

**Campi elettrici e magnetici a bassa frequenza:
sorgenti e metodi di valutazione**

Ing. Nicola Zoppetti – IFAC - CNR, Firenze

3 marzo 2009

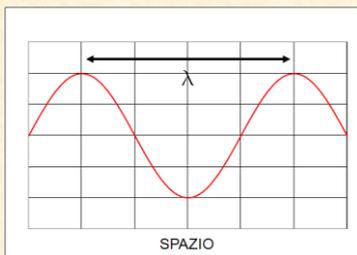
Sommario

- Cenni di Fisica dei campi a bassa frequenza.
- Caratteristiche degli Elettrodotti.
- Caratteristiche di una banca dati georeferenziata delle sorgenti: l'esempio di CERT (Catasto Elettrodotti Regione Toscana).
- Reperimento dei dati
- Metodi di calcolo del campo elettrico e magnetico a bassa frequenza.
- Esempi di applicazioni del calcolo.
- Possibili interventi per la mitigazione del campo magnetico.
- L'approccio CERT alla gestione di un modello del terreno.
- Vincoli imposti dalla normativa vigente e metodi utilizzabili per verificarli.



Master Sistemi Informativi Geografici per il monitoraggio e la gestione del territorio” – Elettrodotti – N. Zoppetti

Campi elettromagnetici: frequenza e lunghezza d'onda



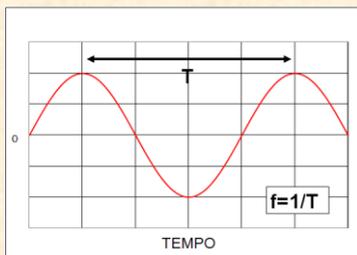
$$\lambda = \frac{c}{f} = cT$$

c è la velocità della luce
(300.000 km/sec circa in aria)

Nel caso degli elettrodotti
abbiamo che

$$T = \frac{1}{50} \text{ sec} \rightarrow f = 50 \text{ Hz}$$

$$\lambda \approx 6000 \text{ km}$$



Master Sistemi Informativi Geografici per il monitoraggio e la gestione del territorio” – Elettrodotti – N. Zoppetti

Quando il campo elettrico e magnetico si comportano come agenti fisici indipendenti?



Quando siamo a una distanza dalle sorgenti molto minore della lunghezza d'onda del campo elettromagnetico da esse generato

($\lambda \gg L$, Regime "Quasi-statico")

$$\lambda_0 = \frac{c_0}{f}$$

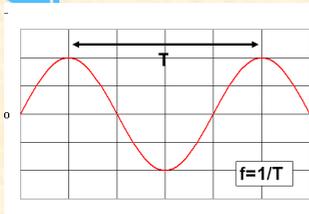
$$\epsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m}$$

$$\mu_0 \approx 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}$$

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \approx 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$$

	50 Hz	1 kHz	10 kHz	1 MHz
λ_0	6000 km	300 km	30 km	300 m

Bassa frequenza



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 da correnti

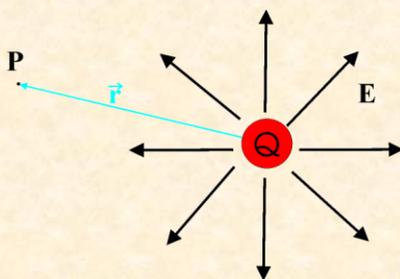
Induzione di corrente

Campo elettrico

Campo elettrico

A bassa frequenza si può considerare che il campo elettrico sia generato da distribuzioni di carica libera.

L'effetto del campo elettrico è quello di esercitare una forza sulle eventuali cariche in esso immerse



- Una carica q posta in P è sottoposta ad una forza

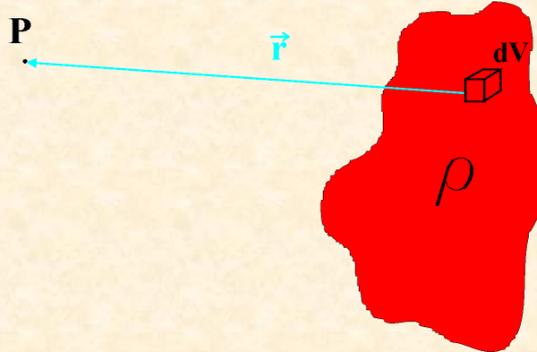
$$\vec{f} = q \cdot \vec{E}(P)$$

- Diretto “radialmente”
- Il verso del campo dipende dal segno della carica Q

$$\vec{E}(P) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{Q}{|\vec{r}|^3} \cdot \vec{r} \quad \left[\frac{V}{m} \right]$$

- La direzione del campo dipende dalla forma della distribuzione di carica

- Ogni volumetto di carica dV contribuisce al campo totale come una carica puntiforme $Q = \rho \cdot dV$

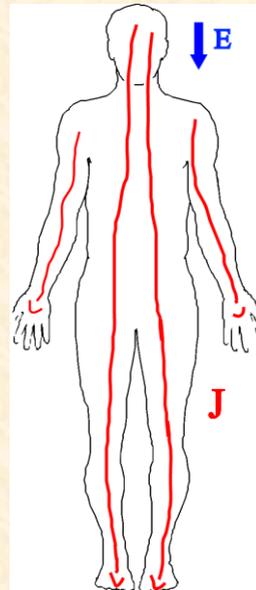


$$\vec{E}(P) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \int_V \frac{\rho}{|\vec{r}|^3} \cdot \vec{r} \cdot dV$$

densità di corrente [A/m²]

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E}$$

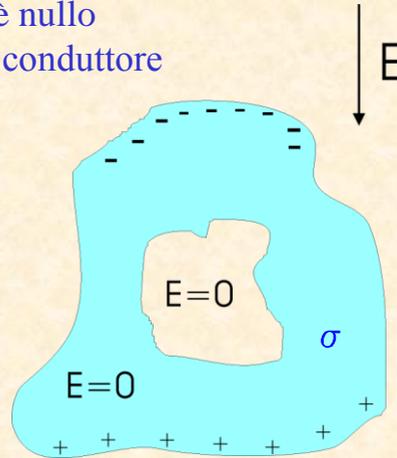
conducibilità [S/m]



Campo elettrico in presenza di conduttori



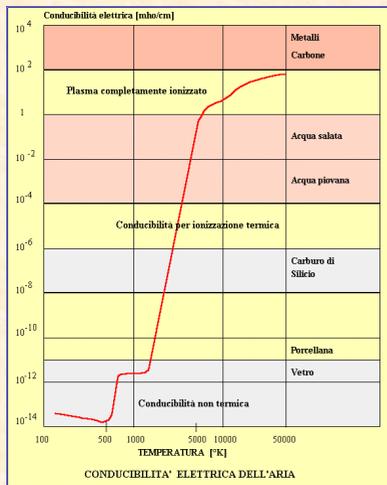
Il campo elettrico all'interno di un conduttore è nullo, come è nullo all'interno di un "guscio" conduttore cavo.



Assimilazione dei materiali a buoni conduttori



Se per un materiale è soddisfatta la condizione $\sigma \gg 2\pi f \epsilon_0$ si dice che questo, alla frequenza f , si comporta come un **buon conduttore**.



a 50 Hz: $2\pi f \epsilon_0 \approx 2,8 \cdot 10^{-10}$

a 1 MHz: $2\pi f \epsilon_0 \approx 5,5 \cdot 10^{-5}$

Aria:

$$2\pi \sigma_{aria, Ambiente} \approx 10^{-14} \frac{mho}{cm} = 10^{-12} \frac{S}{m}$$

~~$\sigma_{aria} \gg \omega \epsilon_0$~~

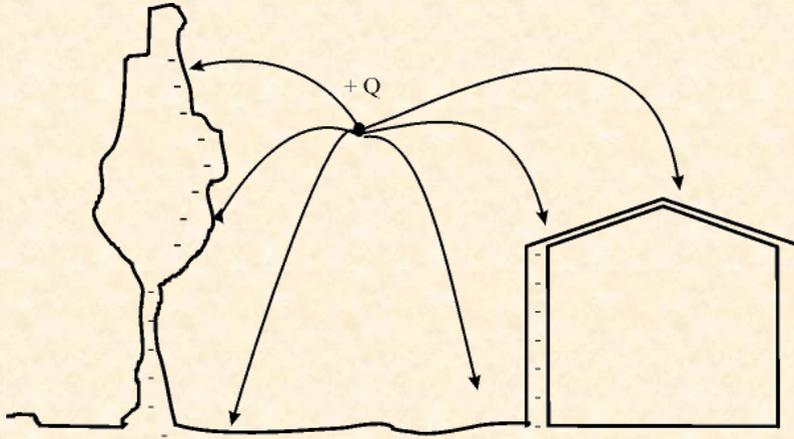
Terreno:

$$\sigma_{terreno umido} \approx 10^{-1} \frac{S}{m}$$

$\sigma_{terreno} \gg \omega \epsilon_{terreno}$

Esposizione al campo elettrico

Alle basse frequenze la vegetazione ed i manufatti si comportano come buoni conduttori e sono quindi in grado di schermare il campo elettrico.



Campo elettrico e potenziale

Il campo elettrico (campo vettoriale) in un punto può essere espresso in termini di una grandezza scalare detta **potenziale** che è l'energia potenziale per unità di carica associata nel punto considerato. La **differenza di potenziale** tra due punti rappresenta l'energia necessaria a spostare una carica di 1 Coulomb da un punto all'altro.

$$\phi(P) = -\frac{\rho}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{d}{d_{rif}}$$

$$\vec{E}(P) = -\nabla\Phi(P) = \frac{\rho}{2\pi\epsilon_0 d} \cdot \hat{d}$$

Campo magnetico

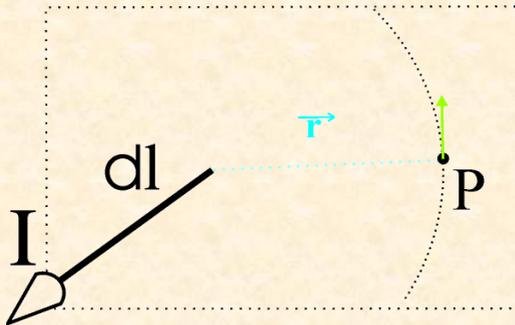
Campo magnetico ed induzione magnetica

- Non sono sinonimi: il campo magnetico si misura in **Ampere/metro** [A/m] l'induzione magnetica in **Tesla** [T].
- Le norme tecniche e legislative si riferiscono all'**induzione magnetica**
- Come unità di misura viene spesso usato il **microtesla** [μT] che corrisponde a 10^{-6}T a volte si usa il **Gauss** [G] che equivale a 10^{-4}T e quindi a $100 \mu\text{T}$.
- Il legame tra il campo magnetico e l'induzione magnetica in un punto è dato dalla cosiddetta **permeabilità magnetica** del mezzo che in aria ed in tutti i mezzi non ferromagnetici vale $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ [Henry/m].
- A differenza del campo elettrico il campo magnetico agisce solo sulle cariche in movimento.

$$\vec{B}(P) = \mu \cdot \vec{H}(P)$$

$$\vec{f} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}(P)$$

$$\vec{B}(P) = \frac{\mu \cdot I}{4\pi} \cdot \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{|\vec{r}|^3}$$

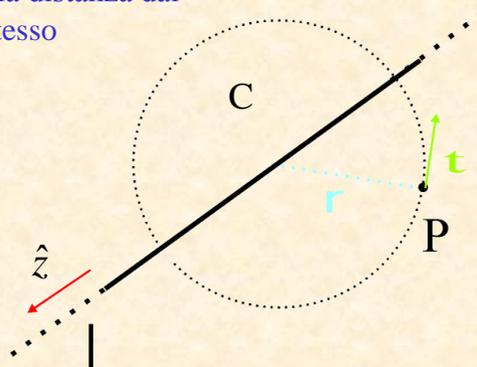


- L'induzione magnetica generata da un elemento infinitesimo di corrente giace sul piano ortogonale all'elemento di corrente stesso.

- L'induzione magnetica appare diretta in senso antiorario se guardata dalla parte da cui si vede la corrente scorrere verso se stessi.

Legge di **Biot-Savart**: il campo magnetico generato da un conduttore rettilineo ed indefinito decade con l'inverso della distanza dal conduttore stesso

$$\vec{B}(P) = \frac{\mu \cdot I}{2\pi} \cdot \frac{\hat{z} \times \vec{r}}{r^2} = \frac{\mu \cdot I}{2\pi \cdot r} \cdot \hat{t}$$

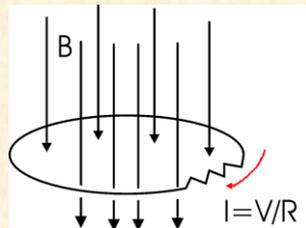
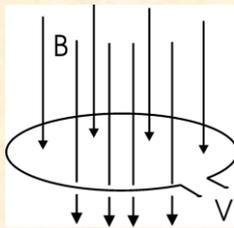


Campo magnetico: induzione di corrente



Legge di **Faraday**: in una spira immersa in un campo magnetico variabile viene indotta una forza elettromotrice proporzionale alla variazione del flusso dell'induzione magnetica concatenato alla spira stessa.

