

Una procedura online per la valutazione dell'induzione magnetica emessa da sistemi complessi di conduttori

Comelli M.¹, Zoppetti N.¹, Spataro B.², Behtouei M.², Carillo M.²

¹Istituto di Fisica Applicata "Nello Carrara" del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR-IFAC),
via Madonna del Piano 10, 50019, Sesto Fiorentino (FI)

²INFN – LNF, Via Enrico Fermi 54 - 00044 Frascati (RM)

moreno.comelli@cnr.it

Riassunto

L'Istituto di Fisica Applicata "Nello Carrara" del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR-IFAC) ha sviluppato il portale WebNIR, "Strumenti Web per la valutazione dell'esposizione occupazionale alle Radiazioni Non Ionizzanti" (<https://webnir.eu>), che mette a disposizione del pubblico diversi strumenti specialistici. Uno di questi consente di calcolare l'induzione magnetica generata da sistemi di conduttori descritti da geometrie miste: spezzate, catenarie, spire circolari. Questo permette di effettuare una valutazione, ad esempio, di operatori posti in luoghi di lavoro (laboratori, officine, ambulatori) in cui le sorgenti di campo siano schematizzabili come combinazione di conduttori semplici, includendo la presenza di bobine, solenoidi, conduttori lineari e sospesi.

Mentre le catenarie vengono approssimate ad una spezzata, per le spire circolari è stata implementata una procedura sviluppata presso INFN che consente il calcolo esatto. Questa, implementata utilizzando i pacchetti scientifici messi a disposizione dal linguaggio di programmazione python (in particolare NumPy), migliora i tempi di calcolo di almeno un ordine di grandezza. Inoltre, il confronto tra diverse procedure derivate in maniera indipendente ha consentito una validazione interna del software che ha dato esito positivo.

Questo strumento si presta ad essere utilizzato non soltanto in ambito protezionistico (valutazione del campo esternamente alle spire), ma anche nel settore acceleratoristico, laddove riveste un maggiore interesse la valutazione dell'induzione internamente alla struttura delle bobine, in particolare per quanto riguarda l'andamento fuori asse.

Il tool di calcolo è strutturato in modo da essere accoppiato in maniera modulare ad uno strumento di visualizzazione ed analisi di mappe, quale QGIS. Ciò permette di importare ed esportare geometrie di conduttori disegnati, di esportare sia i risultati delle simulazioni in un grigliato regolare su file di testo, sia le geometrie coinvolte nel calcolo in formato geoPackage, in modo da essere visualizzate nello stesso ambiente ed offrire un opportuno ambito di riferimento all'operatore.

INTRODUZIONE

Presso l'Istituto di Fisica Applicata "Nello Carrara" del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR-IFAC) è stato sviluppato WebNIR (Andreuccetti, 2017), un portale che raccoglie una serie di strumenti di divulgazione e di calcolo sviluppati nell'ambito di una collaborazione con altri enti di ricerca relativi all'esposizione ai campi elettromagnetici, finanziata da INAIL.

Uno di questi strumenti consente all'utente di specificare fino a 12 configurazioni di conduttori di vario tipo, definirne sia le caratteristiche geometriche, sia quelle elettriche (intensità della corrente, fase, forma d'onda) e calcolare il valore di induzione magnetica in corrispondenza ai punti di un grigliato regolare nello spazio, costituito da un insieme di punti regolarmente distribuiti. I tipi di sorgenti tra cui l'utente può scegliere sono:

- solenoide a sezione circolare
- solenoide a sezione rettangolare

- bobina a corona
- bobina circolare 3D
- bobina rettangolare 3D
- linea spezzata
- catenaria
- geometria importata da file GIS

Potendo inoltre posizionarle ed orientarle opportunamente nello spazio, è possibile descrivere qualsiasi configurazione di conduttori in un laboratorio o in un generico ambiente di lavoro che sia rappresentabile come combinazione di queste configurazioni semplici.

