



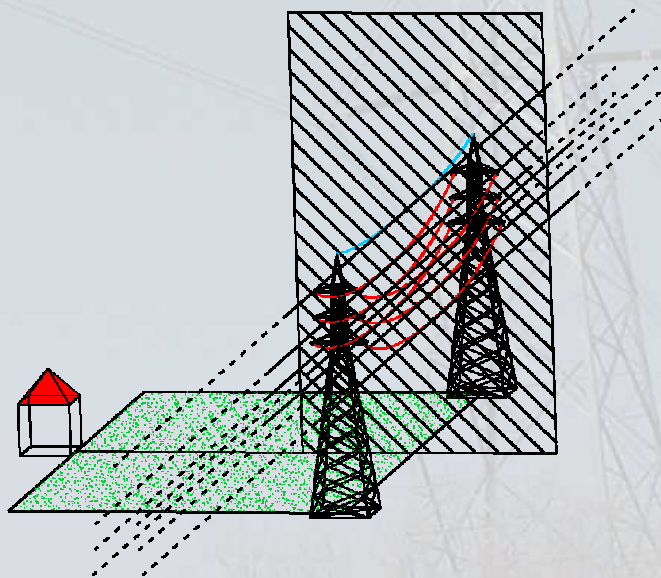
Correnti indotte nel terreno da linee elettriche

Ing. Nicola Zoppetti

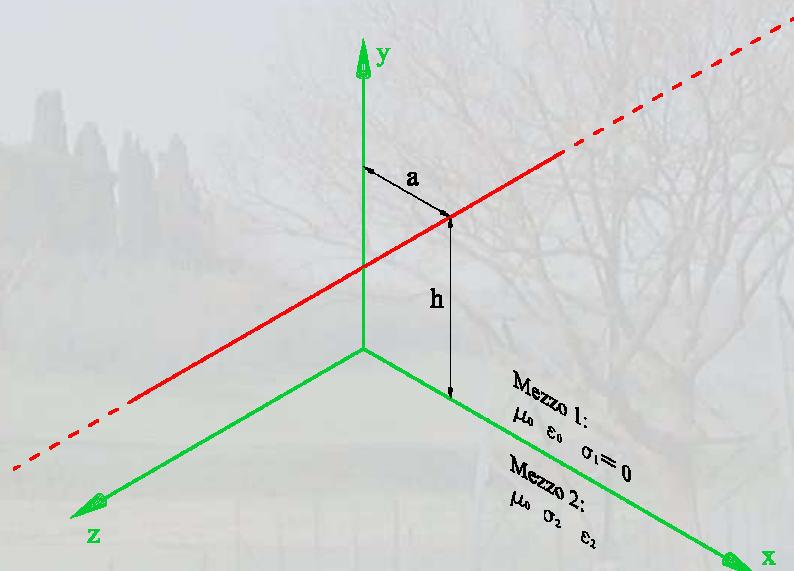
*Istituto di Fisica Applicata “Nello Carrara”
IFAC-CNR, Firenze*

Finalità dello studio

- Fornire un quadro di riferimento che faciliti l'interpretazione fisica dei fenomeni.
- Evidenziare quali sono i fenomeni del primo ordine e quali di ordine superiore.
- Fornire indicazioni sulle approssimazioni e sui metodi di calcolo utilizzabili nelle diverse situazioni possibili
- Valutare se le correnti indotte nel terreno contribuiscono in modo significativo al campo magnetico in aria.



- ogni linea è rappresentata con un fascio di conduttori rettilinei ed indefiniti paralleli al terreno;
- il terreno è rappresentato come un semispazio a conducibilità omogenea e permeabilità magnetica pari a quella del vuoto;



Regime quasi-statico

Campi lentamente variabili (regime “quasi statico”)



Campo elettrico e magnetico disaccoppiati
(si calcolano e si misurano indipendentemente l'uno dall'altro)



