Calcolo dei campi

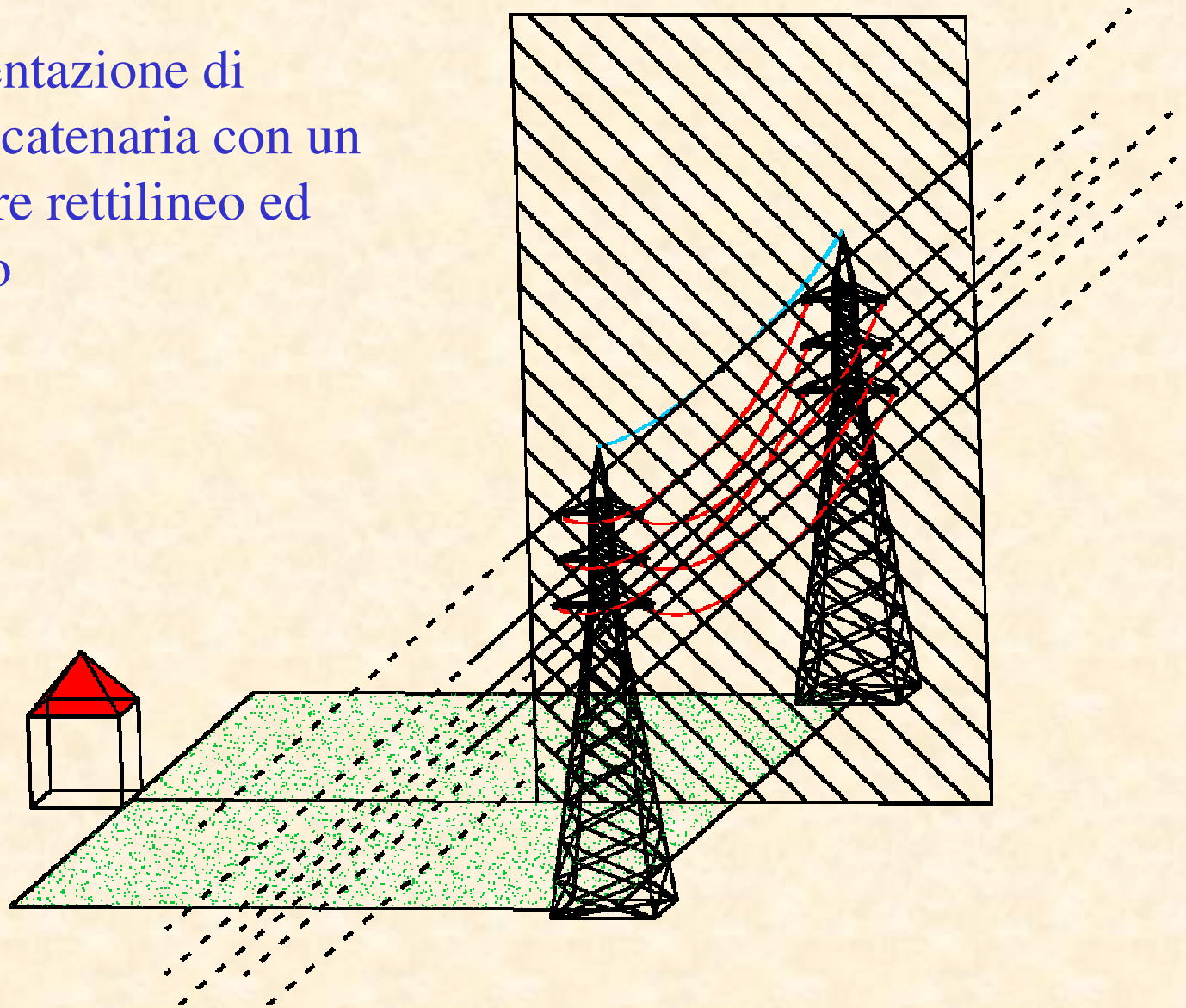
Calcolo dei campi

Due possibili approcci:

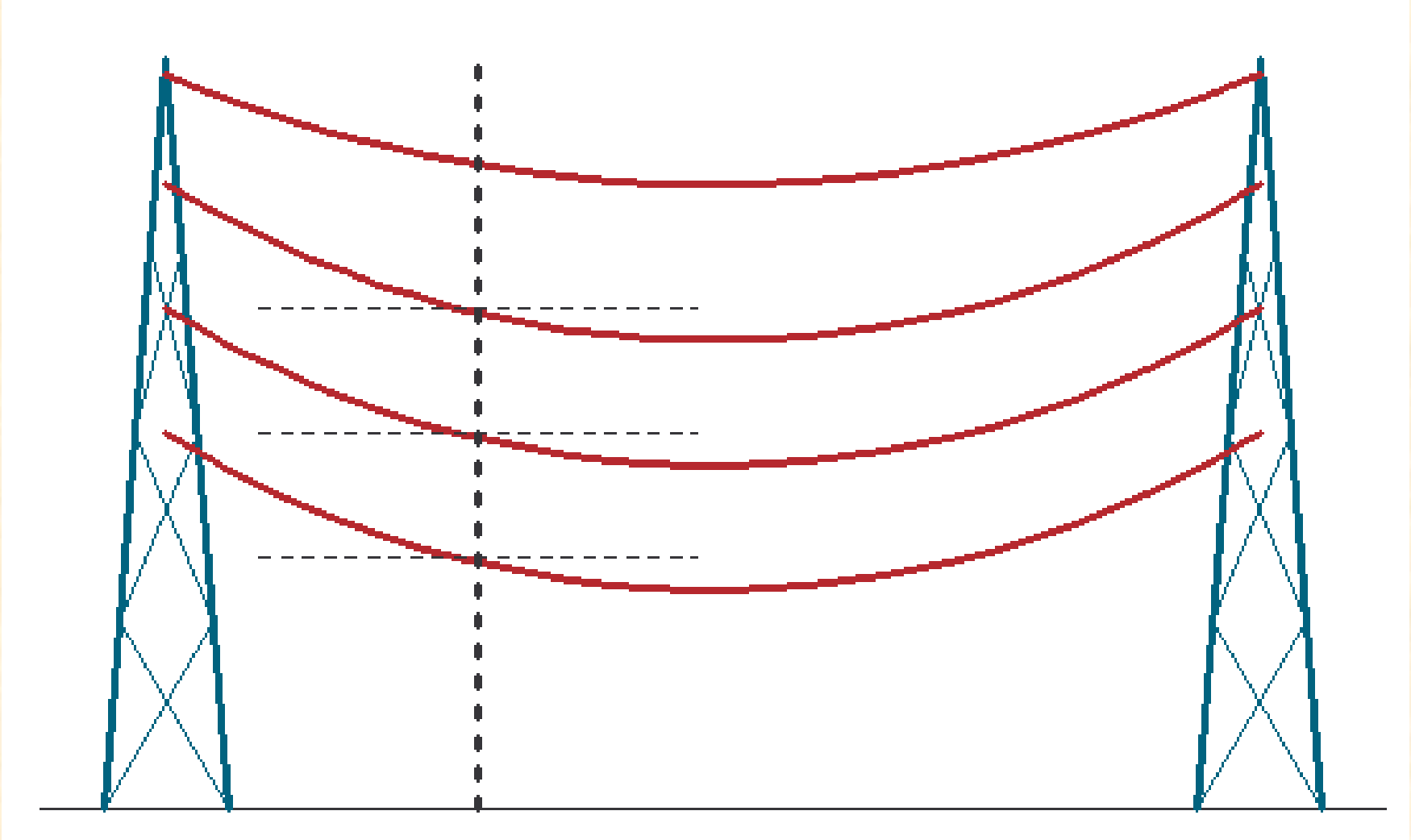
1. **Approccio semplificato:** rappresenta l'elettrodotto con un fascio di conduttori rettilinei ed indefiniti (norma CEI 211-4)
2. **Approccio avanzato**: utilizza un modello tridimensionale dell'elettrodotto ed in particolare rappresenta ciascun conduttore con la relativa *catenaria.*

Calcolo dei campi: approccio semplificato

Rappresentazione di ciascuna catenaria con un conduttore rettilineo ed indefinito



Approccio semplificato: altezza dei conduttori



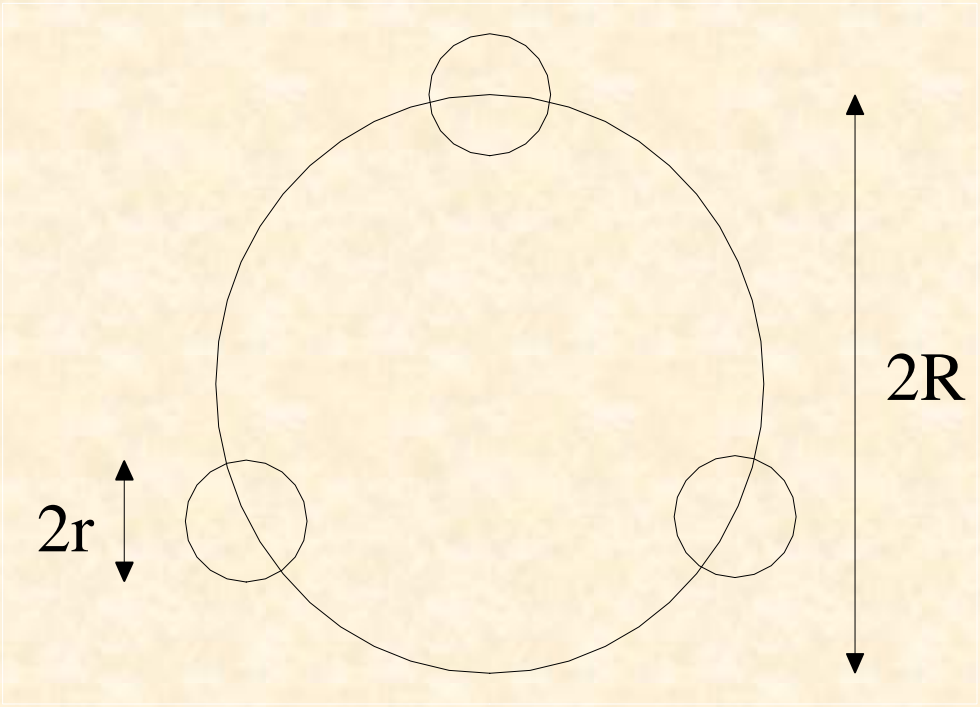
Approccio semplificato: limiti del modello

1. Tutti i conduttori costituenti la linea sono considerati rettilinei, di forma cilindrica con diametro costante, orizzontali, di lunghezza infinita, paralleli tra di loro.
2. Viene trascurata la presenza dei tralicci o piloni di sostegno, degli edifici, della vegetazione e di qualunque altro oggetto si trovi nell'area interessata.
3. I conduttori sono considerati di forma cilindrica con diametro costante.
4. il diametro dei conduttori è piccolo rispetto alle mutue distanze.

Limiti del modello

5. Nel caso di *conduttori a fascio*, si suppone che la distanza tra i singoli subconduttori a uguale potenziale sia piccola rispetto alla distanza tra i conduttori a diverso potenziale; si suppone inoltre che tutti i subconduttori siano uguali tra di loro e che, in una sezione normale del fascio, i loro centri giacciano su una circonferenza.

