



Zeno Martini (admin)

FEMM TUTORIAL

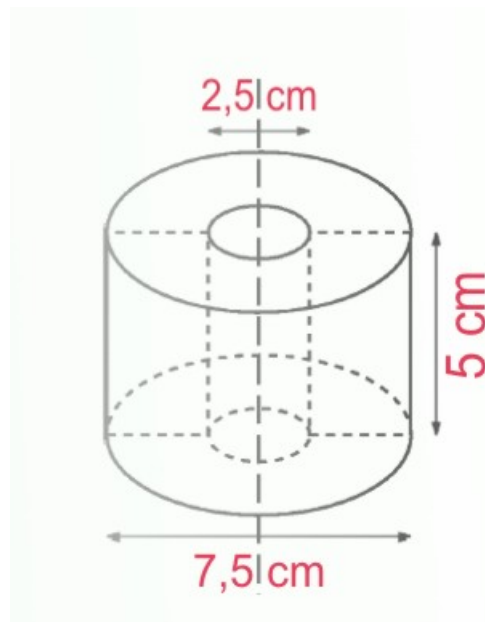
3 April 2009

Presentazione

Tra i software free proposti da [RenzoDF](#) in un [suo articolo](#) come utili per [ElectroYou](#), c'è un interessante ed istruttivo programma di simulazione che permette di tracciare campi magnetici, quindi di risolvere problemi con circuiti magnetici di vario tipo. Si chiama **FEMM** (Finite Element Method Magnetics).

E' stato sviluppato da [David Meeker](#) e risolve problemi bidimensionali in bassa frequenza, magnetici ed anche elettrostatici. E' quindi particolarmente adatto allo studio delle macchine elettriche. L'articolo è un tutorial che ne dimostra l'uso ed è la traduzione, un po' ridotta ed un po' libera, del tutorial in inglese dell'autore, citato nei Riferimenti. Analizza il campo magnetico di un solenoide in aria percorso da corrente continua. Lo scopo è quello di invogliare coloro che sono interessati allo studio dei circuiti magnetici, a servirsi di questo potente strumento software. Ovviamente non è che un piccolo assaggio delle possibilità offerte dal programma, che sono ampiamente descritte nell'Help on line di FEMM. Interessante può diventare lo sviluppo e lo scambio di esercizi e applicazioni di cui [ElectroYou](#) può essere il perno.

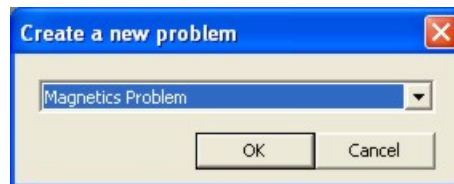
Il solenoide



- Diametro interno: 2,5 cm
- Diametro esterno: 7,5 cm
- Lunghezza: 5 cm
- N. spire: 1000
- Materiale: rame 18 AWG
- Intensità di corrente: 1 A

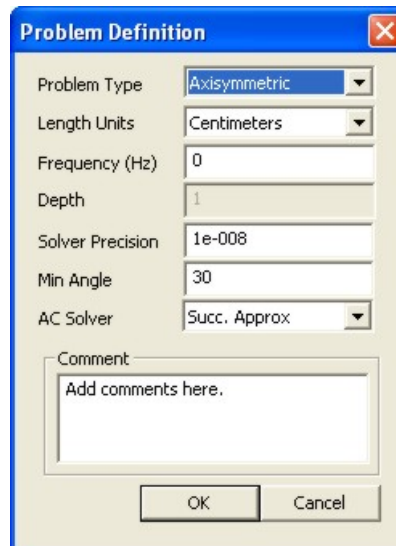
Definizione del problema

Dopo aver lanciato FEMM, scelto il menu *File/New* si seleziona, nella finestra che appare, **Magnetics Problem**



Per definire che la geometria del sistema fisico è a simmetria assiale e che si tratta di un problema di magnetostatica, si sceglie il menu *Problem* e nella finestra che appare *Problem definition* si seleziona:

- nel campo *Problem type*=**Axisymmetric**;
- in *Length units*: **centimeters**;
- in *Frequency (Hz)*: **0**



Definendo il problema a simmetria assiale l'asse di simmetria $r = 0$ è tracciato verticalmente ed il problema è definito nella regione $r \geq 0$. Il verso positivo della corrente è entrante nella pagina.