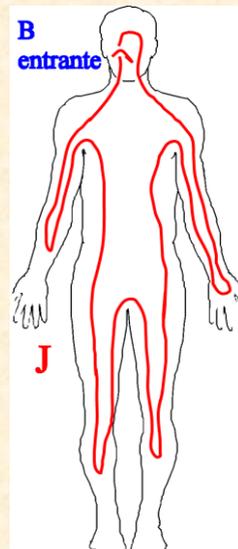
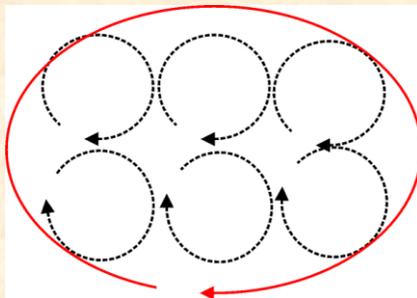
$$\left\{ \begin{array}{l} V = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} \\ \Phi = \iint_{S_{spira}} \vec{B} \cdot d\vec{S}_{spira} \end{array} \right.$$



Campo magnetico: induzione di corrente



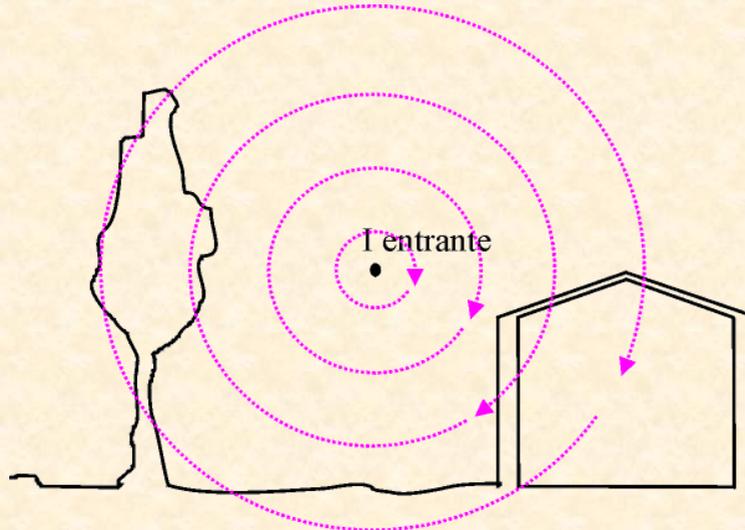
Le correnti indotte nell'organismo dal campo magnetico non fluiscono al suo esterno e questo implica che sia difficile misurarle in modo non invasivo.



Campo magnetico



Alle basse frequenze la vegetazione ed i manufatti non sono in grado di schermare il campo magnetico

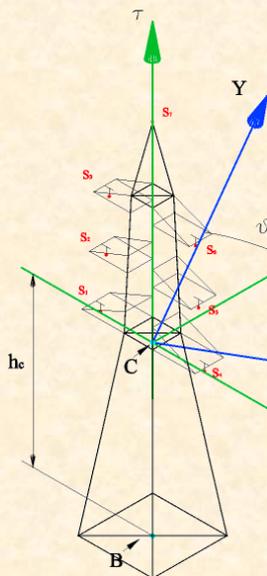


Caratteristiche degli elettrodotti



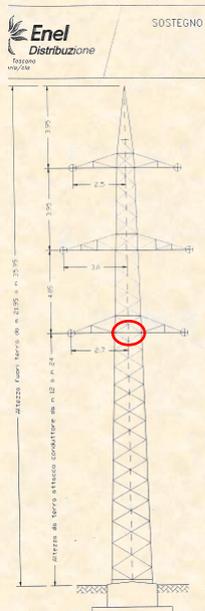
Dati tecnici rilevanti ai fini protezionistici:

- localizzazione e caratterizzazione dei sostegni
- caratterizzazione meccanica dei conduttori
- parametri elettrici



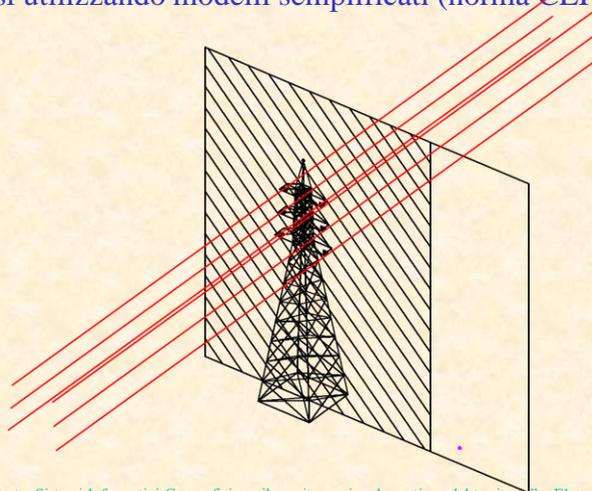
La caratterizzazione dei sostegni è funzionale alla localizzazione dei **punti di sospensione dei conduttori**; a questi fini è necessario disporre dei seguenti dati:

- Coordinate della base del sostegno
- Orientamento del sostegno
- Altezza da terra del conduttore più basso
- Struttura del sostegno

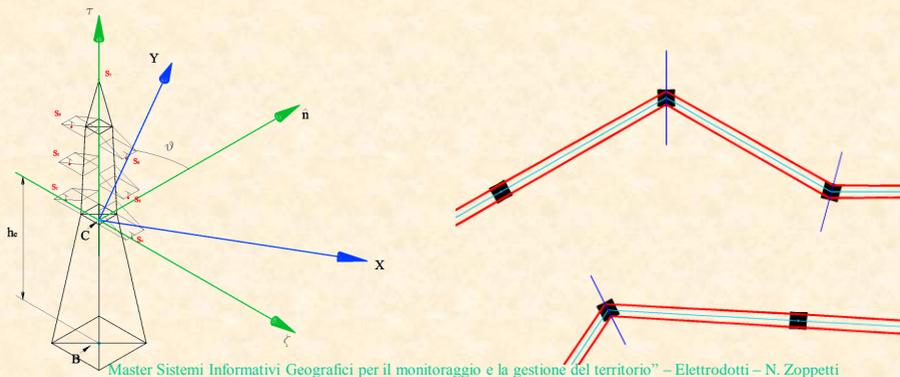


- La struttura del sostegno viene generalmente fornita sotto forma di schema su cui sono indicate le coordinate dei punti di sospensione sul piano di giacenza relativamente al “centro elettrico del sostegno”.
- L’altezza da terra h del conduttore più basso permette di ricavare la posizione dei punti di sospensione nel sistema di riferimento piano con origine nella base del sostegno, asse y verticale e coincidente con l’asse del sostegno, asse x orizzontale.

La conoscenza della struttura del sostegno, dell’altezza da terra del conduttore basso e dei parametri elettrici della linea permette di eseguire valutazioni approssimate dei campi emessi utilizzando modelli semplificati (norma CEI 211-4)



La posizione assoluta dei punti di sospensione dipende anche dall'orientamento del sostegno: tranne che in casi particolari (transizione doppia terna-singola terna) il piano dei punti di sospensione coincide il piano verticale individuato dalla bisettrice dell'angolo formato dalle campate della linea.



Master Sistemi Informativi Geografici per il monitoraggio e la gestione del territorio" – Elettrodotti – N. Zoppetti

27

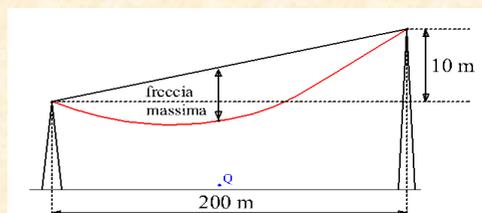
Ciascun conduttore è sospeso per i suoi estremi e si dispone nello spazio secondo una curva detta catenaria.

Note le coordinate dei punti di sospensione la forma della catenaria dipende da un solo ulteriore parametro detto **coefficiente di tesatura** (espresso in metri) detto anche **parametro**.

Il valore del coefficiente di tesatura dipende da molti fattori:

- le condizioni di posa
- le caratteristiche meccaniche del conduttore (elasticità e peso)
- **la sua temperatura**
- eventuale presenza di sovraccarichi (neve, ghiaccio, vento)

Temp.	k	Freccia massima
15°	1812 m	2,7 m
55°	1277 m	3,9 m
90°	1030 m	4,8 m

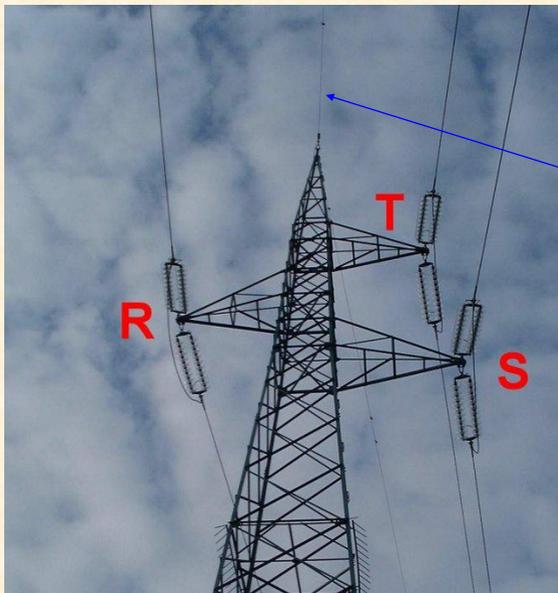


Master Sistemi Informativi Geografici per il monitoraggio e la gestione del territorio" – Elettrodotti – N. Zoppetti

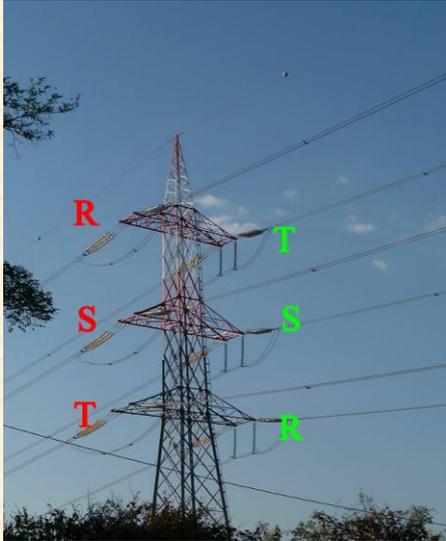
28

Parametri elettrici

Terna trifase – semplice terna

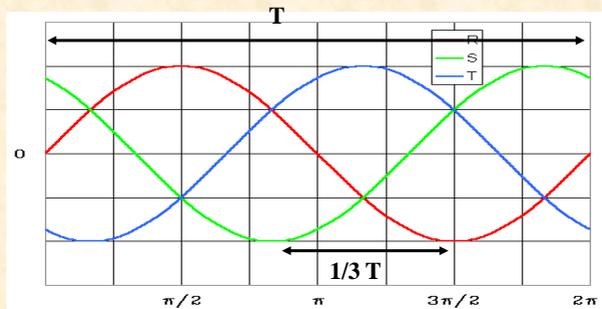


Fune di guardia



Due linee che condividono gli stessi sostegni in doppia terna sono comunque, a tutti gli effetti, del tutto indipendenti l'una dall'altra dal punto di vista elettrico.

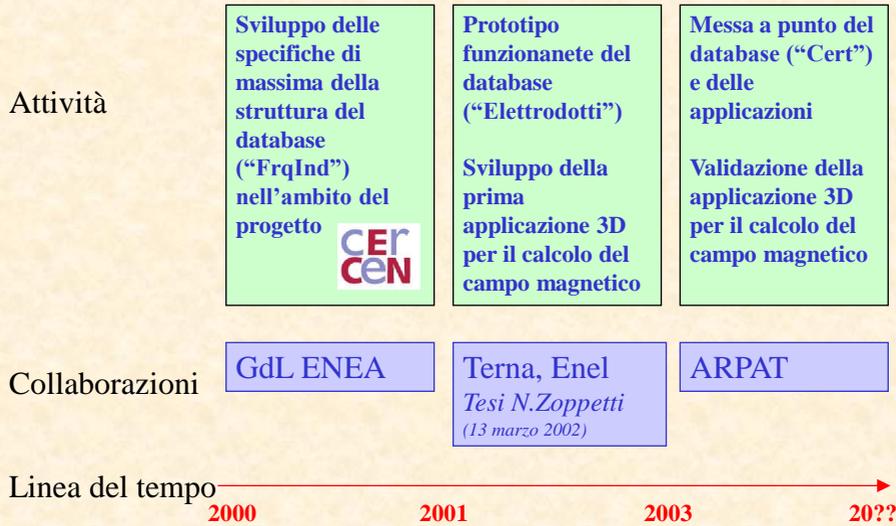
$$\begin{aligned}
 V_R &= V_0 \cos \omega t, & I_R &= I_0 \cos \omega t \\
 V_S &= V_0 \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right), & I_S &= I_0 \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \\
 V_T &= V_0 \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right), & I_T &= I_0 \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \\
 V_R + V_S + V_T &= 0, & I_R + I_S + I_T &= 0
 \end{aligned}$$



Caratteristiche di una banca dati georeferenziata delle sorgenti: l'esempio di CERT (Catasto Elettrodotti Regione Toscana).

La legge quadro del febbraio 2001

La Legge 22 febbraio 2001, n.36 (*Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici*), con gli articoli 4.1.c, 7 e 8.1.d, ha istituito sia il “**catasto nazionale delle sorgenti fisse e mobili dei campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici**”, sia i corrispondenti “**catasti regionali**”, definendone funzioni e scopi.



