



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI FIRENZE
Facoltà di Ingegneria - Dipartimento di Elettronica e
Telecomunicazioni

Tesi di laurea in Ingegneria Elettronica

IMPATTO AMBIENTALE DEI CAMPI
GENERATI DAGLI ELETTRODOTTI:
SVILUPPO ED APPLICAZIONE DI UN
METODO INNOVATIVO PER LA
VALUTAZIONE.

Autore
Nicola Zoppetti

Primo Relatore:
Prof. Ing. Luigi Millanta

Secondo Relatore:
Prof. Ing. Giancarlo Martarelli

Relatori esterni:
Dott. Daniele Andreuccetti

Prof. Ing. Alberto Giorgi

Anno Accademico 2000-2001

ad AnnaMaria ed Alfonso

Firenze, Marzo 2002

Ringraziamenti

Il primo ringraziamento va senza dubbio al personale del reparto “Interazione fra i campi elettromagnetici e la materia” dell’IROE (CNR) presso cui ho svolto questo studio.

In particolare ringrazio il Dott. Daniele Andreuccetti, con cui ho avuto la fortuna di lavorare ed al quale devo molto per quanto mi ha trasmesso, sia sul piano professionale, sia su quello umano.

Un grande “grazie” va all’Ing. Marco Bini, che ad ogni mio dubbio ha saputo rispondere andando oltre il quesito posto, fornendomi un quadro generale dei problemi e dei metodi per affrontarli e che, attraverso la discussione, mi ha stimolato a considerare molti aspetti, altrimenti trascurati.

Desidero citare inoltre tutti gli altri componenti del gruppo, che in tante occasioni hanno avuto modo di consigliarmi e che mi hanno fin dall’inizio accolto come uno di loro: il Dott. Roberto Olmi, i Sigg. Amleto Ignesi, Saverio Priori, Riccardo Vanni, l’Ing. Lapo Pieri ed, al di fuori del gruppo, il Sig. Carlo Bacci.

Ringrazio Enel Terna ed Enel Distribuzione per tutto il materiale fornitomi durante lo svolgimento dello studio ed in particolare il Geometra Roberto Carletti che si è rivelato un interlocutore ideale per competenza

e disponibilità.

Grazie al Prof. Ing. Luigi Millanta per la diponibilità e l'interessamento al mio lavoro e per avermi dato l'occasione di svolgere la tesi presso l'IROE.

Un ringraziamento va anche al Sig. Luca Meucci ed alla Dott.sa Valentina Scheggi per i preziosi consigli ed alla Sig.ra Laura Grazzini, al Dott. Paolo Beni ed al Sig. Marco Rossi per aver saputo comprendere le mie esigenze logistiche durante questi mesi di studio.

Il ringraziamento finale non può che andare a mia madre e mio padre, ai quali la tesi è dedicata, che mi hanno incoraggiato ed aiutato costantemente durante gli studi.

Indice

1	Introduzione	1
1.1	Il problema ELF	2
1.1.1	Effetti acuti	2
1.1.2	Effetti cronici	4
1.2	La Valutazione di Impatto Ambientale	10
1.2.1	Normativa della comunità europea	12
1.2.2	Normativa italiana	13
1.2.3	La procedura nazionale di VIA	15
1.3	Indicazioni generali per l'esecuzione di uno studio di impatto ambientale per elettrodotti	18
1.3.1	Quadro di riferimento programmatico	19
1.3.2	Quadro di riferimento progettuale	19
1.3.3	Quadro di riferimento ambientale	21
1.4	Presentazione dell'approccio utilizzato per l'esecuzione della VIA svolta	23
1.4.1	Inquadramento del problema	23
1.4.2	Il programma disponibile	26
1.4.3	Il nuovo programma	28
1.4.4	L'archivio delle linee	29
1.4.5	Approccio generale seguito per l'esecuzione della VIA	30
2	Gli elettrodotti	34
2.1	Caratteristiche generali delle linee elettriche	34
2.1.1	Le linee elettriche aeree	36
2.1.2	Le linee elettriche in cavo interrato	39
2.2	Il modello del conduttore aereo: la catenaria	43
2.2.1	Descrizione della catenaria sul piano verticale	44
2.2.2	Descrizione della catenaria in un sistema di riferimento tridimensionale	47
2.2.3	L'influenza delle condizioni ambientali e di carico sul parametro di posa	51

2.3	L'archivio delle linee	59
2.3.1	La struttura dell'archivio	59
3	L'archivio cartografico	68
3.1	Elementi di topografia	69
3.1.1	Richiami di geodesia	69
3.1.2	La rappresentazione dell'ellissoide sul piano	71
3.1.3	La cartografia ufficiale italiana	73
3.2	La base cartografica della VIA ed il modello del terreno	78
3.2.1	Il modello del terreno	80
3.2.2	Verifica dei vincoli imposti dalla base cartografica scelta	82
3.3	Il programma per l'interfacciamento con l'archivio cartografico	85
3.3.1	Tipo di interfacciamento all'archivio e librerie utilizzate	86
3.3.2	Utilizzo del modello del terreno: determinazione della quota di un punto di coordinate piane note	87
3.3.3	La consultazione dell'archivio cartografico per il popo- lamento dell'archivio delle linee	91
3.3.4	Il sezionamento del terreno	95
4	Il calcolo dei campi	107
4.1	Algoritmi di calcolo	108
4.1.1	Algoritmo di calcolo per il vettore induzione magnetica	110
4.1.2	Algoritmo di calcolo per il campo elettrico	113
4.2	Il programma di calcolo dei campi	118
4.2.1	Il linguaggio e l'ambiente di programmazione	118
4.2.2	Le strutture informatiche	120
4.2.3	Creazione delle strutture di dati	130
4.2.4	Rappresentazione della catenaria con un insieme delle sue corde	136
4.2.5	Calcolo del campo magnetico	147
4.2.6	Calcolo del campo elettrico	149
4.2.7	La ricerca di punti caratterizzati da valore di campo assegnato	159
4.3	Le Mappe di isocampo	170
4.3.1	Tecniche di tracciamento automatico	170
4.3.2	Caratteristiche generali delle linee isocampo	172
4.4	Verifiche	175
5	Presentazione dei risultati, proposte per la minimizzazione degli impatti e considerazioni finali	190
5.1	Definizione dei parametri di calcolo	191

5.2	Proposte per la minimizzazione degli impatti	194
5.2.1	Quando è opportuno ricorrere a mitigazioni o alternative?	195
5.2.2	Mitigazioni ed alternative	197
5.3	L'integrazione dei vari aspetti della VIA	202
5.4	Sviluppi futuri	205
Sintesi conclusiva		210
Appendici		
A	Giustificazione dell'approssimazione quasi statica	214
A.1	Il modello	215
A.2	La scomposizione dei campi	215
A.3	La caratterizzazione del terreno	217
A.4	Il campo elettrico	219
A.4.1	Il campo elettrico conservativo	219
A.4.2	Il campo elettrico longitudinale	220
A.5	Induzione magnetica	222
A.5.1	Induzione magnetica primaria	223
A.5.2	L'induzione magnetica dovuta alle correnti indotte . . .	223
A.6	Conclusioni	241
B	Specifiche per l'utilizzo del programma di calcolo dei campi	244
C	Specifiche per l'utilizzo dell'applicazione che accede all'archivio cartografico	254
Bibliografia		259

Capitolo 1

Introduzione

La sempre crescente richiesta di energia impone un continuo sviluppo della rete per la trasmissione e la distribuzione di energia elettrica. Insieme a questa esigenza sono cresciute anche le preoccupazioni legate alla presenza nell'ambiente di campi elettrici e magnetici generati dalle strutture della rete. In particolare, la questione ancora aperta dei possibili effetti sanitari legati alle esposizioni ai campi a basse e bassissime frequenze ha imposto l'inclusione delle radiazioni non ionizzanti tra gli aspetti analizzati nelle procedure di valutazione di impatto ambientale relative ad elettrodotti.

In questo capitolo viene dapprima delineato un quadro delle attuali conoscenze relative ai possibili effetti dei campi a frequenze estremamente basse (Extremely Low Frequency, ELF) su sistemi biologici; in seguito si presentano le caratteristiche della procedura di valutazione di impatto ambientale seguendo un percorso a tre tappe.

In primo luogo viene definito il concetto di valutazione di impatto ambientale (VIA) e se ne descrivono le finalità e le basi normative; in secondo luogo vengono fornite indicazioni sulla specifica tipologia di VIA relativa agli elettrodotti; infine, vengono presentati i metodi e gli strumenti utilizzati per eseguire la particolare VIA cui questa Tesi di Laurea si riferisce.

1.1 Il problema ELF

La progressiva diffusione nell'ambiente di campi elettrici e magnetici a basse e bassissime frequenze (Extremely Low Frequency, ELF) ha reso necessaria una riflessione sulle loro possibili interazioni con sistemi biologici. Per affrontare questo problema bisogna distinguere tra effetti acuti e cronici. Questa distinzione è particolarmente importante perchè, se da una parte gli effetti acuti sono il riferimento per i limiti di sicurezza delle normative vigenti in ambito nazionale ed internazionale, dall'altra, i possibili effetti legati all'esposizione cronica sono quelli che destano maggiore preoccupazione nell'opinione pubblica, nelle amministrazioni e nell'ambiente scientifico.

1.1.1 Effetti acuti

È noto che gli effetti acuti dei campi elettrici e magnetici ELF sono attribuibili alla densità di corrente da essi indotta nei tessuti degli organismi esposti.

Per basse densità di corrente le conseguenze principali consistono in interferenze nella sensibilità visiva (percezione di lampi luminosi e colorati, detti *fosfeni*) o tattile (*parestesie*); a livelli via via più elevati le correnti indotte possono causare contrazioni muscolari, aritmie cardiache - dalle extrasistoli fino alla fibrillazione ventricolare - e sensazione di calore.

Dall'analisi dei risultati sperimentali risulta che nessun effetto acuto si manifesta con valore di densità di corrente inferiore ai 10 mA/m^2 ; per questo motivo tale valore è stato assunto come riferimento di base per la determinazione dei limiti di sicurezza.

Tuttavia, i limiti di sicurezza per le esposizioni devono riferirsi alle intensità dei campi, che sono di impiego più immediato di quelli espressi in termini

di densità di corrente. La disciplina tramite la quale è possibile risalire alle intensità di campo elettrico e di campo magnetico in grado di indurre nei tessuti biologici un determinato valore di densità di corrente è la dosimetria.

A basse e bassissime frequenze le densità delle correnti indotte dal campo elettrico e dal campo magnetico sono proporzionali alle intensità dei rispettivi campi ed alla frequenza. Le costanti di proporzionalità (coefficienti dosimetrici) dipendono dalle condizioni di esposizione, dalla localizzazione dell'organo interessato e dalle sue caratteristiche elettriche. La loro determinazione consente di esprimere i limiti di sicurezza per i soggetti esposti in ambienti di lavoro in termini di intensità dei campi partendo dal suddetto valore limite di 10 mA/m^2 per la densità di corrente.

Per individuare i limiti per le esposizioni della popolazione si applicano degli opportuni margini di sicurezza, che traducono matematicamente l'adozione di maggiore cautela per le categorie più deboli.

In base alle suddette considerazioni la prestigiosa INIRC-IRPA (International Non-Ionizing Radiation Committee - International Radiation Protection Association) pubblicò su Health Physics nel 1990 le sue *Interim guidelines on limits of exposure to 50/60 Hz electric and magnetic fields* [22], che indicavano i livelli massimi ammissibili di esposizione, diversificandoli per i “professionalmente esposti” e per la popolazione in genere. In Italia esse sono state recepite, per la sola componente relativa alla popolazione, dal noto Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri (DPCM nel seguito) del 23/04/92.

I limiti suggeriti dall' INIRC-IRPA sono stati pienamente confermati nelle più recenti *Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)* [23], pubblicate nel 1998 a cura dell'ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radia-

tion Protection); nel 1999 queste linee guida sono state anche recepite in una raccomandazione del Consiglio della comunità europea. Le precedenti indicazioni a carattere comunitario erano costituite dalla proposta di normativa CENELEC ENV 50166-1 *Human exposure to electromagnetic fields -low frequency (0 Hz to 10 kHz)* [21], caratterizzata da limiti sensibilmente più elevati rispetto a quelli indicati dall'INIRC-IRPA e poi confermati dall'ICNIRP.

	ICNIRP	CENELEC ENV 50166-1
Campo E - lavoratori	10 kV/m	30 kV/m
Campo E - popolazione	5 kV/m	10 kV/m
Campo B - lavoratori	0,5 mT	1,6 mT
Campo B - popolazione	0,1 mT	0,64 mT

Tabella 1.1: Limiti di sicurezza ICNIRP e CENELEC a 50 Hz

1.1.2 Effetti cronici

I primi sospetti che l'esposizione cronica ai campi ELF, di intensità molto inferiore a quella indicata dalle normative, potesse determinare dei rischi per la salute, sono nati probabilmente in seguito alla pubblicazione sull'*American Journal of Epidemiology*, nel 1979, dell'articolo *Electrical wiring configurations and childhood cancer* di Nancy Wertheimer e Ed Leeper [15]. In questo articolo per la prima volta si avanzava l'ipotesi della possibile esistenza di una associazione tra la residenza nei pressi di grandi elettrodotti e l'insorgere di gravi patologie infantili, come la leucemia acuta; la questione è rimasta per un po' di tempo quiescente, poi sono stati diffusi i risultati di numerosissime indagini epidemiologiche di verifica, molte delle quali confermavano l'associazione. Subito dopo si sono impossessati della questione i mezzi di

informazione che, con toni spesso esageratamente allarmistici, hanno destato interesse e soprattutto preoccupazione nell'opinione pubblica.

La maggior parte degli studi epidemiologici mette in evidenza una relazione tra residenza presso grandi elettrodotti e aumento del rischio di sviluppare una leucemia; alcuni ricercatori hanno ipotizzato come agente responsabile il campo magnetico ed hanno conseguentemente cercato di proporre una soglia di discriminazione per le esposizioni croniche tra livelli sicuri e pericolosi. Il fatto che sia ipotizzata una responsabilità del solo campo magnetico è giustificato dalla constatazione che il campo elettrico è schermato assai efficacemente dalle pareti degli edifici e quindi, presumibilmente, non ha rilevanza dal punto di vista delle esposizioni croniche.

Nonostante gli sforzi operati, non è stato trovato un plausibile meccanismo patogenico che giustifichi la relazione causa-effetto fra esposizione prolungata a bassi livelli di campo e rischio per la salute. Al di là delle ipotesi, attualmente, nessun risultato di laboratorio riproducibile, sia *in vitro* che *in vivo*, è riuscito a dimostrare effetti biologici dei campi magnetici ELF a livelli inferiori ai limiti di sicurezza.

La soglia di discriminazione per esposizioni croniche è stata dunque individuata con metodi per lo più deduttivi, in base ai valori tipici di campo magnetico nei pressi delle linee elettriche; si è raggiunto un certo consenso sul fatto che, se l'agente responsabile della presunta cancerogenicità delle linee elettriche è il campo magnetico, allora la soglia di discriminazione tra valori sicuri e pericolosi si deve collocare attorno a 0.2 - 0.5 microtesla, un valore che indicheremo nel seguito con la denominazione di soglia (di attenzione) epidemiologica.

Esistono dei criteri sulla base dei quali si giudica la validità di uno studio epidemiologico prendendone in considerazione la significatività statistica, la

corrispondenza tra studi diversi, l'esistenza di una relazione dose-risposta, l'evidenza di laboratorio (esperimenti in vivo ed in vitro) e l'esistenza di un plausibile meccanismo biologico che spieghi i risultati degli studi epidemiologici (criteri di Hill [8]). Gli studi che si sono occupati della possibile cancerogenicità del campo magnetico ELF non soddisfano i criteri di Hill da diversi punti di vista: molti di essi sono carenti sul piano della significatività statistica (a causa della bassissima incidenza delle patologie considerate); sono frequenti discordanze nei risultati tra indagini simili; non mancano lavori con risultati completamente negativi, anche se in minoranza. Inoltre non esiste, salvo che in pochi casi, una relazione dose-risposta; le evidenze di laboratorio sono insufficienti e, nonostante vari tentativi, non è stato possibile individuare chiaramente un plausibile meccanismo biologico.

In base alle considerazioni esposte si capisce il motivo per cui i valori assunti come limiti di sicurezza nelle normative nazionali ed internazionali si riferiscano agli effetti acuti piuttosto che a quelli ipotizzati in conseguenza ad esposizioni croniche.

Al fine di giungere a risultati più precisi ed uniformi rispetto ai singoli studi epidemiologici (dal 1979 ad oggi sono più di trenta quelli riguardanti i soli tumori infantili), sono state pubblicate numerose rassegne, condotte anche effettuando *meta-analisi*, cioè analisi quantitative dei risultati di studi epidemiologici omogenei. Un'altra procedura atta a valutare il rischio espositivo consiste nell'impiego delle così dette analisi *pooled*, effettuate aggregando i dati originali dei singoli studi e non i soli risultati, come avviene nelle meta-analisi.

I risultati di questi nuovi e più approfonditi studi sono ben sintetizzati dalle valutazioni espresse in merito dalle grandi organizzazioni che operano nel settore della protezione da radiazioni non ionizzanti.

Il National Institute for Environmental Health Sciences (NIEHS) degli Stati Uniti [24], rifacendosi alle prescrizioni dell'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (IARC), ha concluso che sono emerse "limitate evidenze" di cancerogenicità per la leucemia su popolazione in età infantile in relazione all'esposizione residenziale e per la leucemia linfatica cronica in relazione ai "professionalmente esposti". Con il termine "limitata evidenza" si intende che un nesso causale è plausibile sebbene non sia stato provato, stante l'impossibilità di escludere il ruolo della variabilità casuale, di spiegazioni alternative e di errori sistematici. Su questa base il NIEHS ha classificato i campi ELF come "possibili cancerogeni".

Nel marzo 2000 è stato pubblicato un documento del National Radiological Protection Board (NRPB) britannico [25], nel quale si dice che: "Né gli esperimenti di laboratorio hanno fornito alcuna valida prova che i campi elettrici e magnetici a bassa frequenza siano in grado di provocare il cancro, né gli studi epidemiologici sull'uomo suggeriscono che questi provochino il cancro in generale. C'è tuttavia qualche evidenza epidemiologica che l'esposizione prolungata ad alti livelli di campo magnetico a frequenza industriale sia associato ad un rischio di leucemia in popolazione in età infantile. In assenza di una chiara dimostrazione di un effetto cancerogeno negli adulti, o di una plausibile spiegazione fornita da esperimenti su animali o cellule isolate, l'attuale evidenza epidemiologica non è abbastanza forte da giustificare una netta conclusione che tali campi provochino la leucemia nei bambini. Comunque, a meno che ulteriori ricerche non dimostrino che i risultati sono dovuti al caso o a qualche artefatto al momento non identificato, resta la possibilità che esposizioni intense e prolungate possano determinare il rischio di leucemia infantile". A commento finale del Rapporto, i ricercatori, coordinati dall'epidemiologo sir R. Doll, hanno concluso che non esistono evidenze

scientifiche aggiuntive tali da richiedere una variazione dei limiti di esposizione suggeriti dall'ICNIRP, gli stessi raccomandati per la popolazione nel 1999 a livello comunitario.

Nel giugno 2001 infine la IARC ha elaborato una sua classificazione giungendo a definire l'esposizione a campi ELF come "possibile cancerogeno", sulla base della limitata evidenza di un aumento di rischio di leucemie infantili per esposizioni superiori a 0,4 microtesla. Ha invece escluso tale rischio per bambini esposti a valori di campo magnetico inferiori, nonché l'associazione tra campi elettrici e magnetici ELF e l'insorgenza di tumori del cervello e di altri tumori solidi. Per la popolazione adulta, la IARC ritiene che non esistano dati riproducibili che dimostrino un maggior rischio di alcun tipo di tumore legato ad esposizioni ambientali e occupazionali a campi elettrici e magnetici a bassa frequenza.

Ci troviamo dunque di fronte a questa situazione: le norme di sicurezza, basate su ciò che è quantitativamente accertato, indicano come sicure esposizioni a livelli fino ad almeno un centinaio di microtesla, mentre le indagini epidemiologiche fanno ritenere potenzialmente pericolose esposizioni croniche a valori di pochi decimi di microtesla.

Questa situazione, palesemente insoddisfacente anche dal punto di vista scientifico, è alla base dell'apprensione e, talvolta, dell'avversione della popolazione nei confronti delle infrastrutture elettriche. Espresso in forma di proteste dirette e riproposto attraverso l'attività di comitati di base e di associazioni di consumatori, questo atteggiamento ha suggerito all'Amministrazione di inserire i campi elettromagnetici tra i parametri ambientali che devono essere presi in considerazione nell'esecuzione di una VIA relativa ad un elettrodotto. È stato ritenuto infatti che, sebbene le evidenze scientifiche dell'esistenza di rischi sanitari ricongiungibili all'esposizione cronica a bas-

sissimi livelli non siano abbastanza forti da giustificare una revisione verso il basso dei limiti di sicurezza delle normative, siano tuttavia sufficienti a motivare l'adozione di atteggiamenti cautelativi almeno in occasione di nuove installazioni o profonde ristrutturazioni del sistema elettrico.

Vale forse la pena osservare come una tale risoluzione, per molti versi condivisibile, non risolva di fatto la questione di quali livelli di campo possano essere considerati sicuri, ma sposti semplicemente il contenzioso in un contesto diverso; questa nuova collocazione permette, almeno in via di principio, di affrontare il problema da un punto di vista più ampio e di integrare la discussione con considerazioni di carattere ambientale e sociale.

1.2 La Valutazione di Impatto Ambientale

La **Valutazione di Impatto Ambientale (VIA)** è uno strumento di supporto alle decisioni, che pone la salvaguardia dell'ambiente naturale e della salute dell'uomo al centro dei processi decisionali che precedono la realizzazione di un'opera o di un intervento sul territorio.

La VIA si esplica attraverso una procedura amministrativa finalizzata a valutare la compatibilità ambientale di un'opera in progetto, sulla base di un'analisi degli effetti che l'opera stessa esercita sulle componenti ambientali e socio-economiche interessate e degli interventi per mitigarli e compensarli. Elemento fondamentale della procedura è la partecipazione al processo decisionale delle diverse parti coinvolte, in particolare gli enti locali, che sono chiamati ad esprimere un parere in merito alla realizzazione dell'opera, e i cittadini, che possono inviare osservazioni alla struttura amministrativa responsabile della procedura.

La Valutazione di Impatto Ambientale ha lo scopo di individuare, descrivere e valutare, *in via preventiva*, l'impatto ambientale di determinati progetti pubblici o privati. A tal fine è necessario che le implicazioni di ordine ambientale siano analizzate quanto prima nella progettazione. Non può ritenersi corretto un procedimento tecnico in cui lo studio di impatto ambientale sia stato effettuato solo a valle della progettazione perchè in tal caso sarebbe un documento di tipo puramente giustificativo. Intervenendo *prima dell'approvazione del progetto*, la procedura consente di scegliere, tra diverse soluzioni progettuali, quella che presenta il minor impatto ambientale e di introdurre nel progetto eventuali varianti, che possano mitigare e/o compensare l'impatto dell'opera sull'ambiente. In sostanza, la progettazione e lo studio di impatto ambientale devono essere, per quanto possibile, contestuali: il prodotto finale, inteso come documento tecnico presentato in sede

amministrativa, avrà anche il compito di evidenziare quale sia stato il ruolo effettivamente svolto dalle analisi e dalle valutazioni ambientali all'interno della progettazione.

La VIA non è quindi da intendersi come “strumento” necessario per verificare il rispetto di standard o per imporre nuovi vincoli, oltre quelli già operanti, bensì come “processo coordinato” per raggiungere un elevato grado di protezione ambientale, realizzando l'obiettivo di migliorare la qualità della vita, mantenere la varietà delle specie, e conservare la capacità di riproduzione dell'ecosistema in quanto risorsa essenziale.

Affinché però l'ambiente possa condizionare il progetto è necessario che il gruppo interdisciplinare che opera come soggetto tecnico incaricato dello studio di impatto, abbia individuato con chiarezza i possibili effetti critici delle varie alternative progettuali. Questa fase (spesso indicata col nome di *scoping*) è tecnicamente delicata, in quanto si tratta di scegliere, tra gli innumerevoli effetti ambientali attribuibili alle varie alternative di un progetto, quelli effettivamente critici ai fini della valutazione. È in questa fase che si decide quali settori e componenti ambientali studiare e a quale livello di approfondimento. Lo *scoping* deve tenere conto, per quanto possibile, non solo delle indicazioni emergenti all'interno del gruppo tecnico, ma anche delle preoccupazioni effettive del pubblico coinvolto, che non necessariamente coincidono con quelle tecniche: è quindi auspicabile una partecipazione anche a questo livello.

Infine è importante riconoscere due distinti momenti della valutazione: una valutazione in sede tecnica e una valutazione in sede istituzionale. Le due valutazioni, quando siano state condotte separatamente e con rigore, non sempre coincidono, soprattutto per quanto riguarda il “peso” attribuito alla componente ambientale rispetto alle altre (aspetti economici, obiettivi

tecnicisti, ecc.) [18].

1.2.1 Normativa della comunità europea

Il primo riferimento in materia di valutazione di impatto ambientale a livello comunitario è costituito dalla direttiva del 27 giugno 1985, n. 337. La direttiva impone ai paesi membri della comunità di fare in modo che prima del rilascio delle autorizzazioni, i progetti per i quali si ipotizzano ripercussioni rilevanti sull'ambiente, siano preventivamente sottoposti a procedure per la valutazione di impatto ambientale dell'opera. In ogni stato membro, tale valutazione potrà essere integrata all'interno di procedure esistenti, oppure in procedure apposite, create per l'applicazione della direttiva stessa, da cui verranno estratti i criteri di carattere tecnico-procedurale che riguardano:

- il campo di applicazione;
- il tipo di informazioni sull'interazione opera-ambiente;
- l'informazione e la partecipazione del pubblico.

La direttiva, oltre a fornire dei criteri generali per l'individuazione delle opere relativamente alle quali avviare la valutazione di impatto ambientale, si preoccupa di circoscrivere più precisamente il suo campo di applicazione; un certo numero di categorie di opere sono infatti individuate "a priori" dalla direttiva stessa, che le descrive in due allegati distinti.

Per le opere elencate nel primo dei due allegati gli stati membri dovranno obbligatoriamente attivare la procedura di valutazione di impatto ambientale; per quelle elencate sul secondo allegato la valutazione sarà attivata "solo quando gli stati membri ritengano che le loro caratteristiche lo richiedano" (art. 4).

Oltre al campo di applicazione la direttiva specifica quali devono essere le documentazioni e le informazioni essenziali che il committente fornirà in relazione all'opera da realizzare ed alla sua interazione con l'ambiente (art. 5).

Tali informazioni, da comprendere organicamente in uno studio di impatto ambientale, riguardano:

- la descrizione del progetto;
- i dati necessari ad individuare e valutare gli effetti indotti nell'ambiente;
- le misure di mitigazione degli effetti negativi.

Ultimo ed importante aspetto della valutazione di impatto ambientale che viene individuato nella direttiva è la trasparenza della procedura e la possibilità di accesso alle informazioni: in sostanza la possibilità del pubblico di partecipare al processo decisionale (art 6,7,8,9).

La Direttiva del Consiglio 337/85/CEE è stata integrata dalla direttiva 97/11/CE del 3.3.1997 per gli aspetti riguardanti le categorie di opere da assoggettare a VIA e le fasi procedurali.

1.2.2 Normativa italiana

In Italia il ministero dell'ambiente è stato istituito l' 8 luglio 1986 dalla legge n. 389. La stessa legge, all'art. 6, stabilisce tempi e modi per l'attuazione della direttiva comunitaria in tema di impatto ambientale.

Le categorie di opere da assoggettare a procedura di valutazione di impatto ambientale sono individuate dai successivi DPCM 10 agosto 1988 n. 377 e DPCM 27 dicembre 1988, in cui vengono anche dettate le norme tecniche per l'esecuzione degli studi di impatto ambientale ed in particolare per

la formulazione del giudizio di compatibilità, che stabilisce se, alla luce di tutte le informazioni riportate nello studio, l'opera è realizzabile in quanto compatibile ed armonizzabile nell'ambiente che la circonda oppure non lo è in ragione degli impatti ipotizzati.

Il DPCM del 27 dicembre 1988 specifica la documentazione da allegare alla pronuncia di compatibilità ambientale e fornisce specificazioni sui *quadri di riferimento programmatici, progettuali, ambientali* secondo i quali articolare gli studi di impatto ambientale. Il decreto inoltre individua e definisce le componenti ed i fattori ambientali da considerare nello studio e specifica le categorie di opere da sottoporre a VIA già elencate nel DPCM 377/88.

L'obbligo di preventiva valutazione di impatto ambientale è esteso anche agli elettrodotti dalla legge del 9 gennaio 1991 n. 9; in particolare nell'art. 2 si stabilisce che “gli elettrodotti ad alta tensione (...) sono da assoggettare alla valutazione di impatto ambientale ed a ripristino territoriale nei limiti e con le procedure previste dalla normativa vigente”.

Il Decreto del Presidente della Repubblica 27 aprile 1992 integra la disciplina dettata dai precedenti decreti del 1988 e fornisce indicazioni per la redazione degli studi di impatto e criteri di formulazione del giudizio di compatibilità relativamente agli elettrodotti aerei esterni. In particolare, specifica che sono assoggettati a procedura di VIA gli elettrodotti con tensione nominale di esercizio superiore a 150 kV e lunghezza superiore a 15 chilometri.

Più in generale, il decreto specifica gli atti di programmazione e pianificazione di cui tenere conto nel quadro di riferimento programmatico e gli elementi da fornire nel quadro di riferimento progettuale.

1.2.3 La procedura nazionale di VIA

Una VIA può essere nazionale (cioè coordinata a livello ministeriale) oppure regionale.

La procedura nazionale di VIA prevede le seguenti fasi:

- Presentazione e comunicazione del progetto e dello studio di impatto ambientale;
- pubblicazione dello studio e partecipazione dei cittadini;
- istruttoria;
- giudizio di compatibilità.

Entrando in merito a ciascuno dei punti esposti, il proponente presenta la domanda di autorizzazione o concessione e contestualmente una richiesta di pronuncia di compatibilità ambientale al Ministero dell'Ambiente, al Ministero per i beni e le attività culturali ed alla Regione territorialmente competente.

La domanda è accompagnata da documenti (art. 2 del DPCM n.377/88) la cui esattezza deve risultare da una relazione giurata resa dai professionisti iscritti ai rispettivi albi, ovvero dagli esperti che firmano lo studio di impatto ambientale.

I documenti richiesti sono:

- lo studio di impatto ambientale articolato secondo tre quadri, programmatico, progettuale ed ambientale;
- gli elaborati progettuali;
- una sintesi non tecnica destinata all'informazione al pubblico;
- la documentazione attestante l'avvenuta pubblicazione ai sensi dell'art. 1, comma 1 DPCM n.377/88.

Per permettere ai cittadini di partecipare al processo decisionale devono essere individuati volta per volta gli strumenti più efficaci ed adatti al progetto specifico. È questo un punto tanto importante quanto difficile da affrontare; si deve infatti riuscire ad esprimere i concetti in modo comprensibile ed immediato senza che ciò comporti una banalizzazione dei problemi affrontati. Aspetto particolarmente spinoso è quello di allargare il più possibile l'area di coinvolgimento e fare in modo che partecipino alle iniziative tutti i soggetti effettivamente interessati.

L'istruttoria è condotta dalla Commissione VIA (istituita ai sensi dell'art. 18, comma 5, della legge 11 marzo 1988, n.67) e si conclude con un parere motivato.

Il Ministro dell'Ambiente, sentite le Regioni territorialmente interessate, di concerto con il Ministro per i beni e le attività culturali, si pronuncia sulla compatibilità ambientale entro i 90 giorni successivi al deposito.

Il giudizio di compatibilità ambientale, espresso con decreto del Ministro dell'Ambiente, è vincolante ai fini della approvazione dell'opera; qualora il Ministro competente alla realizzazione del progetto non ritenga di uniformarsi al giudizio espresso dal Ministero dell'Ambiente, la questione è rimessa al Consiglio dei Ministri.

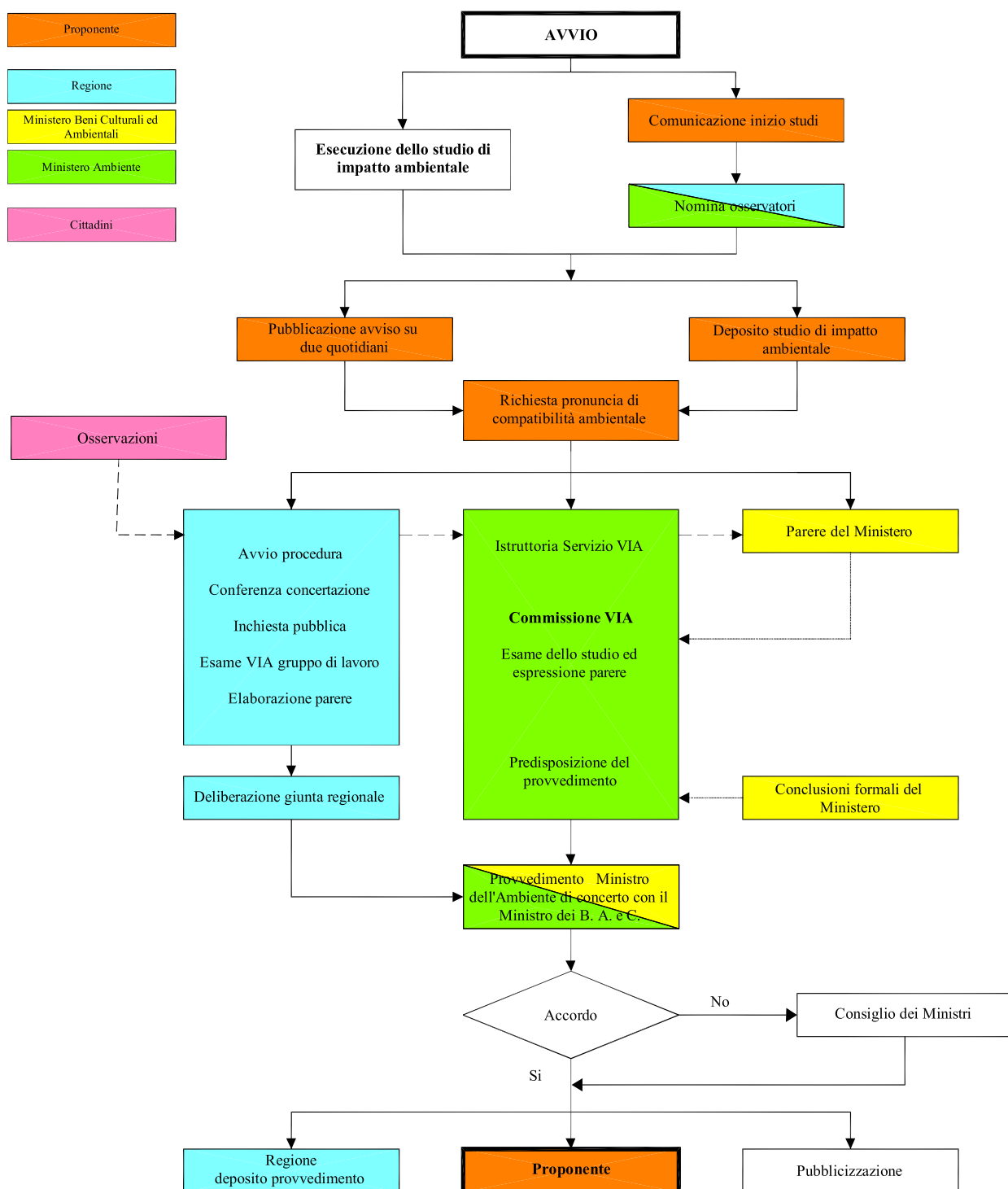


Figura 1.1: Fasi principali della procedura nazionale di VIA

1.3 Indicazioni generali per l'esecuzione di uno studio di impatto ambientale per elettrodotti

Come si è accennato nel paragrafo precedente, l'art. 2 della legge 9 gennaio 1991 n. 9 stabilisce l'obbligo di assoggettare a valutazione di impatto ambientale gli elettrodotti ad alta tensione.

Sono state individuate come caratteristiche ambientali influenzabili dalla presenza di questa tipologia di opera, o, in altre parole, come *fattori ambientali* potenzialmente coinvolti, i seguenti:

- **il suolo**, per quanto riguarda l'occupazione fisica da parte delle strutture dell'impianto e dei sistemi accessori;
- **le radiazioni non ionizzanti**, cioè i campi elettrici e magnetici generati dalle linee, in relazione ai possibili effetti sanitari;
- **il rumore**, dovuto all'effetto corona e ad eventuali microscariche in prossimità degli isolatori;
- **il paesaggio**, per ciò che riguarda l'impatto visivo delle strutture e la loro armonizzazione nell'ambiente circostante;
- **l'ecosistema**, per quanto riguarda la flora e la fauna.

Si esclude invece che possano esservi impatti significativi per quanto riguarda l'atmosfera, l'ambiente idrico ed il sottosuolo.

Le procedure di VIA per un elettrodotto devono riferirsi sia alla fase di esercizio dell'elettrodotto sia a quelle di costruzione ed eventuale dismissione; l'aspetto delle radiazioni non ionizzanti tuttavia è legato soltanto all'e-

esercizio della linea ed è quindi solo a questa fase che si riferiranno tutte le considerazioni seguenti.

Come specificato nelle direttive e nelle leggi che la istituiscono, l'esecuzione di una procedura di VIA si articola in tre *quadri di riferimento*: 1) programmatico, 2) progettuale, 3) ambientale.

1.3.1 Quadro di riferimento programmatico

In questo quadro si forniscono gli strumenti per collocare l'elettrodotto sottoposto a VIA sia nel contesto degli sviluppi previsti per la rete elettrica sia in relazione alle prospettive di sviluppo del territorio dal punto di vista paesaggistico e insediativo, contenute nei piani regolatori.

In altre parole, si deve motivare l'opportunità del nuovo impianto sia inquadrandolo nei piani di sviluppo per la rete elettrica sia in relazione ai piani paesistici e territoriali delle zone interessate.

1.3.2 Quadro di riferimento progettuale

Nel quadro di riferimento progettuale devono essere specificate dettagliatamente tutte le caratteristiche fisiche e tecniche del progetto; inoltre devono comparire tutti i vincoli ed i condizionamenti sia in fase di esercizio che di realizzazione.

Nello stesso quadro devono essere descritte le soluzioni tecniche adottate in relazione alle alternative tecnologiche prese in esame.

Gli aspetti fondamentali ai fini della valutazione degli impatti correlati con i campi elettrici e magnetici sono:

Il tracciato della linea, che deve essere documentato con planimetrie di scala adeguata (tipicamente 1:100000) che evidenzino la posizione della linea,

dei sostegni e di tutte le infrastrutture annesse, oltre naturalmente a tutti gli elementi di rilievo della zona interessata. Dovranno inoltre essere allegate varie mappe tematiche, tra cui quella dell'uso del suolo interessato dalla linea. Tale documentazione dovrà essere disponibile tanto per il tracciato di progetto, tanto per le alternative di tracciato proposte in sede di VIA.

La struttura delle linee, intesa come l'insieme delle caratteristiche di progetto dell'elettrodotto. Di particolare rilievo ai fini della valutazione dei campi sono la descrizione dettagliata delle strutture dei tralicci di sostegno, le caratteristiche costruttive dei conduttori con le relative condizioni di posa, oltre chiaramente alle caratteristiche di esercizio.

Le distanze di rispetto, previste dalla normativa italiana in relazione ad abitazioni e strutture ove si suppone una permanenza prolungata della popolazione; tali distanze si calcolano a partire dal conduttore più vicino all'edificio in questione e, per una linea a 380 kV, la distanza di rispetto è di 28 metri. In normative di altre nazioni, le distanze di rispetto si calcolano a partire dalla proiezione al suolo dell'asse della linea; ciò è stato ritenuto eccessivamente penalizzante per i tratti di linea in cui i cavi si trovano a grande altezza dal suolo come nel caso di attraversamenti di vallate. La normativa italiana consentirebbe la presenza di edifici anche nelle immediate vicinanze di un elettrodotto anche in zone pianeggianti, purché i conduttori si trovino ad altezza sufficiente dal suolo, circostanza questa che si verifica per esempio in prossimità dei tralicci. Per i progetti di elettrodotto più recenti è stato introdotto il criterio di mantenere comunque una distanza minima tra gli edifici e l'asse della linea. Il proponente a tal proposito dovrà sia documentare l'osservanza delle distanze di rispetto, sia indicare l'eventuale adozione di criteri aggiuntivi, quale l'introduzione di una distanza minima dall'asse o dai sostegni della linea.

1.3.3 Quadro di riferimento ambientale

In questo quadro sono raccolti i risultati delle valutazioni degli impatti relativamente a ciascuno dei fattori ambientali individuati per la tipologia di opera sottoposta a VIA. In particolare, la parte riguardante i campi elettrici e magnetici si articola nei seguenti punti:

a) Livelli di campo elettrico e magnetico

Lo studio deve contenere i risultati dei calcoli dei campi per la linea di progetto, che devono essere riportati sia in forma grafica che di tabulati e devono estendersi fino ad una distanza di almeno il doppio della distanza di rispetto prevista dalla normativa vigente.

In corrispondenza di insediamenti abitativi è documentata la richiesta che tali calcoli si estendano fino a distanze tali che i livelli di induzione magnetica siano dell'ordine del microtesla o inferiori.

Nello studio devono essere sommariamente descritti i codici di calcolo impiegati e dettagliatamente indicati tutti i parametri come base per i calcoli.

b) Valutazione delle esposizioni

Ai fini della valutazione delle esposizioni sono rilevanti sia l'intensità dei campi, sia la durata dell'esposizione stessa. Come già evidenziato, a distanze dalle linee superiori a quelle minime previste dalla normativa per i fabbricati e le aree a lunga permanenza, le intensità di entrambi i campi sono tali da consentire, secondo le indicazioni di tutte le normative nazionali e raccomandazioni internazionali, l'esposizione continua della popolazione. Non appaiono quindi giustificabili valutazioni sulla durata di eventuali permanenze occasionali in tali zone; infatti solamente l'esposizione cronica può essere rilevante per valutare eventuali effetti a lungo termine. La dimensione complessiva dell'e-

sposizione cronica della popolazione è implicitamente fornita dai dati sugli insediamenti abitativi ed industriali, cui si è già fatto riferimento in merito al tracciato della linea.

