

d-BA 2019

Agenti fisici e salute nei luoghi di lavoro

Atti a cura di:

S. Goldoni, P. Nataletti, N. Della Vecchia, A. Santarpia

Bologna, 17 ottobre 2019

Agenti fisici e salute nei luoghi di lavoro

STRUMENTI OPERATIVI PER LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO DA CEM

Daniele Andreuccetti ⁽¹⁾, Rosaria Falsaperla ⁽²⁾

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

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

RIASSUNTO

L'Istituto di Fisica Applicata "Nello Carrara" del Consiglio Nazionale delle Ricerche (IFAC-CNR) è capofila di un progetto di ricerca finanziato dall'INAIL che vede coinvolte, oltre al Dipartimento di medicina, epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale (DiMEILA) della stessa INAIL, anche unità operative dell'Azienda USL Toscana Sud Est, della Fondazione IRCCS Policlinico San Matteo di Pavia e dell'Istituto Superiore di Sanità. In questo progetto si sta sviluppando WEBNIR, una piattaforma web ad accesso libero, attraverso la quale viene distribuita una serie di "strumenti web" pensati per fornire supporto alla valutazione dell'esposizione occupazionale ai campi elettromagnetici (con approfondimento delle problematiche specifiche dei portatori di dispositivi medici impiantabili attivi) e alle radiazioni ottiche artificiali.

In questo lavoro si riepilogano le finalità del progetto e si presentano sinteticamente le funzionalità messe a disposizione della piattaforma, con particolare riferimento a quelle orientate alla valutazione dell'esposizione ai campi elettromagnetici.

INTRODUZIONE

Il Decreto Legislativo 1° agosto 2016 n.159 [1] di recepimento della Direttiva Europea 2013/35/UE [2], nel riformulare l'articolo 209 del Decreto Legislativo 9 aprile 2008 n.81 [3], ha previsto esplicitamente che la valutazione dell'esposizione dei lavoratori alle radiazioni non ionizzanti

possa essere effettuata anche basandosi sulle “informazioni reperibili presso banche dati dell’INAIL o delle regioni”. D’altra parte, gli art. 28 e 29 del citato D.Lgs. 81/2008 prevedono che l’INAIL renda disponibili strumenti tecnici e specialistici a supporto dei processi di standardizzazione, semplificazione e riduzione dei livelli di rischio. Basandosi anche su questi presupposti, l’INAIL ha bandito nel 2016 un progetto di ricerca in collaborazione avente l’obiettivo di sviluppare e raccogliere in una piattaforma web una serie di strumenti operativi, pensati per dare supporto agli operatori della prevenzione pubblici e privati, nelle attività di valutazione e riduzione del rischio da esposizione ai campi elettromagnetici (CEM) e alle radiazioni ottiche artificiali (ROA) e di analisi e gestione dei rischi per i portatori di dispositivi medici impiantabili attivi (DMIA). Il progetto, che ha preso l’avvio nel giugno 2017 e giungerà alla conclusione a fine 2019, ha portato alla realizzazione della “piattaforma WEBNIR” [4].

LA PIATTAFORMA WEBNIR

La piattaforma WEBNIR è un sito web raggiungibile all’indirizzo <http://webnir.ifac.cnr.it> e articolato in tre sezioni; la prima di esse (“Sezione pubblica”) è ad accesso libero, mentre le altre (“Sezione gestionale” e “Sezione sviluppo”, finalizzate rispettivamente alla gestione del progetto e allo sviluppo delle applicazioni), sono protette da credenziali riservate al *team* che sviluppa il progetto stesso. Questo *team* comprende unità operative dell’IFAC-CNR, dell’INAIL-DiMEILA, dell’Azienda USL Toscana Sud Est, del Policlinico San Matteo di Pavia e dell’Istituto Superiore di Sanità.

