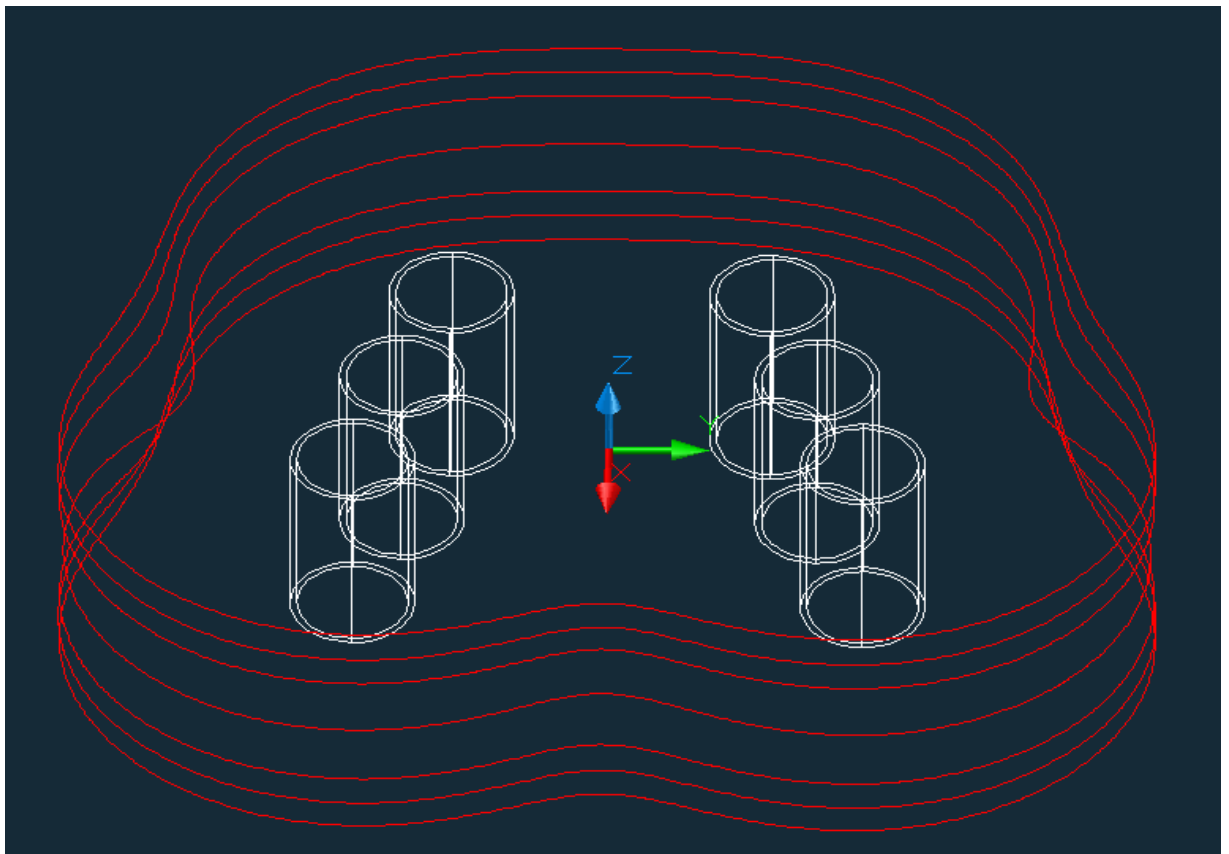


SELF3D TRAF0

Modulo Opzionale di SELF3D FULL
riservato alla simulazione di
trasformatori a secco

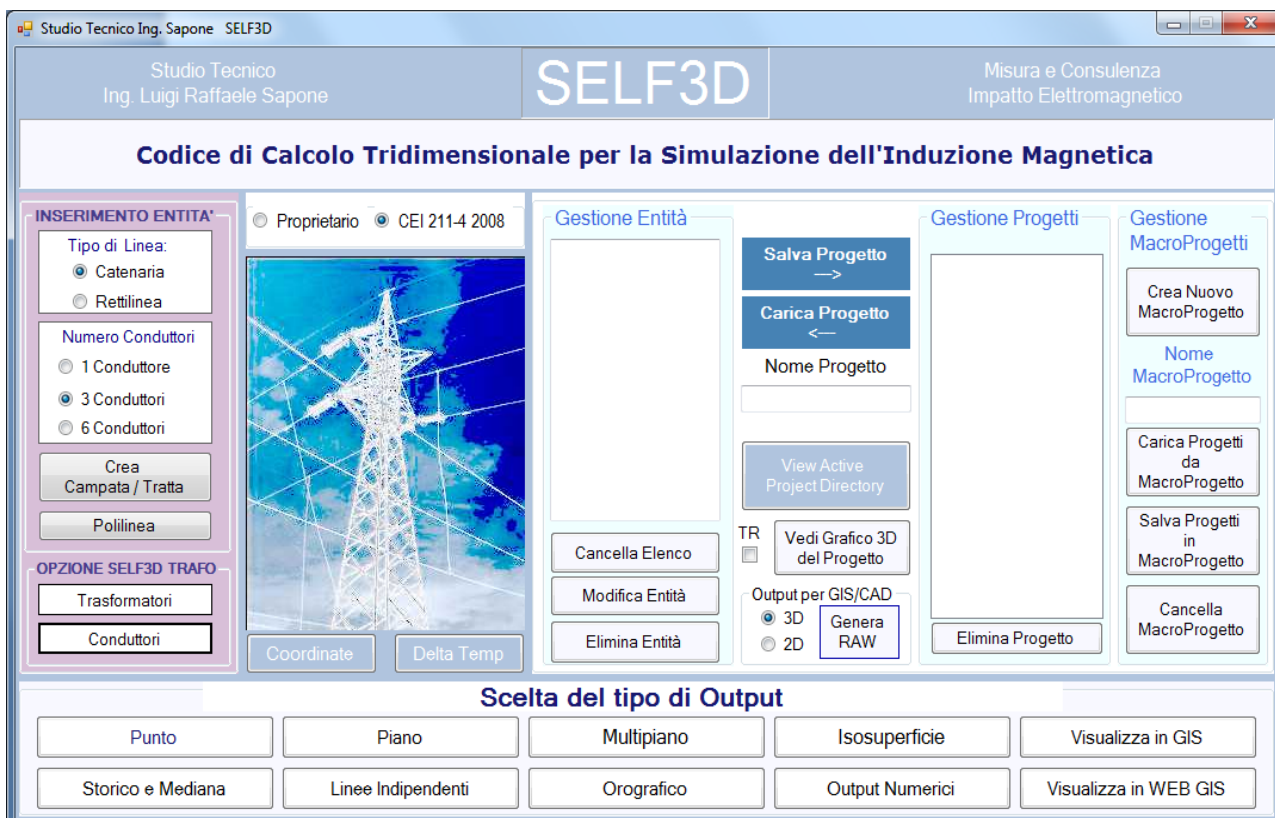


Misura e Consulenza Impatto Elettromagnetico

SELF3D trafo è un modulo opzionale di SELF3D FULL.

Esso è riservato alla simulazione di trasformatori a secco utilizzando un metodo analitico.

Nel momento in cui questo modulo opzionale è attivato in SELF3D FULL, la pagina principale di quest'ultimo appare come nella figura seguente:



Come visibile, a sinistra della figura centrale, è adesso presente un riquadro denominato “Opzione SELF3D TRAF0” e, all'interno di esso, sono presenti i due pulsanti “Trasformatori” (oggetto della presente capitolo) e “Conduttori” (esaminato nel prosieguo di questo documento).

Oltre a ciò, il modulo opzionale SELF3D TRAF0 introduce un livello superiore nella gestione e salvataggio dei dati. Infatti, alle precedenti definizioni di Entità e di Progetti (ossia di insieme di Entità), si aggiunge il MacroProgetto che, da come lo stesso nome suggerisce, rappresenta un insieme di Progetti.

Questa introduzione dei MacroProgetti si è resa necessaria per ottenere una gestione più organica delle simulazioni, dato che con l'opzione SELF3D TRAF0 si sono aggiunte ulteriori entità (trasformatori e linee associate) rispetto a quelle presenti di default in SELF3D.

Operando sul pulsante trasformatori si apre la finestra di dimensionamento trafo, come nella figura seguente:



In SELF3D si parla di “Gruppo di Trasformatori”, ossia di un insieme di trasformatori. Un gruppo è quindi formato da un insieme di trasformatori che possono essere anche tutti diversi tra loro, sia come caratteristiche elettriche e geometriche che, ovviamente, come posizionamento.

Il numero di trasformatori che è possibile inserire in un gruppo, e quindi simulare, è illimitato.

Le parti definite “Gestione Gruppi “ e “Gestione Trasformatori” servono ad operare in merito alla creazione e modifica di gruppi e trasformatori ad essi appartenenti.

La parte “Visualizza Trafo del Gruppo“, come vedremo, serve a lanciare visualizzazioni sia in modalità 2D (una sorta di vista dall'alto), sia in modalità 3D, che a generare un file RAW utilizzato da SELF3D per la visualizzazione di entità in ambiente CAD/GIS/WEBGIS, sfruttando le utilities contenute nello stesso SELF3D.

La parte in basso a destra serve, come lo stesso titolo suggerisce, ad effettuare il calcolo dell'induzione magnetica generata dal gruppo di trasformatori in un punto scelto dall'utente. Qui è da aprire una breve parentesi....

Nel momento in cui si dimensiona in SELF3D un gruppo di trasformatori, essi diventano a tutti gli effetti parte integrante del progetto attivo di SELF3D, ossia parte integrante del progetto che verrà simulato.

Misura e Consulenza Impatto Elettromagnetico

Questo vuol dire che con il gruppo trasformatori è possibile fare tutte le simulazioni che SELF3D permette (punto, piano, piano locale relativo ad un punto georiferito, volume, proiezione al suolo dell'isolinea ecc)

E' quindi possibile anche effettuare la simulazione in un punto.