Raggio equivalente

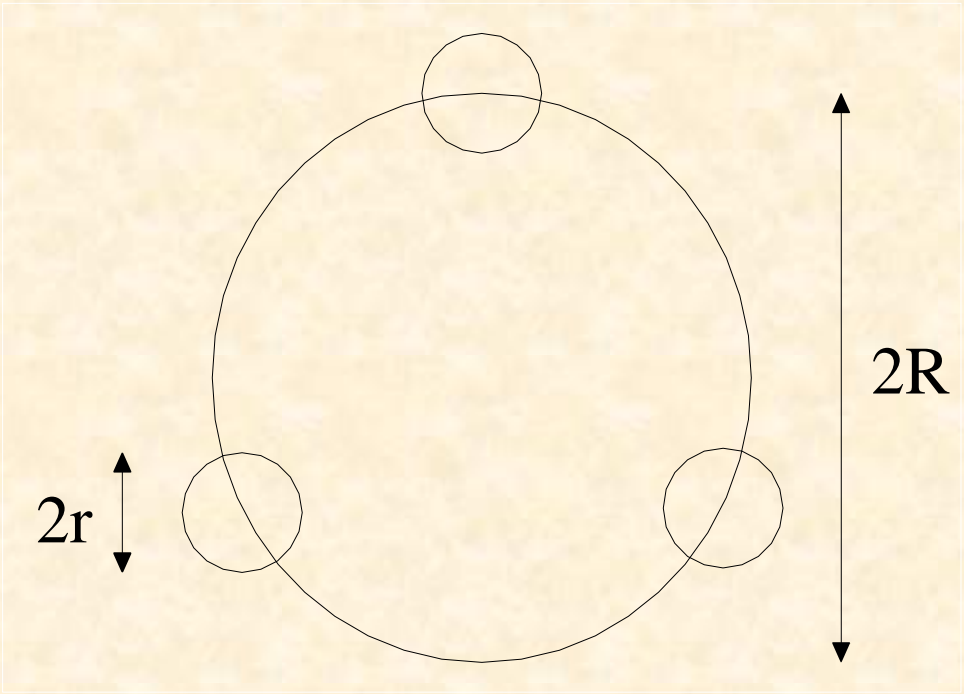


$$\mathrm{R}_{eq} = R\sqrt[n]{n\frac{r}{R}} = \sqrt[n]{nrR^{n-1}}$$

$$(n=2) \quad \mathrm{R}_{eq} = \sqrt{2rR}$$

$$(n=3) \quad \mathrm{R}_{eq} = \sqrt[3]{3rR^2}$$

Raggio equivalente: esempio numerico

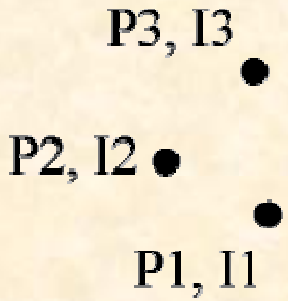


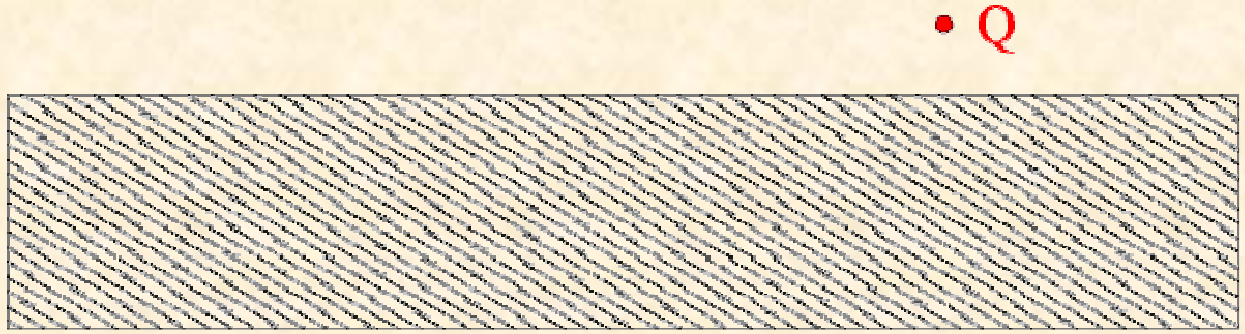
$(n = 3)$ $\quad R_{eq} = \sqrt[3]{3rR^2}$

2r = 31.5 mm, 2R = 46.2 cm $\quad R_{eq}$ = 13,6 cm
(lato del triangolo = 40 cm)

Approccio semplificato: calcolo dell'induzione magnetica

- Il terreno viene considerato "trasparente" dal punto di vista magnetico. Ciò vuol dire che è come se non esistesse e viene considerato solo per la determinazione della quota del punto di calcolo Q
- Si considerano solo i conduttori percorsi da corrente

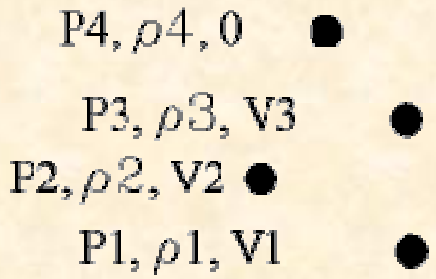


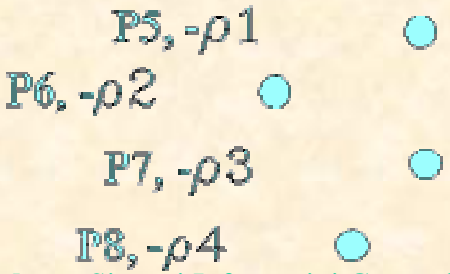


$$\vec{B}(Q) = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{k=1}^{NC} I_k \frac{\hat{z} \times (Q - P_k)}{|Q - P_k|^2} \qquad \hat{z} \text{ uscente}$$

Approccio semplificato: calcolo del campo elettrico

- Il terreno viene considerato come **perfettamente conduttore**, e se ne tiene conto utilizzano la teoria delle cariche immagine.
- Il terreno deve essere piano e privo di irregolarità
- Si considerano tutti i conduttori anche la fune di guardia che è posta al potenziale di terra.
- Le densità lineari di carica sui conduttori (reali ed immagine) non sono note.





$$\vec{E}(Q) = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \sum_{k=1}^{2\square NC} \rho_k \frac{(Q - P_k)}{|Q - P_k|^2}$$

Dalle tensioni alle densità di carica

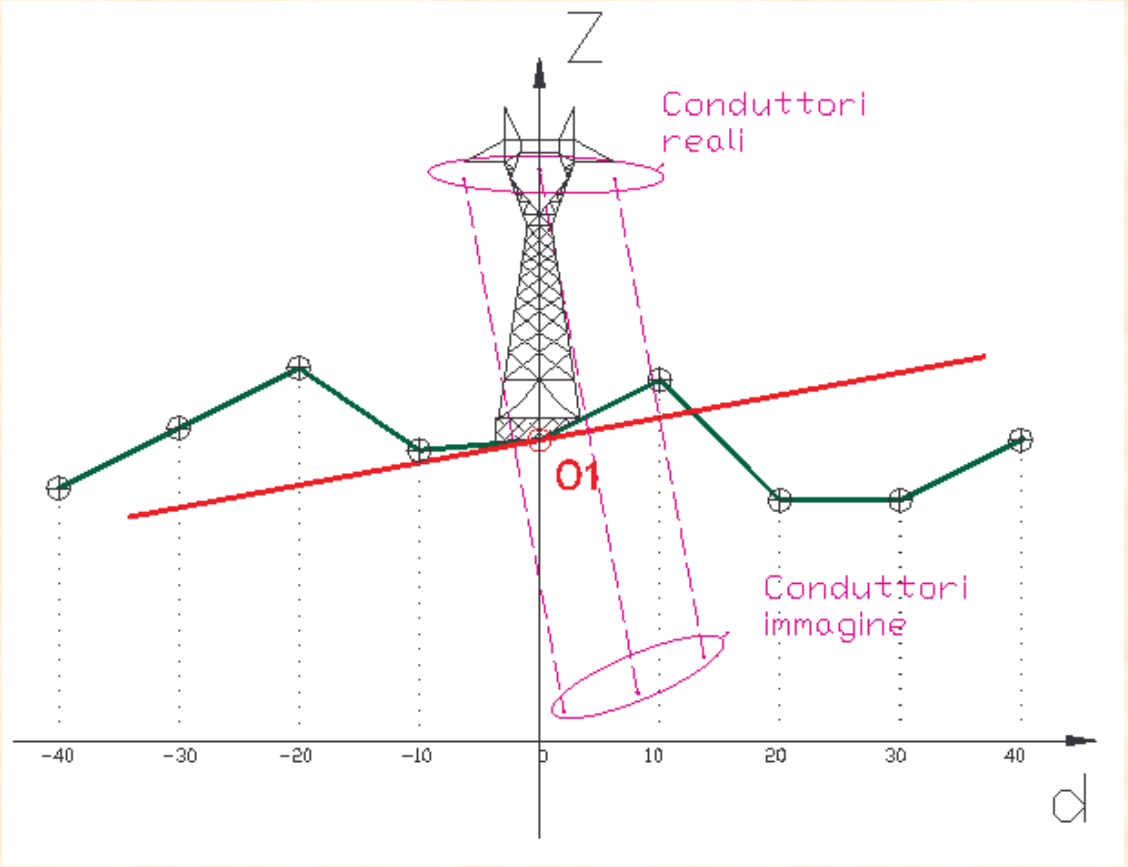
Per determinare le densità di carica è necessario risolvere il sistema lineare di NC equazioni in NC incognite (le densità ρ_k), ciascuna della seguente forma (l va da 1 a NC)

$$V_l = -\frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\sum_{k=1}^{2\cdot NC}\rho_k \ln\frac{d_{kl}}{h_k} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\sum_{k=1}^{NC}\rho_k \ln\frac{d_{kl}}{d_{(k+NC)l}}$$

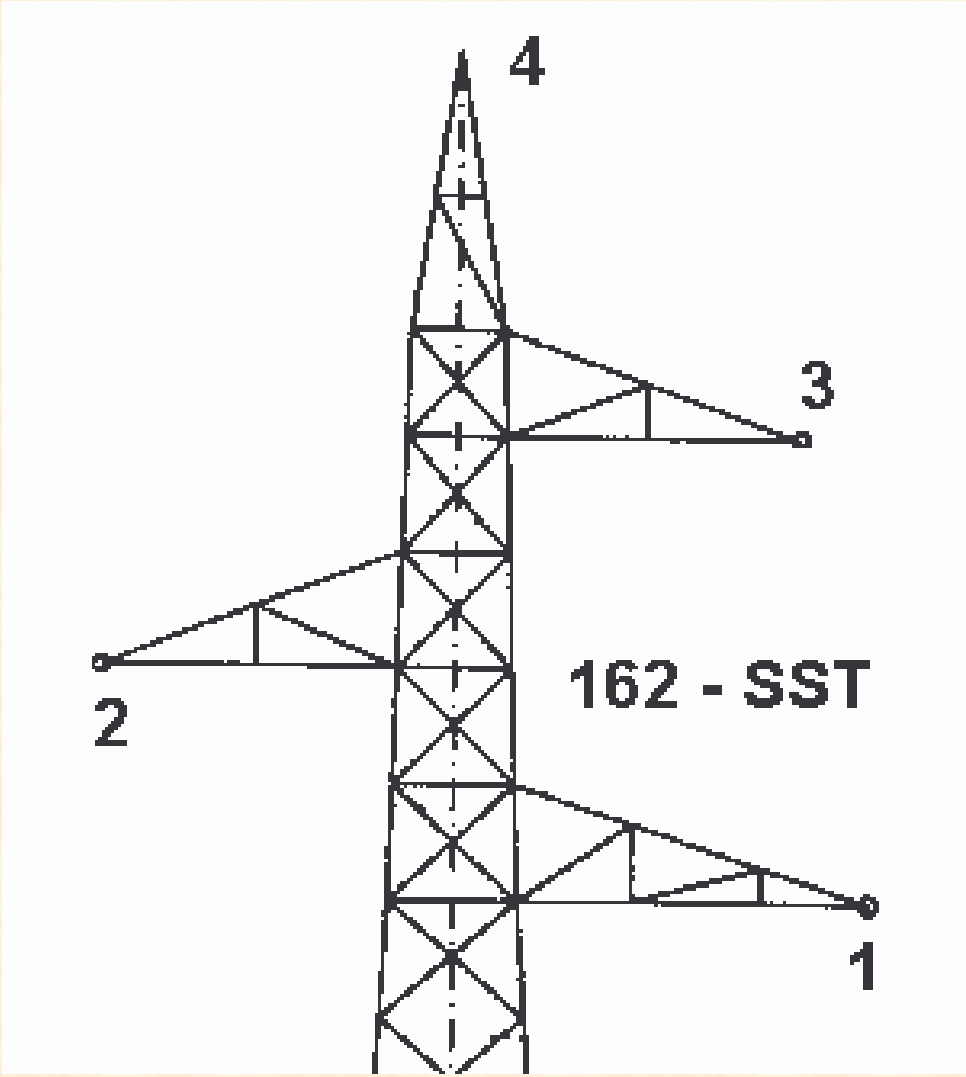
V_l è la tensione sul conduttore l-esimo **rispetto a terra**, ρ_k la carica sul conduttore k-esimo, h_k la sua altezza da terra, d_{kl} la distanza dal centro del conduttore k-esimo alla superficie del conduttore l-esimo, d_{kk} è il raggio del conduttore k-esimo.