Campo elettrico generato
da distribuzioni di carica
libera

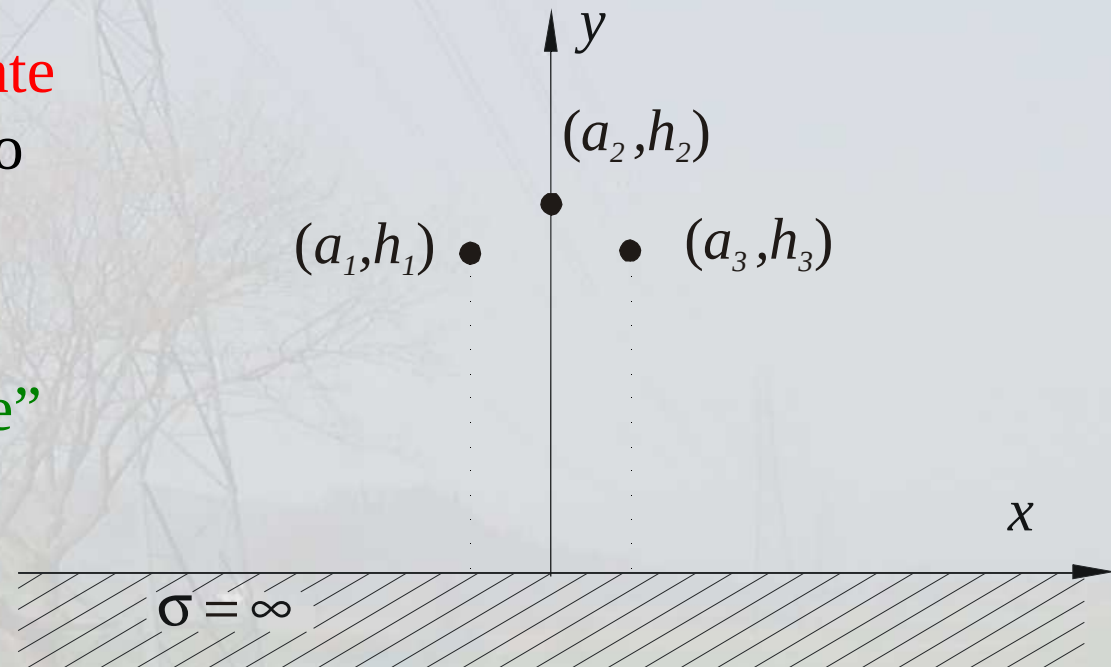


Campo magnetico generato
dalle correnti

Modello semplificato per il calcolo dei campi in aria

Norma CEI 211-4: Guida ai metodi di calcolo dei campi elettrici e magnetici generati da linee elettriche

- **Calcolo di E :**
 - Terreno **perfettamente conduttore**: principio delle immagini
- **Calcolo di B :**
 - Terreno “trasparente”





Significato dell'approssimazione quasi-statica



La lunghezza d'onda è molto maggiore della massima dimensione della regione di spazio in cui è confinato il problema di interesse ($\lambda \gg L$)

$$\lambda_0 = \frac{c_0}{f} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \cdot f} \approx 6000 \text{ km a } 50 \text{ Hz}$$

Gli effetti di propagazione possono essere trascurati. Si possono utilizzare le tecniche della elettrostatica e della magnetostatica.

Un corpo può essere considerato come un **buon conduttore** per il campo elettrico se la carica libera si dispone sulla sua superficie in tempi molto brevi rispetto al periodo di oscillazione delle sorgenti

$$\tau = \frac{\epsilon}{\sigma}$$

*Il calcolo del **campo elettrico** all'interno ed all'esterno di un corpo conduttore può essere separato in due problemi.*

Un oggetto può essere considerato **trasparente** per il campo magnetico se le sue dimensioni (quelle della regione di spazio considerata nel caso del terreno) sono piccole rispetto al relativo spessore della “magnetic skin-depth”

$$\delta_{pelle} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \sigma}}$$

*Il **campo magnetico** impresso all'interno dell'oggetto non è perturbato dall'oggetto stesso. Il campo magnetico generato dalle correnti indotte è trascurabile rispetto al campo magnetico impresso dalle sorgenti.*

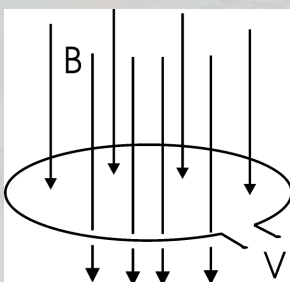
Proprietà elettriche del terreno

	σ [S/m]	ϵ_r	δ_{pelle} [m]	τ [sec]
Argilla umida	0.3	30	130	$8.9 \cdot 10^{-10}$
Terreno umido	0.03	20	411	$5.9 \cdot 10^9$
Terreno sabbioso	10^{-3}	15	2251	$1.3 \cdot 10^{-7}$
Terreno roccioso	10^{-4}	7.5	7118	$6.5 \cdot 10^{-7}$
Acqua dolce	$2 \cdot 10^{-3}$	80	1592	$3.5 \cdot 10^{-7}$
Terreno ghiacciato	$3 \cdot 10^{-5}$	10	12990	$3 \cdot 10^{-6}$