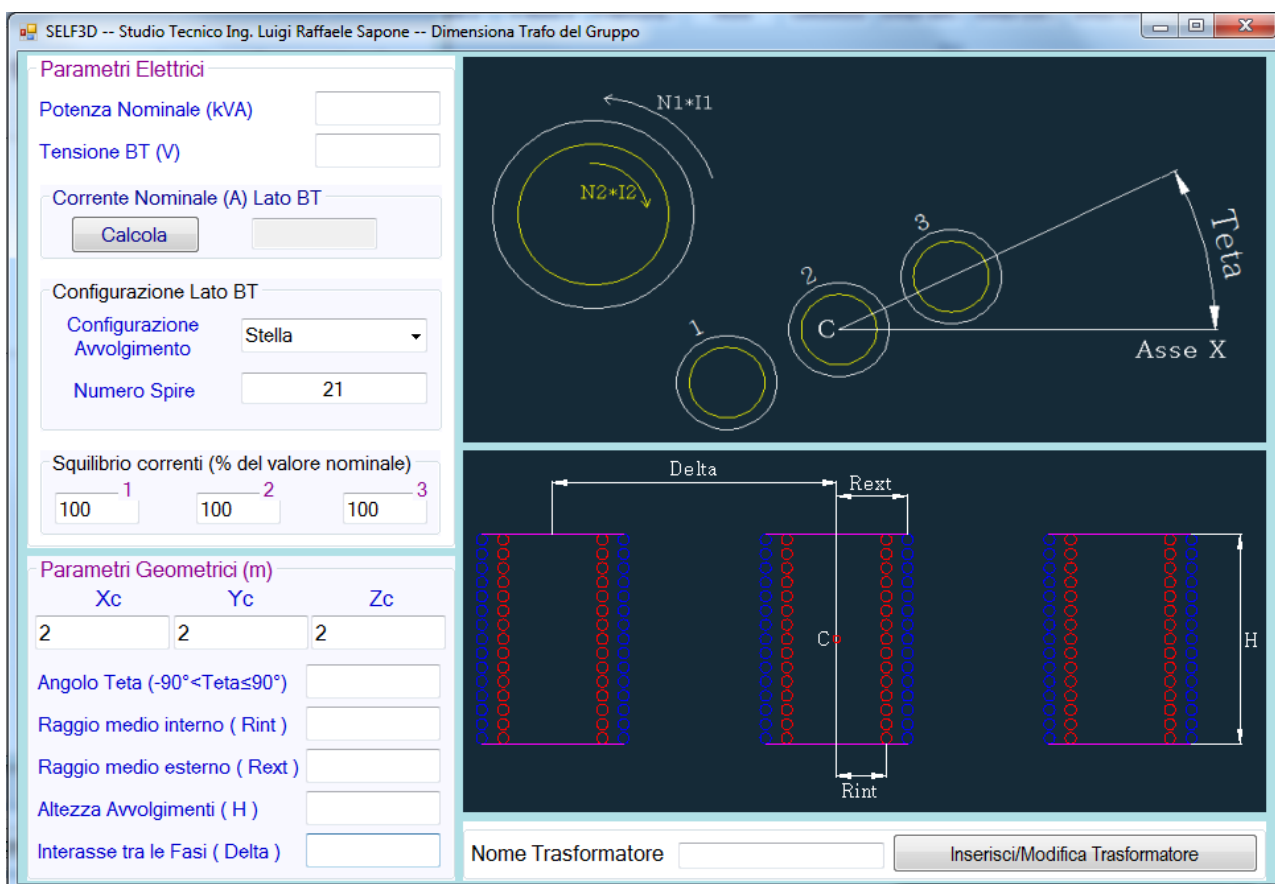
Viene quindi da chiedersi: dato che la simulazione in un punto può effettuarsi con la classica finestra di "Simulazione in un Punto" di SELF3D, a cosa serve dare la possibilità di effettuare simulazioni in un punto anche nella finestra principale di dimensionamento trasformatori?

È stata inserita questa possibilità perchè, nel momento in cui si inserisce un gruppo di trasformatori insieme alle altre linee costituenti il progetto, il risultato della simulazione sarà dato chiaramente dal contributo dei trasformatori combinato con quello delle altre linee elettriche.

Al contrario, la simulazione in un punto permessa nella finestra di dimensionamento trasformatori, è sempre relativa solo e soltanto al contributo del gruppo di trasformatori, indipendentemente dal fatto che il trasformatore faccia parte o meno di un progetto in presenza di altre sorgenti.

In questo modo, è possibile discernere, nello stesso momento, il contributo dei trasformatori del gruppo rispetto al contributo di tutto il progetto da simulare.

Il pulsante "Aggiungi Trasformatore" permette di dimensionare ogni singolo trasformatore del gruppo. Alla sua pressione si apre la finestra seguente:

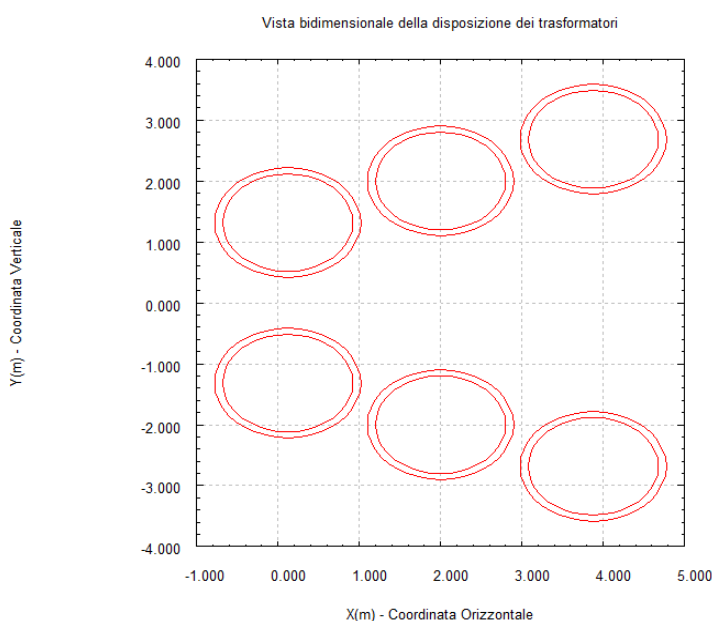


Misura e Consulenza Impatto Elettromagnetico

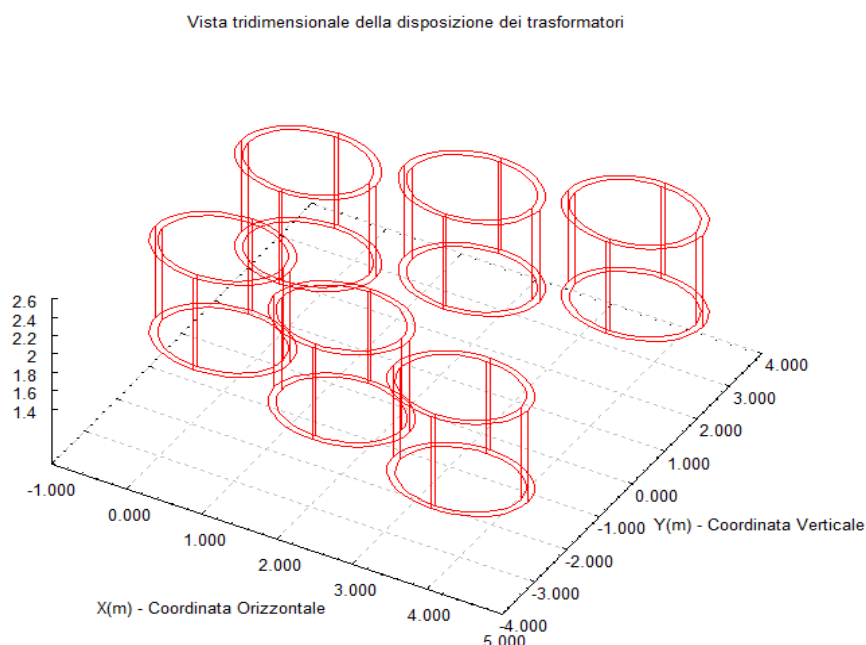
Come visibile, in questa finestra è possibile il dimensionamento dei parametri elettrici (parte superiore sinistra) e geometrici (parte inferiore sinistra) del singolo trasformatore appartenente al gruppo.

Una volta dimensionato, il trasformatore entrerà a far parte del gruppo di trasformatori. E' quindi possibile continuare indefinitamente ad aggiungere altri trasformatori a questo gruppo.

Terminato l'inserimento dei trasformatori in un dato gruppo, è possibile la sua visualizzazione. Nel caso di gruppo composto da due trasformatori, orientati di 20° e -20° rispetto all'Asse X, abbiamo la seguente visualizzazione 2D:

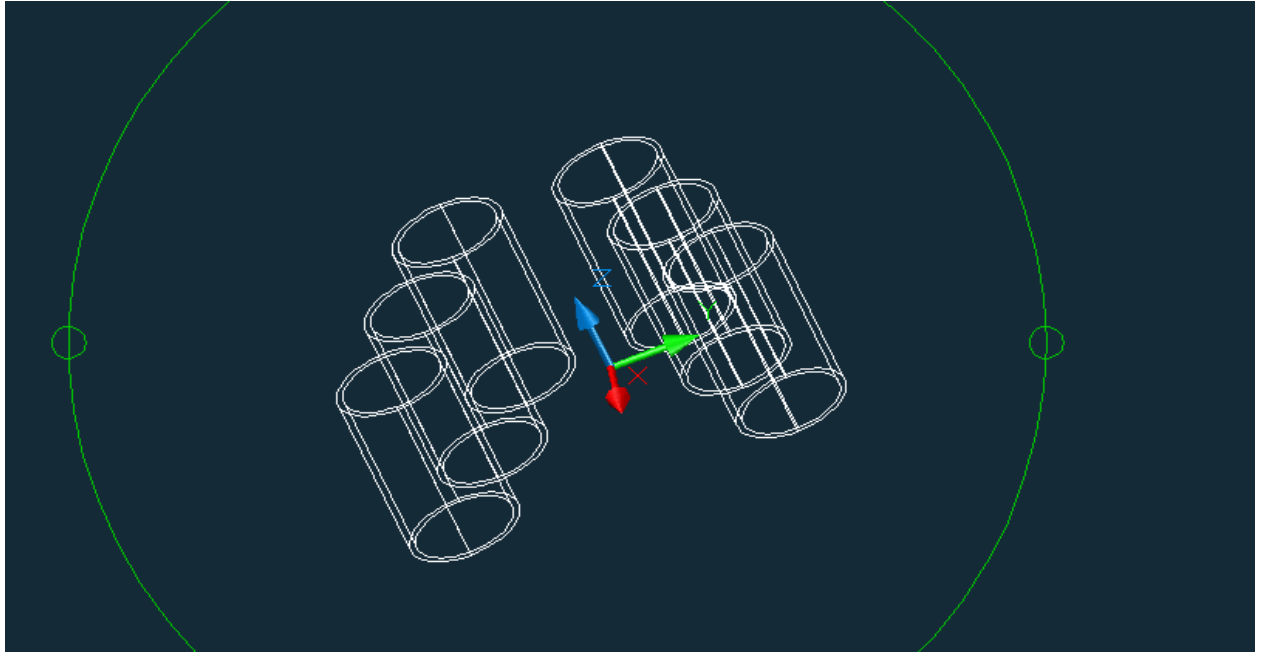


e la seguente visualizzazione stilizzata 3D:



Misura e Consulenza Impatto Elettromagnetico

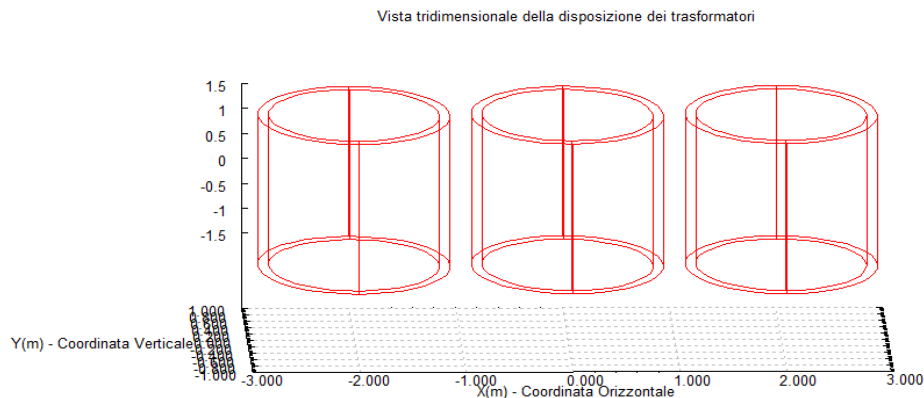
Mentre, operando sul pulsante “Genera RAW per CAD” è possibile operare con le utilities di SELF3D riservate all'interazione con l'ambiente CAD, ed ottenere una rappresentazione 3D nello stesso CAD.