La sezione pubblica è sostanzialmente un contenitore di documenti ed applicazioni ed è organizzato in tre aree tematiche, rispettivamente dedicate ai campi elettromagnetici (“Area CEM”), alle radiazioni ottiche artificiali (“Area ROA”) e alle problematiche dei dispositivi medici impiantabili attivi (“Area DMIA”). Una volta completata, la sezione pubblica ospiterà e renderà liberamente fruibili numerosi contenuti (genericamente denominati “strumenti web”), comprendenti:

- la presentazione e l’analisi della normativa di radioprotezione sui campi elettromagnetici;
- un inventario di sorgenti occupazionali di campi elettromagnetici;
- documenti procedurali, che riepilogano le principali indicazioni operative idonee a guidare gli operatori nel processo di valutazione dell’esposizione a CEM e ROA per alcune tipologie di sorgenti;
- documenti tecnico-scientifici, che approfondiscono questioni tecniche rilevanti e/o complesse;
- applicazioni web, pensate per risolvere alcuni tra i più comuni problemi di calcolo ed elaborazione dati che si incontrano nell’attività di

valutazione dell'esposizione occupazionale a CEM e ROA e nello studio dei rischi CEM per i portatori di DMIA.

L'Area CEM, di cui in particolare ci occupiamo in questo lavoro, raccoglie gli strumenti a supporto della valutazione del rischio da campi elettromagnetici nei luoghi di lavoro. L'accesso ai contenuti di questa Area è organizzato secondo due modalità di ricerca, denominate rispettivamente "Ricerca per tipologia di strumenti" e "Ricerca per classi di sorgenti". Nel primo caso, l'utente accede ad un elenco costruito raccogliendo gli strumenti in gruppi omogenei in base al tipo di funzione svolta. Nel secondo, all'utente viene presentato un elenco di sorgenti occupazionali di campi elettromagnetici (organizzato in classi di sorgenti affini per ambito di applicazione), per ciascuna delle quali sono indicati gli strumenti applicabili.

INFRASTRUTTURA TECNOLOGICA

L'infrastruttura tecnologica su cui si basa la piattaforma WEBNIR è già stata descritta in precedenti pubblicazioni [5,6] e verrà qui solo riepilogata.

La piattaforma è ospitata su una *workstation* di adeguate prestazioni *hardware*. Tutta l'architettura *software* installata o sviluppata su di essa (a partire dal sistema operativo Debian GNU/Linux) utilizza strumenti e linguaggi *open source*.

Le interfacce utente di navigazione e di utilizzo delle applicazioni sono state realizzate per mezzo di pagine web scritte in linguaggio HTML e supportate da procedure Javascript; per queste ultime, si è fatto largo uso del *framework* jQuery. Per la visualizzazione dei grafici con cui documentare i risultati delle applicazioni, si è utilizzata la libreria jqPlot (un *plugin* Javascript basato su jQuery), che supporta molteplici tipologie di grafico e mette a disposizione un'ampia gamma di opzioni, consentendo di realizzare grafici di buona qualità, ampiamente personalizzabili ed esportabili in formato PNG sul computer dell'utente.

Tutti i dati necessari al funzionamento della piattaforma e degli applicativi sono conservati in un *database* PostgreSQL. Il linguaggio PHP viene ampiamente utilizzato per gestire i rapporti tra le pagine web e il *database*, nonché per tutte le elaborazioni non impegnative dal punto di vista computazionale. Per queste ultime (come per esempio interpolazioni e filtri numerici), viene invece utilizzato il linguaggio Python; a questo fine, è stata implementata una interfaccia dedicata per lo scambio bidirezionale di dati tra procedure PHP e procedure Python, denominata GateWay to Python (GW2Py), basata sul protocollo WSGI (Web Server Gateway Interface) e pensata per garantire uniformità di approccio, portabilità e flessibilità.

GLI STRUMENTI PER I CEM

Nel seguito si riepilogano le principali caratteristiche di alcuni degli strumenti presenti nell'Area CEM della piattaforma WEBNIR. Molti di essi sono già stati completati e pubblicati sulla piattaforma (sebbene modifiche e perfezionamenti siano sempre possibili, almeno fino alla fine del progetto), altri sono in procinto di esserlo o si trovano in fase di sviluppo più o meno avanzata; tutti saranno in ogni caso resi fruibili entro la data di conclusione del progetto.