Il calcolo viene eseguito in campo libero, senza considerare la presenza di elementi ferromagnetici all'interno delle bobine o di qualsiasi impegno geometrico nell'ambiente circostante.

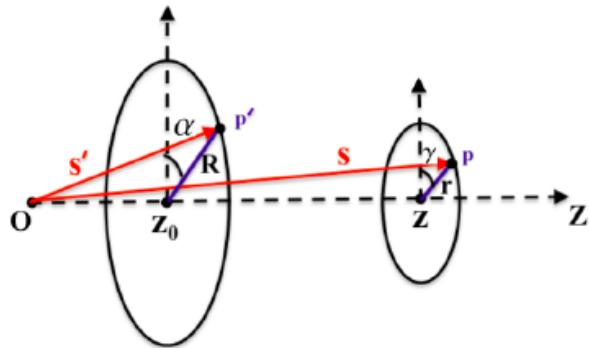
Lo strumento può rivelarsi utile sia in applicazioni di compatibilità elettromagnetica, sia nella determinazione dell'esposizione lavorativa ai campi elettromagnetici. Come vedremo nel seguito, è risultato di interesse anche in applicazioni di tipo diverso, nello specifico in ambito acceleratoreistico.

IL CALCOLO DEL CAMPO

Le tipologie di sorgenti viste in precedenza si possono suddividere in 2 categorie, a seconda che l'elemento costituente più semplice sia un segmento (come nel caso della catenaria, che viene approssimata da una spezzata) o una spira circolare. Il contributo del campo in ciascun punto del grigliato di calcolo viene determinato per ciascuna sorgente elementare (segmento o spira circolare) e i risultati vengono quindi sommati.

La soluzione del calcolo campo di un segmento percorso da corrente è nota e relativamente semplice. La soluzione in tutto lo spazio nel caso di una spira circolare richiede invece considerazioni matematiche più complesse, e parte dalla determinazione del potenziale vettore.

Figura 1- Calcolo dell'induzione di una spira circolare.



A partire da fig. 1 e dal fatto che l'induzione, essendo un campo a divergenza nulla, si può esprimere come rotore di un campo potenziale:

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$$

e scegliendo il gauge di Coulomb si ottiene la soluzione:

$$\vec{A} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint_C \frac{d\vec{l}}{s}$$

Si possono ricavare le componenti longitudinale e radiale per l'induzione magnetica (Trebbin, 2012):

$$B_z = \frac{\mu_0 I}{2\pi\sqrt{z^2 + (R+r)^2}} \left(\frac{R^2 - z^2 - r^2}{z^2 + (r-R)^2} E(k) + K(k) \right)$$

$$B_r = \frac{\mu_0 z I}{2\pi r \sqrt{z^2 + (R+r)^2}} \left(\frac{R^2 + z^2 + r^2}{z^2 + (R-r)^2} E(k) - K(k) \right)$$

ove $K(k)$ e $E(k)$ rappresentano, rispettivamente, gli integrali ellittici di prima e seconda specie, con:

$$k = 2 \sqrt{\frac{rR}{z^2 + (R+r)^2}}$$

$$E_1(k) = \int_0^{2\pi} \frac{d\theta}{\sqrt{1 - k^2(\sin \theta)^2}}$$

$$E_2(k) = \int_0^{2\pi} \sqrt{1 - k^2(\sin \theta)^2} d\theta$$

Una procedura alternativa (Behtouei, Wave in random and complex media, 2020), proposta da INFN, porta a:

$$B_r = \frac{\mu_0 I M_z}{2R} \left[\frac{\xi}{2\eta(1+\xi)} \right]^{\frac{3}{2}} \left[{}_2F_1 \left(\frac{3}{2}, \frac{3}{2}; 2; \frac{2\xi}{1+\xi} \right) - {}_2F_1 \left(\frac{1}{2}, \frac{3}{2}; 1; \frac{2\xi}{1+\xi} \right) \right]$$