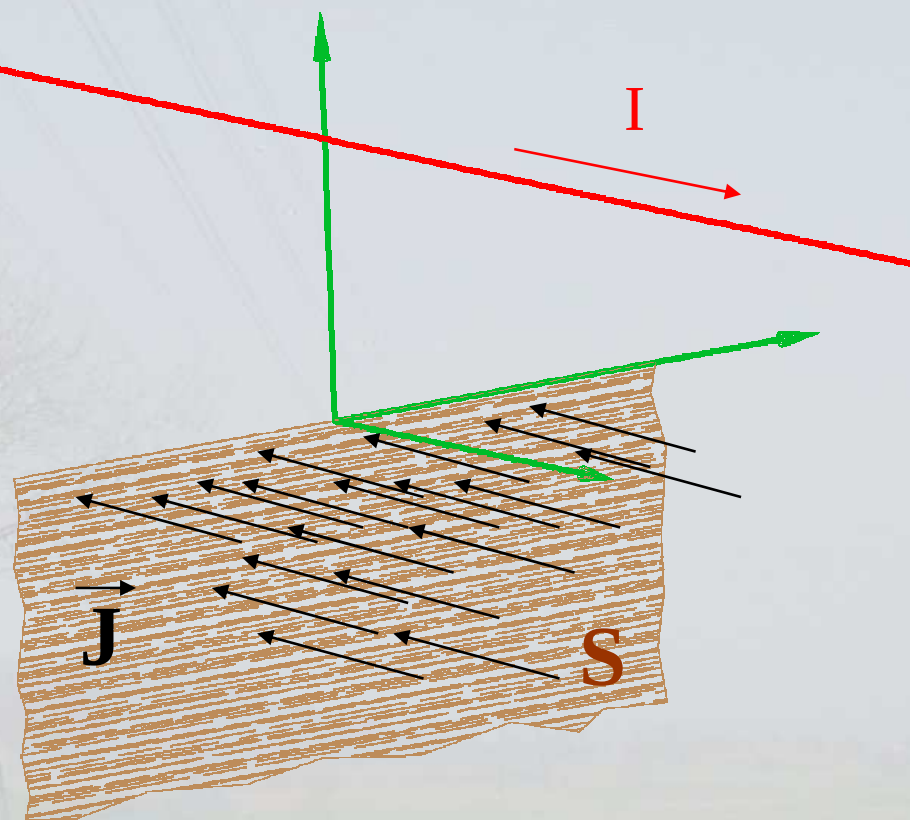
σ = Conducibilità δ = Spessore della pelle = $\frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \sigma}}$ τ = tempo di rilassamento = $\epsilon_0 \epsilon_r / \sigma$

Corrente indotta nel terreno dal campo magnetico

La variazione nel tempo del campo magnetico determina l'induzione di una densità di corrente nel terreno, secondo un meccanismo di accoppiamento analogo a quello che determina l'induzione di corrente in una spira metallica chiusa a cui si concatena un flusso di induzione magnetica variabile nel tempo