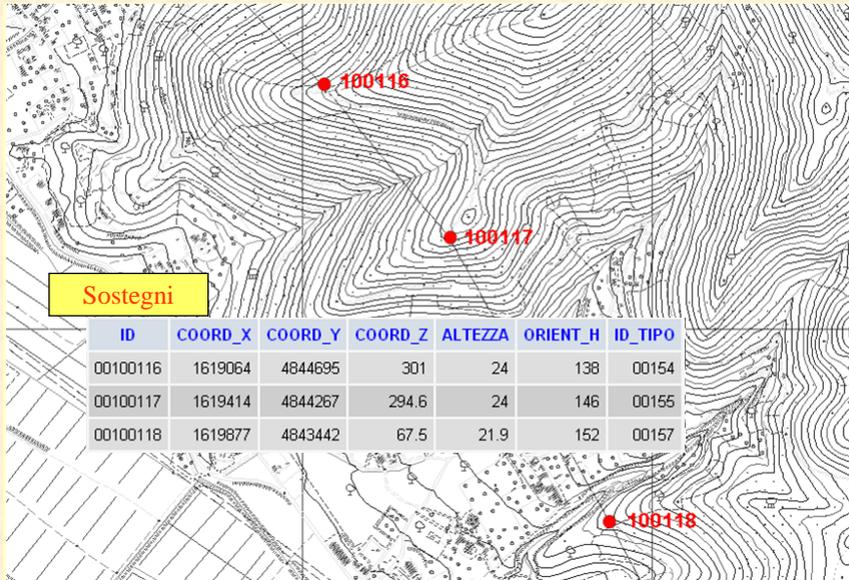
Archiviazione delle informazioni utili a fini descrittivi, amministrativi e statistici.

Capacità di dare supporto a procedure per la determinazione della distribuzione del campo magnetico disperso nell'ambiente, basate su modelli 3D delle linee elettriche e del territorio ed in grado di interfacciarsi direttamente con il *database* e con la cartografia numerica.

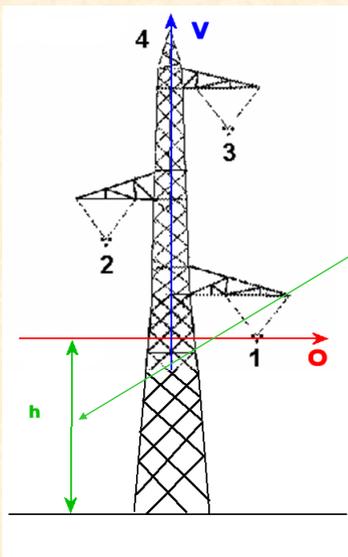
Accessibilità attraverso la rete Internet, con modalità di accesso differenziate per diverse tipologie di utenti.

Modularità e flessibilità.

Adattabilità a differenti piattaforme hardware e software per quanto riguarda il DBMS, lo sviluppo delle applicazioni, gli strumenti cartografici e GIS.

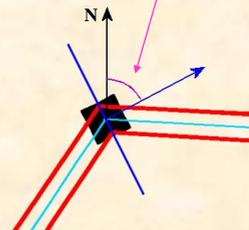


ID	COORD_X	COORD_Y	COORD_Z	ALTEZZA	ORIENT_H	ID_TIPO
00100116	1619064	4844695	301	24	138	00154
00100117	1619414	4844267	294.6	24	146	00155
00100118	1619877	4843442	67.5	21.9	152	00157

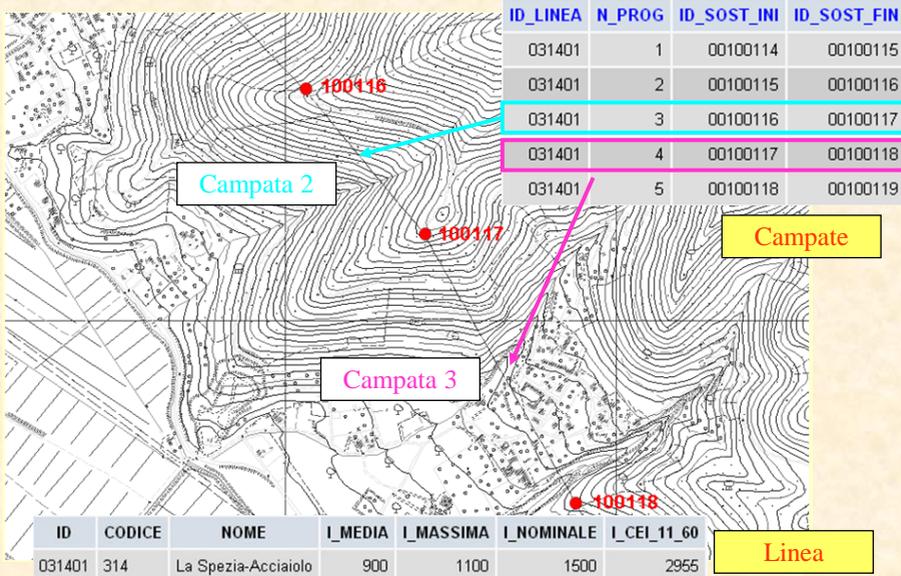


ID	COORD_X	COORD_Y	COORD_Z	ALTEZZA	ORIENT_H	ID_TIPO
00100116	1619064	4844695	301	24	138	00154
00100117	1619414	4844267	294.6	24	146	00155
00100118	1619877	4843442	67.5	21.9	152	00157

ID_TIPO	N_PROG	POS_ORIZ	POS_VERT	CLASSE
00155	1	9.5	0	F
00155	2	-8.5	6	F
00155	3	7.5	12	F
00155	4	0	21	G



Passo 2: linea e campate

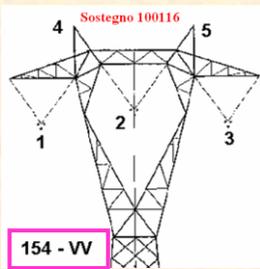


Master Sistemi Informativi Geografici per il monitoraggio e la gestione del territorio" – Elettrodotti – N. Zoppetti

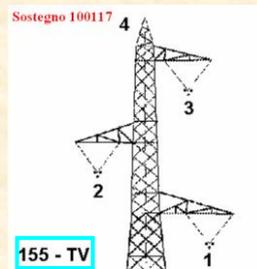
39

Passo 3: tipi di sostegno e punti di sospensione

ID	COORD_X	COORD_Y	COORD_Z	ALTEZZA	ORIENT_H	ID_TIPO
00100116	1619064	4844695	301	24	138	00154
00100117	1619414	4844267	294.6	24	146	00155
00100118	1619877	4843442	67.5	21.9	152	00157



ID_TIPO	N_PROG	POS_ORIZ	POS_VERT	CLASSE
00154	1	-7.9	0	F
00154	2	0	1	F
00154	3	7.9	0	F
00154	4	-5.2	7.4	G
00154	5	5.2	7.4	G



ID_TIPO	N_PROG	POS_ORIZ	POS_VERT	CLASSE
00155	1	9.5	0	F
00155	2	-8.5	6	F
00155	3	7.5	12	F
00155	4	0	21	G

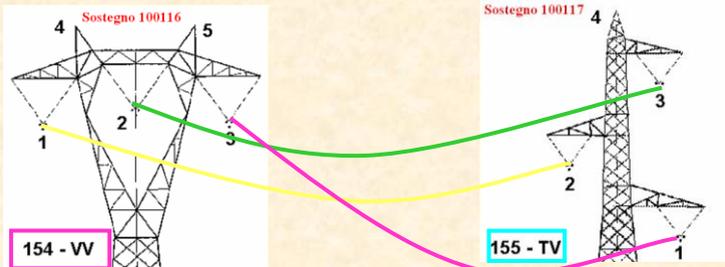
Master Sistemi Informativi Geografici per il monitoraggio e la gestione del territorio" – Elettrodotti – N. Zoppetti

40

ID_LINEA	N_PROG	ID_SOST_INI	ID_SOST_FIN
031401	1	00100114	00100115
031401	2	00100115	00100116
031401	3	00100116	00100117
031401	4	00100117	00100118
031401	5	00100118	00100119

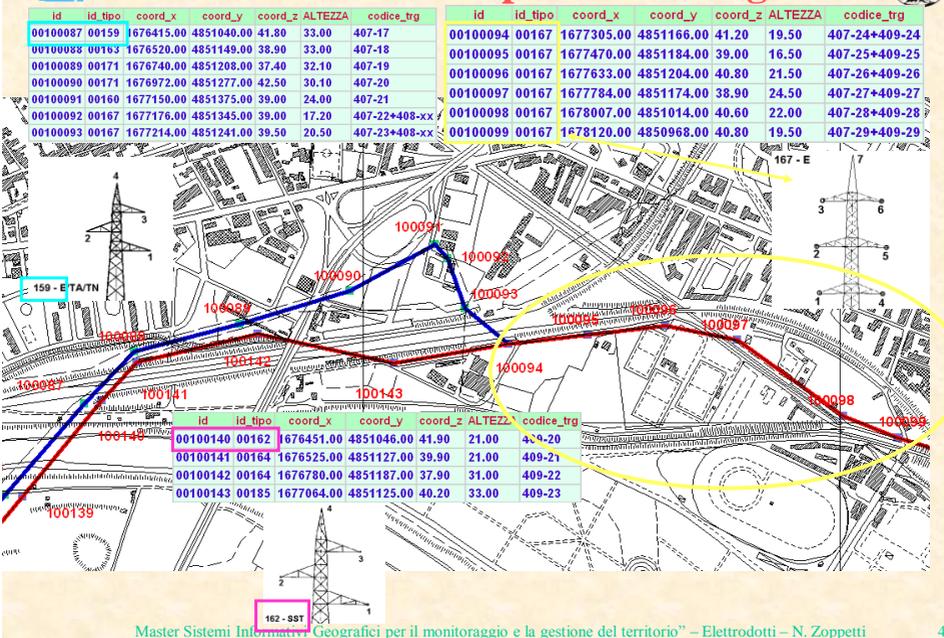
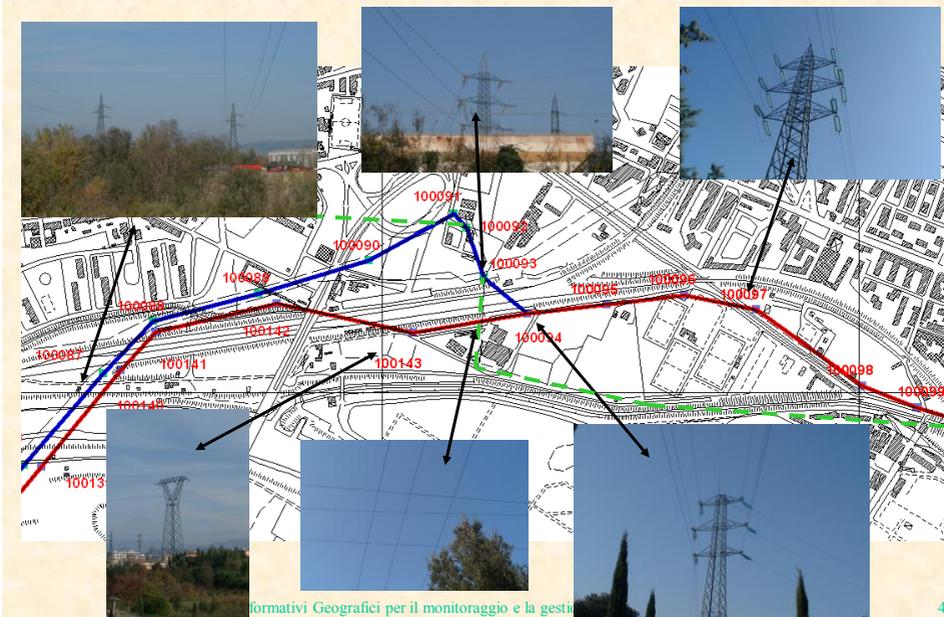
ID_LINEA	CAMPATA	N_PUNTO_INI	N_PUNTO_FIN	TIRO	FASE	CLASSE
031401	0003	1	2	1812	0	F
031401	0003	2	3	1812	240	F
031401	0003	3	1	1812	120	F
031401	0003	4	4	2087	0	G
031401	0003	5	4	2087	0	G

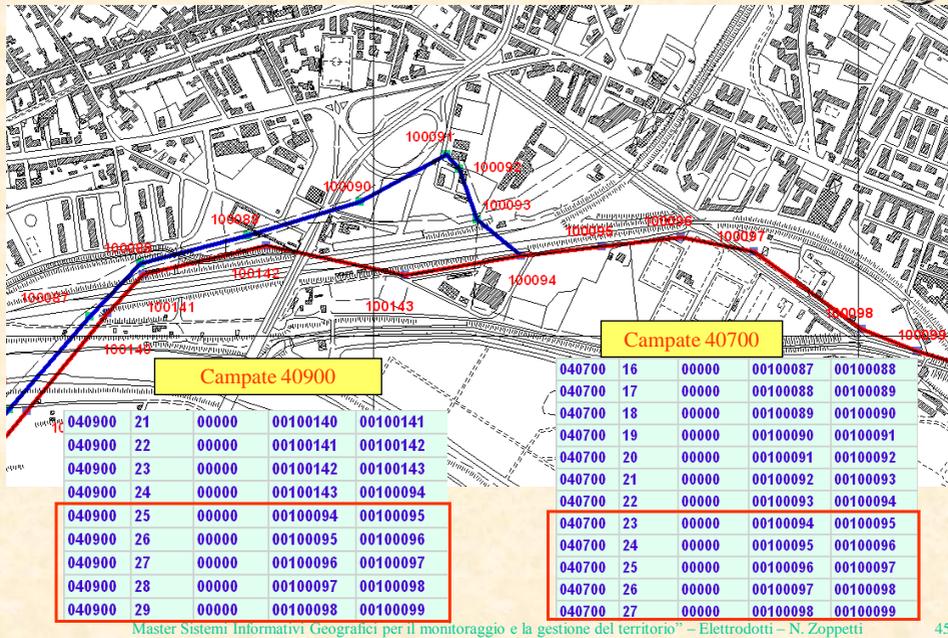
ID	COORD_X	COORD_Y	COORD_Z	ALTEZZA	ORIENT_H	ID_TIPO
00100116	1619064	4844695	301	24	138	00154
00100117	1619414	4844267	294.6	24	146	00155
00100118	1619877	4843442	67.5	21.9	152	00157



Master Sistemi Informativi Geografici per il monitoraggio e la gestione del territorio” – Elettrodotti – N. Zoppetti

- L’associazione tra linea e relativi sostegni avviene attraverso la tabella delle campate.
- I sostegni, gli elementi georeferenziati della linea, non sono associati ad una linea particolare.
- La struttura di ciascun sostegno è definita da quella del relativo tipo.