1.4 Presentazione dell'approccio utilizzato per l'esecuzione della VIA svolta

Fissati i riferimenti normativi ed esposto il quadro generale in cui si colloca una generica VIA per un elettrodotto, è giunto il momento di presentare la particolare VIA su cui si è sviluppata questa Tesi di Laurea.

È importante infatti precisare che la Tesi non affronta un problema ipotetico o astratto, ma è l'esecuzione di una reale VIA in cui l'IROE (Istituto di Ricerca sulle Onde Elettromagnetiche, parte del Consiglio Nazionale delle Ricerche), ed in particolare il gruppo che segue la linea di ricerca "Protezione dai campi elettromagnetici a basse frequenze, radiofrequenze e microonde", è coinvolto.

1.4.1 Inquadramento del problema

Le basi per la VIA a cui ci riferiamo sono state gettate a conclusione del confronto tecnico svoltosi in sede di Presidenza del Consiglio dei Ministri tra Regione Toscana e Terna, in ordine alle diverse problematiche riguardanti le attività della società elettrica in Toscana, confronto in cui è stato redatto un protocollo di intesa firmato dalle parti in data 28 febbraio 2000.

In questo documento venivano prima di tutto identificate le infrastrutture soggette a VIA, con particolare riferimento alla centrale termoelettrica di Santa Barbara ed al suo inserimento nella rete, alla realizzazione di una direttrice a 380 kV di collegamento dalla centrale stessa alle stazioni di Tavarnuzze (Impruneta) e Casellina (Scandicci), nonché agli interventi per la razionalizzazione della rete di trasmissione elettrica e per il miglioramento ambientale.

Per l'aspetto dei campi elettrici e magnetici è stata quindi individuata

nell'IROE, ed in particolare nel reparto Interazione dei campi elettromagnetici con la materia, la struttura in possesso delle competenze e degli strumenti adatti per svolgere tale studio.

Per presentare il tipo di approccio seguito si richiamano i punti **a)** e **b)** del *quadro di riferimento ambientale*, ripercorrendo, a grandi linee, come sono stati sviluppati i temi corrispondenti.

a) Livelli di campo elettrico e magnetico

Per calcolare in via teorica i livelli di campo attesi nei dintorni di una linea elettrica è necessario disporre sia delle informazioni sulla struttura dell'elettrodotto e sulla conformazione del terreno ad esso circostante, sia di un programma di calcolo in grado di elaborare tali informazioni e produrre i risultati in forma opportuna.

Occorre avere presente che il campo elettrico ed il campo magnetico dispersi da un elettrodotto non si mantengono costanti né nello spazio né nel tempo.

Dal punto di vista dello spazio, la principale causa di disomogeneità proviene ovviamente dalla posizione del punto di valutazione (altezza da terra e distanza dall'asse della linea); ma anche a pari distanza ed altezza, procedendo lungo la linea, ci si deve aspettare una variazione dell'intensità dei campi dovuta sia alla differente altezza dei conduttori dal suolo, sia ad eventuali variazioni strutturali dell'elettrodotto (cioè a modifiche della mutua posizione dei conduttori), sia infine alla conformazione orografica del terreno. Dal punto di vista del tempo, la variazione interessa il campo magnetico (il campo elettrico si può ritenere ragionevolmente costante nel tempo, salvo casi particolari) ed è originata dalla variazione della corrente che percorre la linea, a sua volta dipendente dal carico, cioè da quanta potenza l'elettrodotto sta

fornendo alla propria utenza. In via di principio, potrebbe essere sufficiente ridurre il lavoro alla messa a punto di un programma che integri al suo interno la descrizione dell'elettrodotto, accetti in ingresso le coordinate del punto di valutazione e fornisca in uscita i valori di campo attesi. Tuttavia è chiaro che, per motivi pratici, una VIA non può limitarsi a questo. *Occorre fornire all'interlocutore dei mezzi di interpretazione più sintetici ed immediati, che diano rapidamente il quadro della situazione. Questo può essere ottenuto, ad esempio, attraverso la costruzione di una serie di curve isocampo sulle mappe topografiche dei luoghi interessati.* Si pone così un problema di campionamento nello spazio: quanto devono essere fitti i punti di valutazione per ottenere curve significative? Un criterio potrebbe essere quello di scegliere un passo di campionamento sufficiente a garantire di non omettere nemmeno un edificio: quindi, probabilmente, un passo non superiore ad una decina di metri. Tuttavia, in questo caso il numero di punti di valutazione potrebbe diventare eccessivo. Abbiamo optato per un compromesso, in cui le curve isocampo si ricostruiscono sulla base di un campionamento regolare lungo la linea a passi di 20 metri, andando ogni volta a cercare in direzione perpendicolare alla linea stessa, al livello del suolo, la distanza a cui si raggiunge il valore di campo che si vuole evidenziare. Il processo viene integrato con valutazioni ad hoc in punti del territorio prescelti per la loro significatività (punti che potremmo chiamare siti sensibili). Come si è accennato, per il campo magnetico esiste anche un problema di campionamento nel tempo poiché, sebbene l'intensità del campo sia direttamente proporzionale al valore istantaneo della corrente, tuttavia non è immediatamente prevedibile di quanto si sposti sul terreno una certa curva isocampo, in corrispondenza di una data variazione della corrente sulla linea. Occorre quindi ripetere l'intero processo di costruzione delle curve isocampo in corrispondenza di due (o più) valori di

corrente ritenuti significativi: per esempio, il valore medio annuale (che può considerarsi il più indicativo qualora si abbiano in mente gli eventuali effetti a lungo termine) ed un valore massimo (di esercizio oppure nominale), per una valutazione massimamente cautelativa.

b) Valutazione delle esposizioni

La valutazione delle esposizioni rimane automaticamente definita dall'analisi comparata delle mappe di isocampo e delle mappe tematiche indicanti l'uso del suolo o, più in generale, da tavole cartografiche in base alle quali sia possibile distinguere il tipo di insediamento (residenziale, professionale, occasionale ...) caratteristico di ciascuna porzione di territorio rappresentata.

In relazione alle aree residenziali, un ulteriore interessante sviluppo potrebbe essere quello di "sovrapporre" le mappe di isocampo con tavole cartografiche in cui il territorio sia diviso in zone, ciascuna delle quali sia caratterizzata da una certa *densità demografica*; in tal modo si riuscirebbe ad ottenere delle indicazioni quantitative del numero di esposti in relazione a diversi valori di campo.

1.4.2 Il programma disponibile

L'IROE dispone da tempo di un codice di calcolo, denominato programma CAMPI, adatto alla determinazione del campo elettrico e del campo magnetico dispersi da elettrodotti di qualsiasi tipo. Esso è stato distribuito ad un gran numero di istituzioni pubbliche operanti nel settore della protezione NIR (Non Ionizing Radiations) ed ha sempre dato prova di accuratezza adeguata allo scopo. Tuttavia, questo codice non risulta adatto all'esecuzione di una Valutazione di Impatto Ambientale, per due ordini di motivi: uno legato

all'impostazione generale del programma l'altro legato al modello fisico da esso adottato. Per quanto riguarda l'impostazione, la struttura del programma CAMPI è orientata ad una introduzione manuale sia delle caratteristiche della linea, sia della definizione del luogo dei punti di calcolo; in conseguenza di ciò il programma CAMPI non consente, se non in modo estremamente macchinoso, di eseguire valutazioni su ampie zone di territorio, interessate da numerose campate di differente altezza, né di tracciare in tali zone mappe isocampo. Per quanto concerne invece il modello fisico, quello adottato dal programma CAMPI è caratterizzato dai seguenti limiti:

1. tutti i conduttori costituenti la linea sono considerati
 - (a) rettilinei;
 - (b) di forma cilindrica con diametro costante;
 - (c) orizzontali;
 - (d) di lunghezza infinita;
 - (e) paralleli tra di loro.
2. Il suolo è considerato:
 - (a) piano (non necessariamente orizzontale);
 - (b) privo di irregolarità;
 - (c) perfettamente conduttore dal punto di vista elettrico;
 - (d) perfettamente "trasparente" dal punto di vista magnetico.
3. Viene trascurata la presenza dei tralicci o piloni di sostegno, degli edifici, della vegetazione e di qualunque altro oggetto si trovi nell'area interessata.

Come conseguenza di questi limiti il programma CAMPI non consente, per esempio, di determinare i campi dispersi da più elettrodotti non paralleli tra di loro. Più in generale è evidente che, specie quando si vogliano eseguire simulazioni che interessano zone estese di territorio, i conduttori sul piano verticale non si possono considerare né rettilinei né paralleli al suolo (assumono invece un andamento detto catenaria), mentre sul piano orizzontale l'elettrodotto assomiglia ad una linea spezzata con vertici in corrispondenza dei sostegni. Pertanto, le valutazioni eseguite col codice IROE sono in qualche misura approssimate: esse risulteranno tanto più accurate quanto più la situazione reale si accosta alla situazione ideale assunta a base del modello.

In particolare, è necessario superare i limiti 1(a), 1(c), 1(d) ed 1(e) in modo da poter eseguire simulazioni su aree estese di territorio.

1.4.3 Il nuovo programma

Si è quindi ritenuto necessario intraprendere lo sviluppo di un nuovo programma di calcolo, che permetta di superare le limitazioni sopra descritte. Per realizzare efficacemente il tipo di valutazioni richieste da una VIA, tale programma deve disporre della possibilità di:

1. attingere automaticamente le informazioni sulla struttura della linea da un archivio informatico georeferenziato;
2. ricavare da un modello digitale del terreno interessato le informazioni necessarie alla valutazione dei campi;
3. specificare in diversi modi alternativi il luogo dei punti di calcolo, così che sia possibile tanto eseguire valutazioni in singoli punti georeferenziati, quanto disegnare curve isocampo da sovrapporre alla cartografia digitale.

1.4.4 L'archivio delle linee

Una novità prevista della Legge 22 febbraio 2001, n. 36 (Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici, pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale del 7 marzo 2001, n. 55) è l'istituzione, da parte del Ministro dell'ambiente, di un *catasto nazionale delle sorgenti fisse dei campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici e delle zone circostanti per valutare i livelli di tali campi nell'ambiente* (art. 4, comma 1, lettera c e art. 7). Il Catasto Elettromagnetico Nazionale (CEN) è costituito in ultima analisi, da una base di dati informatica, contenente le informazioni relative alla localizzazione geografica ed alla caratterizzazione fisica di tutte le sorgenti di radiazione elettromagnetica presenti sul territorio nazionale. L'IROE partecipa alla definizione delle caratteristiche ed allo studio di fattibilità di un prototipo da proporre come base per il catasto nazionale delle sorgenti a frequenza industriale. Ciò ha permesso di inquadrare il presente studio in un contesto ancor più ampio: la nuova applicazione di calcolo crea le strutture informatiche che modellano gli elettrodotti (interrati ed aerei) attingendo i dati di progetto e le informazioni necessarie alla loro localizzazione dal prototipo della base di dati realizzato in ambito CEN. Di fatto l'archivio delle sorgenti e l'applicazione di calcolo sono stati progettati e realizzati contemporaneamente e con particolare attenzione alla loro compatibilità.

In particolare sono state definite le caratteristiche di un sistema per l'archiviazione elettronica delle caratteristiche degli elettrodotti in grado di gestire le seguenti tipologie di infrastrutture:

- linee elettriche aeree ed interrate, con tensione di lavoro maggiore o uguale a 132 kV;
- stazioni primarie e sottostazioni (cabine primarie) di trasformazione;

e rispondere ad esigenze di:

- descrizione ed analisi strutturale;
- collocazione topografica georeferenziata sul territorio;
- valutazione dei livelli di campo generato.

Si è innanzitutto affrontato il problema relativo alla scelta di un motore DBMS per la realizzazione dell'archivio delle linee elettriche. Si è optato per l'uso di MySQL, in considerazione dei vantaggi offerti da tale ambiente, costituiti dalla robustezza, dalla versatilità, dalla disponibilità per moltissime piattaforme e dalla convenienza economica (si tratta di un prodotto distribuito con licenza GNU).

1.4.5 Approccio generale seguito per l'esecuzione della VIA

Alla luce delle considerazioni sopra esposte, per l'esecuzione dalla VIA richiesta si è adottata una procedura articolata nei punti seguenti:

1. Definizione di una metodica per la descrizione informatica di un elettrodotto, che consenta non solo la sua esatta collocazione nello spazio (anche in riferimento alla cartografia) ma anche la gestione delle informazioni necessarie al calcolo dei campi.
2. Realizzazione di una applicazione che superi le limitazioni del programma per il calcolo dei campi a 50 Hz già messo a punto all'IROE e consenta la realizzazione di mappe isocampo, in relazione ad elettrodotti descritti come al punto 1) ed alla cartografia digitale dei luoghi.

3. Analisi della cartografia (sia cartacea, sia digitale) per un primo studio del problema ed una individuazione preliminare dei siti sensibili.
4. Esecuzione di uno o più sopralluoghi nelle zone di interesse, per completare il quadro delle informazioni e perfezionare l'individuazione dei siti sensibili.
5. Acquisizione delle effettive caratteristiche degli elettrodotti coinvolti, ai fini del loro utilizzo in relazione a quanto detto ai precedenti punti 1) e 2).
6. Esecuzione delle valutazioni numeriche, con realizzazione di mappe di isocampo e tabelle dei valori attesi nei siti sensibili.
7. Analisi delle infrastrutture non modellabili nel modo suddetto (cabine, centrali, stazioni) mediante considerazioni generali, ricerca di casi analoghi, indagine in letteratura.

L'approccio proposto per la realizzazione dello studio prevede l'interazione fra tre "ambienti" distinti:

- L'archivio delle linee
- Il codice di calcolo
- La cartografia digitale

Sebbene la presente Tesi di Laurea sia centrata sullo sviluppo dell'applicazione di calcolo dei campi, una grande mole di lavoro è stata dedicata alla realizzazione ed alla organizzazione degli archivi ed alla definizione delle modalità con cui avvengono le comunicazioni di dati fra le entità create per eseguire la Valutazione di Impatto Ambientale.

Con riferimento alla figura 1.2, analizziamo più in dettaglio il flusso dei dati:

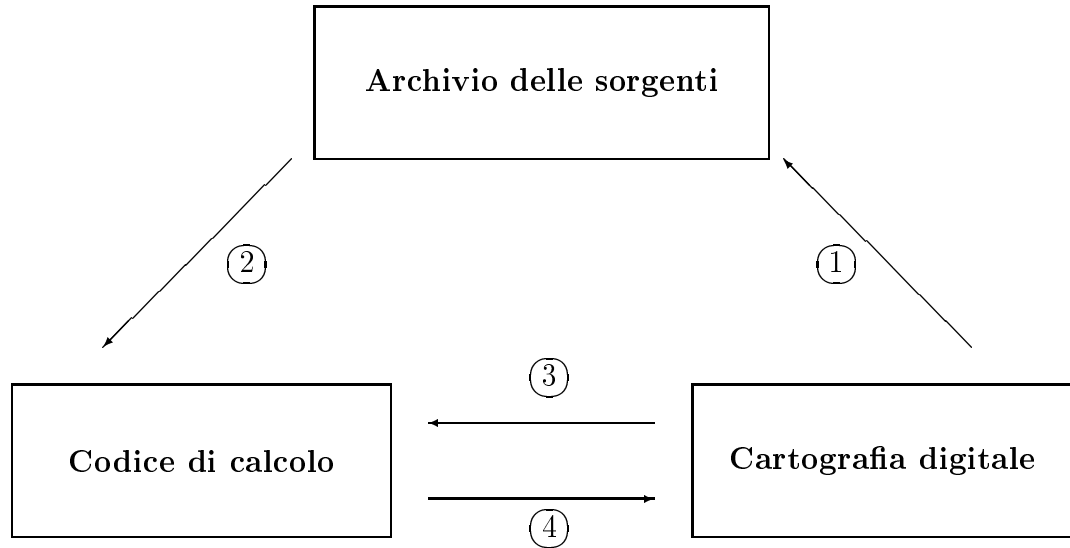


Figura 1.2: Quadro generale dello studio

1. La localizzazione degli elementi costitutivi delle sorgenti deve spesso essere estrapolata dalla cartografia (è il caso dei sostegni di un elettrodotto). Il popolamento dell'archivio richiede quindi l'utilizzo di procedure mediante le quali sia possibile ricavare dalla base cartografica i dati richiesti.
2. Il codice di calcolo richiede all'archivio delle linee i dati, relativi ad uno o più elettrodotti, necessari a creare il modello utilizzato per il calcolo dei campi.
3. Il codice di calcolo ha bisogno di ricreare al suo interno un modello del terreno circostante gli elettrodotti per cui si vuole effettuare la

valutazione dei campi; queste informazioni verranno estrapolate dalla cartografia digitale mediante delle procedure automatizzate. Come vedremo in seguito ciò verrà fatto preliminarmente una volta per tutte ed i risultati, cioè la matrice dei punti appartenenti al terreno, verranno immagazzinati in un file di testo a cui il codice accederà ad ogni sessione.

4. Una volta effettuati i calcoli, il programma che li esegue metterà a disposizione un file in cui i risultati sono codificati opportunamente; per tracciare le linee isocampo sulla cartografia si sono implementate delle procedure semi-automatiche. Per ottenere un risultato definitivo è comunque necessario intervenire manualmente sulla cartografia digitale ai fini di armonizzare le nuove entità grafiche introdotte (linee di isocampo) con la rappresentazione cartografica di base.

Capitolo 2

Gli elettrodotti

In questo capitolo ci si occuperà degli elettrodotti intesi come sorgenti di campi elettrici e magnetici. La valutazione dei campi elettrici e magnetici dispersi nell'ambiente da una linea elettrica richiede la conoscenza della posizione esatta dei conduttori, delle grandezze elettriche di esercizio e di altre caratteristiche tecniche relative all'elettrodotto considerato. Nella prima parte del capitolo si individueranno le principali caratteristiche necessarie per determinare l'intensità dei campi in punti assegnati. Nella seconda si affronterà il problema della descrizione dell'andamento di un generico conduttore di una linea aerea. Infine, nella terza sezione, si presenterà il sistema di archiviazione delle linee elettriche utilizzato per lo svolgimento della VIA.

2.1 Caratteristiche generali delle linee elettriche

Le linee elettriche costituiscono un insieme assai eterogeneo differendo, anche notevolmente, in relazione alla tecnologia ed ai materiali adottati; tuttavia presentano alcune caratteristiche comuni particolarmente rilevanti ai fini del-

la valutazione dei campi dispersi ed è su queste che focalizzeremo la nostra attenzione.

Ogni linea è caratterizzata da un certo numero di conduttori, ciascuno dei quali è mantenuto ad una tensione elettrica alternata di ampiezza e frequenza fissate. In base allo standard europeo la frequenza è fissata a 50 hertz. Ognuno dei conduttori mantenuti in tensione può portare una corrente che presenta lo stesso andamento sinusoidalmente variabile nel tempo, ma con relazione di fase rispetto alla tensione sullo stesso conduttore in genere non definibile a priori.

In condizioni ottimali di esercizio (ragionevolmente rispettate, in genere, per le linee di trasmissione) la tensione e la corrente su ogni conduttore sono in fase tra loro e lo sfasamento tra le correnti che percorrono i conduttori è tale che, in ogni istante, il flusso di corrente netto che scorre lungo la linea è nullo. A queste condizioni faremo sempre riferimento nel seguito.

Gli andamenti nel tempo di tensione e corrente sui conduttori, riassumibili entrambe nel modulo e nella relativa fase, sono tra gli elementi fondamentali ai fini della valutazione dei campi generati e dispersi dalle linee elettriche.

È opportuno sottolineare che l'ampiezza della tensione è una caratteristica fissa per ciascun elettrodotto, cioè non cambia durante l'esercizio; al contrario l'intensità della corrente sui conduttori varia in base alle esigenze dell'utenza e presenta dunque fluttuazioni sia a carattere giornaliero che stagionale. La potenza elettrica trasportata da una linea non è dunque costante ma è caratterizzata dalle stesse fluttuazioni dell'intensità di corrente. Ad una elevata richiesta da parte dell'utenza corrisponde dunque un aumento della corrente erogata, mentre la tensione rimane inalterata.

In linea di principio non esiste una relazione tra tensione nominale di un elettrodotto e l'intensità della corrente trasportata; tuttavia le linee a più

alta tensione sono generalmente progettate per sopportare carichi maggiori rispetto alle linee a voltaggio più basso.

Oltre alla tensione e alla corrente di linea, l'altra caratteristica fondamentale per la valutazione dei campi è la disposizione dei conduttori rispetto al punto in cui si vuole calcolare il campo; queste informazioni devono essere note per tutte le linee che si ipotizzano contribuire significativamente al valore del campo nel punto di valutazione considerato.

Per tutte le tipologie di linea si pone quindi il problema di descrivere con sufficiente accuratezza la posizione e l'andamento dei conduttori, sia rispetto al territorio e quindi agli eventuali "siti sensibili", sia rispetto agli altri conduttori.

2.1.1 Le linee elettriche aeree

Le linee aeree sono di gran lunga le più utilizzate per la trasmissione di energia elettrica a medie e lunghe distanze. I conduttori sono mantenuti ad una certa altezza dal suolo da appositi sostegni a cui sono sospesi mediante opportuni isolatori. Esistono limiti che impongono la minima distanza dal suolo a cui si possono disporre i conduttori la cui posa deve essere dunque effettuata tenendo conto sia dell'orografia del territorio sia dell'eventuale presenza di manufatti o insediamenti. Questi vincoli garantiscono che, in corrispondenza ad aree dove è consentita la permanenza prolungata della popolazione, i campi al suolo siano compatibili con i valori limite generalmente adottati e dalle normative ed in particolare con quelli raccomandati dall'ICNIRP (tabella 1.1).

L'altezza dal suolo dei conduttori cambia comunque all'interno di ogni campata tra due sostegni consecutivi, anche nel caso di terreno pianeggiante, per effetto dell'abbassamento dei cavi che sono fissati in modo lasco e, sotto

l'azione del proprio peso, si dispongono secondo una curva propria di una fune o di una catena ancorate agli estremi e perciò detta *catenaria*. Considerando che le distanze tra due tralicci consecutivi sono in genere di diverse centinaia di metri, i cavi possono presentare abbassamenti di alcuni metri. Se il terreno è pianeggiante, i campi al suolo in prossimità dei sostegni sono generalmente inferiori a quelli misurabili al centro delle campate; d'altra parte si possono verificare anche le circostanze opposte, come nel caso dell'attraversamento di una vallata con un'unica campata, situazione in cui i conduttori sono più vicini al suolo e quindi i campi sono più intensi proprio in prossimità dei sostegni. La valutazione dei campi generati da una linea aerea implicherà quindi una descrizione sufficientemente accurata della posizione assoluta dei conduttori nello spazio.

Le linee aeree sono caratterizzate anche dalle cosiddette *funi di guardia* che, come i conduttori percorsi da corrente, assumono il tipico andamento a catenaria . Queste collegano generalmente le cime dei sostegni di ciascuna campata e sono normalmente più tesi dei conduttori sui quali fluisce la corrente; le loro funzioni sono principalmente quelle di proteggere la linea da scariche atmosferiche e di migliorare la messa a terra dei sostegni.

Gli elettrodotti aerei possono presentare caratteristiche molto diverse l'uno dall'altro; queste differenze possono riguardare sia gli aspetti costruttivi sia le caratteristiche di esercizio, dove questi due elementi non sono tra loro indipendenti.

Per quanto riguarda la struttura fisica di un elettrodotto sono significativi gli aspetti geometrici tanto dei sostegni quanto dei conduttori. L'adozione di un particolare tipo di sostegno ha un immediato ed ovvio riflesso sull'impatto visivo della linea, mentre, almeno per quanto riguarda il campo magnetico, non ha di per sé rilevanza, se non per quanto riguarda la disposizione e

le distanze reciproche tra i conduttori che sono legate alla geometria delle mensole e degli isolatori.

Per quanto riguarda il campo elettrico la questione è assai più delicata: sia il terreno, sia la vegetazione che tutti i manufatti presenti nei pressi della linea sono da considerarsi *buoni conduttori* dal punto di vista elettrico. A maggior ragione sono da considerare conduttrici le strutture, generalmente metalliche, dei tralicci, che, collegate a terra, perturbano in maniera determinante la distribuzione del campo elettrico. Si può infatti supporre che le linee di campo che si dipartono dai conduttori carichi, si richiudano, in prossimità dei sostegni, sulle strutture metalliche dei tralicci determinando un sensibile abbattimento del campo al suolo. Lo stesso vale per le funi di guardia, essendo queste collegate direttamente ai tralicci senza l'interposizione di alcun isolatore. Queste devono senza dubbio essere considerate nel calcolo del campo elettrico visto che, a differenza dei tralicci, influiscono in maniera determinante sull'andamento del campo elettrico per tutto lo sviluppo della campata e non solo ai suoi capi.

Come si è già detto i tralicci, tutti i manufatti ed il terreno non influiscono sensibilmente sulla distribuzione di campo magnetico; questa distribuzione dipende invece notevolmente, soprattutto sulle brevi distanze, dalla disposizione e distanza reciproca dei conduttori.

Dal punto di vista delle caratteristiche di esercizio, le linee differiscono per tensione nominale e per il carico massimo di corrente. Per la trasmissione su grandi distanze in Italia viene adottata, per gli elettrodotti di nuova costruzione, la tensione di 380 kV, che costituisce anche lo standard unificato europeo. Esistono anche numerosi elettrodotti, parte per la trasmissione parte per la distribuzione primaria, che operano alla tensione di 220 kV. Per la distribuzione vengono inoltre impiegate tensioni di 150 kV o di 132 kV o

inferiori. Le norme italiane prevedono la attivazione di procedure VIA per elettrodotti con tensione di esercizio superiore a 150 kV.

È importante sottolineare il ruolo che gioca, nel determinare l'intensità dei campi al suolo, la combinazione delle fasi dei diversi conduttori. Data la natura vettoriale dei campi, i contributi si sommano secondo note regole geometriche che tengono conto non solo della loro intensità, ma anche della loro direzione e verso.

In base a queste considerazioni, si può verificare che le intensità e gli andamenti dei campi al suolo dipendono dalla distanza reciproca dei conduttori. A parità di tensione e di corrente, i campi presentano intensità più basse e più rapidamente decrescenti al diminuire di tale distanza. Sono quindi particolarmente interessanti ai fini dell'esposizione della popolazione alcune nuove tipologie di linee, dette "compatte", nelle quali, grazie all'impiego di mensole di sostegno isolanti, i conduttori sono notevolmente ravvicinati rispetto agli elettrodotti tradizionali.

2.1.2 Le linee elettriche in cavo interrato

Un tipico cavo sotterraneo comprende un conduttore centrale cilindrico, una guaina isolante, una guaina conduttrice messa a terra ed un rivestimento protettivo. Il conduttore centrale è paragonabile a quello di una linea aerea. La guaina isolante può essere di diversi tipi, per esempio in cartone o carta kraft (ricavata dalla polpa del legno) impregnati con olio naturale o sintetico, la cui tenuta dielettrica è dell'ordine dei 50 kV/mm. La carta impregnata d'olio ha grandi vantaggi ed una gamma di applicazioni molto estesa, ma presenta anche grossi inconvenienti: costo elevato, perdite dielettriche, alta resistività termica. Più semplice appare l'utilizzo di isolanti solidi estrusi, proposti dalla chimica dei polimeri. Essi sono finora entrati in uso per tensioni fino a 150

kV, ma con ulteriori sviluppi saranno forse applicabili a tensioni più elevate. Le guaine isolanti sono purtroppo cattivi conduttori anche dal punto di vista termico: la resistenza termica dell'isolante, che si aggiunge a quella del terreno, limita la possibilità di dispersione del calore generato dal conduttore e conseguentemente sia la potenza massima trasportata dal cavo sia la sua lunghezza massima. Attualmente si stà quindi sempre più diffondendo, per medie ed alte tensioni, l'impiego di isolanti plastici, ed in particolare di polietilene. L'insieme conduttore-isolante è posto in una guaina conduttrice. Un cavo è dunque un vero e proprio condensatore, le cui armature sono costituite dall'anima e dalla guaina. Per una certa lunghezza, detta "lunghezza critica", la corrente capacitiva assorbita diviene uguale alla corrente massima trasmissibile dal cavo che non può quindi trasportare corrente "attiva" e quindi energia. Per tensioni inferiori ai 220 kV non si superano in pratica i 20 chilometri. Vi sono alcuni tratti interrati anche a 380 kV ma, al momento, sono esclusivamente ad uso sperimentale e non se ne prevede l'utilizzo se non per tratti estremamente brevi ed in situazioni particolari.

Una diversa tipologia si basa su cavi ad isolamento gassoso. Nel caso di alte tensioni è necessario ricorrere ad elevate pressioni per accrescere l'isolamento. Le potenze trasmissibili sono elevate, perché l'isolamento fluido permette un ottimo raffreddamento per convezione. Il limite di potenza dei cavi di questo tipo è infatti determinato dalla dispersione di calore nel suolo. A 380 kV si possono trasportare fino a 4000 MW di potenza, con la possibilità di incrementare tale valore con tecniche di raffreddamento forzato. I materiali per questo tipo di cavi sono estremamente costosi, per cui, al momento, è ipotizzabile il loro uso solo per tratti brevi ed in situazioni particolari.

Una tecnica molto avanzata è infine quella dei *criocavi*, basata sulla forte diminuzione di resistività alle basse temperature. La temperatura di funzio-

namento per cui si raggiunge la superconduttività è differente per materiali diversi. Sebbene la costruzione di questi cavi sia concettualmente semplice, il costo elevato ne rende al momento impossibile un loro utilizzo pratico.

Generalmente i cavi sotterranei sono attualmente utilizzati per collegamenti sottomarini e per la penetrazione urbana della rete. Il loro impiego presenta indubbi vantaggi, in special modo dal punto di vista paesaggistico e per l'abbattimento dei campi al suolo, ma anche gli svantaggi sono notevoli. In primo luogo, come già sottolineato, l'effetto condensatore di un cavo interrato è superiore a quello di una linea aerea, il che limita fortemente la lunghezza dei singoli tratti di linea. Tale limite varia in relazione alla tipologia di cavo sotterraneo utilizzato, ma non supera in genere qualche decina di chilometri. La lunghezza realizzabile inoltre diminuisce con il crescere della tensione. I costi sono elevati, sia per i materiali impiegati sia per le difficoltà tecniche di posa. Ai costi della messa in opera vanno poi aggiunti quelli di manutenzione, in quanto la ricerca e la riparazione dei guasti richiede costi e tempi superiori a quelli necessari per una linea aerea.

Affrontiamo adesso gli aspetti legati alla dispersione nell'ambiente di campi elettrici e magnetici. Con ottima approssimazione si può supporre che il campo elettrico al suolo generato da un cavo interrato sia nullo, in virtù del duplice effetto schermante dovuto al terreno e alla guaina conduttrice. Se si suppone invece che sulla guaina non scorra corrente, non si può dire altrettanto per il campo magnetico per il quale, con buona approssimazione, si possono considerare ininfluenti sia la presenza del terreno sia quella dei rivestimenti conduttori dei cavi.

In linea generale si può comunque affermare che l'intensità del campo magnetico sia, a parità di distanza dall'asse della linea, inferiore per una linea interrata rispetto ad una linea aerea.

Ciò è dovuto soprattutto ad una maggiore compensazione delle componenti vettoriali associate alle diverse fasi, per effetto della minore interdistanza tra i cavi che, essendo isolati, possono essere accostati l'uno all'altro molto più di quanto sia possibile fare per una linea aerea con conduttori “nudi”.

Si può verificare, inoltre, che ulteriori riduzioni del campo magnetico in superficie possono essere ottenute con opportune disposizioni geometriche dei cavi, ad esempio disponendo i cavi a triangolo nel caso di singola terna.

Come per le linee aeree, anche per le linee interrate è fondamentale predisporre un modello numerico attraverso il quale sia possibile conoscere con sufficiente accuratezza la posizione di ogni conduttore, sia in relazione agli altri conduttori sia rispetto al terreno.

La posa dei cavi avviene mediante lo scavo di trincee a profondità costante (generalmente dell'ordine dei due metri) e quindi i cavi seguono sul piano verticale l'andamento del terreno.

Il diametro e la struttura del sistema anima-isolante-guaina non permette di effettuare con i cavi curve con piccolo raggio di curvatura e tantomeno angoli, dunque la linea dovrebbe essere modellata con una curva nello spazio per la quale, a differenza che per conduttori delle linee aeree, non esiste alcuna espressione analitica. Inoltre, mentre per i tratti aerei si avevano dei punti di riferimento georeferenziati naturali, per le linee interrate non esistono punti “notevoli” a cui riferirsi, se non l'inizio e la fine della linea.

Si è pertanto deciso di rappresentare ciascun cavo interrato come una spezzata i cui segmenti costitutivi sono scelti, a partire dal tracciato di progetto e dalle informazioni contenute nel modello digitale del terreno (si veda il paragrafo 3.2.1), in modo da ottenere una modellazione sufficientemente accurata sia per quanto riguarda l'andamento sul piano verticale sia per quello orizzontale. Gli estremi di questi segmenti vengono detti “*sostegni virtuali*”

del tratto interrato” e la loro definizione porta molteplici vantaggi:

1. permette di individuare anche delle “*campate virtuali*” del tratto interrato; ciò rende possibile la creazione di un sistema di archiviazione delle linee elettriche in cui linee aeree ed interrate sono rappresentate in maniera omogenea;
2. permette un approccio unificato anche per il calcolo dell’induzione magnetica. In particolare non c’è bisogno di differenziare l’algoritmo di calcolo per linee interrate e per linee aeree, proprio in virtù della loro comune strutturazione in termini di sostegni e campate.

Viste le considerazioni sul potere schermante del terreno nei confronti del campo elettrico, ai fini della valutazione sarà rilevante la sola corrente sui conduttori, mentre la tensione avrà importanza solo come dato di archivio.

2.2 Il modello del conduttore aereo: la catenaria

Catenaria è il nome del luogo di punti lungo cui si dispone una fune pesante, omogenea, inestensibile e perfettamente flessibile, sospesa per i suoi estremi e soggetta unicamente al proprio peso. L’equazione di questa curva può essere dedotta dai principi generali della statica, imponendo le condizioni di equilibrio di ogni elemento di cui è costituita la fune (ciascuno dei quali è assimilato ad un corpo rigido).

2.2.1 Descrizione della catenaria sul piano verticale

Sul generico elemento $d\vec{P} = \hat{s}ds$ (dove $\hat{s}$ è il versore della curva e s la coordinata curvilinea lungo di essa) agiscono tre forze: la tensione $\vec{T}(s)$ esercitata dal tratto di fune ad un lato dell'elemento, la tensione $\vec{T}(s + ds)$ esercitata dal tratto sull'altro lato e la forza di gravità $-w\hat{z}ds$, dove w [N/m] è il peso per unità di lunghezza della fune e $\hat{z}$ il versore della verticale (diretto verso l'alto).

La condizione di equilibrio statico richiede l'annullamento della risultante e del momento risultante delle forze applicate sull'elemento. Questo porta a scrivere le equazioni seguenti:

$$\begin{cases} \vec{T}(s + ds) - \vec{T}(s) - w\hat{z}ds = 0 \\ (P + d\vec{P} - O) \times \vec{T}(s + ds) - (P - O) \times \vec{T}(s) - (P - O) \times w\hat{z}ds = 0 \end{cases}$$

Con semplici procedure di calcolo differenziale vettoriale, queste due equazioni portano alle seguenti:

$$\begin{cases} \frac{d\vec{T}(s)}{ds} - w\hat{z} = 0 \\ (P - O) \times \frac{d\vec{T}(s)}{ds}ds + d\vec{P} \times \vec{T}(s) - (P - O) \times w\hat{z}ds = 0 \end{cases}$$

Ovvero, sostituendo la prima nella seconda ed utilizzando anche la definizione $d\vec{P} = \hat{s}ds$:

$$\begin{cases} \frac{d\vec{T}(s)}{ds} = w\hat{z} \\ \hat{s} \times \vec{T}(s) = 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

Prima di proseguire, osserviamo come la prima delle due relazioni (2.1) esprima il fatto che *la forza di tensione $\vec{T}(s)$ giace su di un piano verticale*; se infatti se ne moltiplicano ambo i membri vettorialmente per $\hat{z}$, si giunge facilmente a trovare:

$$\vec{T}(s) \times \hat{z} = \vec{C}$$

dove $\vec{C}$ è un vettore costante; quindi, al variare della coordinata curvilinea s , il piano individuato dai vettori $\vec{T}$ e $\hat{z}$ (un piano sicuramente verticale) si mantiene costante, come volevasi dimostrare. Siccome dalla seconda delle due equazioni (2.1) si deduce che *la forza di tensione $\vec{T}(s)$ è ovunque parallela alla curva cercata*, ne consegue che *la catenaria giace su un piano verticale*. Preso su tale piano un sistema di riferimento (γ, z) con asse γ orizzontale (si veda anche la figura 2.2), per trovare la forma $z = z(\gamma)$ dell'espressione della catenaria si proietti sui due assi coordinati la prima delle equazioni (2.1); si ottiene subito:

$$\begin{cases} \frac{d}{ds} [\vec{T}(s) \cdot \hat{\gamma}] = 0 \\ \frac{d}{ds} [\vec{T}(s) \cdot \hat{z}] = w \end{cases} \quad (2.2)$$

Dalla prima di queste equazioni deduciamo che *la componente orizzontale della tensione $\vec{T}(s)$ si mantiene costante lungo la linea*; si indichi con H [N] tale costante e, per quanto si è visto, si può scrivere:

$$\begin{cases} \vec{T}(s) = T(s)\hat{s} \\ \hat{s} \cdot \hat{\gamma} = \frac{d\gamma}{ds} \\ \hat{s} \cdot \hat{z} = \frac{dz}{ds} \end{cases}$$

e che quindi:

$$\begin{cases} \vec{T}(s) \cdot \hat{\gamma} = T(s) \frac{d\gamma}{ds} \\ \vec{T}(s) \cdot \hat{z} = T(s) \frac{dz}{ds} \end{cases}$$

dunque, dalla (2.2) si ottiene:

$$\begin{cases} T(s) \frac{d\gamma}{ds} = H \\ \frac{d}{ds} (T(s) \frac{dz}{ds}) = w \end{cases} \quad (2.3)$$

Ricavando adesso dalla prima delle (2.3) l'espressione per $T(s)$ e sostituendola

nella seconda delle (2.3) ricaviamo subito:

$$H \frac{d}{ds} \frac{dz}{d\gamma} = w \quad (2.4)$$

che è l'equazione differenziale per la curva cercata. Poiché si tratta di una equazione del secondo ordine, introduciamo la funzione di appoggio:

$$f(\gamma) = \frac{dz}{d\gamma} \quad (2.5)$$

con la quale la (2.4) diviene:

$$H \frac{df(\gamma)}{ds} = w \quad (2.6)$$

Ricordando che H e w sono costanti, introduciamo il parametro di posa k [m] definito da:

$$k = \frac{H}{w} \quad (2.7)$$

e osserviamo che:

$$ds = \sqrt{d\gamma^2 + dz^2} = \sqrt{d\gamma^2 + \left(\frac{dz}{d\gamma}\right)^2 d\gamma^2} = d\gamma \sqrt{1 + f^2} \quad (2.8)$$

grazie alle (2.7) e (2.8), la (2.6) diviene (separando le variabili):

$$\frac{df}{\sqrt{1 + f^2}} = \frac{d\gamma}{k}$$

Integrando ambo i membri si ottiene:

$$\operatorname{arcsinh}(f) = \frac{\gamma}{k} + C_1$$

quindi:

$$f(\gamma) = \sinh\left(\frac{\gamma}{k} + C_1\right)$$

e finalmente, se ricordiamo la (2.5) ed integriamo di nuovo otteniamo:

$$z(\gamma) = k \cosh\left(\frac{\gamma}{k} + C_1\right) + C_2 \quad (2.9)$$

che è l'espressione generale per la curva cercata.

Le due costanti arbitrarie di integrazione C_1 e C_2 devono essere determinate in base alle coordinate dei punti iniziale e finale della campata. In altre parole, assegnati due punti nello spazio e un valore per il parametro di posa k , esiste una ed una sola catenaria che passa per i punti dati ed ha quel valore del parametro di posa.

2.2.2 Descrizione della catenaria in un sistema di riferimento tridimensionale

Consideriamo un sistema di riferimento cartesiano ortogonale x, y, z nel quale l'asse x sia diretto orizzontalmente verso EST, l'asse y sia diretto orizzontalmente verso NORD e l'asse z sia diretto verticalmente verso l'alto. Il sistema abbia origine in un arbitrario punto O al quale imporremo solo di trovarsi al livello del mare, di modo che la coordinata Z indichi la quota s.l.m. dei punti considerati. Dati due punti $P_a(x_a, y_a, z_a)$ e $P_b(x_b, y_b, z_b)$ ed un valore per il parametro di posa k , cerchiamo l'equazione della catenaria da essi univocamente determinata.