Rappresentazione del terreno

- L'approccio semplificato "funziona" anche con terreno non orizzontale.
- In caso di terreno non piano lo si deve rappresentare con il "miglior" piano possibile.
- Il punti di calcolo possono comunque essere determinati lungo il profilo del terreno reale.



Approccio semplificato: struttura di riferimento

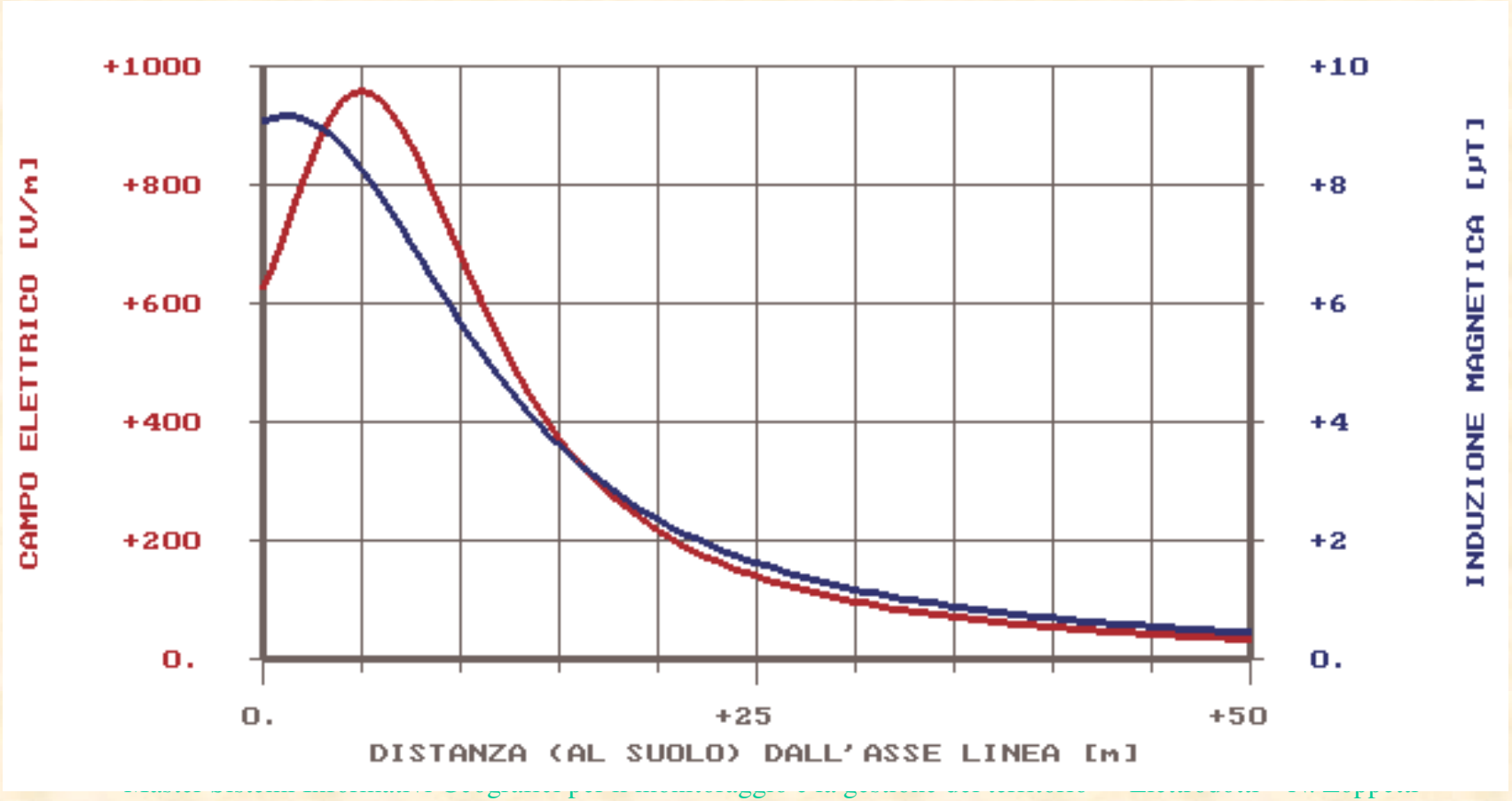


- 132 kV semplice terna
- 800 A
- Conduttore singolo 2r=31.5 mm

X[m]	Y[m]	V[V]	I[A]	FASE
+3.50	0.00	76210	800	+120
-3.00	+2.00	76210	800	0
+2.90	+4.00	76210	800	-120
0.00	+9.35	0	0	0

Risultato dell'esempio

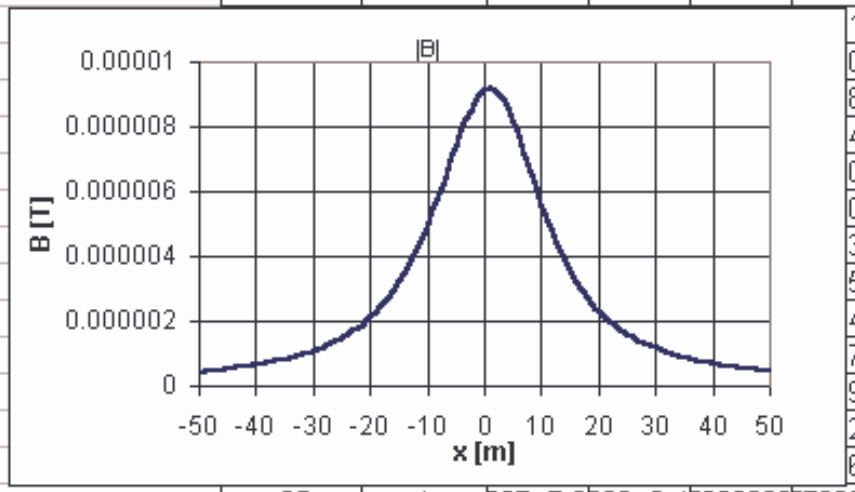
- ESEMPIO:
  - –Conduttore più basso ad una altezza h = 10 m dal suolo
  - –Calcolo lungo la direzione trasversale, a 1 m da terra, per una distanza da 0 a 50 m dall'asse della linea



Risultato dell'esempio

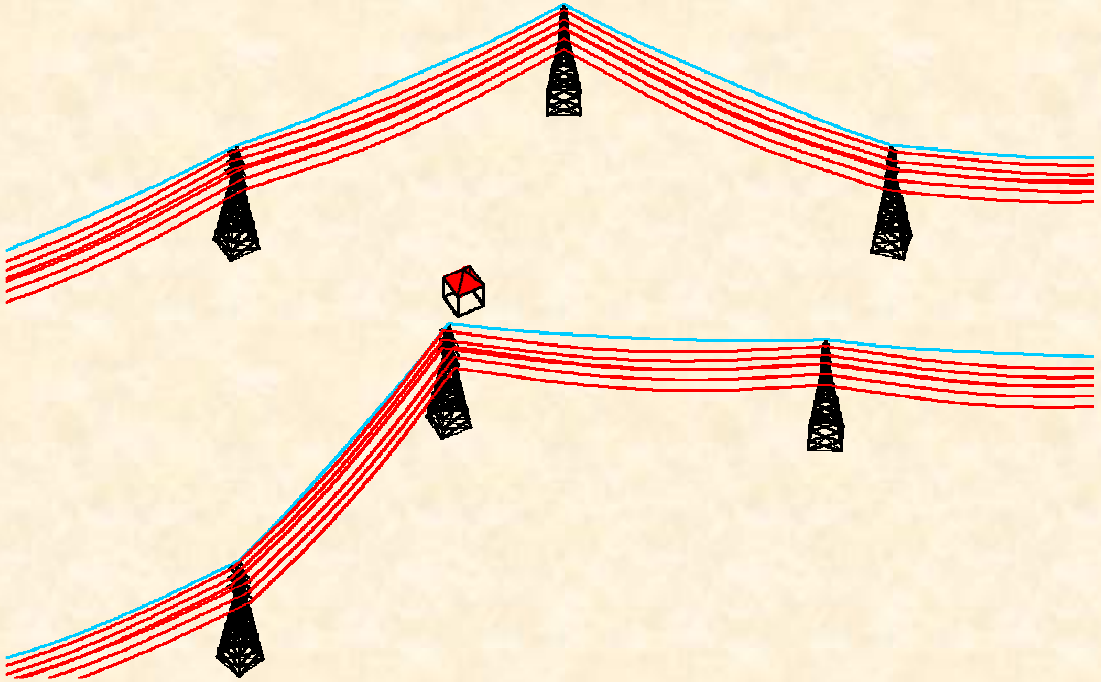
	x	y	I	f	Re_I	Im_I	I_complessa
Conduttore1	3.5	10	800	-120	-400	692.82	692.820323027551i
Conduttore2	-3	12	800	0	800	0	800
Conduttore3	2.9	14	800	120	-400	-692.8	692.820323027551i

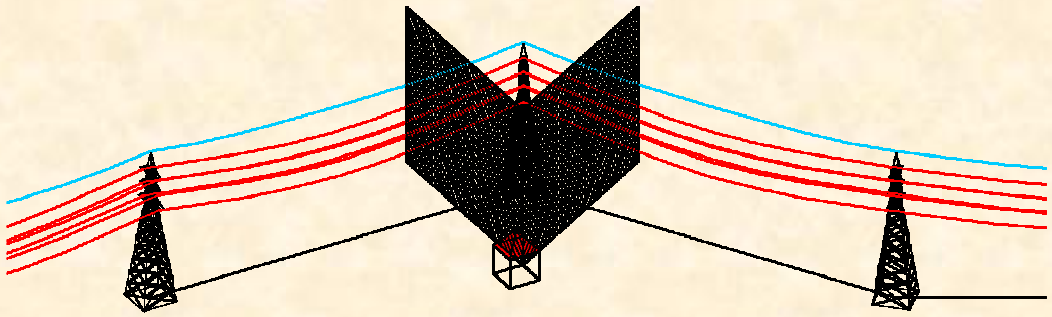
Coordinate punti di calcolo		Contributo conduttore 1		Contributo conduttore 2		Contributo conduttore 3		Campo totale		
x	y	Bx1	By1	Bx2	By2	Bx3	By3	Bx	By	Modulo B
-50	1	007+4.2	006+2.5	8068669	7811158	E-007-6.070	006-2.4	E-007-1.8333	007+4.852	4.26791E-07
-49	1	-007+4.3	006+2.5	3928475	0697362	E-007-6.292	006-2.5	E-007-1.8972	007+5.175	4.43432E-07
					148	E-007-6.527	006-2.5	E-007-1.9644	007+5.525	4.61049E-07
					048	E-007-6.774	006-2.6	E-007-2.0349	007+5.903	4.7972E-07
					802	E-007-7.035	006-2.64	E-007-2.1091	E-007+6.31	4.99527E-07
					4004	E-007-7.312	006-2.69	E-007-2.1872	007+6.756	5.20563E-07
					048	E-007-7.605	006-2.7	E-007-2.2693	007+7.238	5.42931E-07
					047	E-007-7.915	006-2.75	E-007-2.3558	007+7.762	5.66741E-07
					359	E-007-8.244	006-2.8	E-007-2.4470	E-007+8.33	5.92119E-07
					559	E-007-8.593	006-2.90	E-007-2.5431	E-007+8.95	6.19201E-07
					416	E-007-8.964	006-2.95	E-007-2.6445	E-007+9.63	6.48139E-07
					788	E-007-9.359	006-3.0	E-007-2.7515	-007+1.037	6.79102E-07
					912	E-007-9.7802	006-3.0	E-007-2.8645	007+1.119	7.12278E-07
					293	E-007-1.022	006-3.1	E-007-2.9837	E-007+1.20	7.47877E-07
					636	E-007-1.070	006-3.20	E-007-3.1097	-007+1.306	7.86131E-07
-35	1	007+7.9	006+3.4	7903930	6720524	E-007-1.122	006-3.2	E-007-3.2429	007+1.414	8.27303E-07
-34	1	-007+8.3	006+3.4	7375231	3512014	E-007-1.176	006-3.3	E-007-3.3836	-007+1.532	8.71684E-07
-33	1	007+8.8	006+3.5	0195886	8261508	E-007-1.2356	006-3.4	E-007-3.5322	-007+1.664	9.19605E-07