Ogni strumento inserito in WEBNIR viene documentato attraverso schede informative accessibili dall'interfaccia utente. Ogni scheda presenta brevemente l'applicazione, ne descrive le finalità e riporta le istruzioni per il suo uso corretto.

Consultazione di un elenco strutturato di sorgenti CEM

Viene mostrato un elenco di sorgenti occupazionali di campi elettromagnetici, che completa ed estende l'analogo elenco presente sul Portale Agenti Fisici (PAF) [7]. L'elenco è organizzato secondo una struttura gerarchica che ne facilita la consultazione. Per ciascuna sorgente si indicano l'eventuale esistenza sul PAF e la *giustificabilità* a priori e si propongono i collegamenti agli strumenti web utilizzabili in relazione ad essa. Si evidenzia in proposito che per "giustificabilità" di una sorgente ci si riferisce ai casi in cui è possibile eseguire una valutazione del rischio semplificata in considerazione della natura e entità dei rischi associati.

Visualizzazione e confronto dei limiti normativi

Vengono riportate le principali caratteristiche delle normative nazionali e comunitarie relative alla protezione dalle esposizioni ai campi elettromagnetici e viene mostrato in grafico l'andamento dei valori limite in funzione della frequenza. È possibile calcolare il limite ad una frequenza specifica. È possibile riportare in grafico e confrontare gli andamenti in funzione della frequenza di due o più limiti normativi relativi a grandezze omogenee, scelti tra le normative supportate.

Determinazione della distanza di rispetto tramite interpolazione

La *distanza di rispetto* (DR) è un parametro che si rivela molto indicato per sintetizzare i risultati di una valutazione, in quanto indica la distanza da una sorgente oltre la quale un particolare limite normativo viene rispettato.

L'applicazione per la determinazione della DR accetta un semplice file dati (redatto in un apposito formato) relativo alle misure di un indice di esposizione (indice di somma spettrale lineare o quadratica, indice di picco ponderato), rilevato in molteplici punti posti lungo una linea retta, a distanze progressivamente crescenti dalla sorgente. L'utente può opzionalmente specificare, direttamente nell'interfaccia dell'applicazione, gli errori di

misura sulla distanza e/o sull'indice. Viene quindi eseguita una interpolazione polinomiale, mediante la quale si determina la distanza a cui si intercetta il limite normativo. Vengono riportati in grafico (esempio in **Figura 1**) i valori misurati (con le barre di errore se disponibili), la curva di interpolazione e il valore della distanza di rispetto con il relativo intervallo di confidenza.