Nel sistema di coordinate prescelto, l'espressione della catenaria può essere scritta sotto forma di sistema di due equazioni:

$$\begin{cases} z_c(x, y) = z_M + k \left\{ \cosh \left[\frac{1}{k} \sqrt{(x - x_M)^2 + (y - y_M)^2} \right] - 1 \right\} \\ y - y_M = (x - x_M) \tan \alpha \end{cases} \quad (2.10)$$

Dove la seconda delle (2.10) è l'equazione che descrive il piano verticale su cui giace la catenaria. In particolare:

- x_M, y_M, z_M sono le coordinate del minimo della catenaria (o del suo prolungamento);

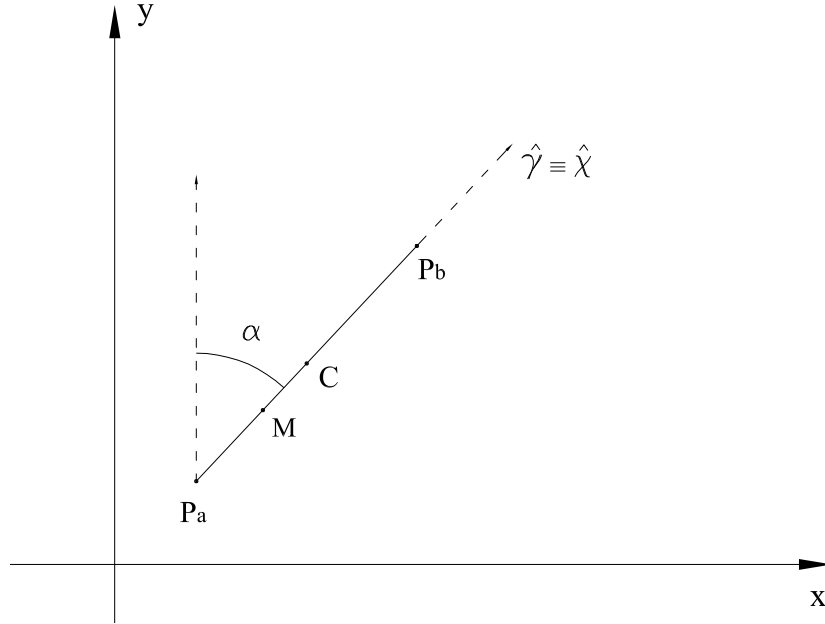


Figura 2.1: Orientamento del piano su cui giace la catenaria

- α è l'angolo individuato dall'intersezione del piano verticale su cui giace la catenaria ed il piano verticale $y = 0$;

$$\alpha = \arctan\left(\frac{y_b - y_a}{x_b - x_a}\right) \quad (2.11)$$

Coordinate del minimo della catenaria

Per completare la descrizione della catenaria in questo sistema di riferimento si devono ricavare le coordinate del minimo (x_M, y_M, z_M) in termini dei parametri noti, cioè in funzione delle coordinate dei punti P_a e P_b e del parametro di posa della catenaria k . Occorre specificare che le espressioni che seguono sono valide sia che il minimo della catenaria sia compreso nel tratto

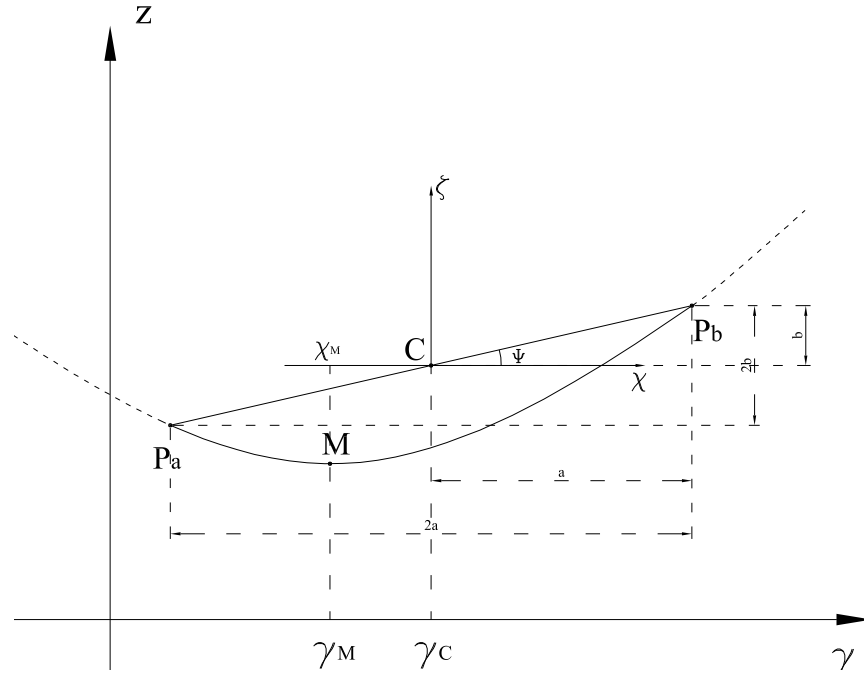


Figura 2.2: Rappresentazione piana della catenaria

fra i due punti P_a e P_b , sia che, come nel caso di punti di sospensione a forte “dislivello”, si trovi sul suo prolungamento.

Come si può notare nelle figure 2.1 e 2.2, si ha che:

$$\begin{cases} x_M = x_C + \chi_M \sin \alpha \\ y_M = y_C + \chi_M \cos \alpha \\ z_M = z_C + \zeta_M \end{cases} \quad (2.12)$$

Il punto C è il punto di mezzo del segmento che unisce i due punti di sospensione P_a e P_b e ha dunque coordinate:

$$\begin{cases} x_C = \frac{x_a + x_b}{2} \\ y_C = \frac{y_a + y_b}{2} \\ z_C = \frac{z_a + z_b}{2} \end{cases} \quad (2.13)$$

Rimangono da ricavare gli ultimi due parametri in funzione di quelli noti:

1. χ_M è l'ascissa del minimo della catenaria nel sistema di coordinate piano, con assi (χ, ζ) centrato in C
2. ζ_M è l'ordinata del minimo della catenaria nel sistema di coordinate (χ, ζ) centrato in C

Per determinare χ_M :

$$\chi_M = -k \operatorname{arctanh}\left(\frac{2b}{L}\right) \quad (2.14)$$

dove:

$$\begin{cases} a = \frac{\sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2}}{2} \\ b = \frac{z_a - z_b}{2} \\ L = \sqrt{\left[2k \sinh\left(\frac{a}{k}\right)\right]^2 + 4b^2} = \sqrt{\left[2k \sinh\left(\frac{\sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2}}{2k}\right)\right]^2 + (z_a - z_b)^2} \end{cases} \quad (2.15)$$

dove L è la lunghezza della catenaria, a è la metà della campata della catenaria e b è la metà del dislivello fra i punti di sospensione.

Si ha dunque che:

$$\chi_M = -k \operatorname{arctanh}\left\{ \frac{(z_a - z_b)}{\sqrt{\left[2k \sinh\left(\frac{\sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2}}{2k}\right)\right]^2 + (z_a - z_b)^2}} \right\}$$

Per determinare ζ_M :

$$\zeta_M = k \left\{ 1 - \cosh \left[\frac{a}{k} + \operatorname{arctanh}\left(\frac{2b}{L}\right) \right] \right\} \quad (2.16)$$

cioè

$$\zeta_M = k \left[1 - \cosh \left(\frac{\sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2}}{2k} + \operatorname{arctanh}\left(\frac{2b}{L}\right) \right) \right] + b$$

Per verificare la validità delle formule della rappresentazione tridimensionale della catenaria si è utilizzato un breve script in Matlab che ne traccia il grafico a partire dalle coordinate dei punti di sospensione e del coefficiente k . Un esempio dei risultati è riportato in figura 2.3.

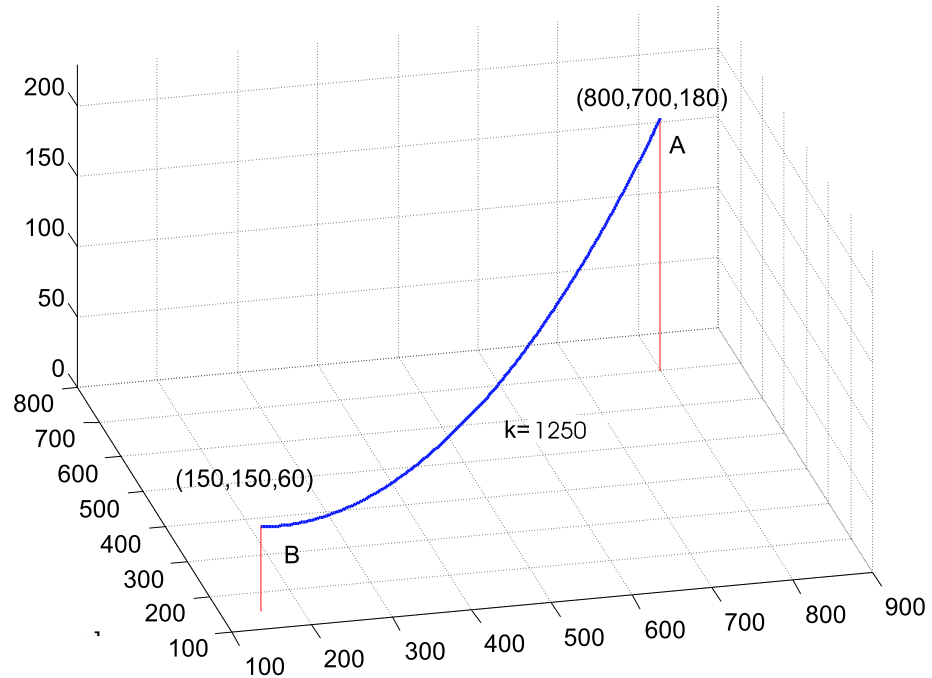


Figura 2.3: Catenaria in $\mathbb{R}^3$

2.2.3 L'influenza delle condizioni ambientali e di carico sul parametro di posa

Il parametro di posa di ciascun conduttore dipende in ogni istante dalle condizioni ambientali e di esercizio oltre che dalle caratteristiche della campata a cui il conduttore appartiene. Il modello di elettrodotto implementato nell'applicazione di calcolo utilizza come parametro di posa per la costruzione delle

catenarie il cosiddetto valore *EDS* (Every Day Stress) che, come il nome stesso indica, è considerato rappresentativo nel caso delle normali sollecitazioni a cui sono sottoposti i conduttori. Tale valore corrisponde, nella unificazione ENEL, al rapporto fra una frazione fissata del carico di rottura di ciascun conduttore e il suo peso per unità di lunghezza. Nel caso dei conduttori degli elettrodotti di cui ci siamo occupati, la frazione del carico di rottura da utilizzare per determinare il parametro di posa in condizioni EDS, è pari al 21%, mentre il parametro di posa delle funi di guardia è ottenuto aumentando del 15% quello ottenuto per i conduttori della stessa campata.

Al momento della posa viene fissato il tiro dei conduttori e della fune di guardia in modo che risulti costante su tutta la linea (pari alle frazioni del carico di rottura indicate) in condizioni “normali” di esercizio, cioè alla temperatura esterna di $15^{\circ}C$ ed in assenza di sovraccarichi meccanici. Ciò assicura tra l’altro una uniformità di comportamento relativamente alle sollecitazioni che si verificano a causa delle vibrazioni. Con questa scelta ci si svincola dunque dalle condizioni operative di ciascun conduttore e si associa a tutta la linea un unico valore di parametro di tesatura, considerato rappresentativo delle normali condizioni di esercizio.

Nei seguenti paragrafi si valuterà come varia il parametro di posa per una generica catenaria, se si considerano condizioni ambientali e di esercizio diverse da quelle dello stato EDS; in tale analisi si considereranno solamente campate i cui relativi sostegni sono di *amarro*, cioè presso cui i conduttori sono vincolati rigidamente alle mensole, mentre non verrà affrontata l’estensione a *tratte di linea*.

Influenza delle condizioni ambientali

Supponiamo che il conduttore non sia ancora percorso da corrente e che quindi assuma la stessa temperatura dell'ambiente esterno, non essendovi produzione di calore per effetto Joule. I fattori che possono causare modifiche dello sviluppo della catenaria sono: le variazioni di temperatura atmosferica che determinano una dilatazione o una contrazione del conduttore, la presenza di un eventuale manicotto di ghiaccio che ne modifica il peso "apparente" ed il vento. Quest'ultimo agente viene trascurato per quanto riguarda la valutazione dei campi al suolo in quanto solo in condizioni eccezionali determina uno spostamento significativo dei conduttori. D'altra parte tali condizioni eccezionali devono essere considerate per quanto riguarda il dimensionamento meccanico della linea ed è per questo che il vento è assunto come parametro caratteristico di alcuni degli altri "stati standard".

Riferendosi infatti alle convenzioni relative al dimensionamento meccanico dei conduttori, si considerano delle condizioni ambientali codificate che fanno assumere a ciascun conduttore un particolare "stato".

I principali sono:

1. stato **MFA** o di massima freccia:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{conduttore scarico} \\ \text{temperatura ambiente } 55^{\circ}C \\ \text{assenza di vento} \end{array} \right.$$

2. stato **MPB** o di massimo parametro

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{conduttore scarico} \\ \text{temperatura ambiente } -20^{\circ}C \\ \text{assenza di vento} \end{array} \right.$$

3. stato **MSB** o di massima sollecitazione

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{conduttore scarico} \\ \text{temperatura ambiente} \quad -20^{\circ}\text{C} \\ \text{vento a } 65 \text{ km/h} \\ \text{manicotto di ghiaccio da } 12 \text{ mm} \end{array} \right.$$

4. stato **EDS**

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{conduttore scarico} \\ \text{temperatura ambiente} \quad 15^{\circ}\text{C} \\ \text{assenza di vento} \end{array} \right.$$

Oltre a questi è definito anche lo stato **CVS** (verifica di sbandamento catene) che rappresenta le condizioni in cui la catenaria è sollecitata da un forte vento (130 km/h) che agisce in direzione orizzontale; per i motivi già esposti, tale stato viene in questa sede trascurato.

Per valutare gli effetti delle “condizioni ambientali” sulla disposizione della catenaria si imposta il cosiddetto *equilibrio degli allungamenti*; noto k_{EDS} e dunque nota dalle (2.15) la lunghezza della catenaria in condizioni EDS, si cerca il nuovo parametro di posa che verifica il bilanciamento degli allungamenti:

$$L_{EDS} - L(k) = \Delta L_{termico} + \Delta L_{elastico} \quad (2.17)$$

con:

$$\left\{ \begin{array}{l} L(k) = \sqrt{\left[2k \sinh\left(\frac{a}{k}\right)\right]^2 + 4b^2} [m] \\ \Delta L_{termico} = \alpha_T L_{EDS} (T_{stato} - T_{EDS}) [m] \\ \Delta L_{elastico} = \frac{1}{\varepsilon_{cond}} \frac{L_{EDS}}{S_{cond}} \left(k P_{stato} - k_{EDS} P_{cond} \right) [m] \\ P_{stato} = [0,92\pi s_{ghiaccio} (s_{ghiaccio} + 2r_{cond})] 10^{-3} + P_{cond} [kg/m] \\ k_{EDS} = 0,21 \frac{C_r}{P_{cond}} [m] \\ L_{EDS} = L(k_{EDS}) [m] \end{array} \right.$$

dove:

P_{stato}	<i>peso apparente del conduttore</i> $[kg/m]$
P_{cond}	<i>peso effettivo del conduttore</i> $[kg/m]$
$s_{ghiaccio}$	<i>spessore del manicotto di ghiaccio</i> $[mm]$
ε_{cond}	<i>modulo elastico del conduttore</i> $[N/mm^2]$
α_{cond}	<i>coefficiente di dilatazione termica conduttore</i> $[^{\circ}C^{-1}]$
S_{cond}	<i>sezione del conduttore</i> $[mm^2]$
C_r	<i>carico di rottura del conduttore</i> $[N]$
T_{stato}	<i>temperatura di stato</i> $[^{\circ}K]$
T_{EDS}	$= 288^{\circ}K$

La 2.17 è un'equazione trascendente in k , dunque per risolverla si deve ricorrere a metodi numerici.

Ad esempio, per una campata di 400 m ($a = 200$ m) con punti di sospensione alla medesima quota ($b = 0$) ed un conduttore con caratteristiche:

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{cond} &= 68000 \text{ N/mm}^2 \\
 \alpha_T &= 19,4 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}C^{-1} \\
 S_{cond} &= 585,3 \text{ mm}^2 \\
 C_r &= 16852 \text{ N} \\
 P_{cond} &= 1,953 \text{ kg/m} \\
 k_{EDS} &= 0,21 \frac{16852}{1,953} = 1812 \text{ m}
 \end{aligned}$$

dalle (2.17) si ottiene che, in stato **MFA**, il nuovo coefficiente di posa è:

$$k_{MFA} = 1545$$

In particolare si ha un aumento di freccia massima pari a:

$$\Delta \text{ freccia massima} \simeq 1,92m$$

Influenza delle condizioni di carico

L'approccio del precedente paragrafo ed in particolare il riferimento agli "stati standard" dei conduttori, è molto utile, proprio per l'utilizzo di convenzioni a cui si fa spesso ricorso quando si tratta di linee elettriche; d'altra parte i conduttori sono percorsi da corrente e quindi non è realistico supporli alla stessa temperatura dell'ambiente esterno.

Un modello più corretto deve prevedere che la temperatura del conduttore e quella dell'ambiente non coincidano ed in particolare che si verifichi un certo $\Delta T = T_{cond} - T_{amb} > 0$ a causa dell'energia dissipata per effetto Joule nel conduttore stesso.

Data la corrente sul conduttore si può determinare la sua temperatura T_{cond} imponendo il bilanciamento degli scambi termici fra conduttore ed ambiente.

In particolare l'energia dissipata per effetto Joule deve essere dispersa sotto forma di calore ceduto all'ambiente sia per radiazione che per convezione.

Si considerano adesso i vari termini che compongono l'espressione del bilanciamento degli scambi energetici:

- $I^2 R$ [W/km] è la potenza per unità di lunghezza dissipata per effetto Joule, dove I è l'intensità della corrente che scorre sul conduttore ed R la sua resistenza per chilometro; quest'ultima dipende dalla temperatura ed in particolare

$$R = R_{20^\circ} [1 + \alpha_T (T - 293)] \quad \left[\frac{W}{km} \right]$$

dove R_{20° è la resistenza per chilometro di conduttore a 20° , T è la temperatura assoluta del conduttore ed α_T è il suo coefficiente di allungamento termico.

- W_c [W/km] è la potenza per unità di lunghezza dissipata *per convezione* da un conduttore con superficie in alluminio e con diametro di D centimetri; la sua espressione è:

$$W_c = 316\pi \frac{\sqrt{P_{ambiente} V_{vento} D}}{T_m^{0,123}} (T - T_{amb}) \left[\frac{W}{km} \right]$$

dove T_{amb} è la temperatura ambiente (quella assoluta), $P_{ambiente}$ è la pressione atmosferica (in atmosfere), V_{vento} è la velocità del vento in km/h (in condizioni normali si assume $V_{vento} = 2 \text{ km/h}$), T_{amb} è la temperatura ambiente e $T_m = \frac{T + T_{amb}}{2}$.

- W_r [W/km] è la potenza per unità di lunghezza dispersa dal conduttore *per radiazione*, che ha espressione:

$$W_r = W_r = 179 e D \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] \left[\frac{W}{km} \right]$$

dove e è il coefficiente di emissione della superficie del conduttore posto generalmente pari a 0,5 per conduttori in alluminio già in uso da tempo.

L'equilibrio tra i tre termini descritti è dunque:

$$I^2 R = W_r + W_c \quad (2.18)$$

Questa espressione viene normalmente utilizzata per ricavare la portata massima delle linee date le condizioni ambientali e le caratteristiche tecniche del conduttore (tra le quali la temperatura massima che esso può assumere). La portata massima indica il valore di corrente oltre il quale, in condizioni ambientali particolarmente sfavorevoli, il conduttore assume temperature capaci di pregiudicarne la stabilità dal punto di vista meccanico.

In questo caso, invece, la corrente è nota e si usa la (2.18) per determinare la temperatura T del conduttore.

Una volta ricavata la temperatura del T la si sostituisce a T_{stato} nella espressione (2.17), cioè nell'espressione del bilanciamento per gli allungamenti del conduttore, ricavando così il nuovo parametro k del conduttore nelle condizioni ambientali e di esercizio assegnate.

2.3 L'archivio delle linee

Sono state definite le caratteristiche di un sistema di archiviazione di linee aeree di trasporto e distribuzione dell'energia elettrica (a 50 Hz) per rispondere ad esigenze di:

- descrizione ed analisi strutturale;
- collocazione topografica georeferenziata sul territorio;
- valutazione dell'esposizione.

Si è innanzitutto affrontato il problema relativo alla scelta di un motore DBMS per la realizzazione dell'archivio delle linee elettriche. Si è optato per l'uso di MySQL (<http://www.mysql.com/>), in considerazione dei vantaggi offerti da tale ambiente, costituiti dalla robustezza, dalla versatilità, dalla disponibilità per moltissime piattaforme e dalla convenienza economica (si tratta di un prodotto distribuito con licenza GNU).

2.3.1 La struttura dell' archivio

L'archivio che si è definito contiene quattro tipi di elementi caratteristici: le linee, le campate, i sostegni e i conduttori. L'elemento fondamentale dell'archivio è la linea, intesa come tratto di elettrodotto senza diramazioni, delimitato ad entrambi gli estremi da una stazione, da una sottostazione, da una cabina oppure da un punto di diramazione da cui si dipartono altre due (o più) linee. Una linea si compone di un certo numero di campate, definite come tratte di linea comprese tra due sostegni successivi. Una campata è caratterizzata:

- dalla posizione e dalle caratteristiche dei sostegni che la delimitano;

- dal numero e dalla tesatura dei conduttori che contiene.

Tutte le campate della medesima linea contengono lo stesso numero di conduttori che risulta quindi essere un parametro caratteristico della linea, piuttosto che della campata. Per definizione, una campata può appartenere ad una ed una sola linea. Questo concetto è particolarmente critico in relazione agli elettrodotti doppia terna, nei quali spesso le due terne appartengono di fatto a due elettrodotti del tutto indipendenti: sarà allora necessario definire due linee, ciascuna con le proprie campate distinte, che condivideranno gli stessi sostegni (ma non gli stessi conduttori). Una campata comprende un certo numero di conduttori, di caratteristiche anche non uguali tra di loro (per esempio, i conduttori attivi saranno in generale diversi - per materiale, diametro e tesatura - dai conduttori di guardia). I sostegni, infine, sono le strutture a cui sono appesi i conduttori delle campate; essi costituiscono anche i punti in cui le linee possono avere cambi di direzione sul piano orizzontale: su tale piano, ciascuna campata (delimitata da un sostegno ad ogni estremo) è rappresentata quindi da un fascio di segmenti che assumeremo paralleli (uno per ogni conduttore), mentre una linea appare come un fascio di spezzate. Rientrano tra i sostegni non solo i piloni ed i tralicci lungo la linea, ma anche le strutture (che chiameremo sostegni terminali) a cui sono appesi i conduttori all'inizio ed al termine della linea stessa. Non è detto, ovviamente, che tutti i sostegni di una stessa linea siano uguali, anzi questa situazione costituisce probabilmente una eccezione. I sostegni sono caratterizzati da una posizione georeferenziata, da una altezza, da un orientamento e da un certo numero di punti di attacco (o sospensione) per i conduttori. Tipicamente, ad ogni punto di attacco solo collegati due conduttori, uno dei quali appartenente alla campata a monte del sostegno, l'altro appartenente alla campata a valle; il numero dei punti di attacco è quindi uguale al

numero dei conduttori che caratterizza la linea. Fa eccezione la situazione dei sostegni terminali, per i quali è possibile ipotizzare che ad ogni punto di attacco sia collegato un solo conduttore. A differenza di quanto avviene per le campate, un sostegno NON appartiene necessariamente ad una sola linea.

Come tutte le moderne basi di dati elettroniche, l'archivio delle linee si articola su un certo numero di tabelle tra loro opportunamente collegate. Distingueremo, per chiarezza, due tipi di tabelle: le tabelle-indice e le tabelle-dati. Le tabelle-indice definiscono associazioni tra indici e gruppi di informazioni che si ripetono frequentemente nell'archivio. Esse permettono di utilizzare, nelle tabelle-dati, dei brevi codici al posto di lunghe serie di dati, relativi alla descrizione dei soggetti gestori delle linee, delle tipologie di linea e dei tipi di sostegno. In conseguenza di ciò, sono previste le seguenti tabelle-indice: tabella dei gestori, tabella delle tipologie di linea, tabella dei tipi di sostegno e tabella dei punti di sospensione (quest'ultima completa la definizione dei tipi di sostegno). Le tabelle-dati costituiscono i veri e propri contenitori dei dati che descrivono le caratteristiche delle linee elettriche presenti in archivio. Poiché, come si è detto, l'archivio ospita quattro tipi di oggetti (sostegni, linee, campate e conduttori), sono corrispondentemente previste quattro tabelle-dati: tabella dei sostegni, tabella delle linee, tabella delle campate e tabella dei conduttori.

Tabella dei gestori

Permette di associare a ciascun gestore (per esempio ENEL, TERNA, FS) un codice univoco da utilizzare nelle altre tabelle. Eventualmente, potranno essere inseriti nella tabella anche altri dati relativi ai gestori (per esempio informazioni di carattere amministrativo).

Tabella dei gestori		
nome campo	tipo campo	contenuto
ID	intero	Identificativo gestore
NOME	stringa	Nome del gestore

Tabella delle tipologie di linea

Definisce le caratteristiche delle varie tipologie standard di linea (per esempio: 380 kV trifase aerea, 132 kV trifase interrata etc.) ed assegna un codice univoco a ciascuna.

Tabella delle tipologie di linea		
nome campo	tipo campo	contenuto
ID	intero	Identificativo tipologia
V_NOM	reale	Tensione nominale
I_NOM	reale	Corrente nominale
NOME	stringa	Nome della tipologia

Tabella dei tipi di sostegno

Definisce le caratteristiche di ogni tipo di sostegno, compresi quelli impropri (punti di ingresso ed uscita da stazioni o cabine) assegnando ad ognuno un codice univoco. Nota bene: la differente altezza del sostegno non costituisce motivo di differenziazione del tipo.

Tabella dei punti di sospensione

Specifica la posizione dei punti di sospensione dei conduttori collegati ad un certo tipo di sostegno (identificato dal relativo codice), relativa al centro-sostegno.

Tabella dei tipi di sostegno		
nome campo	tipo campo	contenuto
ID	intero	Identificativo del tipo
CODICE	stringa	Codice utilizzato dal gestore
TIPO	stringa	Aereo o interrato
NOME	stringa	Nome della del tipo

Tabella dei punti di sospensione		
nome campo	tipo campo	contenuto
ID_TIPO	intero	Identificativo del tipo sostegno
N_PROG	intero	Numero progressivo del punto all'interno del tipo di sostegno utilizzato dal gestore
POS_ORIZ	reale	Posizione orizzontale
POS_VERT	reale	Posizione verticale

Tabella dei sostegni

Per ciascun sostegno censito in archivio, specifica un codice di tipologia di sostegno, le coordinate assolute (compresa la quota s.l.m.) della posizione della sua base-sostegno e l'altezza del centro-sostegno rispetto alla base-sostegno; ad ogni sostegno censito viene assegnato un identificativo univoco. É opportuno chiarire a questo punto come vengono rappresentati i sostegni nell'archivio. Per ogni tipo di sostegno occorre identificare un centro-sostegno convenzionale, situato in linea di massima sull'asse di simmetria verticale del sostegno, alla quota del punto di sospensione più basso. Rispetto a questo punto, nella tabelle dei punti di sospensione sono riportate le coordinate (ζ_i, τ_i) di spostamento laterale e verticale dei vari punti di attacco dei conduttori, facendo l'ipotesi che tutti questi punti giacciono su uno stesso piano verticale comprendente anche il centro-sostegno C . Ad ogni sostegno presen-

Tabella dei sostegni		
nome campo	tipo campo	contenuto
ID	intero	Identificativo univoco
ID_TIPO	intero	Identificativo del tipo di sostegno
CODICE	stringa	Codice utilizzato dal gestore
COORD_X	intero	Coordinate della base-sostegno
COORD_Y	intero	
COORD_Z	intero	Quota s.l.m. della base-sostegno
ALTEZZA	reale	Altezza del centro-sostegno rispetto alla base-sostegno
ORIENT	reale	Orientamento della direzione di uscita dei conduttori rispetto al nord geografico (tra -180 e +180 gradi, positiva se in senso orario, negativa se in senso antiorario)

te in archivio viene poi associata una base-sostegno B corrispondente al piede della perpendicolare condotta dal centro-sostegno; nella tabella dei sostegni si specificano quindi sia la posizione assoluta della base-sostegno (tramite le sue coordinate geografiche e la quota s.l.m.) sia l'altezza h_c del centro-sostegno rispetto alla base-sostegno sia, infine, l'orientamento θ del sostegno stesso rispetto alla direzione del nord geografico. In figura 2.4 sono riportati i punti di riferimento e le grandezze attraverso cui si determina la posizione dei punti di sospensione relativi ad un generico sostegno doppia terna.

Si potrebbe infine osservare che la tabella dei sostegni non è strettamente indispensabile e potrebbe essere eliminata, includendo le relative informazioni nella tabella delle campate; in questo modo però si dovrebbero ripetere le stesse informazioni due volte (come sostegno finale di una campata ed iniziale della successiva). Inoltre, l'utilità e l'importanza della tabella dei sostegni nasce anche dalla considerazione che i sostegni sono di fatto gli unici oggetti

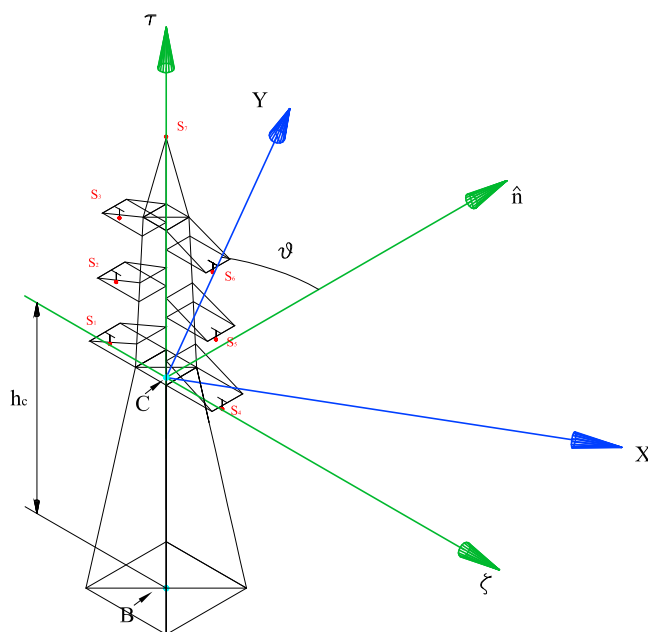


Figura 2.4: Determinazione dei punti di sospensione a partire dalle caratteristiche di archivio

realmente georeferenziati di una linea.

Tabella delle linee

Per ciascuna linea presente in archivio, specifica un codice di gestore, un codice di tipologia di linea, ogni altra caratteristica di rilievo tecnico pertinente all'intera linea; ad ogni linea censita viene assegnato un identificativo univoco.

Tabella delle campate

Per ciascuna campata, specifica l'identificativo della linea di appartenenza, il numero d'ordine progressivo di posizionamento lungo la linea stessa ed i

Tabella delle linee		
nome campo	tipo campo	contenuto
ID	intero	Identificativo univoco
ID_TIPO	intero	Identificativo del tipo di linea
ID_GEST	intero	Identificativo del gestore
CODICE	stringa	Codice utilizzato dal gestore
I_MEDIA	intero	Corrente media in Ampere
I_MASSIMA	intero	Corrente massima in Ampere
NOME	stringa	Nome della linea

riferimenti ai sostegni a monte ed a valle. Poiché, come si è detto, una campata appartiene necessariamente ad una ed una sola linea, non è necessario prevedere per la campata un proprio codice di identificazione univoco, essendo la campata stessa univocamente individuata dal codice della linea di appartenenza e dal numero progressivo.

Tabella delle campate		
nome campo	tipo campo	contenuto
ID_LINEA	intero	Identificativo della linea cui la campata appartiene
N_PROG	intero	Numero progressivo della campata all'interno della linea
ID_SOST_INI	intero	Identificativo del sostegno a monte
ID_SOST_FIN	intero	Identificativo del sostegno a valle

Tabella dei conduttori

La tabella dei conduttori contiene le informazioni relative al cablaggio delle campate. Per ciascun conduttore, si specificano le campate di appartenenza, un numero d'ordine progressivo ed i riferimenti ai punti di sospensione a

Tabella dei conduttori		
nome campo	tipo campo	contenuto
ID.LINEA	intero	Identificativo univoco della linea
N_CAMP_DA	intero	Identificativo della prima campata del gruppo
N_CAMP_A	intero	Identificativo dell'ultima campata del gruppo
N_PROG	intero	Numero progressivo del conduttore all'interno della campata
N_PUNTO_INI	intero	Numero d'ordine del punto di sospensione iniziale
N_PUNTO_FIN	intero	Numero d'ordine del punto di sospensione finale
TIRO	reale	Parametro di tesatura del conduttore
FASE	intero	Fase di tensione e corrente sul conduttore
TIPO	stringa	Fase o neutro
DIAMETRO	reale	Diametro in metri del conduttore

monte ed a valle; si forniscono inoltre informazioni sulla tesatura del conduttore (dato necessario alla ricostruzione del profilo della catenaria), sul suo diametro e sulla fase di tensione e corrente sul conduttore stesso. Poiché lo schema di cablaggio si ripete spesso inalterato per un gruppo di campate consecutive di una stessa linea, si è ritenuto opportuno evitare la duplicazione di record identici nella tabella dei conduttori attraverso l'utilizzo dei due campi ID_CAMP_DA e ID_CAMP_A al posto di un unico campo ID_CAMPATA.

Capitolo 3

L'archivio cartografico

L'approccio proposto in questa sede per la realizzazione di studi VIA relativamente alla componente dei campi elettrici e magnetici, prevede per la cartografia un duplice utilizzo: in primo luogo da essa vengono ricavati dati fondamentali per lo svolgimento della valutazione teorica della distribuzione dei campi come il tracciato degli elettrodotti e le caratteristiche del terreno interessato dal loro passaggio; inoltre al termine della fase di valutazione, i risultati del calcolo dei campi sono sintetizzati in mappe tematiche dette *mappe di isocampo* in cui alla cartografia di base sono sovrapposte le curve di livello per i campi.

Nella prima parte di questo capitolo si parlerà della cartografia dal punto di vista teorico, fornendo le basi necessarie per un suo corretto utilizzo ed in particolare per avere la sicurezza di estrarre dati validi e creare mappe tematiche significative. In seguito si parlerà della cartografia digitale e si definirà con precisione cosa è contenuto nel cosiddetto *archivio cartografico*. Infine si descriverà l'applicazione sviluppata per accedere in modo automatico a tale archivio, cioè l'applicazione con cui si localizzano le sorgenti dei campi, si ricava l'andamento del terreno ed infine si creano le mappe di isocampo.

3.1 Elementi di topografia

In questa prima parte del capitolo si forniscono le basi per capire come nasce la rappresentazione cartografica piana di una realtà territoriale che si sviluppa invece su una superficie approssimativamente “ellissoidica” (ellissoide di rotazione). Partendo da questi aspetti teorici, si arriva a presentare il sistema di rappresentazione cartografica nazionale e quello internazionale, che costituirà lo “standard” a cui si dovranno probabilmente adeguare gli studi futuri.

Questa introduzione teorica è importante per capire in che modo la scelta della cartografia può essere vincolante; infatti l'estrazione delle informazioni necessarie alla localizzazione delle sorgenti fa sì che i limiti della rappresentazione cartografica scelta (soprattutto in relazione alla scala utilizzata) debbano essere considerati anche durante la valutazione dei campi.

3.1.1 Richiami di geodesia

La forma del geoide è quella di un corpo approssimativamente sferico ma piuttosto irregolare, presentante gibbosità dette “ondulazioni geoidiche”, dipendenti soprattutto dalla distribuzione irregolare e dalle diverse densità delle masse terrestri. L'equazione del geoide in coordinate sferiche è assai complessa e richiede la conoscenza di un grande numero di parametri pur riferendosi ad una forma approssimata; con alcune limitazioni la si può ridurre a quella di una sferoide detto di Bruns, dal nome dell'astronomo tedesco che ne trattò per primo.

Con ulteriori semplificazioni, che qui si omettono, si perviene alla equazione di un ellissoide di rotazione:

$$\frac{X^2 + Y^2}{a^2} + \frac{Z^2}{b^2} = 1$$

Come si vede, questo ellissoide dipende dai parametri a (semiasse maggiore o equatoriale) e b (semiasse minore o polare). A essi sono legati l'eccentricità e^2 nonché lo schiacciamento α . Per tre secoli, la determinazione di questi parametri venne affidata a misura di archi di meridiano; oggi si ricorre invece a osservazioni satellitari, che forniscono parametri meccanici da cui si ricavano le costanti geometriche. Per l'ellissoide chiamato "WGS 84" (World Geodetic System 1984), sono:

$$\begin{aligned} a &= 6378137 \text{ m} \\ e^2 &= 0,00669438002 \\ \alpha &= \frac{1}{298,257223563} \end{aligned}$$

dove:

$$e^2 = 1 - \frac{b^2}{a^2} \qquad \alpha = \frac{a-b}{a}$$

Va ricordato che sono ancora in uso altri ellissoidi le cui caratteristiche sono riportate in tabella 3.1; come si vede, l'ultimo ha praticamente gli stessi dati di WGS84; l'ellissoide di Bessel invece fu usato per la cartografia ufficiale italiana dopo l'Unità.

Internazionale o di Hayford (1909)	con	$a = 6378388$	$\alpha = 1/297,0$
Helmert (1906)	con	$a = 6378140$	$\alpha = 1/298,3$
Clarke (1880)	con	$a = 6378243$	$\alpha = 1/295,5$
Bessel (1841)	con	$a = 6377397$	$\alpha = 1/299,2$
Krassovsky (1942)	con	$a = 6378245$	$\alpha = 1/298,3$
Canberra (1980)	con	$a = 6378137$	$\alpha = 1/298,257$

Tabella 3.1: Ellissoidi in uso

3.1.2 La rappresentazione dell'ellissoide sul piano

Quando si effettua una rappresentazione di una superficie su di un'altra, deve essere stabilita una corrispondenza biunivoca fra i punti delle due superfici. *Le relazioni analitiche che definiscono tale legame prendono il nome di formule di corrispondenza, corrispondenze o anche di equazioni della carta.* Per rappresentare sul piano l'ellissoide di rotazione terrestre sarà così indispensabile stabilire un legame fra le coordinate del piano (x, y) e le coordinate ellissoidiche (φ, α) definito genericamente dalle due relazioni:

$$x = x(\varphi, \alpha)$$

$$y = y(\varphi, \alpha)$$

a cui si accompagnano, per la biunivocità del legame suddetto, le due relazioni inverse:

$$\varphi = \varphi(x, y)$$

$$\alpha = \alpha(x, y)$$

denominate appunto *corrispondenze inverse*.

Le rappresentazioni cartografiche si possono classificare in base alle deformazioni che introducono:

- **carte conformi o isogoniche o conformi o ortomorfe**, quando gli angoli risultano inalterati e, di conseguenza è conservata la similitudine tra le corrispondenti figure infinitesime sull'ellissoide e sul piano;
- **carte equivalenti o autaliche**, quando vengono conservate le aree (utilizzate per la cartografia catastale);
- **carte aflatliche** quando non vengono conservate né aree né angoli. Esse non rappresentano una classe ben definita, includendo di fatto anche altre rappresentazioni che presentano deformazioni molto contenute;

- **carte equidistanti**, allorché il rapporto delle lunghezze si conserva per determinate linee.

Il problema della cartografia e la classificazione dei diversi tipi di carta possono essere affrontati anche sotto forma diversa, per quanto meno generale, da quella analitica prima considerata. Infatti molti dei sistemi di rappresentazione cartografica, ed in particolare quelli che trovano una più frequente utilizzazione pratica, possono ottenersi con vere e proprie costruzioni geometriche che permettono di passare da un punto della superficie ellissoidica o sferica al corrispondente punto del piano. Una volta ottenuta per via geometrica la rappresentazione dei punti dell'ellissoide su di un piano, per realizzare la carta alla scala voluta, sarà sufficiente adottare un opportuno rapporto di similitudine fra quello e questa. La genesi delle antiche carte era proprio di tipo geometrico ed è per questa ragione che si parla tuttora di proiezioni con riferimento a talune rappresentazioni cartografiche. Da tale punto di vista la rappresentazione conforme di Gauss rientra nella classe delle proiezioni per sviluppo cilindrico inverso in quanto effettuata su un cilindro tangente all'ellissoide terrestre lungo un suo meridiano.

Il riferimento allo schema proiettivo della rappresentazione di Gauss consente, come già si è detto, di individuare immediatamente le due condizioni al contorno che caratterizzano la rappresentazione stessa. Le formule di corrispondenza, dovranno evidentemente soddisfare le due condizioni seguenti:

1. un meridiano dell'ellissoide (meridiano centrale o meridiano origine) si trasformi sul piano in una retta che si assume come asse delle y con origine nel punto in cui interseca la retta immagine dell'equatore;
2. lungo l'asse delle y siano conservate le lunghezze oggettive ossia in tutti

i punti di tale asse e lungo la sua direzione il modulo del coefficiente di deformazione lineare sia uguale all'unità.

3.1.3 La cartografia ufficiale italiana

Il sistema nazionale di riferimento assume come origine per le longitudini il meridiano passante per l'osservatorio astronomico di Monte Mario (Roma) che presenta una differenza di longitudine di $12^{\circ}27'08'',40$ est rispetto al meridiano di Greenwich. Il sistema cartografico prescelto, con l'adozione dell'ellissoide internazionale, è stato quello della rappresentazione conforme di Gauss, mediante la suddivisione in due fusi di 6° di longitudine, denominati rispettivamente *fuso ovest* e *fuso est*. Tale sistema è stato adattato alla situazione italiana, sulla base degli studi sviluppati da Giovanni Boaga. Il sistema cartografico nazionale risultante, denominato quindi *rappresentazione conforme di Gauss-Boaga*, ha come meridiani centrali dei due fusi quelli corrispondenti alle longitudini di 9° est Greenwich, per il fuso ovest, e di 15° est Greenwich, per il fuso est. Questa soluzione di continuità è stata tuttavia integrata in seguito da una zona di sovrapposizione tra i due fusi, dell'ampiezza di circa 40 km, per la quale risultano contemporaneamente disponibili due riferimenti: uno nel fuso ovest e l'altro nel fuso est.