$$B_z = \frac{\mu_0 I}{2R} \left[\frac{\xi}{2\eta(1+\xi)} \right]^{\frac{3}{2}} \left[(\eta+1) {}_2F_1 \left(\frac{1}{2}, \frac{3}{2}; 1; \frac{2\xi}{1+\xi} \right) - \eta {}_2F_1 \left(\frac{3}{2}, \frac{3}{2}; 2; \frac{2\xi}{1+\xi} \right) \right]$$

dove ${}_2F_1$ è la funzione ipergeometrica, e si sono utilizzate le convenzioni:

$$\xi = \frac{2rR}{r^2 + R^2 + (z - z_0)^2}$$

$$\eta = \frac{r}{R}$$

$$M_z = \frac{z}{R}$$

LA VALIDAZIONE DELLA PROCEDURA

Entrambe le formulazioni sono state utilizzate nell'implementazione software per una prima valutazione dell'attendibilità dello stesso, in quanto ottenute indipendentemente, e hanno fornito lo stesso risultato. È stata in seguito dimostrata (Behtouei, 2022) l'equivalenza matematica dei due metodi tramite le relazioni:

$$E \left(\frac{2\xi}{\xi+1} \right) = \frac{\pi}{2} \frac{1-\xi}{1+\xi} {}_2F_1 \left(\frac{1}{2}, \frac{3}{2}; 1; \frac{2\xi}{1+\xi} \right)$$

$$_2F_1\left(\frac{3}{2}, \frac{3}{2}; 2; \frac{2\xi}{1+\xi}\right) = \frac{4E\left(\frac{2\xi}{\xi+1}\right) + (\xi-1)K\left(\frac{2\xi}{\xi+1}\right)}{\frac{2\pi\xi(1-\xi)}{(\xi+1)^2}}$$

È stata eseguita inoltre una “validazione interna” dei risultati del software confrontando i risultati ottenuti applicando:

- la formulazione esatta che si avvale degli integrali ellittici completi di prima e seconda specie (Trebbin, 2012)
- la formulazione esatta che utilizza la funzione ipergeometrica (Behtouei, Wave in random and complex media, 2020)
- il calcolo approssimato in cui l’elica che costituisce il solenoide viene approssimata con una spezzata, aumentando progressivamente il numero di segmenti costituenti la singola spira (nel dettaglio, sono stati eseguiti dei test approssimando la spira con 20, 200 e 2000 segmenti).

Il risultato ottenuto nei primi 2 casi è coincidente fino alla 13-sima cifra, le 2 formulazioni sono equivalenti e le discrepanze sono dovute alle approssimazioni implicite nelle librerie utilizzate. In particolare, il linguaggio utilizzato per eseguire i calcoli è Python 3.9 e la libreria SciPy.special si occupa di calcolare integrali ellittici e funzioni ipergeometriche.

Il confronto di questi risultati con quelli ottenuti dall’approssimazione con una spezzata ha mostrato una convergenza progressiva nel numero di cifre identiche all’aumentare del numero di segmenti con cui viene approssimata l’elica.

Infine, il risultato atteso in centro ad un solenoide con le seguenti caratteristiche:

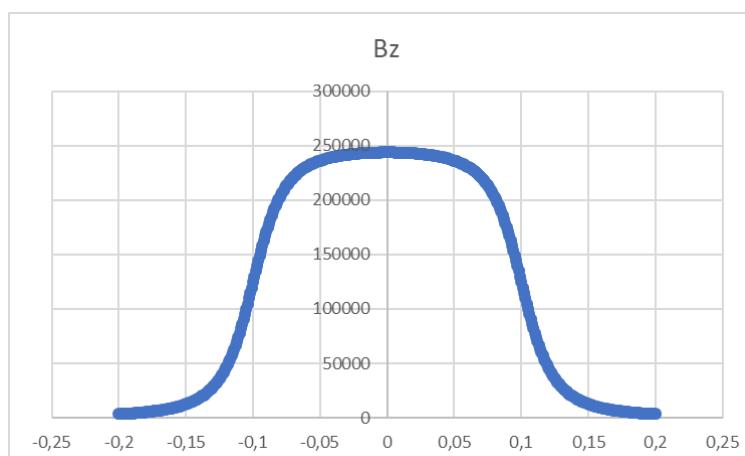
- 200 spire
- raggio: 25 mm
- distanza tra le spire: 1 mm
- intensità di corrente: 200 A

coincide con quello atteso dalla formula teorica per il solenoide infinito, data da:

$$B = \frac{\mu_0 NI}{l}$$

ove N indica il numero di spire, I la corrente, l la lunghezza del solenoide e μ_0 è la permeabilità magnetica nel vuoto: con i parametri specificati si ottiene l’andamento in fig. 2.

Figura 2 - Andamento del campo Bz lungo l’asse del solenoide (la componente radiale è nulla)..



L'IMPLEMENTAZIONE IN WEBNIR

L'interfaccia dell'applicazione (fig. 3) consente, come detto, di definire sia il posizionamento e l'orientamento delle sorgenti nello spazio di lavoro, sia il volume ed il passo di calcolo del grigliato in cui verranno eseguiti i calcoli.

Figura 3 - Interfaccia utente dell'applicazione di calcolo.

The screenshot shows the 'Definizione delle sorgenti' (Definition of sources) and 'Grigliato di calcolo' (Calculation grid) sections of the WebNIR application.

Definizione delle sorgenti:

- Numero di strutture: 12
- Forma del segnale: Continua
- 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12
- Tipo di struttura: Bobina circolare 3D
- Corrente di picco: 190 A
- Fase: 0 °
- Geometria della struttura n. 1:

 - X_{centro}: 126.25 mm
 - Y_{centro}: 0 mm
 - Z_{centro}: 0 mm
 - Raggio interno: 157 mm
 - Raggio esterno: 356 mm
 - Spessore: 115.5 mm
 - θ: 0 °
 - ψ: 90 °
 - φ: 0 °
 - Numero di spire: 192
 - Verso corrente: Orario
 - Numero di segmenti: 0

- Replica alla struttura n.: ... ➤

Grigliato di calcolo:

- SRID: Sistema di riferimento locale
- X_{ini}: 0 mm
- Y_{ini}: -155 mm
- Z_{ini}: 0 mm
- Passo: 5 mm
- Passi lungo X: 600
- Passi lungo Y: 62
- Passi lungo Z: 0
- Unità di output: T

Impegni geometrici:

- Tipo di geometria: Seleziona...

Bottoni:

- Da grigliato
- Crea GPKG

Alcune caratteristiche di interesse sono:

- la possibilità, comune a tutte le applicazioni presenti in WebNIR (Comelli, 2019), di esportare i dati dell'interfaccia in formato JSON (JavaScript Object Notation), per poi ricaricarli in un secondo momento, evitando di ripetere l'inserimento;
- la replicazione della geometria di una struttura, utile nel caso in cui si abbia a che fare con strutture identiche posizioante in diversi punti dello spazio (come nel caso di fig. 4);
- la suddivisione del carico computazionale tra client e server: i dati dell'interfaccia vengono raccolti ed inviati tramite un'interfaccia WSGI ad un file python che si occupa di smistarli al programma di calcolo vero e proprio, che risiede sul server e utilizza le funzioni scientifiche avanzate delle librerie evolute di python per eseguire il calcolo.