$$\int_S \vec{J} \cdot d\vec{S} = I$$



Corrente indotta nel terreno dal campo magnetico

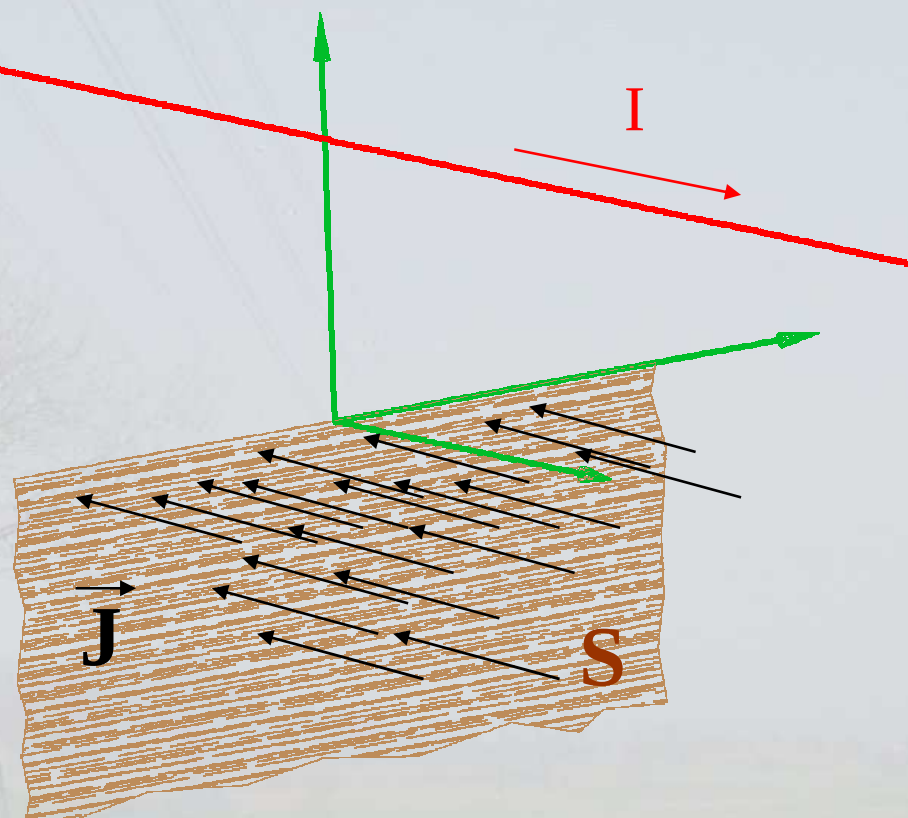
La corrente tende ad addensarsi nella porzione di terreno sottostante ai conduttori della linea.

La densità di corrente indotta nel terreno non è uniforme.

Inoltre, a frequenza fissata, quanto più la conducibilità è alta, tanto più la corrente tende a schiacciarsi sulla superficie di separazione terra-aria

$$\delta_{pelle} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \sigma}}$$

All'aumentare della conducibilità la pelle tende ad assumere spessore infinitesimo



Per il calcolo del campo magnetico in aria può essere utilizzato il principio delle correnti immagine

Corrente indotta nel terreno “quasi-elettrostaticamente”