Particolare interesse presenta la riduzione delle coordinate operata in questo sistema per contenere le deformazioni cartografiche lineari massime. Con l'adozione dei fusi di 6° in longitudine, il fattore di scala, o modulo di riduzione lineare, assume al margine di ciascun fuso un valore $m = 1,0008$. Si tratta senza dubbio di una entità eccessiva, considerando che una distanza effettiva di 10 km, misurata sul terreno, al limite di questi fusi, finirebbe per subire un allungamento nella rappresentazione cartografica di circa 8 m. Per contenere quindi tali deformazioni lineari massime, l'ellissoide di rotazione

assunto come superficie di riferimento è stato convenzionalmente ridotto dello 0,4 per mille, e cioè i suoi parametri, nella fattispecie quelli dell'ellissoide internazionale, sono stati moltiplicati per 0,9996. Questo artificio, che ha ridotto di fatto le coordinate dei punti, ha consentito di mantenere il valore del fattore di scala massimo entro limiti molto più tollerabili ai fini dell'utilizzazione immediata della cartografia prodotta, senza peraltro imporre un completo ridisegno della preesistente cartografia italiana realizzata nella proiezione naturale. La riduzione del fattore di scala massimo da 1,0008 a 1,0004 ha introdotto nella rappresentazione cartografica conforme delle contrazioni che hanno finito per spostare su due diversi meridiani, posti in posizione simmetrica rispetto a quello centrale di ciascun fuso, *l'automecoicità* della rappresentazione medesima, situata in origine sullo stesso meridiano centrale o primo meridiano del fuso. Nell'ambito definito da questi due meridiani simmetrici identificati dal fattore di scala $m = 1$, la rappresentazione presenta quindi delle contrazioni; all'esterno di questo stesso ambito presenta invece delle dilatazioni. Nella prassi corrente, per eliminare qualsiasi incertezza sul segno delle ascisse e ridurle tutte al segno positivo, sono state attribuite ai diversi meridiani centrali dei fusi, delle false origini che permettono di contraddistinguere anche i differenti fusi, per cui le coordinate correntemente utilizzate nelle trasformazioni inverse ne devono tenere conto. Indicando pertanto con E l'ascissa di un generico punto della rappresentazione gaussiana, essa verrà ottenuta dalla somma algebrica della x calcolata, contratta dello 0,9996, con le costanti convenzionali prescelte per il meridiano centrale del fuso di appartenenza. Nel sistema nazionale le costanti risultano rispettivamente:

$$E = x + \begin{cases} 1500 \text{ km per il fuso OVEST} \\ 2520 \text{ km per il fuso EST} \end{cases}$$

Data questa convenzione, cade nel sistema nazionale la necessità di identificare il fuso di riferimento, poiché esso può essere immediatamente identificato dalle prime cifre (1 e 2) delle costanti che definiscono la falsa origine relativa.

II sistema UTM

Il problema dell'unificazione delle reti geodetiche ha messo in evidenza anche la necessità di pervenire ad una normalizzazione delle rappresentazioni cartografiche dell'intera superficie terrestre. Per questo si è applicata, in maniera sistematica, la stessa rappresentazione conforme di Gauss (denominata nei paesi anglosassoni trasversa di Mercatore) per i territori compresi fra i paralleli di $+80^\circ$ e -80° di latitudine, e la proiezione stereografica polare per le due calotte polari delimitate rispettivamente a nord e a sud degli stessi paralleli. La superficie terrestre compresa tra questi paralleli è stata ripartita in 60 fusi dell'ampiezza di 6° in longitudine e, progressivamente numerati a partire dal antimeridiano di Greenwich. Tale circostanza definisce pertanto non un sistema UTM, bensì 60 diversi sistemi fra loro autonomi. Il territorio italiano risulta in tal caso compreso quasi tutto nei due fusi 32 e 33, coincidenti peraltro con i due fusi stabiliti nel sistema nazionale in maniera del tutto indipendente. Le corrispondenze studiate per la rappresentazione sono del tutto identiche nei 60 sistemi, e il fattore di riduzione rimane pari a 0,9996. Per agevolare l'individuazione delle regioni rappresentate, i diversi fusi sono stati suddivisi in 20 fasce parallele, dieci nell'emisfero Nord e dieci nell'emisfero Sud, generate per mezzo di paralleli geografici distanziati di 8° in latitudine a partire dall'equatore e fino alle latitudini di 80° nord e di 80° sud. Queste fasce sono state poi individuate da lettere dell'alfabeto dalla C fino alla X a partire dalla fascia attigua alla calotta Sud, escludendo però le

lettere I e O. Dalle due ripartizioni, quella in fusi e quella in fasce, la superficie terrestre è stata così suddivisa in 1.200 zone (20 x 60), ciascuna delle quali ha l'ampiezza di 6° in longitudine e 8° in latitudine. Queste zone sono utili per la designazione delle aree di volta in volta interessate nell'insieme della rappresentazione cartografica, denominata appunto Universale Trasversa di Mercatore o più semplicemente sistema UTM.

Ciascun fuso rappresentato nel piano della proiezione trasversa di Mercatore comporta il tracciamento di un reticolato ortogonale a partire dal meridiano centrale, che individua l'asse delle ordinate N, e dall'equatore che definisce invece l'asse delle ascisse E, alla cui origine è stato attribuito un valore convenzionale di 500.000 m (falsa origine). Particolare rilievo assume l'individuazione dei punti col reticolato UTM, che viene effettuata attraverso un gruppo di numeri e di lettere posti l'una di seguito all'altra, senza spaziature, senza virgole, punti o parentesi. L'individuazione avviene seguendo l'ordine: - designazione di zona di reticolato, cioè numero del fuso e lettera di fascia; - designazione di quadrato di 100 km, cioè lettera di colonna e lettera di riga; - coordinata E a partire dalla decina di km; - coordinata N a partire dalla decina di km. In tabella 3.2 è riportato un esempio di individuazione delle coordinate di un punto secondo il sistema UTM con grado di precisione crescente.

Per quanto riguarda il territorio italiano, l'interesse presentato dal sistema UTM è legato soprattutto alle possibilità offerte dall'unificazione delle reti geodetiche fondamentali europee. *Non è infatti possibile trovare alcuna relazione ben definita che permetta di passare da un sistema all'altro.* Per rendere possibile in via approssimata e ai soli fini cartografici questa trasformazione di coordinate, sono stati redatti dei grafici a curve isotransitive utili per l'interpolazione delle correzioni da attribuire, fuso per fuso, alle coor-

100 km di lato	si scriverà	32 T P P
10 km di lato	si scriverà	32 T P P 85
1 km di lato	si scriverà	32 T P P 7652
100 m di lato	si scriverà	32 T P P 760522
10 m di lato	si scriverà	32 T P P 76022248
1 m di lato	si scriverà	32 T P P 7602322476

Tabella 3.2: Coordinate UTM

dinate di un sistema per ricavare le coordinate dell'altro e viceversa. Tali correzioni sono state anche tabulate, in maniera da fornire, foglio per foglio della carta topografica alla scala di 1:100.000, le corrispondenti costanti medie di passaggio. Si deve comunque sottolineare che le coordinate piane N ed E dei diversi punti considerati sono definite per i due sistemi sempre dalle stesse formule di corrispondenza della rappresentazione conforme di Gauss dell'ellissoide internazionale.

3.2 La base cartografica della VIA ed il modello del terreno

La base cartografica adottata per l'esecuzione dello studio è costituita dalla *cartografia tecnica regionale in scala 1:10000*. Il sistema di coordinate su cui tale cartografia è basata è quello Gauss-Boaga anche se su ciascun foglio sono indicati i riferimenti del sistema UTM.

Il tipo di studio svolto ha ovviamente richiesto che la cartografia fosse disponibile su supporto digitale oltre che cartaceo; a tal proposito è opportuno distinguere due tipi di cartografia “digitale”: la cartografia di tipo *bitmap* e la cartografia *vettoriale*.

La cartografia *bitmap* equivale a quella in formato cartaceo, nel senso che rispetto a quest'ultima cambia solo il supporto. Essa può essere visualizzata o modificata come qualsiasi altra immagine digitale ed è in genere disponibile in diversi formati e a diverse risoluzioni.

La cartografia *vettoriale* è qualcosa di più: in essa ogni elemento ha una sua identità, che va oltre il fatto di essere rappresentato con un certo tratto sul foglio o con un certo numero di pixel sullo schermo; ad esempio una linea è memorizzata come tale e cioè attraverso le coordinate dei suoi estremi, lo spessore del tratto, il colore, ... ed è quindi un elemento a sé stante, modificabile indipendentemente da tutti gli altri contenuti nello stesso file.

Vi sono molti tipi di vettoriali diversi; uno dei più diffusi, specialmente per cartografia e disegni tecnici, è il cosiddetto **DWG**.

Il DWG è un formato di file binario, la cui popolarità è inscindibilmente legata a quella di *Autocad*, che da oltre 20 anni è il più diffuso tra tutti i programmi per il disegno tecnico (*CAD*, Computer Aided Design) in commercio.

Ogni file DWG può essere considerato una vera e propria base di dati in cui gli elementi grafici, detti anche *entità*, sono memorizzati in liste concatenate; una delle sue caratteristiche peculiari è l'organizzazione del file in *livelli*. Ogni entità della base di dati ha, tra le sue caratteristiche, un livello di appartenenza. Ad esempio, considerando la cartografia, le linee che rappresentano strade avranno un livello differente da quelle che rappresentano edifici o quelle relative a confini o fiumi; questa caratteristica della base di dati si traduce in grandi vantaggi quando se ne visualizza il contenuto. Gli elementi di ciascun livello sono visualizzabili indipendentemente da quelli degli altri, come fossero disegnati su fogli di carta trasparente che possono essere sovrapposti l'uno all'altro e che possono essere rimossi o aggiunti a piacere.

Ciò è assai utile anche si quando vogliono aggiungere nuovi elementi, come nel caso delle linee isocampo alla base cartografica della VIA. Per le nuove entità vengono ovviamente creati dei nuovi livelli e non si altera quindi l'organizzazione degli elementi preesistenti nel file.

Per sovrapporre nello stesso file entità di origine diversa, occorre che sia stato stabilito a priori un sistema di riferimento coerente che permetta di conservare la mutua disposizione dei vari elementi.

I punti di riferimento sono costituiti dagli elementi della cartografia digitale che deve essere *georeferenziata*. Per georeferenziazione della cartografia digitale si intende il processo che porta ad attribuire a ciascuna entità all'interno del file le stesse coordinate che essa assume in un fissato sistema di rappresentazione cartografica. La georeferenziazione non comporta semplicemente un ridimensionamento ed una traslazione della cartografia digitale (bitmap o vettoriale che sia), ma una trasformazione più complicata; ciò è dovuto principalmente al fatto che la base rimane pur sempre la cartografia

cartacea tradizionale, per cui non si possono escludere deformazioni del supporto verificatesi a monte o durante la “digitalizzazione”. La cartografia di base comprende l’indicazione di elementi detti *riferimenti o punti geodetici*; di essi si conoscono le coordinate esatte, che normalmente non sono state dedotte da altri elementi della cartografia, ma che sono frutto di triangolazioni sul campo. Questi punti sono fondamentali per la georeferenziazione di ogni foglio. Le trasformazioni utilizzate fanno infatti in modo che ai punti geodetici considerati vengano attribuite sul file le coordinate esatte, mentre tutti gli altri vengono posizionati come se la superficie piana su cui è rappresentata la cartografia fosse di materiale elastico e si cercasse di “stirla” in modo da far coincidere un numero finito di punti a dei corrispondenti fissi. Il numero di punti geodetici utilizzati per la georeferenziazione non è stabilito a priori; normalmente si usano quattro punti il più possibile vicino ai vertici del foglio, a cui se ne aggiunge uno della zona centrale.

Se la cartografia è georeferenzata lo sono anche tutti gli elementi da essa estratti; tale assunto è di fondamentale importanza per l’esecuzione di tutto lo studio, con particolare riferimento alla fase di localizzazione delle sorgenti di campo.

3.2.1 Il modello del terreno

La cartografia tecnica regionale digitalizzata, utilizzata come base cartografica per lo studio di impatto ambientale, è *strettamente bidimensionale*. Al più, solo per alcuni fogli di recente realizzazione, le linee isocline sono quotate, vale a dire che le linee delle mappe rimangono quelle della cartografia bidimensionale, ma fra gli attributi associati a ciascuna linea compare la quota.

Un modello digitale del terreno è qualcosa di più: è un insieme di elementi

grafici la cui composizione definisce la superficie con cui si rappresenta il terreno in una determinata zona.

Il modello del terreno utilizzato per la VIA ha come elemento costitutivo di base l'elemento grafico del DWG denominato “faccia 3d”: si tratta di una porzione triangolare di piano i cui vertici hanno per coordinate una terna di valori reali che individua la posizione di ciascuno in $\mathbb{R}^3$. Ciascuna faccia triangolare condivide ognuno dei suoi lati con una faccia triangolare contigua, cosicchè la composizione di tutti gli elementi triangolari individua una superficie come quella rappresentata in figura 3.1.

Il modello del terreno così definito è stato fornito da TERNA ed è ricavato dalle linee isocline e da altri elementi grafici quotati della cartografia digitalizzata bidimensionale georeferenziata.

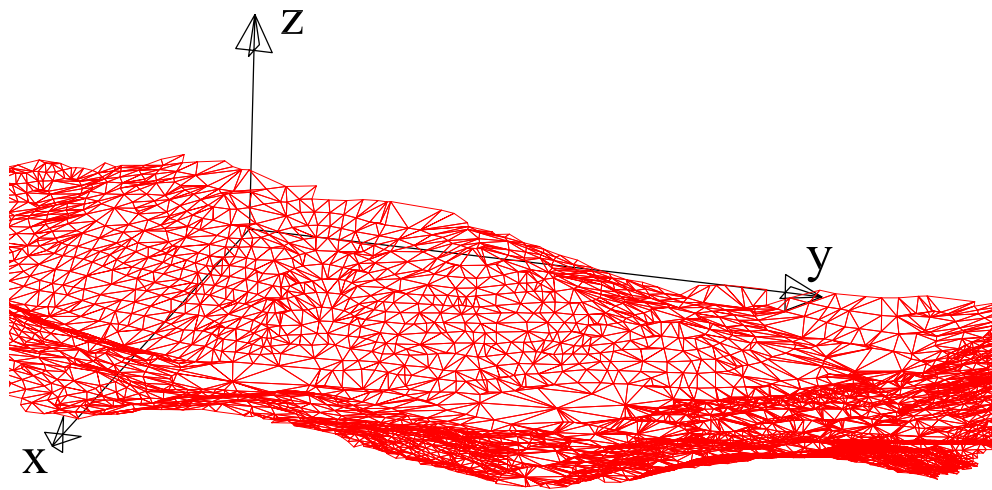


Figura 3.1: Modello del terreno

Rimane così definito quello che in seguito chiameremo *archivio cartografico*: ogni porzione di territorio che deve essere descritta per l'esecuzione della VIA, ha come corrispondente nell'archivio cartografico un file di tipo DWG

in cui, su livelli diversi, sono rappresentati gli elementi della cartografia tecnica regionale georeferenziata, il modello del terreno e, alla fine della fase di valutazione, anche la varie linee isocampo.

Il fatto che questi elementi siano memorizzati effettivamente tutti nello stesso file è vero solo in linea di principio. In pratica si preferisce spesso separare i vari elementi su file diversi in modo da contenerne le dimensioni e conseguentemente velocizzarne la consultazione.

3.2.2 Verifica dei vincoli imposti dalla base cartografica scelta

Come si è detto la cartografia digitale disponibile è in scala 1:10000 ed è stata *georeferenziata* secondo il sistema Gauss-Boaga, assunto come sistema ufficiale della VIA.

L'utilizzo della cartografia digitale vettoriale viene a volte erroneamente interpretato come un superamento di tutti i vincoli legati alla scala della cartografia considerata. La possibilità di visualizzare sullo schermo particolari della cartografia fortemente ingranditi ed insieme di disporre delle coordinate “reali” degli elementi (grazie alla georeferenziazione), non deve far dimenticare che i limiti di dettaglio significativi apprezzabili dalla cartografia, si determinano comunque in relazione alla sua scala.

Dunque non ha senso determinare sulla cartografia in scala 1:10.000 le coordinate di un punto con la precisione delle frazioni di metro, visto che un metro corrisponderebbe sulla carta ad un decimo di millimetro.

Le carte a diverse scale non differiscono semplicemente per un fattore di ingrandimento, ma nascono con procedimenti diversi al variare del dettaglio da rappresentare. In particolare la stessa georeferenziazione della cartografia perde di significato se il dettaglio desiderato è esagerato rispetto alla scala

della cartografia. Premesso ciò ed osservando che 1 millimetro sulla carta corrisponde a 10 metri sul terreno si possono fare le seguenti considerazioni.

- nel codice di calcolo tutte le operazioni sono effettuate basandosi su coordinate *approssimate al metro*; le coordinate E,N delle sorgenti (memorizzate nell'archivio delle linee e ricavate spesso dalla cartografia) come anche quelle dei cosiddetti “*punti di isocampo*” (attraverso cui vengono definite le linee isocampo corrispondenti) sono dunque dei numeri interi.

La principale giustificazione per questo tipo di arrotondamento è legata al concetto di *imperfezione grafica*; si considera infatti che l'incertezza con cui si può determinare la posizione di un generico elemento della cartografia non possa essere inferiore allo spessore del tratto utilizzato; questo è assunto, indipendentemente dalla scala cartografica, pari a 0,2 millimetri. Gli 0,2 millimetri di imperfezione grafica corrispondono, in scala 1:10000, a 2 metri sul territorio; ne deriva che non ha senso specificare le coordinate di un elemento fino al decimo di metro in quanto ciò equivarrebbe a saper apprezzare sulla carta particolari dell'ordine del centesimo di millimetro.

- Nel momento in cui si vuole arricchire la cartografia con nuovi elementi, è necessario chiedersi se questi siano bene inseriti sulla base cartografica preesistente. Nel caso delle linee isocampo ciò è di fondamentale importanza in quanto esse assumono significato in relazione al loro posizionamento rispetto alle entità territoriali rappresentate (specialmente gli edifici). Come vedremo, l'andamento delle linee isocampo viene ottenuto *per punti*; la posizione di ciascuno di questi punti è indicata rispetto a dei riferimenti fissi detti capisaldi. In altre parole, i punti

di isocampo vengono individuati attraverso gli scostamenti rispetto ai relativi capisaldi; come vedremo l'ampiezza di questi scostamenti non supera i 200 metri. Anche se questi scostamenti sono determinati in base a dei calcoli, la situazione è analoga a quella in cui si voglia aggiungere alla cartografia la rappresentazione di un nuovo oggetto lineare presente sul territorio nota la posizione esatta di un estremo, la sua lunghezza, la direzione della retta su cui esso giace ed il suo verso. Al variare della posizione dell'oggetto all'interno del fuso, è lecito chiedersi se si debba tenere conto nella sua rappresentazione della distorsione lineare che caratterizza tutti gli altri elementi della cartografia. In linea di principio infatti il nuovo oggetto rappresentato potrebbe non essere ben inserito nella cartografia qualora solo per esso non si tenesse conto della distorsione lineare. Anche se ci si trovasse al margine del fuso però, la rappresentazione sul piano di un oggetto lineare lungo 200 metri (sull'ellissoide) sarebbe lunga $m \cdot l = 1,004 \cdot 200 = 200,8$ metri. Gli 80 centimetri in più corrisponderebbero a 0,08 millimetri sulla carta 1:10.000 e non sarebbero quindi apprezzabili per il già citato margine di imperfezione cartografica indipendente dalla scala pari a 0,2 millimetri.

Per quanto detto nei precedenti paragrafi, tutte le considerazioni qui esposte valgono anche nel caso in cui il sistema di coordinate adottato sia quello UTM piuttosto che Gauss-Boaga.

La normalizzazione delle rappresentazioni cartografiche a scala europea diventa sempre più un'esigenza via via che si rafforzano i vincoli fissati in ambito comunitario; lo standard UTM è quello unanimemente accettato ed anche per l'esecuzione di VIA se ne farà sempre più uso.

3.3 Il programma per l'interfacciamento con l'archivio cartografico

Nonostante sia per molti versi penalizzante, soprattutto in termini di prestazioni, si è deciso di sviluppare in maniera separata il codice di calcolo dei campi da quello realizzato per accedere all'archivio cartografico.

Questa “separazione di ambiti” si è dimostrata assai flessibile in fase di progettazione dei programmi e degli archivi, permettendone lo sviluppo contemporaneo ed operativamente (ma non logicamente) indipendente. Ciò non toglie che, raggiunto un livello di sviluppo soddisfacente, sia auspicabile una maggiore integrazione fra l'applicazione di calcolo dei campi e quella che accede alla cartografia digitale.

Allo stato attuale dunque, per accedere alla cartografia in modo automatizzato, si ricorre ad una applicazione a sé stante, con una sua interfaccia, che utilizza dei file di appoggio per i risultati che possono essere sia di tipo grafico, sia di tipo testo.

Come si è già accennato l'approccio proposto per l'esecuzione dello studio di impatto ambientale prevede l'accesso all'archivio cartografico in momenti distinti:

- **Popolamento dell'archivio delle linee**
- **Determinazione dell'andamento del terreno ai fini del calcolo dei campi**
- **Costruzione delle mappe di isocampo**

dove l'ordine dell'elenco rispecchia quello temporale durante lo svolgimento dello studio.

Pur essendo distinte temporalmente, le prime due fasi sono riconducibili alla stessa modalità di accesso all'archivio cartografico cioè alla sua *consultazione*. In particolare l'archivio viene consultato per ricavare la localizzazione delle sorgenti e l'andamento del terreno intorno a ciascuna di esse.

La successiva fase di costruzione delle linee isocampo avviene con modalità del tutto diverse essendo invertito il flusso di dati: in base ai risultati dei calcoli dei campi, si creano nuovi elementi nell'archivio.

In questa sezione del capitolo, dopo avere accennato alle librerie di funzioni utilizzate per lo sviluppo del nuovo codice, si prenderà in considerazione la fase di consultazione dell'archivio cartografico descrivendo gli strumenti realizzati per eseguirla.

La descrizione delle procedure di stesura delle mappe di isocampo è invece posta al termine del capitolo relativo al calcolo dei campi, che ne rappresenta il logico presupposto.

3.3.1 Tipo di interfacciamento all'archivio e librerie utilizzate

Il formato di file binario DWG è proprietà della AUTODESK che produce il software AUTOCAD e, fino a pochi anni fa, le sue specifiche non erano disponibili. Recentemente esse sono state rese pubbliche e sono nati nuovi strumenti che permettono di leggere, scrivere e modificare file DWG senza ricorrere necessariamente all'utilizzo di un programma CAD.

In particolare la *OpenDWG Alliance*, un'associazione di utenti e rivenditori di CAD, ha creato delle librerie per linguaggio C/C++, disponibili per varie piattaforme e ambienti di programmazione, che costituiscono un potente strumento per leggere, scrivere e modificare file DWG, prescindendo totalmente dalla disponibilità di un CAD.

Sostanzialmente vengono definite delle strutture informatiche le cui variabili costitutive descrivono le caratteristiche delle varie “entità” del DWG, dove per entità si intendono gli elementi grafici che costituiscono il contenuto del file. Queste strutture sono una sorta di contenitore di appoggio in cui è possibile copiare le caratteristiche di ogni elemento contenuto nel file; fatto ciò le caratteristiche possono essere consultate o modificate attraverso opportuni comandi.

3.3.2 Utilizzo del modello del terreno: determinazione della quota di un punto di coordinate piane note

Supponiamo di avere a disposizione un modello del terreno sotto forma di facce triangolari adiacenti l’una all’altra, che coprono la porzione di territorio a cui siamo interessati e di voler ricavare in base a questo modello la quota di un generico punto in tale zona. In altre parole il problema da risolvere è quello di ricavare la quota di un punto che si trovi nella zona coperta dal modello e caratterizzato dalle coordinate x, y che ne individuano la posizione sul piano orizzontale (coordinate planimetriche).

La soluzione di detto problema si articola in due passi successivi:

1. individuazione della porzione di modello che rappresenta la zona in cui il punto si trova;
2. determinazione della quota a partire dalle caratteristiche della porzione di modello individuata al passo precedente.

Il primo passo è necessario a causa del particolare strumento scelto per accedere all’archivio cartografico: l’applicazione sviluppata a tale scopo utilizza degli strumenti che permettono di attingere direttamente alla base di dati (DWG) in cui sono immagazzinate le caratteristiche degli elementi grafici

svincolandosi dall'interfaccia ad alto livello che viene utilizzata per la visualizzazione e la modifica di detti file e svincolandosi quindi anche da tutti gli strumenti che essa mette a disposizione. In particolare, per determinare la prossimità di un elemento grafico ad un altro, mentre se si utilizza l'interfaccia ad alto livello sono a disposizione una serie di strumenti per la selezione delle entità grafiche, accedendo direttamente alla base di dati non si può fare altro che effettuare un controllo basato sulle coordinate di posizionamento degli elementi considerati.

Più in dettaglio, si eseguono i seguenti passi:

Passo 1 :

- dati i 3 vertici $P1, P2, P3$ di una generica faccia triangolare, si considera la sua proiezione su un piano orizzontale, i cui vertici hanno rispettivamente coordinate $(X_1, Y_1)(X_2, Y_2)(X_3, Y_3)$;
- si definiscono, sempre sul piano orizzontale, le 3 rette su cui giacciono i tre lati del triangolo (proiezione sul piano della faccia triangolare);
- si definiscono poi i tre semipiani individuati da ciascuna delle tre rette e dal vertice del triangolo che non giace sulla retta medesima;
- se il generico punto Q di coordinate (X_q, Y_q) giace su *tutti e tre i semipiani* definiti per ciascuna faccia, allora la faccia triangolare considerata è la porzione di modello del terreno cercata, altrimenti si deve considerare un'altra faccia triangolare e ripetere il procedimento di ricerca descritto.

Passo 2 Note le coordinate in $\mathbb{R}^3$ dei vertici della porzione di modello determinata in base al passo precedente e note le coordinate del punto

Q sul piano orizzontale (X_Q, Y_Q) si calcola la terza coordinata di Q , cioè la sua quota, definendo il piano su cui giace la faccia triangolare considerata e determinando la sua quota alle coordinate (X_Q, Y_Q) .

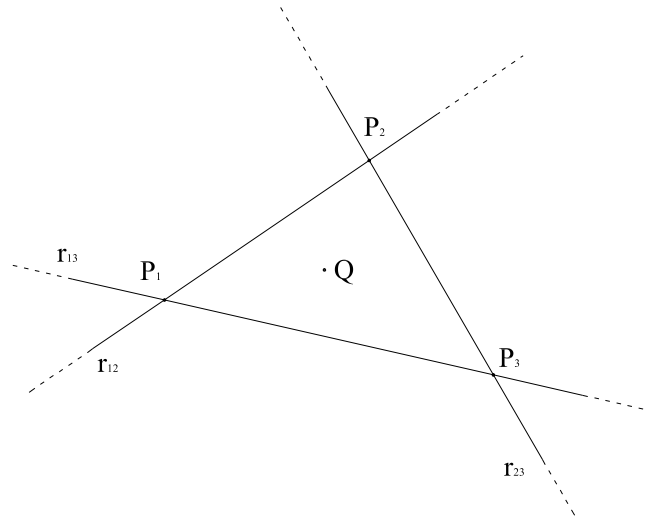


Figura 3.2: Componente elementare del modello del terreno

Nel seguito si illustrano i particolari più importanti di alcune delle operazioni citate.

Definizione delle rette e dei semipiani Riferendosi alla figura 3.2 si consideri la retta r_{12} ; questa è descritta dalla generica equazione $ay + bx + c = 0$ dove:

- se $X_1 \neq X_2$ e $Y_1 \neq Y_2$

$$a = 1 \quad b = \frac{Y_2 - Y_1}{X_1 - X_2} \quad c = -Y_1 - bX_1$$

- se $X_1 = X_2$ e $Y_1 \neq Y_2$

$$a = 0 \quad b = 1 \quad c = -X_1$$

- se $X_1 \neq X_2$ e $Y_1 = Y_2$

$$a = 1 \quad b = 0 \quad c = -Y_1$$

I due semipiani orizzontali delimitati dalla r_{12} sono caratterizzati dal segno della espressione con variabili x, y

$$ay + bx + c$$

In particolare il semipiano su cui giace la proiezione di P_3 è caratterizzato dal segno della:

$$aY_3 + bX_3 + c \triangleq test_{P_3}$$

quello su cui giace Q dal segno dell'espressione:

$$aY_3 + bX_3 + c \triangleq test_Q^{12}$$

Quindi la condizione che deve essere verificata affinché P_3 e Q giacciano sullo stesso semipiano, tra i due individuati da r_{12} , è:

$$(test_{P_3})(test_Q^{12}) > 0$$

In particolare se $(test_{P_3})(test_Q^{12}) = 0$ il punto Q giace su r_{12} infatti $test_{P_3}$ è sempre $\neq 0$, (P_1, P_2, P_3) sono i vertici di un triangolo, r_{12} passa per P_1 e P_2) e $test_Q^{12} = 0$ è la condizione di appartenenza di Q alla r_{12} .

Si ripete la stessa procedura considerando le rette r_{23} e r_{13} definendo quindi $test_{P_1}$, $test_{P_2}$, $test_Q^{23}$ e $test_Q^{13}$; la condizione che deve essere soddisfatta dalla porzione di modello cercata è dunque

$$[(test_{P_3})(test_Q^{12})(test_{P_1})(test_Q^{23})(test_{P_2})(test_Q^{13})] \geq 0 \quad (3.1)$$

in particolare, se la (3.1) è verificata con l'uguaglianza, allora il punto Q si trova sul bordo della porzione di modello considerata.

Calcolo della quota di Q Per calcolare Z_Q , una volta note le coordinate dei vertici della faccia triangolare che “copre” il punto di coordinate X_Q, Y_Q , si ricava l’equazione che descrive il piano che interpola i tre vertici e si sostituiscono X_Q, Y_Q alle incognite x, y . Le equazioni parametriche del piano passante per i 3 punti P_1, P_2, P_3 di coordinate $(X_1, Y_1, Z_1), (X_2, Y_2, Z_2), (X_3, Y_3, Z_3)$ sono:

$$\begin{cases} x = X_1 + t(X_2 - X_1) + s(X_3 - X_1) \\ y = Y_1 + t(Y_2 - Y_1) + s(Y_3 - Y_1) \\ z = Z_1 + t(Z_2 - Z_1) + s(Z_3 - Z_1) \end{cases}$$

sostituendo X_Q a x e Y_Q a y si ottiene:

$$\begin{cases} X_Q = X_1 + t(X_2 - X_1) + s(X_3 - X_1) \\ Y_Q = Y_1 + t(Y_2 - Y_1) + s(Y_3 - Y_1) \\ Z_Q = Z_1 + t(Z_2 - Z_1) + s(Z_3 - Z_1) \end{cases} \quad (3.2)$$

Le (3.2) rappresentano un sistema lineare di tre equazioni nelle tre incognite t, s e Z_Q ; risolvendolo si ottiene la Z_Q cercata.

3.3.3 La consultazione dell’archivio cartografico per il popolamento dell’archivio delle linee

Come si è visto nel paragrafo 2.3, tra le funzionalità generiche dell’archivio delle linee c’è quella di *localizzare le sorgenti*. Le informazioni necessarie a localizzare le strutture della linea sono le coordinate (in fattispecie quelle Gauss-Boaga) di alcuni elementi, per esempio, nel caso delle linee aeree, vengono memorizzate le coordinate della base dei sostegni dell’elettrodotto. Se il costruttore della linea fornisce le coordinate per la base di ogni sostegno, quota s.l.m. compresa, si può procedere direttamente a popolare l’archivio. Nel caso del particolare studio svolto la localizzazione dei sostegni è stata

sempre fornita indirettamente attraverso il contenuto di un file DWG, sotto forma di tracciato **georeferenziato** con indicazione della posizione in pianta dei sostegni.

La quota dei sostegni era generalmente tabulata a parte oppure è stata ricavata, dal modello digitale del terreno, a partire dalle coordinate sulla planimetria di ciascun sostegno, come esposto nel paragrafo 3.3.2.

Sono dunque state approntate delle procedure automatizzate in grado di leggere il contenuto del file georeferenziato del tracciato e ricavare da esso le coordinate dei sostegni.

Nel caso di linee interrrete invece non esistono dei punti di riferimento come i sostegni delle linee aeree; è perciò indispensabile definirne di appropriati a partire dai dati di cui si dispone.

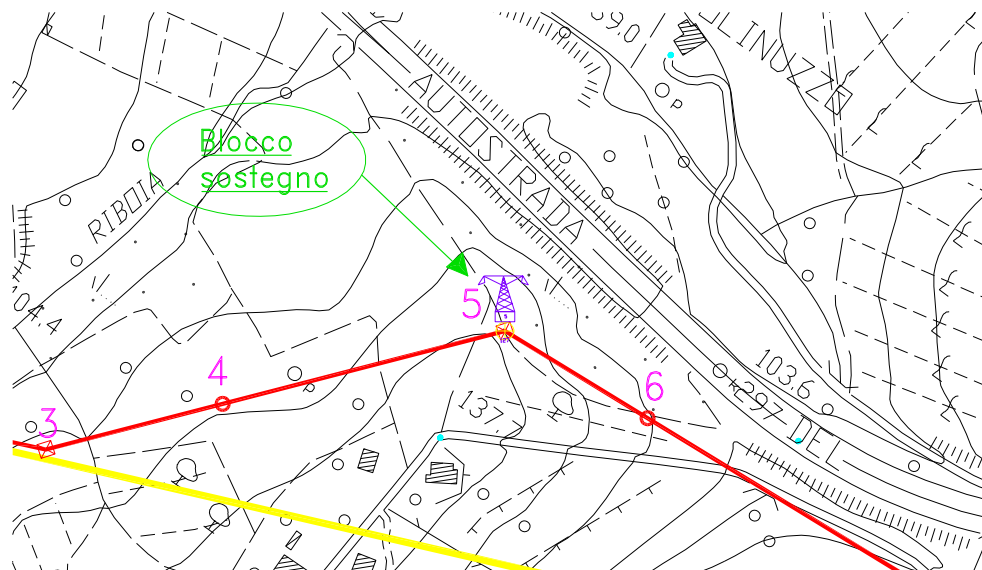


Figura 3.3: Esempio di planimetria con tracciato e “blocco sostegno”

Estrazione delle coordinate dei sostegni di linee aeree

Questa operazione è necessaria nel caso i dati riguardanti la localizzazione degli elettrodotti da sottoporre a valutazione siano forniti sotto forma di elementi grafici della cartografia digitale georeferenziata.

In particolare, sul tracciato georeferenziato con indicazione della posizione di ciascun sostegno, si collocano, utilizzando Autocad, degli elementi appositamente creati, detti “*blocchi sostegno*”. Questi nuovi elementi oltre ad indicare la posizione di ciascun sostegno hanno ad essi associati come attributi un numero che li identifica univocamente e, se necessario, un campo numerico che indica la quota della base del sostegno. Le coordinate planimetriche di inserimento di questi ultimi coincidono con quelle previste per i sostegni reali se il tracciato fornito è effettivamente georeferenziato.

Per estrarre le sole coordinate EN senza ottenere la quota è stata creata una funzione che restituisce le coordinate di inserimento di tutti i blocchi sostegno posizionati nel file. Nel caso si vogliano conoscere anche le quote del piede dei sostegni, una volta ricavate le coordinate EN di ciascun blocco, si procede come descritto nel paragrafo 3.2.1 di questo capitolo.

In entrambi i casi i risultati sono salvati su un file di testo di uscita opportunamente strutturato in cui, per ciascun sostegno, vengono riportate le coordinate richieste oltre all’identificativo che permette di distinguerli l’uno dall’altro. Con i dati ottenuti si procede quindi al popolamento dell’archivio delle linee.

Estrazione del profilo di linee interrate

La posa dei cavi per un tratto di linea interrato avviene in genere mediante lo scavo di trincee di profondità costante; strutturalmente non esiste alcun punto di riferimento come i sostegni per i tratti aerei e quindi si pone il

problema di trovarne di opportuni ai fini della localizzazione delle linee e della loro modellazione. I tratti interrati di linea vengono modellati come fasci di segmenti paralleli, dunque l'aspetto assunto dal tratto di linea è quello di una spezzata in $\mathbb{R}^3$. In effetti il tratto di linea ha un andamento curvilineo sia sul piano verticale (segue il profilo del terreno) sia su quello orizzontale (il diametro dei cavi di 10 cm non permette cambi di direzione secchi). È dunque necessario scegliere i punti da utilizzare come estremi per la spezzata in modo che questa approssimi il meglio possibile la curva definita dal tratto di linea da modellare.

La scelta di detti punti si articola nei seguenti passi:

- si prepara con Autocad un file in cui siano presenti solamente il modello del terreno e i tracciati in pianta delle linee;
- si utilizza una opportuna applicazione che campiona i tracciati con un certo passo e, per ogni punto di campionamento, ricava la quota (paragrafo 3.2.1), riportando le coordinate di ciascun punto su un file di testo opportunamente formattato;
- si visualizzano i punti sia sul piano orizzontale che sul profilo del tratto di interrato, grazie ad un opportuna applicazione che attinge al file di testo creato al passo precedente. Questa applicazione permette in primo luogo di selezionare manualmente (col puntatore del mouse) due insiemi di punti: quelli che corrispondono a cambi di direzione del tracciato sulla planimetria (primo gruppo) e quelli sul profilo (secondo gruppo); inoltre unisce ed ordina i punti dei due gruppi in modo che essi si succedano secondo lo sviluppo della linea.

L'insieme di punti così ottenuto è quello dei vertici della spezzata che rappresenta il tratto di linea interrato;

- si popola l'archivio inserendo le coordinate dei punti così ottenuti (detti nel seguito “sostegni virtuali” delle linee interrate).

3.3.4 Il sezionamento del terreno

Per determinare l'andamento delle linee isocampo è necessario calcolare i campi in un gran numero di punti di cui devono essere note sia le coordinate planimetriche sia la quota sul livello del mare.

Le coordinate di questi punti non sono determinabili a priori ma dipendono da molti parametri tra i quali quelli, impostabili dall'utente, caratteristici di ciascuna sessione di calcolo, come il valore di campo caratteristico della linea isocampo da tracciare o la corrente di linea.

Durante la sessione di calcolo si avrà dunque la necessità di consultare continuamente il modello del terreno, o dei dati estratti da esso, per ricavare le quote dei punti le cui coordinate sono necessarie allo svolgimento della procedura.

Per *sezionamento del terreno* si intende l'estrazione dal modello digitale del terreno dei dati necessari allo svolgimento dei calcoli; tali dati vengono quindi memorizzati, secondo uno speciale formato, su un file di testo detto *file delle sezioni*.

Si è infatti deciso di estrarre una volta per tutte i dati riguardanti l'andamento del terreno dal modello e salvarli in un file di appoggio piuttosto che consultare direttamente il modello durante i calcoli; ciò per i seguenti motivi:

- rendere il programma di calcolo indipendente dal tipo di modello disponibile;
- non gravare il nucleo di calcolo con le operazioni di ricerca all'interno del modello, descritte nei paragrafi precedenti.

Le informazioni contenute nel file di appoggio serviranno, durante la sessione di calcolo dei campi, per creare le strutture sezione descritte nel paragrafo 4.2.2.

L'andamento del terreno circostante ciascuna linea è ricavato *per sezioni*: procedendo lungo l'asse della linea a passi di lunghezza fissata (passo longitudinale), si prendono in considerazione dei piani verticali trasversali alla linea di cui si ricava l'intersezione con la superficie del terreno. Su ciascuno di questi piani è definita una *sezione del terreno*. Ciascuna sezione del terreno ha come punto di riferimento l'intersezione fra il piano verticale e la proiezione sul terreno dell'asse della linea lungo cui si sta procedendo; questo punto è detto *caposaldo della sezione*.

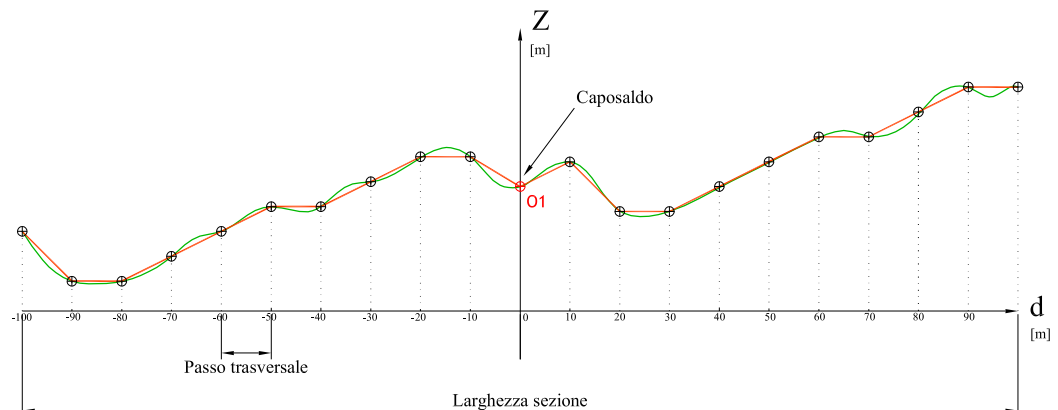


Figura 3.4: Rappresentazione del terreno sul piano di sezionamento

A partire dal caposaldo, procedendo in direzione trasversale alla linea a passi di lunghezza fissata (passo trasversale), si determinano le quote di un numero fissato di punti al suolo, sia da una parte che dall'altra dell'asse della linea; questi, insieme al caposaldo ed al versore che individua il piano

verticale su cui si è operato, sono gli elementi costitutivi di ciascuna sezione del terreno.

Il numero di punti al suolo appartenenti a ciascuno “sbraccio laterale” insieme al passo trasversale che separa due punti contigui, fissano la *larghezza della sezione*, che è dunque data dall’espressione:

$$L_{sezione} = 2 \cdot (n_{punti \text{ sbraccio}}) \cdot (passo_{trasversale}) \quad [m]$$

A parità di larghezza della sezione, aumentando il numero dei punti e diminuendo il passo trasversale, si otterrà una rappresentazione del terreno sul piano verticale sempre più accurata.