Definizione della geometria

Ora bisogna definire la geometria del sistema fisico precisando anche i limiti della regione in cui si intende tracciare il campo magnetico.

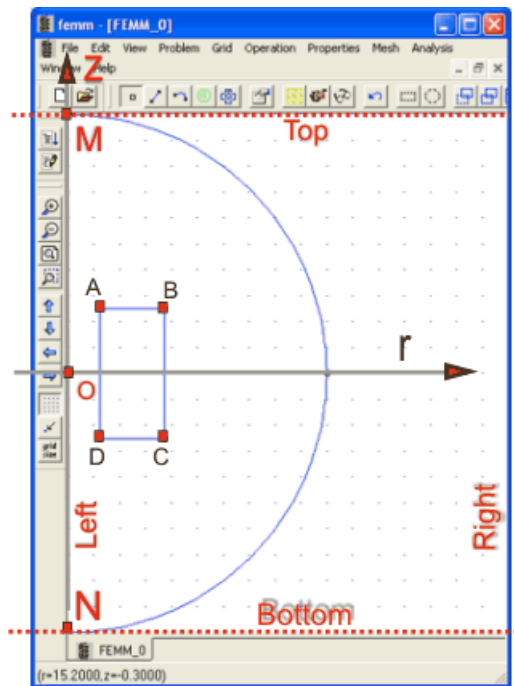
Considereremo perciò una sfera che contenga il solenoide in modo che un suo diametro coincida con l'asse magnetico del solenoide ed il centro coincida con il punto mediano di tale asse. Può andare bene una sfera di raggio $R = 10 \text{ cm}$.

Gli assi cartesiani siano:

- asse delle ordinate, z : coincidente con l'asse magnetico del solenoide
- asse delle ascisse, r , passante per in centro della sfera.

Predisponiamo ora la vista dello schermo in modo che l'asse r , orizzontale, sia al centro e l'asse z , verticale sul bordo sinistro. La larghezza e l'altezza della finestra di visualizzazione devono essere tali da contenere la sfera, o meglio l'emisfera, poiché abbiamo fatto coincidere l'asse z con il bordo sinistro. Lo schermo intersecherà la sfera secondo un semicerchio e l'avvolgimento secondo un rettangolo interno al semicerchio, in posizione simmetrica rispetto all'asse delle ascisse.

La geometria che otterremo è mostrata nella seguente figura

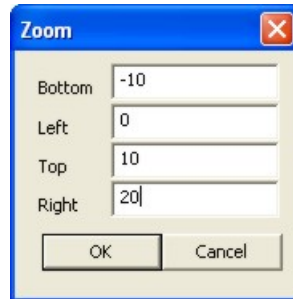


- Top: delimita il bordo superiore ed è una retta orizzontale di equazione $z = R$ (o maggiore);
- Bottom: delimita il bordo inferiore ed è una retta orizzontale di equazione $z = -R$ (o minore);

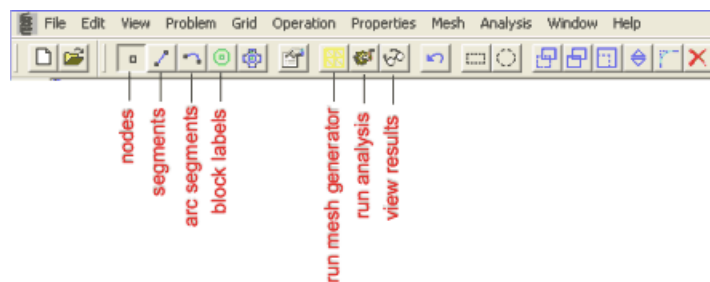
- Left: delimita il bordo sinistro ed è una retta verticale di equazione $r = 0$ (può essere anche minore);
- Right: delimita il bordo destro ed è una retta verticale di equazione $r = R$ (o maggiore);

Per specificare tutto questo scegliamo dalla barra menu *View/Keyboard*

Apparirà la finestra di zoom in cui imposteremo i limiti come precedentemente indicato



Ora dobbiamo disegnare la geometria del nostro sistema, quindi la sezione dell'avvolgimento e quella dell'emisfera.



