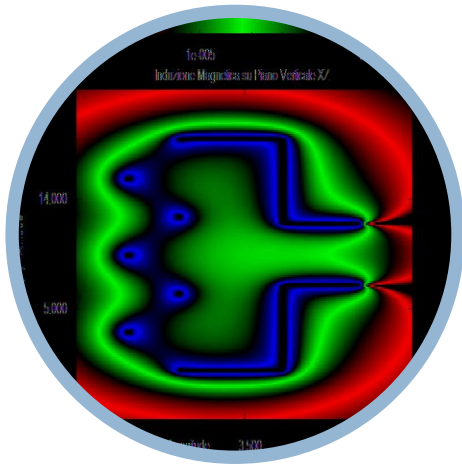




SELF3D

Validazione

Procedura indicata da
ARPA Friuli Venezia Giulia

STUDIO TECNICO ING. SAPONE

[Studio Tecnico Ing. Sapone - Software -
SELF3D \(stilrs.altervista.org\)](mailto:studioingsapone@live.com)

studioingsapone@live.com

Algoritmo di calcolo utilizzato in SELF3D

SELF3D è un software che permette la simulazione dell'induzione magnetica di conduttori presenti sia in linee elettriche aeree (catenaria), che interrate, che di forma arbitraria attraverso la definizione della polilinea che identifica o approssima (con la precisione desiderata) i conduttori stessi.

Nel caso di linee aeree è sufficiente inserire i parametri dei tralicci ed il parametro di posa, dato che il software si occupa autonomamente della modellizzazione spaziale della curva di catenaria. SELF3D non effettua una modellizzazione approssimata della catenaria come una parabola, ma effettua la modellizzazione corretta in termini di coseno iperbolico.

Nel caso di linee interrate è sufficiente inserire i parametri che caratterizzano i punti di giunzione di due tratte consecutive.

Nel caso di linee di forma arbitraria, come nel caso di stazione elettrica, bisogna inserire (oltre ai parametri elettrici) le coordinate dei vertici delle polilinee che rappresentano i conduttori. Questo può essere fatto sia "manualmente", fornendo un file di testo contenente l'elenco dei vertici delle polilinee, sia "automaticamente", disegnando le polilinee in ambiente CAD e importandone in SELF3D (grazie ad una utility fornita in bundle) i vertici.

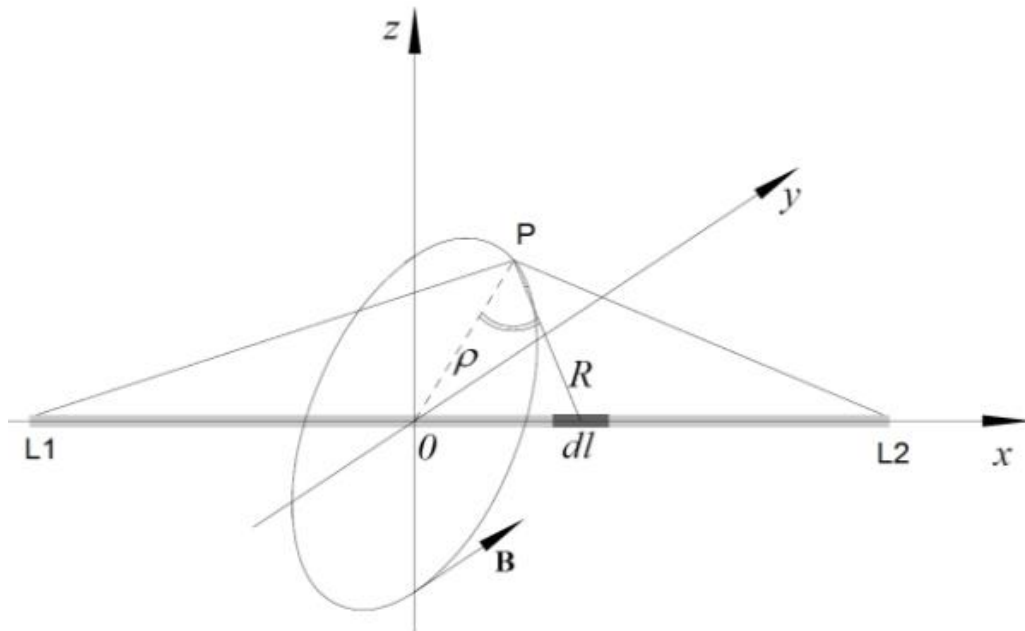
La particolarità del codice di calcolo tridimensionale permette di affrontare anche situazioni complesse come incroci di elettrodotti, campate successive con angolo di deviazione elevato (e quindi con sussistenza, in una data area, dell'effetto congiunto delle due campate consecutive), contemporanea presenza di linee aeree ed interrate comunque orientate, e così via.

Nell'effettuare la simulazione, SELF3D considera, come detto, un qualsiasi linea elettrica come composta da un insieme di segmenti contigui (a meno che, chiaramente, la linea sia composta da un unico segmento).

Il valore dell'induzione magnetica generato da una qualsiasi distribuzione di conduttori si ottiene sommando vettorialmente l'induzione magnetica generata da tutti i segmenti nei quali viene scomposto l'insieme dei conduttori stessi, considerando l'orientazione spaziale del segmento, l'ampiezza e la fase delle correnti circolanti.

Soffermiamoci quindi sul singolo segmento.

L'induzione magnetica $d\vec{B}$ generata da un tratto di filo infinitesimo $d\vec{l}$, attraversato dalla corrente I (fasore), può essere espressa attraverso l'applicazione della legge di Biot-Savart. Vediamo la figura seguente.



Abbiamo un segmento lungo L (che si estende da $L1$ a $L2$ con $|L1| + |L2| = L$, rispetto ad un sistema di riferimento centrato su un punto "O" del conduttore).