Per lo svolgimento della VIA si è ritenuto opportuno fissare una volta per tutte sia la larghezza della sezione sia il numero di punti appartenente a ciascuno dei due bracci laterali e, di conseguenza, anche il passo trasversale.

Per fissare la larghezza della sezione ci si è basati sul valore minimo di induzione magnetica per cui si vuole tracciare le relative linee isocampo; come verrà motivato in seguito tale valore è pari a 0,2 microtesla. Considerata una tipica linea a 380 kV ed i relativi valori nominali di corrente (che sono i più elevati tra quelli utilizzati per i calcoli) si è individuata in 200 metri la distanza dall’asse della linea entro cui tale valore verrà sicuramente raggiunto. Fissando dunque a 200 metri la larghezza di ciascuno sbraccio, si assume per le sezioni una larghezza complessiva di 400 metri.

Per determinare il numero di punti al suolo con cui rappresentare il terreno su ciascun piano verticale si è cercato un compromesso ottimale tra esigenza di rappresentazione dettagliata e onerosità computazionale delle fasi di sezionamento del terreno e di calcolo dei campi. Su queste basi si è fissato per il passo trasversale il valore di 10 metri; ciascuna sezione è dunque composta dalle coordinate del caposaldo e dalle quote di 40 punti, 20 per

ciascuno sbraccio, distanziati di 10 metri l'uno dall'altro, dei quali dunque i due più lontani distano 200 metri dal rispettivo caposaldo.

In base ad analoghe considerazioni si è fissato a 20 metri il passo longitudinale, cioè la distanza fra i capisaldi di due sezioni contigue, misurata lungo l'asse della campata proiettata sul piano orizzontale.

Se la linea è rettilinea i piani verticali con cui si seziona il modello del terreno sono tutti paralleli e su ciascuno di essi è rappresentata una porzione di terreno diversa da quelle rappresentate sugli altri piani.

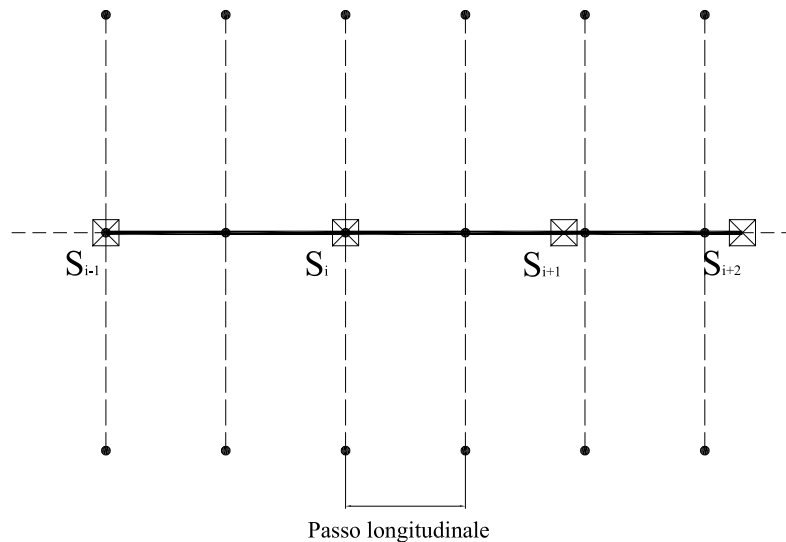


Figura 3.5: Sezionamento del terreno lungo una linea rettilinea

Nella vista planimetrica di figura 3.5 si nota infatti che, in caso di linea rettilinea, i piani di sezionamento, trasversali alla linea (rappresentati dalle linee tratteggiate), non si intersecano mai.

Se, come sempre avviene, il tracciato della linea elettrica presenta dei cambi di direzione, qualora si determinassero i piani di sezionamento come

nel caso di linea rettilinea, la situazione sarebbe quella rappresentata in figura 3.6; in particolare è possibile che i piani si intersechino in corrispondenza dei cambi di direzione.

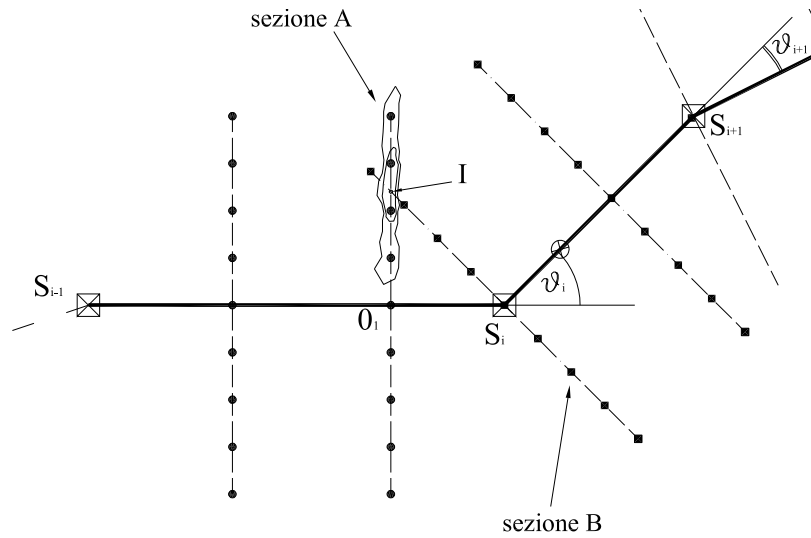


Figura 3.6: Sovrapposizione delle sezioni.

L'intersezione dei piani di sezionamento può far nascere delle complicazioni durante le fasi di calcolo dei campi e di tracciamento delle linee isocampo, come si è cercato di visualizzare in figura 3.6.

La zona ove avviene l'intersezione fra i piani verticali è interessata da due diverse sezioni indicate con le lettere A e B in figura, dove per ogni sezione sono evidenziati i punti di campionamento delle quote. Supponendo per esempio che lungo la sezione A sia presente una depressione (di cui si sono tracciate delle ipotetiche isocline) si vede subito solo una delle due sezioni (la sezione A) terrebbe traccia della depressione stessa.

Ciò che può creare problemi non è il fatto di aver trascurato un particolare del terreno; questo prezzo è infatti implicitamente accettato con la scelta

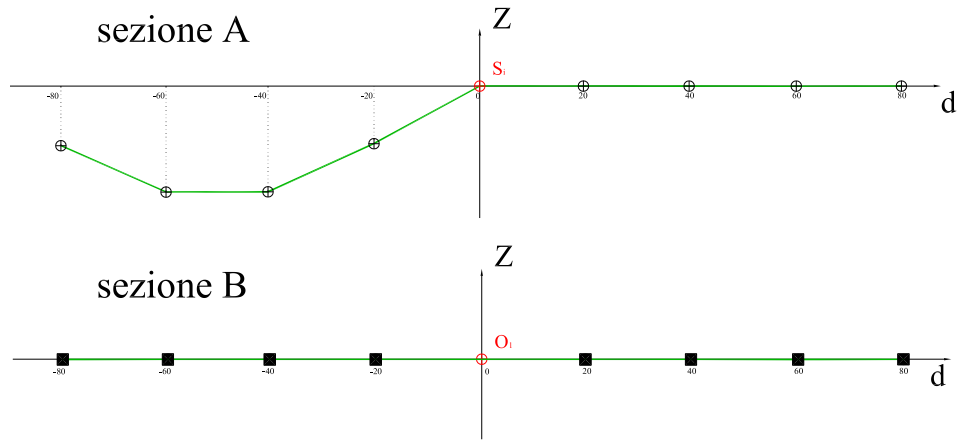


Figura 3.7: Sezioni sovrapposte

della distanza (passo trasversale) tra i punti di ciascuna sezione. Piuttosto, il fatto di disporre di *due rappresentazioni della stessa zona non in accordo*, può originare incongruenze anche nel calcolo dei campi.

Ad esempio, nel caso in cui voglia calcolare i campi nel punto I (figura 3.6) in cui si intersecano i segmenti che rappresentano le sezioni, posso ricavare la sua quota sia in base al contenuto della sezione A che a quello della sezione B; se le quote ricavate differiscono significativamente (figura 3.7), è possibile che anche fra i campi calcolati per le due quote sussistano differenze significative.

L'intersezione fra i piani di sezioni diverse complica anche la fase di tracciamento delle linee isocampo. Come si capirà meglio dopo aver affrontato gli aspetti legati al calcolo dei campi esposti nel prossimo capitolo, le linee isocampo vengono ricavate *per punti*. Le procedure di tracciamento dovranno disporre dell'insieme *ordinato* delle coordinate di questi punti, in modo che la linea tracciata li unisca secondo l'ordine corretto. Supponendo di avere un punto di passaggio della linea di isocampo per ogni sbraccio della sezione

(situazione che si verifica nella grande maggioranza dei casi), se le sezioni non si intersecano, l'ordine con cui i punti si devono unire è quello con cui le relative sezioni si succedono procedendo lungo la linea.

Nel caso in cui le sezioni si sovrappongono non è più detto che l'ordinamento delle sezioni lungo la linea dia buoni risultati per il tracciamento delle linee isocampo.

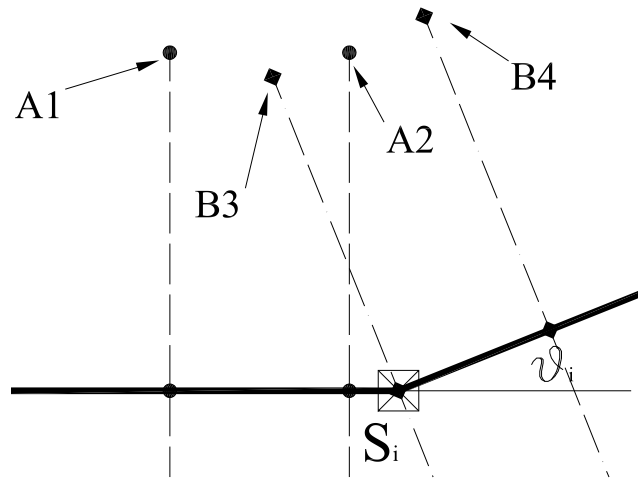


Figura 3.8: Influenza della sovrapposizione di sezioni sul tracciamento di linee isocampo

Si considerino ad esempio gli estremi A1, A2, B3, B4 delle sezioni in figura 3.8; se i punti evidenziati fossero quelli attraverso cui far passare una linea di isocampo, l'ordine con cui dovrebbero essere uniti sarebbe A1-B3-A2-B4 mentre l'ordine di successione delle sezioni cioè A1-A2-B3-B4 non darebbe risultati accettabili.

In base a queste considerazioni, si è adottato per sezionare il terreno un algoritmo che tende ad evitare la sovrapposizione delle sezioni.

Vediamo come viene sezionato il terreno lungo un generico tratto di linea

compreso tra 3 sostegni S_0 , S_1 , S_2 le cui campate cambino di direzione l'una rispetto alla precedente (figura 3.9).

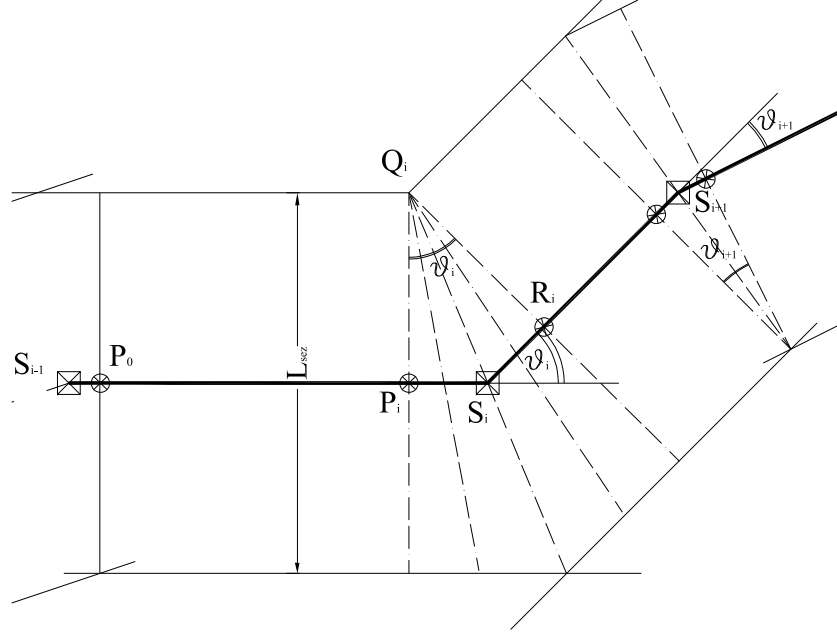


Figura 3.9: Nuovo algoritmo di sezionamento

I dati di cui si dispone sono le coordinate dei sostegni S_i e la larghezza della sezione L_{sez} . Si ricavano i vettori longitudinali e trasversali relativi alle due campate:

$$\hat{i}_{l1} = \frac{S_1 - S_0}{|S_1 - S_0|} \quad \hat{i}_{t1} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \hat{i}_{l1}$$

$$\hat{i}_{l2} = \frac{S_2 - S_1}{|S_2 - S_1|} \quad \hat{i}_{t2} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \hat{i}_{l2}$$

Si ricava quindi l'angolo θ_1 :

$$\theta_1 = \arcsen[(\hat{i}_{l1} \times \hat{i}_{l2}) \cdot \hat{i}_z]$$

dove θ è positivo per cambi di direzione in senso antiorario e dove l'espressione per θ_1 è valida purché le deviazioni siano inferiori a $\frac{\pi}{2}$.

Noto θ_1 , si ricava la posizione lungo l'asse della linea dei punti P e R:

$$\begin{cases} P = S_1 - \hat{i}_{l1} [L_{sez} \tan(\frac{|\theta_1|}{2})] \\ R = S_1 + \hat{i}_{l2} [L_{sez} \tan(\frac{|\theta_1|}{2})] \end{cases}$$

Per ottenere le coordinate del punto Q si deve distinguere i casi $\theta_1 > 0$ e $\theta_1 < 0$

$$\begin{cases} se \theta_1 > 0 & Q = P - \hat{i}_{t1} L_{sez} = R - \hat{i}_{t2} L_{sez} \\ se \theta_1 < 0 & Q = P + \hat{i}_{t1} L_{sez} = R + \hat{i}_{t2} L_{sez} \end{cases}$$

Una volta ricavate le coordinate dei punti P_0 , Q , R , P (in questo caso P_0 coincide con S_0), si procede col sezionamento del terreno; ciascun piano di sezionamento è individuato da un punto (il caposaldo della sezione che voglio ricavare) e da due versori, il versore trasversale e $\hat{i}_z$.

La determinazione del piano di sezionamento dipende dalla posizione lungo l'asse della linea del relativo caposaldo con le modalità descritte in seguito:

- **da P_0 a P** i piani sono tutti paralleli tra loro, i capisaldi sono distanziati regolarmente e giacciono lungo $(P - P_0)$; il versore trasversale che individua il piano insieme a $\hat{i}_z$ è $\hat{i}_{t1}$.
- **da P a S_1** i piani non sono tutti paralleli tra loro, i capisaldi O giacciono comunque lungo $(S_1 - P)$, il versore trasversale che individua il piano insieme a $\hat{i}_z$ è $\hat{i}_t = \frac{O-P}{|O-P|}$ se $\theta > 0$ oppure $\hat{i}_t = \frac{P-O}{|P-O|}$ se $\theta < 0$.
- **da S_1 a R** i piani non sono tutti paralleli tra loro, i capisaldi O giacciono comunque lungo $(R - S_1)$, il versore trasversale che individua il piano insieme a $\hat{i}_z$ è $\hat{i}_t = \frac{O-S_1}{|O-S_1|}$ se $\theta > 0$ oppure $\hat{i}_t = \frac{S_1-O}{|S_1-O|}$ se $\theta < 0$.

Per le campate successive si procede analogamente ponendo $P_0 = R$.

È opportuno precisare che l'algoritmo descritto non esclude totalmente la possibilità di sovrapposizioni delle sezioni: anche nel caso in cui $|\theta| < \pi/2$, fissata la larghezza della sezione, può accadere che, per campate corte, appartenenti a tratti di linea con forti cambi di direzione, si verifichi la situazione in figura 3.10 in cui la zona tratteggiata è quella in cui potenzialmente possono verificarsi le sovrapposizioni.

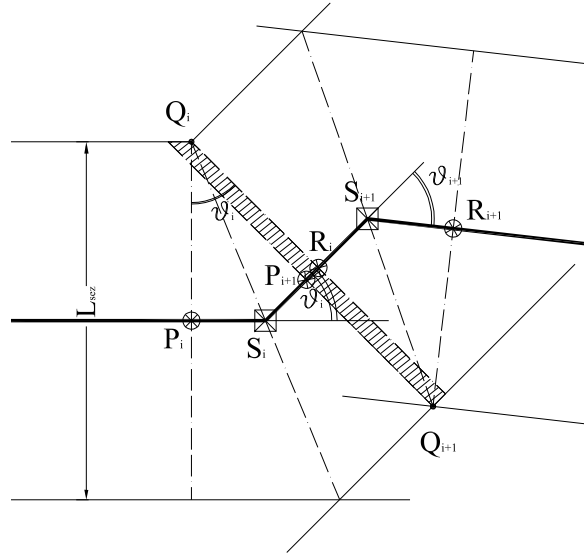


Figura 3.10: Sovrapposizione di sezioni col nuovo algoritmo di sezionamento

La condizione affinché ciò non accada è sintetizzata nella seguente espressione:

$$L_{campata} = |(S_{i+1} - S_i)| > |(R_i - S_i)| + |(S_{i+1} - P_{i+1})| =$$

$$= \frac{L_{sezione}}{2} \left[\tan\left(\frac{|\theta_i|}{2}\right) + \tan\left(\frac{|\theta_{i+1}|}{2}\right) \right]$$

Il file delle sezioni

Le informazioni relative ad ogni sezione sono riportate nel file delle sezioni nell'ordine in cui esse si susseguono lungo la linea; a sua volta tale file contiene le informazioni relative alle sezioni ricavate lungo *tutte le linee che si vogliono utilizzare nella stessa sessione di calcolo*. Di seguito si riporta una parte di file delle sezioni di cui è evidente la strutturazione *a righe*.

```
L 1001 30
T 4001 1678978 4842788 67 -0.99 9.95 15
D 67 67 67 67 67 67 67 67 67 67 66 66 64 63 62
S 67 67 66 66 66 66 65 64 65 66 67 67 67 68 69
P 1678958 4842786 67 -0.99 9.95 15
D 67 67 67 67 67 67 67 66 66 63 63 62 65 68 68
S 67 66 66 64 64 64 64 64 65 67 68 68 68 67 67
P 1678938 4842784 63 -0.99 9.95 15
D 63 63 64 65 65 64 64 63 63 62 69 70 70 70 72
S 63 63 66 66 67 67 68 68 68 68 68 68 68 68 68
P 1678918 4842782 67 -0.99 9.95 15
D 67 66 64 64 66 70 72 74 75 75 78 79 79 79 79
S 67 67 67 68 68 68 68 68 68 68 68 68 68 68 68
P 1678898 4842780 71 -0.99 9.95 15
D 73 74 75 76 78 78 79 79 79 80 80 80 80 81 82
S 69 69 68 68 68 68 68 68 68 68 69 69 69 69 69
```

In particolare:

- ogni **riga L** segna l'inizio della parte del file in cui sono contenute le informazioni relative alle sezioni del terreno estratte *lungo una particolare linea* il cui identificativo è il numero che segue il codice di inizio riga L.
- ogni riga **riga T** indica che le informazioni che seguono sono relative ad una sezione del terreno che *ha per caposaldo la base di un sostegno della linea*;

ogni riga **riga P** invece indica che le informazioni che seguono sono relative ad una sezione del terreno che ha per caposaldo un punto appartenente alla proiezione dell'asse longitudinale della linea sul terreno *che non è la base di un sostegno della linea.*

In ciascuna di queste righe sono contenute informazioni quali: le coordinate del caposaldo della sezione, le componenti del versore che individua il piano verticale su cui la sezione giace ed il numero di punti che giacciono sul piano della sezione di cui si conosce la quota.

- le righe **D** e **S** contengono le quote relativi ai due “*sbracci laterali*” che costituiscono ciascuna sezione.

Capitolo 4

Il calcolo dei campi

Nei due capitoli precedenti sono stati definiti e descritti gli archivi delle linee e della cartografia, specificando le relazioni che li legano.

Si è visto che la localizzazione delle sorgenti è spesso ricavata dalla cartografia georeferenziata e ciò fa sì che i due archivi siano distinti ma non indipendenti, dovendo esistere una corrispondenza fra la rappresentazione sulla cartografia delle linee elettriche e le variabili di localizzazione della relativa struttura informatica presente nell'archivio delle linee.

In questo capitolo presenteremo le procedure alla base della valutazione teorica dei campi generati dalle linee elettriche, evidenziandone le modalità di integrazione con gli archivi stessi.

Per presentare questa, che è la parte centrale dello studio svolto, è opportuno separare la descrizione degli algoritmi di calcolo, in cui si fa diretto riferimento alle leggi fisiche su cui i calcoli si basano, da quella delle procedure che li implementano all'interno del codice di calcolo, che sono maggiormente svincolate dagli aspetti fisici e dipendono in gran parte dalle tecniche particolari utilizzate per la realizzazione della applicazione.

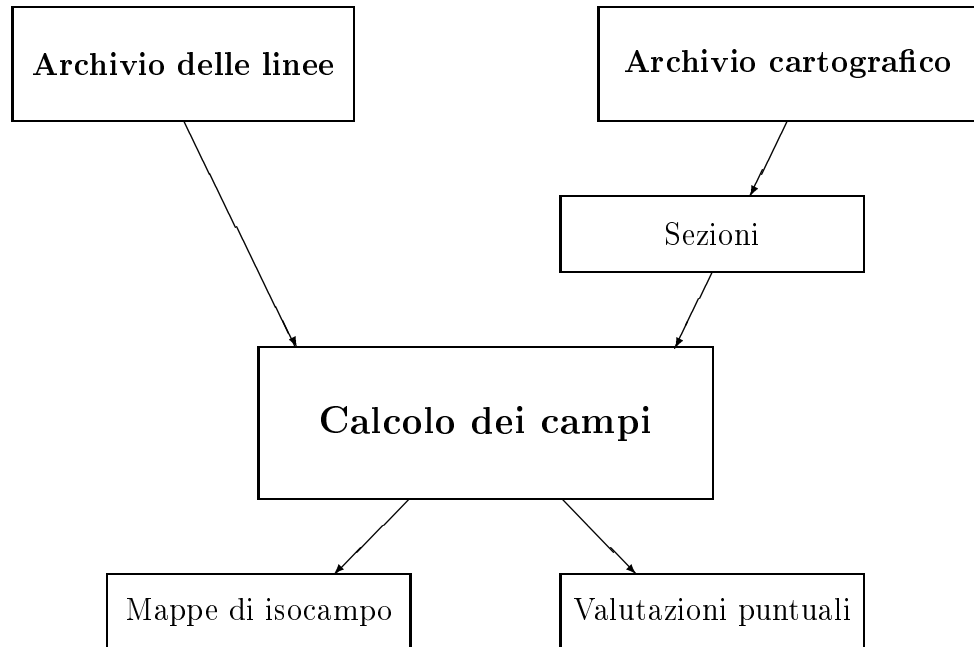


Figura 4.1: Il calcolo dei campi

4.1 Algoritmi di calcolo

La frequenza della corrente e della tensione sui conduttori delle linee elettriche è pari a 50 hertz. A questa frequenza i fenomeni ondulatori sono trascurabili, i campi generati sono disaccoppiati e rimangono legati alle rispettive sorgenti: le correnti per il campo magnetico e le cariche per il campo elettrico; spesso questa situazione viene definita con il termine “*quasi statica*”, che indica campi lentamente variabili nel tempo.

Piuttosto che fare riferimento alle equazioni di Maxwell ed ai termini che si devono trascurare in esse (giustificazione del disaccoppiamento dei campi dal punto di vista teorico-formale), si assume valida l'ipotesi di regime quasi statico quando la lunghezza d'onda dei campi sia molto maggiore delle

dimensioni della regione di spazio in cui è possibile confinare il problema da analizzare. A 50 hertz, nel vuoto, la lunghezza d'onda è $\lambda_0 \simeq \frac{300 \cdot 10^6}{50} = 6 \cdot 10^6 \text{ m} = 6000 \text{ km}$ e dunque si può assumere valida l'ipotesi di regime quasi statico.

In virtù di queste considerazioni si possono considerare separatamente il campo elettrico ed il campo magnetico e dunque sviluppare i relativi algoritmi in modo indipendente.

In questo paragrafo verranno esposti gli algoritmi utilizzati per i calcoli assumendo valida l'ipotesi di regime quasi statico e di conseguenza considerando il terreno come un buon conduttore dal punto di vista elettrico e come un mezzo "trasparente" dal punto di vista magnetico. A primo acchito queste ultime due approssimazioni potrebbero sembrare in disaccordo tra loro, in quanto se si considera il terreno come un buon conduttore non si può escludere a priori che il campo magnetico sia in grado di indurvi delle correnti e che queste modifichino la distribuzione dell'induzione al suolo.

Per il momento si giustifica l'adozione degli algoritmi presentati affermando che il fenomeno dell'induzione di corrente da un contributo all'induzione al suolo trascurabile rispetto alle incertezze intrinseche al modello utilizzato, come ad esempio quelle legate alla localizzazione delle sorgenti o alla determinazione dell'andamento del terreno.

Per approfondire questo ed altri aspetti si rimanda alla prima appendice di questa tesi, in cui è delineato un quadro teorico completo della situazione.

4.1.1 Algoritmo di calcolo per il vettore induzione magnetica

Il punto di partenza è costituito dalla legge di Biot-Savart in forma differenziale:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\vec{P} \times \vec{r}}{r^3} \quad (4.1)$$

che fornisce il campo magnetico generato nel punto Q da un elemento di corrente di lunghezza $d\vec{P}$ intensità I , posto nel punto P con $\vec{r} = (Q - P)$. Per l'applicazione della equazione (4.1) si individuano i seguenti possibili approcci:

1. **L'approccio analitico.** In un ristrettissimo numero di casi, per sorgenti di geometria estremamente semplice, è possibile integrare analiticamente la (4.1) ed ottenere in forma chiusa l'espressione del campo generato. In questo modo è possibile implementare il modello del *conduttore rettilineo indefinito*. Se O è un punto qualunque del conduttore, $\hat{u}$ il vettore unitario parallelo ad esso e diretto nel verso della corrente e Q , come sopra, il punto dove calcolare il campo, si giunge facilmente a ritrovare la legge di Biot-Savart in forma integrale e vettoriale:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{\hat{u} \times (Q - O)}{|\hat{u} \times (Q - O)|^2}$$

2. **L'approccio numerico.** L'integrazione richiesta per l'applicazione della (4.1) alla maggior parte delle sorgenti, anche strutturalmente molto semplici, non può essere eseguita analiticamente ed occorre utilizzare metodi numerici.
3. **Composizione di più sorgenti elementari.** Alcune sorgenti reali potranno essere convenientemente modellate come combinazione di un

certo numero di sorgenti elementari per cui si è utilizzato uno degli approcci precedenti. Il campo magnetico generato è dato evidentemente dalla somma dei campi prodotti dalle singole componenti elementari.

La scelta del tipo di approccio dipende dunque dalla curva utilizzata per descrivere i conduttori percorsi da corrente delle sorgenti modellate, che è quella lungo cui si deve integrare la (4.1).

I conduttori delle linee aeree assumono il tipico andamento a “catenaria”; note le coordinate dei punti di sospensione e il parametro di tesatura si dispone dell’espressione analitica della curva (paragrafo 2.2).

Per i conduttori di linee interrate non è nota a priori un’espressione analitica attraverso cui descriverne le caratteristiche a partire da un numero fissato di parametri. Dalla rappresentazione in pianta del tracciato e dal suo profilo altimetrico, si ricavano le coordinate di una serie ordinata di punti attraverso cui passano i conduttori della linea (ovviamente devono essere note le caratteristiche della linea come la profondità della trincea di posa e la disposizione dei conduttori al suo interno). Se la scelta dei punti è opportuna, la spezzata che li unisce può essere assunta come rappresentazione dei conduttori della linea (paragrafo 3.3.3).

L’integrazione della (4.1) assume forme diverse per i due tipi di conduttore e quindi di curve: nel caso della catenaria, l’elemento $d\vec{P}$, cioè l’elemento infinitesimo della curva, ha una espressione complessa e gli estremi di integrazione sono i punti di sospensione.

Nel caso di conduttori appartenenti a linee interrate, l’integrazione della (4.1) viene suddivisa in tanti tratti quanti sono i segmenti che compongono la spezzata che modella il conduttore; ovviamente in ciascun tratto gli estremi di integrazione sono gli estremi del segmento considerato, mentre $d\vec{P}$ è l’elemento lineare infinitesimo del segmento.

Come vedremo più avanti (paragrafo 4.2.4) anche la catenaria viene automaticamente rappresentata con una spezzata i cui segmenti costitutivi sono un sottoinsieme delle corde della curva.

Tutte le sorgenti di campo magnetico considerate nel programma sono dunque composte da elementi lineari di lunghezza finita; la sorgente elementare di cui tutte le altre si compongono è il *segmento conduttore*, per il quale, come vedremo, l'applicazione della (4.1) richiede l'approccio numerico.

Il campo generato da ogni sorgente sarà dato dalla somma dei campi generati dai segmenti conduttori che la costituiscono.

Il segmento di conduttore

Sia $(P2 - P1)$ il segmento conduttore, $\hat{u}$ il suo versore, I la corrente che lo attraversa (positiva se diretta nel senso di $\hat{u}$), P un punto generico su di esso, Q il punto potenziato e $\vec{r} = (Q - P)$.

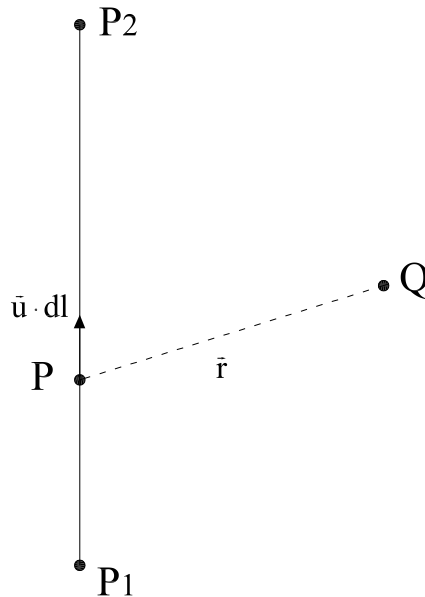


Figura 4.2: Segmento conduttore

Considerato che:

$$d\vec{P} \times \vec{r} = \hat{u} \times (Q - P)dl = \hat{u} \times (Q - P1)dl \quad (4.2)$$

sostituendo la (4.2) nella (4.1) ed integrando fra P1 e P2 si ottiene facilmente

$$\vec{B}_{segmento_conduttore}(Q) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \hat{u} \times (Q - P1) \int_{P1}^{P2} \frac{dl}{r^3} \quad (4.3)$$

L'espressione (4.3), pur essendo relativamente semplice, non può essere integrata analiticamente ma richiede di impiegare tecniche numeriche. Allo scopo possono essere utilizzate procedure di integrazione numerica basate sull'estensione a funzioni vettoriali del noto metodo di Simpson.

4.1.2 Algoritmo di calcolo per il campo elettrico

Come si vedrà nel paragrafo 4.2.2, il modello dell'elettrodotto costruito nell'applicazione di calcolo è tridimensionale e non presenta alcun tipo di simmetria predefinita; i conduttori sono senza eccezioni modellati come delle spezzate in $\mathbb{R}^3$.

Per il calcolo del campo elettrico *si è scelto di adottare per le sorgenti un modello semplificato a simmetria cilindrica*, grazie al quale il problema del calcolo del campo diventa un problema “piano”.

Il modello semplificato

L'algoritmo di calcolo impiegato per il campo elettrico fa uso del seguente modello semplificato:

1. tutti i conduttori costituenti la linea (sia *conduttori attivi*, cioè sotto tensione e/o percorsi da corrente, sia i *conduttori di guardia*, a potenziale di terra e non percorsi da corrente) sono considerati rettilinei, orizzontali, di lunghezza infinita e paralleli tra loro;

2. i conduttori sono considerati di forma cilindrica con diametro costante; nel caso di *conduttori a fascio* si suppone che la distanza tra i singoli subconduttori ad 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 giacciono su una circonferenza ("*circonferenza circoscritta al fascio*"); in base a queste ipotesi si sostituisce al fascio di conduttori un conduttore unico di opportuno diametro equivalente;
3. la distribuzione della carica elettrica sulla superficie dei conduttori è considerata uniforme;
4. il suolo è considerato piano e privo di irregolarità e perfettamente conduttore dal punto di vista elettrico;
5. viene trascurata la presenza dei tralicci o piloni di sostegno, degli edifici e di qualunque altro oggetto si trovi nell'area interessata.

Le condizioni sopra esposte permettono di ridurre il calcolo ad un problema *piano* poiché la situazione è esattamente la stessa su qualunque *sezione normale* della linea, dove con "sezione normale" si intende, qui e nel seguito, quella generata da un piano verticale ortogonale all'asse longitudinale della linea (cioè alla direzione dei conduttori rettilinei che la rappresentano) passante per il punto ove si vogliono calcolare i campi.

Procedimento di calcolo

Il campo elettrico $\vec{E}$ generato da NF conduttori filiformi, rettilinei e indefiniti, numerati da 0 a $(NF - 1)$, è dato da una generalizzazione della legge di

Coulomb:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{k=0}^{NF=1} \int_{C_k} \frac{\varrho}{r^3} \vec{r} dl \quad (4.4)$$

dove C_k è il conduttore generico, ϱ la densità lineare di carica su di esso, dl un suo tratto elementare, $\vec{r}$ la distanza tra questo tratto elementare ed il punto dove si vuole calcolare il campo. Per tenere conto del piano di terra, nella sommatoria deve essere incluso un *conduttore immagine* per ciascun conduttore reale (sia *attivo* che *di guardia*) la cui posizione è speculare (rispetto al piano di terra) e la cui carica è opposta a quella del rispettivo conduttore reale.

Il modello adottato (conduttori cilindrici, rettilinei, orizzontali, indefiniti, paralleli tra di loro) consente di eseguire facilmente l'integrazione che compare nella (4.4) e semplificare i calcoli. Indicato al solito con Q il punto dove si vuole calcolare il campo, definiamo con *sezione normale* il piano verticale passante per Q e ortogonale ai conduttori; indichiamo quindi con P_k il punto dove il generico conduttore C_k interseca la *sezione normale*; infine, per comodità, introduciamo il parametro u_k definito da

$$u_k = \frac{\varrho}{2\pi\epsilon_0} \quad (4.5)$$

per il campo elettrico in Q si ottiene dunque l'espressione

$$\vec{E} = \sum_{k=0}^{NF-1} \frac{u_k}{|Q - P_k|^2} (Q - P_k) \quad (4.6)$$

Come si è detto, la sommatoria che compare in queste equazioni *si estende tanto ai conduttori reali quanto alle loro immagini* rispetto al piano di terra (suolo); se $NR = \frac{NF}{2}$ è il numero dei conduttori reali (e quindi anche il numero dei conduttori immagine), se inoltre numeriamo da 0 a $(NR - 1)$ i conduttori reali e da NR a $NF - 1$ le immagini, e se infine supponiamo che

C_{k+NR} sia l'immagine del conduttore C_k avremo

$$u_k = -u_{k-NR} \quad k = NR, (NR+1), \dots, (NF-1) \quad (4.7)$$

e quindi la (4.6) diventa

$$\vec{E} = \sum_{k=0}^{NR-1} \frac{u_k}{|Q - P_k|^2} (Q - P_k) - \sum_{k=NR}^{NF-1} \frac{u_{k-NR}}{|Q - P_k|^2} (Q - P_k) \quad (4.8)$$

La (4.8) è l'espressione usata nel calcolo del campo elettrico, una volta che siano stati determinati i parametri u_k per k da 0 a $(NR-1)$, ovvero le densità lineari di carica sui conduttori reali.

Per calcolare questi parametri si procede come segue. Preso sulla sezione normale un sistema di riferimento con asse X coincidente con la linea del suolo ed asse Y ad esso perpendicolare, il potenziale $\phi_k(d)$ generato dal conduttore C_k ad una distanza d dal suo asse è dato da

$$\phi_k = -\frac{q_k}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{d}{|y_k|} \quad (4.9)$$

dove $|y_k|$ è la distanza dal suolo del conduttore stesso; il potenziale V_l sulla superficie del conduttore C_l è dato dalla somma dei contributi di tutti gli NF conduttori presenti, cioè

$$V_l = - \sum_{k=0}^{NF-1} u_k \ln \frac{d_{kl}}{|y_k|} \quad (4.10)$$

dove d_{kl} è la distanza tra il centro del conduttore C_k e la superficie del conduttore C_l (quindi d_{kk} è il raggio del conduttore C_k); se separiamo le sommatorie sui conduttori reali e sulle immagini otteniamo

$$V_l = - \sum_{k=0}^{NR-1} u_k \ln \frac{d_{kl}}{|y_k|} - \sum_{k=NR}^{NF-1} u_k \ln \frac{d_{kl}}{|y_k|} \quad (4.11)$$

nella seconda sommatoria si effettua la sostituzione $k \rightarrow k + NR$

$$V_l = - \sum_{k=0}^{NR-1} u_k \ln \frac{d_{kl}}{|y_k|} - \sum_{k=0}^{NF-1-NR} u_{k+NR} \ln \frac{d_{(k+NR)l}}{|y_{(k+NR)}|} \quad (4.12)$$

osservato che

$$u_{k+NR} = -u_k \quad (4.13)$$

$$y_{k+NR} = -y_k$$

possiamo adesso unire le due sommatorie ottenendo:

$$V_l = \sum_{k=0}^{NR-1} \left(u_k \ln \frac{d_{kl}}{|y_k|} + u_{(k+NR)} \ln \frac{d_{(k+NR)l}}{|y_{(k+NR)}|} \right) \quad (4.14)$$

ovvero

$$V_l = \sum_{k=0}^{NR-1} \left(u_k \ln \frac{d_{(k+NR)l}}{d_{kl}} \right) \quad (4.15)$$

La relazione (4.15) può essere riguardata come espressione di un sistema lineare non omogeneo di NR equazioni nelle NR incognite u_k , essendo noti i potenziali V_i sui conduttori; se introduciamo la matrice

$$M_{kl} = \ln \frac{d_{(k+NR)l}}{d_{kl}} \quad (4.16)$$

e la matrice inversa

$$N_{lk} = M_{kl}^{-1} \quad (4.17)$$

allora la soluzione del sistema (4.15) si può esprimere con:

$$u_k = \sum_{l=0}^{NR-1} N_{lk} V_l \quad (4.18)$$

L'espressione per il campo $\vec{E}$ è dunque la (4.8) dove i termini u_k sono quelli forniti dalla (4.18).

4.2 Il programma di calcolo dei campi

È il momento di descrivere il programma che implementa gli algoritmi di calcolo presentati nel paragrafo precedente e le strutture informatiche tramite cui si modellano le sorgenti dei campi ed il terreno.

In questo paragrafo verranno inoltre trattati aspetti fondamentali per lo svolgimento della sessione di calcolo, quali l'algoritmo di ricerca delle linee isocampo e il criterio con cui si includono le sorgenti nel computo dei campi a partire dalla loro posizione e dalle coordinate del punto Q in cui si vogliono calcolare i campi stessi.

4.2.1 Il linguaggio e l'ambiente di programmazione

Volendo riassumere i requisiti richiesti alla applicazione per il calcolo dei campi si individuano esigenze di:

- **Efficienza**
- **Predisposizione alla gestione di comunicazioni fra processi diversi**
- **Facilità di sviluppo e manutenibilità del codice**
- **Trasportabilità del codice**

Per *efficienza* si intende la possibilità di ottimizzare il flusso dell'applicazione intervenendo a "basso livello" sia nella gestione della memoria sia nella realizzazione della logica di controllo.

La *predisposizione alla gestione di comunicazioni fra processi diversi* è necessaria per quanto detto nei capitoli precedenti ed in special modo in riferimento al quadro generale dello studio delineato nel paragrafo 1.4.5 e specialmente in figura 1.2.

L'ambito di utilizzo della applicazione e la conseguente possibile necessità di sviluppi successivi suggeriscono inoltre che la struttura del codice si allontani, per quanto possibile, dalla forma di “codice procedurale” in cui la organizzazione delle variabili e la rappresentazione dei dati non è ben strutturata. Per facilitare la manutenzione e lo sviluppo del codice è necessario utilizzare un linguaggio di programmazione che sia naturalmente predisposto per l'organizzazione e la correlazione delle variabili senza che ciò pregiudichi l'efficienza del codice sviluppato.

Infine il riferimento alla *trasportabilità* del codice è indispensabile se si vuole ipotizzare la diffusione delle applicazioni sviluppate quali strumenti per l'esecuzione di studi di impatto ambientale.

Alla luce delle caratteristiche richieste al nuovo programma, si è scelto il C++ come linguaggio di programmazione per la realizzazione dell'applicazione di calcolo dei campi.

Il C++ è emerso come linguaggio di programmazione negli anni ottanta; si basa sul linguaggio C dal quale eredita tutte le caratteristiche di efficienza e gestione anche a basso livello e ne rappresenta un'evoluzione verso la tecnica di programmazione a oggetti. Il C++ offre una naturale migrazione dal linguaggio C a un livello di programmazione più elevato senza che questo pregiudichi la possibilità di sviluppare sezioni di codice a livello più basso. La programmazione a oggetti consente di manipolare gruppi di variabili e funzioni correlate tra loro. Le variabili vengono aggregate in oggetti a cui sono associate anche funzioni che definiscono le relazioni fra le variabili stesse. Una modifica ad una variabile può per esempio attivare automaticamente delle modifiche in tutte le variabili correlate.

La potenza della programmazione ad oggetti libera il programmatore dalla necessità di dover tenere in considerazione un gran numero di singole

variabili.

La trasportabilità del codice è salvaguardata dall'esistenza di uno “standard” (ANSI C++), anche se non tutti i compilatori ne seguono rigorosamente le prescrizioni.