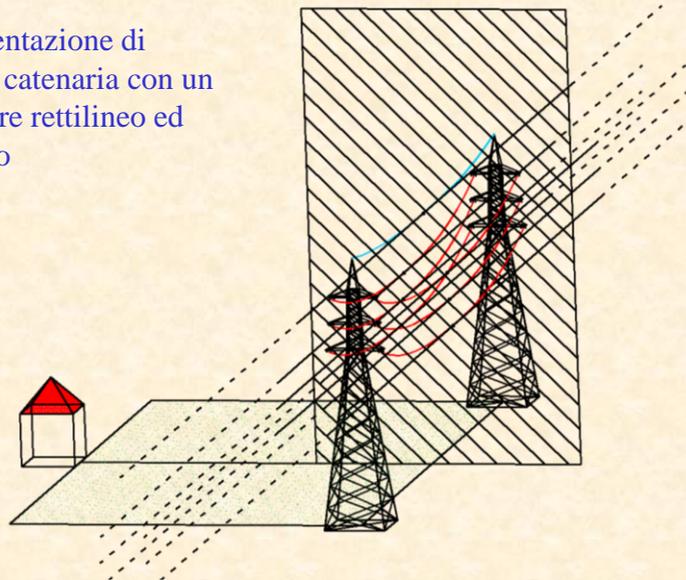
Master Sistemi Informativi Geografici per il monitoraggio e la gestione del territorio* – Elettrodotti – N. Zoppetti

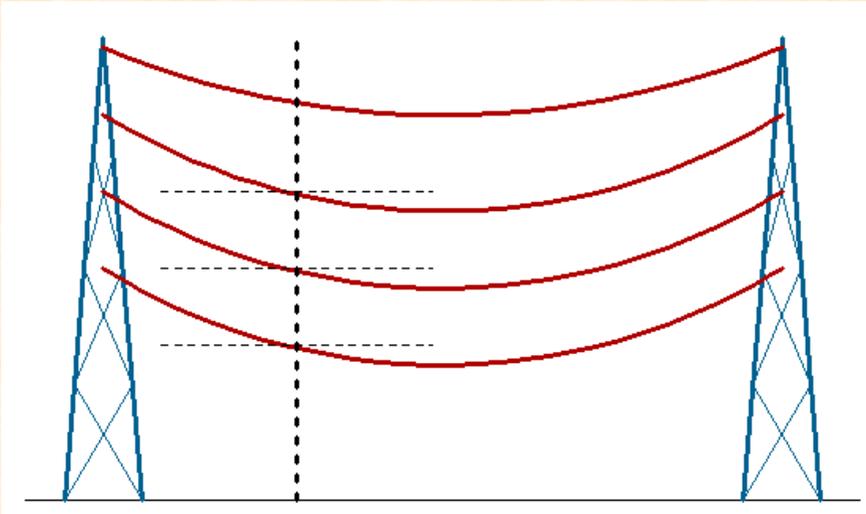
Calcolo dei campi

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*.

Rappresentazione di ciascuna catenaria con un conduttore rettilineo ed indefinito





1. Tutti i conduttori costituenti la linea sono considerati **rettilinei, 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.

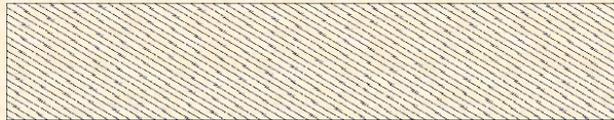
Approccio semplificato: calcolo dell'induzione magnetica



- 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

P3, I3 ●
 P2, I2 ●
 P1, I1 ●

• Q



$$\vec{B}_Q = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{k=1}^{NC} I_k \frac{\hat{z} \times \vec{Q} - \vec{P}_k}{|\vec{Q} - \vec{P}_k|^2} \quad \hat{z} \text{ uscente}$$

Approccio semplificato: calcolo del campo elettrico



- Il terreno viene considerato come **perfettamente conduttore**, e se ne tiene conto utilizzando 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.

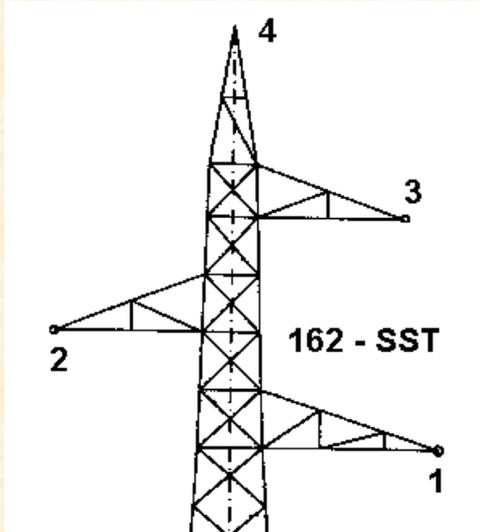
P4, ρ4, 0 ●
 P3, ρ3, V3 ●
 P2, ρ2, V2 ●
 P1, ρ1, V1 ●

• Q

P5, -ρ1 ●
 P6, -ρ2 ●
 P7, -ρ3 ●
 P8, -ρ4 ●

$$\vec{E}_Q = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{k=1}^{2NC} \rho_k \frac{\vec{Q} - \vec{P}_k}{|\vec{Q} - \vec{P}_k|^2}$$

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

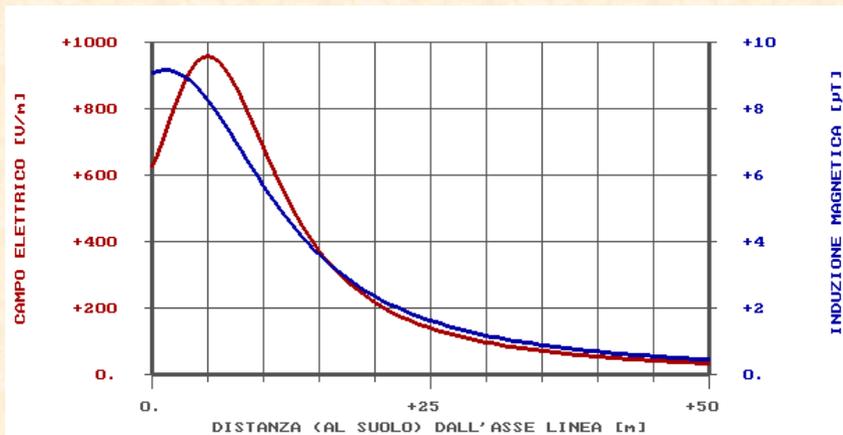
Risultato dell'esempio



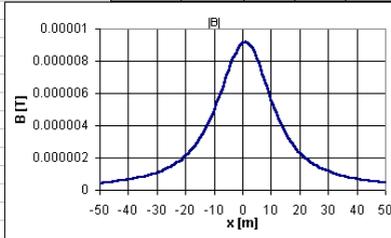
•ESEMPIO:

–Conduttore più basso ad una altezza $h = 10$ m dal suolo

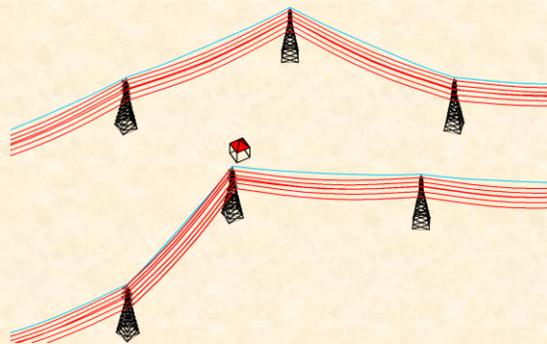
–Calcolo lungo la direzione trasversale, a 1 m da terra, per una distanza da 0 a 50 m dall'asse della linea



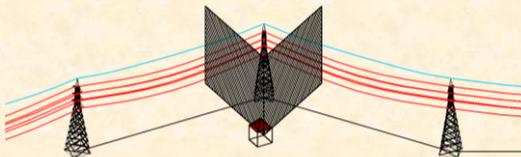
	x	y	l	f	Re I	Im I	complessa					
11	Conduttore1	3.5	10	800	-120	-400	692.820323027551i					
12	Conduttore2	-3	12	800	0	800	0					
13	Conduttore3	2.9	14	800	120	-400	-692.820323027551i					
14												
		Coordinate punti di calcolo		Contributo conduttore 1		Contributo conduttore 2		Contributo conduttore 3		Campo totale		
		x	y	Bx1	By1	Bx2	By2	Bx3	By3	Bx	By	Modulo B
15		-50	1	007+4.2006+2.590686697811159	00686697811159	E-007-6.070006-2.4	E-007-1.8333007+4.852					4.26791E-07
16		-49	1	007+4.3006+2.599284750697362	00686697811159	E-007-6.292006-2.5	E-007-1.897007+5.176					4.43432E-07
17												
18												
19												
20												
21												
22												
23												
24												
25												
26												
27												
28												
29												
30												
31												
32		-35	1	007+7.9006+3.479039306720524	00686697811159	E-007-1.122006-3.2	E-007-3.2429007+1.414					8.27303E-07
33		-34	1	007+8.3006+3.473752318512014	00686697811159	E-007-1.1768006-3.3	E-007-3.3636007+1.532					8.71684E-07
34		-33	1	007+8.8006+3.511958866261508	00686697811159	E-007-1.2356006-3.4	E-007-3.5322007+1.664					9.19606E-07



1. Presenza di più linee non parallele

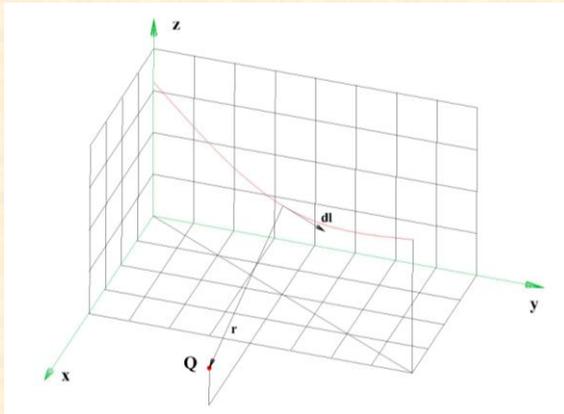


2. Cambi di direzione pronunciati della linea



Approccio avanzato

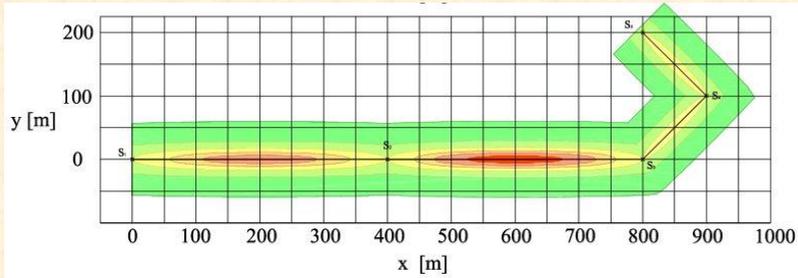
- Si applica con semplicità al calcolo della sola **induzione magnetica**.
- Si basa sull'integrazione numerica della prima legge di Laplace sulle catenarie. Consiste cioè nel rappresentare ogni catenaria con un sottoinsieme delle sue corde, ciascuna delle quali contribuisce al campo totale secondo la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



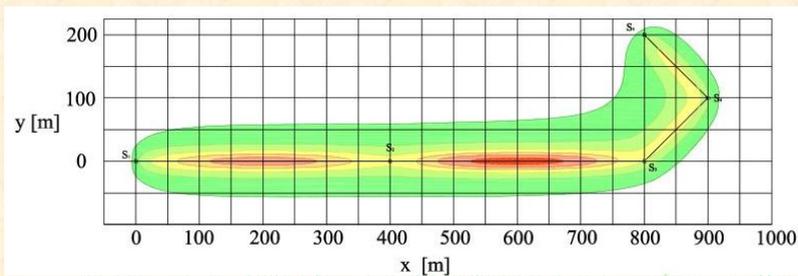
$$\vec{B}(Q) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_l \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}$$

Confronto fra approccio semplificato ed avanzato

Conduttori rettilinei ed indefiniti



Catenarie



59

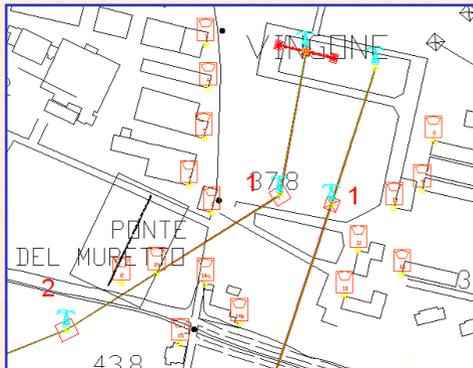
Non viene preso in considerazione per diversi motivi :

- 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.