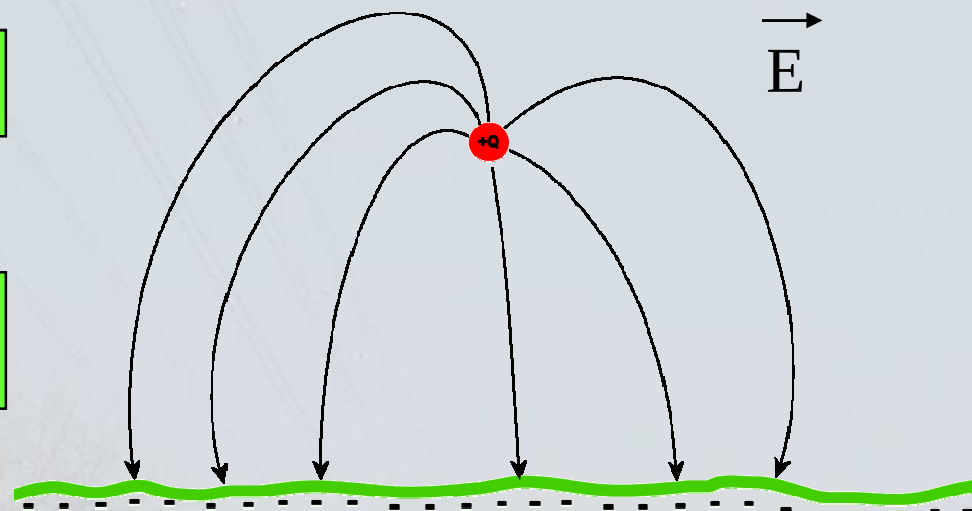
In ogni istante

Densità lineare di carica sul conduttore

induzione elettrostatica

Densità **superficiale** di
carica nel terreno

Il terreno si comporta come
un buon conduttore



Evoluzione temporale

Variazione sinusoidale
(50 Hz) della
densità lineare di
carica sul conduttore



Variazione sinusoidale
della densità superficiale
di carica nel terreno

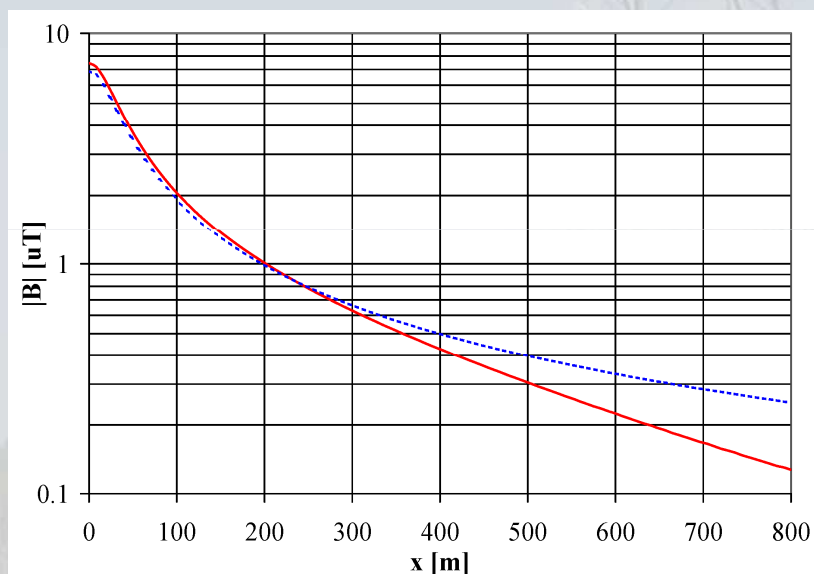


Densità di corrente
nel terreno

Influenza del terreno nel calcolo del campo magnetico generato da elettrodotti

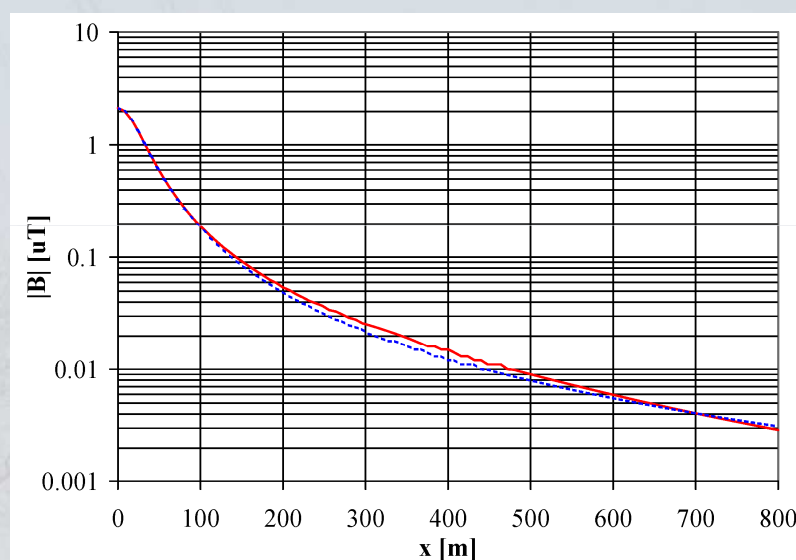
- I calcoli effettuati suggeriscono che nella grande maggioranza dei casi l'influenza delle correnti indotte nel terreno sia trascurabile ai fini della valutazione dell'impatto sull'ambiente dei campi generati da elettrodotti. Solo in condizioni particolari, quali quelle di terreni particolarmente conduttivi e grandi distanze dalle linee il campo magnetico totale può risentire del loro contributo.

1 conduttore



Un Filo: induzione magnetica ad 1 metro da terra. *Linea continua* (—): calcolo del campo B con il metodo completo e con quello quasi statico *Linea tratteggiata* (.....): contributo del solo conduttore primario. $a = 0$ m, $h=30$ m e $\sigma=0,1$ S/m $I=1000$ A.