Per quanto riguarda la definizione dell'interfaccia utente si è scelto di sfruttare esclusivamente le possibilità offerte dallo standard ANSI C++ piuttosto che creare un'interfaccia a livello più alto basata su menù e finestre; al momento dunque, i parametri e le opzioni relative a ciascuna sessione di calcolo dei campi sono impostabili dall'utente tramite dei file di testo opportunamente strutturati. Ciò è motivato più da considerazioni legate alle necessità del momento in cui si è sviluppato il codice piuttosto che alla sua trasportabilità, anche se questa ne risulta sicuramente svantaggiata. Per il futuro è senza dubbio auspicabile lo sviluppo di interfacce a più alto livello per le varie piattaforme.

4.2.2 Le strutture informatiche

Come si è già detto il programma di calcolo dei campi è stato sviluppato utilizzando la filosofia della *programmazione ad oggetti*, per cui si manipolano gruppi di variabili correlate (chiamati appunto oggetti) e non singole variabili.

Le qualità principali di un oggetto sono un livello di complessità non banale, un confine ben definito ed una serie di modelli di comportamento. In genere un'unica variabile non può essere considerata un valido candidato per la realizzazione di un oggetto, in quanto non ha il livello di complessità sufficiente. Il conduttore di una linea aerea, per esempio, è rappresentato nel codice di calcolo da un particolare oggetto in cui sono aggregate le variabili quali il raggio del conduttore, le coordinate dei suoi estremi, la corrente che vi scorre. Per ogni conduttore che occorre considerare, esisterà nel codice

di calcolo una istanza (oggetto) di tale classe, le cui variabili caratteristiche assumeranno valori ben determinati, generalmente diversi da quelli delle altre istanze.

Si intende per *classe* la definizione astratta di un gruppo di oggetti. La definizione di una classe specifica le caratteristiche comuni degli oggetti appartenenti alla classe stessa ed in particolare l'insieme delle variabili di stato e una serie di modelli di comportamento. In altre parole ogni classe definisce un tipo di oggetto; dunque le classi hanno nomi astratti: *linea*, *campata*,... mentre gli oggetti hanno nomi come: *linea_1001*, *campata_3_linea_1001*,...

In questo paragrafo verranno esposte le caratteristiche generali dei tipi di oggetti che modellano le sorgenti e gli altri elementi definiti nel codice di calcolo.

È da notare che le strutture informatiche che vengono utilizzate per modellare l'elettrodotto ai fini del calcolo dei campi non ricalcano esattamente il modo in cui è organizzato il contenuto dell'archivio delle linee, pur attingendovi i dati costitutivi.

Classe linea

L'elemento a più alto livello fra le strutture che modellano le sorgenti utilizzate nel nucleo di calcolo è la linea, intesa come tratto di elettrodotto senza diramazioni. La linea è per definizione mista, cioè può comprendere allo stesso tempo campate aeree, campate interrate, raccordi aereo-interrato e raccordi interrato-aereo. A differenza di quanto succede nell'archivio delle linee, le ampiezze di tensione e corrente sui conduttori, pur essendo caratteristiche della linea, per esigenze di calcolo, sono assegnati a ciascun conduttore. Questo è anche dovuto al fatto che, per prima cosa si sono modellati i conduttori a sé stanti e poi, una volta raggiunto un modello soddisfacente, sono

state costruite le campate come insieme di conduttori e le linee come insieme di campate. Potrebbe inoltre risultare utile poter utilizzare una conduttore o una campata senza bisogno di definire una linea che “le contenga”.

La linea sarà caratterizzata, oltre che da un riferimento a ciascuna sua campata, semplicemente da un identificativo numerico e dal numero delle sue campate, compresi i raccordi (vedi tabella 4.1).

Classe linea		
nome campo	tipo campo	contenuto
n_l	intero	Identificativo univoco della linea
n_c	intero	Numero delle campate della linea
c_l	puntatore	Indirizzo in memoria dell'array che contiene gli oggetti campata relative alla linea

Tabella 4.1: Linea

Classe campata

Ciascuna linea è costituita da un certo numero di campate. La campata, come si è detto sopra, può essere aerea, interrata, un raccordo aereo-interrato o interrato-aereo. Ciascun oggetto campata sarà caratterizzato dal numero dei suoi conduttori (funi di guardia comprese) ed oltre a questo da dei campi specifici per ogni tipo.

Classe campata (parte comune)		
nome campo	tipo campo	contenuto
n_c	intero	Numero dei conduttori della campata

Tabella 4.2: Campata

Le *campate interrate ed i raccordi* sono modellati come dei fasci di segmenti rettilinei e paralleli che, a loro volta, rappresentano i conduttori della

campata. I raccordi sono isolati, separano un tratto di linea aereo da uno interrato e sono quindi costituiti da un unico fascio di conduttori verticali; le campate interrate invece possono succedersi l'una all'altra nella stessa linea. Un tratto interrato di linea appare dunque modellato da una spezzata nello spazio di cui ogni elemento rettilineo è in realtà un fascio di segmenti rettilinei.

Classe campata interrata		
nome campo	tipo campo	contenuto
e_i_c_i	puntatore	Indirizzo dell'array che contiene gli estremi iniziali dei segmenti che modellano i conduttori della campata.
e_f_c_i	puntatore	Indirizzo dell'array che contiene gli estremi finali dei segmenti che modellano i conduttori della campata.
I_c_i	puntatore	Indirizzo dell'array che contiene le correnti (in modulo e fase) che scorrono su ciascun conduttore della campata.

Tabella 4.3: Campata interrata

Le campate interrate ed i raccordi sono sorgenti di solo campo magnetico in quanto si considerano perfettamente schermati, dal punto di vista elettrico, rispettivamente dal terreno e dalla struttura metallica del sostegno di raccordo e quindi sono caratterizzate dalla sola corrente. Le variabili caratteristiche delle campate interrate e dei raccordi saranno dunque i riferimenti agli estremi di ciascun segmento e la corrente su di esso.

Le campate aeree invece sono modellate come dei fasci di “catenarie” non necessariamente parallele.

Classe raccordo		
nome campo	tipo campo	contenuto
e_i_r	puntatore	Indirizzo dell'array che contiene gli estremi iniziali dei segmenti che modellano i conduttori del raccordo.
e_f_r	puntatore	Indirizzo dell'array che contiene gli estremi finali dei segmenti che modellano i conduttori del raccordo.
I_r	puntatore	Indirizzo dell'array che contiene le correnti (in modulo e fase) che scorrono su ciascun conduttore del raccordo.

Tabella 4.4: Raccordo

Classe campata aerea		
nome campo	tipo campo	contenuto
C	puntatore	Indirizzo dell'array che contiene gli oggetti catenaria relativi alla campata.

Tabella 4.5: Campata aerea

Classe catenaria

Le varie catenarie vengono costruite a partire dalla posizione assoluta dei punti di sospensione e del parametro di posa di ciascun conduttore, ricavati dall'archivio.

In pratica per ogni conduttore di ciascuna campata aerea viene costruito un modello geometrico individuale che rappresenta lo sviluppo della catenaria secondo cui si dispone il conduttore attraverso un opportuno numero di segmenti (corde) su di essa. Il numero dei segmenti dipende dalla concavità della catenaria e quindi dal suo parametro di posa, rapportato alla lunghezza della campata ed alla accuratezza richiesta. Gli estremi di detti segmenti

Struttura catenaria		
nome campo	tipo campo	contenuto
pt_{inizio}	Punto $\mathbb{R}^3$	Punto di sospensione iniziale
pt_{fine}	Punto $\mathbb{R}^3$	Punto di sospensione finale
k	Reale	Parametro di posa della catenaria [m]
r	Reale	Raggio del conduttore [m]
$n_{bisezioni}$	intero	Numero dei passi con cui si è “campionato” la catenaria; i punti di campionamento sono $(2^{n_{bisezioni}} + 1)$
accuratezza	Reale	Accuratezza con cui si è rappresentata la catenaria
I	complesso	Corrente sul conduttore
V	complesso	Tensione sul conduttore
P	puntatore	Indirizzo dell'array che contiene le coordinate (x,y,z) dei punti con cui si è campionata la catenaria.

Tabella 4.6: Catenaria

sono ricavati tramite procedure ricorsive annidate che fanno riferimento alla espressione analitica che descrive la catenaria, esposta nel paragrafo 2.2.2.

Ciascuna campata aerea sarà dunque caratterizzata dal riferimento alle catenarie che la compongono, mentre ciascuna catenaria avrà come campi caratteristici, oltre a gli estremi dei segmenti che rappresentano il conduttore ed il loro numero, un parametro che rappresenta l'accuratezza con cui si è approssimata la curva, la corrente sul conduttore e tutte le informazioni necessarie al calcolo del campo elettrico cioè il raggio e la tensione sul conduttore stesso.

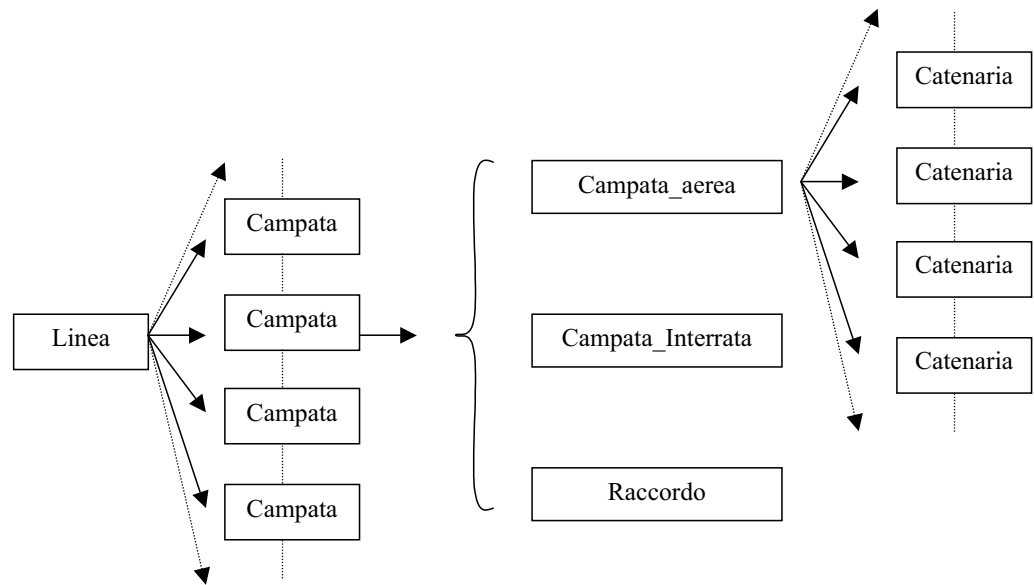


Figura 4.3: Relazione fra le classi con cui si modellano le sorgenti di campo

Classe sezione

Per determinare correttamente la distribuzione dei campi non è sufficiente costruire un modello per le relative sorgenti, ma è necessario modellare anche il terreno ad esse circostante.

La necessità di conoscere l'andamento del terreno subentra in più circostanze nelle procedure di calcolo dei campi:

- nel paragrafo 4.1.2 si è visto che per calcolare il campo elettrico è necessario tenere conto dell'andamento del terreno per determinare la posizione dei “conduttori immagine”;
- affinché i risultati del calcolo dei campi siano significativi ai fini della valutazione degli impatti sull'ambiente, essi si devono riferire alla superficie del suolo. Avrebbe ben poca rilevanza conoscere l'intensità dei campi a decine di metri di quota sul terreno oppure sotto la sua superficie. In altre parole la conoscenza dell'andamento del terreno è

necessaria per *determinare correttamente la quota dei punti in cui si vogliono calcolare i campi*.

Il terreno viene dunque modellato sotto forma di matrice di punti, ciascuno caratterizzato dalle sue coordinate cartesiane nello stesso sistema di riferimento utilizzato per la rappresentazione delle sorgenti.

La classe fondamentale per l'assolvimento di questo compito è la *sezione*.

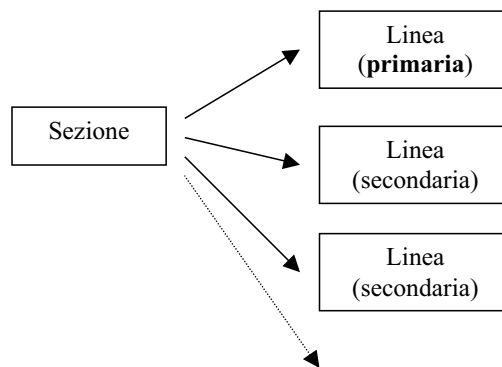


Figura 4.4: Relazione fra classe sezione e classe linea

Per ogni linea considerata, partendo dal suo sostegno iniziale e procedendo lungo l'asse delle varie campate a passi di 20 metri, si è individuata una serie di punti al suolo detti centri o capisaldi delle sezioni. Per ciascuno di questi capisaldi si sono presi in considerazione due “sbracci” laterali rettilinei, diretti ortogonalmente all'asse della campata, da una parte e dall'altra dell'asse stesso. Procedendo a passi di 10 metri lungo ciascuno di tali sbracci (detti semisezioni), fino ad una distanza di 200 metri dall'asse dell'elettrodotto, si sono individuate altre serie di punti al suolo che, insieme ai capisaldi sopra definiti, costituiscono la nostra matrice del terreno (vedi paragrafo 3.3.4). Ciascuna sezione è costituita dal suo caposaldo, dalle due sue semisezioni e

Classe sezione		
nome campo	tipo campo	contenuto
O1	Punto $\mathbb{R}^3$	Caposaldo della sezione
n_p_sez	intero	Numero di punti appartenenti a ciascuna semisezione
D_sez	Reale	Distanza in metri, misurata sul piano orizzontale, che separa ciascun punto della semisezione dai due punti contigui.
L_sez	Vettore $\mathbb{R}^3$	Versore orizzontale che, insieme a quello verticale centrato in O1, individua il piano verticale su cui giacciono i punti delle 2 semisezioni
Z_sez_d	puntatore	Indirizzo dell'array che contiene le quote s.l.m. degli (<i>n_p_sez</i>) punti al suolo che costituiscono la semisezione destra (continua in tabella 4.8).
Z_sez_s	puntatore	Indirizzo dell'array che contiene le quote s.l.m. degli (<i>n_p_sez</i>) punti al suolo che costituiscono la semisezione sinistra
linea_sez	puntatore	Riferimento alla linea (che chiameremo primaria per la sezione) lungo cui la sezione è definita
progr_camp	intero	È l'indice progressivo che individua la campata della linea primaria lungo cui la sezione è definita.

Tabella 4.7: Sezione

da altri campi relativi alla disposizione dei punti al suolo che la compongono. Ogni sezione è caratterizzata inoltre da dei riferimenti alla linea lungo cui la sezione è definita e ad eventuali “altre linee” da considerare per il computo

del campo magnetico.

Classe sezione (continua)		
nome campo	tipo campo	contenuto
nc1,nc2	interi	Sono gli indici che delimitano le campate della linea primaria da includere nel computo del campo magnetico
n_al	intero	È il numero delle linee (esclusa quella primaria) che si vogliono includere nel computo del campo magnetico (che chiameremo secondarie per la sezione).
id_al	puntatore	È l'indirizzo dell'array che contiene gli identificativi delle linee secondarie per la sezione.

Tabella 4.8: Sezione

4.2.3 Creazione delle strutture di dati

Le classi descritte nel paragrafo precedente si differenziano fra loro anche per il modo con cui vengono create le relative istanze (oggetti) durante la sessione di calcolo. La prima distinzione che si può fare è quella fra tutte le classi che rappresentano le sorgenti di campo e la classe sezione: infatti mentre le prime vengono istanziate a partire dai dati contenuti nell'archivio delle linee, le sezioni attingono ad un file specifico in cui sono stati immagazzinati i dati ricavati dal modello del terreno (vedi paragrafo 3.3.4). Un'altra grossa differenza fra le sezioni e gli oggetti che modellano le sorgenti consiste nel fatto che queste ultime vengono modellate all'inizio della sessione di calcolo e “rimangono in vita” fino al termine della sessione; le sezioni invece vengono create, usate e “distrutte” in modo che vi sia sempre *solo una sezione in memoria*; per distruzione di un oggetto si intende ovviamente che la memoria da esso occupata viene liberata e i dati in essa contenuti vengono persi.

Il programma di calcolo, per costruire le istanze delle classi che rappresentano le sorgenti di campo, deve dunque accedere alle informazioni contenute nell'archivio delle linee. È quindi necessario predisporre un metodo generale per interfacciare i due “mondi” fin qui estranei e separati: quello dell'archivio delle sorgenti e quello delle procedure di calcolo dei campi. Ciò avviene in un contesto in cui archivio e procedure risiedono su macchine diverse, di cui una con sistema operativo Linux e l'altra con sistema operativo Windows. Le due macchine, nella situazione contingente, si trovano sulla stessa rete locale ma, in una prospettiva più generale, si può pensare ad un Catasto Elettromagnetico pubblico a cui possono accedere soggetti esterni - pubblici e privati - che hanno bisogno di dati per valutazioni di vario tipo; in questo caso la rete Internet rappresenta l'infrastruttura preferenziale per il collegamento.

L'accesso ai dati dell'archivio deve avvenire in condizioni di sicurezza:

solo i soggetti autorizzati devono accedere ai dati e ciascuno con propri privilegi e limitazioni. Può essere necessario eseguire delle preelaborazioni sui dati dell'archivio, prima di trasferirli al programma di calcolo. Può essere vantaggioso eseguire alcune di queste preelaborazioni sul computer che ospita l'archivio (per esempio la determinazione delle coordinate assolute dei punti di sospensione).

I requisiti sopra descritti si implementano bene sfruttando un approccio client-server su protocollo TCP-IP.

Nell'approccio client-server due applicazioni concorrono alla soluzione ottimale di un problema di trattamento dati. Una di esse, detta server (nel caso che ci interessa, il programma che estrae, preelabora e fornisce i dati di archivio), è sempre in esecuzione, in attesa di richieste (anche multiple in contemporanea) che giungono da altre applicazioni, dette client (nel caso che ci interessa, il programma che deve calcolare i campi). Il client prende l'iniziativa, richiedendo la connessione che il server, se possibile, accoglie, mettendosi a disposizione delle sue richieste. Successivamente, il dialogo tra le due applicazioni prosegue sulla base di comandi inviati dal client al server e dell'esecuzione di questi comandi da parte del server, che ne invia quindi i risultati al client. Uno dei comandi inviati dal client istruisce il server a concludere il lavoro e porre fine al collegamento. Ovviamente il server rimane in attesa di altre richieste di connessione. Il protocollo TCP-IP, per le sue caratteristiche di versatilità, robustezza, universalità e affidabilità, è supporto ideale per la realizzazione di applicazioni client-server distribuite su una rete (in cui cioè il programma server ed il programma client risiedono su computer diversi). Esso diviene ovviamente una scelta obbligata quando il collegamento si avvale della rete Internet che, come è noto, è appunto basata sul protocollo TCP-IP.

Sebbene il motore DBMS utilizzato dall'archivio (MySQL) sia già basato su funzionalità di server, si è ritenuto opportuno interporre un ulteriore programma server dedicato, che gira sulla stessa macchina di MySQL ed accede all'archivio stesso con privilegi controllati; esso permette di ottimizzare tanto la sicurezza quanto la possibilità di preelaborare i dati in modo adattato all'applicazione dell'utente.

Oltre ai comandi con cui si stabilisce o si interrompe la comunicazione, vi sono sostanzialmente tre tipi di richieste che il programma di calcolo dei campi può fare al server:

- richiesta dei dati di una linea;
- richiesta dei dati di una campata;
- richiesta dei dati relativi ai sostegni di una linea;

ad ognuna di esse è associato un *comando* che, una volta trasmesso, viene interpretato dal server, il quale risponde con i dati richiesti.

Di seguito si indica la sintassi dei tre comandi e la struttura delle risposte del server:

- **comando DATILINEA(id_linea)**: col parametro *id_linea* il client specifica l'identificativo di archivio della linea elettrica di cui si vuole ottenere le caratteristiche.

Il server risponde con una stringa di tipo:

$$id_linea \quad tipo_linea \quad V_nom \quad I_nom \quad n_camp$$

dove *id_linea* coincide col parametro utilizzato nel comando; *tipo_linea* è un codice che specifica se la linea in questione è composta da sole campate aeree, interrate oppure se è una linea mista; *V_nom* ed *I_nom*

sono i valore di tensione e corrente nominale rispettivamente in volt ed ampere; n_camp è il numero di campate della linea.

- **comando DATICAMP(id_linea,progr_camp)**: il parametro $progr_camp$ è l'indice progressivo che caratterizza ogni campata della linea con identificativi id_linea .

La risposta del server è strutturata in più stringhe distinte; la prima è sempre del tipo:

$$id_linea \quad prog_camp \quad id_si \quad id_sf \quad n_cond$$

dove $prog_camp$ è l'indice progressivo della campata della linea id_linea a cui ci si riferisce che coincide col parametro utilizzato nel comando; id_si e id_sf sono gli identificativi di archivio dei sostegni tra cui la campata si sviluppa; n_cond è il numero dei conduttori della campata.

Seguono poi n_cond righe, una per ogni conduttore, con struttura:

$$coord_pt_sosp \quad k \quad fase \quad tipo \quad diametro$$

dove $coord_pt_sosp$ sono due terne di valori reali che indicano le coordinate Gauss-Boaga dei punti di sospensione; k è il parametro di tesatura del conduttore a cui la stringa si riferisce; $fase$ indica la fase in gradi della corrente e della tensione sul conduttore; $tipo$ è un codice che indica se si sta considerando un conduttore oppure una fune di guardia; $diametro$ è il diametro del conduttore o della fune di guardia.

- **comando DATISOST(id_linea)**: il server risponde a questo comando con una prima stringa in cui si specifica il numero dei sostegni della linea n_sost e quindi con altre n_sost stringhe ciascuna delle quali ha una struttura del tipo:

prog_sost tipo_sost coord_b_sost h_sost ori_sost

dove *prog_sost* è il progressivo del sostegno; *tipo_sost* è un codice che indica se si tratta di un sostegno relativo ad un tratto di linea aerea oppure un “sostegno virtuale” di un tratto interrato; *coord_b_sost* sono le coordinate della base del sostegno; *h_sost* è la quota del conduttore più basso rispetto alla base del sostegno nel caso di tratto di linea aerea oppure la profondità di interrimento dei cavi nel caso di tratto di linea interrato.

I comandi descritti vengono utilizzati nel codice di calcolo quando si istanziano gli oggetti che modellano le sorgenti dei campi. In particolare, per ogni classe descritta, esiste una (o anche più) funzione detta “*costruttore della classe*”; essa, come dice il nome stesso, ha il compito di gestire tutta la fase di costruzione degli oggetti della classe e quindi anche la comunicazione con gli archivi, se questa è necessaria.

Per capire meglio in che contesto i comandi descritti vengono utilizzati, si descrivono i passi logici attraverso la cui esecuzione viene costruito un generico oggetto *linea*, supponendo che tutte le campate della linea siano campate aeree.

1. viene invocato il *costruttore della classe linea*;
2. il *costruttore della classe linea* invia al server il comando DATILINEA;
3. il *costruttore della classe linea* alloca in memoria lo spazio sufficiente per un oggetto linea con un numero di campate *n_camp* pari a quello specificato nella risposta del server al comando DATILINEA;
4. il *costruttore della classe linea* invoca per *n_camp* volte il *costruttore*

della classe *campata*, incrementando ogni volta un indice intero p , pari a 1 per la prima campata;

5. il *costruttore della classe campata* invia al server il comando DATICAMP, utilizzando come parametro *progr_camp* il valore di p . Ricevuta la risposta dal server alloca in memoria lo spazio per un oggetto *campata* con un numero di conduttori *n_cond* pari a quello specificato nella risposta del server al comando DATICAMP;
6. il *costruttore della classe campata* invoca a sua volta il *costruttore della classe catenaria* per *n_cond* volte, il quale costruisce i vari oggetti *catenaria* basandosi sui dati contenuti nelle *n_cond* stringhe successive alla prima che compongono la risposta del server al comando DATICAMP.

Supponendo che le campate della linea abbiano tutte lo stesso numero *n_cond* di conduttori, si ha che, per costruire l'oggetti linea si invoca:

- una volta il *costruttore della classe linea* (passo 1) ed una volta anche il comando DATILINEA (passo 2);
- *n_camp* volte sia il *costruttore della classe campata* (passo 4) sia il comando DATICAMP (passo 5);
- (*n_camp*·*n_cond*) volte il *costruttore della classe catenaria*.

Tra gli oggetti che modellano sorgenti di campo, la *catenaria* è l'unico per cui sia opportuno descrivere con maggior dettaglio le fasi di costruzione, in virtù del fatto che per essa, e solo per essa, i dati grezzi in archivio sono insufficienti a darne una rappresentazione completa ai fini dell'utilizzo del nostro algoritmo per il calcolo dei campi stessi. Ciascuna *catenaria* (ovvero ciascun conduttore) è rappresentata in archivio, dal punto di vista geometrico, attraverso le coordinate dei punti iniziale e finale (punti di sospensione dei

conduttori) ed il parametro di tesatura. A noi interessa invece rappresentare la catenaria stessa con una successione di corde consecutive su di essa.

4.2.4 Rappresentazione della catenaria con un insieme delle sue corde

Come si è già detto nel paragrafo 4.1.1, ogni conduttore aereo è rappresentato, ai fini del calcolo dell'induzione magnetica, da una curva rettilinea a tratti i cui segmenti costitutivi sono corde della catenaria secondo cui si dispone il conduttore (paragrafo 2.2). Gli estremi di questi segmenti sono tanto più ravvicinati quanto più la catenaria tende a discostarsi dalla corda che unisce i suoi due estremi (approssimazione di ordine 0). Questa scomposizione in segmenti risulta molto vantaggiosa per il calcolo del vettore induzione: invece di risolvere numericamente un complesso integrale di linea, si calcola il campo come somma dei contributi generati da ciascun segmento con cui la catenaria è rappresentata; per calcolare il contributo di ciascun segmento si deve integrare la legge di Biot-Savart in forma differenziale (4.1) sul segmento stesso.

Nell'archivio delle linee non sono memorizzate le coordinate degli estremi di tutti i segmenti utilizzati ma, per ciascun conduttore, solo quelle dei punti di sospensione ed il parametro di tesatura della relativa catenaria. A partire dai questi dati si deve istanziare l'oggetto catenaria; per fare ciò vengono utilizzate tre procedure, annidate l'una nell'altra, che possono essere così classificate:

Procedura di allocazione: procedura ricorsiva, che ad ogni passo alloca lo spazio per i punti con cui si rappresenta la catenaria (gli estremi delle corde) ed in cui si effettua il controllo di convergenza in base

al quale si verifica se la rappresentazione ottenuta al passo corrente è sufficientemente accurata.

Procedura di riempimento: procedura ricorsiva in cui si riempie lo spazio allocato dalla precedente *procedura di allocazione*, facendo riferimento ad una apposita funzione per il calcolo delle quote, a cui si passano ogni volta le coordinate opportune.

Funzione di calcolo delle quote: calcola la quota Z_P del punto appartenente alla catenaria in questione di coordinate X_P, Y_P ; non effettua alcun controllo e sta quindi alle procedure che la invocano fare in modo che le (X_P, Y_P) siano effettivamente le coordinate sul piano orizzontale di un punto appartenente alla catenaria.

In particolare la **procedura di riempimento dello spazio allocato** richiede che siano specificati due indici interi (*inizio, fine*) attraverso i quali si individuano i punti della catenaria di cui si deve calcolare la quota (si veda la figura 4.6).

Per quanto riguarda invece l'**espressione utilizzata per il calcolo delle quote**, note le coordinate dei punti di sospensione $P_a (x_a, y_a, z_a)$ e $P_b (x_b, y_b, z_b)$ ed un valore per il parametro di posa k in metri, si può ricavare l'espressione della quota del punto N della catenaria di coordinate (x_N, y_N, z_N) la cui proiezione sul piano xy coincide con quella del punto medio C della corda che unisce i 2 punti di sospensione (figura 4.5).

Si ha:

$$\begin{cases} x_N = \frac{x_a + x_b}{2} \\ y_N = \frac{y_a + y_b}{2} \\ z_N = \frac{z_a + z_b}{2} + k \left\{ \operatorname{arctanh} \left(\frac{2b}{L} \right) - \cosh \left[\frac{a}{k} + \operatorname{arctanh} \left(\frac{2b}{L} \right) \right] \right\} \end{cases}$$

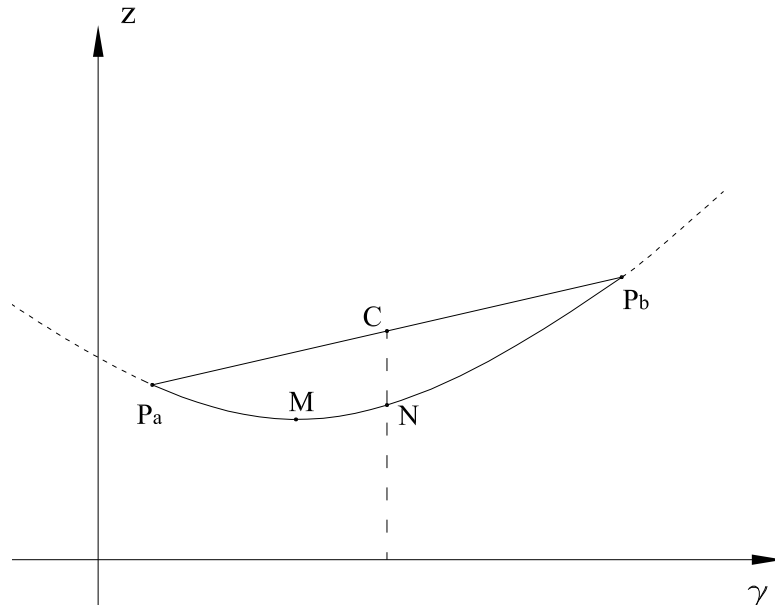


Figura 4.5: Costruzione dell'oggetto catenaria

dove per a, b e L valgono le (2.15)

Per le proprietà della catenaria, questa formula è in effetti più generale: infatti A e B possono essere due punti qualsiasi appartenenti alla curva ed il punto N di coordinate (x_N, y_N, z_N) è sempre il punto appartenente alla catenaria la cui proiezione sul piano xy coincide con quella del punto medio della corda che unisce A e B.

Riassumendo, l'istanziamento di ciascun oggetto catenaria viene eseguito attraverso i seguenti passi:

1. si parte dai due punti di sospensione e si divide in due il segmento che li unisce (si hanno quindi tre punti di campionamento, estremi compresi);
2. con le formule descritte si calcola la quota z_N del punto che ha proiezione sul piano xy coincidente con quella del punto ottenuto con la bisezione della corda appena effettuata;

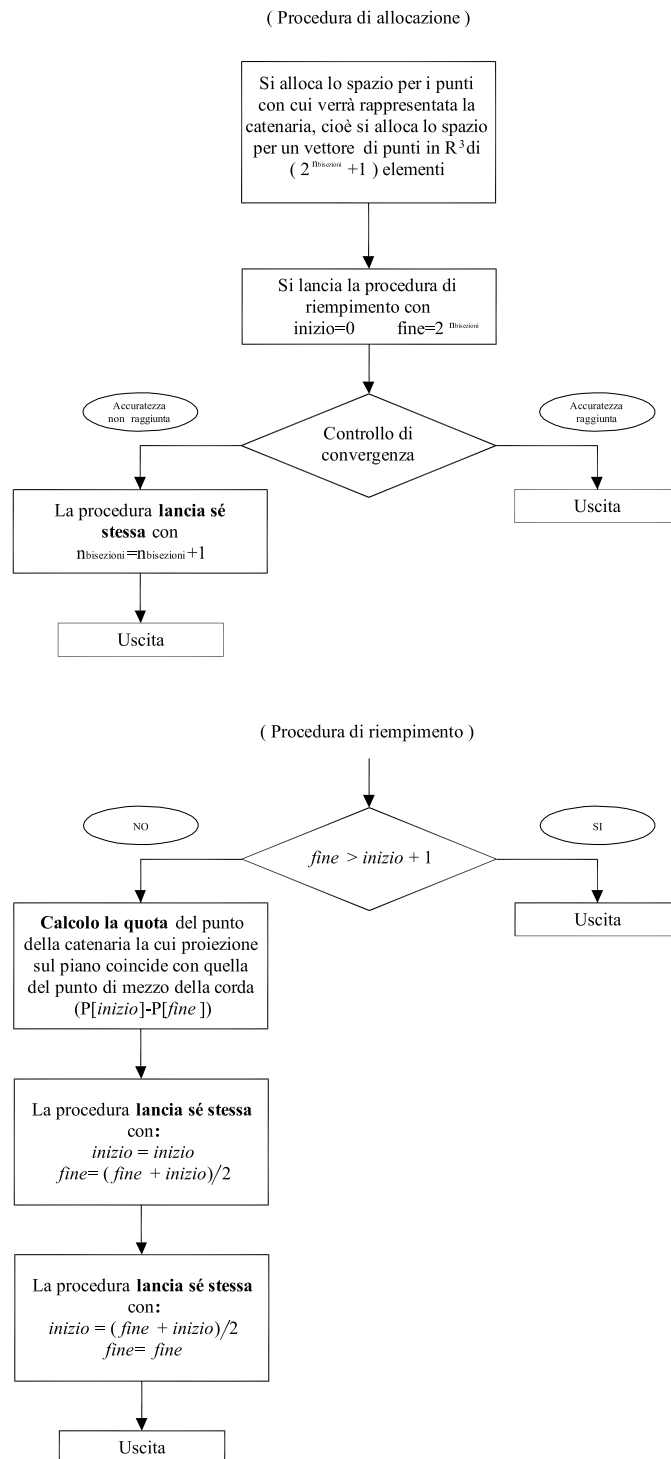


Figura 4.6: Procedure di allocazione e di riempimento

3. se il campionamento con 3 punti (2 corde) soddisfa l'accuratezza richiesta, si è concluso;
4. Se non si è raggiunto l'accuratezza richiesta si ripetono i punti (1) e (2) per le due corde della rappresentazione a tre punti, ottenendo così una rappresentazione a quattro corde (cinque punti);
5. si effettua il controllo di convergenza; se è soddisfatto si è concluso;
6. se il criterio di convergenza non è soddisfatto si ripetono i passi (4) e (5) partendo dall'ultima rappresentazione per cui si è eseguito con esito negativo il controllo di convergenza.

Criterio di convergenza

Si intende per criterio di convergenza il criterio in base al quale si decide se la rappresentazione ottenuta per la catenaria è soddisfacente oppure se si deve ricavarne una più precisa; esso deve avere le seguenti caratteristiche:

1. deve dare risultati che dipendono dall'andamento della particolare catenaria a cui si applica e non deve essere dunque riconducibile al fissare a priori un certo numero di passi di iterazione e quindi di segmenti;
2. l'indice di convergenza che si confronta con l'accuratezza richiesta deve essere il rapporto fra grandezze relative a diversi passi di iterazione, o meglio, deve essere un numero che esprime quanto, per ogni passo, si è migliorata l'approssimazione della catenaria con la spezzata scelta.

Il criterio di convergenza scelto *assume come grandezza di base la lunghezza della spezzata con cui si modella ciascuna catenaria*; è infatti evidente che, quanto più aumenta il numero dei segmenti del modello, tanto più la somma delle loro lunghezze si avvicinerà alla lunghezza della curva.

In figura 4.7 è riportata una catenaria con le sue rappresentazioni a 1, 2, 4 e 8 corde; la curva non è realistica per un conduttore di linea aerea perché, come si vede, la freccia massima è dello stesso ordine di grandezza della terza parte della campata; d'altra parte, per una curva realisticamente adottabile come modello per un conduttore, le varie rappresentazioni non si sarebbero potute distinguere alla scala adottata in figura.

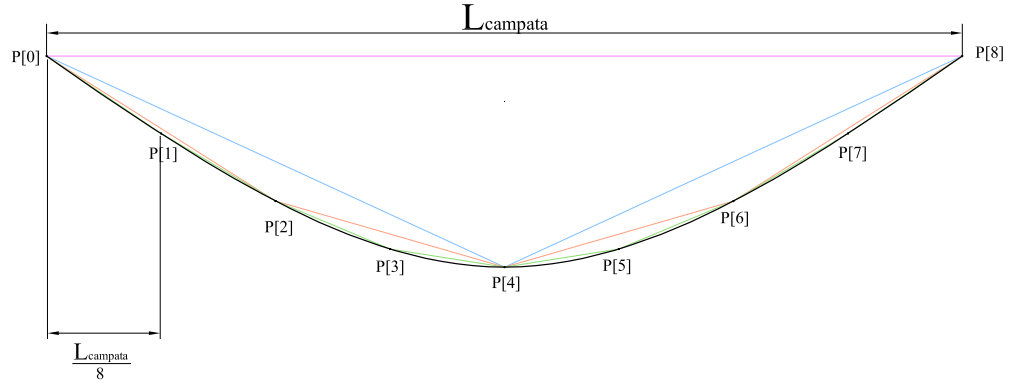


Figura 4.7: Rappresentazione della catenaria con un insieme di corde

Ad ogni passo di approssimazione, si considera la lunghezza del modello ottenuto e si confronta con quella del modello del passo precedente.

Nel caso si sia rappresentato la catenaria con 8 corde si calcolano dunque:

$$L_{corrente} = L_8 = \sum_{i=0}^7 |P[i+1] - P[i]| \quad [m]$$

$$L_{precedente} = L_4 = \sum_{i=0}^3 |P[2(i+1)] - P[2i]| \quad [m]$$

Si considera come indice di convergenza il seguente:

$$c_i = \frac{L_{corrente} - L_{precedente}}{L_{precedente}} = \frac{L_8 - L_4}{L_8}$$

La lunghezza del modello tende a quella della curva in modo monotonicamente crescente e quindi l'indice di convergenza decrescerà monotonicamente a zero.

Il criterio di convergenza è soddisfatto nel momento in cui il valore del parametro di controllo diventa più piccolo di un certo valore che chiameremo accuratezza minima richiesta.

Per stabilire il particolare valore di accuratezza da richiedere è necessario mettere in relazione il numero di corde utilizzate per la rappresentazione di ogni conduttore ed i valori di campo da esso generati. In particolare si farà riferimento all'induzione magnetica generata da rappresentazioni diverse della stessa catenaria, ponendosi in condizioni realistiche anche se peggiorative.

Per affrontare il problema, isolandolo, si è scelta come situazione di riferimento quella di una singola campata con un solo conduttore. Il parametro di tesatura adottato è pari a 1500 metri ed è quindi più piccolo di quello che si è riscontrato tipicamente per i conduttori reali in stato EDS avvicinandosi piuttosto ai minimi valori riscontrati in condizioni di massima freccia.

La campata è lunga 400 metri ed i punti di sospensione sono entrambi posti a 20 metri di altezza dal suolo, supposto piano. Questo conduttore è stato quindi rappresentato con un numero progressivamente crescente di corde; in base a ciascuna di queste rappresentazioni si sono determinate le linee isocampo al suolo per alcuni valori di campo ed è stata calcolata l'induzione magnetica, sempre al suolo, procedendo a passi di 1 metro lungo l'asse della campata.

In figura 4.8, insieme alle linee isocampo a 5 e 25 microtesla, è riportato il profilo della catenaria considerata; il calcolo dell'induzione magnetica è stato eseguito supponendo che nel conduttore scorra una corrente pari a 1500 ampere.

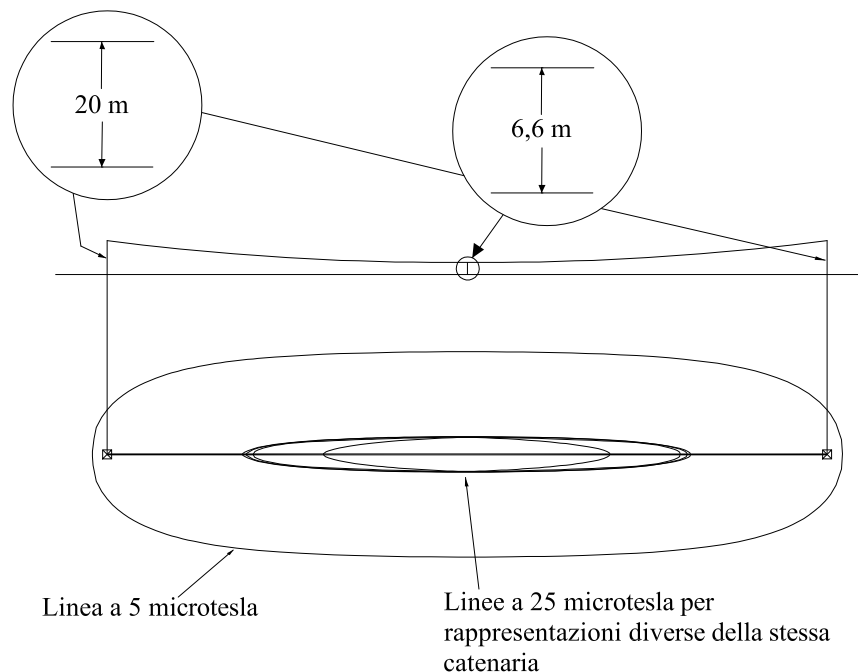


Figura 4.8: Linee isocampo a 5 e 25 microtesla per 1 campata di un conduttore singolo

Le linee isocampo a 5 microtesla per le varie rappresentazioni sono sovrapposte ed indistinguibili; ciò significa che a distanza dal conduttore i modelli sono equivalenti dal punto di vista dei campi generati.

Sullo stesso grafico si nota invece come le linee a 25 microtesla siano ben distinte per le varie rappresentazioni; queste differenze sono l'oggetto di figura 4.9.