Alcuni esempi di valutazione

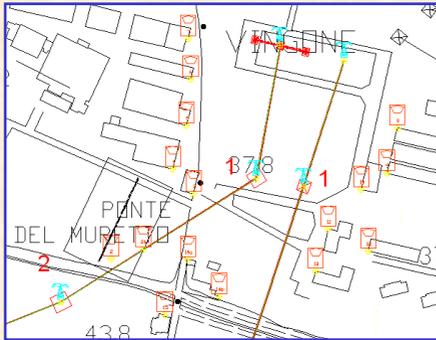
Calcolo su punti

ID	X(m)	Y(m)	Z(m)
1a	1672576	4847670	39
1b	1672608	4847665	40
2	1672942	4847734	39
2b	1672970	4847742	39
3	1673012	4847789	39
4	1672995	4847810	38
5	1673006	4847847	38
6	1673009	4847886	37
7	1673007	4847920	37
8	1673184	4847845	39

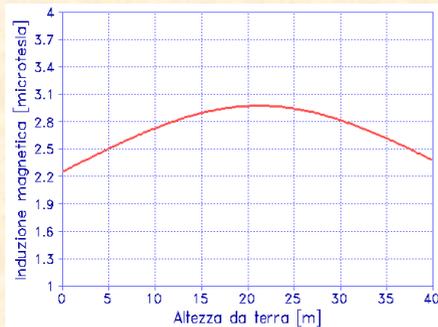


ID	INDUZIONE MAGNETICA · [μT]
1a	1.03
1b	0.78
2a	1.85
2b	2.02
3	1.63
4	0.83
5	0.62
6	0.48
7	0.25
8	0.31
9	0.25
10	0.26
11	0.26
12	0.09
13	0.25
14a	1.48
14b	0.41
15	0.60

- Per ogni edificio è stato considerato un segmento verticale lungo lo spigolo o la facciata più esposta.
- La lunghezza di ciascun segmento è legata all'altezza dell'edificio considerato



ID	INDUZIONE-MAGNETICA [μT]			
	@-1-m	@-4-m	@-7-m	@-10-m
1a	1.03	1.10	1.16	
1b	0.78	0.81	0.84	
2a	1.85	2.20	2.65	
2b	2.02	2.42	2.95	
3	1.63	1.92		
4	0.83	0.92	1.01	
5	0.62	0.66	0.69	
6	0.48	0.49	0.51	
7	0.25	0.26	0.27	
8	0.31	0.32	0.34	0.35
9	0.25	0.26	0.27	0.28
10	0.26	0.28	0.30	0.31
11	0.26	0.28	0.30	0.33
12	0.09	0.09	0.09	0.09
13	0.25	0.27	0.30	0.33
14a	1.48	1.70		
14b	0.41	0.41		
15	0.60	0.64		



Macinuzze; il profilo verticale dell'induzione magnetica è stato calcolato lungo lo spigolo in primo piano nella foto

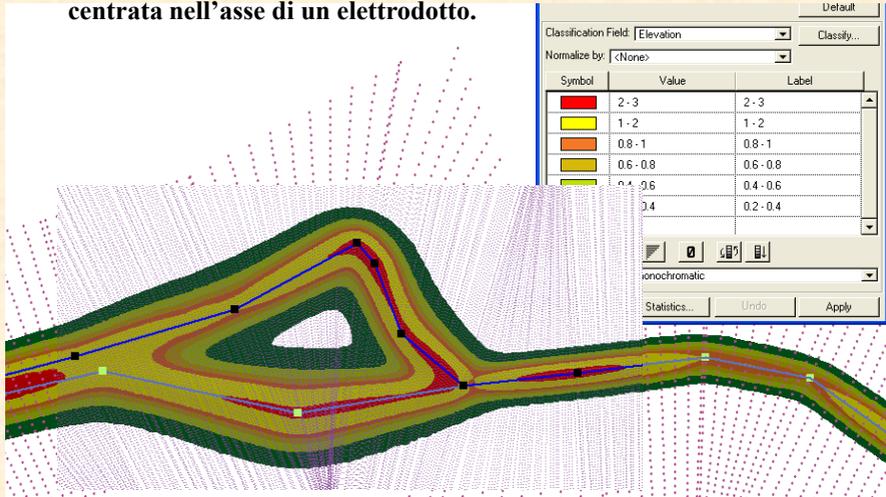
Longitudine 1675228 m
 Latitudine 4845657 m
 Quota 66 m



Calcolo su grigliato: elaborazione risultati



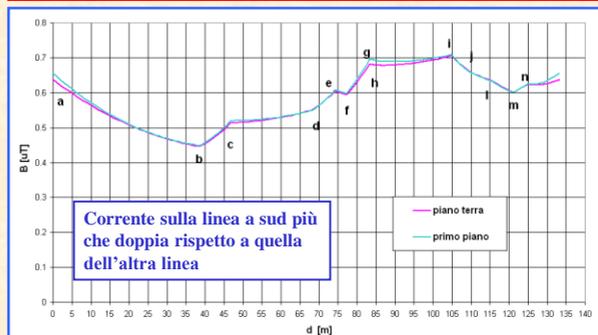
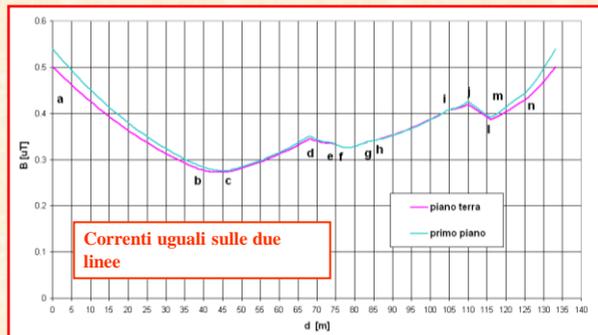
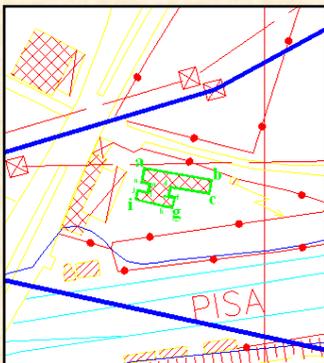
- In questo caso i punti del grigliato sono quelli appartenenti alla superficie di una striscia di territorio a larghezza fissata, centrata nell'asse di un elettrodotto.



Master Sistemi Informativi Geografici per il monitoraggio e la gestione del territorio" – Elettrodotti – N. Zoppetti

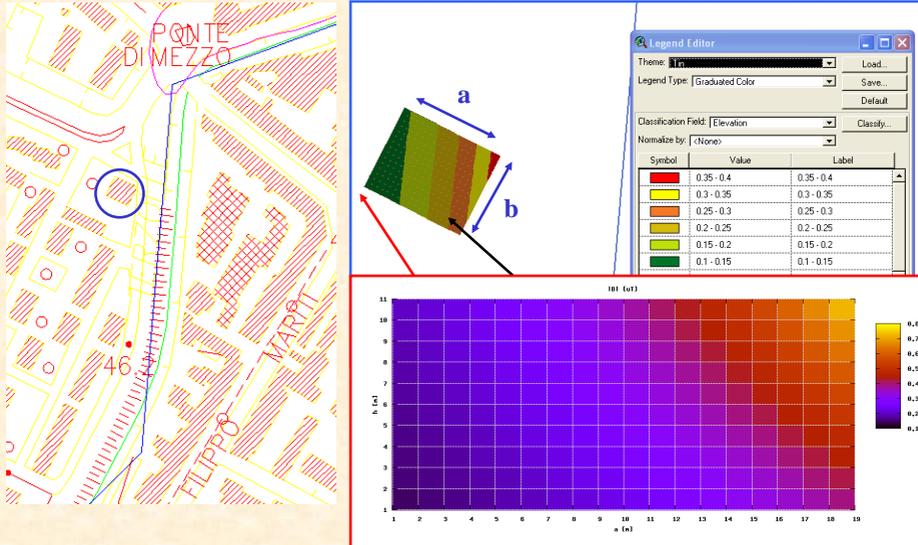
65

Calcolo del campo lungo il perimetro di edifici per determinarne il punto più esposto

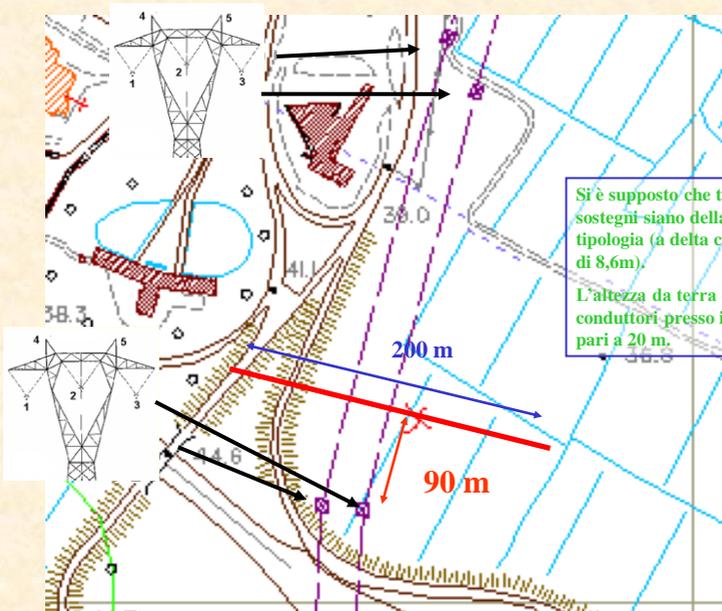


Master Sistemi Informativi Geografici per il monitoraggio e la gestione del territorio" – Elettrodotti – N. Zoppetti

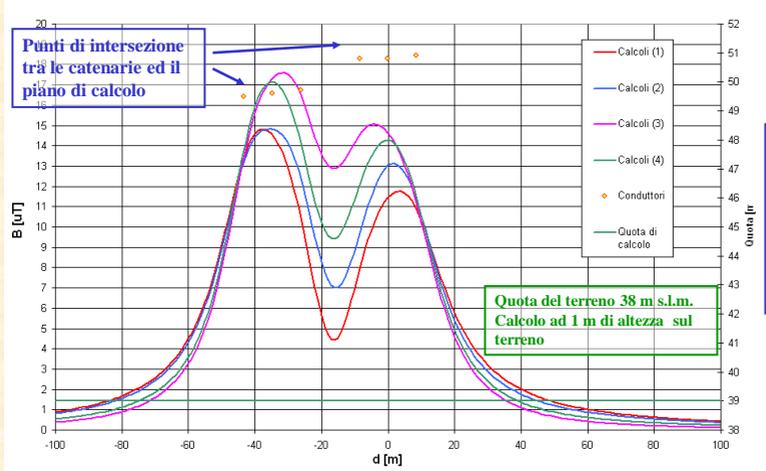
66



Master Sistemi Informativi Geografici per il monitoraggio e la gestione del territorio" – Elettrodotti – N. Zoppetti



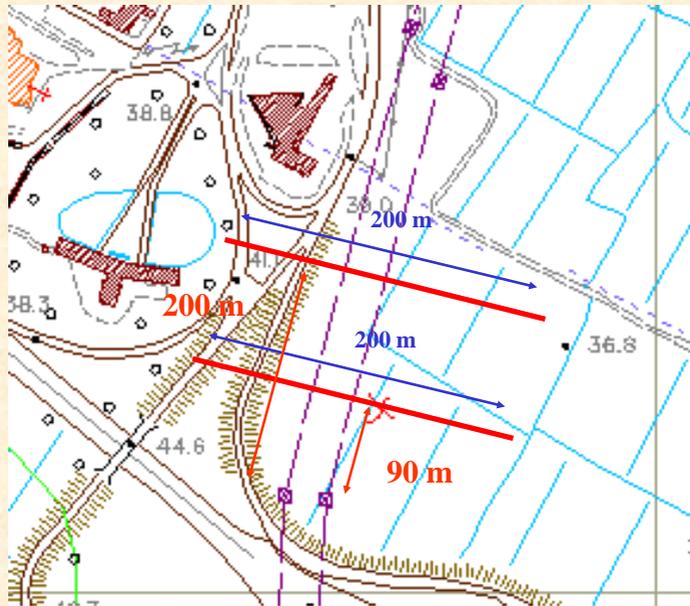
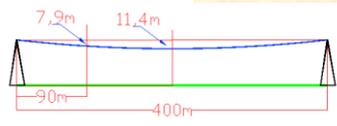
Master Sistemi Informativi Geografici per il monitoraggio e la gestione del territorio" – Elettrodotti – N. Zoppetti