Situazioni critiche per l'applicazione dell'approccio semplificato

1. Presenza di più linee non parallele

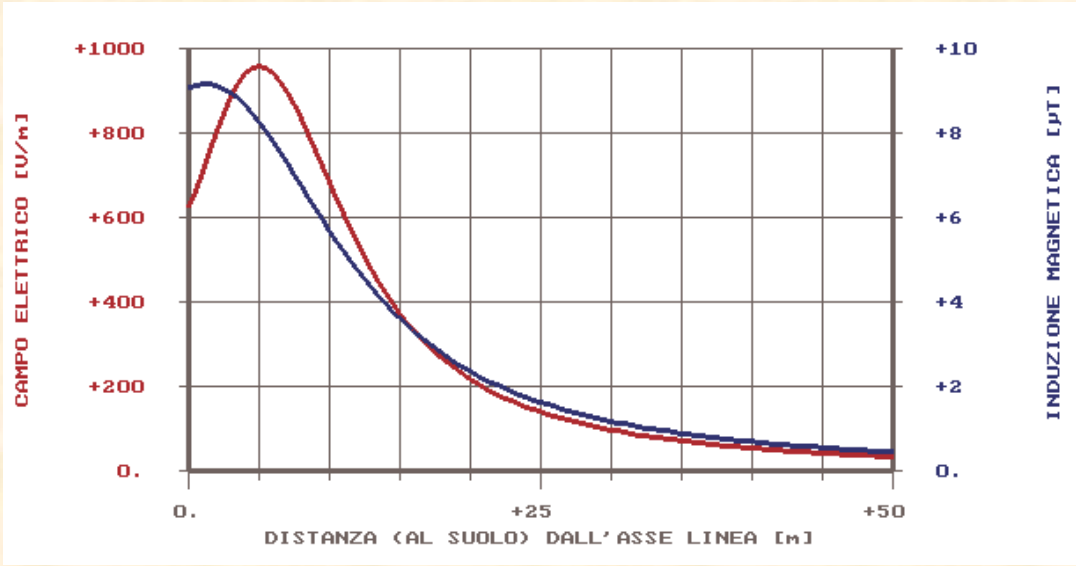


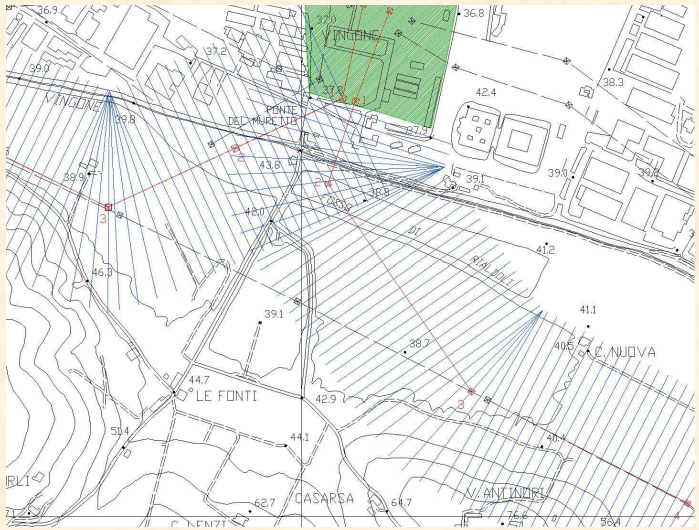


2. Cambi di direzione pronunciati della linea

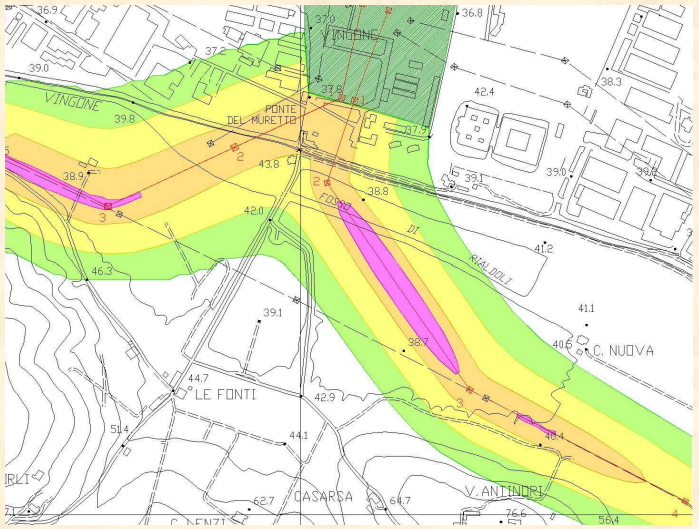
Situazioni critiche per l'applicazione dell'approccio semplificato

- Formato dei risultati inadatto a rappresentare vaste porzioni di territorio



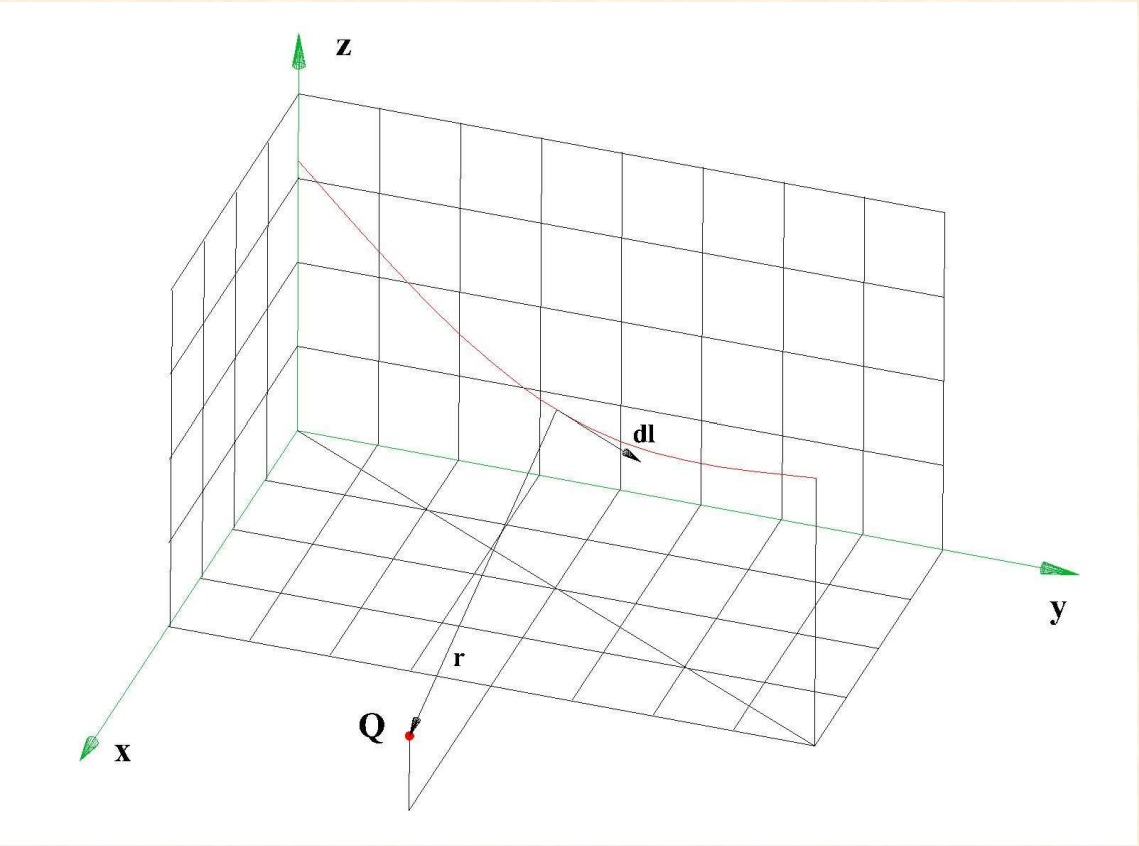


da		a
0,2 µT		0,5 µT
0,5 µT		2 µT
2 µT		5 µT
5 µT		



Approccio avanzato

- Si applica con semplicità al calcolo della sola induzione magnetica.
- Si basa sull'integrazione numerica della prima legge di Laplace sulle catenarie. Consiste cioè nel rappresentare ogni catenaria con un sottoinsieme delle sue corde, ciascuna delle quali contribuisce al campo totale secondo la prima legge di Laplace.



$$\vec{B}(Q) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_l \frac{\vec{dl} \times \vec{r}}{r^3}$$

Fenomeni del secondo ordine

Volendo raffinare ulteriormente il modello di calcolo per l'induzione magnetica si dovrebbero considerare inoltre:

- Le correnti indotte nel terreno
- Le correnti indotte nelle funi di guardia

Si tratta di fenomeni che contribuiscono in maniera sensibile al campo solo in situazioni molto particolari e che possono essere trascurati nella grande maggioranza dei casi.