Il valore dell'induzione magnetica generato dal tratto infinitesimo $d\vec{l}$ nel punto P è dato da:

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

dove:

$$\vec{R} = \vec{r} - \vec{r}'$$

è il vettore spostamento, uguale alla differenza tra il vettore r che individua il tratto infinitesimo di conduttore, e il vettore r' che individua il punto P di calcolo. Per calcolare l'induzione magnetica nel punto P , generata complessivamente dal tratto L di conduttore, è sufficiente calcolare l'integrale (esteso al segmento L) dell'induzione magnetica generata dal tratto infinitesimo $d\vec{l}$, ottenendo:

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

Questo porta ad una formulazione analitica delle componenti B_x , B_y e B_z dell'induzione magnetica, considerata nel sistema di coordinate cartesiane OXYZ precedentemente definito ed avente come origine un punto del conduttore.

La successiva operazione che effettua SELF3D è quella di modificare sia le coordinate del punto di calcolo, sia le componenti B_x , B_y , B_z dell'induzione magnetica B , in modo da riferirsi non più ad un sistema di riferimento solidale al tratto di conduttore, ma ad un sistema di riferimento "globale", ossia ad un sistema di riferimento nel quale verranno riferiti tutti i conduttori facenti parte del progetto.

Il passaggio da questo sistema di riferimento, solidale al tratto di conduttore, al sistema di riferimento "globale" avviene operando una rototraslazione 3D. Essa viene effettuata attraverso l'applicazione di un vettore di spostamento e di matrici 3x3 (dirette ed inverse) di rotazione tridimensionale.

In ultima analisi, si ottiene, nel sistema di riferimento globale, il valore di B_x , B_y e B_z generato dal tratto di conduttore. Questa operazione viene poi ripetuta per tutti i tratti (segmenti) delle polilinee nelle quali sono scomposti i conduttori del progetto, arrivando, in questo modo, al calcolo dell'induzione magnetica complessivamente generata da tutto il sistema di conduttori presenti, tenendo conto della loro orientazione spaziale, della corrente e della fase di quest'ultima.

Validazione di SELF3D

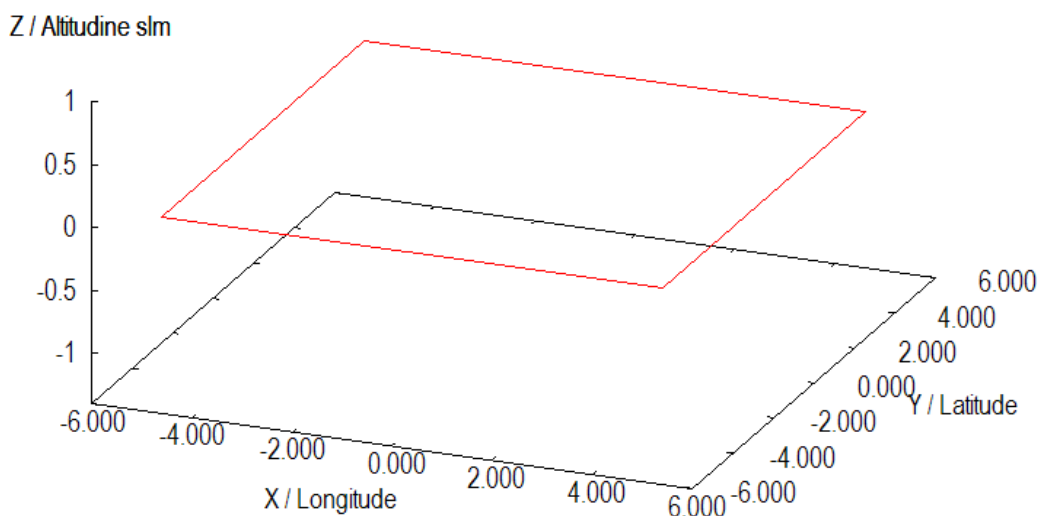
In questo lavoro si è provveduto a confrontare i risultati di SELF3D con varie situazioni teoriche al fine di avere una validazione riferendosi a configurazioni dai risultati conosciuti. A questo scopo si sono utilizzate sia alcune procedure, presenti in un lavoro realizzato da ARPA Friuli Venezia Giulia (autori: Comelli M., Benes M., Bampo A., Villalta R.), per la validazione teorica di modelli di calcolo dell'induzione magnetica generata da elettrodotti, sia delle situazioni definite dallo scrivente per tener conto delle caratteristiche uniche e peculiari di SELF3D.

SPIRA QUADRATA

Consideriamo il caso di una spira quadrata di lato $L=10$ metri, attraversata da una corrente $I=50A$. Questa spira viene disposta orizzontalmente (piano XY) e il centro di essa è posizionato nell'origine degli assi.

Dopo aver inserito la spira all'interno di SELF3D, ed aver lanciato il comando di visualizzazione tridimensionale dei conduttori inseriti, la spira ci appare come nella figura seguente:

Disposizione spaziale dei conduttori

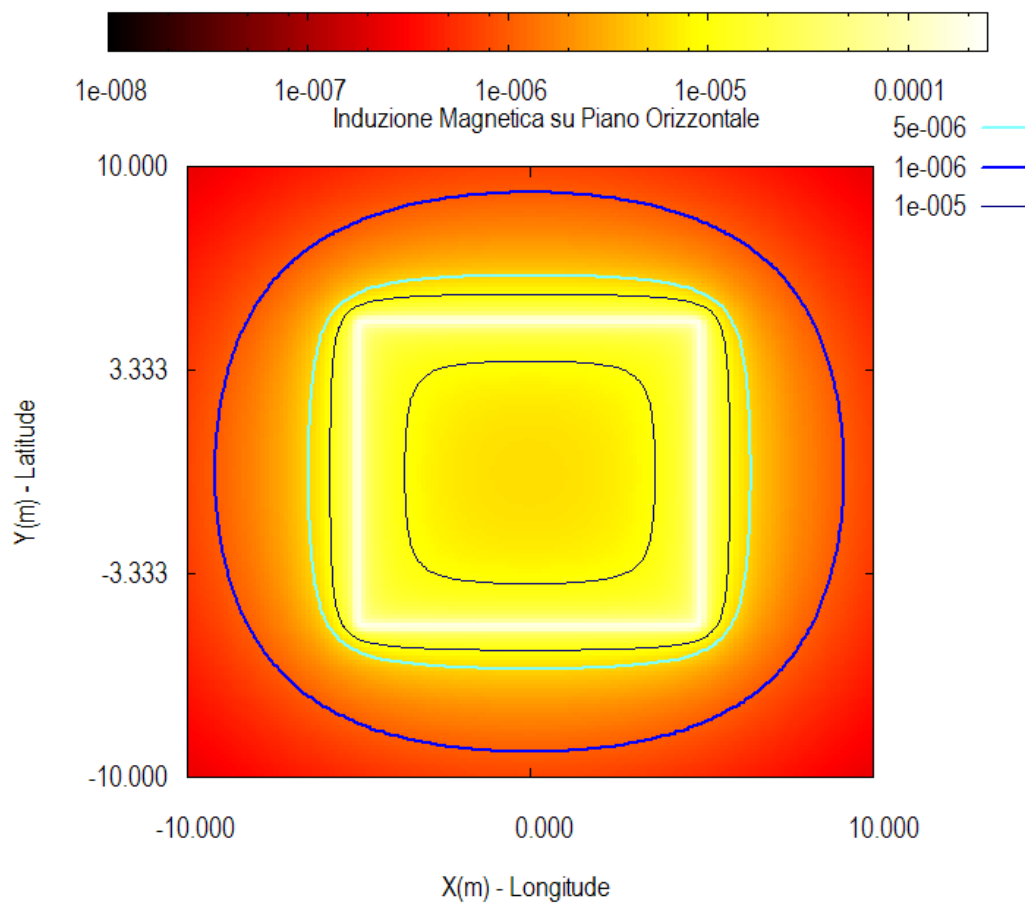


Il valore dell'induzione magnetica al centro di una spira quadrata è dato dalla seguente formula:

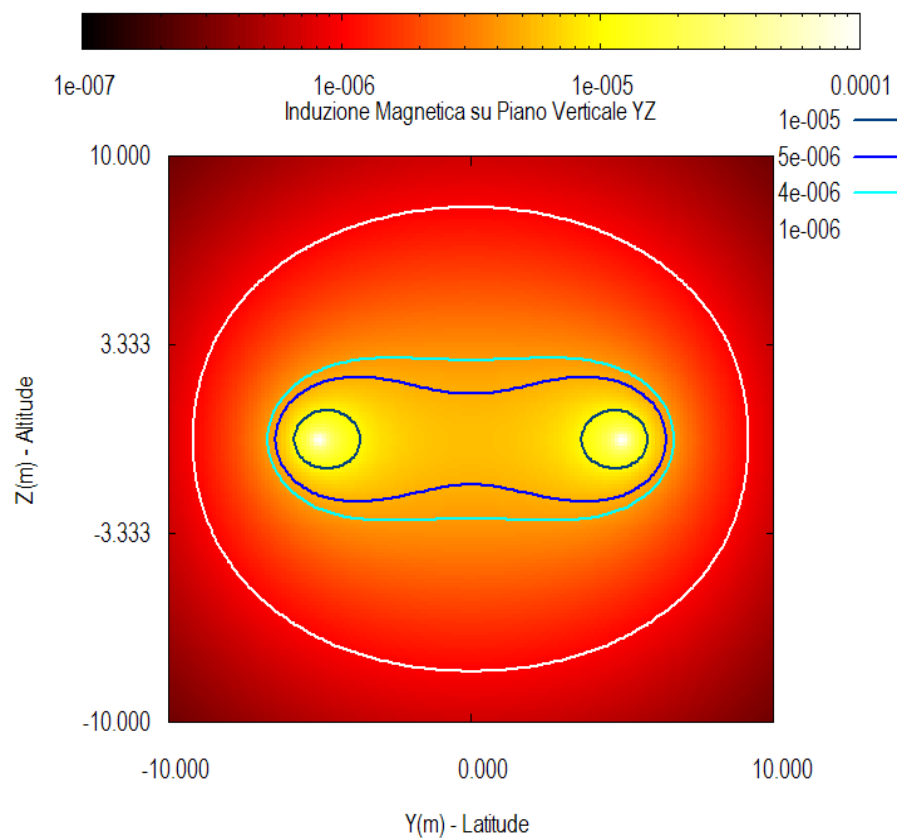
$$B = \frac{\mu_0 2\sqrt{2}}{\pi L} I$$

dove L è il lato della spira ed I è la corrente in essa circolante.

Effettuando la simulazione dell'induzione magnetica generata dalla spira su un piano orizzontale, ad ordinata zero, otteniamo il seguente grafico, visualizzato in SELF3D come mapcolor e isolinee



Effettuando invece la simulazione dell'induzione magnetica generata dalla spira su un piano verticale YZ si ottiene il seguente grafico:



Nella presente tabella è indicato il confronto tra il calcolo con la formula analitica e quello risultante dalla simulazione con SELF3D. Il punto di calcolo è il centro della spira.

Induzione magnetica nel centro della spira quadrata (micro Tesla)	
Calcolo con formula analitica	Calcolo con SELF3D
5.656854	5.656854

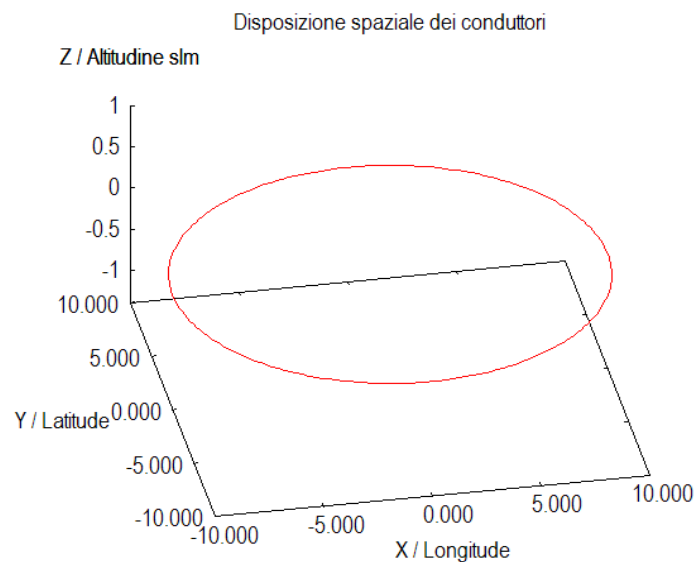
Come può evincersi il risultato di SELF3D è perfettamente in linea con il calcolo analitico.