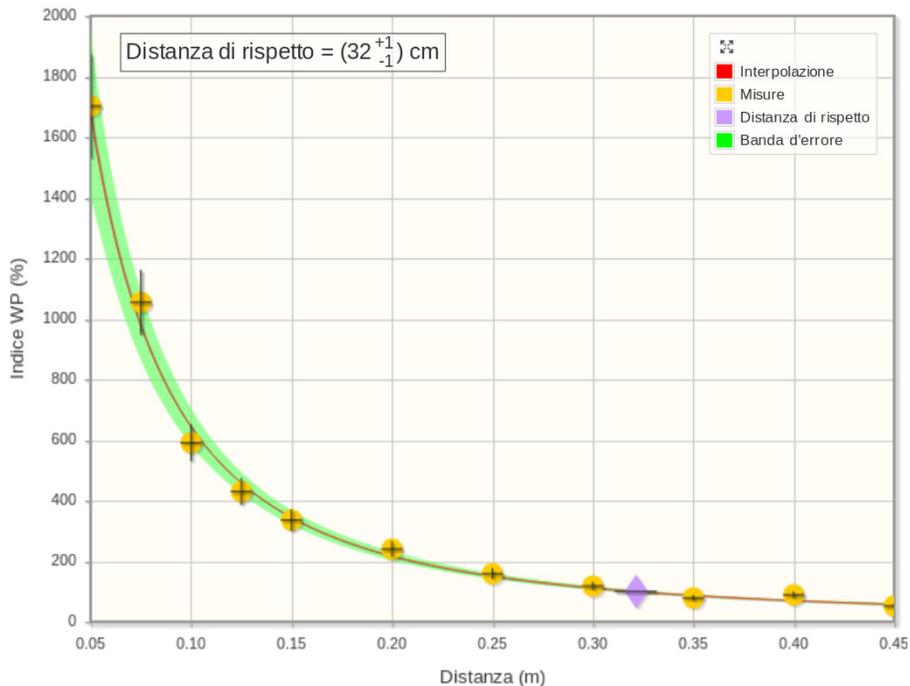


Figura 1 – Esempio di visualizzazione dei risultati dell'applicazione per l'interpolazione dei valori di indice di picco ponderato (WP) e la ricerca della distanza di rispetto, relativa a misure del campo magnetico di una saldatrice ad arco, con errore assoluto sulla distanza di 5 mm ed errore relativo sull'indice del 10%.

Elaborazione di misure di campo magnetico percepito

Viene analizzata una sequenza temporale regolare di misure vettoriali di induzione magnetica, acquisite da uno dei più comuni strumenti del settore (Narda/Metrolab THM1176 Three-axis Hall Magnetometer), indossato da un soggetto in movimento in un campo magnetostatico. Viene accettato ed elaborato il file dati salvato dallo strumento in modo nativo e vengono determinati il valore di picco dell'induzione magnetica, la sua massima variazione su 3 secondi e gli indici di picco ponderato nel dominio del tempo

relativi alle principali normative. Le grandezze misurate e calcolate vengono documentate sia graficamente, sia in forma tabellare.

Pur non essendo espressamente richieste dalla Direttiva 2013/35/UE, queste valutazioni sono ben fondate da un punto di vista tecnico-scientifico, in quanto basate sulla pertinente Linea Guida pubblicata dall'ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) nel 2014 [9] e sono indicate dalla Guida non vincolante di buone prassi [10] per l'attuazione della stessa direttiva 35, qualora si vogliano effettuare valutazioni più approfondite.

Analisi di forme d'onda e calcolo dell'indice di picco ponderato

Vengono analizzate le forme d'onda relative a misure di campo elettrico o magnetico a frequenza bassa o intermedia, campionate nel dominio del tempo o della frequenza. Vengono accettati i file dati acquisiti dalle più comuni catene di misura (oppure i file dati la cui struttura viene descritta dettagliatamente dall'utente) e vengono determinati e mostrati in grafico e in tabella (esempio in **Figura 2**) alcuni parametri radioprotezionistici riepilogativi, come per esempio gli indici di picco ponderato relativi alle principali normative applicabili.