Lo stesso vale per gli ambienti GIS e WEBGIS.

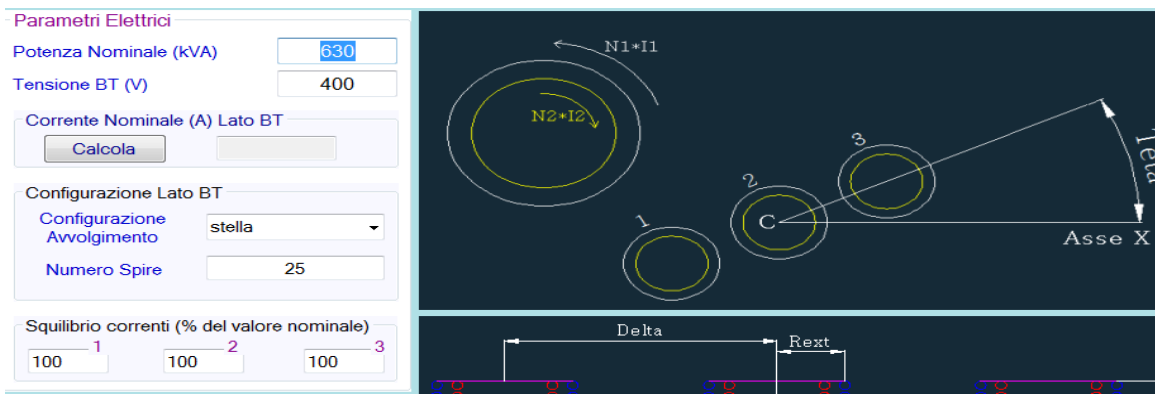
Come vediamo, queste opzioni di visualizzazione (2D,3D e RAW) sono riservate alla visualizzazione dei soli trasformatori appartenenti al gruppo trasformatori. Questo al fine di verificare per bene il corretto inserimento geometrico degli stessi trasformatori. E' evidente che, nel momento in cui il gruppo trasformatori entrerà a far parte di un progetto più articolato (composto ad esempio, oltre che dai trafo, anche da terne rettilinee, conduttori elicordati, conduttori a catenaria come potrebbe essere una linea aerea MT in ingresso ad una cabina), allora la visualizzazione di SELF3D terrà conto di tutte le geometrie inserite, e non solo dei trafo.

Passiamo ora alla simulazione, considerando, per adesso, il solo trasformatore. Inseriamo un solo trasformatore, orientato lungo l'asse X, e centrato nel punto 0,0,0. Visualizzandolo in modalità 3D otteniamo il seguente risultato:



Misura e Consulenza Impatto Elettromagnetico

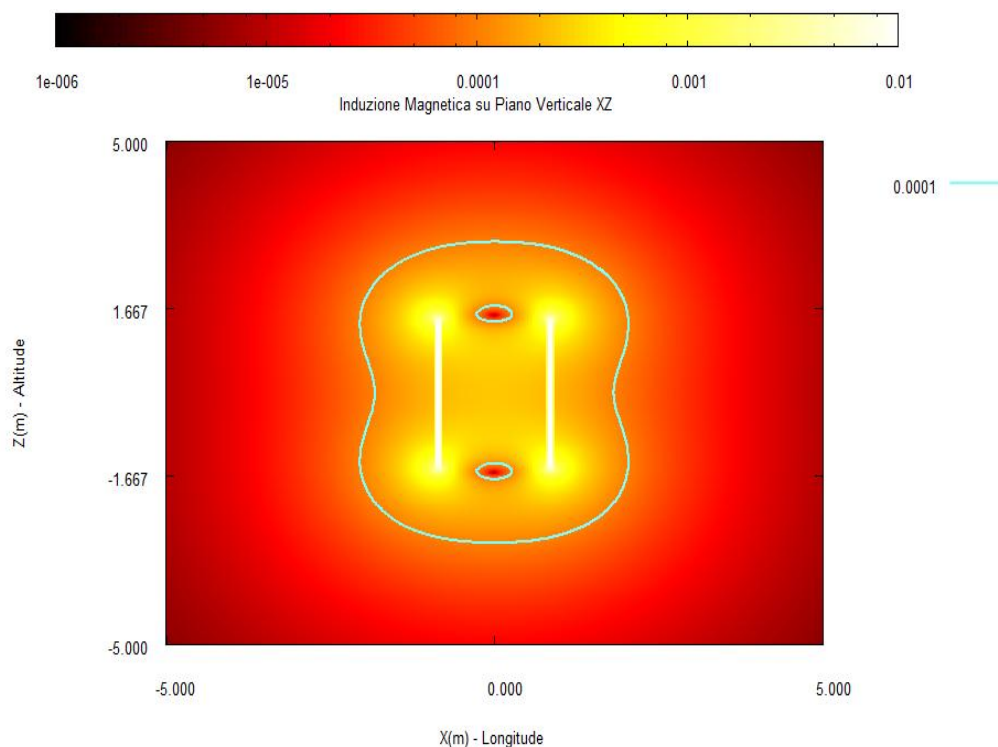
Vediamo ora la parte superiore della finestra demandata al dimensionamento del singolo trasformatore appartenente al gruppo.



In questa finestra è possibile vedere come si possa impostare anche il dato relativo allo squilibrio delle correnti. Questo può esserci utile per mostrare i risultati della nostra simulazione di esempio iniziando con uno solo degli avvolgimenti attivi.

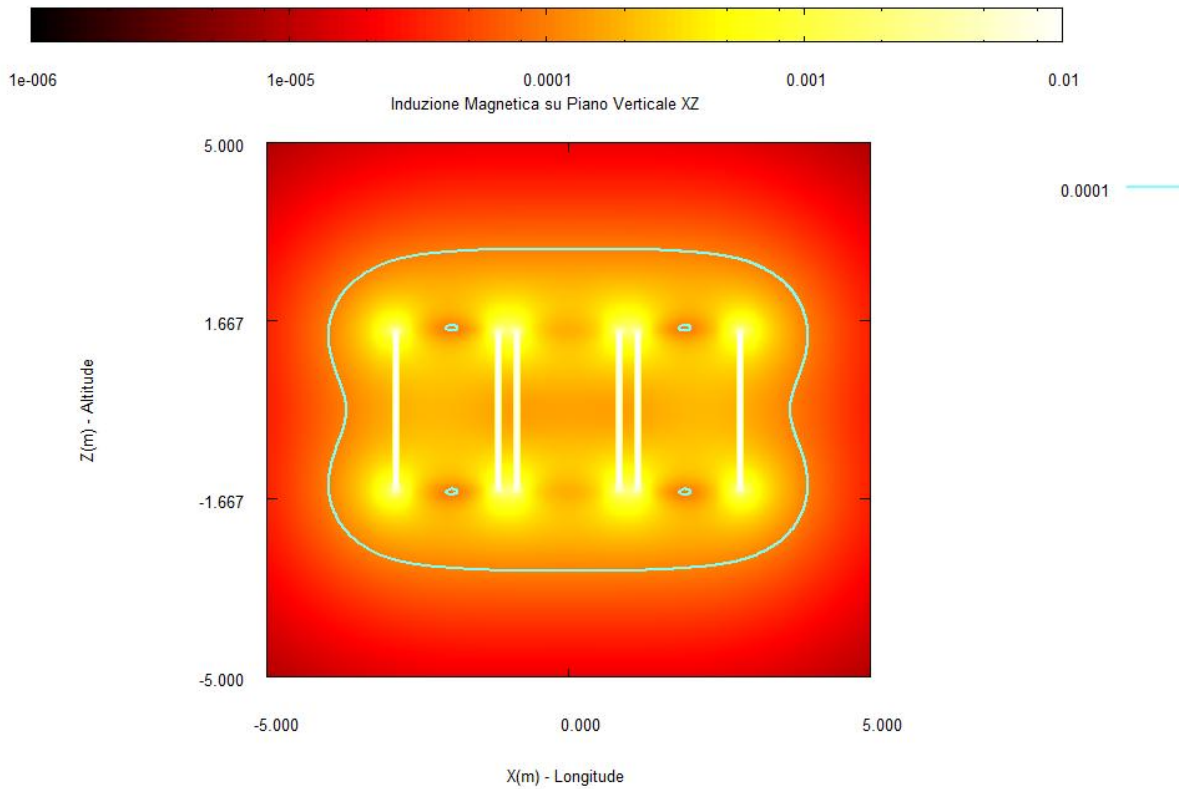
Infatti impostando a 100 il valore dello squilibrio sull'avvolgimento 2 (corrente nominale), e, allo stesso tempo, impostando lo squilibrio degli altri due avvolgimenti a zero, abbiamo una situazione in cui è presente una corrente circolante solo sull'avvolgimento centrale, ossia una sorta di trasformatore monofase.