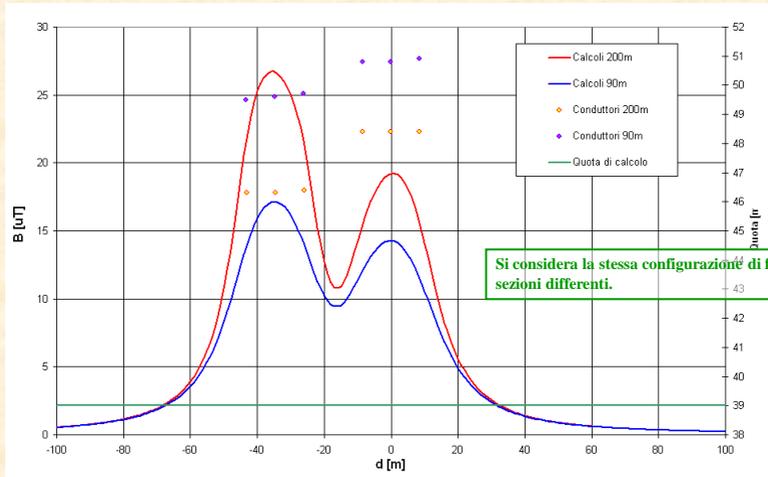


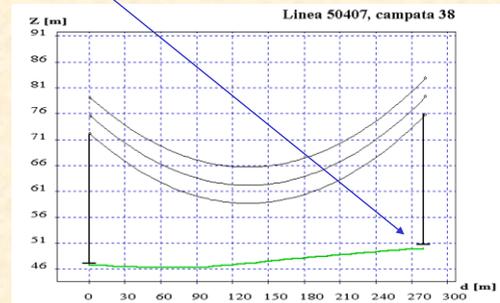
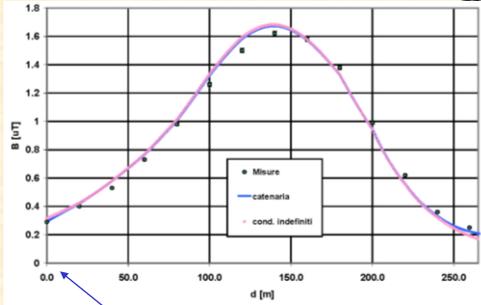
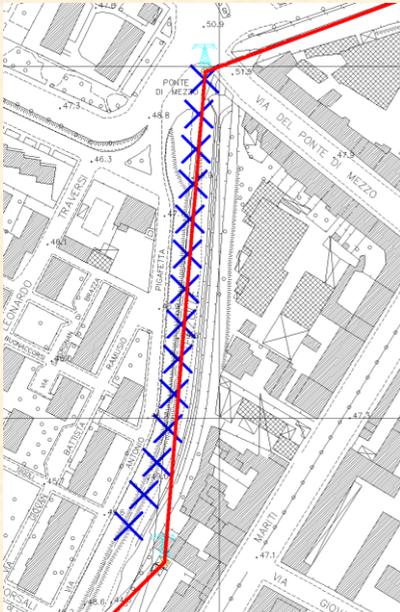
Presso la sezione di calcolo i conduttori sono alti circa 12 m da terra (parametro di tesatura 1750m, CEI 11-60).

Quota del terreno 38 m s.l.m. Calcolo ad 1 m di altezza sul terreno

N.	220 kv			132 kv		
	sinistra	centrale	destra	sinistra	centrale	destra
1	0	120	-120	0	120	-120
2	0	120	-120	0	-120	120
3	-120	120	0	0	120	-120
4	0	120	-120	120	-120	0

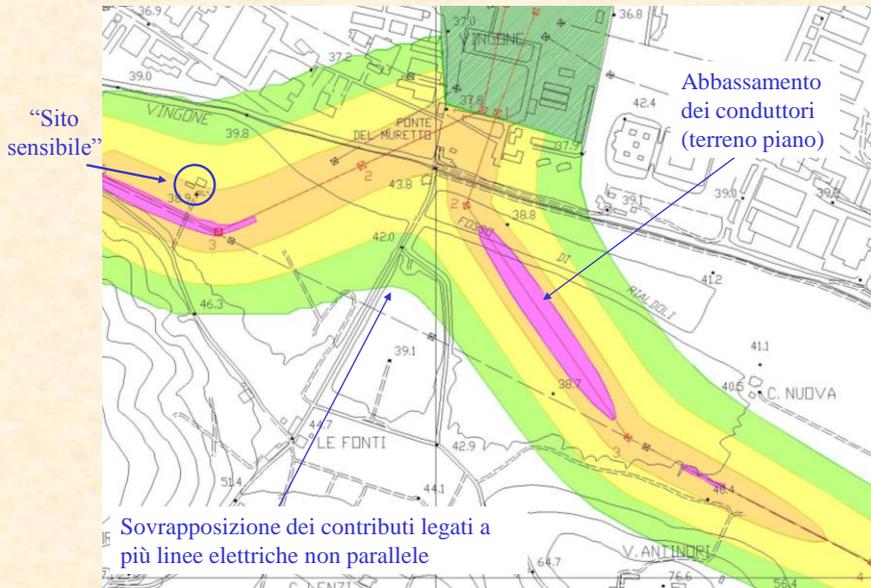






Alcuni esempi tratti dallo studio VIA relativo al tratto di elettrodotto a 380 kV S. Barbara (Ar)-Casellina (Fi).

(Dati tecnici cortesemente forniti da TERNA SPA)



Master Sistemi Informativi Geografici per il monitoraggio e la gestione del territorio” – Elettrodotti – N. Zoppetti



Casa colonica (probabilmente non abitata continuamente) in via della Lavanderia; la parte ad impatto ALTO è l'annesso (probabilmente un fienile) sulla sinistra

Longitudine 1672587 m

Latitudine 4847667 m

Quota 39 m

APO C2a

Profilo verticale dell'induzione magnetica

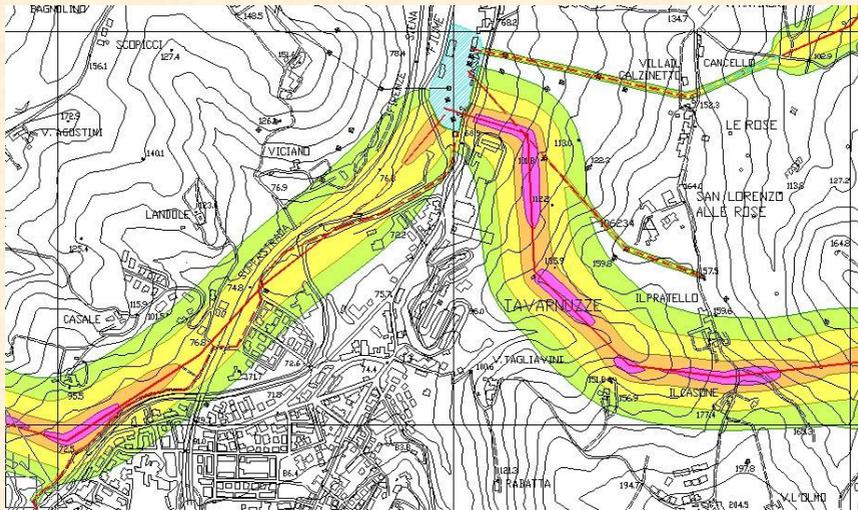
Altezza dal suolo [m]	Induzione magnetica [μT]	
	Condizione cautelativa	Condizione realistica
1	0.91	2.28
3	0.95	2.35
6	1.0	2.45



Master Sistemi Informativi Geografici per il monitoraggio e la gestione del territorio” – Elettrodotti – N. Zoppetti

Tavernuzze

presenza tratti interrati di linee a 132 kV

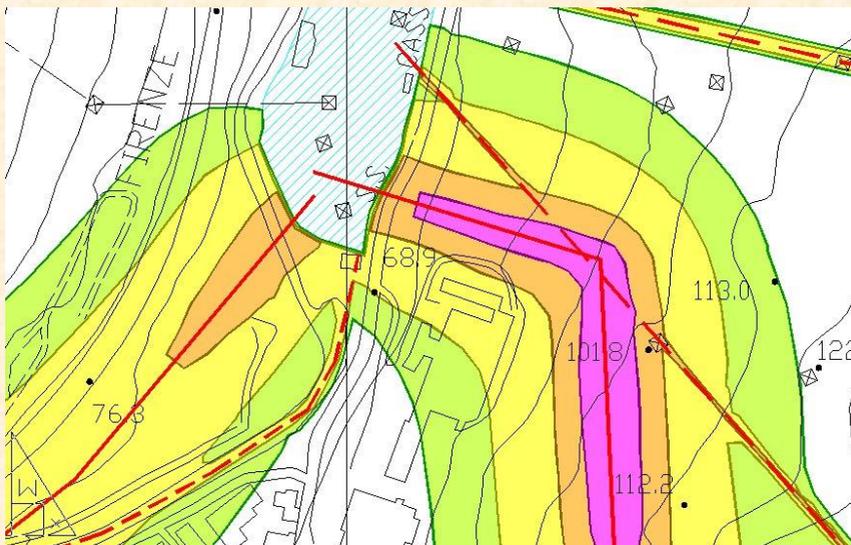


Master Sistemi Informativi Geografici per il monitoraggio e la gestione del territorio – Elettrodotti – N. Zoppetti

77

Tavernuzze

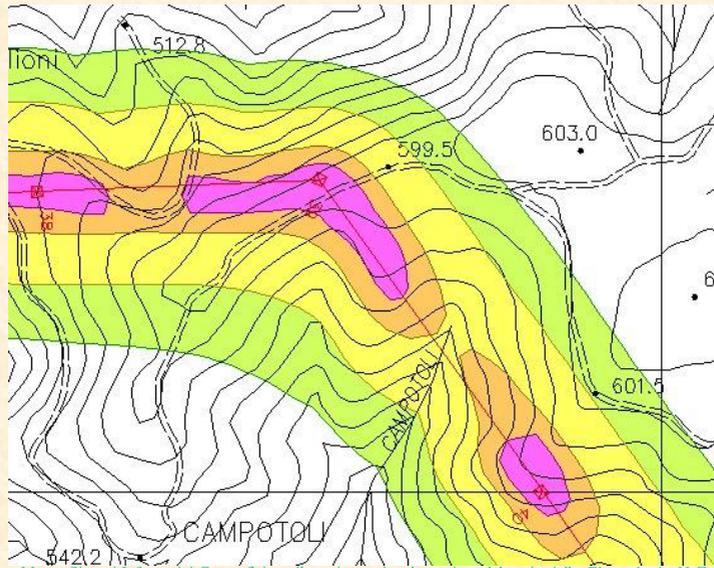
particolare tratti interrati



Master Sistemi Informativi Geografici per il monitoraggio e la gestione del territorio – Elettrodotti – N. Zoppetti

78

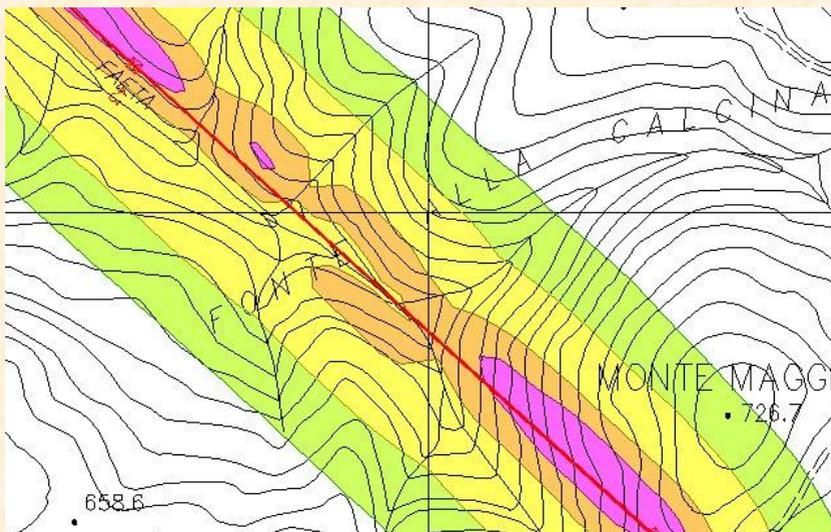
Colline del Chianti: cambio di direzione pronunciato



Master Sistemi Informativi Geografici per il monitoraggio e la gestione del territorio" – Elettrodotti – N. Zoppetti

79

Colline del Chianti terreno montuoso



Master Sistemi Informativi Geografici per il monitoraggio e la gestione del territorio" – Elettrodotti – N. Zoppetti