Barra degli strumenti usati

Scelto lo strumento *nodes* si posiziona il mouse e si clicca (ad ogni click appare un quadratino) nei punti:

- O(0,0); (origine degli assi)
- M(0,10); (intersezione retta top con asse z);
- N(0,-10);(intersezione retta bottom con asse z);
- vertici del rettangolo, sezione dell'avvolgimento
 - A(1.25 , 2.5);
 - B(3.75 , 2.5);
 - C(3.75 , -2.5)
 - D(1.25 , -2.5)

NB: può essere difficoltoso posizionare esattamente il mouse. Le coordinate dei punti si possono però scrivere da tastiera. Premendo il tasto TAB appare la finestra per immettere le coordinate r e z.



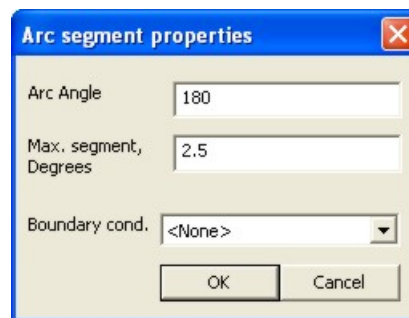
Ora dobbiamo tracciare la semicirconferenza che delimita l'intersezione della sfera ed i segmenti del rettangolo che rappresenta la sezione dell'avvolgimento.

Per tracciare i segmenti si sceglie lo strumento *segment*.

Si clicca prima su un estremo del segmento, poi sull'altro. Il quadratino del primo clic diventerà rosso quando selezionato, ed al successivo click verrà tracciato il segmento che unisce i punti-quadratini. I segmenti da tracciare sono MN, asse magnetico e diametro del semicerchio, AB, BC, CD, DA: bordi della sezione dell'avvolgimento.

Per tracciare la semicirconferenza, si usa lo strumento *Arc segments*

Si clicca sul quadratino del punto N che diventerà rosso, quindi sul quadratino del punto M. Comparirà allora la finestra che chiede i parametri per tracciare l'arco. L'arco sarà di 180° , specificato nel campo *Arc Angle*, e sarà tracciato come una successione di segmenti che approssimeranno gli archi elementari il cui angolo al centro è specificato nel campo *Max. segment, Degrees*. (2.5 nel nostro caso)



A questo punto la geometria del sistema è tracciata.

Definizione dei materiali

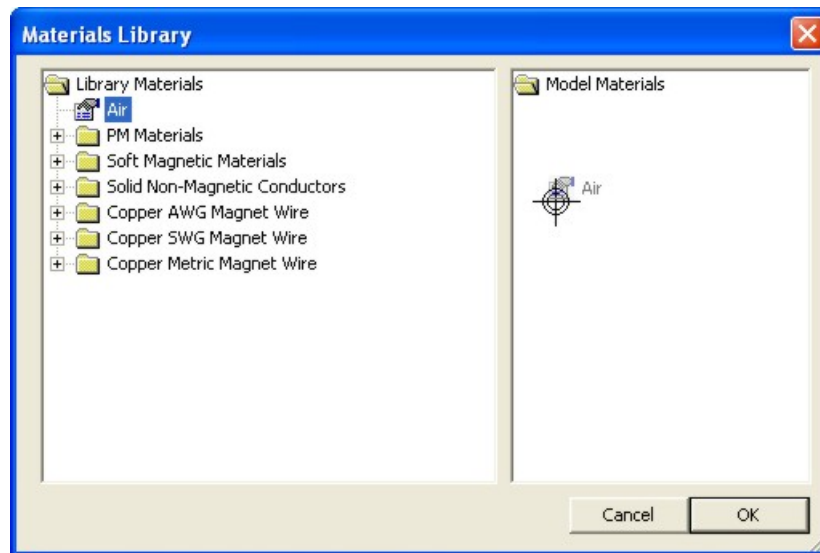
Ora bisogna specificare il materiale che occupa lo spazio: il rame dell'avvolgimento e l'aria all'esterno.