Questa impostazione verrà utilizzata, come vedremo, nel prosieguo di questa presentazione nel momento in cui si effettuerà il confronto del codice di "SELF3D TRAF0" con un codice FEM. Effettuando una simulazione su un piano verticale passante per il punto 0,0,0 (ossia per il centro del trasformatore "monofase") e diretto lungo l'asse X abbiamo:

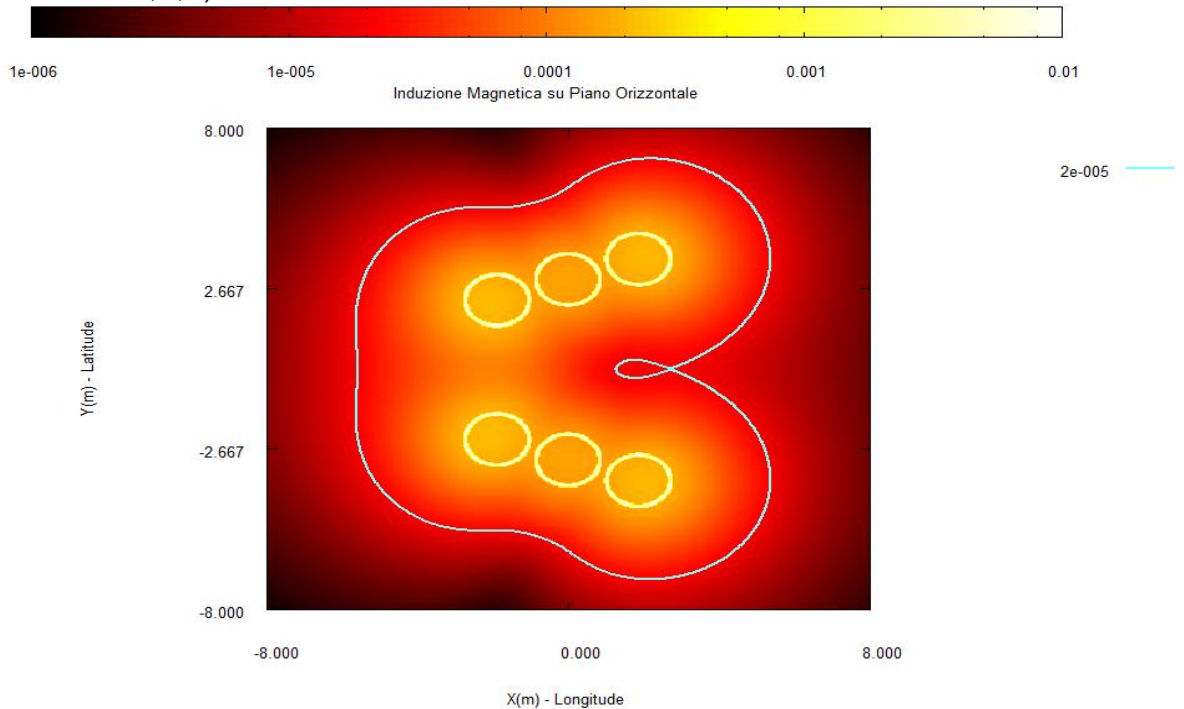


Attiviamo ora tutti e tre gli avvolgimenti del nostro trasformatore, impostando tutti i tre valori dello squilibrio a 100. Rifacciamo la simulazione sullo stesso piano di cui sopra, ottenendo:

Misura e Consulenza Impatto Elettromagnetico



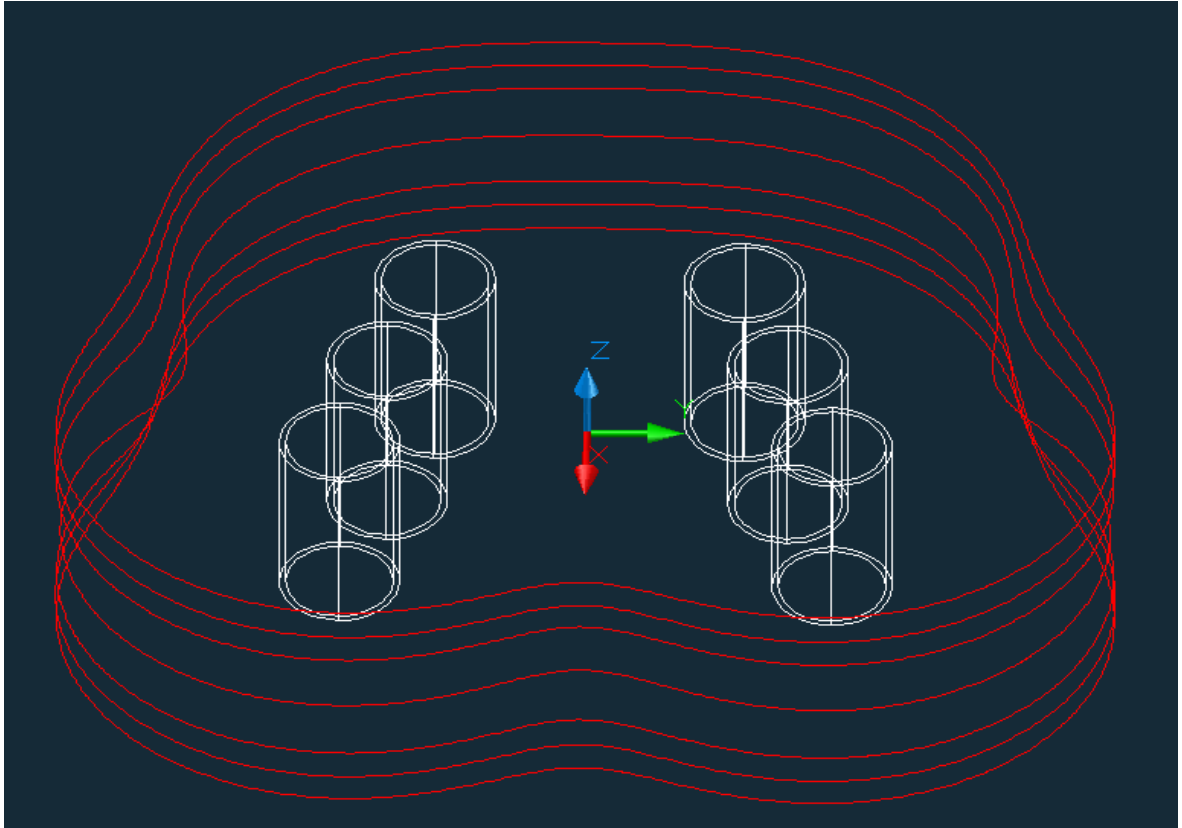
Riprendendo, invece, il precedente settaggio di due trasformatori orientati di 10° l'uno, e di -10° l'altro, ed effettuando questa volta una simulazione su un piano orizzontale (passante in 0,0,0) otteniamo:

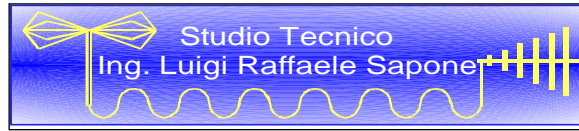


Come detto, per tutte le simulazioni di SELF3D, il risultato può essere esportato in ambiente CAD / GIS / WEBGIS.

Misura e Consulenza Impatto Elettromagnetico

Scegliendo di rappresentare il risultato in ambiente CAD, di seguito vediamo alcune isolinee a 10 micro Tesla sovrapposte ai disegni stilizzati dei trasformatori che hanno generato le isolinee stesse:





Misura e Consulenza Impatto Elettromagnetico

L'inserimento dei conduttori permessa dall'opzione SELF3D TRAF0 ed esempio di calcolo complessivo

SELF3D permette varie possibilità di inserimento dei conduttori da simulare. Al seguente [link](#) potete visionare quelle permesse di default da SELF3D.

Esse essenzialmente si possono racchiudere in due macrogruppi:

- Inserimento dei conduttori tramite finestre grafiche dedicate
- Inserimento dei conduttori tramite il loro disegno in CAD e successiva esportazione in SELF3D, tramite lo script self3d-CAD.

E' evidente che l'utilizzo di un ambiente CAD, sebbene non necessario (come detto si può anche effettuare l'inserimento tramite finestre grafiche), fornisce all'utilizzatore le numerosissime caratteristiche di creazione e modifica di entità che solo un vero ambiente CAD può offrire.

Allo stesso tempo, è da evidenziarsi che, in alcuni casi, la creazione di entità in ambiente CAD può essere più scomoda e dispendiosa rispetto al semplice inserimento delle coordinate iniziali e finali di una linea in una finestra grafica.

Quanto appena detto non è vero nel caso di linea rettilinea (non c'è molta differenza tra il sapere le coordinate di un segmento ed effettuare il suo disegno in CAD), ma è sicuramente vero nel caso di una linea aerea a catenaria, o di un cavo elicordato (sicuramente non agevoli da disegnare).

A tal fine è da evidenziare che SELF3D, permette una interazione bidirezionale con l'ambiente CAD; ossia, è sia possibile esportare disegni CAD in SELF3D, sia esportare in CAD dei conduttori dimensionati tramite finestre grafiche di SELF3D.

In questo modo è possibile, nel caso se ne presenti la necessità, utilizzare una modalità di inserimento mista "CAD"---"Finestre Grafiche", riunendo quindi la definizione automatica di geometrie complesse (come catenarie o cavi elicordati) permessa dalle finestre grafiche di inserimento, e la possibilità di modificare entità permesse dall'ambiente CAD (come, ad esempio, raccordare vari tratti di linee, oppure inserire tratti di conduttori disposti secondo una curva con un certo raggio di curvatura, ecc.).

Comunque, quanto appena detto sull'utilizzo misto CAD/Finestre è da intendersi solo per geometrie che abbiano una complessità di una certa rilevanza. Nelle normali condizioni di interesse, l'inserimento dei conduttori tramite finestre grafiche è più che sufficiente.

Detto questo, e ritornando alle finestre grafiche di inserimento presenti nel [link](#) testè indicato, è da notare che in questo modo è possibile inserire conduttori rettilinei disposti in qualsiasi modo nello spazio.

Nonostante quanto appena detto, insieme all'opzione SELF3D TRAF0, si è voluto introdurre altre modalità di inserimento di conduttori. Queste altre modalità non sostituiscono quelle già esistenti ma si aggiungono ad esse. Quindi è possibile utilizzare l'esistente modalità di inserimento di una campata aerea, ad esempio, per dimensionare una linea aerea MT in ingresso da una cabina di trasformazione, e, allo stesso tempo, utilizzare le nuove modalità di inserimento che accompagnano l'opzione SELF3D TRAF0.

La scelta di introdurre altre modalità di inserimento nell'opzione SELF3D TRAF0, rispetto a quelle già esistenti, è stata dettata da alcune osservazioni:

Misura e Consulenza Impatto Elettromagnetico

- le modalità di inserimento esistenti di default in SELF3D sono più appropriate per inserimenti di tipo geografico (ad esempio, viene chiesto l'angolo che il piano formato dagli sbracci di un traliccio forma con il Nord).
- i conduttori che sono presenti nelle adiacenze dei trasformatori sono generalmente orientati o in senso verticale, o disposti su un piano orizzontale (permettendo comunque la possibilità che i conduttori siano disposti secondo un qualsiasi angolo su detto piano orizzontale). Questo permette di semplificare la modalità di inserimento dei parametri
- è stata ritenuta importante la possibilità di definire direttamente in SELF3D, e quindi simulare, conduttori avvolti ad elica. E' stato detto "definire direttamente" perchè, pur senza l'installazione dell'opzione SELF3D TRAF0, era già possibile simulare dei conduttori elicordati, ma per questo bisognava utilizzare lo script self3d-CAD, con conseguente necessità di ricorrere ad un ambiente CAD. Nell'opzione SELF3D TRAF0, invece, è stata aggiunta la possibilità di definire i conduttori elicordati direttamente in SELF3D, quindi senza la necessità di ricorrere ad un ambiente CAD.

