

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

Comelli M., Zopetti N., Spataro B., Behtouei M., Carillo M.

moreno.comelli@cnr.it



BRiC 2017-2024

- Bandi di Ricerca in Collaborazione
- Finanziati da INAIL
- CNR-IFAC Firenze, CNR-IFC Pisa, ISS, USL Siena, Policlinico San Matteo, UNIMORE
- Attività focalizzate sull'esposizione professionale riferita ai portatori di DMIA (Dispositivi Medici Impiantabili ed Indossabili Attivi)

BRiC 2017-2024

È attualmente in corso il terzo BRiC su questa tematica:

- 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
- Sviluppo di strumenti e metodi per la valutazione e la gestione del rischio derivante da esposizione a campi elettromagnetici per la tutela dei lavoratori portatori di dispositivi medici indossabili ed impiantabili
- Definizione di procedure operative per la valutazione del rischio dei lavoratori portatori di dispositivi medici attivi, impiantabili e indossabili

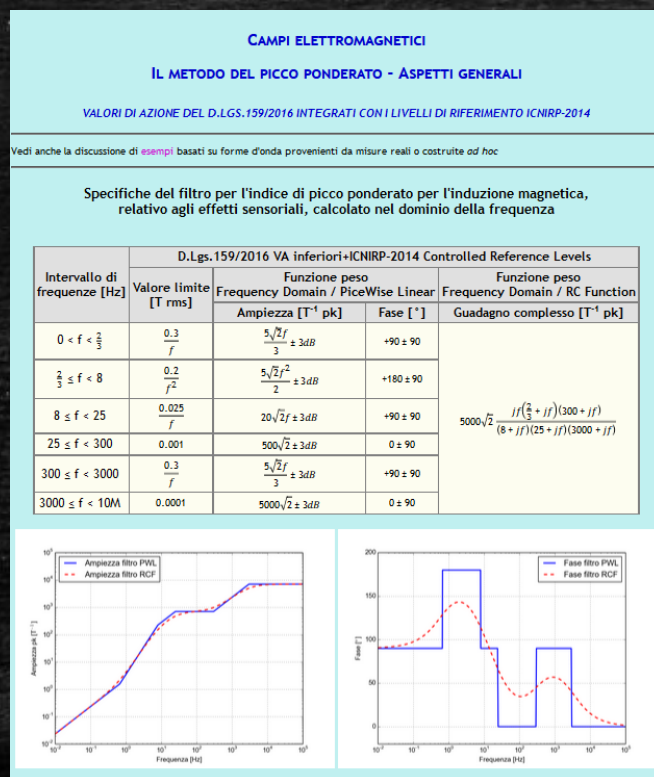
WebNIR

- Strumenti **Web** per la valutazione dall'esposizione occupazionale alle **Radiazioni Non Ionizzanti**
- Portale web: <https://webnir.eu>
- 3 sezioni:
 - CEM (Campi ElettroMagnetici)
 - DMIA (Dispositivi Medici Implantabili e Indossabili Attivi)
 - ROA (Radiazioni Ottiche Artificiali)
- In fase aggiornamento con nuove tecnologie, implementazione di nuove caratteristiche tecniche (sito responsive, multilingua, ricerca per parole chiave)

WebNIR

Mette a disposizione:

- Documenti tecnici (pagine web o PDF)



INTRODUZIONE ALLA DOSIMETRIA ELETTROMAGNETICA:
LA VALUTAZIONE DELLE GRANDEZZE DOSIMETRICHE NEI SOGGETTI ESPOSTI¹

Daniele Andreuccetti, IFAC-CNR, Firenze

- La dosimetria elettromagnetica**
La dosimetria elettromagnetica è una disciplina tecnico-scientifica che si occupa di studiare i **meccanismi di accoppiamento** tra un **campo elettromagnetico** ed un **oggetto biologico** in esso immerso o, come si dice, **"esposto"** ad esso.
L'**accoppiamento** è il primo di una serie di fenomeni biofisici concatenati attraverso cui si realizza l'interazione tra un campo elettromagnetico ed un oggetto biologico e che comprende schematicamente i passi seguenti.
 - Esposizione:** un oggetto biologico viene immerso in un campo elettromagnetico.
 - Accoppiamento:** il campo elettromagnetico induce alcuni fenomeni fisici, caratterizzati da determinate grandezze fisiche, nei tessuti dell'organismo esposto; questi fenomeni hanno origine dall'azione delle forze del campo sulle cariche e sulle correnti elettriche presenti nei tessuti.
 - Effetto biologico:** i fenomeni fisici indotti dal campo esterno provocano sempre una deviazione dalle condizioni di equilibrio elettrico a livello molecolare; per poter parlare propriamente di effetto biologico, si deve però verificare una variazione morfologica o funzionale in strutture di livello superiore (tessuti, organi o sistemi).
 - Danno biologico o sanitario:** un effetto biologico non costituisce necessariamente un danno; perché questo si verifichi, occorre che l'effetto superi la capacità di compensazione di cui dispone l'organismo, che dipende anche dalle condizioni

WebNIR

Mette a disposizione:

- Documenti tecnici (pagine web o PDF)
- Procedure interattive

Is the worker a carrier of AIMD?

YES

✓

NO

▼

Specify type, brand and model of AIMD

Type	Brand	Model	+
Pacemaker	Boston	Model 1	-

Continue

✓

LIST OF INSTRUMENTATION TABLE 1

As a first step in the risk assessment, a series of equipment that could be present in the workplace will be presented, for which the potential risk for workers with AIMD has already been assessed and it is therefore possible to carry out a simplified risk assessment. For each item reported in the source list, the user, in addition to indicating its presence by means of a check mark, must indicate whether it complies with specific indications on their method of use and operation, which will be shown on the screen from time to time.

Check whether the workplace contains equipment listed in [Table 1](#) of the CEI EN 50527-1 standard and whether the indications reported in the *Exceptions and Notes* column of the same Table are complied with.

Select the equipment of interest:

☐ Lighting fixtures ⓘ

☐ Computers and IT equipment ⓘ

☒ Computers, tablets, IT equipment including wireless communications ⓘ

☐ Comply / ☒ Does not comply with instructions

☒ Office equipment ⓘ

☒ Comply / ☐ Does not comply with instructions

☐ Smartphones, mobile phones and cordless phones ⓘ

☐ Two-way radios ⓘ

WebNIR

Mette a disposizione:

- Documenti tecnici (pagine web o PDF)
- Procedure interattive
- Applicazioni di calcolo

Presentazione **Inserimento dati** Risultati Istruzioni

Modalità di calcolo della schermatura

- Calcolo per spessore dello schermo, distanza dalla sorgente, frequenza e materiale noti e fissi
- Calcolo in funzione della frequenza per vari materiali
- Calcolo in funzione dello spessore dello schermo per vari materiali
- Calcolo in funzione della frequenza e dello spessore dello schermo
- Calcolo in funzione della frequenza e della distanza dalla sorgente
- Calcolo in funzione dello spessore dello schermo e della distanza dalla sorgente
- Calcolo in funzione della distanza dalla sorgente per vari materiali

Dati relativi ai materiali

Materiali in archivio				
Nome	σ	μ_r	$f_{1/2}$	α
ZV - Permdur	4e+06	800	100000	0.2
Acciaio 0.5% C	9.5e+06	200	100000	0.2

Parametri di calcolo

Materiale: ☐ 2V - Permdur ☒ Acciaio 0.5% C

Frequenza: 50 Hz

Distanza dalla sorgente: 1 cm

Spessore minimo: 1 μm

Spessore massimo: 100 μm

Calcola Reset JSON

Parametri generali della struttura n. 1

Nome della struttura: Struttura n. 1

Altezza da terra del conduttore più basso: 20 m

Distanza dall'origine, lungo il terreno: 0.0 m

Parametro utilizzato nel caso di conduttori a fascio:

☒ Raggio della circonferenza ☐ Spaziatura tra i subconduttori

Utilizzo facoltativo di sostegni a massimo impatto

Tensione efficace nominale tra le fasi: 132 kV

Prima di selezionare il tipo di sostegno, assicurarsi che il tipo di tensione sia corretto. Se impostata su "Alternata monofase" o "Continua" l'inserimento delle fasi viene disabilitato, e il valore di tensione non viene compilato automaticamente.