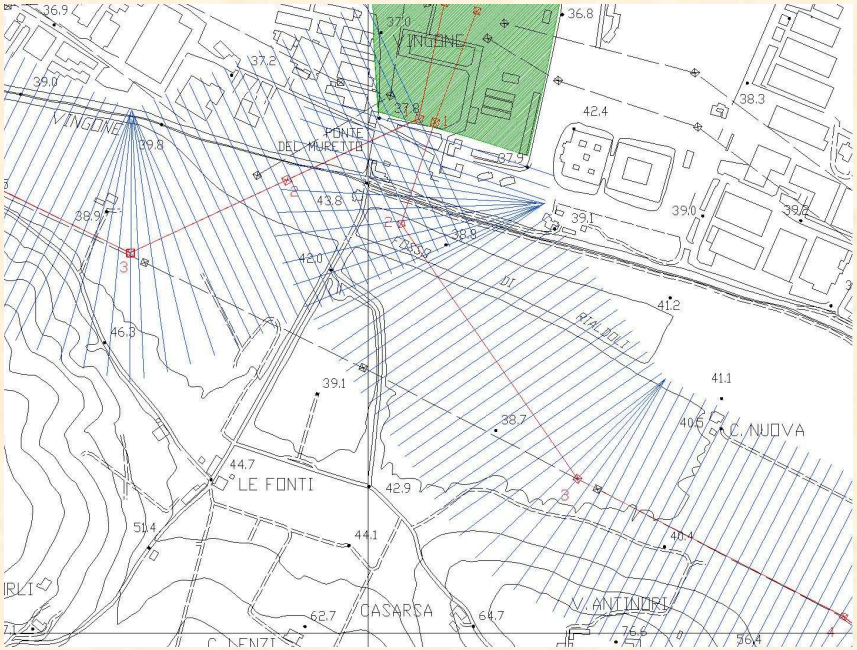
Approccio avanzato e campo elettrico

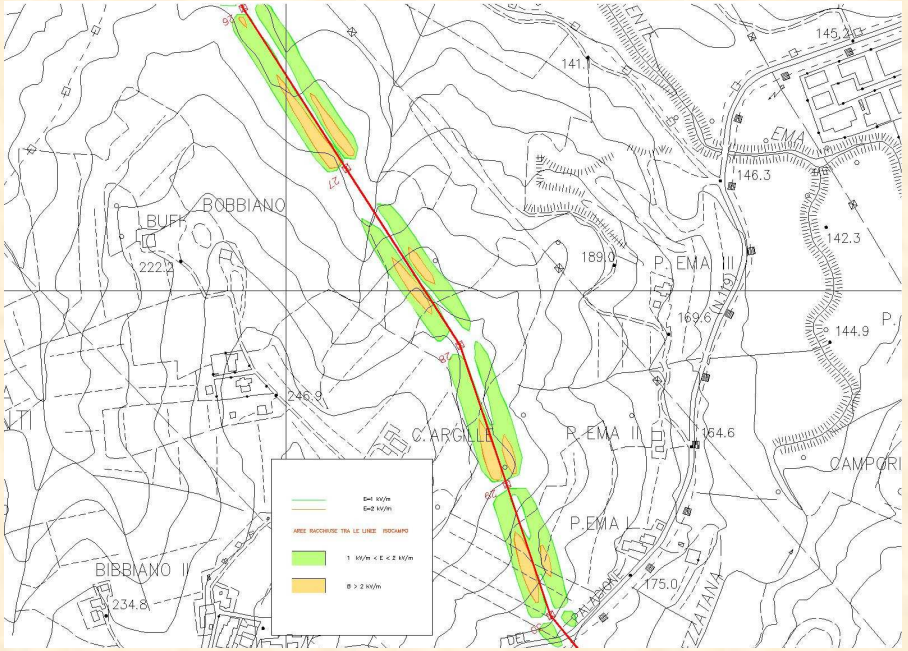
Non viene preso in considerazione per diversi motivi :

- è molto complicato tenere conto della variazione di altezza dal terreno dei conduttori;
- è inutile introdurre un grande dettaglio nella descrizione dei conduttori se si continuano a trascurare elementi altrettanto importanti quali la conformazione del terreno, la presenza della vegetazione e dei manufatti e la struttura metallica dei sostegni;
- alle basse frequenze il campo elettrico viene considerato molto meno rilevante dell'induzione magnetica dal punto di vista protezionistico.

Approccio avanzato e campo elettrico

È possibile utilizzare un approccio ibrido per cui su ogni sezione trasversale di linea considerata si applica il metodo semplificato bidimensionale. Come per l'induzione magnetica le curve di livello vengono determinate unendo i punti a livello di campo prefissato trovati su ogni sezione trasversale.

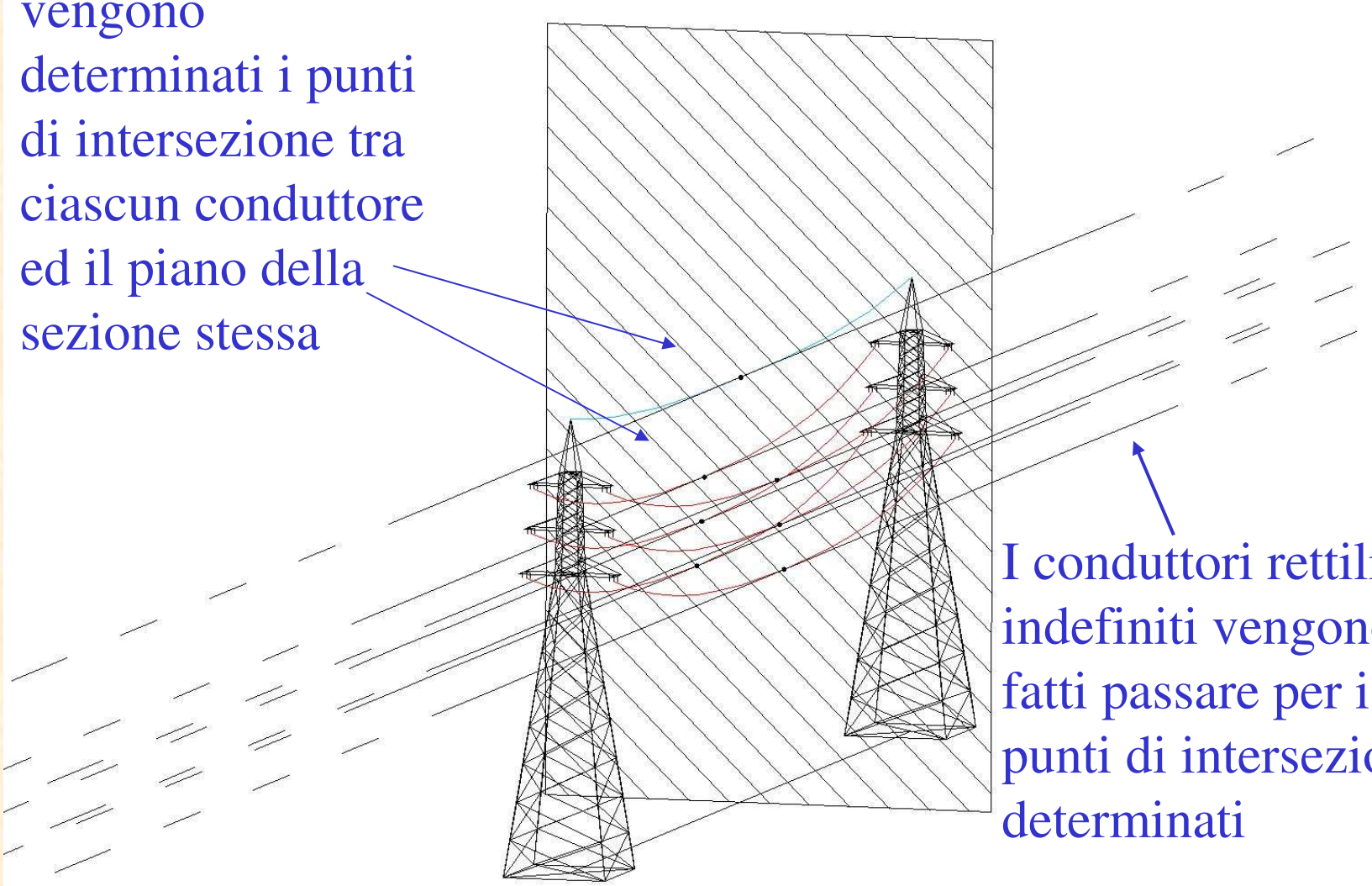




Confronto fra approccio semplificato ed avanzato

Confronto

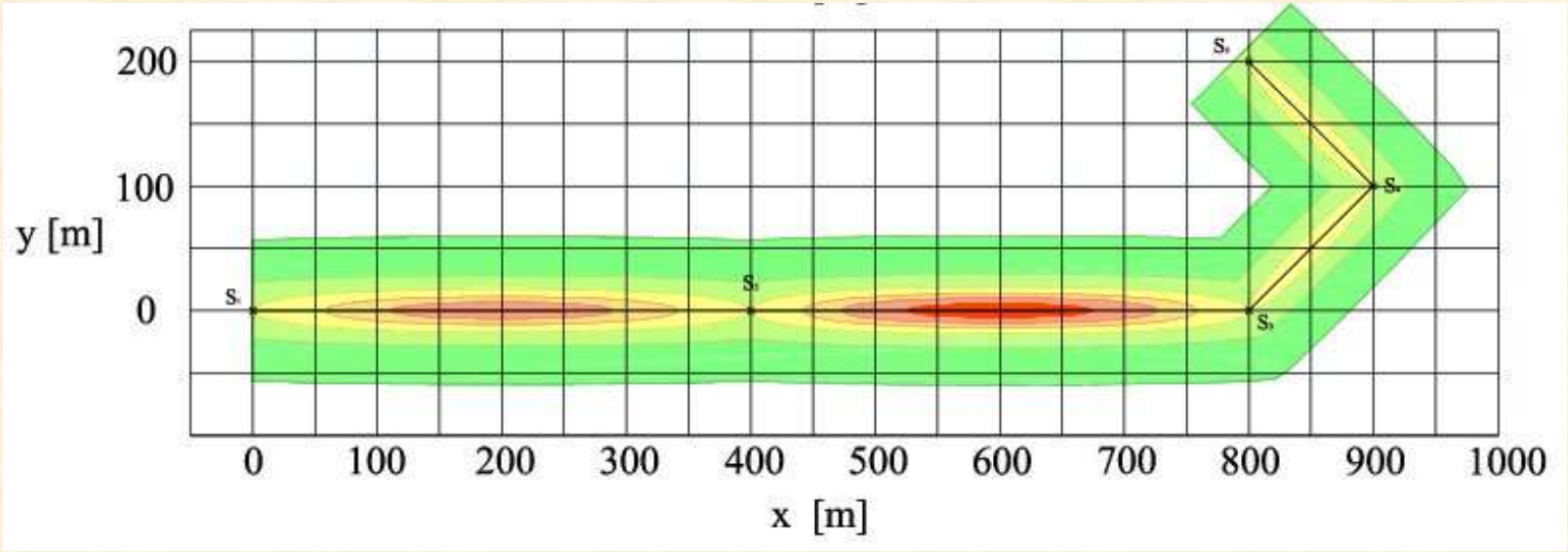
Su ogni sezione vengono determinati i punti di intersezione tra ciascun conduttore ed il piano della sezione stessa



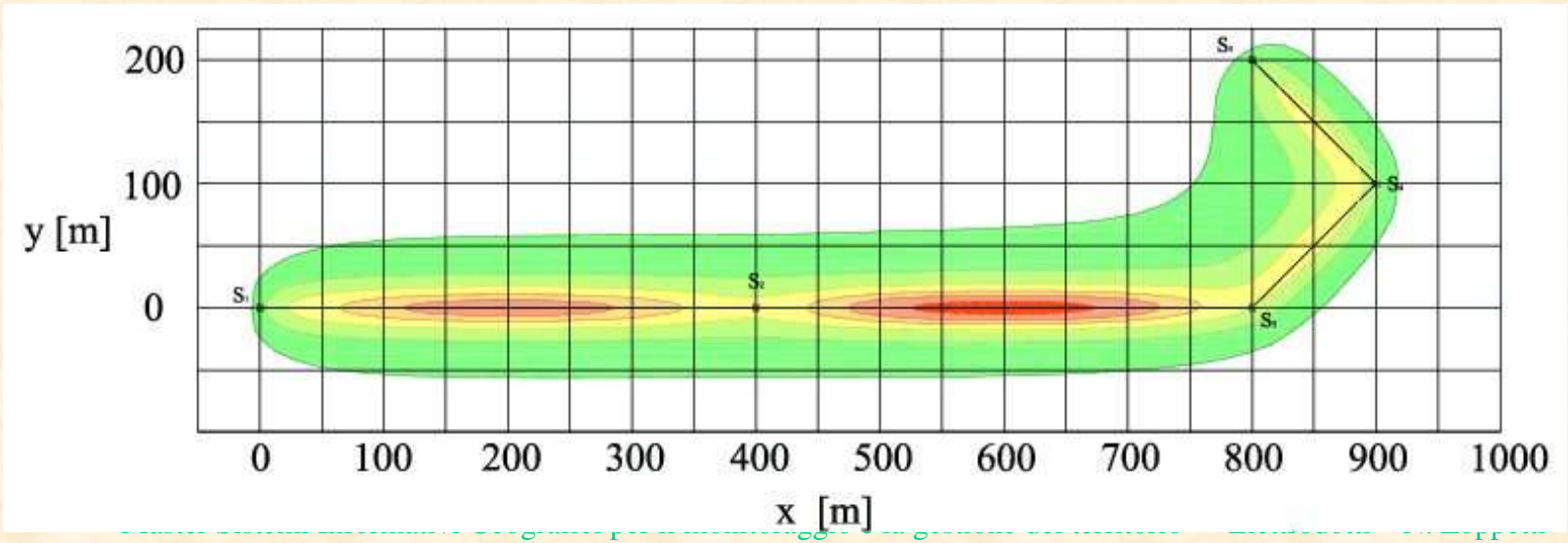
I conduttori rettilinei indefiniti vengono fatti passare per i punti di intersezione determinati