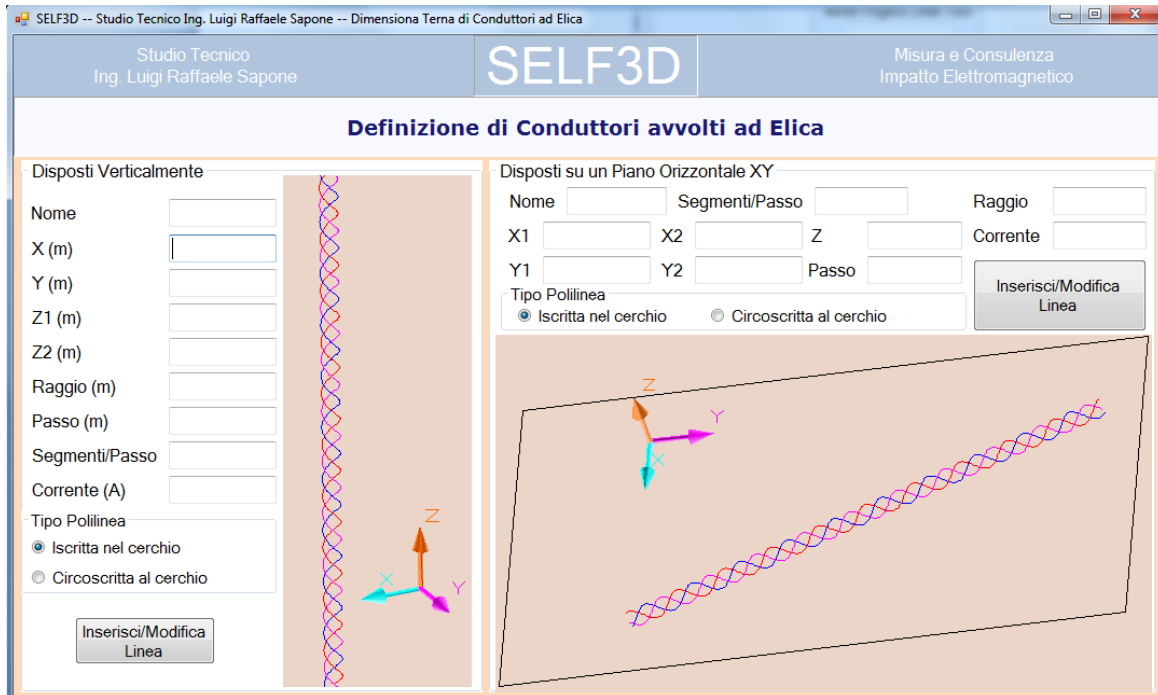
Selezionando il pulsante "Conduttori" relativo al riquadro dell'opzione SELF3D TRAF0, viene aperta la seguente finestra:



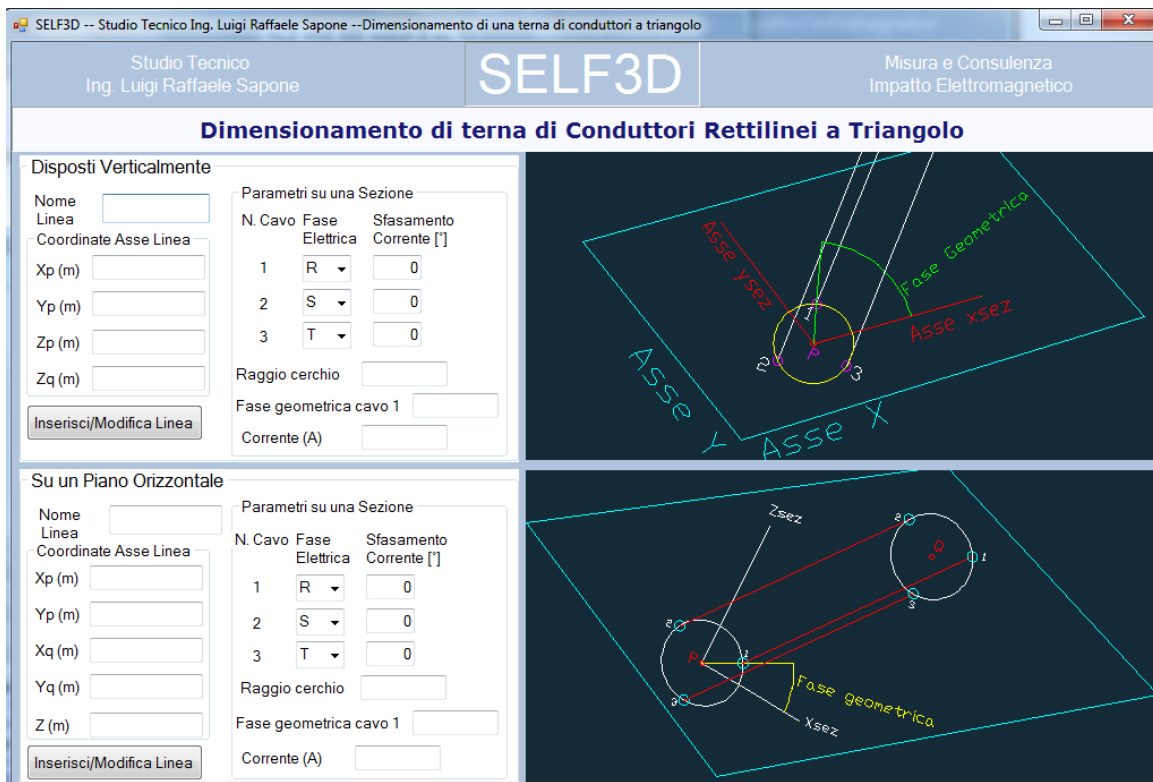
La gestione degli inserimenti è praticamente uguale a quella relativa agli inserimenti delle campate e delle tratte rettilinee utilizzate di default in SELF3D.

Come può evincersi e come detto, con l'opzione SELF3D TRAF0, è possibile dimensionarsi direttamente dei cavi elicordati. Infatti selezionando il pulsante "elica" si ottiene l'apertura della seguente finestra relativa all'elica:

Misura e Consulenza Impatto Elettromagnetico



E' inoltre possibile l'immediata definizione di linee a triangolo, tramite la finestra associata:



Allo stesso modo è possibile dimensionare terne piane e singole linee arbitrariamente orientate nello spazio.

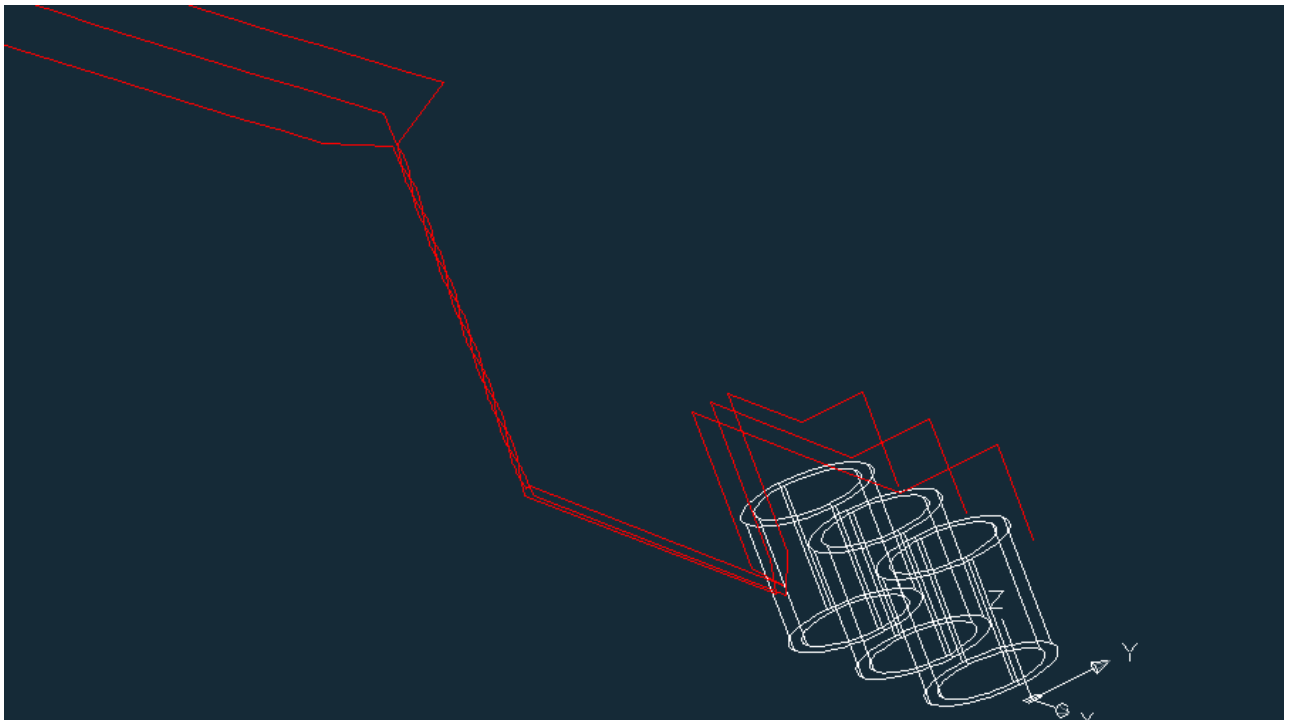
E' altresì possibile introdurre polilinee (con il pulsante poly) al fine di permettere la simulazione di geometrie di qualsiasi conformazione geometrica.

Misura e Consulenza Impatto Elettromagnetico

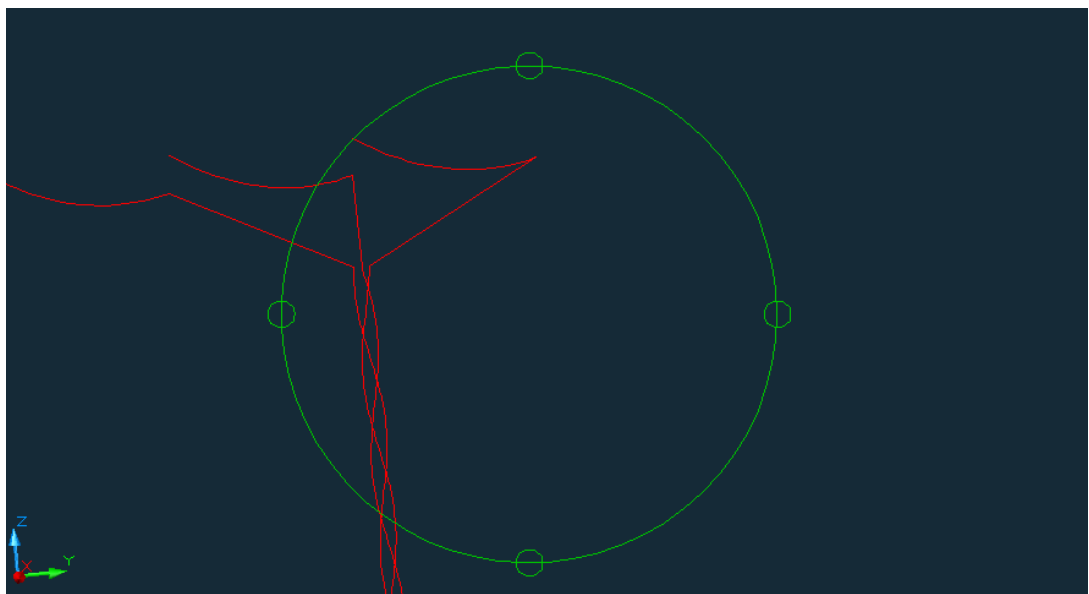
Vediamo un esempio pratico. Immaginiamo di essere in presenza delle seguenti linee....