Per farlo si procede in questo modo: si indica un punto all'interno della regione occupata dal materiale ed a quel punto si associa il materiale, che sarà dal programma riconosciuto come materiale di tutti i punti della regione.

Si sceglie lo strumento *Block labels* e si posiziona il mouse all'interno della regione; quindi si clicca. In corrispondenza apparirà un quadratino verde seguito dalla scritta *<none>* che sta ad indicare che per quella regione non è stato ancora specificato alcun materiale.

Nel nostro caso sceglieremo due punti: uno interno al rettangolo (rame), l'altro esterno(aria).

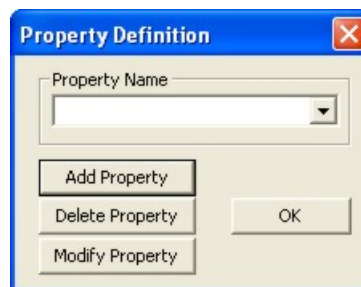
Si sceglie ora il menù *Property/Materials Library*. Compare la finestra con i materiali disponibili. Nel nostro caso ci occorrono aria e rame.



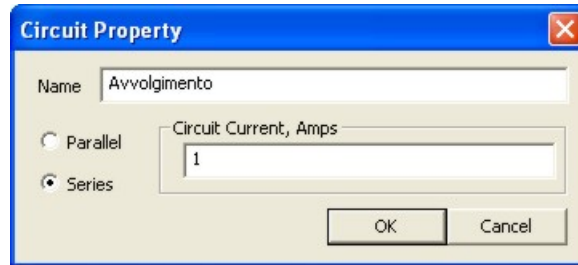
Si trascinano nel box di destra con il mouse (drag & drop), i materiali che si trovano nel box di sinistra che li raccoglie in una cartella associata al progetto. Nel nostro caso i materiali sono l'aria (**Air**) ed il filo di rame **AWG 18** che si trova nella cartella Copper AWG Magnet Wire. Fatto ciò si clicca su OK.

Dobbiamo ora specificare le caratteristiche dell'avvolgimento: 1000 spire percorse dalla corrente di 1 A.

Si sceglie il menu *Property/Circuits*. Compare la finestra



Si clicca su *Add Property*. Si apre una finestra nel cui campo, *Name*, si inserisce un nome per il circuito (**Avvolgimento**: ad esempio); nel campo *Circuit Current*, si inserisce **1**, che è l'ampere che percorre le spire in serie. Eccola

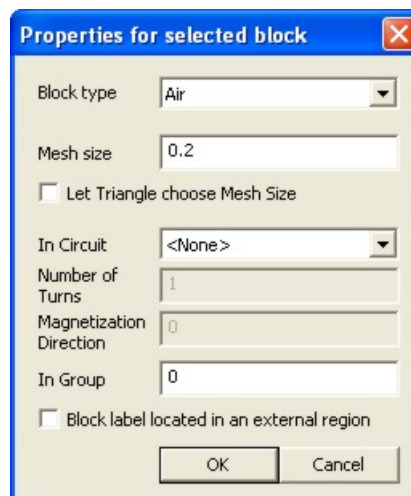


Si clicca quindi su OK e nella finestra precedente nel campo property name compare Avvolgimento. Si conferma cliccando su OK.

Assegnazione dei materiali alle regioni

Ora ad ogni regione individuata in precedenza con il block label, devono essere assegnate le proprietà definite.