Parametri dei conduttori della struttura n. 1

N. 6 (da 1 a 30)

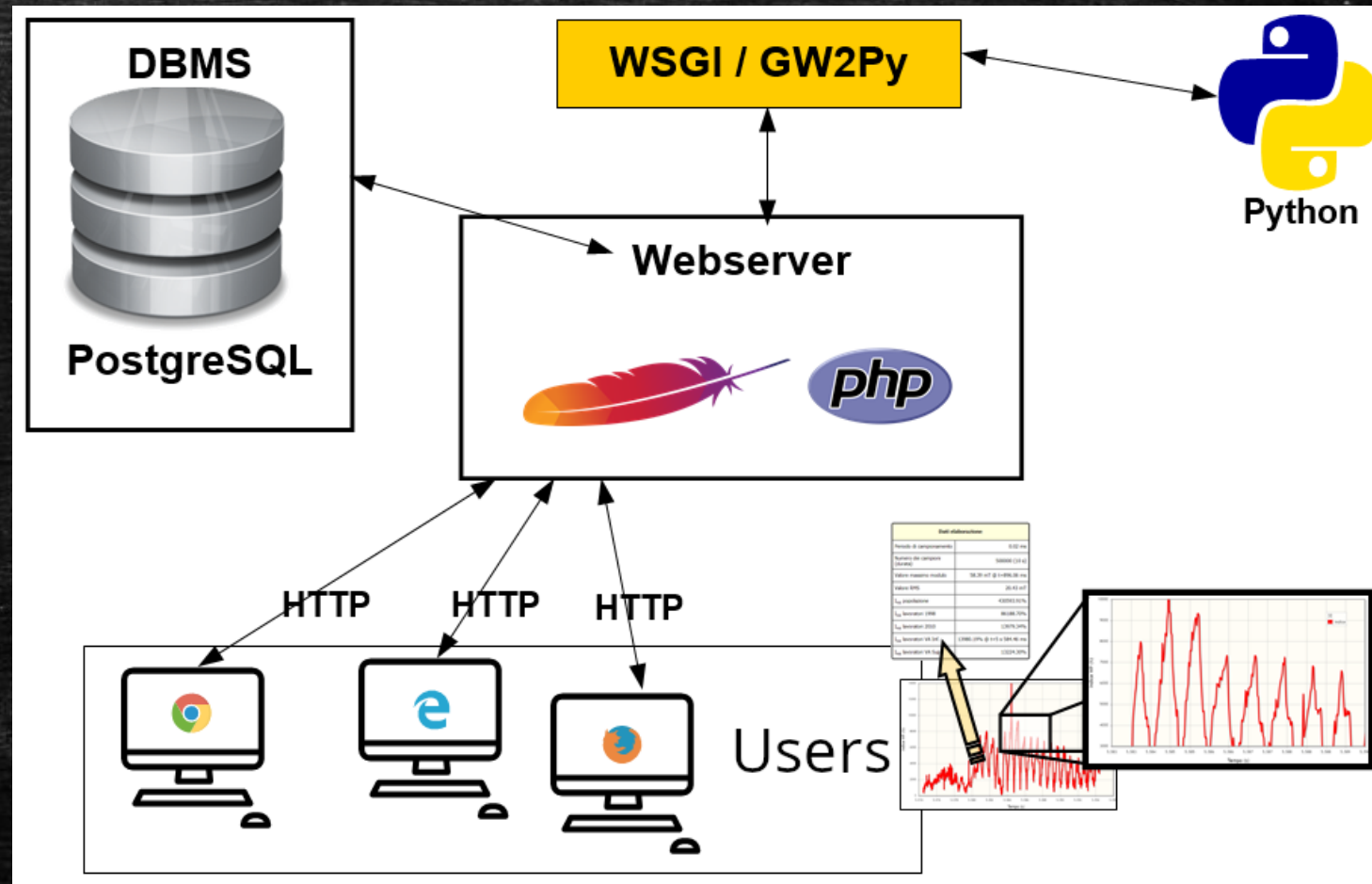
conduttori

X (m)	Y (m)	Tipo	V (kV)	Fase (°)	r (mm)	n	R / s
-5.2	0	F	78.210	0	30	1	35
-6.1	6	F	78.210	120	30	1	35
-4.6	12.5	F	78.210	240	30	1	35
5.2	0	F	78.210	0	30	1	35
6.1	6	F	78.210	120	30	1	35
4.6	12.5	F	78.210	240	30	1	35

Replica questi parametri alla struttura n. ... 

Il protocollo di comunicazione

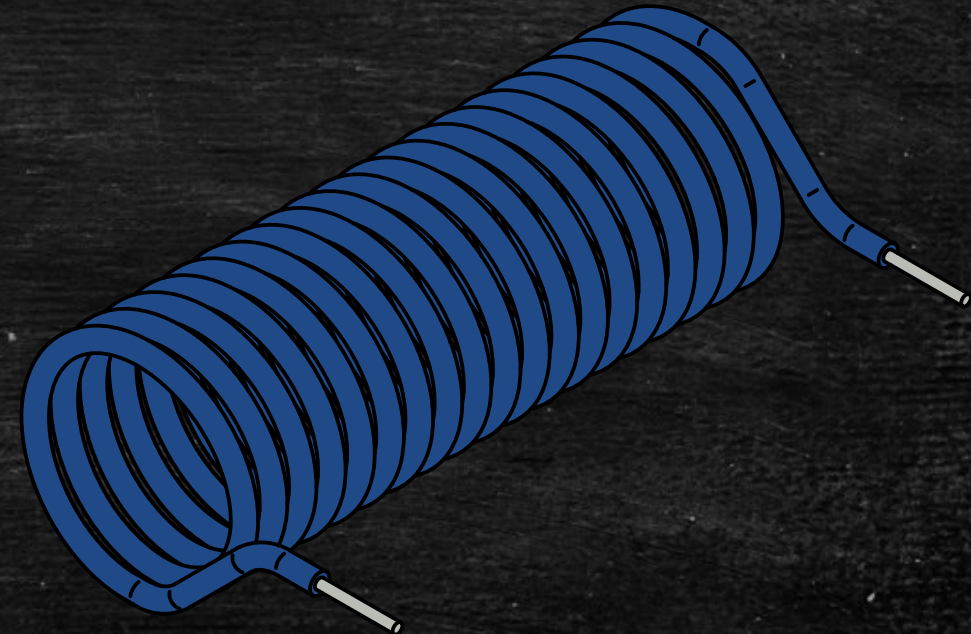
- Gli strumenti hanno un'interfaccia utente creata tramite una pagina web
- Il carico computazionale è suddiviso tra il computer dell'utente e la piattaforma server
- Gw2Py: POST dati al server, ottiene dati dal server
- JSON come formato standard per lo scambio di dati



Calcolo dell'induzione magnetica

Calcola l'induzione magnetica generata da un insieme di conduttori di questo tipo:

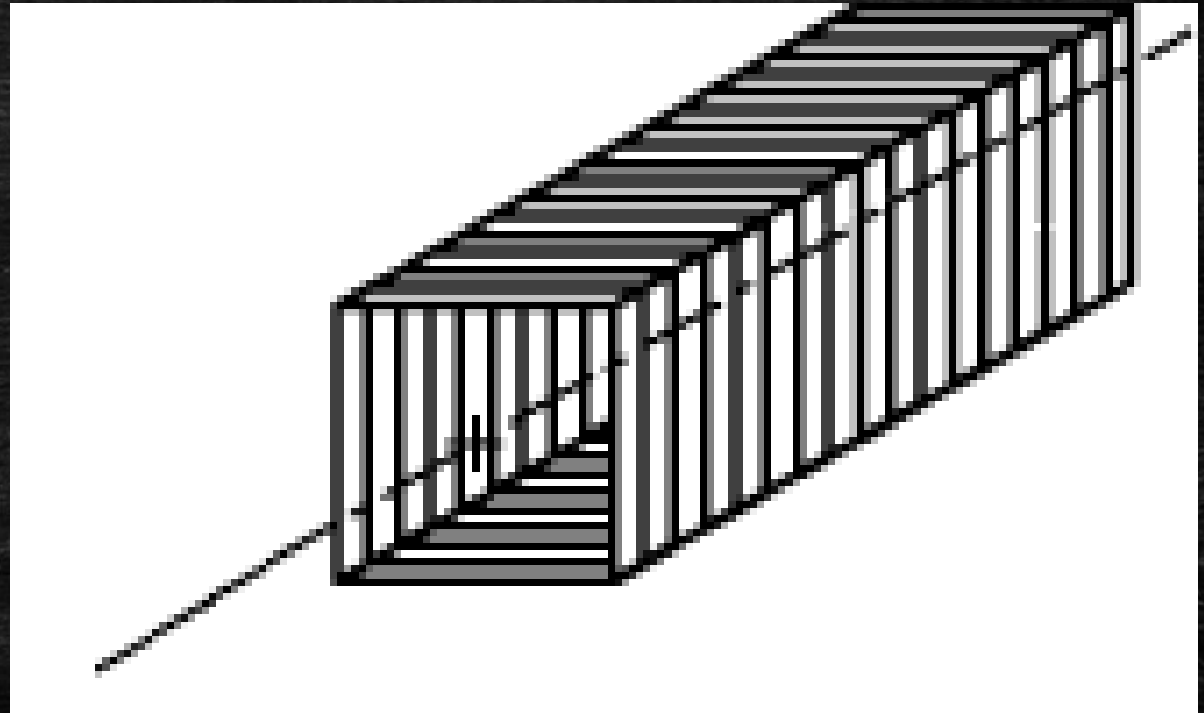
- solenoide a sezione circolare
- solenoide a sezione rettangolare
- bobina a corona
- bobina circolare 3D
- bobina rettangolare 3D
- linea spezzata
- catenaria
- geometria importata da file GIS



Calcolo dell'induzione magnetica

Calcola l'induzione magnetica generata da un insieme di conduttori di questo tipo:

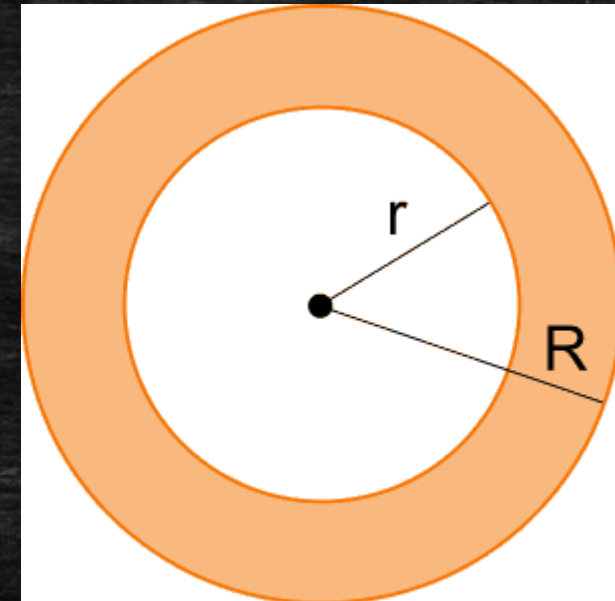
- solenoide a sezione circolare
- solenoide a sezione rettangolare
- bobina a corona
- bobina circolare 3D
- bobina rettangolare 3D
- linea spezzata
- catenaria
- geometria importata da file GIS



Calcolo dell'induzione magnetica

Calcola l'induzione magnetica generata da un insieme di conduttori di questo tipo:

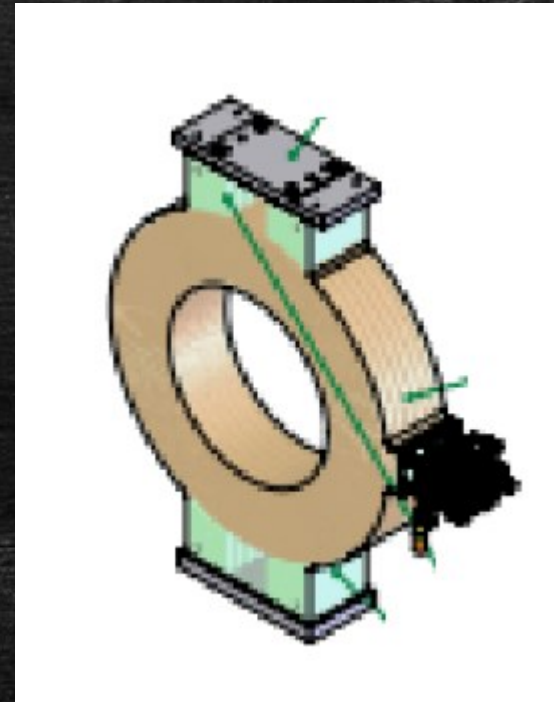
- solenoide a sezione circolare
- solenoide a sezione rettangolare
- bobina a corona
- bobina circolare 3D
- bobina rettangolare 3D
- linea spezzata
- catenaria
- geometria importata da file GIS



Calcolo dell'induzione magnetica

Calcola l'induzione magnetica generata da un insieme di conduttori di questo tipo:

- 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



Calcolo dell'induzione magnetica

Calcola l'induzione magnetica generata da un insieme di conduttori di questo tipo:

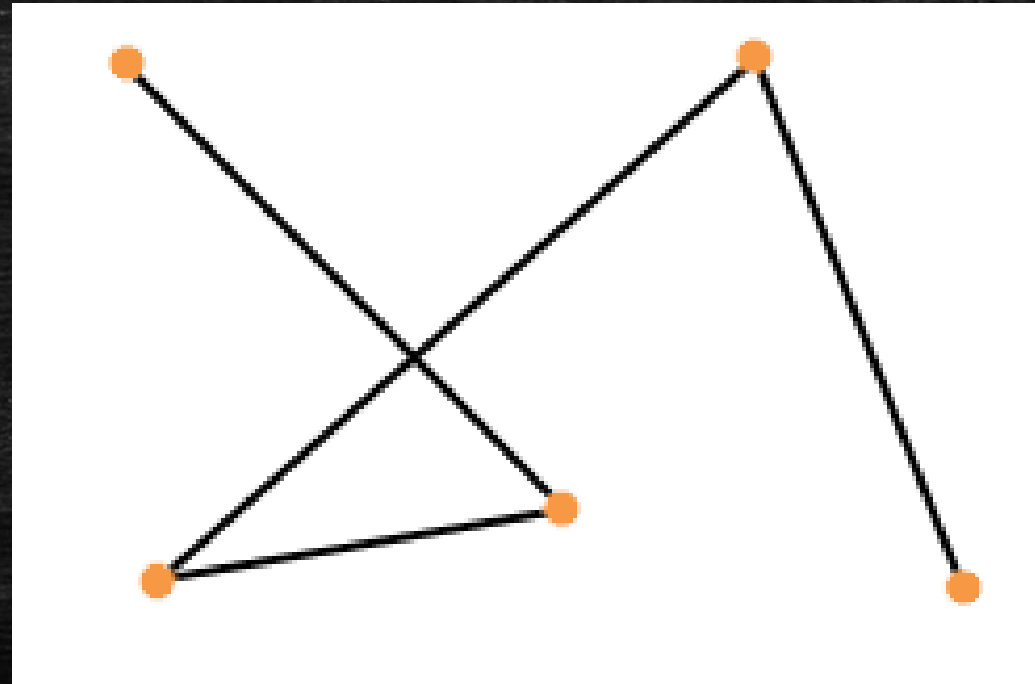
- solenoide a sezione circolare
- solenoide a sezione rettangolare
- bobina a corona
- bobina circolare 3D
- bobina rettangolare 3D
- linea spezzata
- catenaria
- geometria importata da file GIS



Calcolo dell'induzione magnetica

Calcola l'induzione magnetica generata da un insieme di conduttori di questo tipo:

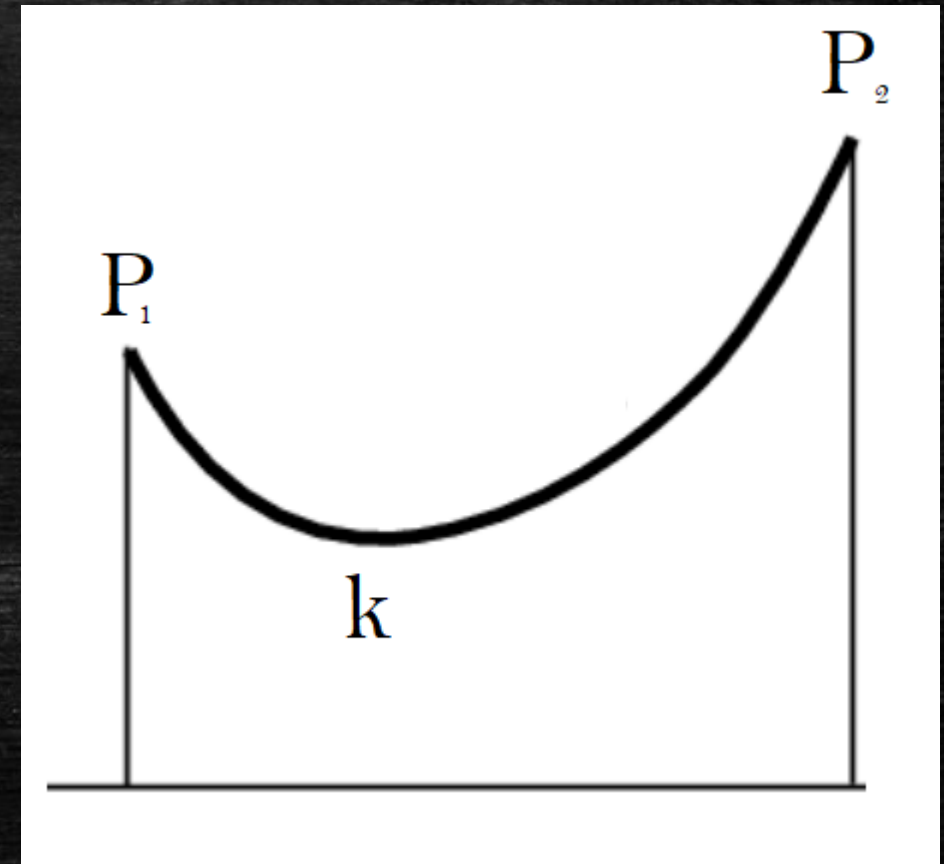
- solenoide a sezione circolare
- solenoide a sezione rettangolare
- bobina a corona
- bobina circolare 3D
- bobina rettangolare 3D
- linea spezzata
- catenaria
- geometria importata da file GIS



Calcolo dell'induzione magnetica

Calcola l'induzione magnetica generata da un insieme di conduttori di questo tipo:

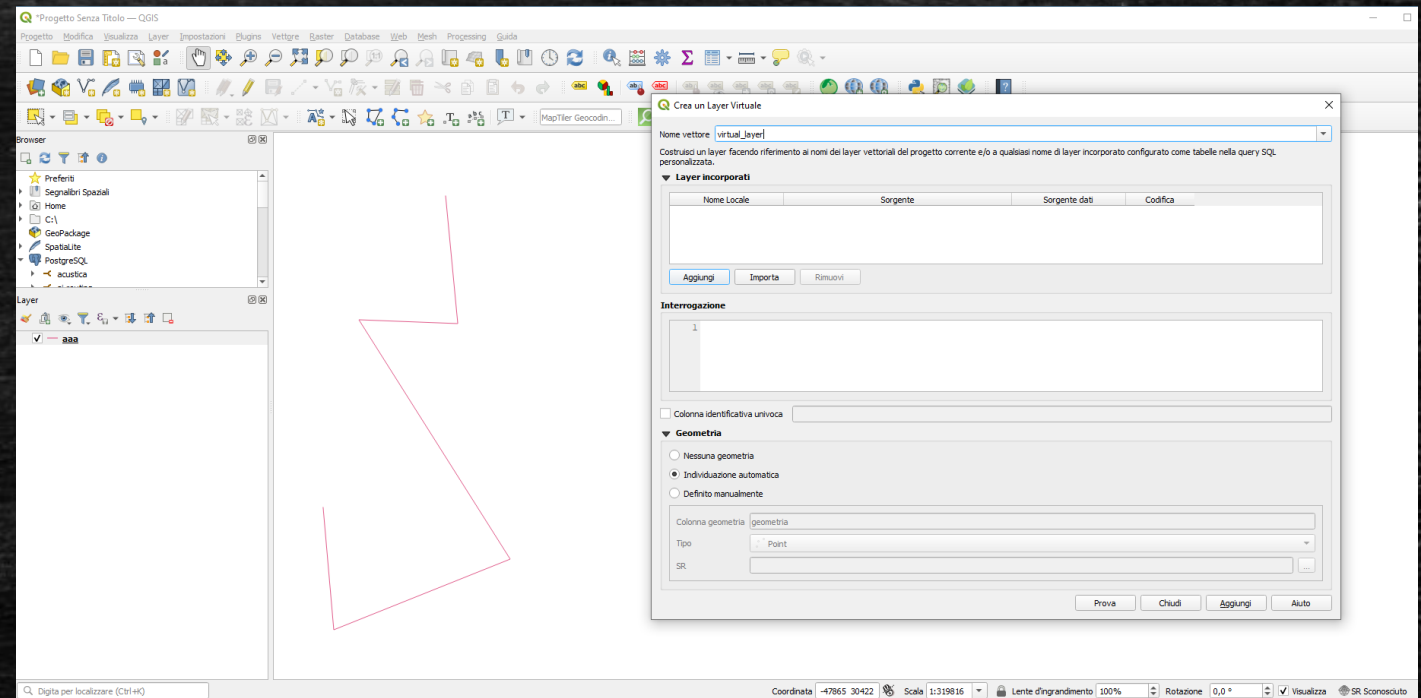
- solenoide a sezione circolare
- solenoide a sezione rettangolare
- bobina a corona
- bobina circolare 3D
- bobina rettangolare 3D
- linea spezzata
- catenaria
- geometria importata da file GIS



Calcolo dell'induzione magnetica

Calcola l'induzione magnetica generata da un insieme di conduttori di questo tipo:

- 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



Calcolo dell'induzione magnetica

Nelle varie tipologie di sorgenti, l'elemento costituente più semplice può essere:

- un segmento (come nel caso della catenaria, che viene approssimata da una spezzata)
- 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.

Calcolo dell'induzione magnetica

L'utente può:

- specificare fino a 12 configurazioni di conduttori di questi tipi
- definirne le caratteristiche geometriche ed elettriche
- calcolare il valore di induzione magnetica in un grigliato (punti regolarmente distribuiti in un parallelepipedo)

The screenshot shows a software interface for calculating magnetic induction. The interface is divided into several sections:

- Sorgenti e grigliato di calcolo**: This section contains the 'Definizione delle sorgenti' (Definition of sources) and 'Geometria della struttura n. 1' (Geometry of structure n. 1).
- Definizione delle sorgenti**: This section includes fields for 'Numero di strutture' (Number of structures) set to 12, 'Forma del segnale' (Signal shape) set to 'Continua' (Continuous), 'Tipo di struttura' (Structure type) set to 'Bobina circolare 3D' (3D circular coil), 'Corrente di picco' (Peak current) set to 190 A, and 'Fase' (Phase) set to 0°.
- Geometria della struttura n. 1**: This section includes fields for 'Xcentro' (126.25 mm), 'Ycentro' (0 mm), 'Zcentro' (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' (Current direction) set to 'Orario' (Clockwise), and 'Numero di segmenti' (Number of segments) set to 0.
- Grigliato di calcolo**: This section is highlighted with a red box and contains fields for 'SRID' (System of reference) set to 'Sistema di riferimento locale' (Local reference system), 'Xini' (0 mm), 'Yini' (0 mm), 'Zini' (0 mm), 'Passo' (10 mm), 'Passi lungo X' (350), 'Passi lungo Y' (0), 'Passi lungo Z' (0), and 'Unità di output' (μT).
- Impegni geometrici**: This section includes a 'Tipo di geometria' (Geometry type) dropdown menu and a 'Da grigliato' (From grid) button.

A red arrow points from the 'Geometria della struttura n. 1' section to the 'Grigliato di calcolo' section, indicating a relationship between the structure geometry and the calculation grid.

Calcolo dell'induzione magnetica

- Si possono posizionare ed orientare opportunamente le geometrie nello spazio
- È possibile descrivere qualsiasi insieme di conduttori rappresentabile come combinazione di configurazioni semplici.

Sorgenti e grigliato di calcolo Risultati del calcolo Presentazione ed istruzioni Un caso studio

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

Xcentro 126.25 mm

Ycentro 0 mm

Zcentro 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

Xini 0 mm

Yini 0 mm

Zini 0 mm

Passo 10 mm

Passi lungo X 350

Passi lungo Y 0

Passi lungo Z 0

Unità di output μT

Impegni geometrici

Tipo di geometria Seleziona...

Da grigliato

Crea GPKG

Calcola

Reset

JSON

Calcolo dell'induzione magnetica

- Il calcolo viene eseguito in campo libero
- Non si considera la presenza di elementi ferromagnetici all'interno delle bobine
- Né impegni geometrici nell'ambiente

Sorgenti e grigliato di calcolo

Risultati del calcolo

Presentazione ed istruzioni

Un caso studio

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}

0

mm

Z_{ini}

0

mm

Passo

10

mm

Passi lungo X

350

Passi lungo Y

0

Passi lungo Z

0

Unità di output

μ T

Impegni geometrici

Tipo di geometria

Seleziona...