La stessa identità di risultati si è riscontrata nel caso di pentagono, esagono, ottagono.

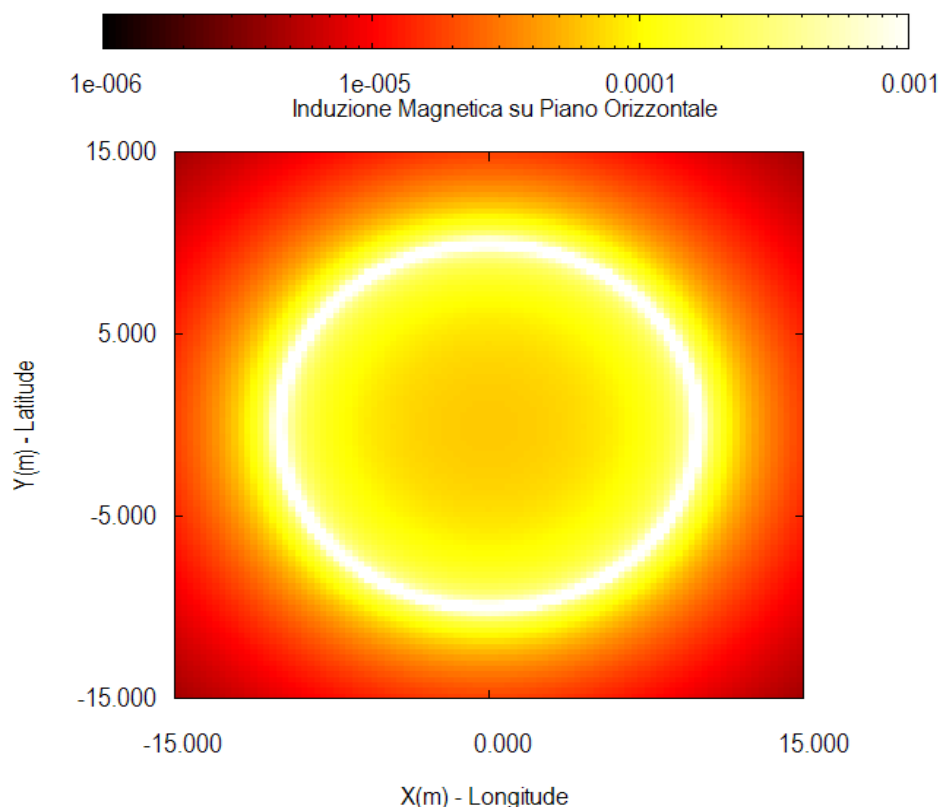
Grazie alla possibilità, offerta da SELF3D, di effettuare simulazioni di conduttori di qualsiasi forma utilizzando una polilinea approssimante, analizziamo il caso di una spira circolare. In questo caso la spira circolare è stata disegnata in ambiente CAD con 200 vertici, ed importata in SELF3D.

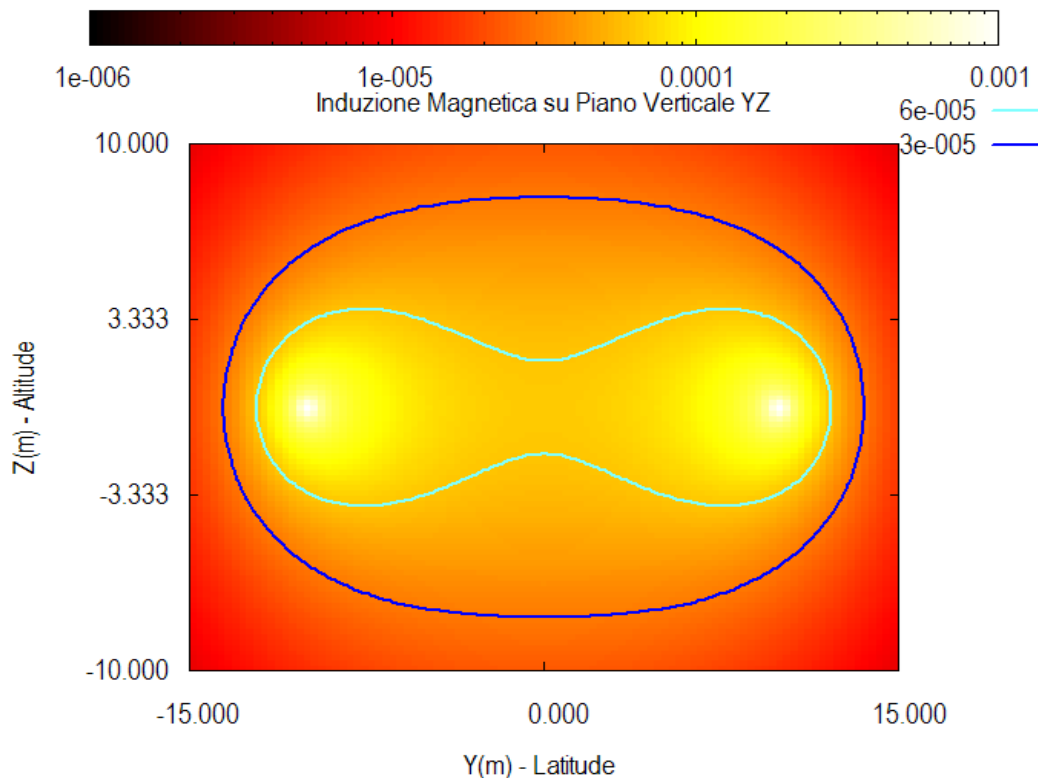
La spira in oggetto ha un raggio di 10 metri e in essa scorre una corrente di 1000 A. Il centro di essa è fissato nell'origine degli assi.

La visualizzazione della spira in SELF3D è la seguente.