Si posiziona il mouse sul punto scelto nella regione occupata dall'aria e lo si seleziona usando il pulsante destro del mouse (right click). Il quadratino diventa rosso; si preme <spazio> sulla tastiera e compare la finestra *Property of selected block*

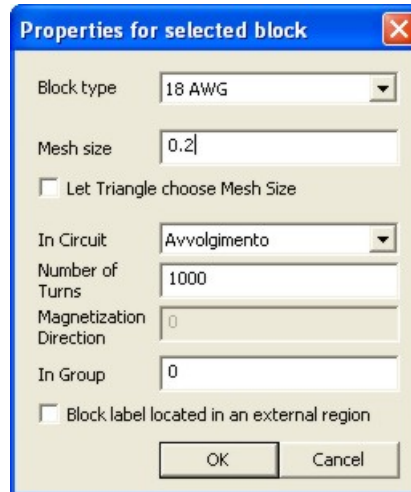


dove si sceglie **Air** nel campo *block type* e, dopo aver deselezionato la casella *Let triangle choose mesh size*, nel campo *Mesh size* si scrive **0.1**, che è la lunghezza massima del lato del triangolo equilatero usato per coprire tutta la regione dal software di elaborazione.

Si clicca ora su OK. Il quadratino verde del disegno verrà cerchiato e comparirà accanto il nome Air.

Si ripete il procedimento portandosi sul punto scelto all'interno dell'avvolgimento.

Nella finestra



nel campo *In circuit* si specificherà **Avvolgimento**, che è il nome dato all'unico circuito presente, precisando nel campo *Number of Turns* il numero di spire: **1000**. Si clicca su OK ed il quadratino verde sul disegno verrà cerchiato e comparirà accanto il nome del circuito di appartenenza con le specifiche 18 AWG [**Avvolgimento:1000**].

Definizione delle condizioni ai bordi

Il campo magnetico si estende teoricamente all'infinito. Il calcolo però è effettuato solo nello spazio definito. Occorre ora dire come devono essere considerati i bordi della regione in cui il calcolo è effettuato.

Si sceglie il menu *Property/Boundary* e nella finestra che compare si clicca sul pulsante *Add New Property*. Nel campo *Name* della nuova finestra si scrive, ad esempio, **ABC** (**A**symptotic **B**oundary **C**ondition) e, nel campo *BC Type* si seleziona **Mixed**.

Questo ci dà la possibilità di simulare uno spazio aperto, senza bordi, anche se il calcolo avviene in uno spazio limitato. Si devono introdurre due coefficienti. Qui si riportano solo i valori da inserire nel caso dell'esempio. Per una loro giustificazione teorica si rimanda alla documentazione specifica del software. I due coefficienti sono:

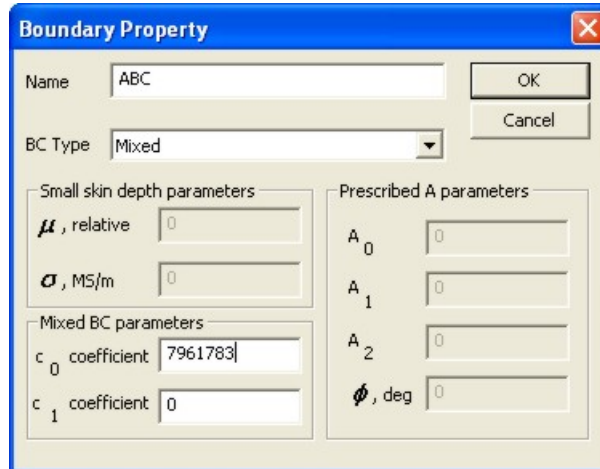
c_1 che va posto uguale a zero e c_0 da calcolare con la formula:

$$c_0 = \frac{1}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot R} \text{dove}$$

- $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ è la permeabilità del vuoto;

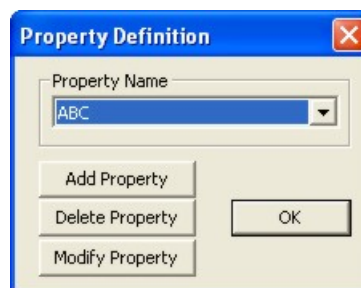
- μ_r è la permeabilità relativa del materiale (aria nel nostro caso quindi $\mu_r = 1$);
- R il raggio della sfera che delimita la regione (10 cm)

Si ha dunque $c_0 = 7961783$



Si esce con OK dalle finestre.