Da grigliato

Crea GPKG

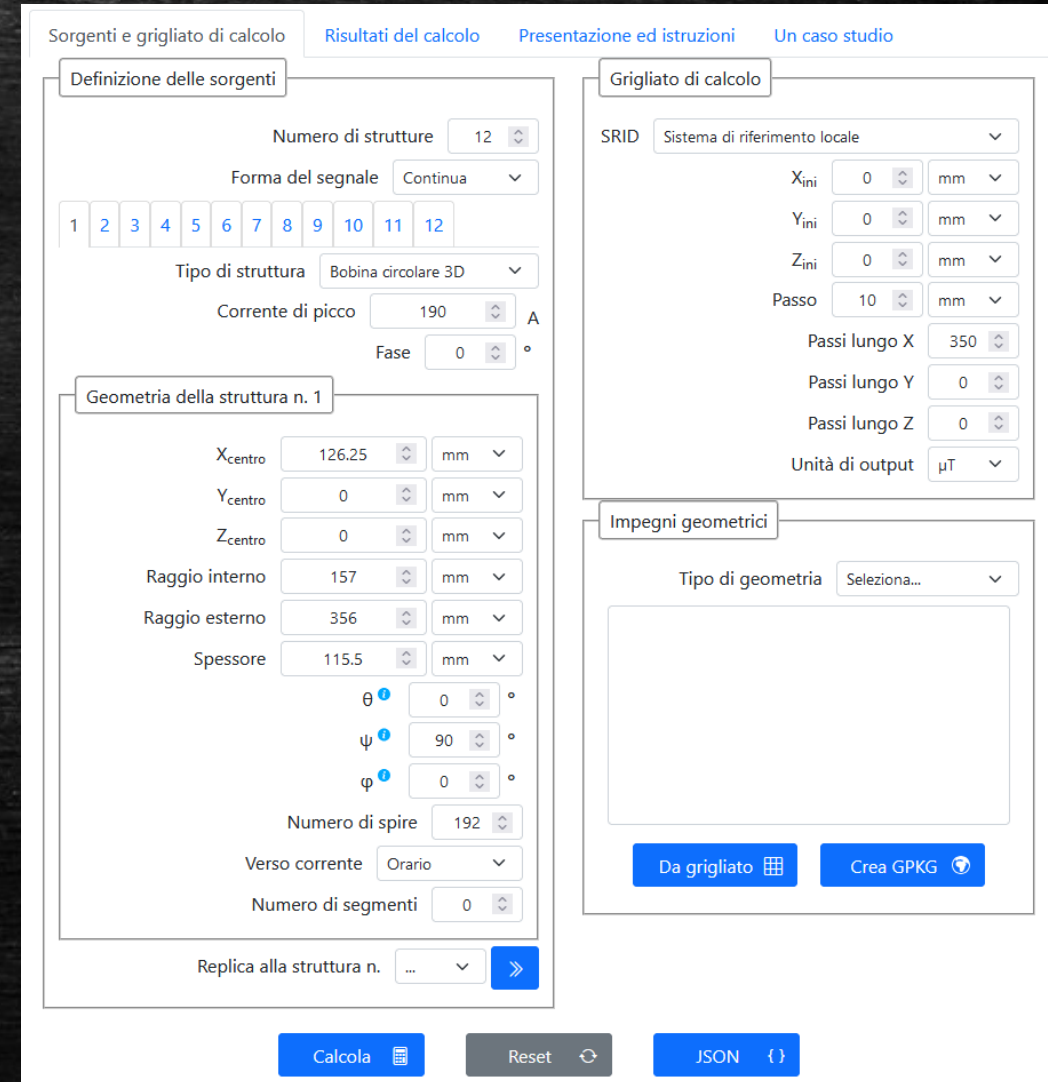
Calcola

Reset

JSON

Calcolo dell'induzione magnetica

- Possibilità di esportare i dati dell'interfaccia in formato JSON (JavaScript Object Notation), per poi ricaricarli in un secondo momento, evitando di ripetere l'inserimento;
- Replicazione della geometria di una struttura, utile nel caso in cui si abbia a che fare con strutture identiche o simili posizionate in diversi punti dello spazio;



The interface is divided into several sections for configuring the calculation of magnetic induction.

Sorgenti e grigliato di calcolo

Definizione delle sorgenti

- Numero di strutture: 12
- Forma del segnale: Continua
- 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

Grigliato di calcolo

- SRID: Sistema di riferimento locale
- X_{ini}: 0 mm
- Y_{ini}: 0 mm
- Z_{ini}: 0 mm
- Passo: 10 mm
- Passi lungo X: 350
- Passi lungo Y: 0
- Passi lungo Z: 0
- Unità di output: μT

Impegni geometrici

- Tipo di geometria: Seleziona...

Buttons:

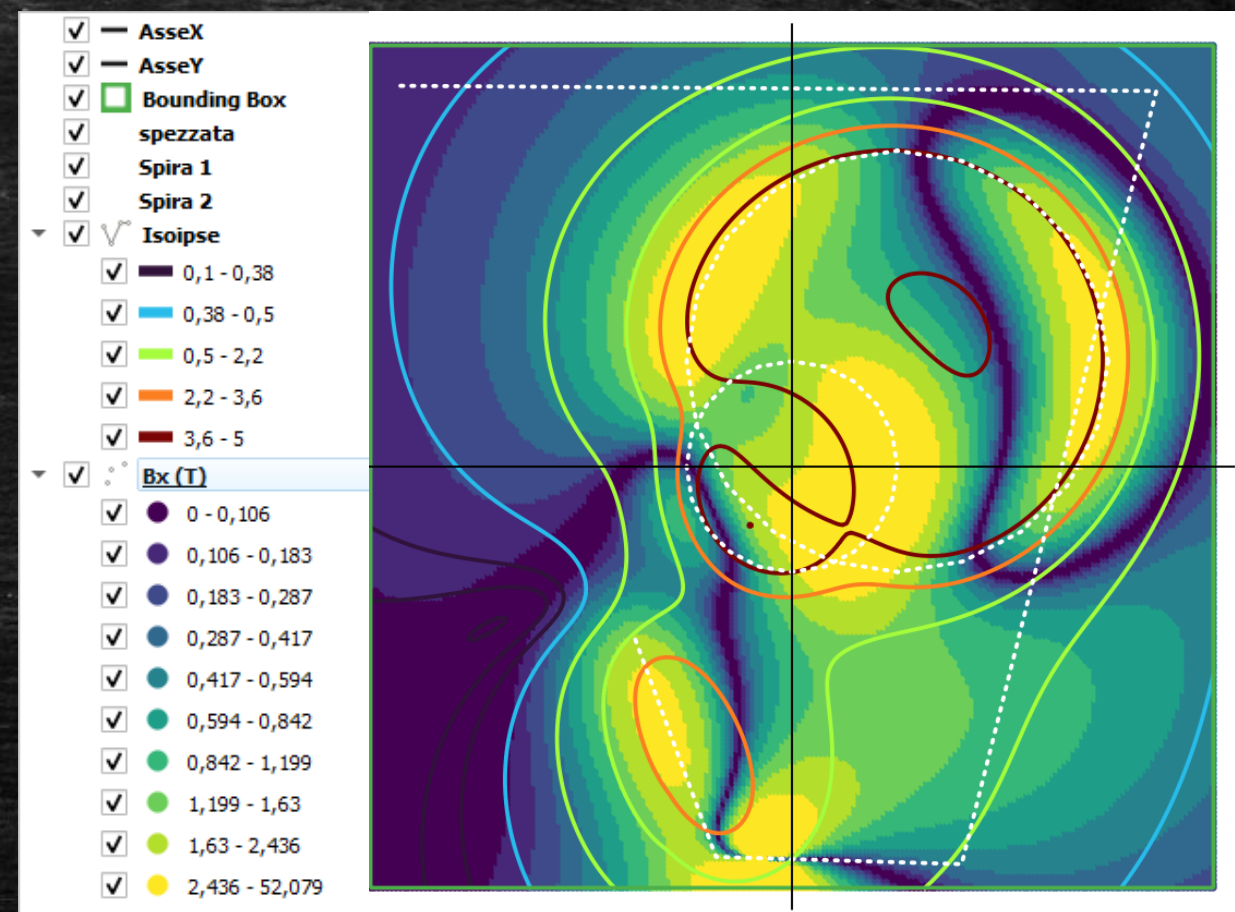
- Da grigliato
- Crea GPKG
- Calcola
- Reset
- JSON

Replica alla struttura n. ... >>

Calcolo dell'induzione magnetica

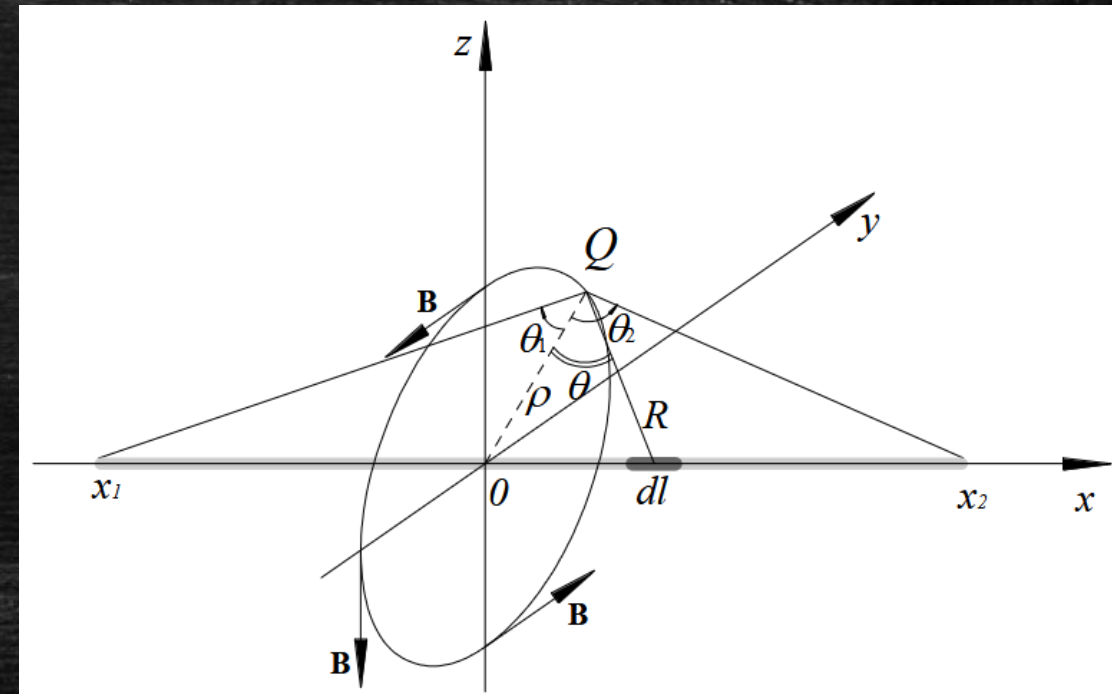
Esempio dell'output atteso:

- 3 sorgenti semplici (una spezzata, 2 spire circolari)
- Mappa di campo in QGIS
- Isoipse
- Sovrapposizione a sorgenti e bounding box (del grigliato di calcolo)