Effettuando la simulazione su un piano orizzontale e, successivamente, su un piano verticale otteniamo i grafici seguenti:





L'induzione magnetica generata da una spira circolare, nel centro della spira stessa, è espressa da:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}$$

Nella seguente tabella è presente il confronto tra il calcolo con la formula analitica e quello risultante dalla simulazione con SELF3D. Il punto di calcolo è il centro della spira circolare. In questo caso di spira circolare, il risultato è molto interessante perché ci permette di fare una serie di considerazioni.

Induzione magnetica nel centro della spira circolare (micro Tesla) Spira circolare scomposta in 200 vertici	
Calcolo con formula analitica	Calcolo con SELF3D
62.831853	62.837021

Il risultato in uscita da SELF3D è leggermente maggiore di quello fornito dal calcolo analitico.

Il rapporto tra i due risultati è:

$$R = \frac{B_{SELF3D}}{B_{ANALITICO}} = \frac{62.837021}{62.831853} = 1.00008225$$

e l'errore relativo è:

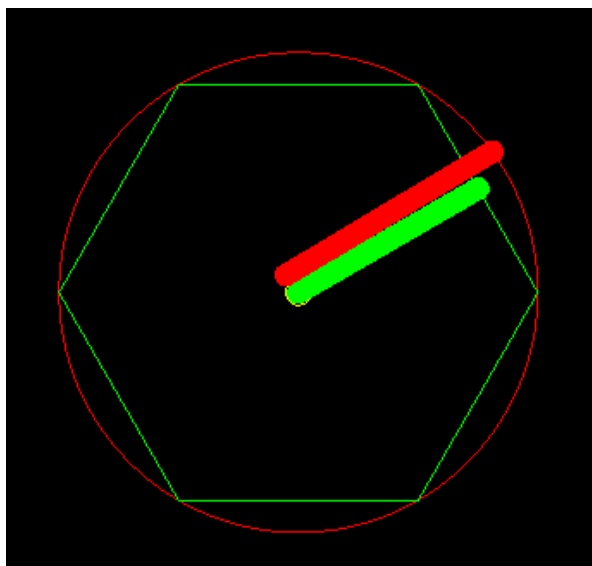
$$\Delta B_{REL} = \frac{B_{SELF3D} - B_{ANALITICO}}{B_{ANALITICO}} = \frac{62.837021 - 62.831853}{62.831853} = \frac{0.005168}{62.831853} = 8.225 \times 10^{-5}$$

ossia di 8 parti su 100.000, quindi meno di una parte su 10.000.

Ora, lungi dall'aver questo scostamento qualsiasi valenza in termini pratici, la sua analisi ci permette di entrare con maggior dettaglio nella situazione in esame.

Infatti, un risultato di SELF3D maggiore di quello analitico è perfettamente in linea con quanto ci potessimo aspettare da un punto di vista teorico.

Questo deriva dal processo di approssimazione della spira (circonferenza rossa) mediante una polilinea (esagono verde), osservabile dalla figura seguente, nella quale, per scopo illustrativo, è stata utilizzata una polilinea approssimante con soli 6 vertici (per l'appunto, un esagono):



In questo caso la linea spessa rossa rappresenta il raggio esatto della spira, mentre, la linea spessa verde rappresenta la distanza dal centro della spira del tratto di polilinea che la approssima. Come può evincersi, la linea spessa verde è più corta di quella rossa, conseguentemente, i tratti della polilinea sono più vicini al punto di calcolo rispetto ai punti della spira. Da questo ne consegue un maggior valore dell'induzione magnetica generato dalla polilinea (SELF3D) rispetto alla spira (Calcolo Analitico) come precedentemente evidenziato.

La differenza di valore polilinea/spira diminuisce all'aumentare del numero dei vertici della polilinea. E questo è chiaro perché, all'aumentare dei vertici, la polilinea “tende” sempre più verso la spira, anche se, in termini pratici, è inutile spingersi oltre un certo numero di vertici, come abbiamo visto in questo esempio (con 200 vertici si ha un errore percentuale di 8 parti su 100.000, non avente quindi nessun significato pratico).

Per verificare quanto abbiamo detto si è aumentato il numero di vertici nei quali scomporre la spira circolare. Si è passati dal precedente valore di 200 vertici ad un valore di 1000 vertici.

Abbiamo la nuova situazione delineata nella tabella seguente:

Induzione magnetica nel centro della spira circolare (micro Tesla) Spira circolare scomposta in 1000 vertici	
Calcolo con formula analitica	Calcolo con SELF3D
62.831853	62.832060

Il rapporto tra i due risultati è:

$$R = \frac{B_{SELF3D}}{B_{ANALITICO}} = \frac{62.832060}{62.831853} = 1.0000032945$$

e l'errore relativo è:

$$\Delta B_{REL} = \frac{B_{SELF3D} - B_{ANALITICO}}{B_{ANALITICO}} = \frac{62.832060 - 62.831853}{62.831853} = \frac{0.005168}{62.831853} = 3.294 \text{EXP}(-6)$$

Si è quindi passato da un errore relativo di $8.225 \text{EXP}(-5)$ nel caso di 200 vertici ad un errore relativo di $3.294 \text{exp}(-6)$ nel caso di 1000 vertici.

Detta diversamente, si è passato da un errore di 8 parti su centomila, nel caso di 200 vertici, ad un errore di 3 parti su un milione nel caso di 1000 vertici.

A questo punto la domanda che sorgespontanea è: qual è il numero di vertici che permette di ottenere l'uguaglianza di tutte le 8 cifre che rappresentano l'induzione magnetica nel caso del calcolo analitico ed in quello derivante dall'applicazione di SELF3D? Dopo aver fatto varie prove ho constatato come scomponendo la spira in 30.000 vertici si ha la seguente situazione:

Induzione magnetica nel centro della spira circolare (micro Tesla) Spira circolare scomposta in 30.000 vertici	
Calcolo con formula analitica	Calcolo con SELF3D
62.831853	62.831853

Ossia una perfetta uguaglianza del valore (rappresentato con 8 cifre) simulato da SELF3D, rispetto al valore derivante da un calcolo analitico, utilizzando una scomposizione della spira in una polilinea di 30.000 vertici. È da osservare come questa verifica sia stata possibile grazie alla possibilità di inserire un numero illimitato di vertici. A tal fine, è stato riscritto il codice dedicato alla gestione degli array in SELF3D dalla release 1.4.