- 1 linea aerea a catenaria
- 1 discesa dalla linea aerea utilizzando un cavo elicordato
- un tratto interrato a triangolo
- una serie di tratti a terna piana sino al trasformatore
- un trasformatore

Chiaramente questo è solo un esempio di coesistenza di varie entità, perchè il numero di linee e trasformatori che è possibile inserire in un Progetto è, come già detto, illimitato. Vediamo la figura



mentre, di seguito è meglio visualizzato il passaggio dalla catenaria aerea alla linea elicordata:



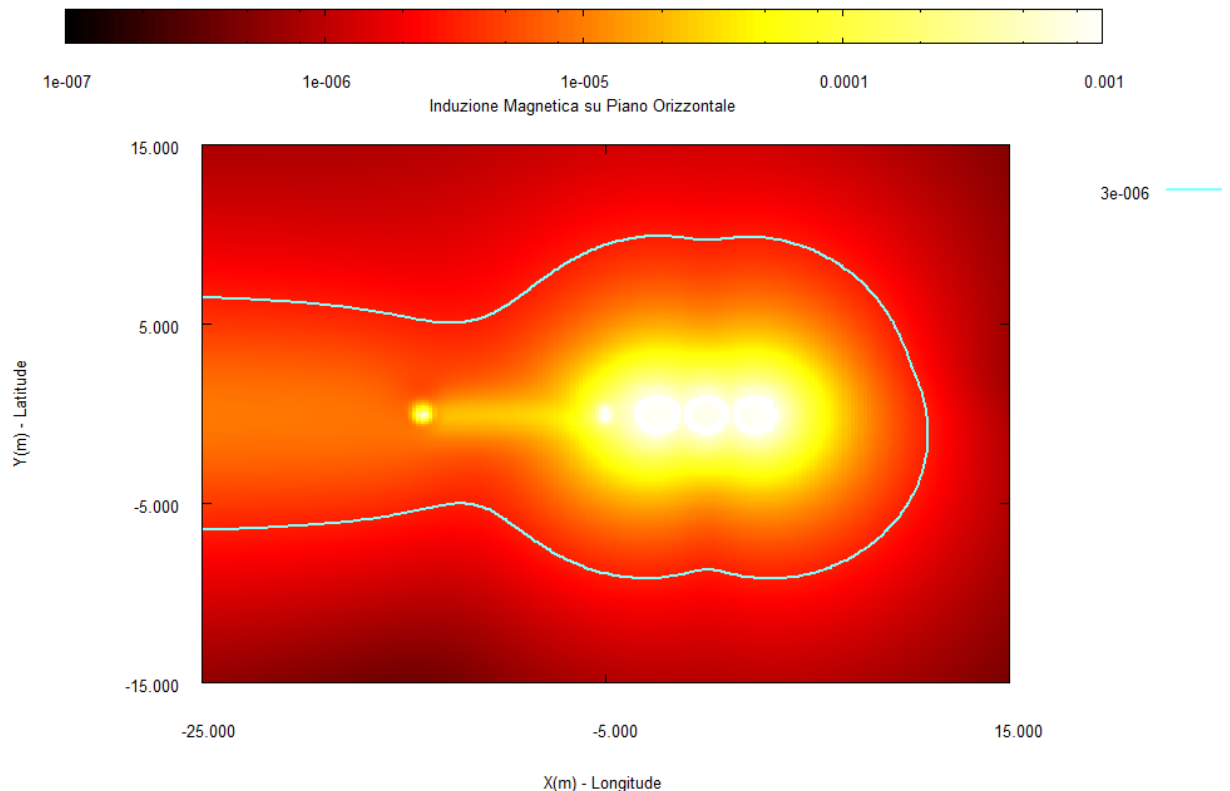
Misura e Consulenza Impatto Elettromagnetico

Tutte le entità del progetto, indipendentemente che si tratti

- di trasformatori in qualsiasi numero, disposizione e caratteristiche elettriche
- di linee a terna o triangolo inserite con le nuove finestre grafiche che accompagnano l'opzione SELF3D TRAF0
- di linee a catenaria (quindi elettrodotti aerei) dimensionate con le finestre grafiche di inserimento presenti di default in SELF3D
- di linee precedentemente disegnate in CAD e poi esportate in SELF3D con lo script self3d-FAS
- di polilinee inserite manualmente o automaticamente con lo script associato

andranno a costituire nel loro insieme un PROGETTO SELF3D, fattibile quindi di essere simulato con le varie possibilità di calcolo che lo stesso SELF3D dispone.

Effettuando una simulazione orizzontale passante per il centro del trasformatore abbiamo:

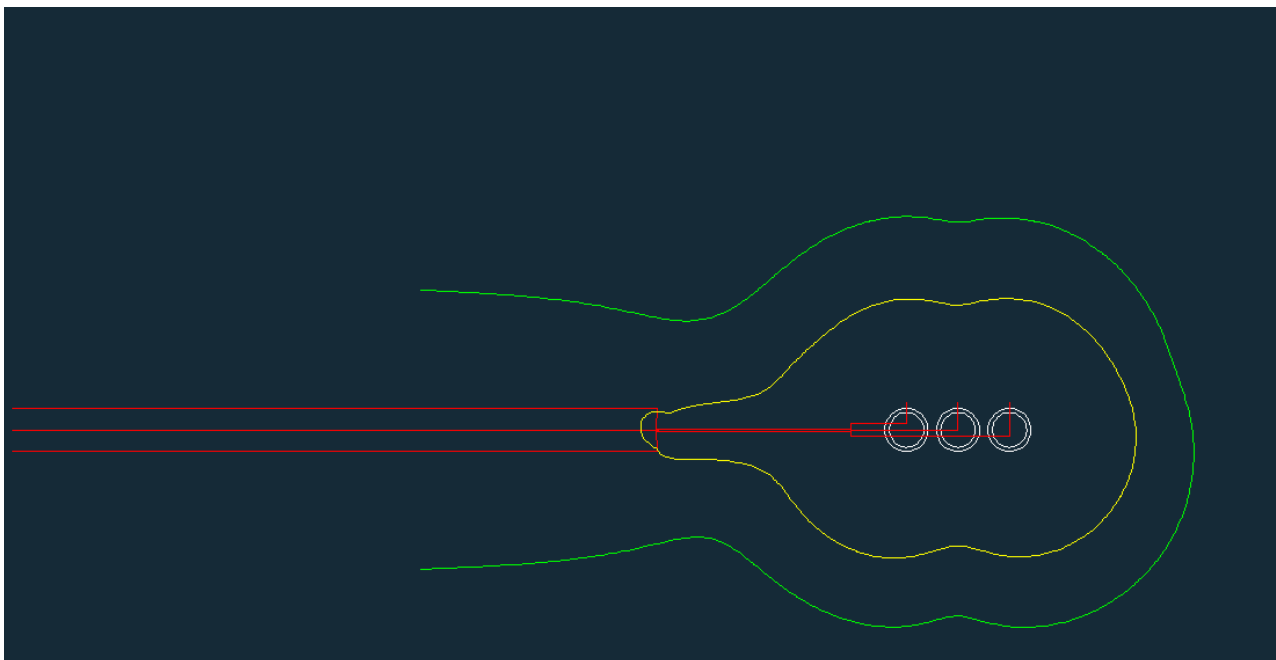


Chiaramente, anche in questo caso, i risultati della simulazione possono essere esportati in ambienti CAD / GIS / WEBGIS e, quindi, sovrapposti sia alle entità (conduttori, trasformatori) che hanno generato la data induzione magnetica, sia a grafici 2D o 3D rappresentanti edifici o piani che delimitano, ad esempio, l'area di occupazione di un recettore sensibile.

Di seguito vediamo la simulazione su un piano orizzontale, qui sopra rappresentata con una map color, esportata e visualizzata in ambiente CAD insieme ai conduttori ed alla rappresentazione stilizzata del trasformatore. L'isolina verde è a 3 micro Tesla, quella gialla a 10 micro Tesla.

Misura e Consulenza Impatto Elettromagnetico

Prima in una vista dall'alto:



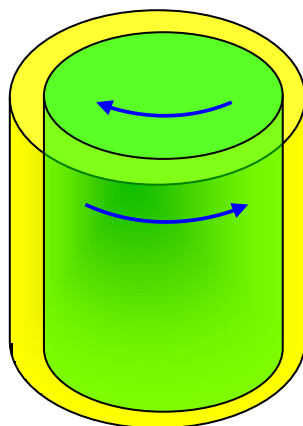
quindi, ed infine, in una rappresentazione 3D:



Benchè la precedente immagine rappresenti una simulazione orizzontale, è possibile fare qualunque tipo di simulazione permessa da SELF3D (piani verticali, inclinati, isovolumi, piano orientato in qualsiasi modo esprimendo le sue coordinate in modalità relativa ad un punto georeferenziato, simulazioni su una retta ecc.).

Il codice di calcolo utilizzato in SELF3D TRAF0

SELF3D TRAF0 utilizza un modello del trasformatore come un insieme di cilindri percorsi da corrente. Ogni fase del trasformatore viene modellizzata come una coppia di cilindri, uno interno (di raggio inferiore) che rappresenta generalmente l'avvolgimento BT, ed uno esterno (di raggio superiore) che rappresenta generalmente l'avvolgimento MT.



La corrente che scorre nei due cilindri è fissata, in modulo, uguale alla forza magnetomotrice dei due avvolgimenti (a sua volta uguale al prodotto della corrente di fase per il numero di spire), considerata uguale. Questo è vero con la condizione di trascurare la corrente magnetizzante, situazione questa sicuramente applicabile ai fini del calcolo del flusso disperso del trasformatore.

Il verso della corrente nei due cilindri è invece opposto, come è in realtà causa il flusso generato dalla forza controelettromotrice indotta nel lato BT, a seguito del concatenamento con le stesse spire BT della variazione di flusso generato dalla corrente MT.

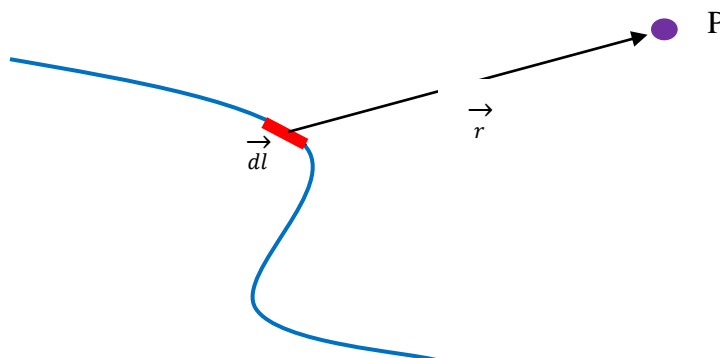
In queste condizioni viene quindi effettuato il calcolo dell'induzione magnetica generata dalla coppia di cilindri MT e BT.

Questo viene poi ripetuto per gli altri due avvolgimenti, tenendo conto che i fasori della corrente nei tre avvolgimenti sono sfasati.

Infine viene composto il valore totale dell'induzione magnetica attraverso la composizione delle Bx,By,Bz (intese come numeri complessi, ossia fasori, quindi con parte reale e immaginaria) delle tre fasi del trasformatore. In ultima analisi, quello da cui si parte, ossia il cuore del codice, è il calcolo dell'induzione magnetica generata da un cilindro.