Calcolo dell'induzione magnetica

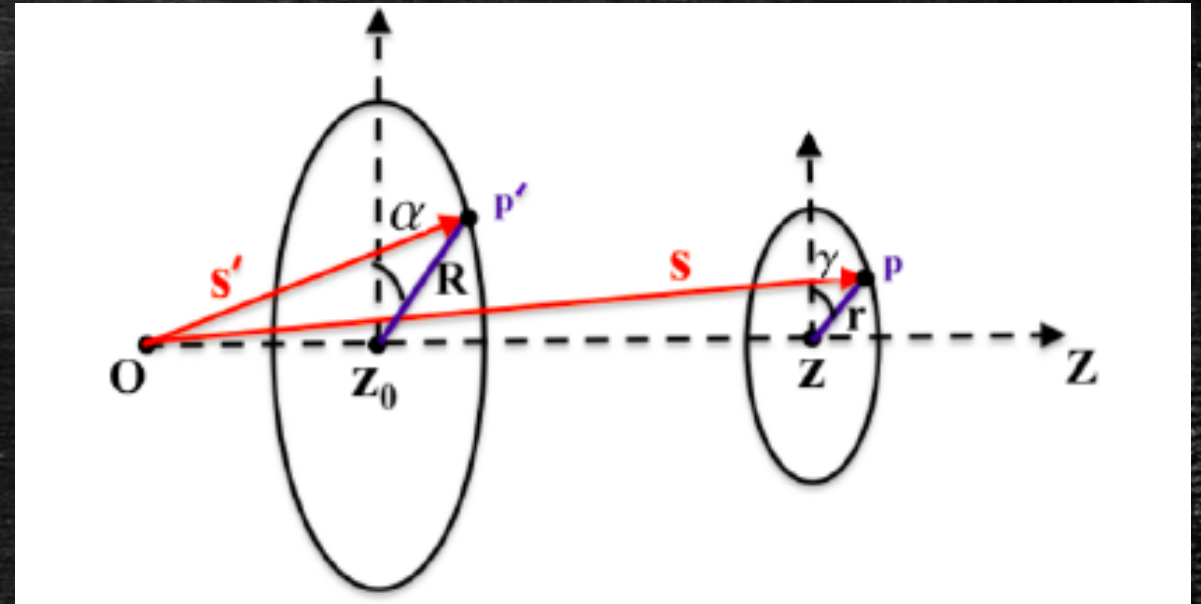
La soluzione del calcolo campo di un segmento percorso da corrente è relativamente semplice



$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi\rho} (\sin \theta_2 - \sin \theta_1) \hat{\mathbf{e}}$$

Calcolo dell'induzione magnetica

- La soluzione in tutto lo spazio nel caso di una spira circolare richiede considerazioni matematiche più complesse
- Parte dalla determinazione del potenziale vettore.



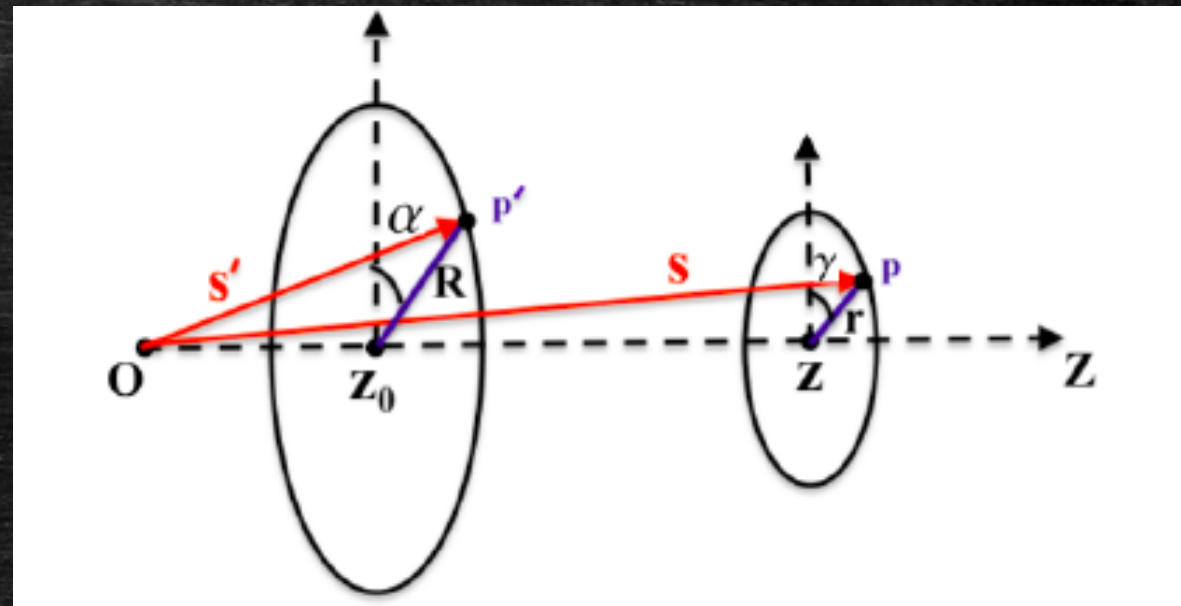
Calcolo dell'induzione magnetica

L'induzione è 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:

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



Calcolo dell'induzione magnetica

Si ricavano le componenti longitudinale e radiale per l'induzione magnetica:

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

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

E, K : integrali ellittici completi di I e II specie

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

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

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

Calcolo dell'induzione magnetica

Una procedura alternativa, proposta da INFN, porta a:

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

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

${}_2F_1$: funzione ipergeometrica

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

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

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

Calcolo dell'induzione magnetica

Si dimostra l'equivalenza matematica dei due metodi tramite:

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

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

Validazione della procedura

È stata eseguita una validazione interna dei risultati del software confrontando:

- la formulazione esatta che si avvale degli integrali ellittici
- la formulazione esatta che utilizza la funzione ipergeometrica
- il calcolo approssimato in cui la spira viene approssimata con una spezzata, aumentando progressivamente il numero di segmenti costituenti la singola spira (sono stati eseguiti dei test approssimando la spira con 20, 200 e 2000 segmenti)

Validazione della procedura

Risultato della validazione:

- 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 la spira.
- **Attenzione:** tempi di calcolo molto diversi (10x con spira approssimata da 20 segmenti)

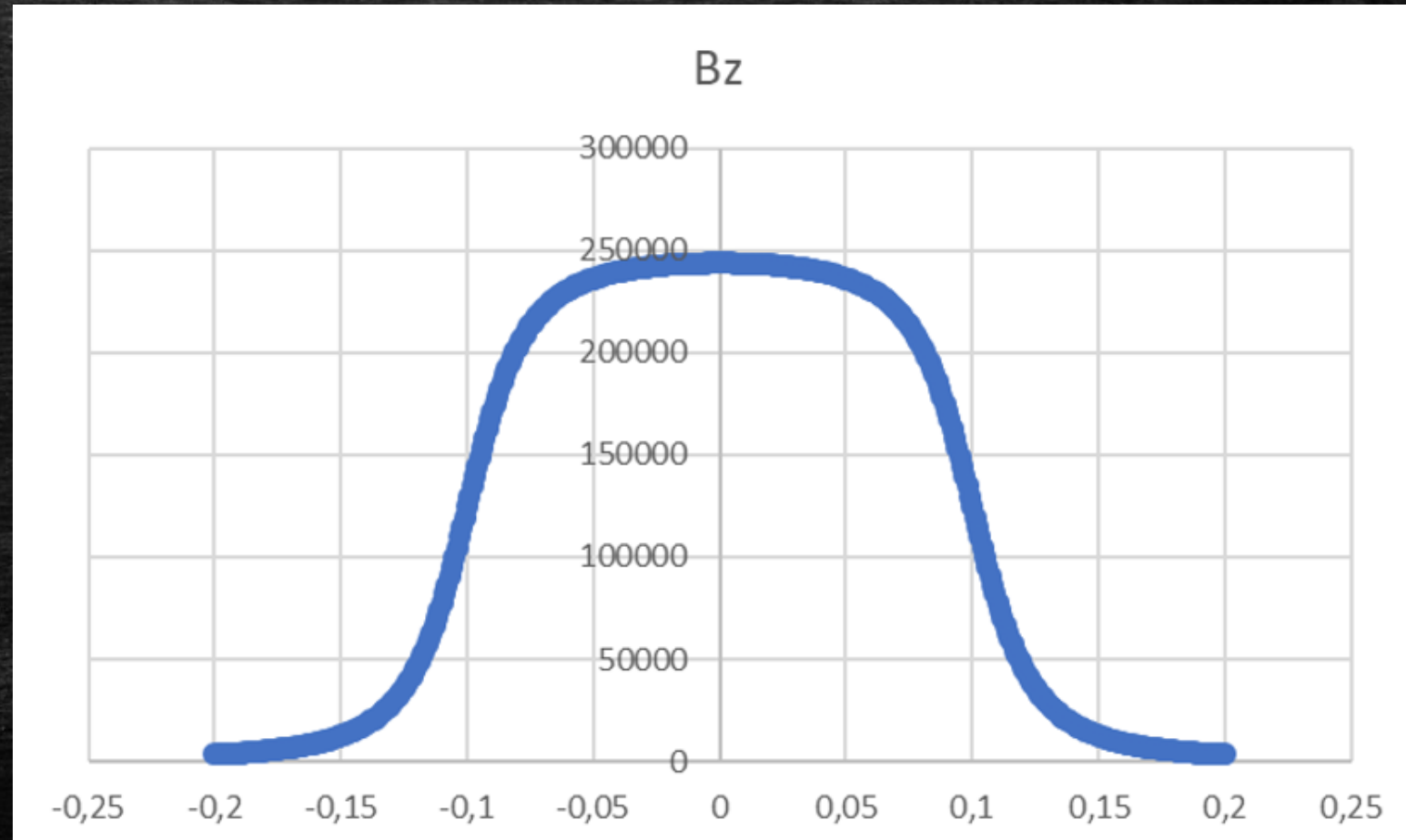
Validazione della procedura

Infine, il risultato atteso in centro
ad un solenoide:

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

coincide con quello atteso dalla
teoria per il solenoide infinito:

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



I risultati del 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 possibile scaricare il file di testo con i risultati:

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

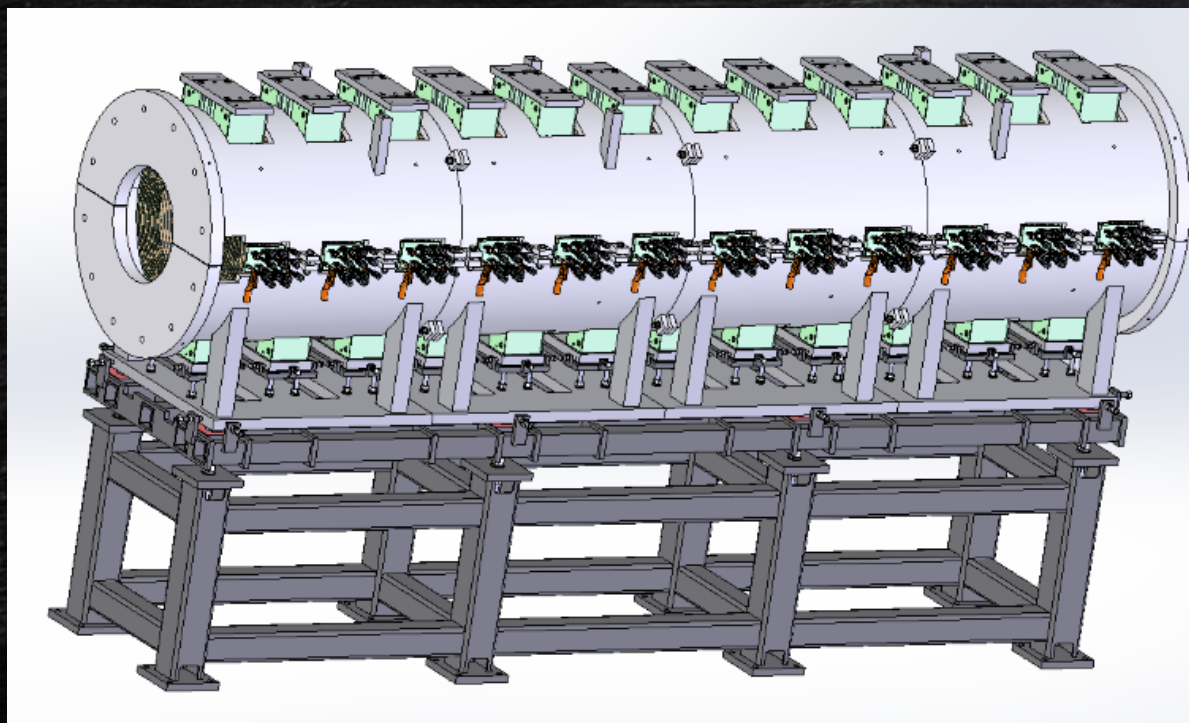
I risultati del calcolo

Al termine dell'esecuzione del calcolo:

- ...
- è possibile scaricare un file in formato zip contenente le geometrie delle sorgenti in formato GeoPackage
- 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

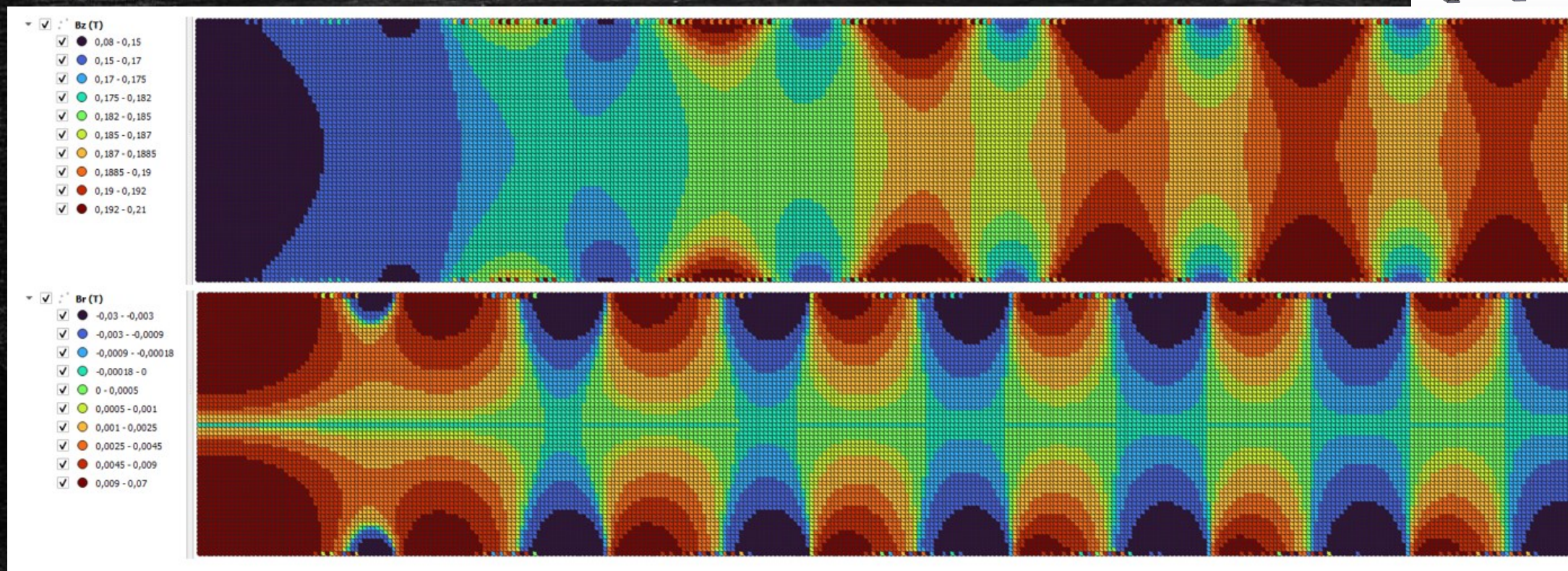
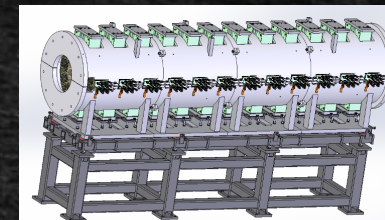
Le applicazioni

In ambito acceleratoristico esistono diverse applicazioni rilevanti dei sistemi di foccheggio dei fasci di particelle cariche che utilizzano le lenti magnetiche.