Da una ulteriore analisi ho desunto che il valore SELF3D ottenuto per l'induzione magnetica è identico al risultato analitico (su molte più cifre delle 8 precedenti) calcolato in presenza di un poligono regolare con 30.000 vertici.

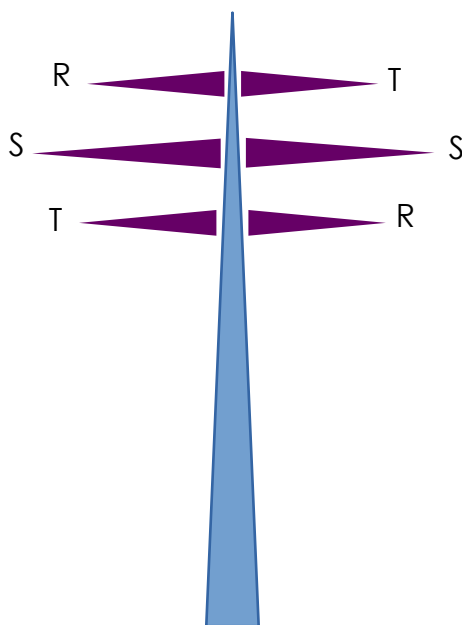
Questa considerazione assume una valenza particolare considerando l'elevato numero di vertici scelto. È infatti evidente che, dal fatto che SELF3D abbia dato risultati uguali al calcolo analitico nel caso di un quadrato, un pentagono, un esagono e un ottagono, non si possa derivare automaticamente che un risultato uguale al calcolo analitico permanga anche in presenza di 30000 vertici. E questo perché il numero di bit con il quale, all'interno di un codice, viene rappresentata una variabile non è certo infinito.

È quindi possibile, da quanto appena detto, derivarne una analisi sul comportamento del codice di SELF3D nei riguardi di due ulteriori aspetti:

1. **La tenuta della precisione del codice di calcolo nei riguardi della simulazione di spezzoni di linea di piccole dimensioni.** Infatti, all'aumentare dei vertici della polilinea, diminuisce la lunghezza del singolo segmento e l'induzione magnetica ad una certa distanza.
2. **La tenuta di SELF3D nei confronti della propagazione dell'errore, caratteristica di tutti i codici di tipo iterativo.** All'aumentare del numero di vertici aumenta il numero di elementi che contribuiscono alla formazione di un valore dell'induzione magnetica in un dato punto.

Ora valutiamo la risposta di SELF3D in un caso in cui sono presenti due linee indipendenti con una relazione di fase relativa variabile. In questo caso ci siamo riferiti agli stessi valori presenti nel lavoro sviluppato dall'Arpa FVG, citato all'inizio di questo documento, al fine di avere un confronto non solo con l'andamento dell'induzione al variare della relazione di fase, ma anche con l'ampiezza dell'induzione stessa. Questo per avere anche informazioni, per quanto possibile in questa configurazione, sul dimensionamento spaziale della curva di catenaria.

Vengono considerate due terne trifase indipendenti montate su un unico traliccio come mostrato in figura, dove vengono indicate le fasi delle tensioni sui conduttori.



Gli sbracci hanno una lunghezza di 5m (quello inferiore e superiore) e 8m (l'altro), e sono posti ad una altezza di 35m, 33m, 31m.

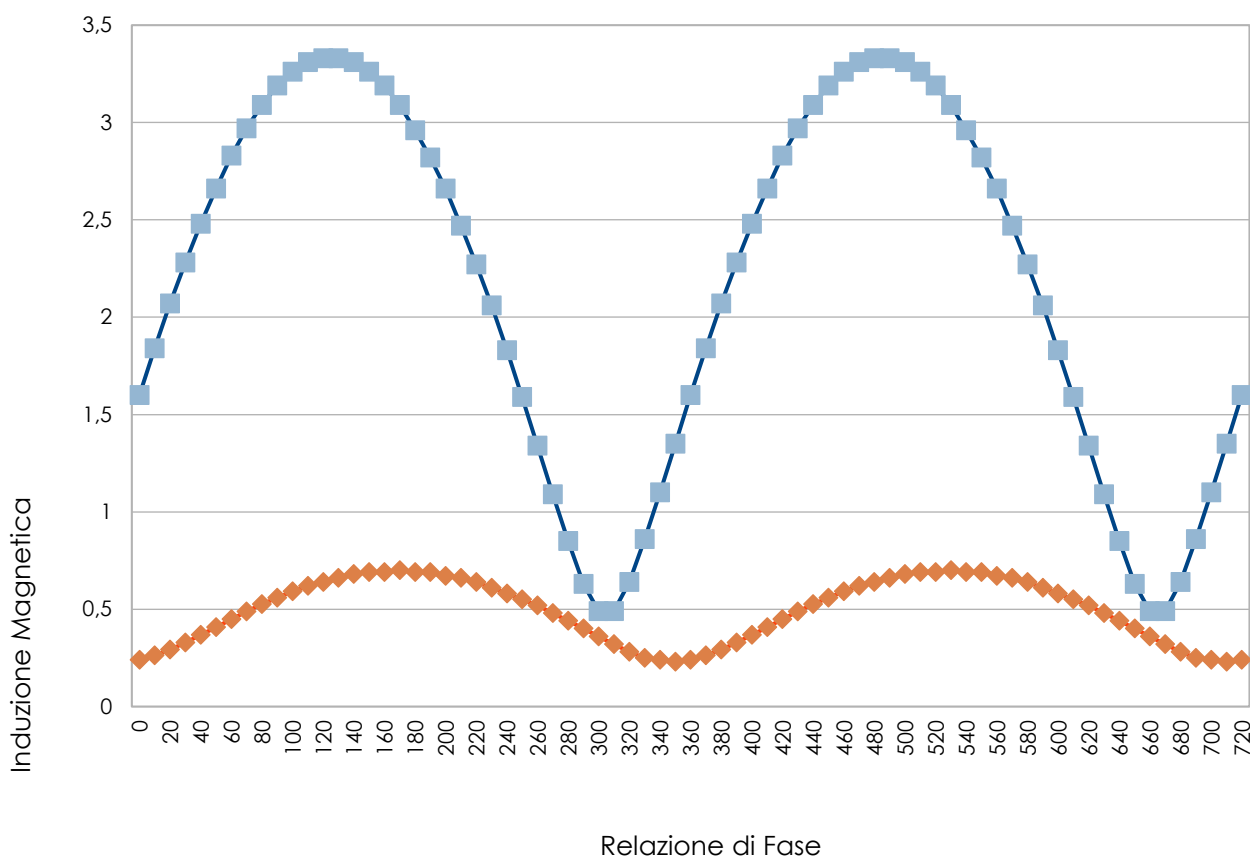
Le correnti nelle due terne sono di 960A e 1300A. I parametri di posa sono di 1600m e 1700m.