Dagli ultimi due grafici si nota che il massimo scostamento fra linee isocampo relative allo stesso valore ma a diversi modelli, si verifica lungo l'asse della campata; il motivo è evidente se si pensa che tutte le rappresentazioni giacciono sullo stesso piano verticale che passa per l'asse della campata, ed è dunque muovendosi su di esso che si risente maggiormente delle diverse

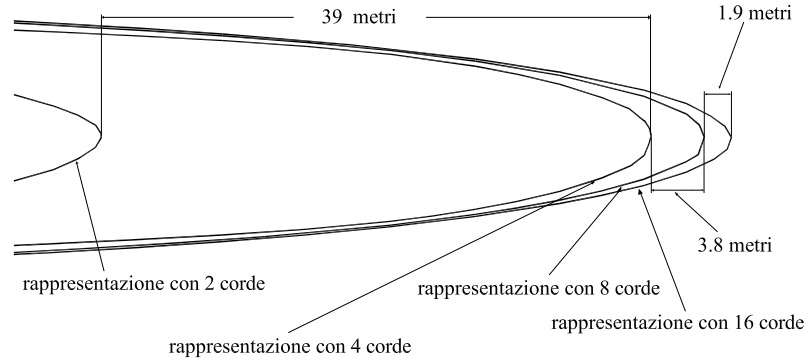


Figura 4.9: Particolare di linee isocampo a 25 microtesla per una campata di un conduttore singolo

geometrie con cui la catenaria è rappresentata.

Si è quindi calcolato l'induzione magnetica muovendosi lungo l'asse della campata, ottenendo i risultati riportati nelle figure 4.10 e 4.11.

In particolare in figura 4.10 sono riportati gli andamenti di $|\vec{B}_i|$ con $i = 2, 4, 8, 16, 32$; ed in figura 4.11 sono riportati gli andamenti di:

$$\frac{|\vec{B}_{2i}| - |\vec{B}_i|}{|\vec{B}_i|} \quad i = 2, 4, 8, 16;$$

dove $|\vec{B}_{2i}|$ e $|\vec{B}_i|$ sono i moduli dell'induzione magnetica generata dalle rappresentazioni della catenaria a $(2i)$ e (i) corde rispettivamente.

Partendo dall'analisi di figura 4.11, si arriva a determinare il valore di accuratezza adottato: come si può notare, mentre passando dalla rappresentazione a due corde a quella quattro e da quella a quattro a quella a otto corde, si raggiungono scostamenti per l'induzione magnetica dell'ordine del 30% e 10% rispettivamente. Passando dal modello a 8 corde a quello a 16, gli scostamenti rimangono invece contenuti al 2,5% circa.

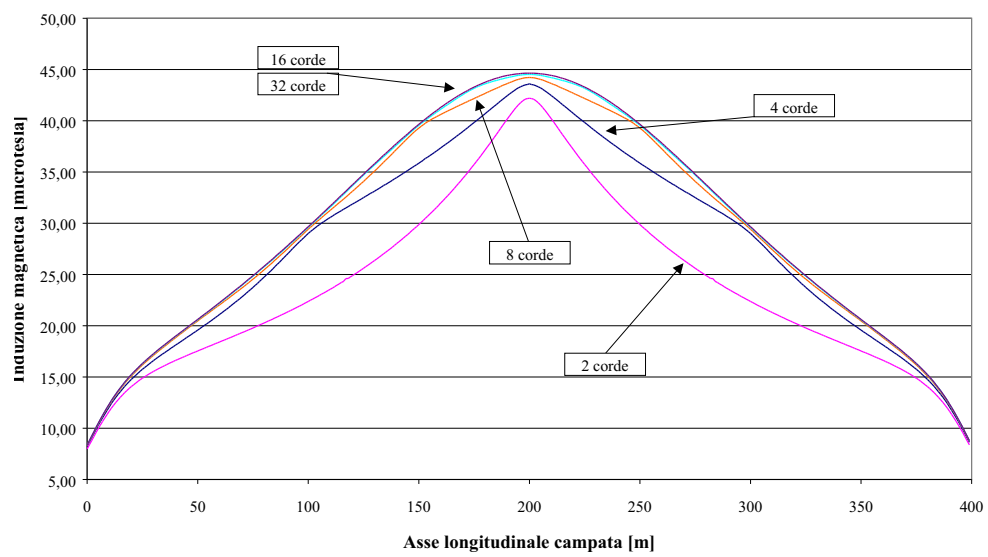


Figura 4.10: Profilo longitudinale dell'induzione magnetica.

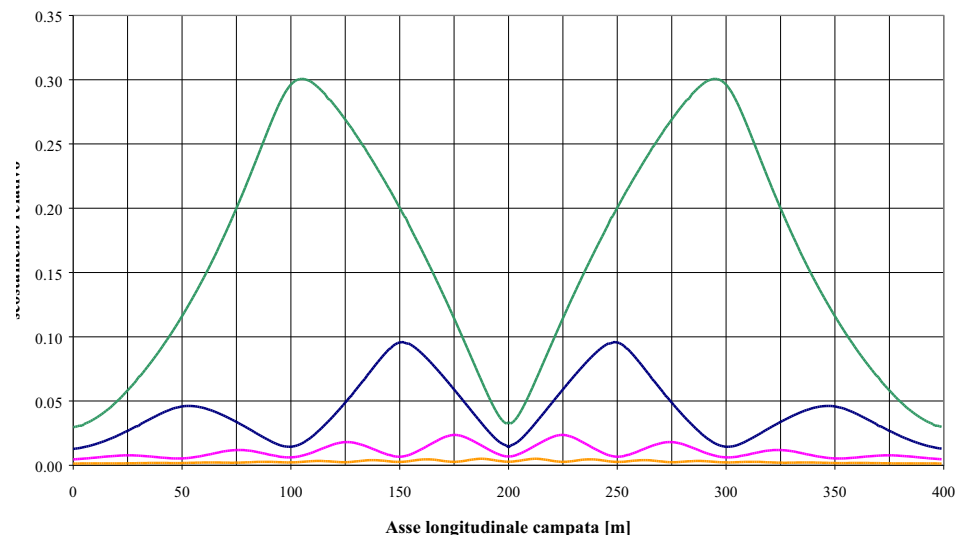


Figura 4.11: Scostamento relativo fra profili longitudinali.

Consideriamo adesso le lunghezze dei vari modelli:

$$\begin{array}{ll} L_1 = 400m & L_2 = 400,891m \\ L_4 = 401,112m & L_8 = 401,168m \\ L_{16} = 401,182m & L_{32} = 401,185m \end{array}$$

dove L_1 è la lunghezza del segmento che unisce i due punti di sospensione.

L'indice di convergenza c_i vale quindi:

$$\begin{array}{ll} c_2 = 0,0022 & c_4 = 0,00055 \\ c_8 = 0,000138 & c_{16} = 3,4 \cdot 10^{-5} \\ & c_{32} = 8,6 \cdot 10^{-6} \end{array}$$

Se si suppone accettabile il rischio di trascurare scostamenti per i campi dell'ordine del 2,5% e quindi si considera accettabile in questo caso il modello a 16 corde, il valore di accuratezza da richiedere è pari a 10^{-4} .

Considerando che nell'esempio si calcola il campo anche in punti molto vicini al conduttore (la distanza minima è di circa 6,6 metri) e che questo è particolarmente "lasco" e quindi necessita di un maggior numero di corde rispetto a quanto sufficiente per un conduttore più teso, *si può assumere il valore di 10^{-4} come accuratezza da richiedere per tutti i conduttori delle linee elettriche considerate nell'esecuzione della VIA*, con la ragionevole sicurezza che questi verranno modellati in modo opportuno ai fini del calcolo dei campi al suolo.

4.2.5 Calcolo del campo magnetico

Tutte le sorgenti modellate nel nucleo di calcolo sono composte da spezzate in $\mathbb{R}^3$, ciascuna delle quali rappresenta un conduttore. Il vettore induzione generato da una sorgente in un punto Q assegnato è dato dalla sovrapposizione dei contributi di tutti i segmenti conduttori che compongono le spezzate con cui ciascun conduttore della sorgente è modellato.

Catenaria

Come esposto nel paragrafo precedente, ciascuna catenaria è rappresentata dall'insieme ordinato di $2^{n_{bisezioni}}$ corde; ciascuna corda è modellata come un segmento conduttore e risulta che:

$$\vec{B}_{catenaria}(Q) = \sum_{i=1}^{2^{n_{bisezioni}}} \vec{B}_{corda\ i-esima}(Q) \quad (4.19)$$

dove $\vec{B}_{corda\ i-esima}(Q)$ risponde alla espressione (4.3) dell'induzione magnetica generata da un segmento conduttore, che, come si è visto, richiede l'utilizzo di tecniche numeriche.

Campate aeree

Come esposto nel paragrafo 4.2.2, ciascuna campata aerea è composta da tante catenarie quanti sono i suoi conduttori e quindi:

$$\vec{B}_{campataaerea}(Q) = \sum_{i=1}^{n^o\ conduttori} \vec{B}_{catenaria\ i-esima}(Q) \quad (4.20)$$

dove $\vec{B}_{catenaria\ i-esima}(Q)$ risponde alla (4.19).

Campate interrate e raccordi

Come esposto nel paragrafo (4.2.2), ciascuna campata interrata è composta da tanti segmenti rettilinei quanti sono i suoi conduttori; lo stesso vale per i

raccordi, quindi:

$$\vec{B}_{campatainterrata/raccordo}(Q) = \sum_{i=1}^{n^o \text{ conduttori}} \vec{B}_{segmento \ i-esimo}(Q) \quad (4.21)$$

dove $\vec{B}_{segmento \ i-esimo}(Q)$ risponde alla (4.3).

Linee

Come esposto nel paragrafo 4.2.2 ciascuna linea è composta da un certo numero di campate; queste possono essere aeree, interrate oppure raccordi e quindi:

$$\vec{B}_{linea}(Q) = \sum_{i=1}^{n^o \text{ campate}} \vec{B}_{campata \ i-esima}(Q) \quad (4.22)$$

dove $\vec{B}_{campata \ i-esima}(Q)$ risponde alla (4.20) o alla (4.21) a secondo che la *i-esima campata* sia aerea piuttosto che interrata o un raccordo.

4.2.6 Calcolo del campo elettrico

Come si è visto nel paragrafo 4.1.2, per il calcolo del campo elettrico si utilizza un *modello piano semplificato*; d'altra parte, come evidenziato nel paragrafo 4.2.2, le sorgenti dei campi sono modellate da strutture riferite ad un sistema di coordinate *tridimensionale*.

L'utilizzo del modello bidimensionale, a fronte di una semplificazione dei calcoli, rende pertanto necessaria una fase preliminare in cui si ricavano, dal modello tridimensionale, le informazioni necessarie alla costruzione del modello bidimensionale semplificato.

La semplificazione del modello

Il modello fisico bidimensionale scelto per il calcolo del campo elettrico viene ricavato attraverso l'esecuzione dei seguenti passi:

1. scelta di un piano verticale di calcolo (sezione normale);
2. determinazione su detto piano della posizione dei conduttori rettificati reali mediante le coordinate bidimensionali dell'intersezione di ciascuna catenaria col piano di calcolo scelto;
3. rappresentazione del terreno su detto piano mediante una retta inclinata individuata da un punto e da un angolo di inclinazione;
4. determinazione della posizione dei conduttori rettificati immagine, rappresentati da dei punti posti simmetricamente a quelli relativi ai conduttori reali rispetto alla retta che rappresenta il terreno.

1) Scelta della sezione normale.

Per quanto riguarda la scelta del piano di calcolo, questa è obbligata nel caso sia fissato il punto potenziato Q : il piano sarà quello verticale

ortogonale alla linea, passante per Q; se invece si stanno cercando i punti di passaggio per le linee di isocampo, si sceglieranno i piani verticali, ortogonali alla linea, su cui sono definite le sezioni relative alla linea stessa (in altre parole le sezioni per cui la linea in questione è *primaria*).

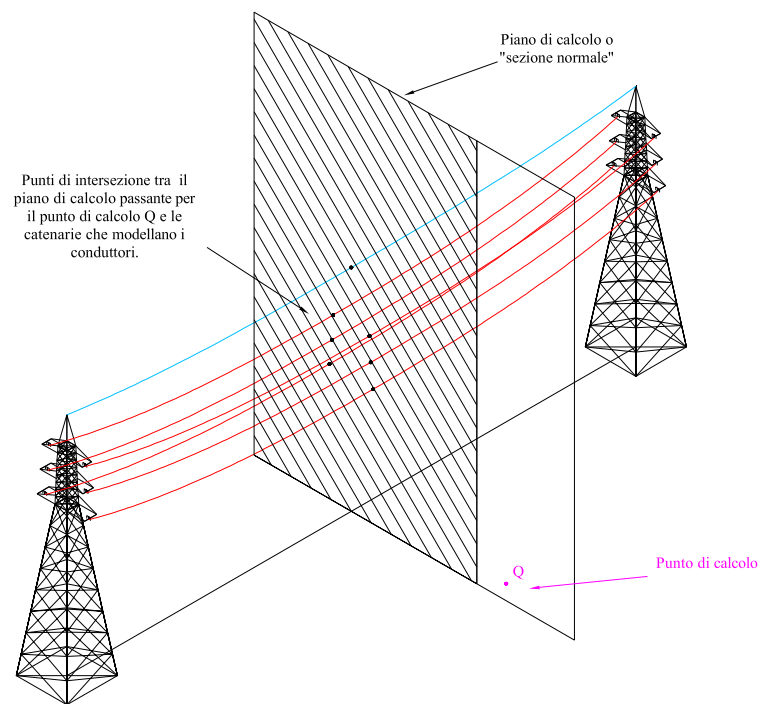


Figura 4.12: Determinazione del modello bidimensionale semplificato

2) Determinazione delle intersezioni conduttori-sezione normale

Per la determinazione dei punti di intersezione di ciascuna catenaria che modella un conduttore reale con il piano di calcolo, si procede in due passi:

- a) si calcolano le coordinate X_P, Y_P (EN) del punto di intersezione tra conduttore e piano di calcolo; ciò può essere fatto in base a sem-

plici relazioni geometriche sul piano orizzontale senza considerare l'andamento della catenaria;

- b) note le coordinate dei punti di sospensione P_a, P_b della catenaria ed il suo parametro di posa k , si ricava la quota del punto P appartenente alla catenaria che ha coordinate $x = X_P$ ed $y = Y_P$ ricavate al punto precedente. In particolare si utilizza la seguente espressione:

$$Z_P = Z_a + k \cosh \left\{ \frac{1}{k} \sqrt{\arg(X_P, Y_P)} \right\} - \cosh \left[\frac{a}{k} + \operatorname{arctanh}\left(\frac{2b}{L}\right) \right]$$

dove:

$$\arg(X_P, Y_P) = \left[X_P - \frac{X_a + X_b}{2} + k \operatorname{arctanh}\left(\frac{2b}{L}\right) \cos \alpha \right]^2 + \left[Y_P - \frac{Y_a + Y_b}{2} + k \operatorname{arctanh}\left(\frac{2b}{L}\right) \sin \alpha \right]^2$$

e dove per a, b e L si faccia riferimento alle (2.15).

3) Rappresentazione del terreno

Nel caso ci si riferisca ad un piano su cui è definita una sezione, si rappresenta il terreno come una retta passante per il caposaldo O_1 e che ha per inclinazione rispetto all'orizzonte quella della retta ottenuta tramite la regressione lineare dei punti delle semisezioni, dove a ciascun punto si assegna un peso inversamente proporzionale al quadrato della distanza dall'asse della linea misurata lungo l'asse orizzontale.

La funzione errore S tiene conto di quanto ciascuna retta appartenente al fascio centrato in O_1 si discosta dalla spezzata che rappresenta il terreno sul piano verticale definito dalla sezione. In particolare, se i vertici T_i della spezzata con cui si è rappresentato il terreno hanno coordinate (x_i, y_i) sul piano di calcolo e dove $T_0 \equiv O_1 \triangleq \text{caposaldo}$ si ha che:

$$S = S(a) = \sum_{i=-n.p.sez}^{n.p.sez} p_i [y_i - ax_i]^2 \quad \text{con } i \neq 0$$

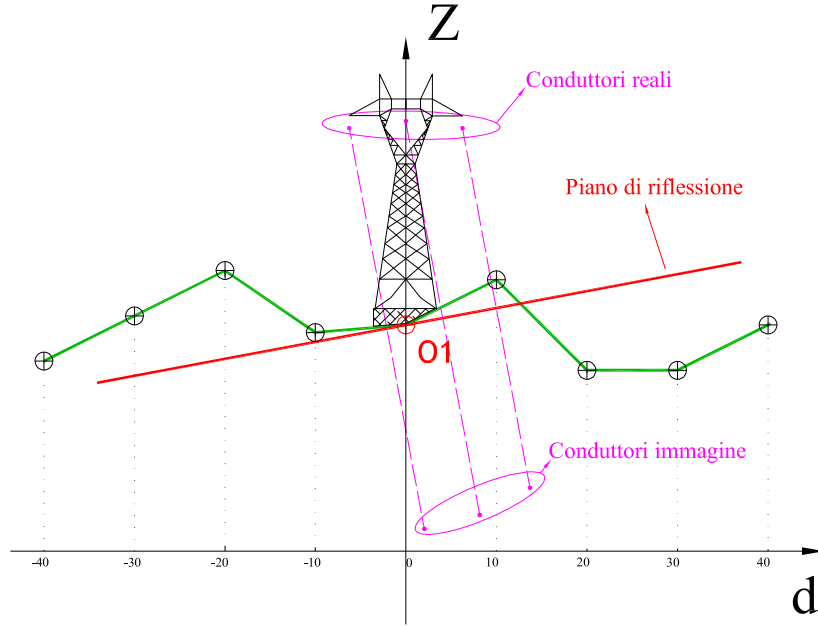


Figura 4.13: Posizionamento dei conduttori immagine

Dove p_i è la successione dei *pesi* che si vuole attribuire a ciascun punto di coordinate (x_i, y_i) .

Si cerca il minimo per S al variare di a , cioè impongo:

$$\frac{\partial S}{\partial a} = \sum_{i=-n_{p_sez} \atop i \neq 0}^{n_{p_sez}} p_i [2ax_i^2 - 2x_i y_i]$$

e quindi si determina:

$$a = \frac{\sum_{i=-n_{p_sez} \atop i \neq 0}^{n_{p_sez}} p_i x_i y_i}{\sum_{i=1}^{n_{p_sez}} p_i x_i^2}$$

in particolare, riferendosi alla struttura “sezione” descritta nel paragrafo 4.2.2, assumendo $p_i = \frac{1}{i^2}$, separando le somme per indici positivi

e negativi ed eseguendo le semplificazioni del caso:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^{n-p-sez} \frac{D_{sez} Z_{sez_d} [i-1]}{i} + \sum_{i=1}^{n-p-sez} \frac{D_{sez} Z_{sez_s} [i-1]}{i}}{2 \sum_{i=1}^{n-p-sez} D_{sez}^2}$$

La particolare successione dei pesi è stata scelta affinché la retta che rappresenta il terreno sulla sezione sia più aderente alle parti di spezzata di vertici (x_i, y_i) vicine al caposaldo piuttosto che a parti della stessa linea che rappresentano porzioni di terreno lontane da O_1 . Per i tipi di sostegni utilizzati infatti lo sbraccio laterale, o meglio la distanza dei punti di sospensione dei conduttori laterali rispetto all'asse verticale del sostegno, *non supera mai i 10 metri* e quindi ci si aspetta che, volendo forzare la geometria del terreno fino ad assumerla piana, sia l'andamento del terreno circostante il sostegno a determinare la posizione delle immagini nel modello semplificato costruito.

4) Posizionamento dei conduttori immagine

Per determinare la posizione sul piano verticale dei punti che rappresentano i conduttori immagine, si utilizzano semplici relazioni geometriche. Riferendosi alla figura 4.14, una volta note le coordinate del punto P , quelle del *caposaldo* O_1 ed il coefficiente angolare $\arctan \vartheta$ della retta passante per O_1 con cui si rappresenta il terreno sulla sezione considerata, si ricava la posizione I del conduttore immagine relativo al conduttore passante per P :

$$I = P - 2(P - T)$$

dove:

$$(P-T) = |P-O_1| \sin(\varphi-\vartheta) \cos(\pi/2-\vartheta) [\hat{i}_c \times \hat{z}] + |P-O_1| \sin(\varphi-\vartheta) \sin(\pi/2-\vartheta) \hat{z}$$

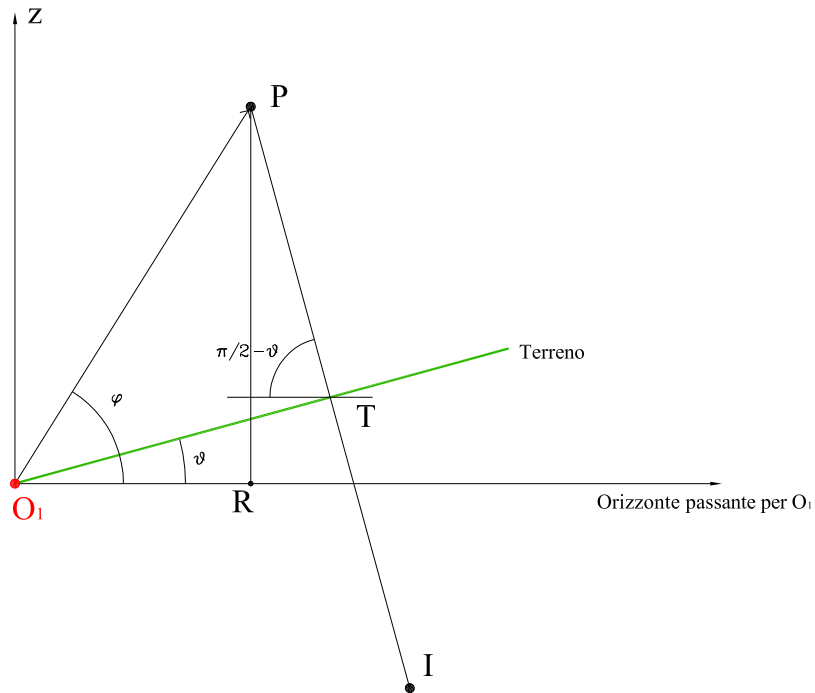


Figura 4.14: Determinazione della posizione dei conduttori immagine

ed $\hat{i}_c$ è il versore che individua la direzione dei conduttori rettilinei indefiniti.

Le sorgenti di campo elettrico

Per quanto già detto, i tratti interrati non vengono considerati come sorgenti di campo elettrico; i conduttori interrati sono infatti immersi in un mezzo *conduttore* dal quale si può supporre che il campo elettrico venga totalmente schermato.

Il particolare tipo di sostegno utilizzato per le transizioni aereo-interrato e interrato-aereo permette di trascurare come sorgenti di campo elettrico anche le strutture “raccordo”. Come si vede in figura 4.15, i conduttori corrono all’interno della struttura metallica del sostegno; si può quindi ragionevol-

mente supporre che le linee di forza del campo elettrico che si dipartono dai conduttori in tensione si richiudano sulla struttura metallica, collegata a terra.

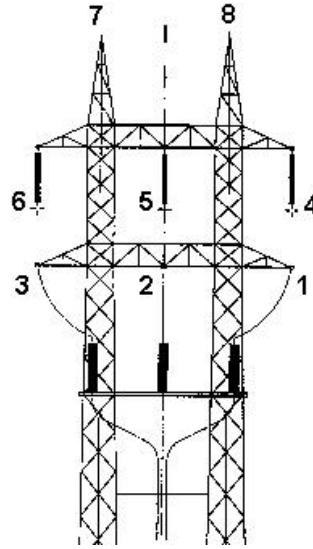


Figura 4.15: Sostegno di transizione

Le uniche sorgenti di campo elettrico sono dunque le *campate aeree* di ciascuna linea; le catenarie che compongono ciascuna campata aerea non sono considerate come sorgenti a sé stanti; ciò è evidente dalla discussione del paragrafo 4.1.2 ed in particolare dall'espressione (4.8) in cui le densità lineari di carica u_k sui conduttori reali dipendono dalla disposizione mutua dei conduttori, cioè dalla posizione di ciascuno rispetto agli altri.

I conduttori utilizzati nell'algoritmo di calcolo sono quelli del *modello semplificato* cioè sono rettilinei, indefiniti e orizzontali; quindi le strutture “catenaria” che compongono ciascuna campata aerea non sono direttamente utilizzate nel calcolo. In base al loro sviluppo, si determina però la posizione dei conduttori rettilinei indefiniti da utilizzare nei calcoli.

Il calcolo del campo elettrico generato da una campata aerea

Data una campata aerea (rappresentata sul piano xy dal suo asse longitudinale) e dato un punto $Q = (X_q, Y_q, Z_q)$ per cui il punto più vicino della campata considerata non sia uno degli estremi del segmento che la rappresenta sul piano xy , si descrive adesso la procedura logica per la determinazione del campo elettrico $\vec{E}(Q)$ che la campata genera in Q .

1. Si determina il piano di calcolo o *sezione normale* che è il piano verticale trasversale alla campata passante per Q ;
2. si individua il sistema di riferimento su tale piano che ha l'asse z verticale diretta verso l'alto e l'asse x orizzontale diretta come $\hat{i}_z \times \hat{i}_{campata}$ dove $\hat{i}_{campata}$ giace lungo l'asse longitudinale della campata ed è diretto nel senso della numerazione progressiva crescente dei sostegni della linea a cui la campata appartiene. L'origine del sistema di riferimento è il caposaldo $O1$ della sezione definita sul piano verticale considerato;
3. si procede alla determinazione delle intersezioni delle catenarie che modellano i conduttori con la sezione normale, come descritto al punto 2 (Determinazione delle intersezioni conduttori-sezione normale);
4. si procede alla rappresentazione del terreno come descritto al punto 3 (Rappresentazione del terreno);
5. si determina la posizione dei conduttori immagine come descritto al punto 4 (Posizionamento dei conduttori immagine);
6. riferendosi alle espressioni del paragrafo in cui è esposto l'algoritmo di calcolo per il campo elettrico, si riempie la matrice d_{ij} delle distanze, si ricava quindi la matrice M_{ij} (4.16) e la si inverte (4.17);

7. si ricavano i termini u_k (4.18) e, sostituendoli nella (4.8), si determina finalmente il campo cercato.

Il calcolo del campo elettrico generato da una linea singola

Il calcolo del campo elettrico generato da una linea si ridurrà in realtà a quello generato dalla campata della linea che interseca il piano di calcolo considerato e si articolerà dunque nei seguenti passi:

- determinazione del piano di calcolo individuato dal punto potenziato o coincidente con quello della sezione considerata
- determinazione della campata che interseca il piano di calcolo considerato
- calcolo del campo generato dalla campata determinata come descritto nel precedente paragrafo.

Linee parallele

In alcuni casi è necessario considerare allo stesso tempo due o più linee parallele. È il caso per esempio di una linea doppia terna o meglio di tratti più o meno lunghi in cui due terne relative a due diverse linee condividono gli stessi sostegni.

Visto che le linee costruite all'inizio della sessione di calcolo sono singola terna ed indipendenti, è necessario fornire al codice un'informazione supplementare, cioè un indice, positivo o negativo, che tenga conto dello sfalsamento del progressivo delle campate delle due linee, in quanto non è detto che la prima campata di una linea sia appaiata alla prima dell'altra e via dicendo. Quindi *si costruisce una campata fittizia che comprende i conduttori di entrambe le linee* e si determina il campo da essa generato come descritto

in un precedente paragrafo (“Il calcolo del campo elettrico generato da una campata aerea”).

4.2.7 La ricerca di punti caratterizzati da valore di campo assegnato

Nei paragrafi precedenti si è descritto come viene determinata l'ampiezza del campo elettrico e dell'induzione magnetica in un punto di coordinate assegnate. Per eseguire lo studio di impatto ambientale nei termini preposti, è necessario però operare in senso logicamente opposto, predisponendo delle procedure che individuino il punto o il luogo dei punti ("linea isocampo") in cui l'ampiezza del campo assuma un valore assegnato.

La procedura con cui si determina l'andamento delle linee isocampo è analoga per il vettore induzione magnetica e per il campo elettrico e può quindi essere descritta in modo del tutto generale.

Nel corso di una generica sessione di calcolo, per determinare l'andamento delle linee isocampo si creano le sezioni relative alla linea primaria muovendosi lungo l'asse della linea con un passo prefissato, leggendo le informazioni necessarie da un apposito file di testo; si effettua la ricerca dei punti in cui si raggiunge il valore di campo cercato muovendosi sul piano trasversale alla linea su cui la sezione giace, seguendo il profilo del terreno di cui la sezione tiene traccia; si salvano i risultati in un file di testo di uscita; si distrugge infine la sezione creata.

È importante sottolineare che *le sezioni vengono utilizzate una alla volta* e quindi vengono create, utilizzate e distrutte una dopo l'altra.

Le informazioni necessarie alla loro costruzione, ed in particolare le quote dei punti appartenenti a ciascuna sezione, sono memorizzate in un file di testo che viene creato, una volta per tutte, da una procedura automatica che consulta il modello del terreno (paragrafo 3.2.1).

L'utilizzo delle funzioni di ricerca presuppone che siano state istanziate tutte le linee di interesse; dunque ogni sessione di calcolo si apre con la

consultazione dell'archivio e la costruzione degli oggetti linea si cui si vuole lavorare e si conclude con la loro distruzione.

Le funzioni per la determinazione delle linee isocampo accettano come parametri le seguenti informazioni:

- l'identificativo e l'indirizzo di memoria dell'oggetto linea lungo cui si vogliono tracciare le linee isocampo (“linea primaria”);
- il valore in modulo del campo per cui si vogliono tracciare le linee isocampo;
- gli indici della prima e dell'ultima campata della linea primaria lungo cui tracciare le linee isocampo;
- gli identificativi e gli indirizzi di eventuali altre linee (secondarie) da includere nel computo del campo.

Un diagramma di flusso in cui si distinguono più in dettaglio le principali fasi di ciascuna sessione di calcolo è riportato in figura 4.20.

Ricerca del punto a campo assegnato sul piano definito dalla generica sezione

Il risultato della ricerca di punti caratterizzati da un certo valore di modulo di campo consiste nell'insieme delle coordinate (x, y, z) di detti punti; per determinare le coordinate di ciascun punto, si dovrà dunque risolvere un problema a tre gradi di libertà.

Ogni ricerca avviene però su un piano verticale individuato da una sezione del terreno e ciò riduce a due i gradi di libertà.

Ciascuna sezione è stata definita per consentire la rappresentazione del terreno sul piano verticale corrispondente. Poiché desideriamo determinare

le coordinate dei punti in cui si raggiunge un determinato valore del modulo di campo *caratterizzati da una altezza dal suolo assegnata*, si ha una ulteriore diminuzione dei gradi di libertà della ricerca.

In definitiva, per individuare univocamente un punto caratterizzato da una certa altezza dal suolo, che sia giacente su un piano su cui è definita una sezione, è necessario specificare solo la sua distanza d in metri dall'asse della linea (definita sul piano orizzontale).

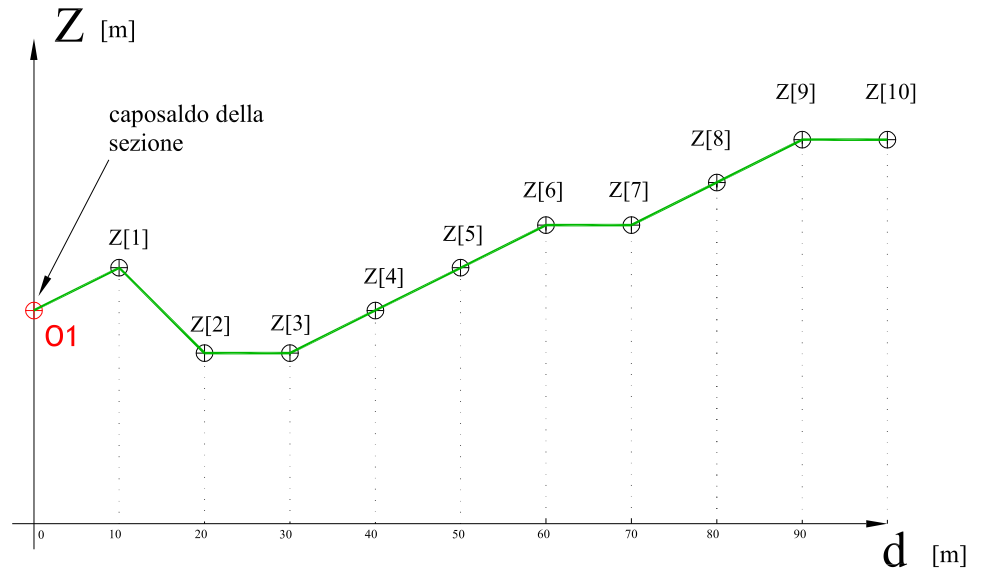


Figura 4.16: Profilo del terreno ricavato da una semisezione

Riferendosi alla figura 4.16, note le coordinate del caposaldo della sezione $O1 = (X_{O1}, Y_{O1}, Z_{O1})$, noto il versore che determina la direzione ortogonale alla linea $\hat{i}_{sezione}$ che insieme a $O1$ definisce l'asse d , nota la coordinata d

lungo tale asse ed assunto che $D_{sez} = 10 \text{ m}$ si ha che:

$$\begin{cases} X_P = X_{O1} + d(\hat{i}_{sezione} \cdot \hat{i}_x) \\ Y_P = Y_{O1} + d(\hat{i}_{sezione} \cdot \hat{i}_y) \\ Z_P = \zeta(d) \end{cases} \quad (4.23)$$

dove se d non è un multiplo di D_{sez} , allora $\zeta(d)$ è l'ordinata della retta di regressione passante per i due punti della sezione “più vicini”, di cui si conosce la quota (cioè quelli relativi ad ascisse pari al multiplo di D_{sez} immediatamente maggiore di d e a quello immediatamente minore).

Fissata la sezione su cui si effettua la ricerca e fissata l'altezza dal suolo, per individuare univocamente un punto Q in $\mathbb{R}^3$ è sufficiente specificare la sua distanza d dall'asse verticale della sezione, misurata sul piano orizzontale.

I campi da calcolare dipendono, fissate le sorgenti (e nel caso del campo elettrico, fissato il profilo del terreno), dalle coordinate del punto in cui si calcolano.

Il problema da risolvere si pone quindi in questi termini: per determinare le coordinate dei punti appartenenti alla sezione e caratterizzati da una certa quota sul terreno, in cui il modulo del campo raggiunga un valore assegnato C , si devono trovare gli zeri della funzione:

$$g(d) = f(d) - C$$

dove $f(d) : \mathbb{R} \longrightarrow \mathbb{R}$ è la funzione “*modulo del campo sulla sezione, per una altezza dal suolo assegnata*”.

Ovviamente la funzione $f(d)$ non è disponibile in forma esplicita, ma è l'implementazione numerica degli algoritmi precedentemente descritti (paragrafi 4.1.1 e 4.1.2).

La figura 4.17 si riferisce al calcolo dell'induzione magnetica su una sezione in cui si risente pesantemente di una linea “secondaria” posta in direzione

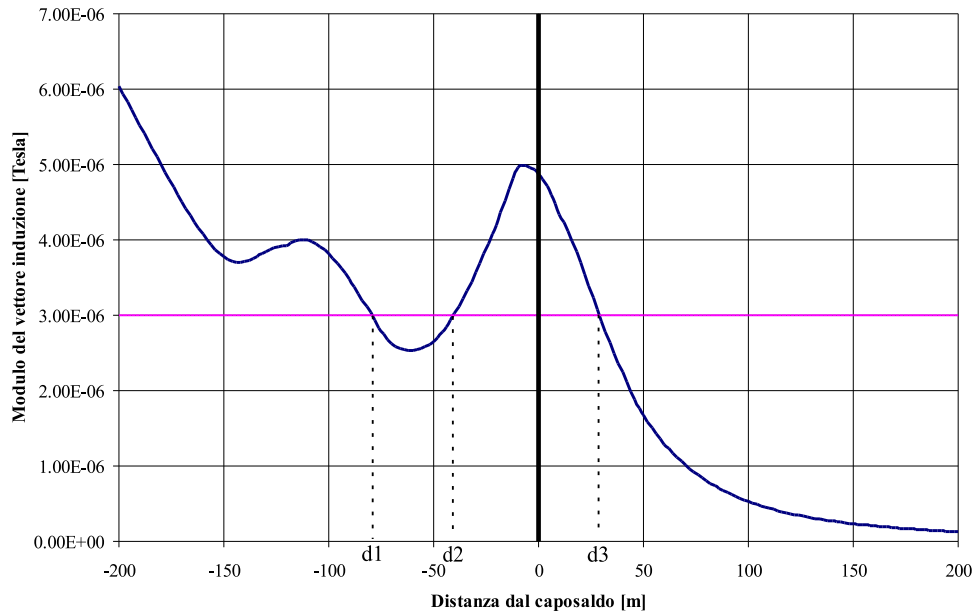


Figura 4.17: Ricerca su una sezione dei punti in cui $|B| = 3$ microtesla

delle distanze negative; in particolare si ricercano i punti in cui il modulo dell'induzione è pari a 3 microtesla.

La scelta del sistema di riferimento sul piano verticale della sezione si basa su considerazioni analoghe a quelle effettuate per il calcolo del campo elettrico generato da una campata aerea (si veda in particolare il punto 2 a pagina 156).

In effetti la ricerca avviene separatamente per distanze dall'asse positive e negative; nel caso della figura 4.17 prima si sarebbe trovato $d3$ (d positive) e poi $d1, d2$ (d negative).

Ciascuna ricerca ha due fasi distinte; consideriamo ad esempio quella per $d \geq 0$:

1. si calcola il campo sulla sezione ad intervalli regolari partendo da $d = 0$, incrementando d (ad ogni passo di una quantità fissata Δd) fino a rag-

giungere il limite estremo della sezione (la distanza massima dall'asse per cui esiste ancora la sezione);

2. si raffina la ricerca (con un algoritmo ricorsivo di bisezione) solo negli intervalli in cui la fase precedente ha rilevato la presenza di un punto in cui il campo assume il valore cercato (nel seguito “punto di zero”).

In entrambi i passi si ricorre alle (4.23) per ricavare le coordinate (x, y, z) di ciascun punto in cui si calcola il campo. Scendendo ancora più in dettaglio:

- **Fase 1:** La procedura riceve come parametri l'altezza dal suolo per cui effettuare la ricerca, il valore di campo cercato e l'ampiezza dell'incremento Δd . Poiché la ricerca viene effettuata su una particolare sezione, non è necessario indicare quali linee elettriche debbano essere considerate nel calcolo dei campi perché queste sono informazioni direttamente legate alle sezioni. La procedura restituisce il numero di volte che ha registrato un intervallo i cui due estremi sono caratterizzati da valori di campo uno maggiore ed uno minore del valore cercato e le distanze che costituiscono gli estremi inferiori e superiori di tali intervalli.
- **Fase 2:** La procedura riceve come parametri l'estremo superiore ed inferiore d_s e d_g di un intervallo di distanze in cui si presume ci sia un punto di zero, il valore cercato, l'altezza dal suolo ed una risoluzione in metri da raggiungere. In pratica la procedura cerca il valore della variabile indipendente x per cui la funzione $f(x)$ assume un valore determinato. La procedura sfrutta un algoritmo ricorsivo di bisezione dell'intervallo di ricerca e si arresta quando l'ampiezza dell'intervallo di ricerca diventa inferiore all'accuratezza richiesta, in seguito controlla che il valore di campo ottenuto nel punto determinato avvicini sufficien-

temente quello cercato (scarto tollerato $\leq 1\%$ del valore cercato), nel qual caso restituisce il valore di x [11].

Riferendosi alla figura 4.17 per $d \geq 0$ m con un $\Delta d = 50$ m la **Fase 1** avrebbe rilevato la presenza di uno “zero” nell’intervallo $d \in [0 \text{ m}, 50 \text{ m}]$ mentre nella **Fase 2** si sarebbe cercato il valore di $d3$ in tale intervallo.

Criterio di selezione delle linee secondarie

Ci chiediamo adesso quali campate delle linee secondarie per una data sezione vengono considerate significative ai fini del calcolo dell’induzione magnetica.

Esponiamo meglio il problema: ogni sezione è definita lungo una certa linea (detta *primaria* per la sezione), ma ciascuna sezione ha dei riferimenti ad altre linee (linee secondarie) che, trovandosi per alcuni tratti relativamente poco distanti, si suppone possano contribuire in modo significativo al campo calcolato sulla sezione considerata. Se durante i calcoli si considerasse ciascuna linea secondaria *per intero* si avrebbe un eccessivo allungamento dei tempi di calcolo; inoltre tale allungamento non si tradurrebbe in un apprezzabile miglioramento in termini di precisione: nel caso infatti la linea secondaria sia composta da molte campate, quelle più lontane disteranno dalla sezione sulla quale si eseguono i calcoli anche qualche chilometro. Si richiede quindi un criterio secondo il quale scartare le campate “lontane” appartenenti alle linee secondarie per la sezione ed includere invece nel calcolo quelle più vicine alla sezione stessa. Chiaramente tale criterio, nel caso della ricerca di punti a valore di campo fissato, dovrà dipendere dal valore di campo cercato; in altri termini si dovrà comunque garantire che l’aver trascurato alcune campate delle linee secondarie per la sezione, sia ininfluenza ai fini della ricerca dei punti “di isocampo”; ovvero si dovrà essere sicuri che le campate tra-

scurate non avrebbero contribuito al campo totale per più di una frazione trascurabile del valore di campo cercato.

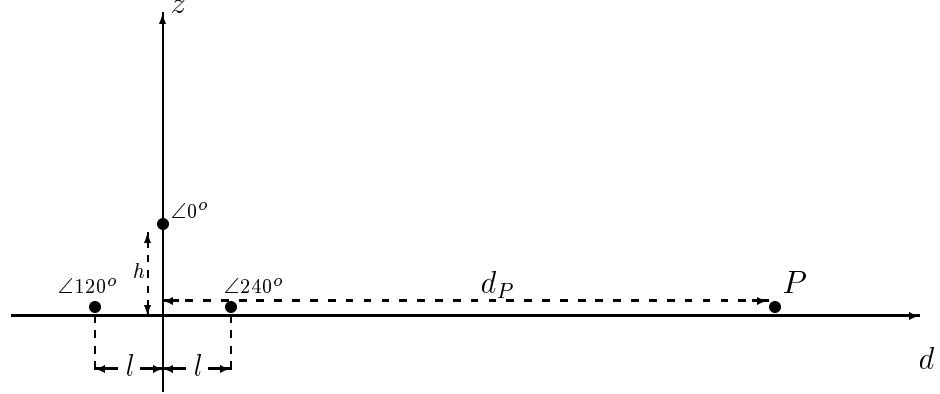


Figura 4.18: Criterio di selezione

Consideriamo la figura 4.18; supponiamo che $\angle 0^\circ$, $\angle 120^\circ$ e $\angle 240^\circ$ rappresentino i punti di intersezione di una generica terna di un elettrodotto con il piano del foglio dove i nomi dei punti sono indicativi anche della fase della corrente (di intensità I) che scorre su ciascuno di essi.