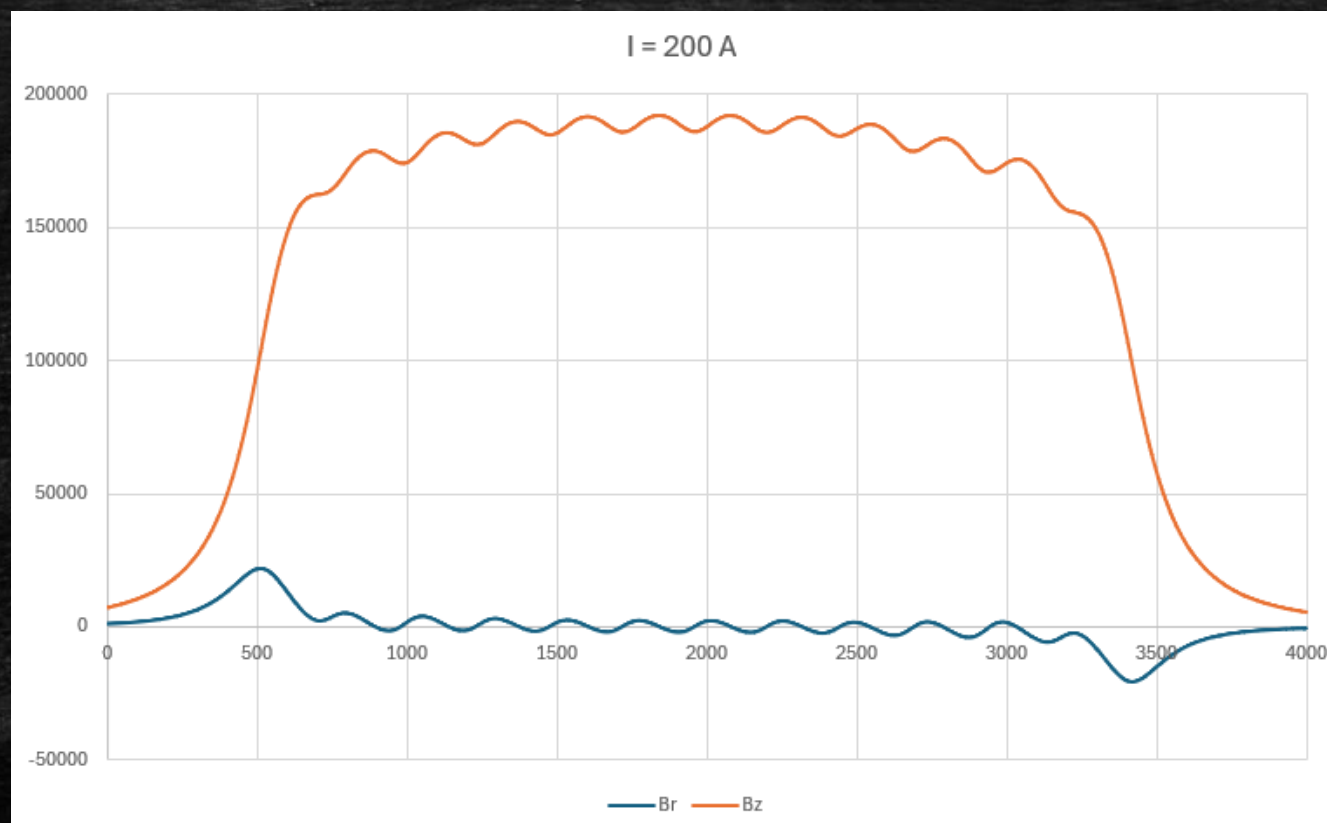
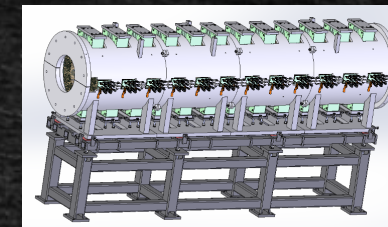
Le applicazioni

Mappe con le componenti di campo assiale (sopra) e radiale (sotto).



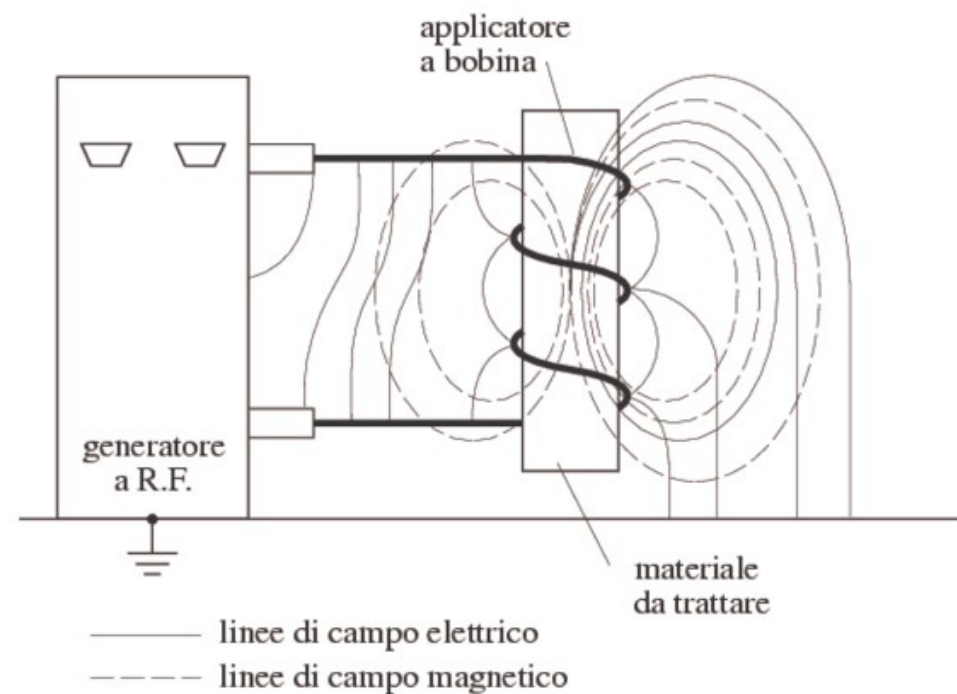
Le applicazioni

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



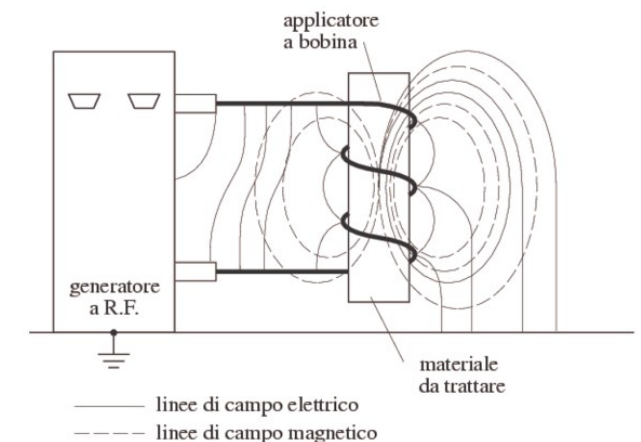
Le applicazioni

In ambito radioprotezionistico Un caso studio è quello dell'esposizione al campo magnetico generato da un forno ad induzione utilizzato nell'industria orafa.



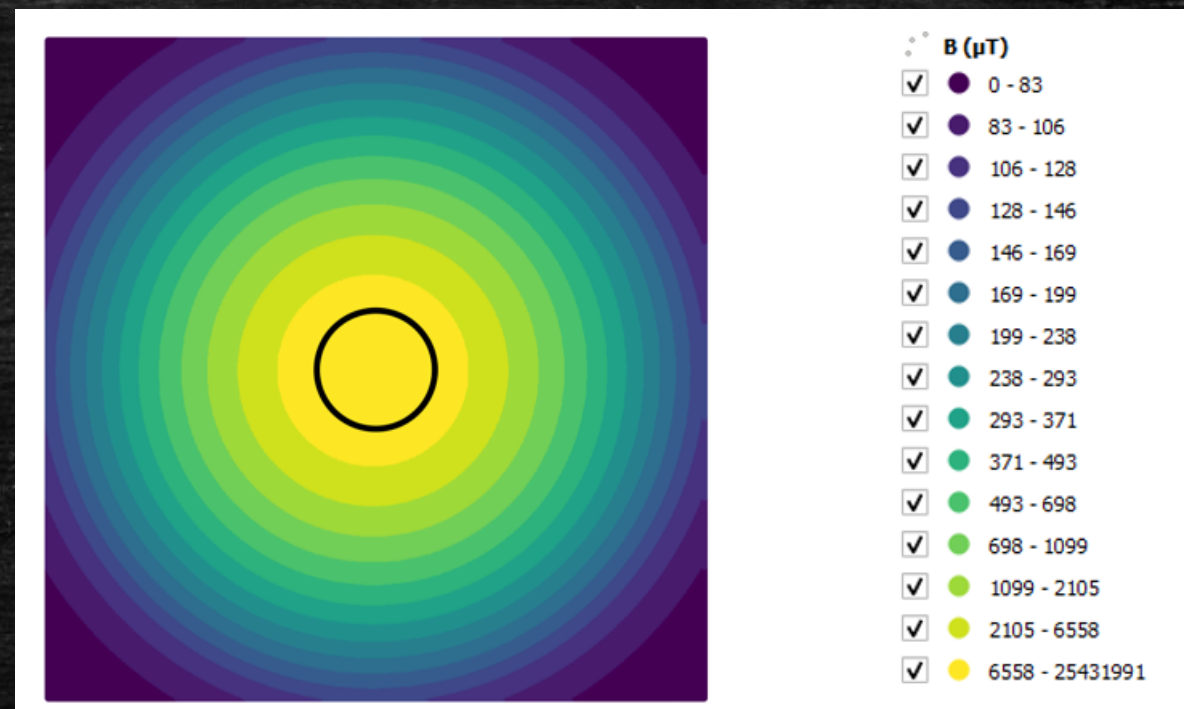
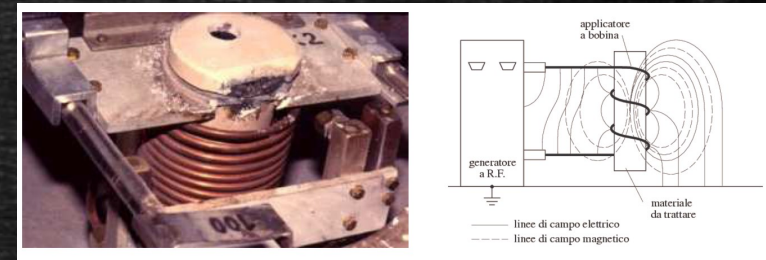
Le applicazioni

- Si tratta di un solenoide avvolto intorno ad un crogiolo cilindrico, collegato ad un generatore a radiofrequenza.
- 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.



Le applicazioni

- 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 sono conformi alle simulazioni effettuate al momento dell'analisi della sorgente.





Grazie per l'attenzione

moreno.comelli@cnr.it