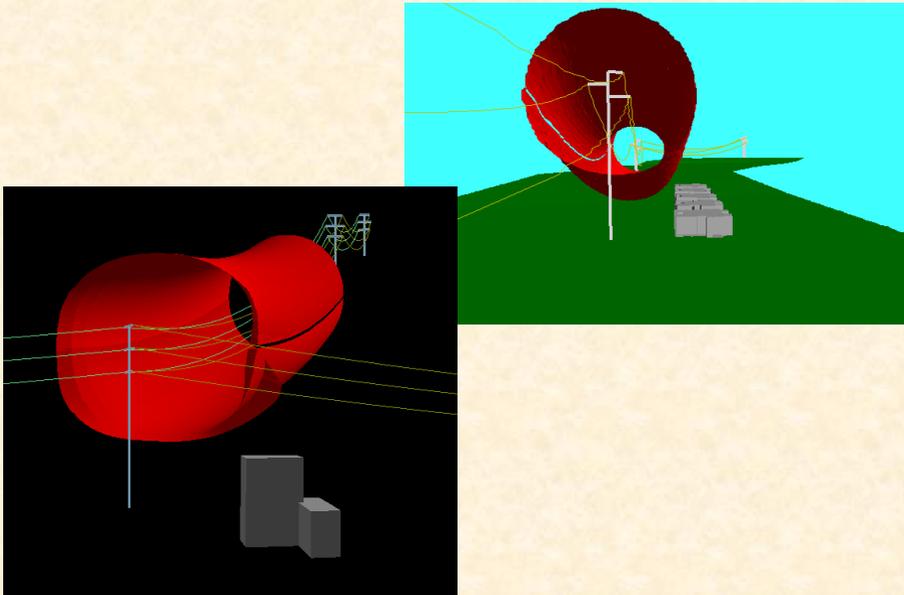
80

Pisa Barbaricina linea pilota convenzione ARPAT-IFAC



Master Sistemi Informativi Geografici per il monitoraggio e la gestione del territorio" – Elettrodotti – N. Zoppetti

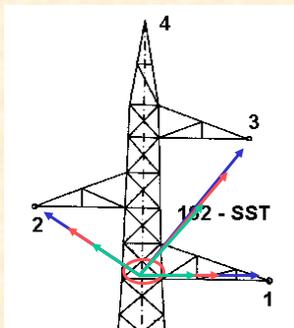
Visualizzazione tridimensionale



Master Sistemi Informativi Geografici per il monitoraggio e la gestione del territorio" – Elettrodotti – N. Zoppetti

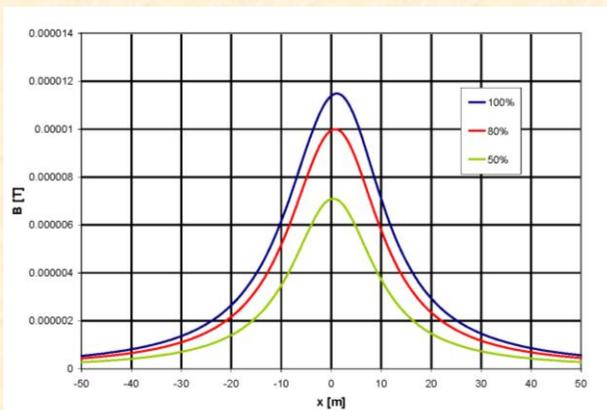
Possibili interventi per la mitigazione del campo

Strutture compatte



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

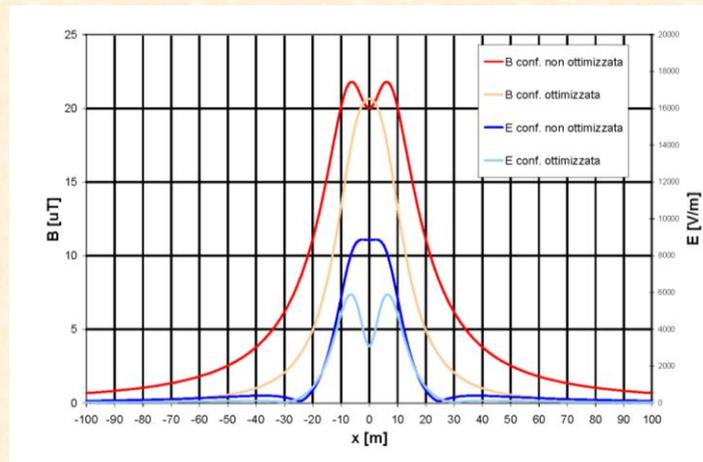
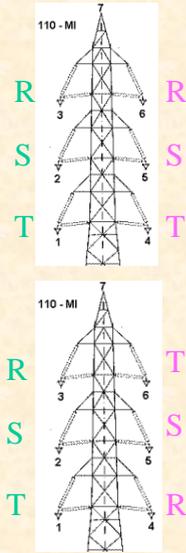
X [m]	Y [m]	V [V]	I [A]	FASE
+3.50	0.00	76210	1000	+120
-3.00	+2.00	76210	1000	0
+2.90	+4.00	76210	1000	-120



Ottimizzazione delle fasi per una doppia terna



Configurazione non ottimizzata



Configurazione ottimizzata

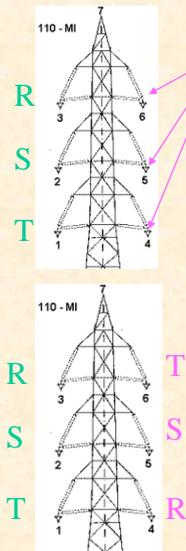
Master Sistemi Informativi Geografici per il monitoraggio e la gestione del territorio" – Elettrodotti – N. Zoppetti

85

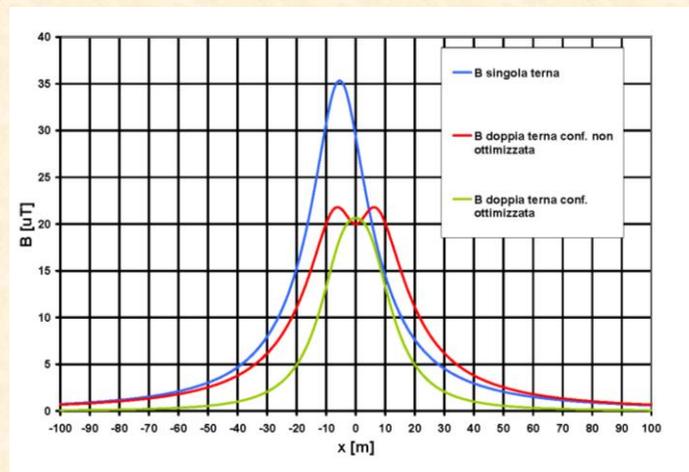
“sdoppiamento” delle fasi per una semplice terna



Singola terna



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



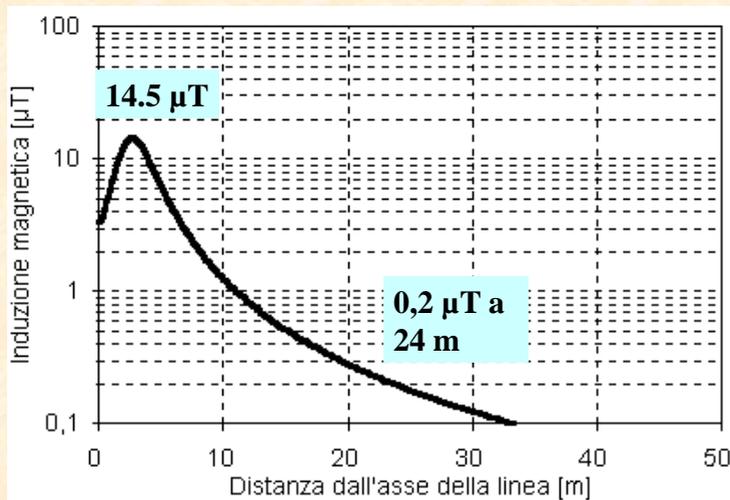
Doppia terna ottimizzata

Master Sistemi Informativi Geografici per il monitoraggio e la gestione del territorio" – Elettrodotti – N. Zoppetti

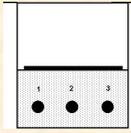
86

- Sono sorgenti di sola induzione magnetica in quanto il terreno scherma il campo elettrico
- Profondità di interrimento 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.

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 $14.5 \mu\text{T}$) è confrontabile con quello dell'elettrodotto in aria, tenendo conto del diverso livello di corrente trasportata (circa la metà).

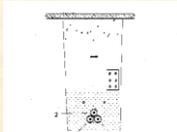


Esso si riduce più rapidamente con la distanza: gli $0.2 \mu\text{T}$ si raggiungono a soli 24 metri circa dall'asse della linea.



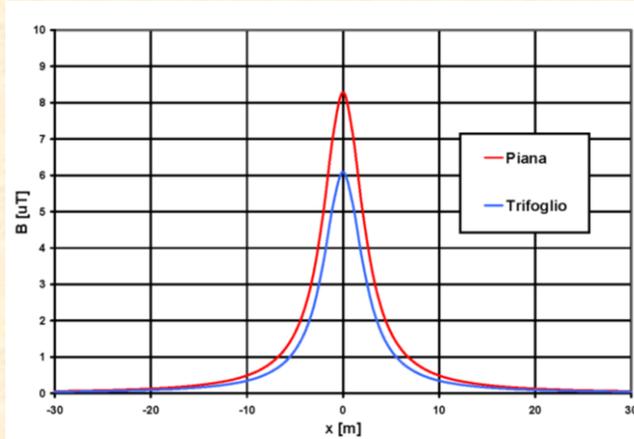
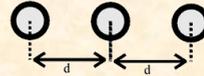
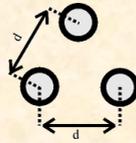
X [m]	Y [m]	I [A]	FASE
-0.15	0.00	1000	+120
0.00	0.00	1000	0
+0.15	0.00	1000	-120

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

Elettrodotti interrati



Master Sistemi Informativi Geografici per il monitoraggio e la gestione del territorio – Elettrodotti – N. Zoppetti

89



Vincoli imposti dalla normativa vigente e metodi utilizzabili per verificarli

Master Sistemi Informativi Geografici per il monitoraggio e la gestione del territorio – Elettrodotti – N. Zoppetti

90

- **Legge 36/2001** → Concetti generali
- **DPCM 08/07/2003** → Valori di riferimento
- **DM 29/05/2008** → Metodologia di calcolo

La legge 36 ed il DPCM 8/07/2003 introducono un **duplice criterio di protezione** dell'uomo dalle esposizioni ai campi elettrici e magnetici generati da elettrodotti.

- Il primo criterio si riferisce al **valore "di immissione"** dei campi, **misurabile** in un punto in un determinato ambiente e si concretizza nella definizione dei cosiddetti *limiti di esposizione, valori di attenzione ed obiettivi di qualità*.
- Il secondo criterio si riferisce invece al **valore "di emissione"** inteso come valore di campo generato da un determinato insieme di sorgenti e **calcolato secondo un algoritmo noto**, supponendo che sulle linee scorrano determinate correnti di riferimento. Esso si concretizza nella definizione delle cosiddette *fasce di rispetto*.

Limite di esposizione, valore di attenzione e obiettivo di qualità



- La definizione di limite di esposizione, valore di attenzione e di obiettivo di qualità viene data nell'articolo 3 della legge 36.
- I relativi valori numerici sono stati specificati negli articoli 3 e 4 del DPCM 8/07/2003. In particolare :
 - *limite di esposizione* **100 μ T**;
 - *valore di attenzione* **10 μ T**;
 - *obiettivo di qualità* **3 μ T**;
- I precedenti valori sono da intendere come mediana sulle 24 ore in normali condizioni di esercizio degli elettrodotti considerati.
- Il riferimento alla mediana fa sì che al valore di immissione misurato non contribuiscano sorgenti di tipo occasionale, quali dispositivi di uso domestico a cui non si applicano le disposizioni della legge 36.
- Il riferimento alle normali condizioni di esercizio permette di escludere condizioni eccezionali come guasti o sovraccarichi sugli elettrodotti.

Limite di esposizione, valore di attenzione e obiettivo di qualità



- Il limite di esposizione (100 μ T) non deve essere superato in alcuna condizione ed è inteso come limite di protezione da effetti acuti.
- Il valore di attenzione (10 μ T) invece non deve essere superato negli ambienti adibiti a permanenza prolungata (oltre le quattro ore al giorno) e costituisce "misura di cautela ai fini della protezione da possibili effetti a lungo termine".
- L'obiettivo di qualità (3 μ T) infine viene introdotto ai fini "della progressiva minimizzazione delle esposizioni..." e si riferisce (art 4 del DPCM 8/07/2003)
 - (a) alla progettazione di nuovi elettrodotti
 - (b) alla progettazione di nuovi insediamenti in prossimità di elettrodotti esistenti

La **legge n. 36**, all'articolo 4 (comma 1 lettera h) definisce la fascia di rispetto per gli elettrodotti come la fascia all'interno della quale *"non è consentita alcuna destinazione di edifici ad uso residenziale, scolastico, sanitario ovvero ad uso che comporti una permanenza non inferiore a quattro ore"*.

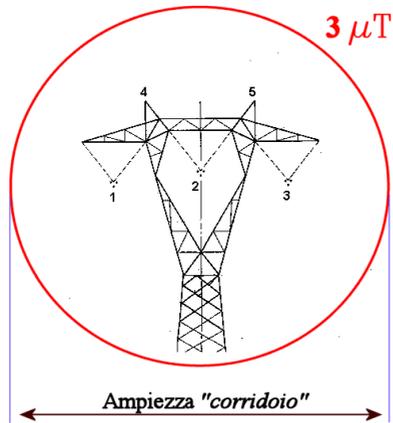
Il **DPCM 8/07/2003** specifica che per il calcolo di tali fasce ci si debba riferire al valore di campo fissato dall'obiettivo di qualità (3 μ T) ed "alla portata in corrente in servizio normale dell'elettrodotto, come definita dalla **norma CEI 11-60**". La norma citata definisce la portata in corrente in servizio normale come "la corrente che può essere sopportata da un conduttore per il 100% del tempo con limiti accettabili del rischio di scarica ... e dell'invecchiamento".