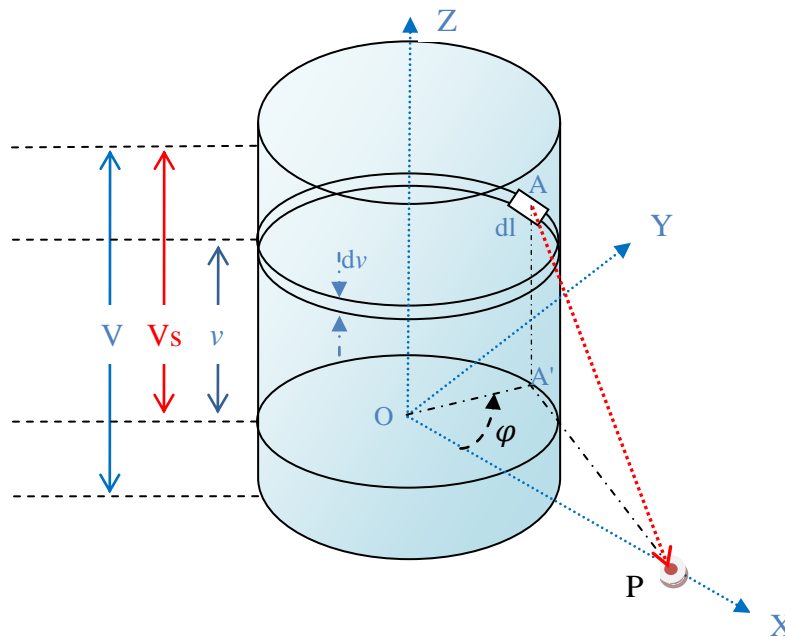
Come noto, il valore dell'induzione magnetica in un punto P generato da un tratto di filo, di lunghezza infinitesima dl, percorso dalla corrente I, è dato dalla 1° formula di Laplace:

$$d\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} * \frac{I}{r^3} * d\vec{l} \times \vec{r}$$



Misura e Consulenza Impatto Elettromagnetico

Consideriamo ora un cilindro attraversato da una corrente uguale alla forza magnetomotrice (mmf) dell'avvolgimento. Immaginiamo questo cilindro, di altezza V , diviso in cilindri di altezza infinitesima dv . Consideriamo, su questo cilindro infinitesimo, l'area bianca uguale a $dl \cdot dv$. Quest'area viene attraversata da una corrente uguale a

$$dI = dv * \frac{mmf}{V}$$


Nell'immagine precedente vediamo come si sia definito un sistema di riferimento XYZ avente il piano XY passante per il punto P in cui si vuol calcolare l'induzione magnetica, con l'origine O posizionata sull'asse (chiaramente verticale) del cilindro, e l'asse Z diretto come lo stesso asse del cilindro.

Questo perchè siamo interessati al calcolo delle componenti X,Y e Z dell'induzione.

L'induzione magnetica generata nel punto P, dall'area $dl \cdot dv$, può ricavarsi con la prima legge di Laplace di cui sopra.

Conseguentemente, per calcolare l'induzione complessiva generata dall'intero cilindro, è sufficiente integrare il contributo, generato dall'area $dl \cdot dv$, lungo tutta la circonferenza orizzontale sulla quale è presente dl , e lungo tutta l'altezza V del cilindro.

Partendo dal contributo generato dall'area $dl \cdot dv$, abbiamo:

$$d\vec{B}(\vec{r}) = \frac{mmf}{V} * dv * \frac{\mu_0}{4\pi} * \frac{I}{r^3} * (\vec{dl} \times \vec{r})$$

$$d\vec{B}(\vec{r}) = \frac{mmf}{V} * dv * \frac{\mu_0}{4\pi} * \frac{I}{AP^3} * \vec{dl} \times (\vec{AA'} + \vec{AO} + \vec{OP})$$

Volendoci riferire al sistema di coordinate cartesiane XYZ prima definito, effettueremo delle trasformazioni che permettono di esprimere i prodotti vettoriali di cui sopra in funzione dei versori degli assi X,Y e Z, come di seguito esemplificato:

Misura e Consulenza Impatto Elettromagnetico

$$\vec{dl} \times \vec{AA'} = R * d\varphi * v * (-\cos\varphi * \vec{u}_x - \sin\varphi * \vec{u}_y)$$

$$\vec{dl} \times \vec{A'O} = R^2 * d\varphi * \vec{u}_z$$

$$\vec{dl} \times \vec{OP} = -R * d\varphi * X * \cos\varphi * \vec{u}_z$$

e inoltre sussiste la relazione:

$$AP^2 = v^2 + R^2 + X^2 - 2RX\cos\varphi$$

dove con X si è indicata la distanza del punto P dall'asse del cilindro, e con \vec{u}_x , \vec{u}_y , \vec{u}_z si sono indicati i versori degli assi X, Y e Z. In questo modo, effettuando una integrazione su tutto il cilindro, si ottiene che l'induzione magnetica in un punto P può esprimersi in funzione delle tre coordinate cartesiane Bx, By, Bz.

Ad esempio, la componente Bz può esprimersi attraverso il seguente integrale doppio:

$$B_z = \frac{\mu_0}{4\pi} * I * R * \int_{-(V-V_s)}^{V_s} \int_0^{2\pi} \frac{(R - X\cos\varphi)dv d\varphi}{(v^2 + R^2 + X^2 - 2RX\cos\varphi)^{\frac{3}{2}}}$$

La componente By, chiaramente, è nulla essendo il sistema a geometria cilindrica.

Lo sviluppo di questi integrali doppi ha portato ad una soluzione analitica per tutte e tre le componenti cartesiane X, Y e Z dell'induzione magnetica (due delle quali, X e Z, diverse da zero), soluzione che si basa sul calcolo di integrali ellittici completi del primo e del secondo tipo.

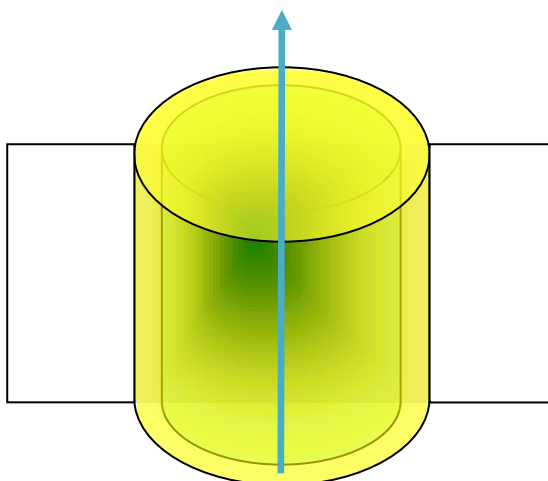
In SELF3D TRAF0 gli integrali ellittici necessari alla soluzione analitica vengono risolti attraverso un codice di calcolo di tipo ricorsivo, giungendo, infine, al calcolo dell'induzione magnetica in un punto generata da un insieme di avvolgimenti e, quindi, da uno o più trasformatori che nel loro insieme rappresentano il gruppo trasformatori da simulare in SELF3D.

Il confronto del risultato di SELF3D TRAF0 con un codice agli elementi finiti (FEMM)

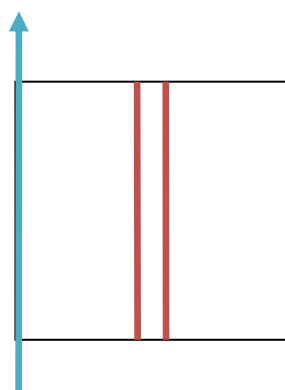
Per confrontare il codice utilizzato in SELF3D TRAF0 con un altro codice, si è scelto il software FEMM (FEM Magnetics). Questo è un software, basato sul calcolo agli elementi finiti, che permette di simulare delle geometrie che presentino una configurazione di tipo planare o una simmetria di tipo assiale (axialsimmetrico, ossia con un asse di simmetria).

La configurazione di doppio cilindro utilizzata da SELF3D TRAF0 nel modello di una fase del trasformatore risponde ai requisiti di "axialsimmetricità" e, pertanto, viene qui effettuato un confronto tra i risultati di FEMM e quelli di SELF3D utilizzando una coppia di cilindri concentrici.

Consideriamo quindi i due cilindri concentrici già visti precedentemente, e immaginiamo che questo doppio cilindro sia "tagliato" da un piano verticale passante per l'asse di simmetria.

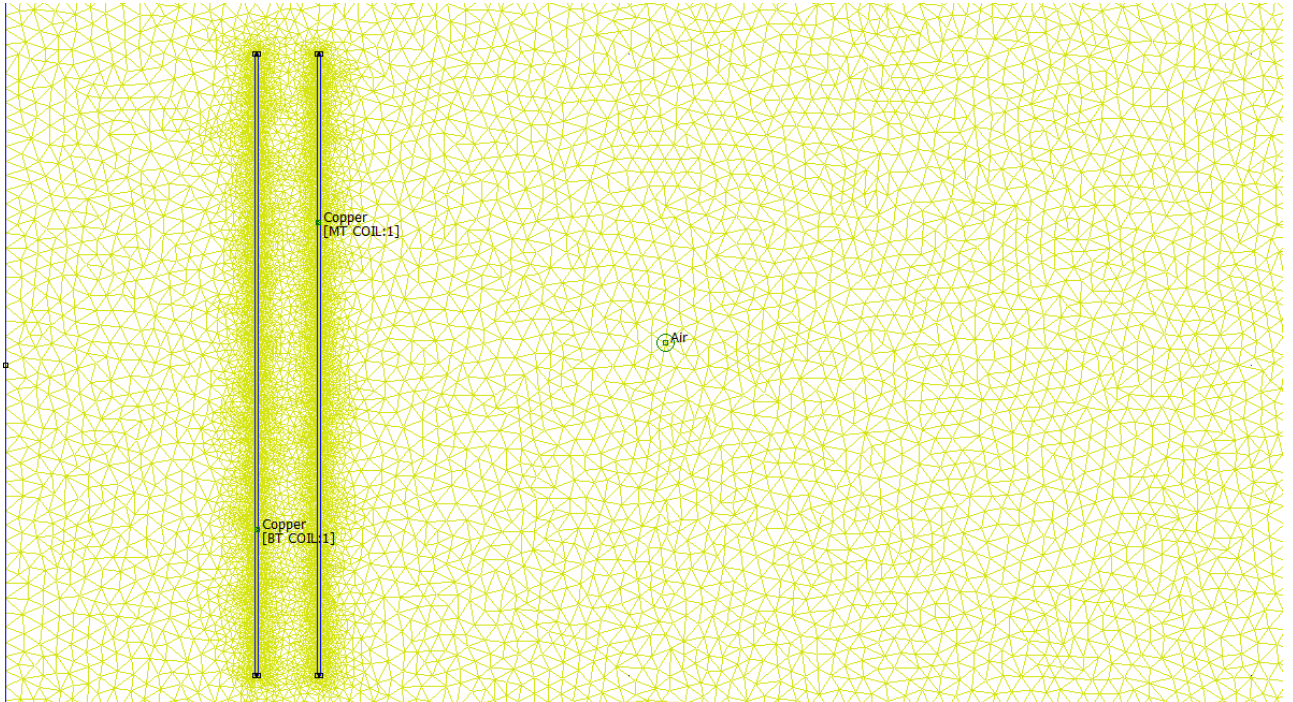


Considerato uno solo dei semipiani (ad esempio quello destro), esso viene "inciso" dai due cilindri che lasciano su di esso due aree rettangolari uguali alle sezioni di questi due fogli cilindrici, come le aree rosse di seguito visualizzate.