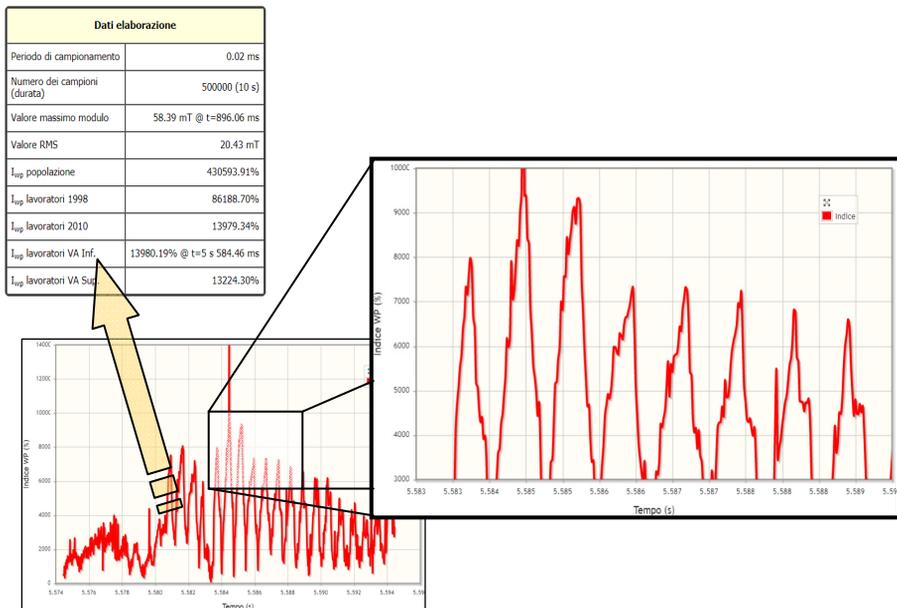


Figura 2 – Esempio di visualizzazione dei risultati dell'applicazione per l'analisi di una forma d'onda nel dominio del tempo, relativa a misure di campo magnetico di gradiente in risonanza magnetica.

Calcolo dell'induzione magnetica dispersa da un sistema di elettrodotto aerei o interrati

L'applicazione gestisce fino a 10 linee elettriche parallele, aeree o interrate, ciascuna costituita da un massimo di 30 conduttori percorsi da corrente nota. È possibile selezionare le strutture particolarmente impattanti predefinite nel sistema ed eventualmente modificarle, oppure descriverne di nuove inserendo direttamente i valori di tutti i parametri geometrici ed elettrici pertinenti. Occorre poi fornire le informazioni sulla modalità di calcolo, che viene eseguito su una sezione verticale ortogonale ai conduttori. Si determinano i valori di induzione magnetica lungo una linea perpendicolare alla direzione dei conduttori e posta ad una altezza prefissata dal terreno (supposto piano, ma non necessariamente orizzontale) e si ricercano i punti della sezione in cui l'induzione assume un particolare valore indicato dall'utente. I risultati sono riportati in due distinti grafici. La seconda modalità è particolarmente utile per l'individuazione delle cosiddette "fasce di rispetto".

Modellazione numerica di sorgenti

Questa applicazione consente di definire e modellare varie tipologie di sorgenti quasistatiche di induzione magnetica; le tipologie attualmente previste sono il segmento rettilineo, la bobina a spira singola o multipla e il solenoide; per mezzo di esse, è possibile rappresentare un'ampia gamma di sorgenti reali, costituite da conduttori filiformi e avvolgimenti di vario tipo. L'utente deve specificare i parametri che definiscono la geometria della sorgente, la sua posizione nello spazio e il valore della corrente che la percorre. L'applicazione provvede a calcolare il vettore induzione magnetica disperso nell'ambiente, utilizzando il modello analitico o numerico più idoneo caso per caso.

Valutazione dell'efficacia schermante di schermi piani omogenei

L'applicazione si colloca nell'ambito delle attività per il contenimento dell'esposizione ai campi elettromagnetici ed offre un ausilio preliminare al dimensionamento di una schermatura.

Viene utilizzato un modello semplificato per valutare la *shielding effectiveness* (SE) di uno schermo ideale, modellato come una lastra piana omogenea indefinita, costituita da materiale conduttore di data conducibilità elettrica e permeabilità magnetica. Nel caso dei materiali ferromagnetici, viene utilizzato un semplice modello Cole-Cole [11] per tenere approssimativamente conto della variazione della permeabilità con la frequenza. È possibile selezionare il materiale tra quelli, di caratteristiche note, predefiniti nell'archivio dell'applicazione, oppure definire un materiale personalizzato, inserendone le relative caratteristiche elettriche e magnetiche. Vengono valutati i contributi alla SE originati dalle riflessioni sulle

interfacce di entrata e di uscita dalla lastra-schermo, dall'assorbimento in quest'ultima e dalle eventuali riflessioni multiple. Oltre a fornire il valore della SE in un caso specifico, l'applicazione permette di costruire grafici (esempio in **Figura 3**) in cui viene riportato l'andamento della SE in funzione della variazione di uno o due parametri del problema.