- **Legge n. 36/2001**, articolo 4 (comma 1 lettera h)
- **DPCM 8/07/2003** articolo 6.
- Norma CEI 11-60.
- **DM 29/05/2008**

Definizione delle procedure per la determinazione della fascia

Fasce di rispetto: DPA (distanza di prima approssimazione)

Ci si riferisce al calcolo della proiezione a terra del volume di rispetto a $3 \mu\text{T}$, calcolato in condizioni cautelative. Nel DM 29/05/2008 la larghezza della DPA viene indicata come indice conservativo della fascia di rispetto propriamente detta.



- Si considerano conduttori rettilinei ed indefiniti (CEI 211-4).
- Si determina il confine del volume di rispetto a $3 \mu\text{T}$ sul piano di calcolo.
- Si considera il corridoio ottenuto proiettando a terra gli estremi del volume di rispetto a $3 \mu\text{T}$.

L'ampiezza della DPA è svincolata dall'andamento del terreno

Master Sistemi Informativi Geografici per il monitoraggio e la gestione del territorio – Elettrodotti – N. Zoppetti

97

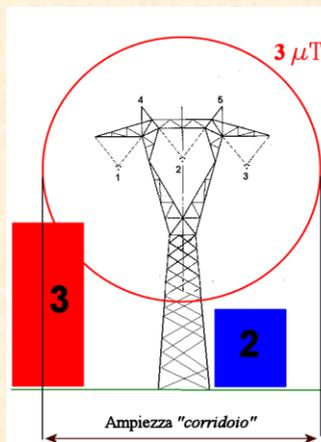
Fasce di rispetto: DM 29/05/2008 e norma CEI 106-11

Sia nel DM 29/05/2008 sia nella norma CEI 106-11 si fa riferimento alla DPA (o corridoio) come “indice conservativo della fascia di rispetto” ed in particolare si adotta un approccio a due livelli secondo il quale, per chi sta all'esterno dei “corridoi” si può subito procedere all'autorizzazione, mentre se si cade all'interno dei corridoi, sono necessarie indagini più accurate.

Master Sistemi Informativi Geografici per il monitoraggio e la gestione del territorio – Elettrodotti – N. Zoppetti

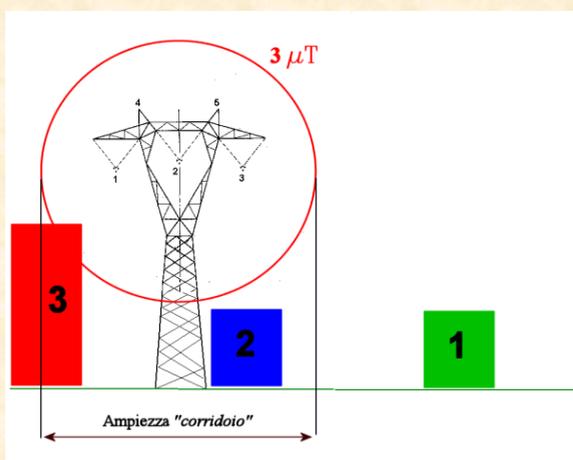
98

Supponiamo che 3 soggetti (soggetto n.1, n.2 e n.3) richiedano l'autorizzazione a costruire altrettanti edifici (abitazioni o uffici ad esempio) nei pressi di un elettrodotto esistente.

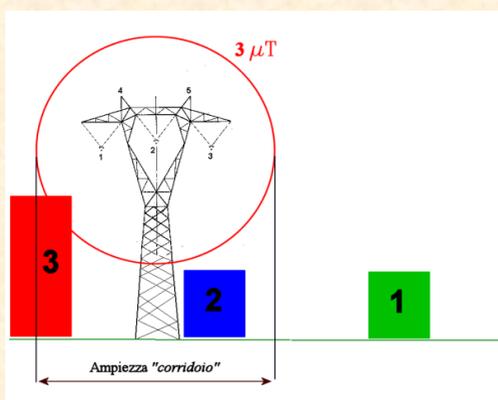


Vediamo chi può costruire e chi no, al variare della normativa di riferimento.

La porzione di territorio vincolata dalla DPA è la proiezione a terra del volume a $3 \mu\text{T}$ e quindi, **solo l'edificio 1 (verde) è compatibile una destinazione d'uso richiesta.**



Mentre per chi sta all'esterno dei "corridoi" si può subito procedere all'autorizzazione, se si cade all'interno dei corridoi, sono necessarie indagini più accurate. **In particolare, in tali indagini si dovrebbe tenere conto del reale volume di rispetto e quindi anche dell'andamento del terreno.**



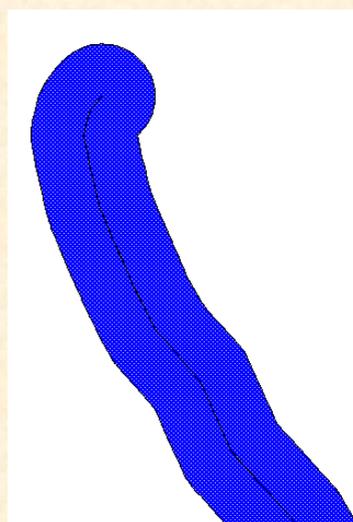
Secondo tale approccio:

L'edificio 1 è esterno al corridoio quindi **la sua destinazione d'uso può essere subito autorizzata.**

L'edificio 2 sta tutto dentro il corridoio e quindi **la sua destinazione d'uso NON può essere subito autorizzata.** Da **indagini più accurate** si determina che è **esterno alla regione caratterizzata da livelli di campo maggiori di 3 μT.** L'edificio 2 **può quindi essere costruito così com'è.**

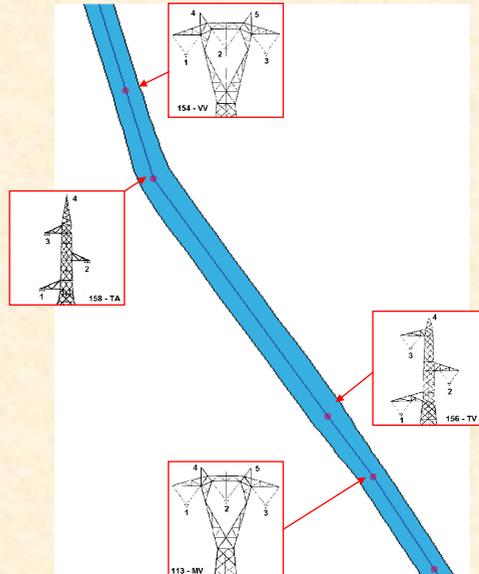
L'edificio 3 sta parzialmente dentro il corridoio quindi **la sua destinazione d'uso NON può essere subito autorizzata.** Da **indagini più accurate** si determina che una **sua porzione è interna alla regione caratterizzata da livelli di campo maggiori di 3 μT.** L'edificio 3 **NON può quindi essere costruito così com'è.**

Per ottenere dei corridoi georeferenziati, integrabili nella cartografia, l'approccio più semplice è quello di considerare la tipologia di sostegno che da luogo al corridoio più ampio e quindi tracciare un "buffer" riferito all'asse della linea a larghezza costante pari all'ampiezza del corridoio determinata.



Sono state studiate delle evoluzioni dell'approccio con fascia a larghezza costante.

Tali soluzioni, pur svincolandosi dall'andamento del terreno e considerando la proiezione a terra del volume di rispetto a 3 μ T, danno luogo a delle fasce a larghezza non costante che tengono conto sia della variazione di tipologia di sostegno e quindi della mutua distanza tra i conduttori, sia di eventuali cambi di direzione del tracciato, sia della presenza di più linee non parallele tra loro.



Riferimenti

- **Normative nazionali**
 - [DM 40, 16 gennaio 1991](#)
 - [DPCM 23 aprile 1992](#)
 - [DM 381/1998](#)
 - [Legge 36/2001](#)
 - [DPCM 8 luglio 2003 - RF & MW](#)
 - [DPCM 8 luglio 2003 - 50 Hz](#)
 - [Circolare sulla metodologia provvisoria per la determinazione delle fasce di rispetto relative ad elettrodotti](#)
- **Guide tecniche nazionali**
 - [Linee guida applicative del DM 381/1998](#)
 - [ANPA: Guida tecnica per la misura dei campi elettromagnetici compresi nell'intervallo di frequenza 100 kHz - 3 GHz in riferimento all'esposizione della popolazione](#)
- **Documenti internazionali**
 - [ICNIRP: Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields \(up to 300 GHz\)](#)
 - [Raccomandazione del Consiglio Europeo del 12 luglio 1999 relativa alla limitazione dell'esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici da 0 Hz a 300 GHz](#)
 - [WHO Backgrounder: Campi elettromagnetici e salute pubblica - politiche cautelative](#)
 - [Pronunciamento IARC del giugno 2001](#)
 - [Direttiva Europea 2004/40/EC "on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents \(electromagnetic fields\)" del 29 aprile 2004](#)
- **Lucidi, in formato pdf, della lezione tenuta da Nicola Zoppetti nell'ambito del Master di secondo livello "Sistemi Informativi Geografici per il monitoraggio e la gestione del territorio", il 5 marzo 2007**
 - [Parte 1: campo elettrico e magnetico e sorgenti ambientali](#)
 - [Parte 2: caratteristiche degli elettrodotti](#)
 - [Parte 3: CERT \(Catasto elettrodotti Regione Toscana\) e reperimento dati](#)

- **Pubblicazioni varie sui campi ELF**
 - [D. Andreuccetti, N. Zoppetti](#)
"Campo magnetico disperso da elettrodotti ad alta tensione: una metodologia avanzata di valutazione basata su modelli 3D di linee elettriche e territorio"
Atti del Convegno "Dal monitoraggio degli agenti fisici sul territorio alla valutazione dell'esposizione ambientale"
29-31 Ottobre 2003, Torino.
 - [M. Eini, N. Zoppetti](#)
"Confronto tra due approcci per la valutazione dell'influenza del terreno nel calcolo del campo magnetico generato da elettrodotti"
Atti del Convegno "Dal monitoraggio degli agenti fisici sul territorio alla valutazione dell'esposizione ambientale"
29-31 Ottobre 2003, Torino.
 - [N. Zoppetti, D. Andreuccetti](#)
"Valutazione numerica del campo magnetico generato da elettrodotti: approcci possibili e soluzioni concrete alla luce della normativa vigente"
Tutto Misure, N.02, anno 2005, pp. 111-116.
 - [D. Andreuccetti, N. Colonna, R. Fossi e N. Zoppetti](#)
"Campo magnetico disperso da elettrodotti ad alta tensione: validazione di una metodologia avanzata di valutazione basata su modelli 3D di linee elettriche e territorio"
Atti del terzo convegno nazionale "Controllo ambientale degli agenti fisici: dal monitoraggio alle azioni di risanamento e bonifica"
Biella, 7-9 giugno 2006, vol.2, pp.704-709.
 - [N. Zoppetti e D. Andreuccetti](#)
"Influenza del modello della linea nella determinazione delle fasce di rispetto degli elettrodotti"
Atti del terzo convegno nazionale "Controllo ambientale degli agenti fisici: dal monitoraggio alle azioni di risanamento e bonifica"
Biella, 7-9 giugno 2006, vol.2, pp.574-579.
- **Lucidi, in formato HTML, dei seminari tenuti dal dott. D. Andreuccetti alla scuola di Fisica Sanitaria**
 - [Panorama storico 1 - generale](#)
 - [Panorama storico 2 - ELF](#)
 - [Dualismo onda/corpuscolo - Radiazioni ionizzanti e non](#)
 - [Come nasce una norma di sicurezza: 1 - approccio top-down](#)
 - [Come nasce una norma di sicurezza: 2a - approccio effect-driven](#)
 - [Come nasce una norma di sicurezza: 2b - limiti di base e limiti di riferimento](#)
 - [Effetti acuti NON termici e margini di sicurezza](#)
 - [Effetti termici e margini di sicurezza](#)
 - [Classi di sorgenti di campi elettromagnetici](#)

- **Altri documenti**

- [Cosa sono le radiazioni non ionizzanti, come si misurano, quali sono le fonti di rischio](#)
Uno sguardo generale alle problematiche del settore
- [Campi elettromagnetici ad alta frequenza](#)
Aspetti tecnici delle sorgenti collegate ai servizi di telecomunicazione, con riferimento all'esposizione della popolazione
- [Manuale programma CAMPI](#)
Contiene algoritmo per il calcolo del campo elettrico e del campo magnetico dispersi da un elettrodotto
- [Report Tecnico IFAC N. TR/AEL/08.03 ISSN 1120-2823 "Modellazione dei conduttori di un elettrodotto aereo: la catenaria"](#)
Descrive le espressioni che stanno alla base della rappresentazione nello spazio del generico conduttore di un elettrodotto.
- [Documento sulla determinazione delle fasce di rispetto relative ad elettrodotti](#)
Descrive i criteri con cui sono determinate le fasce di rispetto in relazione sia alla normativa vigente, sia a possibili evoluzioni.
- [Riferimenti per approfondire](#)