Al termine dell'esecuzione del calcolo, vengono visualizzati alcuni valori riepilogativi di interesse (tempo di calcolo, valori minimo e massimo del modulo dell'induzione). È inoltre possibile scaricare il file di testo contenente i risultati delle elaborazioni, formattato nel modo seguente:

X	Y	Z	B	Bx	By	Bz
0.0	0.0	0.0	628.3185307179	0.0	0.0	628.3185307179
0.0	1.0	0.0	0.317730752302	0.0	0.0	0.317730752302
0.0	2.0	0.0	0.039380643144	0.0	0.0	0.039380643144
0.0	3.0	0.0	0.011650089610	0.0	0.0	0.011650089610
0.0	4.0	0.0	0.004912192226	0.0	0.0	0.004912192226
0.0	5.0	0.0	0.002514405568	0.0	0.0	0.002514405568
0.0	6.0	0.0	0.001454895688	0.0	0.0	0.001454895688
0.0	7.0	0.0	0.000916126557	0.0	0.0	0.000916126557
0.0	8.0	0.0	0.000613700191	0.0	0.0	0.000613700191
0.0	9.0	0.0	0.000431005356	0.0	0.0	0.000431005356
...						
100.0	98.0	0.0	0.000000114455	0.0	0.0	0.000000114455
100.0	99.0	0.0	0.000000112751	0.0	0.0	0.000000112751
100.0	100.0	0.0	0.000000111072	0.0	0.0	0.000000111072

```
;Acquisition time: 0.07743000984191895 s
;Processing time: 4.373416900634766 s
;Maximum value: 628.3185307179587 µT
;Minimum value: 1.1107213593206478e-07 µT
;Grid points: 10201
;Number of segments: 0
;Number of loops: 1
```

e un file in formato zip contenente le geometrie delle sorgenti in formato GeoPackage.
 Infine, è possibile fissare 2 valori (per 2 assi cartesiani) tra quelli per cui è stato eseguito il calcolo nel grigliato e visualizzare in grafico l'andamento del campo (modulo e componenti) lungo la terza coordinata.

APPLICAZIONI IN AMBITO ACCELERATORISTICO

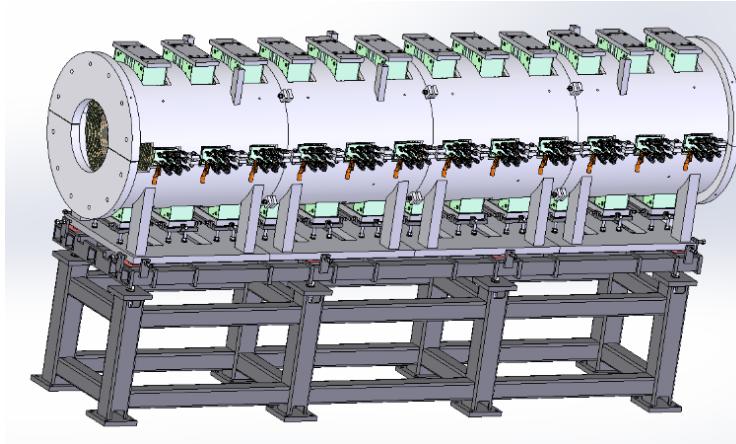
Esistono diverse applicazioni rilevanti dei sistemi di focheggiamento dei fasci di particelle cariche che utilizzano le lenti magnetiche:

- il sistema di iniezione dei fasci di elettroni non relativistici degli acceleratori lineari;
- i collisori di fasci di particelle cariche;
- il klystron ad elevata frequenza;
- il cannone auto-focalizzante che genera il fascio di elettroni seguito da alcune lenti magnetiche per focalizzare il fascio di elettroni prima di essere iniettato nella guida acceleratrice;
- il sistema di trasporto del fascio di elettroni contenente il sistema di focheggiamento opportunatamente progettato al fine di determinare le dimensioni del fascio di particelle idonee a massimizzare il numero di cariche elettriche trasmesse e ad ottimizzare i parametri dell'ottica di trasporto del fascio di particelle per l'iniezione nella guida accelerante. Essendo il fascio di particelle non relativistico, l'effetto repulsivo della carica spaziale deve essere necessariamente controllato, specialmente per distanze assiali di circa 1 m. Questo può essere fatto con l'utilizzo di bobine, ottimizzando le distribuzioni di focheggiamento dei campi magnetici longitudinali e radiali delle bobine;
- il pre-buncher, l'ottica di trasporto del fascio di particelle, per migliorare la selezione in energia per l'accettanza della sezione accelerante (Vannozzi).