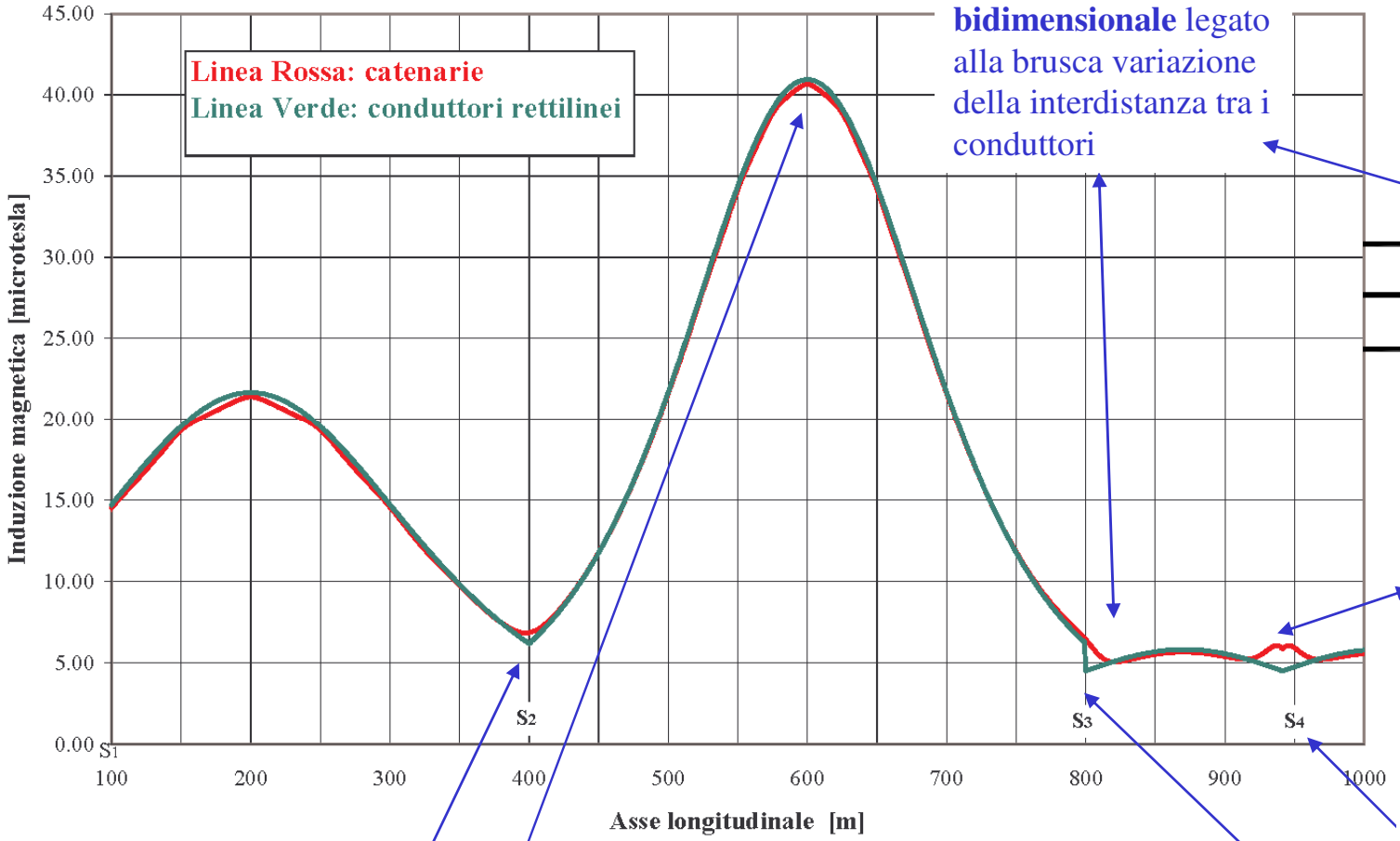
Confronto

Conduttori rettilinei ed indefiniti

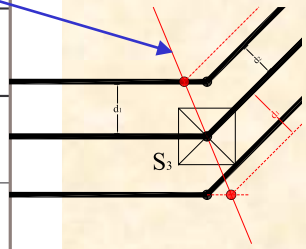


Catenarie

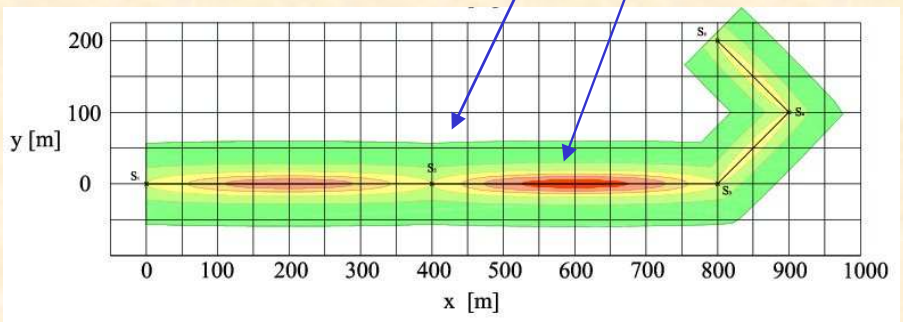


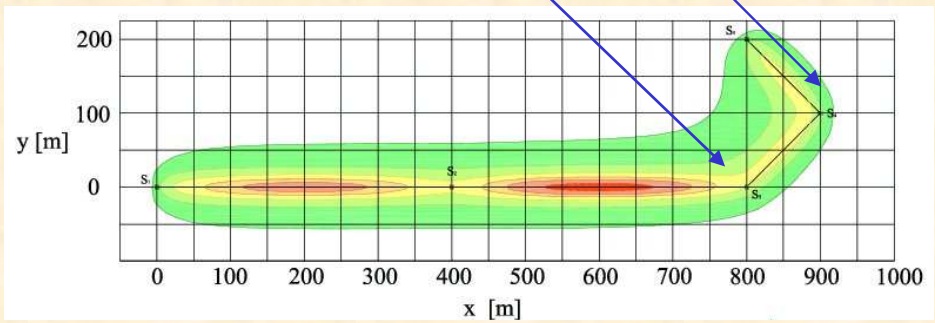


Linite modello bidimensionale legato alla brusca variazione della interdistanza tra i conduttori



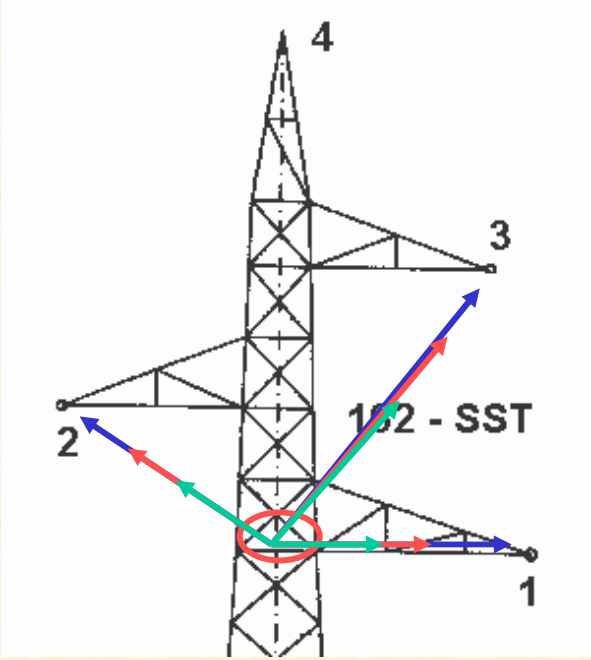
Maggiore accuratezza del modello tridimensionale: composizione contributi campate a monte e a valle del cambio di direzione





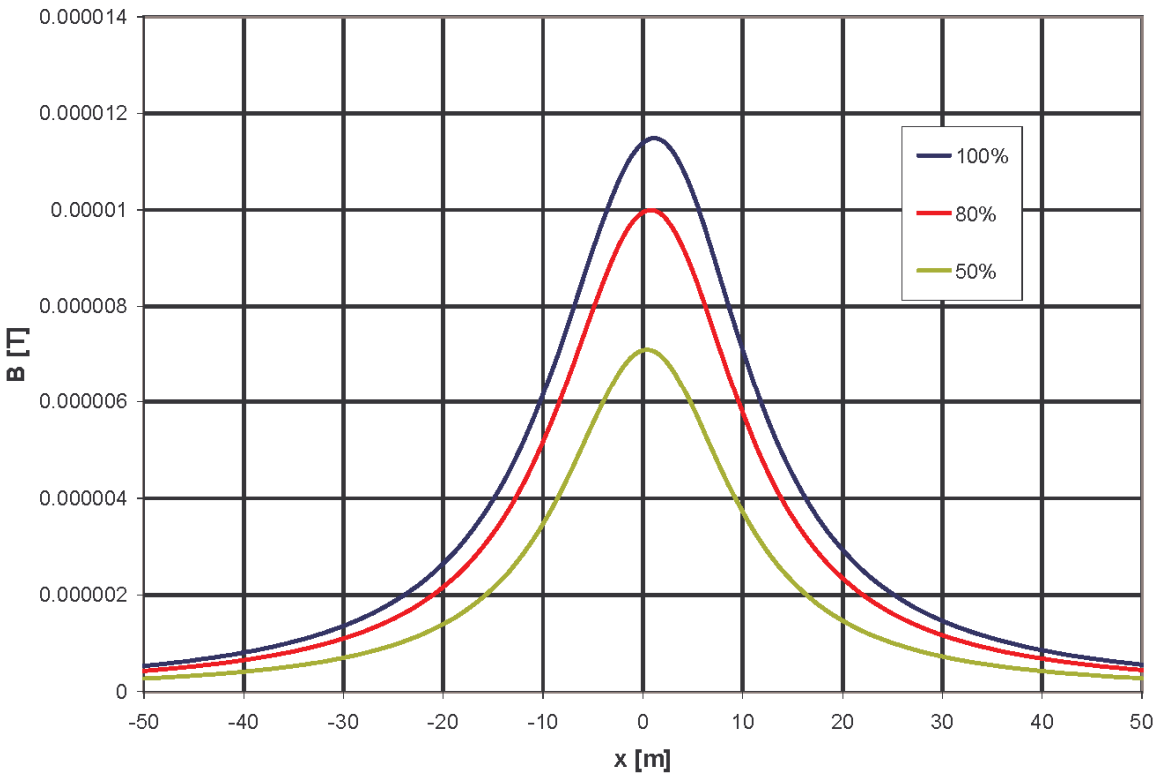
Possibili interventi per la mitigazione del campo

Strutture compatte



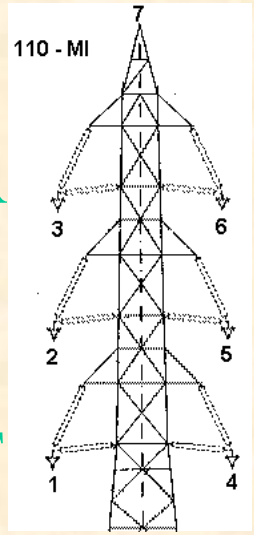
X[m]	Y[m]	V[V]	I[A]	FASE
+3.50	0.00	76210	1000	+120
-3.00	+2.00	76210	1000	0
+2.90	+4.00	76210	1000	-120