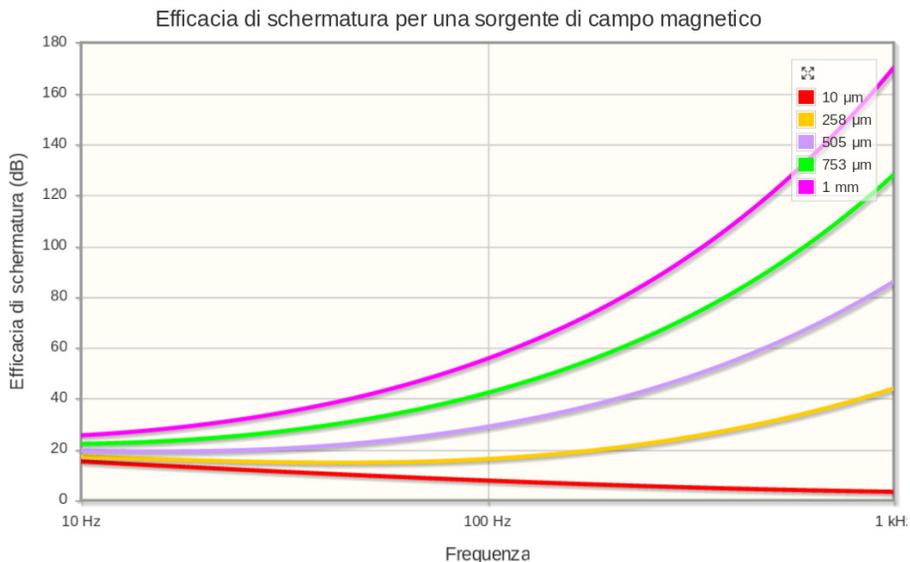


Figura 3 – Esempio di visualizzazione dei risultati dell'applicazione per la stima della Shielding Effectiveness (SE): SE di una lastra di ferro puro al 99.95%, per frequenze da 10 Hz a 1 kHz e vari spessori, nei confronti di una sorgente di campo magnetico posta a 50 cm di distanza dallo schermo.

Stima della tensione indotta all'ingresso di un pacemaker¹

Questa applicazione permette di calcolare la tensione indotta ai terminali di ingresso di un *pacemaker* in funzione delle sue condizioni di esposizione (in particolare, dei valori di intensità di campo elettrico e/o di campo magnetico), attraverso l'implementazione delle formule riportate nell'appendice della norma CEI EN 50527-2-1 [12], con riferimento alla situazione di caso peggiore, in cui l'area formata dal *pacemaker* e dall'elettrocattetero nel corpo umano è di 225 cm². Il calcolo viene effettuato inserendo la frequenza di interesse e i valori di picco massimo di campo elettrico e di campo

¹ Questa applicazione è inserita nell'Area DMIA di WEBNIR, a differenza di tutti gli altri strumenti web descritti in questo lavoro, che si trovano nell'Area CEM.

magnetico misurati. Il valore di tensione indotta così ottenuto può essere confrontato con i livelli di immunità che i *pacemaker* devono soddisfare, alle varie frequenze, per verificarne la compatibilità con le condizioni di esposizione.

Procedure di intervento schematiche standardizzate

Sono state predisposte le seguenti procedure, validate nel corso di apposite campagne di misura.

Valutazione dell'esposizione al campo magnetico generato da un apparato per stimolazione magnetica transcranica.

Valutazione dell'esposizione al campo magnetico generato da una saldatrice industriale a punti o ad arco.

Valutazione dell'esposizione al campo elettrico e magnetico generato da un elettrobisturi.

Valutazione dell'esposizione al campo magnetico di gradiente in risonanza magnetica.

Valutazione dell'esposizione dovuta al movimento di un soggetto in un campo magnetico statico.

CONCLUSIONI

La piattaforma WEBNIR mette a disposizione una serie di strumenti pensati sia con finalità di formazione individuale, sia per fornire supporto nelle fasi di conduzione delle attività di valutazione dell'esposizione e di elaborazione ed interpretazione dei dati misurati.