3 conduttori



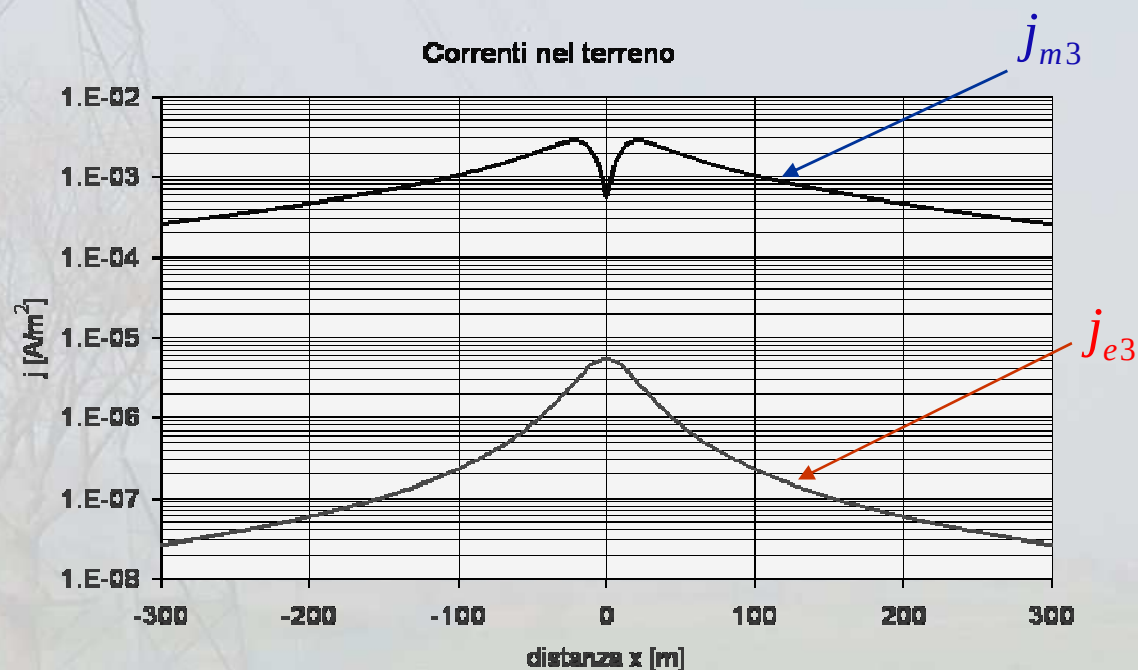
Tre fasi: induzione magnetica ad 1 metro da terra. *Linea continua* (—): calcolo del campo B con il metodo completo e con quello quasi statico *Linea tratteggiata* (.....): contributo dei soli conduttori primari. $h=30$ m e $\sigma=0,1$ S/m $I=1000$ A.

Densità di corrente indotte nel terreno

Elettrodotto trifase aereo a 380 kV, percorso da una corrente di 1500A

Presso la superficie del terreno la densità di corrente indotta dal campo elettrico assume valori di due ordini di grandezza inferiori a quelli assunti negli stessi punti dalla densità di corrente indotta dal campo magnetico

La densità di corrente indotta dal campo elettrico è un fenomeno del secondo ordine

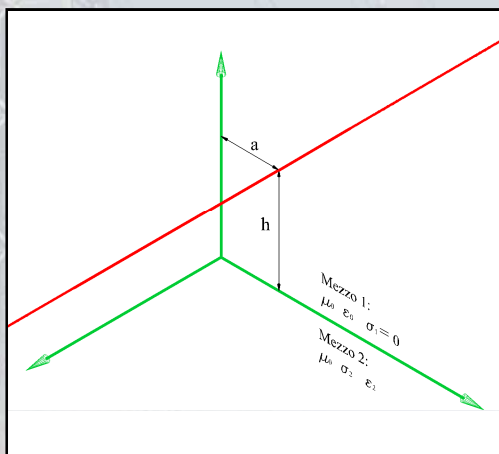


Entità delle approssimazioni che caratterizzano i metodi quasi statici

Sono stati confrontati due metodi che prevedono la **risoluzione analitica** di una parte del problema, per ricondursi quindi ad un **numero limitato di integrazioni numeriche in una sola variabile**.