- 132 kV semplice terna
- 1000 A
- h=10 m



Ottimizzazione delle fasi per una doppia terna

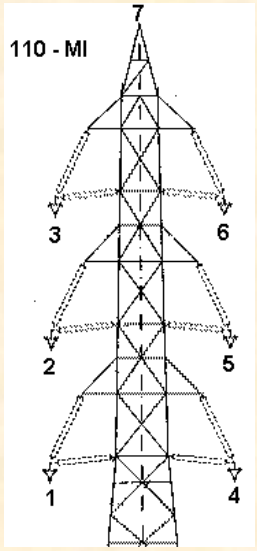
Configurazione non ottimizzata



R R

S S

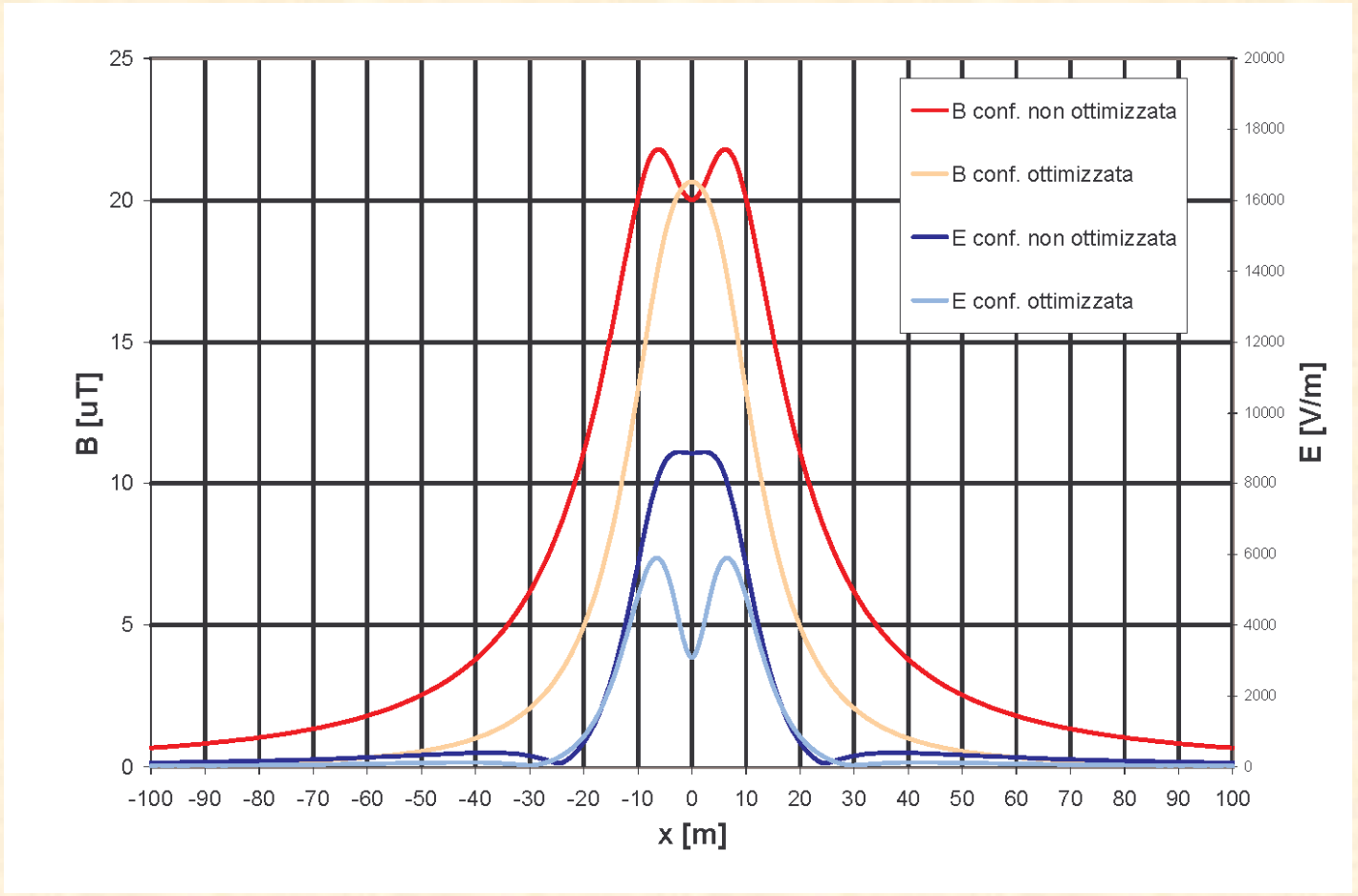
T T



R T

S S

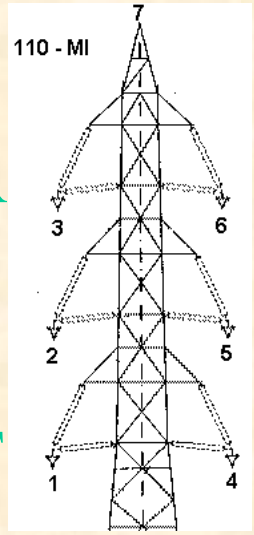
T R



Configurazione ottimizzata

Ottimizzazione delle fasi per una doppia terna

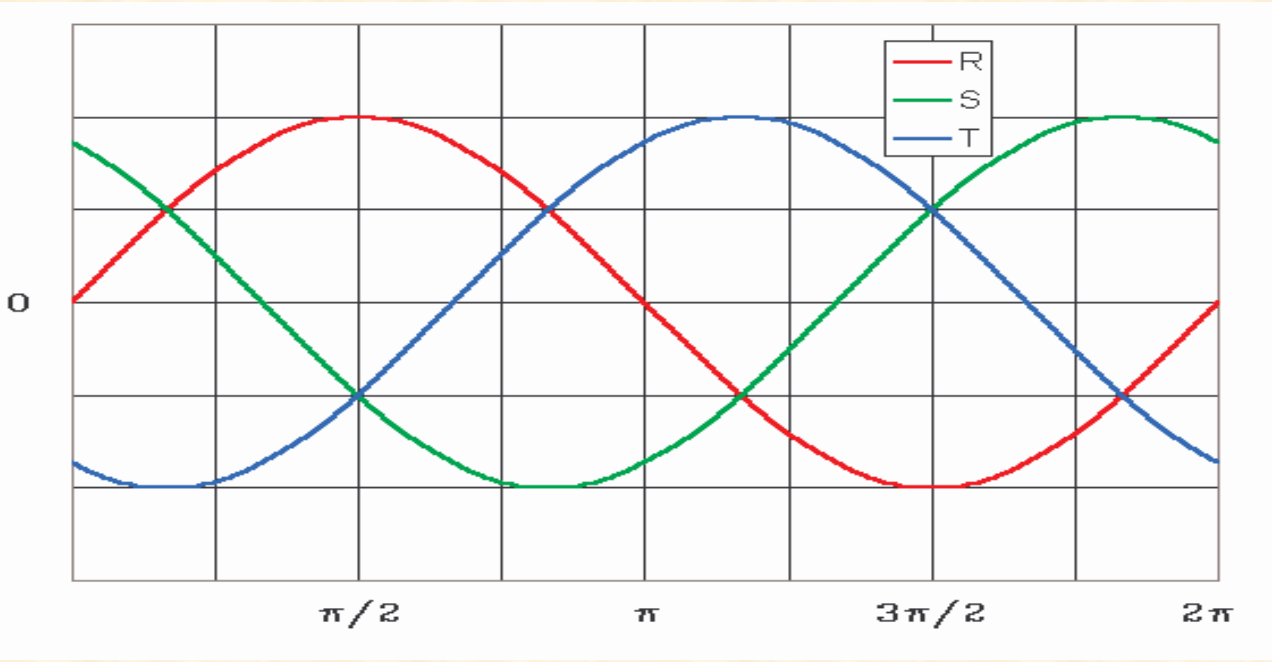
Configurazione non ottimizzata

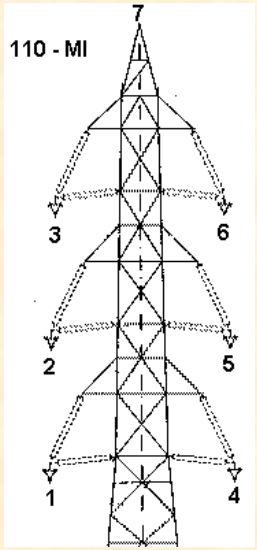


R R

S S

T T





R T

S S

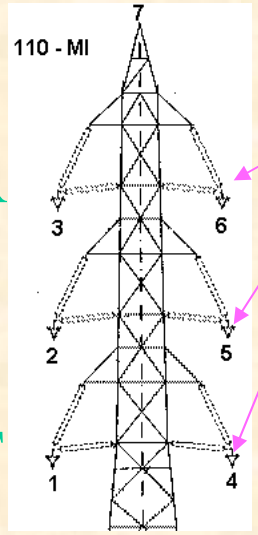
T R

Nella configurazione ottimizzata si massimizzano le distanze tra fasi omologhe

Configurazione ottimizzata

“sdoppiamento” delle fasi per un singola terna

Singola terna



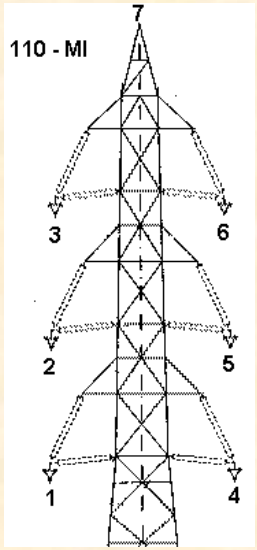
R

S

T

I=0 A

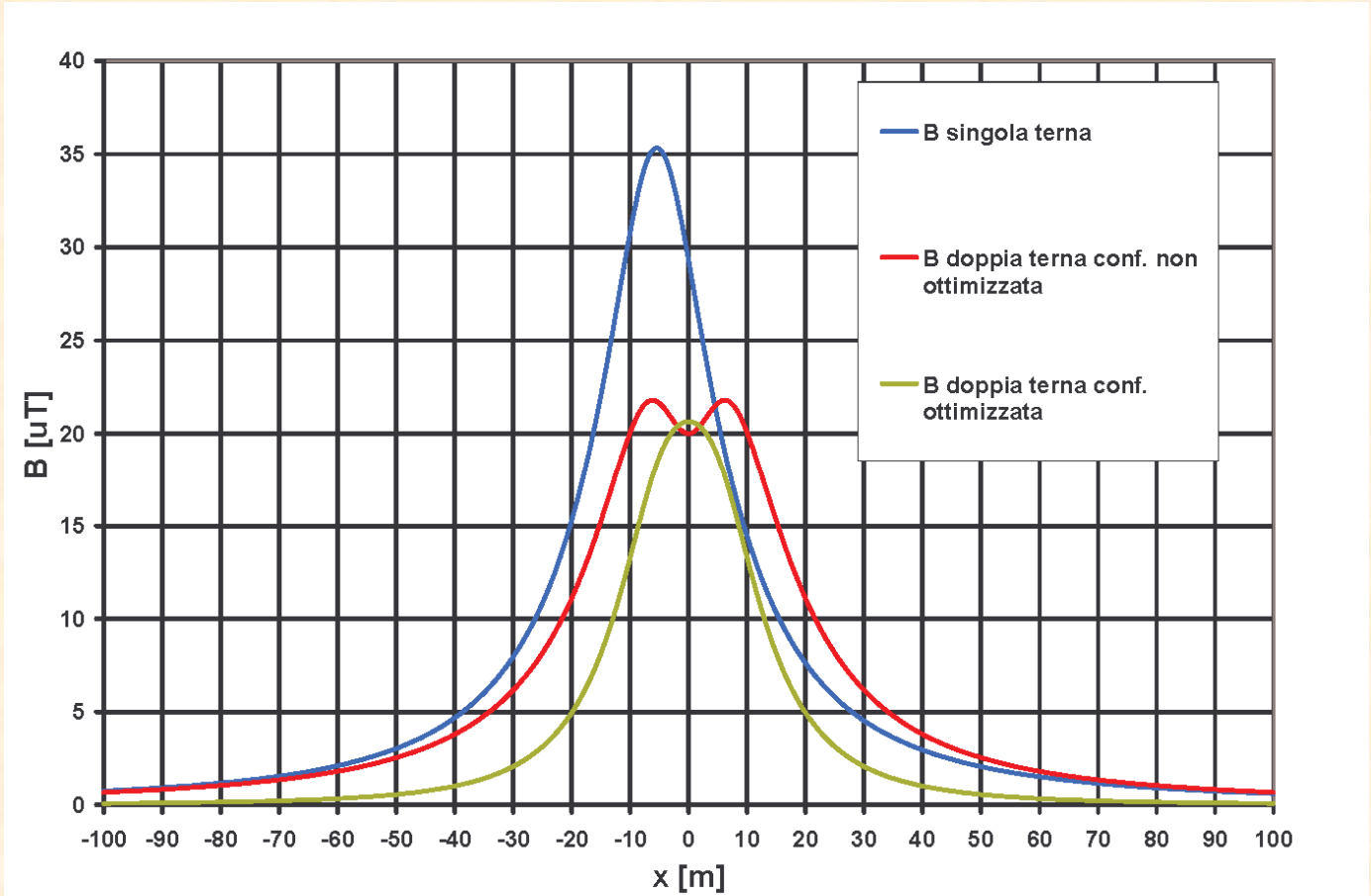
- Singola terna 2000 MW: 3000 A
- Doppia terna 2000 MW: 1500 A per terna



