dei risultati

Il picco massimo rappresenta il valore di I_{WP} cercato, espresso in percentuale. Dal grafico si distingue in maniera ottimale sia il valore assunto dall'indice che l'istante in cui esso viene raggiunto.

Informazioni più approfondite, come già detto, sono fornite sotto forma di tabelle, di cui si riporta un esempio in Tabella 4.

Nell'insieme, da tutte le elaborazioni effettuate, sono emerse la semplicità di uso, l'efficienza e la versatilità dell'applicazione.

8 – CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

L'applicazione utilizzata, sebbene funzionante e già disponibile per l'uso, è comunque suscettibile di ulteriori sviluppi e perfezionamenti.



d-A2018

In particolare si sta progressivamente trasformando in uno strumento più generale, utilizzabile in modo interattivo per la determinazione dell'indice di picco ponderato nel dominio del tempo e nel dominio della frequenza, per un'ampia categoria di sorgenti di induzione magnetica (come ad esempio le saldatrici a punti e ad arco, e gli stimolatori magnetici transcranici); l'applicazione sarà in grado di adattarsi alla più ampia tipologia possibile di strumenti di misura e di forme d'onda campionate.

L'intenzione è fornire uno strumento operativo semplice che renda possibile, anche in mancanza di conoscenze specialistiche, eseguire valutazioni affidabili dell'esposizione con accuratezza sufficiente dando priorità alle sorgenti di esposizione più diffuse e di interesse protezionistico.

9 – CREDITI

Il presente lavoro si è avvalso del supporto finanziario fornito dall'INAIL nell'ambito del progetto a Bando Bric-2016, Programma 4, Tematica 30.

BIBLIOGRAFIA

- [1] R.Lodato, S.Mancini, G.M.Contessa, V.Brugaletta, D.Andreuccetti, N.Zoppetti and P.Rossi: "Setup for gradients field measurement in MRI". Abstract collection of the X International Congress of the European Bioelectromagnetics Association (EBEA2011), Rome (Italy), 21-24 February 2011, and ISBN 978-88-8286-231-2 (extended abstract n.5154).
- [2] D.Andreuccetti, G.M.Contessa, R.Falsaperla, R.Lodato, R.Pinto, N.Zoppetti and P.Rossi: "Weighted-peak assessment of occupational exposure due to MRI gradient fields and movements in a nonhomogeneous static magnetic field". *Medical Physics* (ISSN 0094-2405), Vol.40, N.1, January 2013, 011910 (10 pages); <http://dx.doi.org/10.1118/1.4771933>;
- [3] R.Pinto, N.Zoppetti, C.Merla, R.Lodato, R.Falsaperla, V.Lopresto, G.M.Contessa and D.Andreuccetti: "The weighted-peak method in time and frequency domain: an operative application to the analysis on MRI gradient signals". Abstract collection of the Joint Meeting of the Bioelectromagnetics Society and the European BioElectromagnetics Association (BioEM2013), Thessaloniki (Greece), 10-14 June 2013, pp.539-541, ISBN 978-16-2748-901-0 (extended abstract).
- [4] R.Falsaperla, D.Andreuccetti, G.M.Contessa, R.Lodato, V.Lopresto, C.Merla, R.Pinto, P.Rossi and N.Zoppetti: "Occupational exposure to electromagnetic fields in MRI facilities: a case study in Italy". Abstract collection of the 31st International Congress on Occupational Health, Seoul COEX Convention Center (Korea), 31 May - 5 June 2015.
- [5] Raccomandazione 1999/519/CE del Consiglio europeo del 12 luglio 1999 relativa alla limitazione dell'esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici da 0 Hz a 300 GHz. *Gazzetta ufficiale delle Comunità europee* L 199/59-70, 30.7.1999.
- [6] ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Physics*, Vol.74, N.4, April 1998, pp.494-522.
- [7] Direttiva 2004/40/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 29 aprile 2004 sulle prescrizioni minime di sicurezza e di salute relative all'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dagli agenti fisici (campi elettromagnetici). *Gazzetta ufficiale dell'Unione europea* L 184/1-9, 24.5.2004.
- [8] Decreto Legislativo 1° agosto 2016, n.159. Attuazione della direttiva 2013/35/UE sulle disposizioni minime di sicurezza e di salute relative all'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dagli agenti fisici (campi elettromagnetici) e che abroga la direttiva 2004/40/CE.

**d=A2018**

Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana Serie generale - n.192, agosto 2016.

- [9] ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). Health Physics, Vol.99, N.6, December 2010, pp.818-836.