Anche nei collisori dei fasci di particelle (Bassetti, 1996) al fine di ridurre la degradazione della luminosità, le lenti magnetiche aiutano a controllare le funzioni ottiche della dinamica degli stessi fasci di particelle in accordo ai parametri di progetto. Infine, nei klystron ad elevata frequenza, ad esempio in banda Ka (Behtouei, Journal of Physics 2020; Spataro, 2022), la conoscenza analitica dei campi magnetici radiali e longitudinali sono fondamentali per determinare i parametri ottici della dinamica del fascio di particelle al fine di ridurre le dimensioni trasverse degli stessi fasci nei tubi metallici con dimensioni ridotte entro i quali viaggiano le particelle cariche aumentando l'efficienza dell'amplificatore di potenza.

In alcuni casi, è anche possibile eseguire il focaggio del fascio di particelle installando i solenoidi attorno le sezioni acceleratrici come è indicato in fig. 4 dove sono installati in cascata 12 bobine di focaggio attorno alla guida accelerante.

Figura 4 - Modello della sezione acceleratrice con 12 bobine per il focaggio del fascio di particelle cariche.



In tutti i casi le lenti magnetiche o bobine sono fondamentali per un buon esito progettuale di operazione per la loro semplicità costruttiva ed efficacia.

Nel seguito vengono riportati i risultati del calcolo eseguito per la struttura mostrata in fig. 4. In particolare, in fig. 5 sono visualizzate le componenti assiale e radiale dell'induzione all'interno della struttura (sono considerate solo le prime 6 bobine ai fini della rappresentazione grafica).

Figura 5 - Visualizzazione delle mappe con le componenti di campo assiale (sopra) e radiale (sotto).

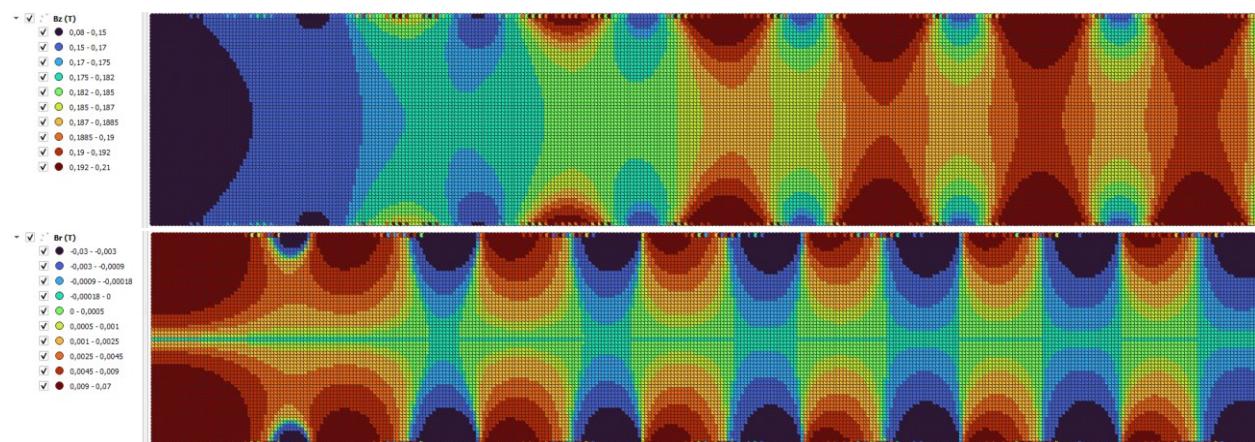
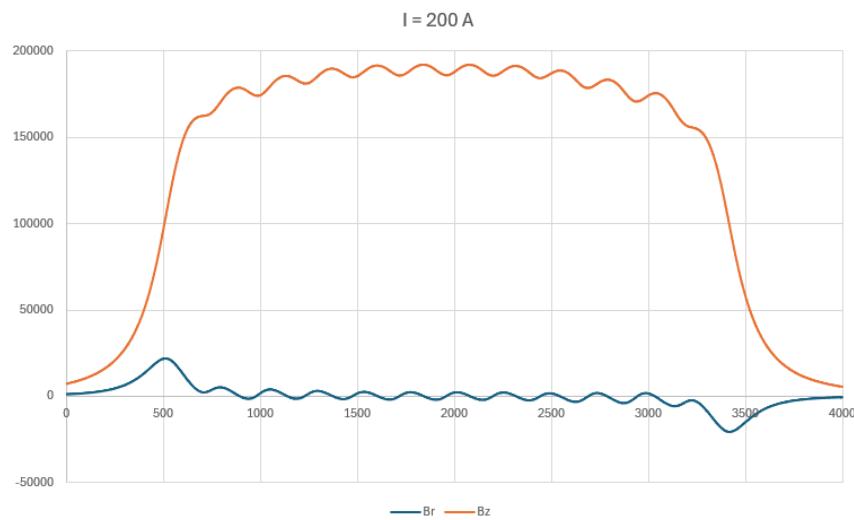