R T

S S

T R



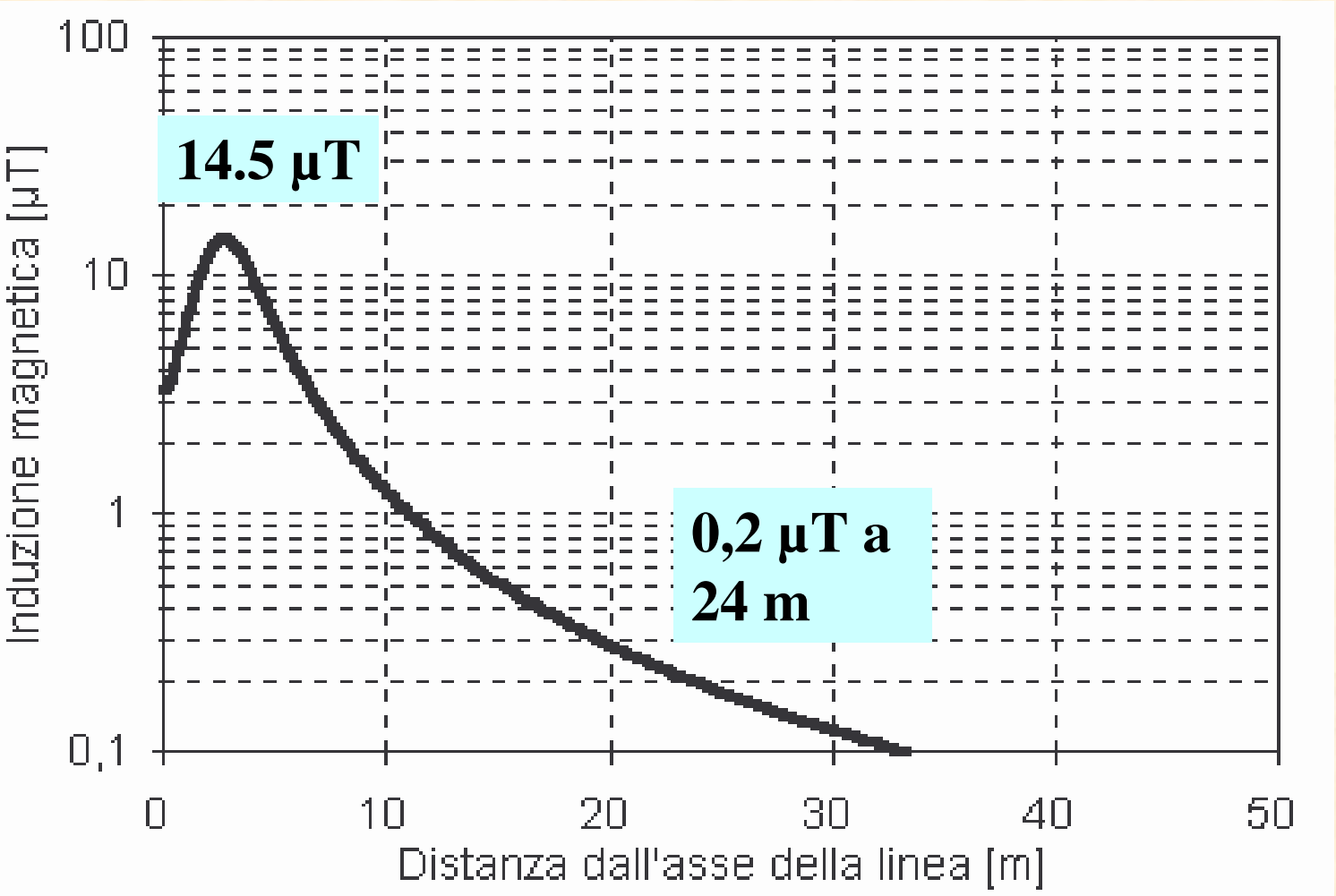
Doppia terna ottimizzata

Elettrodotti interrati

- Sono sorgenti di sola induzione magnetica in quanto il terreno scherma il campo elettrico
- Profondità di interramento dei cavi nell'ordine del metro e mezzo
- L'induzione magnetica decade molto rapidamente allontanandosi dai conduttori per effetto delle piccole mutue distanze tra i conduttori stessi.
- I livelli massimi di campo misurabili immediatamente al di sopra dei conduttori sono spesso più elevati di quelli rilevati sotto ai conduttori di una linea aerea percorsa da corrente della stessa intensità.

Elettrodotti interrati: esempio

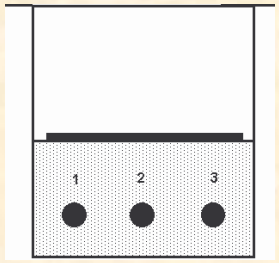
Profilo laterale del campo magnetico generato al livello del suolo da un elettrodotto **380 kV doppia terna piana da 1000 MW** (790 A) interrato ad una profondità di 1.85 metri. Il campo magnetico massimo (pari a circa 14.5 µT) è confrontabile con quello dell'elettrodotto in aria, tenendo conto del diverso livello di corrente trasportata (circa la metà).

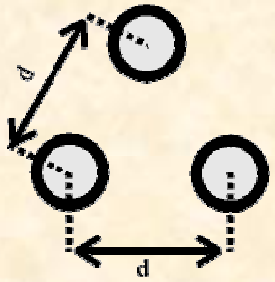


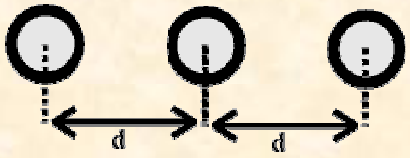
Esso si riduce più rapidamente con la distanza: gli 0.2 µT si raggiungono a soli 24 metri circa dall'asse della linea.

Elettrodotti interrati

Posa piana

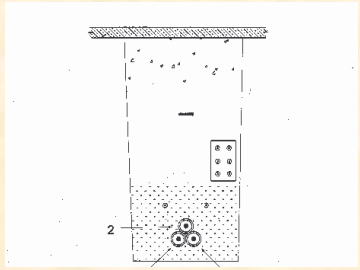
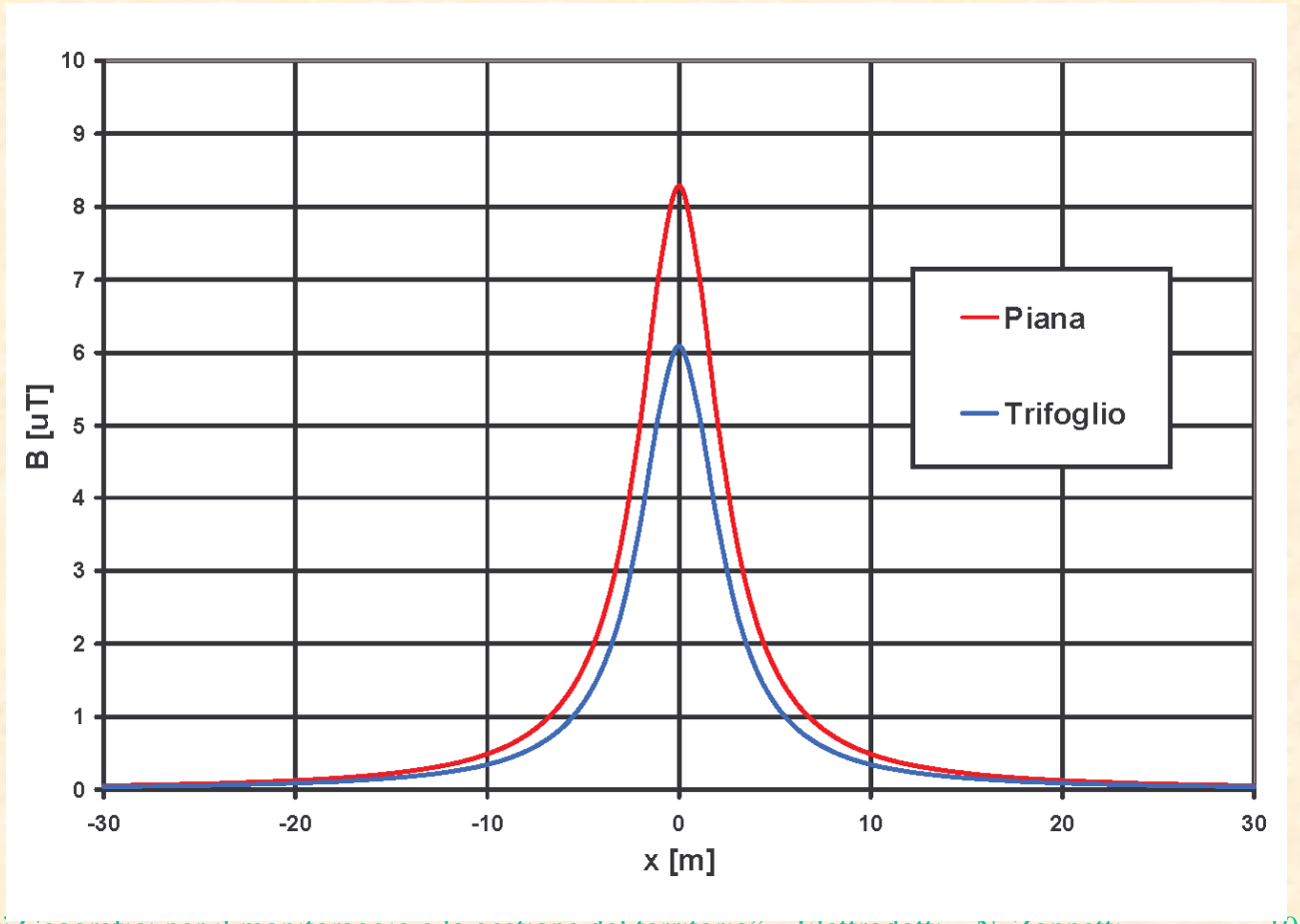






X[m]	Y[m]	I[A]	FASE
-0.15	0.00	1000	+120
0.00	0.00	1000	0
+0.15	0.00	1000	-120

Posa a trifoglio



X[m]	Y[m]	I[A]	FASE
-0.075	0.00	1000	+120
0.00	+0.13	1000	0
+0.075	0.00	1000	-120