Approccio completo

- Equazioni di Maxwell non disaccoppiate
- Rappresentazione dei campi in modi



Approccio quasi statico

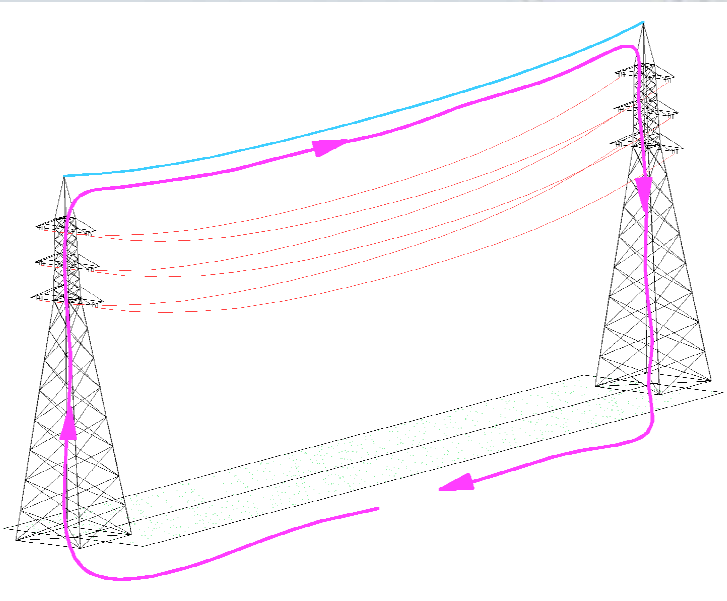
- Equazioni di Maxwell disaccoppiate
- Trascura le correnti “di spostamento”

- Tale raffronto consente da un lato di **valutare l'entità delle approssimazioni** adottate con il metodo quasi statico e dall'altro di **interpretare fisicamente** i legami fra le correnti indotte nel terreno e i campi da queste generati.
- L'approccio completo ha il pregio di **derivare i campi in maniera rigorosa** dalle equazioni di Maxwell, permettendo così di verificare con sicurezza la precisione dei risultati ottenuti con il metodo quasi statico.

Sono state rilevate differenze assolutamente trascurabili tra i risultati ottenuti utilizzando i diversi metodi (differenze paragonabili alla precisione delle procedure numeriche utilizzate)

Correnti indotte nelle funi di guarda

La precedente analisi non prende in considerazione un fenomeno che, in alcuni casi, può essere apprezzabile sia in termini di **contributo al campo magnetico in aria**, sia di **densità di corrente indotta nel terreno**.

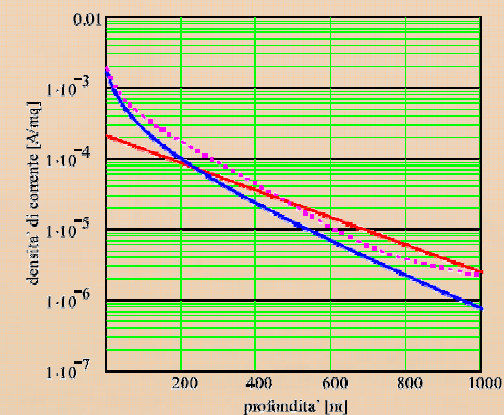
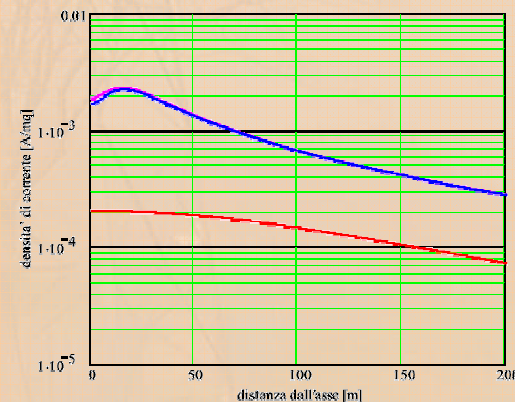


Il campo magnetico impresso può indurre una corrente apprezzabile nella spira formata dalle funi di guarda e dai tralicci e che si chiude attraverso il terreno.

L'entità di questo fenomeno dipende dalle caratteristiche della campata considerata.

Il contributo al campo magnetico **in aria** dovuto alla corrente che scorre **nel conduttore di guarda** può essere apprezzabile, specialmente a distanza dalla linea.

Per linee trifase con correnti bilanciate, il **ritorno della corrente di spira** attraverso il terreno può dare luogo a densità di corrente paragonabili a quelle **indotte direttamente dal campo magnetico**



- L'approccio quasi statico è di grande aiuto nella interpretazione fisica dei fenomeni di interesse.
- L'approccio quasi statico, in particolare, rende possibile la separazione dei fenomeni e la loro classificazione in termini di effetti.
- Se correttamente applicati, i metodi quasi statici forniscono risultati del tutto equivalenti a quelli ottenuti utilizzando metodi che fanno riferimento alle equazioni di Maxwell complete.
- I metodi presentati sono stati sviluppati per lo studio dei fenomeni in aria, ma possono essere applicati anche per determinare le grandezze fisiche di interesse nel terreno.