Fig. 6 mostra invece l'andamento delle due componenti lungo un traiettoria parallela all'asse della struttura, ad una distanza pari a metà del raggio interno.

Figura 6 - Andamento della componente radiale (in blu) e assiale (in arancio) dell'induzione lungo una traiettoria parallela all'asse centrale della struttura.



UN'APPLICAZIONE IN AMBITO RADIOPROTEZIONISTICO

Un caso studio già affrontato (Zoppetti, 2008) in questo ambito è quello dell'esposizione al campo magnetico generato da un forno ad induzione utilizzato nell'industria orafa. Questo apparecchio utilizza campi magnetici di forte intensità per indurre correnti parassite nei metalli da lavorare, scaldandoli fino a farli fondere. Le frequenze di lavoro tipiche vanno da qualche kHz a qualche decina di kHz. Si tratta sostanzialmente di un solenoide avvolto intorno ad un crogiolo cilindrico, collegato ad un generatore a radiofrequenza. In fig. 7 sono riportati una foto e lo schema di funzionamento.

Figura 7 - Fornetto a induzione

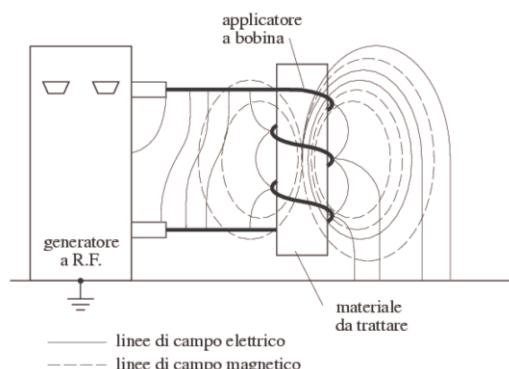
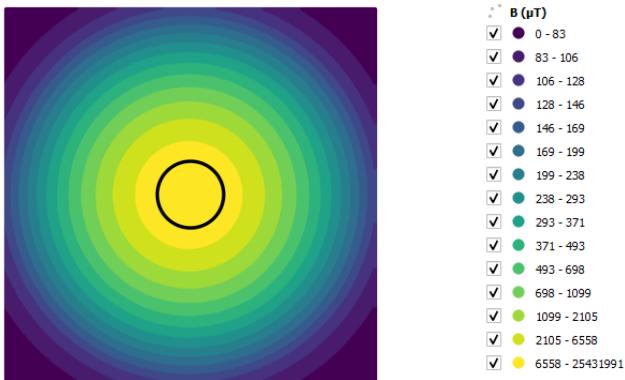


Figura 8 - Mappa di campo del modulo dell'induzione.