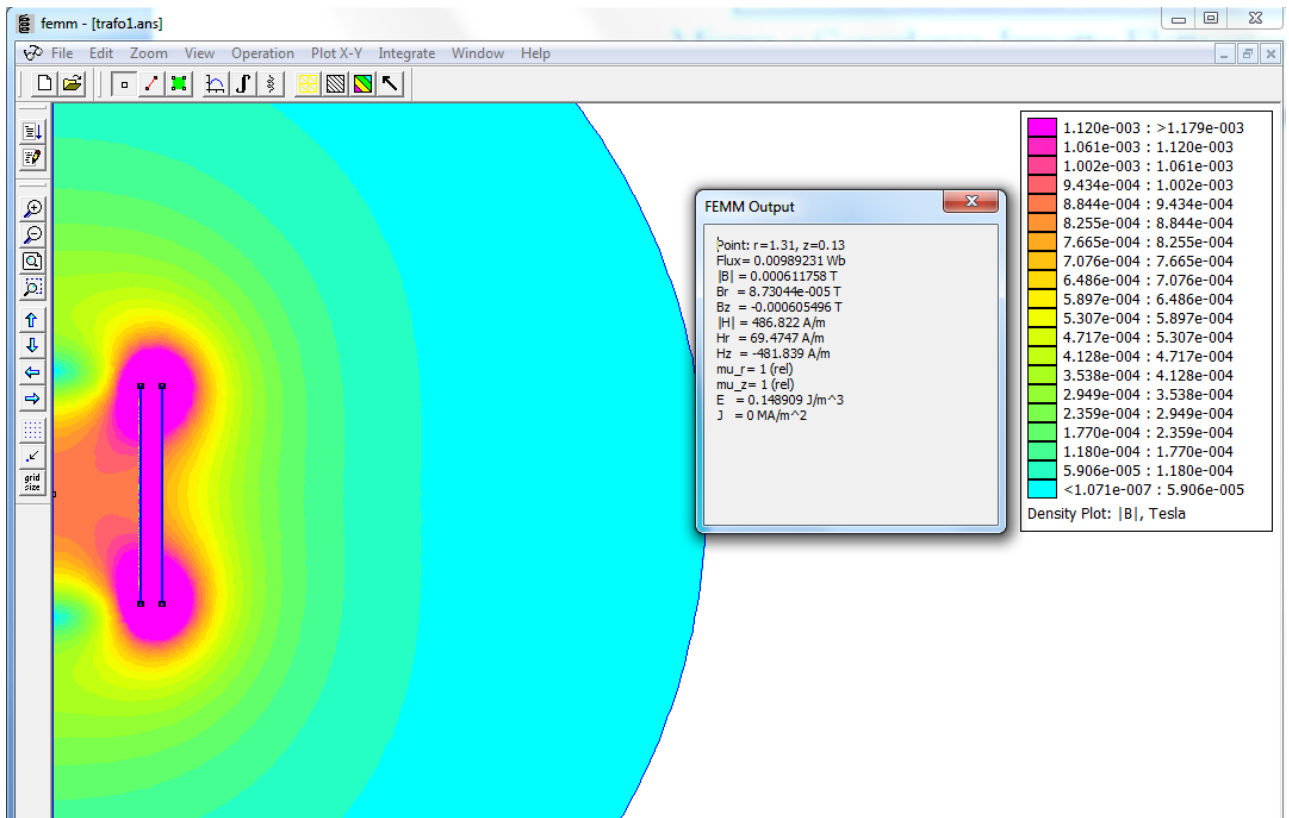


Misura e Consulenza Impatto Elettromagnetico

Il nostro modello FEM è costruito proprio inserendo le aree che rappresentano le sezioni di questi "fogli cilindrici" su un piano verticale passante per l'asse di simmetria, come di seguito rappresentato in una vista della mesh FEMM:

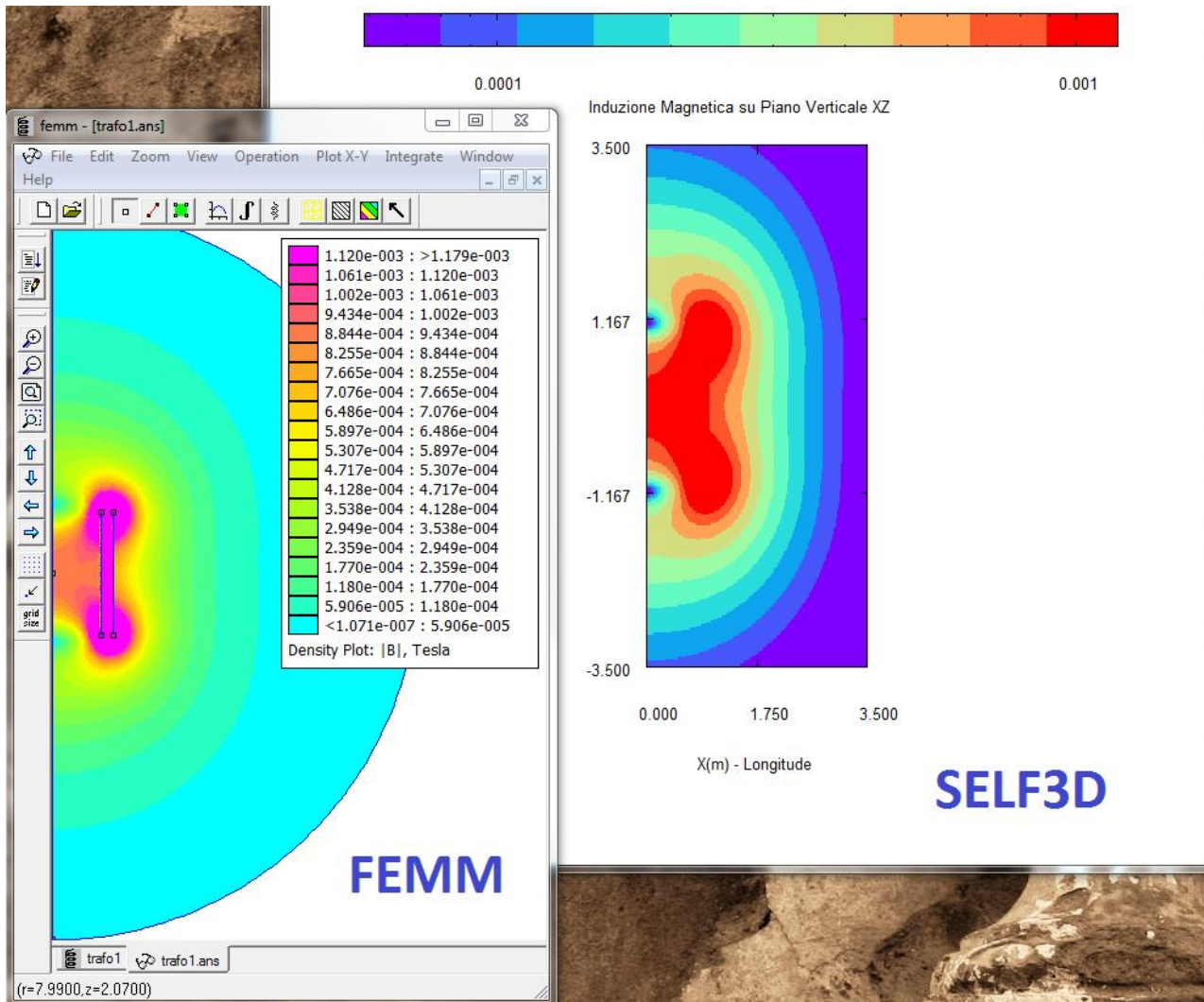


Lanciando il solutore FEMM otteniamo il seguente risultato:



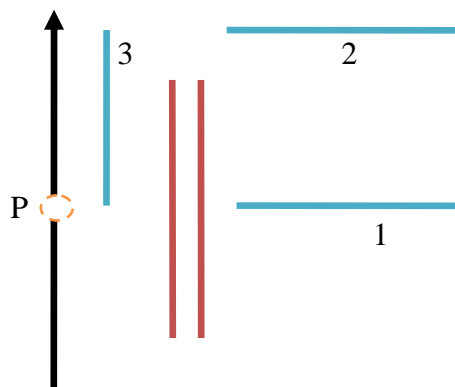
Misura e Consulenza Impatto Elettromagnetico

Per effettuare il confronto iniziamo da una analisi qualitativa tra l'output di FEMM e quello di SELF3D come nella figura seguente:



e proseguiamo con una analisi quantitativa.

A tal scopo valutiamo l'induzione magnetica in alcuni punti posizionati all'inizio, in due punti intermedi, e nel punto finale di alcuni segmenti, come quelli azzurri mostrati di seguito (in rosso sono indicati gli avvolgimenti di una fase su una sezione, il punto P rappresenta il centro del trafo):



Misura e Consulenza Impatto Elettromagnetico

Segmento 1				
Distanza dall'asse Trafo	Dislivello rispetto al punto P	B (μ T) FEMM	B (μ T) SELF3D	Errore relativo $(B_{FEMM} - B_{SELF3D})$ B_{SELF3D}
1.2m	0	670.816	672.444	-0,0024
1.7m	0	376.994	377.548	-0,0015
2.2m	0	201.208	201.549	-0,0017
2.7m	0	114.176	114.199	-0,0002

Segmento 2				
Distanza dall'asse Trafo	Dislivello rispetto al punto P	B (μ T) FEMM	B (μ T) SELF3D	Errore relativo $(B_{FEMM} - B_{SELF3D})$ B_{SELF3D}
1.2m	1.4m	769.487	770.455	-0,0013
1.7m	1.4m	361.742	361.530	0,0006
2.2m	1.4m	185.637	185.853	-0,0012
2.7m	1.4m	106.626	106.697	-0,0007

Segmento 3				
Distanza dall'asse Trafo	Dislivello rispetto al punto P	B (μ T) FEMM	B (μ T) SELF3D	Errore relativo $(B_{FEMM} - B_{SELF3D})$ B_{SELF3D}
0.3m	0	930.942	930.939	0,0000
0.3m	0.7m	766.697	765.286	0,0018
0.3m	1.4m	401.225	401.361	-0,0003
0.3m	2.1m	329.921	329.987	-0,0002

come vediamo, i valori simulati da FEMM e da SELF3D sono praticamente identici. L'errore massimo riscontrato in queste simulazioni è stato del 2,4 per mille, ossia dello 0,24 per cento.

D'altra parte, volendo entrare in merito ad errori di entità così piccola, bisognerebbe considerare anche altri parametri della simulazione FEMM (come, ad esempio, la dimensione della mesh).

Grazie del tempo dedicatomi

Luigi Raffaele Sapone