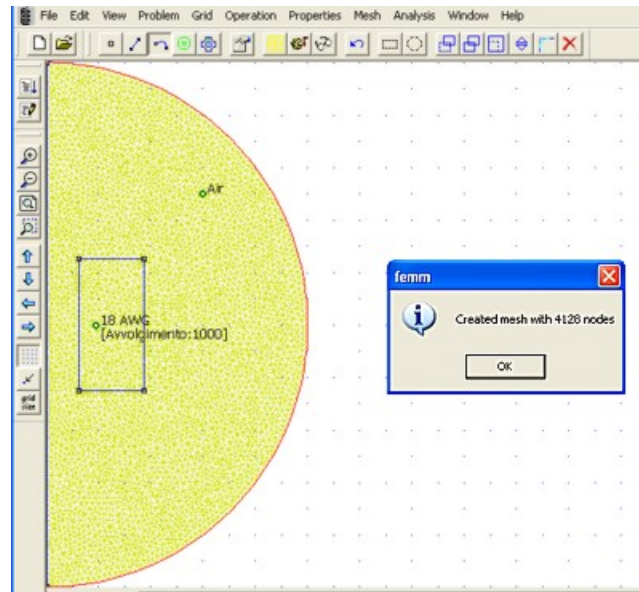
Ora si deve attribuire la proprietà definita al bordo che la deve avere, cioè alla la semicirconferenza. Si sceglie lo strumento *Arc segment*; ci si posiziona con il mouse sulla semicirconferenza; si clicca con il pulsante destro del mouse e la semicirconferenza diventerà rossa indicando che è selezionata; si sceglie il menu Property/boundary scegliendo ABC nella finestra di definizione delle proprietà.



Si clicca su OK.

Calcoli e tracciamento del campo

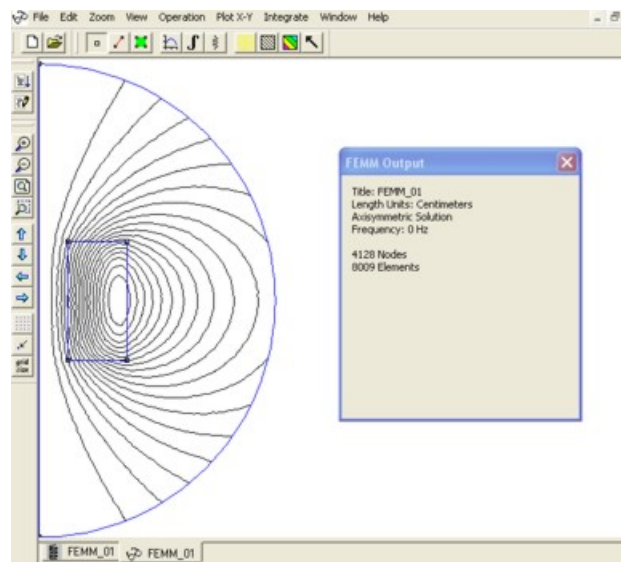
Ora si possono eseguire i calcoli e visualizzare i diagrammi che rappresentano il campo. Con il pulsante-strumento *Run Mesh generator* si visualizza in che modo le regioni sono coperte dalla triangolazione. Ecco cosa si ottiene nel caso specifico