In fig. 8 sono riportati i risultati del calcolo, visualizzati in QGIS e sovrapposti alla geometria della sorgente (nel piano orizzontale), esportata automaticamente dal programma di calcolo in formato geoPackage. I risultati, confrontati con le simulazioni effettuate al momento dell'analisi della sorgente, sono conformi con quanto atteso.

CONCLUSIONI

WebNIR, il portale sviluppato da CNR-IFAC e dedicato alla valutazione dell'esposizione professionale alle radiazioni non ionizzanti, mette a disposizione del pubblico ed in particolare dei tecnici specializzati in tale ambito una serie di strumenti che consentono di effettuare diversi tipi di valutazioni. Al suo interno vengono integrati vari strumenti che si avvalgono di tecnologie sviluppate nel corso di una serie di collaborazioni con i principali istituti di ricerca italiani attivi in questo settore. In particolare, lo strumento che permette di valutare l'induzione magnetica generata da qualsiasi sistema di conduttori ha dimostrato sia la sua efficacia, fornendo risultati conformi a quanto atteso, sia la duttilità nell'essere impiegato in applicazioni diverse da quelle per cui era stato originariamente pensato.

L'intenzione di chi contribuisce al mantenimento e all'evoluzione del portale è di continuare ad aggiornarlo ed integrarlo in futuro mediante l'implementazione di nuovi strumenti e l'aggiornamento costante di quanto già presente.

RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro ha beneficiato del sostegno finanziario fornito dall'INAIL nell'ambito del progetto Bric-2022 "Definizione di procedure operative per la valutazione del rischio dei lavoratori portatori di dispositivi medici attivi, impiantabili e indossabili".

Bibliografia

- Bassetti, M., and C. Biscari. *Analytical formulae for magnetic multipoles*. Part. Accel. 52 (1996): 221-250.
 Grant Trebbin, *Deriving the expression for the off-axis magnetic field of a circular current loop*, <https://www.grant-trebbin.com/2012/04/off-axis-magnetic-field-of-circular.html>, 2012
 Andreuccetti D., Comelli M., Zoppetti N., 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*. 2017-2024. (<https://webnir.eu/>).
 Comelli M., Andreuccetti D., *Applicazione online per l'acquisizione e l'elaborazione di dati nel dominio del tempo e della frequenza nella valutazione dell'esposizione a CEM*, VII Convegno Nazionale Agenti Fisici, Stresa, 5-7 giugno 2019

Zoppetti N., *Dosimetria numerica in condizioni quasi-statiche e problemi collegati*, dottorato di ricerca conseguito nell'ambito del Dottorato Internazionale in "RF, Microonde ed Elettromagnetismo" dell'Università degli Studi di Firenze, 2008

Behtouei et al., *Initial design of a high-power Ka-band klystron*, Journal of Physics: Conference Series. Vol. 1596. No. 1. IOP Publishing, 2020.

Behtouei et al., *A Novel Exact Analytical Expression for the Magnetic Field of a Solenoid*, Wave in random and complex media, 2020

Behtouei M., Spataro B., Faillace L., Carillo M., Comelli M., Palumbo L., Variola A. and Migliorati M., *A novel method to calculate the magnetic field of a solenoid generated by a surface current element*, Waves in Random and Complex Media, 2022

B. Spataro et al., *A low –perveance electron gun for high efficiency Ka-band Klystron*, Eur. Phys. J. Plus (2022) 137:769

A. Vannozzi, INFN-LNF, private communication