Si è quindi provveduto ad effettuare una serie di simulazioni con SELF3D in due punti, entrambi ad una altezza di due metri dal suolo, uno posto sull'asse della linea, e l'altro a 50m di distanza dallo stesso asse.

Per ogni simulazione si è provveduto a variare lo sfasamento corrente/tensione di una terna trifase e, quindi, ad introdurre uno sfasamento variabile tra le due terne di correnti trifase. Lo sfasamento è stato variato con uno step di 10°.

Il risultato è mostrato nella figura seguente dove, in blu, è indicata la simulazione inerente il punto sull'asse della linea e, in rosso, quella relativa al punto distante 50m dallo stesso asse.

Induzione Magnetica al variare della Relazione di Fase



L'andamento mostrato rispecchia quanto atteso e presente nel documento ARPA FVG. Ciò vale non solo in relazione alla tipologia di variazione dell'induzione magnetica con la fase relativa delle terne, ma anche alle ampiezze assunte dall'induzione magnetica stessa nei due punti di calcolo.

È interessante a questo punto valutare lo stesso discorso di fase relativa appena effettuato utilizzando il modulo di SELF3D relativo all'analisi di linee con fase relativa ignota.

In questo modulo bisogna fornire a SELF3D i parametri relativi a Tensione, Potenza Attiva e Potenza Reattiva o, equivalentemente, quelli relativi a Tensione, Corrente e Sfasamento Corrente/Tensione.

È da evidenziare che, nel caso si scelga di inserire la terna Tensione, Corrente e Sfasamento I/V, l'inserimento del valore della tensione è non significativo perché essa non contribuisce al risultato del calcolo.

Infatti, mentre nella terna Tensione / Potenza Attiva / Potenza Reattiva il valore della tensione viene utilizzato per derivare (a partire dalle potenze) lo sfasamento corrente/tensione, nell'altro caso (inserimento dei valori di Tensione / Corrente / Sfasamento I/V) lo sfasamento corrente/tensione è già fornito.

Il suo inserimento in questo secondo caso deriva dalla volontà di uniformare il numero di parametri in ingresso al software nelle due possibilità. È quindi possibile inserire qualunque valore di tensione.

La finestra inerente l'analisi di linee con fase relativa ignota è mostrata nella figura seguente:

Calcolo in presenza di linee indipendenti

Studio Tecnico Ing. Sapone

SELF3D

MISURA E CONSULENZA
IMPATTO ELETTROMAGNETICO

ANALISI IN PRESENZA DI LINEE CON RELAZIONE DI FASE IGNOTA



Separatore campi dati di ingresso

☒ Spazio
☐ Tabulazione

Tipologia Dati in Ingresso

☒ Tensione, Potenza attiva, Potenza Reattiva
☐ Tensione, Corrente, Sfasamento I / V

Punto di Calcolo

Px:
Py:
Pz:
Delta:

Relazione di Fase Ignota

☒ Multipli Casuali di 120°
☐ Completamente Casuale

Lancio del Simulatore

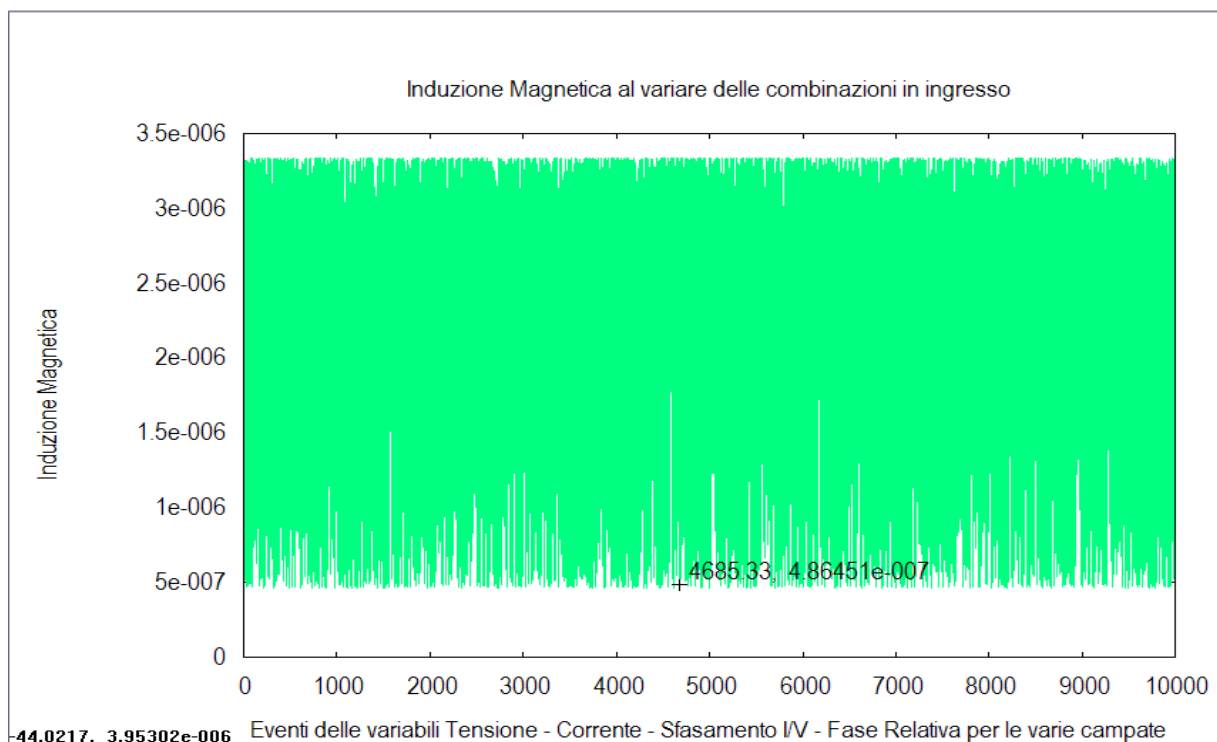
Numero di Iterazioni:

Risultati

Valore Max (μT):

Dopo aver inserito i parametri necessari, e scegliendo una relazione di fase completamente casuale, si lancia il simulatore. Il valore massimo dell'induzione magnetica risultante dalle diverse iterazioni, con diversa relazione di fase, è mostrato nella parte bassa della figura ("Valore Max μT"), ed è uguale a 3,34 μT, perfettamente in linea con l'analisi precedentemente effettuata.

Per la simulazione sono state utilizzate 10,000 iterazioni (numero sicuramente eccessivo con due elettrodotto interagenti). Da prove effettuate risulta che un valore di iterazioni uguale a cinquecento è qui più che sufficiente per stabilizzare il valore massimo rilevato. Premendo il tasto "Grafico Dati Simulati" viene lanciato il visualizzatore che mostra tutte le iterazioni effettuate, come esemplificato nella figura seguente.



In questa figura è stato inoltre aggiunto un marker sulla parte bassa della zona di variabilità dell'induzione magnetica.

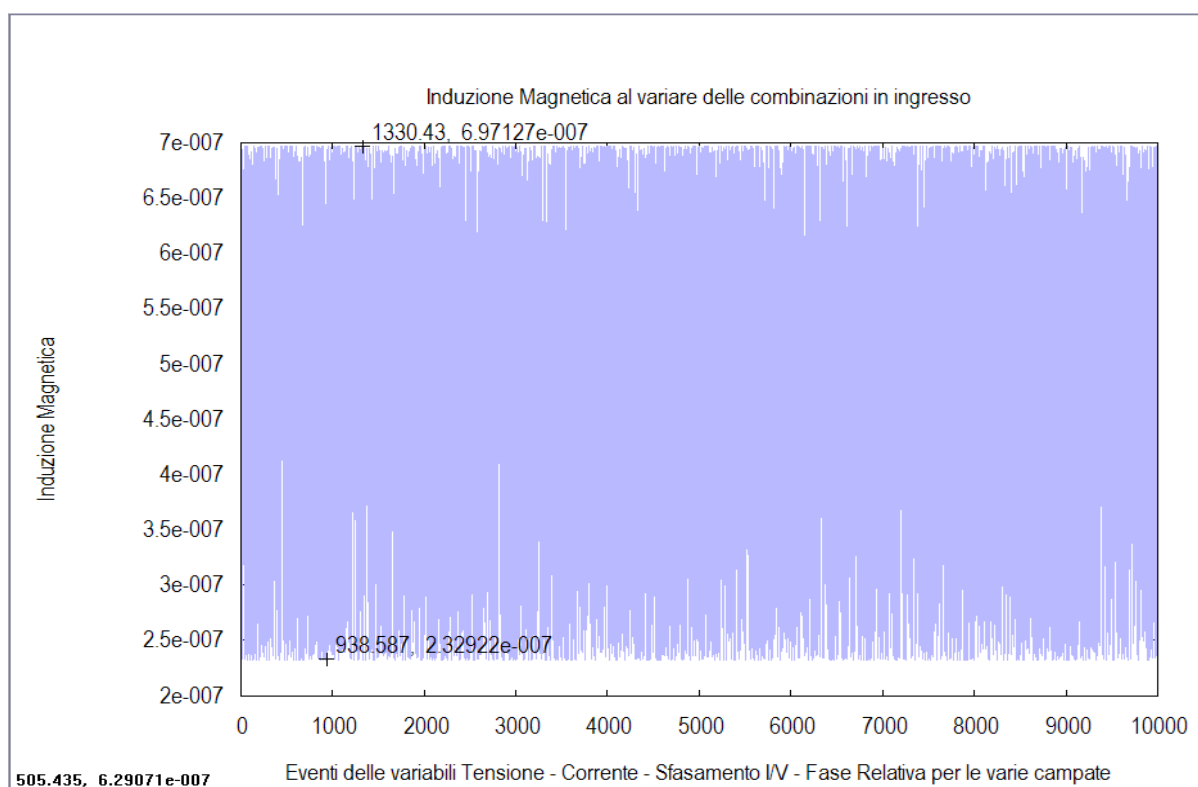
Il marker indica (4685,33 – 4,86451e-07). Il primo valore (o meglio, la parte intera di esso) indica in quale iterazione si è ottenuto il secondo valore mostrato di 4,86451e-07, il quale rappresenta l'induzione magnetica minima al variare dello sfasamento relativo.

Anche questo valore di induzione magnetica minima è perfettamente in linea con quanto stabilito nella precedente analisi.

Come ultima analisi applichiamo questo modulo di SELF3D alla valutazione del range di variazione dell'induzione magnetica nel punto distante 50m dall'asse dell'elettrodotto. Dopo aver lanciato il simulatore, il valore massimo ricavato nelle 10000 iterazioni appare nella solita textbox nella parte bassa della finestra ed indica 0,697 micro Tesla.

Questo valore può essere anche ricavato per via grafica posizionando un marker nella parte superiore dell'intervallo di variazione dell'induzione magnetica, come mostrato nella figura seguente. Nella stessa figura è altresì presente un marker anche sulla parte bassa dell'intervallo di variazione dell'induzione magnetica, ad indicare un valore minimo di 0,233 micro Tesla.

Anche questi risultati sono in perfetto accordo con la valutazione eseguita precedentemente e con i relativi contenuti del lavoro sviluppato dall'Agenzia.



Grazie per il tempo dedicatomi

Luigi Raffaele Sapone