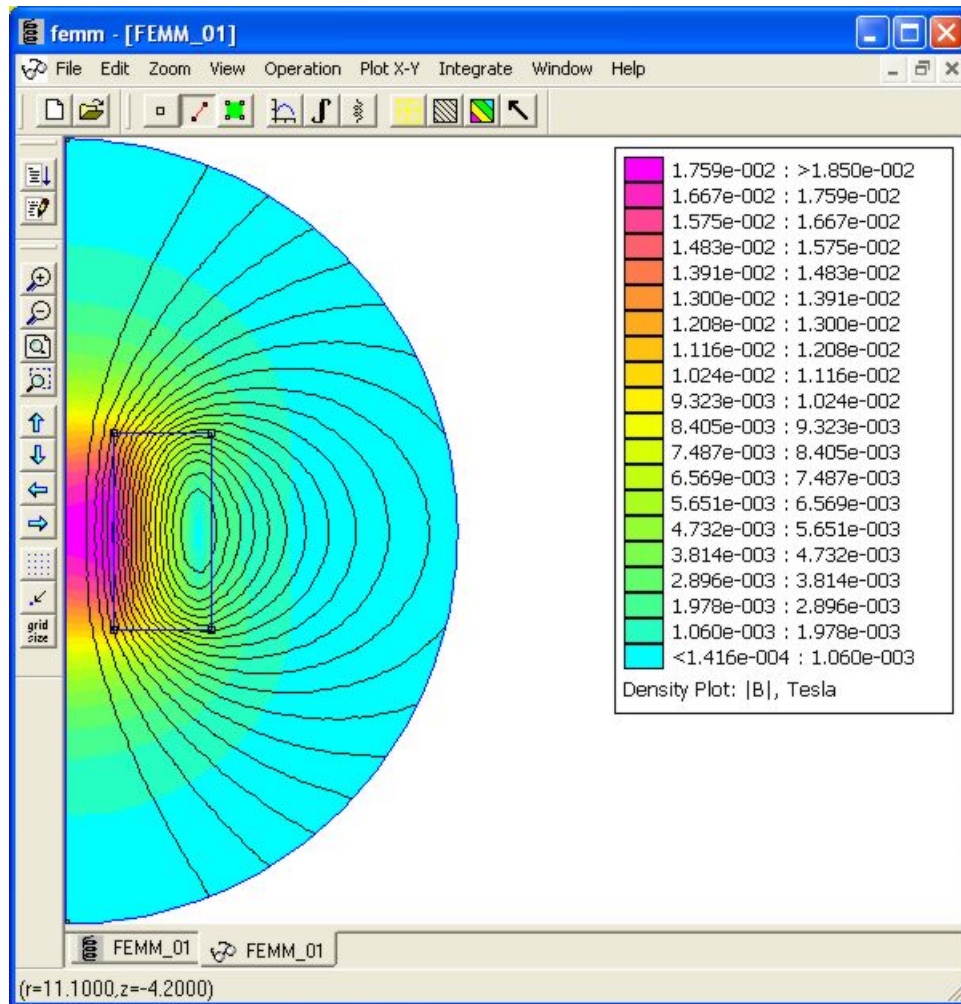
Si effettuano i calcoli cliccando sullo strumento *Run Analysis*

Si visualizzano le linee di campo con lo strumento *View Results*

Si ottiene



Ora si possono avere molte altre informazioni, usando i pulsanti della barra sotto i menù. Si può ad esempio tracciare il grafico evidenziando con colori i valori dell'induzione magnetica. Basta cliccare sul pulsante con barre trasversali colorate che apre una finestra di dialogo per stabilire cosa mostrare e come (induzione, campo magnetico, densità di corrente). Ecco ciò che si ottiene.



Induzione magnetica

Riferimenti ed ulteriori link

- [Il documento originale](#)
- Un ottimo tutorial del prof. Nicola Bianchi (Università di Padova)
 - [UsingFEM](#)
- Uno studio del motore ad induzione, sempre del prof. Nicola Bianchi
 - [IM-FEM](#)

Appendice

Come detto si può fare molto di più con FEMM comprese animazioni.

Eccone ad esempio una realizzata da [rini](#)



Estratto da "<http://www.electroyou.it/mediawiki/index.php?title=UsersPages:Admin:femmtutorial>"