Essa contribuisce quindi a dare risposta in modo concreto alle aspettative aperte dal D.Lgs. 81/2008 [3], in particolare dove si chiama in causa la possibilità di far uso di informazioni reperibili presso banche dati e siti web.

La piattaforma, pertanto, può costituire un riferimento di utile e frequente consultazione per gli operatori pubblici e privati investiti dei compiti di prevenzione e protezione dalle radiazioni non ionizzanti, coadiuvandoli – specie in carenza di formazione e conoscenze specifiche e specialistiche – nell'eseguire valutazioni affidabili dell'esposizione, almeno in relazione alle sorgenti e alle problematiche più diffuse.

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] 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”. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana n.192 del 18 agosto 2016.
- [2] Direttiva 2013/35/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 26 giugno 2013 sulle disposizioni 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 179/1-21, 29.6.2013.
- [3] 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”, coordinato con il D.Lgs. 3 agosto 2009, n.106 e smi. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana n.101 del 30 aprile 2008, supplemento ordinario n.108.
<https://www.portaleagentifisici.it/filemanager/userfiles/TU-81-08-Edizione-Febbraio-2019.pdf.pdf>
- [4] WEBNIR. Piattaforma web sviluppata nell’ambito del progetto ex bando INAIL Bric-2016 (P4-ID30) “Strumenti web di ausilio alla valutazione del rischio da esposizione a campi elettromagnetici - anche in riferimento ai portatori di dispositivi medici impiantabili attivi - e a radiazioni ottiche artificiali”. 2017-2019. (<http://webnir.ifac.cnr.it/>).
- [5] D.Andreuccetti, M.Comelli, S.D’Agostino, R.Falsaperla, N.Zoppetti: “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”. Atti del convegno dBA-2018 “I rischi fisici nei luoghi di lavoro”, Bologna, 17 ottobre 2018. ISBN 978-88-940868-6-7, pag. 247-260.
- [6] M.Comelli, D.Andreuccetti: “Applicazione online per l’acquisizione e l’elaborazione di dati nel dominio del tempo e della frequenza nella valutazione dell’esposizione a CEM”. Atti del VII Convegno Nazionale Agenti Fisici “Monitoraggio ambientale: dalla produzione all’analisi del dato”, Stresa, 5-7 giugno 2019. ISBN 978-88-88648-47-7, pag.281-287.

- [7] PAF. Portale Agenti Fisici, Sezione Campi Elettromagnetici. (https://www.portaleagentifisici.it/fo_campi_elettromagnetici_index.php).
- [8] N.Zoppetti, D.Andreuccetti, M.Comelli, S.D'Agostino, R.Falsaperla: "Incertezza nella determinazione della distanza di rispetto mediante interpolazione spaziale di indici di esposizione a campi elettromagnetici". Atti del VII Convegno Nazionale Agenti Fisici "Monitoraggio ambientale: dalla produzione all'analisi del dato", Stresa (VB), 5-7 giugno 2019. ISBN 978-88-8864-847-7, pag.347-350.
- [9] ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection): "Guidelines for limiting exposure to electric fields induced by movement of the human body in a static magnetic field and by time-varying magnetic fields below 1 Hz". Health Physics, Vol.106, N.3, March 2014, pp.418-425.
- [10] Guida non vincolante di buone prassi per l'attuazione della direttiva 2013/35/UE relativa ai campi elettromagnetici. Commissione Europea, Direzione generale per l'Occupazione gli affari sociali e l'inclusione, Unità B3. Manoscritto completato nel novembre 2014. © Unione europea, 2015.
- [11] K.S.Cole and R.H.Cole: "Dispersion and absorption in dielectrics: I. Alternating current characteristics". Journal of Chemical Physics, Vol.9 (April 1941), pages 341-351.
- [12] CEI EN 50527-2-1 (2016): "Procedure for the assessment of the exposure to electromagnetic fields of workers bearing active implantable medical devices Part 2-1: Specific assessment for workers with cardiac pacemakers."