Se $d_P \gg h$ allora l'espressione per il modulo $|\vec{B}(P)|$ del campo generato in P dai tre conduttori (supposti rettilinei, indefiniti, ortogonali al foglio) sarà del tipo:

$$|\vec{B}(P)| = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left| \frac{1}{d_P} + \frac{e^{j\frac{2\pi}{3}}}{d_P + l} + \frac{e^{-j\frac{2\pi}{3}}}{d_P - l} \right|$$

dopo opportune semplificazioni:

$$|\vec{B}(P)| = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left| \frac{l(l + j\sqrt{3}d_P)}{d_P(d_P^2 - l^2)} \right|$$

posto quindi che $d_P \gg l$:

$$|\vec{B}(P)| \simeq \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{l\sqrt{3}}{d_P^2}$$

Considerando adesso la figura 4.19, siano S_1 ed S_2 gli estremi della sezione su cui si sta eseguendo la ricerca e P_1 , P_2 gli estremi della generica campata di una linea secondaria per la sezione di estremi S_1 ed S_2 .

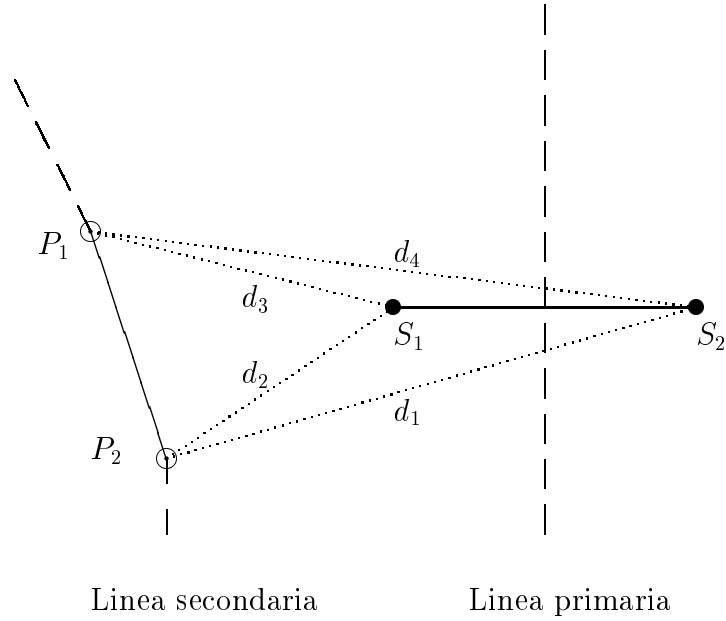


Figura 4.19: Criterio di selezione

Data la corrente I_s caratteristica della linea secondaria, per determinare se la campata di estremi P_1, P_2 deve essere considerata nei calcoli, si controlla se è verificata la disuguaglianza:

$$\frac{\mu_0 I_s}{2\pi} \frac{l\sqrt{3}}{d_p^2} \geq \frac{B_{cercato}}{50} \quad (4.24)$$

dove $B_{cercato}$ è il valore del modulo di $\vec{B}$ per cui si vuole tracciare la linea di isocampo ed il fattore 50 a denominatore significa che si ritiene accettabile scartare campate della linea secondaria che non contribuiscono per più del 2% del valore di campo cercato.

Per ciascuna campata di ogni linea secondaria della sezione si deve valu-

tare la (4.24) con quattro valori diversi per d_p , cioè:

$$d_1 = |S_2 - P2|$$

$$d_2 = |S_1 - P2|$$

$$d_3 = |S_1 - P1|$$

$$d_4 = |S_2 - P1|$$

se la (4.24) è verificata anche in uno solo dei quattro casi, allora la campata P_1, P_2 è considerata nei calcoli, altrimenti, se nessuna delle quattro disequazioni risulta verificata, la campata non viene considerata. Nella (4.24) il valore di l è pari alla distanza tra l'asse verticale del sostegno ed i punti di sospensione dei conduttori laterali, relativa al tipo di sostegno con “sbraccio laterale” più ampio fra quelli utilizzati per le linee a 380kV soggette a VIA.

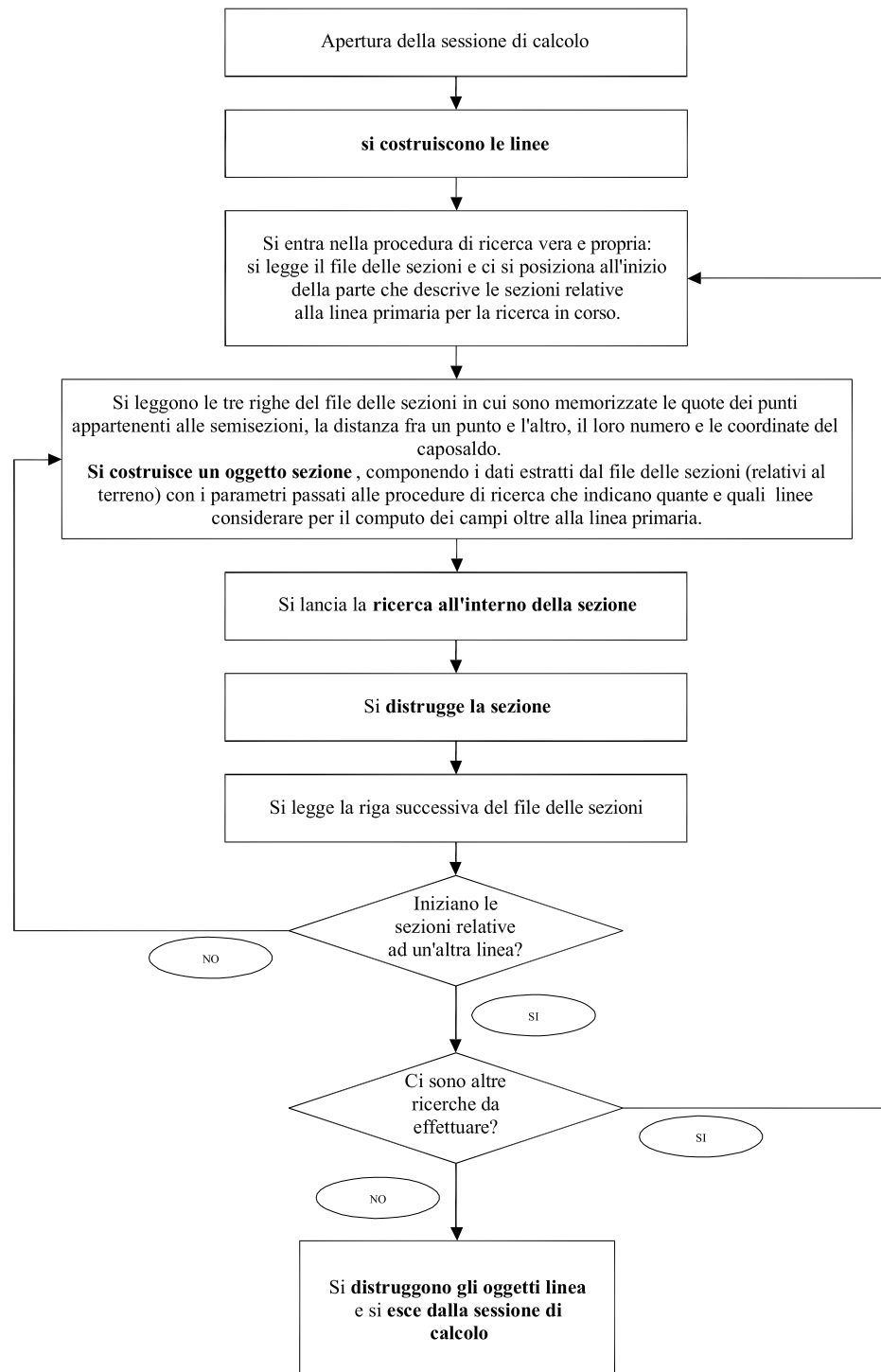


Figura 4.20: Fasi principali di ogni sessione di calcolo

4.3 Le Mappe di isocampo

Si intendono per mappe di isocampo delle *mappe tematiche* in cui alla cartografia di base, vengono sovrainpresse le curve di livello per i campi, relative ad alcuni valori ritenuti significativi, dove per "curva di livello" si intende il luogo dei punti in cui il campo assume un valore di intensità assegnato.

Le mappe di isocampo costituiscono la forma sintetica attraverso cui vengono presentati i risultati dello studio di impatto ambientale relativamente alla componente elettromagnetica. Esse si prestano ad essere consultate con diversi livelli di dettaglio: forniscono indicazioni puramente quantitative riguardo il livello di campo "al suolo" per ogni porzione di terreno considerata, ma consentono anche di effettuare considerazioni generali sulla distribuzione dei campi al variare delle caratteristiche tecniche degli elettrodotti, del loro numero e dell'andamento del terreno.

Per tracciare le linee isocampo non è richiesto alcun tipo di semplificazione se non quelle intrinseche ai modelli utilizzati durante i calcoli per le sorgenti e per il terreno anche se a questo proposito saranno necessarie alcune precisazioni riguardanti il campo elettrico.

In questo paragrafo verranno presi in considerazione gli aspetti tecnici relativi alla creazione delle mappe che riguardano sia quanto viene eseguito automaticamente, tramite applicazioni sviluppate a tale scopo, sia l'intervento "manuale", necessario per ottenere mappe complete.

4.3.1 Tecniche di tracciamento automatico

Ogni sessione di calcolo dei campi produce come risultato un file di testo in cui sono specificate le coordinate di tutti i punti in cui è stato rilevato il "*valore di campo cercato*". Questo file, denominato qui e nel seguito come "*file*

dei punti” è strutturato in modo da permettere di tracciare le linee isocampo relative al valore di campo cercato svincolandosi, per quanto possibile, dall’intervento manuale di un operatore.

Il file dei punti ha una struttura “a righe”; ogni riga è relativa ad una semisezione e riporta il numero e le coordinate dei punti su di essa in cui si è rilevato il valore di campo cercato. Si riporta di seguito un breve esempio del contenuto del file dei punti:

```
P 1 1672906.8 4847835.7 39
P 0 -1 -1 -1
P 1 1672888.4 4847828.5 39
P 0 -1 -1 -1
T 1 1672826.6 4847803.4 39.803711
T 1 1672927.9 4847586.6 41
P 1 1672808.2 4847796.3 40.706836
P 1 1672908.4 4847581.7 40
P 1 1672789.8 4847788.2 39
P 1 1672889.3 4847575.1 40
```

Poiché il codice di calcolo costruisce i propri modelli per sorgenti e terreno attingendo ad archivi georeferenziati secondo il sistema cartografico nazionale, le coordinate indicate adottano il sistema Gauss-Boaga.

Per tracciare le linee isocampo si considerano i punti di isocampo trovati su un’intera sezione e dunque il contenuto di due delle righe del file dei punti.

La prima operazione eseguita dalle procedure automatiche sviluppate è quella di “disegnare” *tutti i punti le cui coordinate sono memorizzate nel file di testo*, su un livello indipendente di un nuovo file Autocad (tipo dwg), che chiameremo *“file dei risultati”*. In seguito ha luogo la fase di tracciamento vera e propria, durante la quale i punti precedentemente posizionati vengono uniti con segmenti. Questa operazione non è eseguita indiscriminatamente, ma solo quando esiste la ragionevole sicurezza che i risultati ottenuti siano significativi. In particolare, per decidere in quali circostanze procedere al

tracciamento ed in che modo, ci si riferisce al *numero di punti trovati su ogni sezione*.

Le due situazioni in cui si procede col tracciamento delle linee isocampo sono quelle in cui siano stati trovati due o quattro punti di isocampo su più sezioni del terreno successivamente estratte lungo l'asse di una linea elettrica. Qualora si riscontri un numero di punti differente le linee non vengono tracciate o vengono interrotte se sulle sezioni precedenti si erano riscontrati due o quattro punti.

L'algoritmo utilizzato per il sezionamento del terreno, esposto nel paragrafo 3.3.4, fa sì che non ci si debba preoccupare dei cambi di direzione della linea in quanto evita generalmente le sovrapposizioni fra sezioni.

La condizione di due punti per sezione generalmente è relativa all'induzione magnetica mentre quella di quattro punti per sezione si riferisce normalmente al campo elettrico. Ovviamente si possono verificare situazioni molto differenti al variare delle caratteristiche tecniche delle linee, della morfologia del terreno, ma soprattutto del numero e della disposizione delle linee che contribuiscono significativamente ai campi.

In ogni caso, per ottenere delle mappe di isocampo complete, è necessario intervenire manualmente, quantomeno per chiudere le linee isocampo; per intervento manuale si intende la modifica delle caratteristiche del file dei risultati mediante l'utilizzo di un'interfaccia CAD.

4.3.2 Caratteristiche generali delle linee isocampo

Le procedure di tracciamento delle linee isocampo non sono del tutto automatiche ma richiedono di essere completate attraverso un intervento manuale. Per eseguire correttamente tale intervento è necessario conoscere quali siano le caratteristiche delle linee isocampo, specialmente per affrontare situazioni

critiche quali quelle legate alla presenza di più elettrodotti non paralleli tra loro che contribuiscono significativamente ai campi sulla stessa sezione.

Il procedimento con cui vengono determinate le linee isocampo fa sì che ci si possa riferire a delle caratteristiche semplificate, che possono essere riassunte nelle seguenti:

1. le linee relative a valori diversi di campo non si possono mai incrociare;
2. le linee isocampo sono sempre linee chiuse;
3. le linee relative allo stesso valore di campo non possono presentare biforcazioni; più in generale non esistono dei nodi a cui afferiscano un numero dispari di rami della stessa linea di isocampo (figura 4.21.(a));
4. possono esistere nodi a cui afferiscono un numero pari di rami di linea relativi allo stesso valore di campo (figura 4.21.(b)).

Per quanto riguarda il campo elettrico l'aspetto della chiusura delle linee isocampo deve essere affrontato con particolare cautela, per cui se ne tratterà più in dettaglio.

La chiusura delle linee isocampo per il campo elettrico

A proposito dell'algoritmo di calcolo del campo elettrico si è detto che trascura la presenza dei sostegni i quali, essendo metallici, perturbano invece la distribuzione reale del campo. D'altra parte la distribuzione reale è influenzata anche dalla presenza di altri elementi presenti quali la vegetazione o gli edifici, che pure vengono trascurati.

Dato che l'algoritmo di calcolo per il campo elettrico trascura la presenza dei sostegni, le linee isocampo tracciate presso di essi dalle procedure automatiche non presentano caratteristiche diverse da quelle costruite in zone lontane dai sostegni.

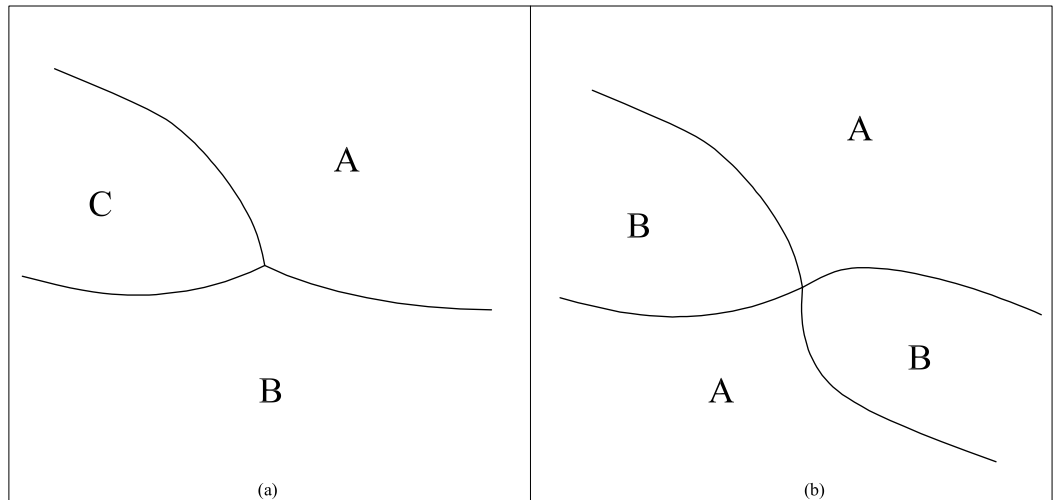


Figura 4.21: Caratteristiche delle linee isocampo

Il tracciamento delle linee isocampo può quindi essere effettuato ricalcando fedelmente il risultato dei calcoli e dunque trascurando la presenza dei sostegni, oppure prevedendo che le linee vengano richiuse “manualmente” presso i sostegni stessi.

Tale chiusura introduce nei risultati una componente in parte empirica ed in parte arbitraria; empirica perché si basa su un fatto fisicamente accertato e riscontrato in tutte le campagne di misura, arbitraria perché l’operatore effettua tale chiusura in modo logico ma di fatto svincolato da qualsiasi elemento ricavato dal calcolo.

Nonostante la componente arbitraria introdotta si è preferito richiudere manualmente le linee isocampo; si è ritenuto infatti che non fosse accettabile indicare dei valori di campo superiori ad 1 kV/m laddove in realtà è noto che si misurano al massimo poche decine di V/m.

Al di là della particolare scelta adottata per lo studio svolto, entrambe le alternative sono da considerare accettabili; questa parziale ambiguità può

essere tollerata, solo perché il campo elettrico riveste un'importanza relativamente bassa ai fini dei risultati dello studio. Ciò è dovuto principalmente al fatto che il campo elettrico non viene preso in considerazione come possibile agente patogeno, a differenza dell'induzione magnetica; si deve inoltre tener conto che i risultati relativi al campo elettrico sono comunque affetti da notevole incertezza in quanto vengono trascurati elementi come la vegetazione, le asperità del terreno, o i manufatti in genere, che possono contribuire localmente in misura significativa.

4.4 Verifiche

Il nuovo programma di calcolo, essendo mirato all'esecuzione di studi VIA, è stato sviluppato ponendo particolare attenzione al calcolo dell'induzione magnetica ed è quindi logico che ci si riferisca al campo magnetico anche quando si vuole verificare quanto le novità introdotte diano risultati riscontrabili in termini di migliore accuratezza. Considerando poi che la tipologia di linea più frequente è quella aerea, è altrettanto naturale eseguire le verifiche considerando campate di linee aeree.

La nuova applicazione sviluppata introduce, rispetto a quelle precedentemente reperibili, molteplici innovazioni, quali:

1. le caratteristiche tecniche delle linee elettriche vengono attinte automaticamente dal relativo archivio, lasciando all'utente solo il compito di fissare alcuni parametri relativi alla simulazione da effettuare;
2. il programma permette di ricavare l'andamento di linee di isocampo *tenendo conto dell'andamento del terreno*;
3. per ogni linea viene costruito un modello tridimensionale nel quale ogni

conduttore è modellato con un insieme di segmenti che approssimano la curva secondo cui esso si dispone.

I primi due punti dell'elenco riguardano delle innovazioni tecniche e procedurali che aggiungono nuove possibilità, ma non implicano modifiche agli algoritmi di calcolo veri e propri. Al contrario l'adozione del modello tridimensionale per i conduttori determina un corrispondente adattamento dell'algoritmo di calcolo dell'induzione magnetica.

Vi sono due diversi modi in cui può essere utilizzato il modello tridimensionale per i conduttori:

- fissate le coordinate del punto Q in cui si vogliono calcolare i campi, si determina la posizione dei punti di intersezione fra la sezione normale alla linea passante per Q e le catenarie che modellano i conduttori, denominati nel seguito “*intersezioni catenaria-sezione*”; durante i calcoli si considerano dei conduttori rettilinei indefiniti orizzontali passanti per i punti così determinati;
- il modello tridimensionale definisce la curva (in questo caso l'insieme di segmenti) lungo cui integrare l'espressione di Biot-Savart in forma differenziale (4.1).

Poiché l'utilizzo nei calcoli di conduttori rettilinei indefiniti era caratteristico dei programmi precedenti al prototipo sviluppato in questa sede, si identifica quanto descritto al primo punto con il termine di “*vecchio approccio*”; ovviamente l'approccio descritto al secondo punto è denominato “*nuovo*” ed è quello utilizzato per il calcolo dell'induzione magnetica nel programma di cui si è descritto il funzionamento in questo capitolo.

Il nuovo approccio rappresenta meglio la realtà e conseguentemente darà risultati più accurati; è necessario però valutare se i miglioramenti raggiunti

in termini di accuratezza compensano le complicazioni ed il rallentamento subiti dalla fase di calcolo del campo magnetico.

Volendo paragonare i due approcci, si è scelto come situazione di riferimento quella di quattro campate di una linea aerea che si sviluppa su terreno piano ed orizzontale. Il sistema di riferimento scelto è centrato nel sostegno iniziale (S_1) la cui base ha dunque coordinate (0,0,0); i restanti sostegni S_2 , S_3 , S_4 , S_5 hanno coordinate rispettivamente pari a (400,0,0), (800,0,0), (900,100,0), (800,200,0). Mentre le prime due campate si succedono senza cambiare direzione (giacciono entrambe sull'asse x), fra la seconda e la terza campata c'è un angolo di $(\pi/4)$ mentre la terza e l'ultima formano un angolo pari a $(\pi/2)$.

Consideriamo inizialmente campate con un solo conduttore; tutti i punti di sospensione sono posti sulla verticale della base del relativo sostegno a 20 metri di quota, inoltre i conduttori hanno diversi parametri k di tesatura, come riportato in tabella 4.9, dove per “franco” si intende il franco minimo da terra e per “freccia” la freccia massima.

campata	lunghezza [metri]	dislivello [metri]	k [metri]	freccia [metri]	franco [metri]	corde
$S_1 S_2$	400	0	2000	10	10	8
$S_2 S_3$	400	0	1500	14,4	6,6	16
$S_3 S_4$	341	0	1000	2,5	17,5	8
$S_4 S_5$	341	0	1000	2,5	17,5	8

Tabella 4.9: Caratteristiche delle campate

Le linee isocampo della figura 4.22 sono relative ai valori 5, 10, 15, 25 e 35 microtesla; nella parte superiore del grafico sono riportate quelle determinate calcolando i campi secondo il nuovo approccio, mentre in quella inferiore secondo il vecchio.

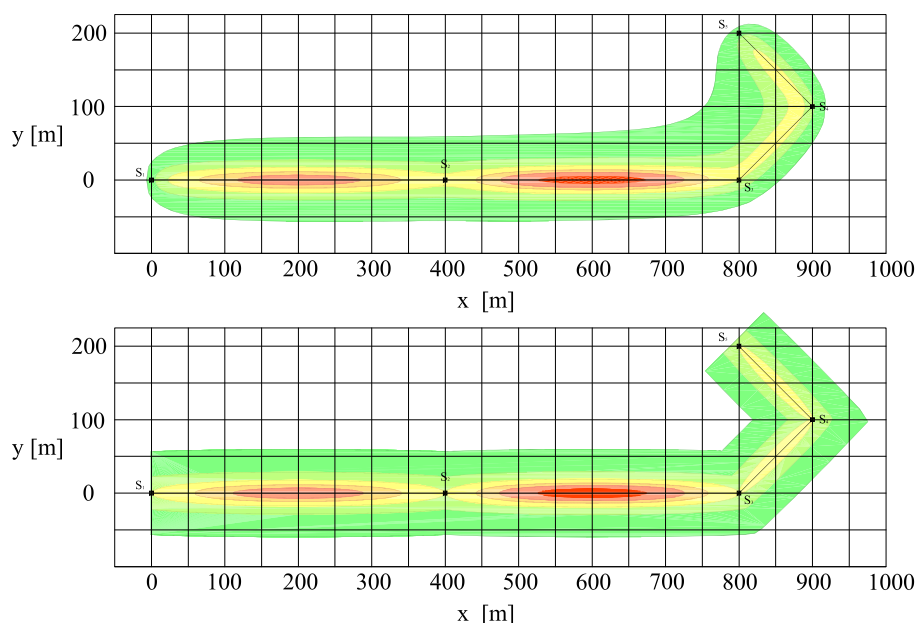


Figura 4.22: Mappe di isocampo per vecchio e nuovo approccio

Ciò che meglio si apprezza su questo grafico è la perdita di simmetria, rispetto all'asse della linea, della distribuzione dei campi ottenuta secondo il nuovo approccio in corrispondenza dei cambi di direzione della linea.

Secondo il vecchio approccio, si calcola l'induzione considerando in questo caso sempre un solo conduttore rettilineo ed indefinito che modella la campata della linea più vicina; la distribuzione del campo conserverà localmente la simmetria rispetto all'asse della campata del conduttore rettificato utilizzato.

Secondo il nuovo approccio invece, quando si calcola l'induzione presso un sostegno della linea, si risente del contributo delle campate sia a monte sia a valle del sostegno e ci si aspetta che la natura vettoriale dei campi determini dissimmetrie rispetto all'asse delle campate come infatti si osserva

sulle mappe di isocampo nell'esempio riportato, per ascisse superiori a 700 metri.

Anche dove le campate si succedono senza cambi di direzione, si possono notare alcune differenze tra i risultati ottenuti con i due approcci; per esempio, presso S_2 , le linee isocampo a 15 microtesla, mentre per il vecchio approccio si richiudono a monte ed a valle del sostegno, per il nuovo approccio rimangono “aperte”.

Le differenze più evidenti sono però quelle relative a valori bassi di induzione, specialmente in corrispondenza del primo e dell'ultimo sostegno. Laddove la linea termina, la distribuzione del campo ottenuta secondo il nuovo approccio rappresenta bene ciò che ci si aspetta accada in realtà, per cui, dove terminano i conduttori, le linee di isocampo tendono a richiudersi. Le linee isocampo a 5 e 10 microtesla ottenute secondo il vecchio approccio sono invece state troncate e chiuse manualmente laddove queste sarebbero continuate a causa della lunghezza indefinita del conduttore utilizzato per i calcoli.

Nella figura (4.23) si prende in considerazione l'andamento dell'induzione magnetica calcolato lungo l'asse delle campate secondo il nuovo ed il vecchio approccio, mentre in figura 4.24 si prende in considerazione lo scostamento relativo tra i profili dell'induzione della precedente figura 4.23, dove per scostamento relativo si intende:

$$\frac{|\vec{B}_{vecchio}| - |\vec{B}_{nuovo}|}{|\vec{B}_{nuovo}|}$$

e dove si indica con $\vec{B}_{vecchio}$ l'induzione calcolata secondo il vecchio approccio e con $\vec{B}_{nuovo}$ l'induzione calcolata secondo quello nuovo.

Procedendo lungo l'asse longitudinale della linea ed indicando con “ l ” l'ascissa lineare che descrive questo avanzamento si nota quanto segue:

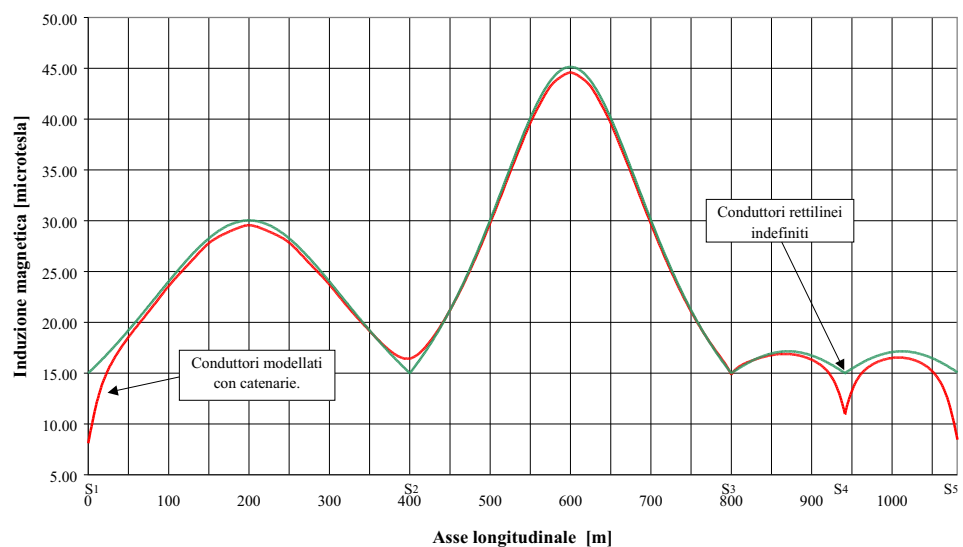


Figura 4.23: Profili dell'induzione magnetica lungo l'asse delle campate relativi al “vecchio” ed al “nuovo approccio”: conduttore singolo

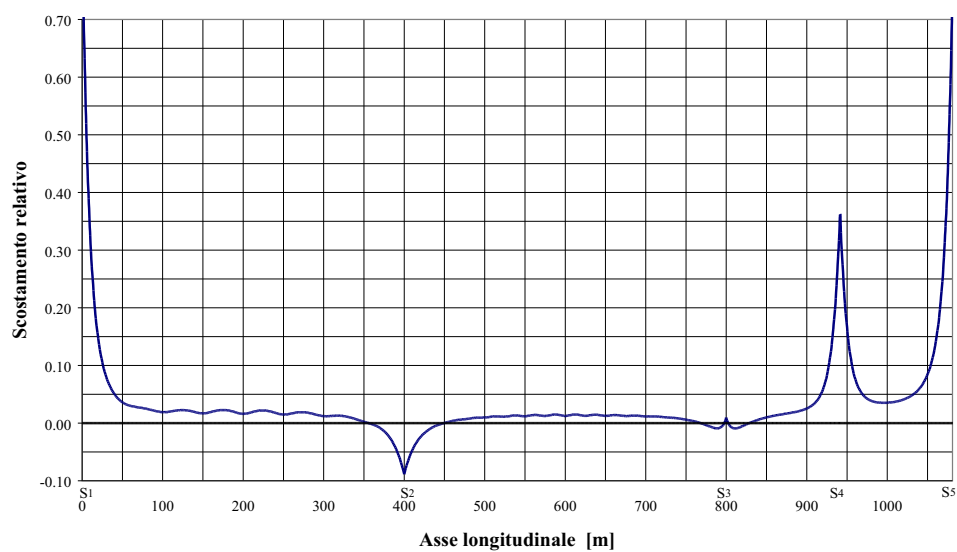


Figura 4.24: Scostamento relativo fra i profili dell'induzione magnetica relativi al “vecchio” ed al “nuovo approccio”

- 1) $l = 0$ (S_1): sovrastima del vecchio approccio rispetto al nuovo principalmente per effetto della lunghezza indefinita del conduttore utilizzato per i calcoli (figura 4.25 (a));
- 2) $100 < l < 300$ $500 < l < 700$: i campi generati dal conduttore rettilineo indefinito sono maggiori di quelli calcolati secondo il nuovo approccio (3% circa in più); sul grafico dei campi ciò è più evidente nel punto centrale della campata, ma, come si nota in figura 4.24, la sovrastima è dell'ordine del 3% su tutto l'intervallo indicato (figura 4.25 (c) e (d)).
- 3) $l = 400$ (S_2): il punto della catenaria per cui viene fatto passare il conduttore rettilineo indefinito del vecchio approccio è il punto di sospensione (S_2) ed è dunque il punto più alto di tutta la catenaria. In questo caso col vecchio approccio si trascura l'abbassamento dei conduttori che si dispongono secondo la catenaria corrispondente (figura 4.25 (b)) e quindi si sottostima il campo;
- 4) $l = 941$ (S_4): la linea subisce un cambio di direzione ad angolo retto; col nuovo approccio si risente fortemente della sovrapposizione dei contributi delle campate a monte e a valle di S_4 che si sommano in modo vettoriale dando luogo alla cancellazione di componenti discordi; al contrario col vecchio approccio non si verifica alcuna cancellazione in quanto si considera un solo conduttore rettilineo e non più segmenti conduttori. È da notare che, trovandosi presso un sostegno, si ripetono le condizioni descritte al punto precedente ma gli effetti che si erano osservati presso S_2 sono trascurabili rispetto a quelli legati al cambio di direzione della linea;
- 5) $l = 800$ (S_3): la linea subisce un cambio di direzione di 45° ; in questa situazione si verifica una sovrapposizione ed un bilanciamento fra le

due tendenze osservate presso i sostegni S_2 ed S_4 . Come presso S_2 il conduttore rettilineo del vecchio approccio passa per il punto di sospensione della catenaria e quindi l'induzione al suolo tende ad essere più bassa di quella calcolata secondo il nuovo approccio (si veda il punto 2). D'altra parte il cambio di direzione fa sì che i contributi legati alle diverse campate, sommati vettorialmente, diano luogo a delle parziali cancellazioni come presso il sostegno S_4 (punto 4).

Come si vede in figura 4.24 avvicinandosi al sostegno, ad una cinquantina di metri da esso, si comincia a notare l'effetto dell'innalzamento del conduttore indefinito che, come presso S_2 determina il passaggio a valori negativi dello scostamento relativo. Avvicinandosi ulteriormente al sostegno però la tendenza si inverte e l'andamento dello scostamento assume la forma che caratterizzava la situazione presso il sostegno S_4 . La composizione di queste due tendenze fa sì che lo scostamento fra i due diversi approcci rimanga comunque contenuto.

La situazione a cui si è fatto riferimento per paragonare i due approcci è caratterizzata da campate con un solo conduttore; questa è una circostanza che non si verifica mai per linee elettriche reali ma che è stata considerata per cercare un approccio graduale all'analisi trascurando, almeno inizialmente, gli effetti della presenza di più conduttori.

A questo punto dunque è interessante considerare le differenze tra i risultati ottenuti con vecchio e nuovo approccio nel caso di campate con 3 conduttori sui quali scorrono correnti della medesima ampiezza ma sfasate l'una rispetto all'altra di un terzo di periodo. I punti di sospensione di ciascun sostegno sono posti tutti alla stessa quota sul terreno (20 metri) e sono distanziati l'uno dall'altro di 5 metri. Presso i sostegni S_2 ed S_4 i piani di giacenza dei punti di sospensione coincidono con i piani verticali definiti dalla

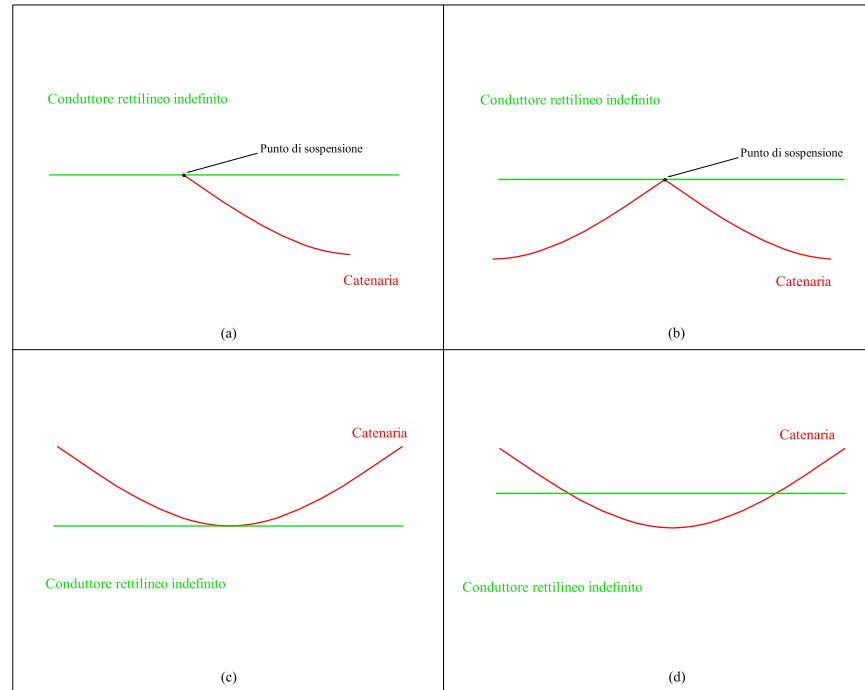


Figura 4.25: Posizionamento del conduttore rettilineo indefinito

bisettrice dell'angolo fra le due campate, mentre ciò non avviene presso S_3 e, come si vedrà, ciò avrà ripercussioni sull'andamento dei campi al suolo.

Ciò che a priori ci si potrebbe aspettare in questa situazione è di ritrovare degli andamenti simili ai precedenti ma riportati a valori di campo più bassi per effetto delle cancellazioni fra i contributi legati alle diverse fasi della linea. Ci si aspetterebbe dunque una contrazione delle linee isocampo che, a parità di valore, si dovrebbero avvicinare all'asse della linea e una traslazione verso il basso di tutti i profili di campo. Per lo scostamento relativo fra i due approcci, ci si potrebbe invece aspettare una sostanziale conferma dell'andamento relativo a campate con un solo conduttore.

Come si nota nelle figure 4.26 e 4.27, ciò che ci si aspettava è sostanzial-

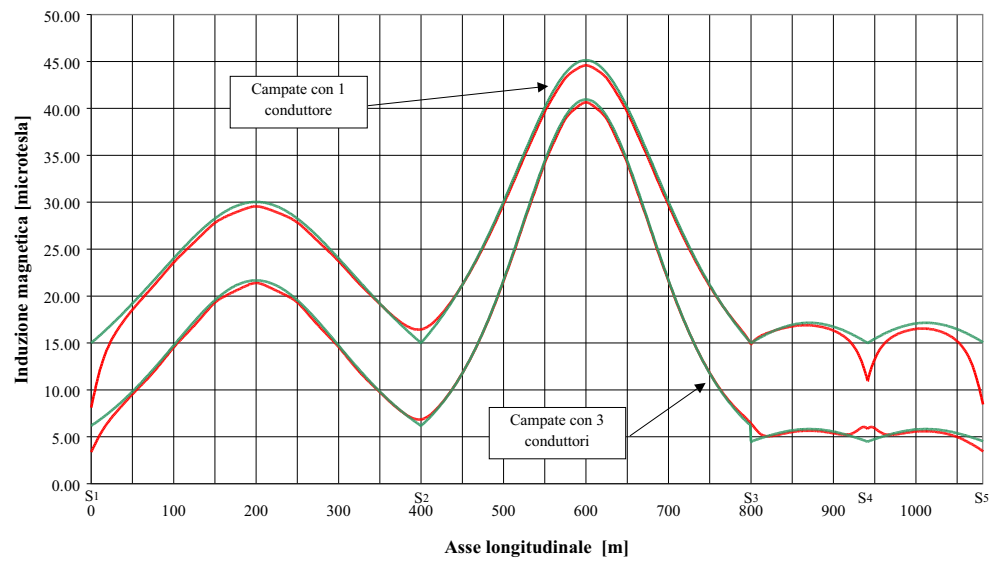


Figura 4.26: Profili dell'induzione magnetica relativi al “vecchio” ed al “nuovo approccio”: conduttore singolo e linea a tre conduttori

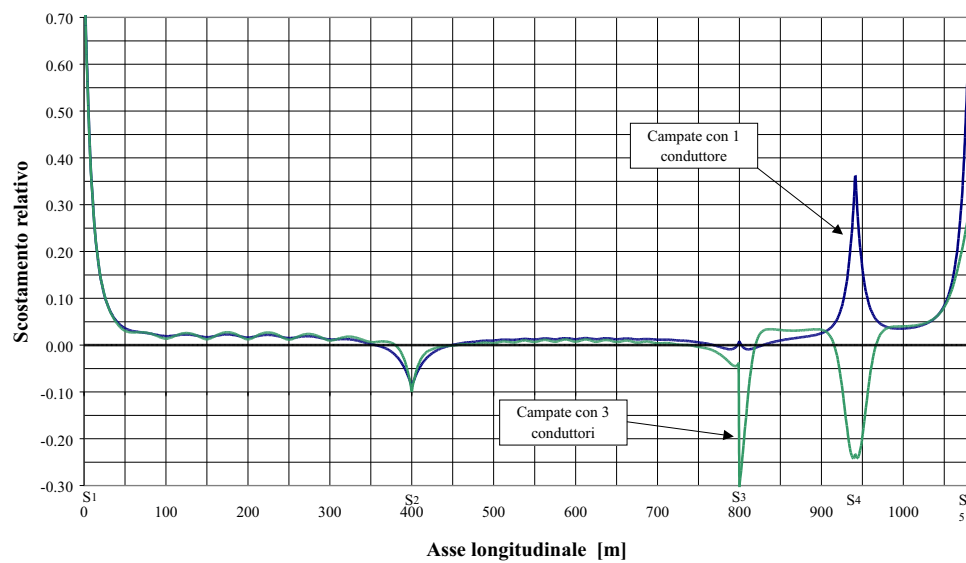


Figura 4.27: Scostamento relativo fra i profili dell'induzione magnetica relativi al “vecchio” ed al “nuovo approccio”

mente confermato per le prime due campate; proseguendo lungo l'asse della linea si notano però due fenomeni che non si erano verificati nel caso di un conduttore per campata.

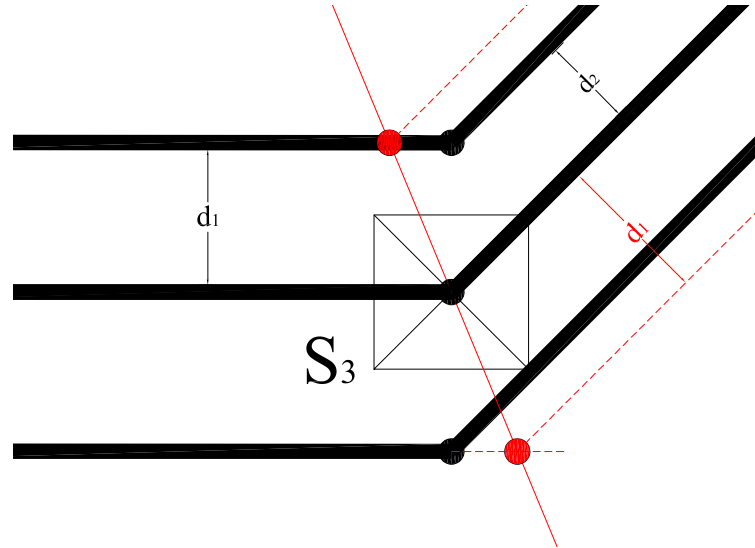


Figura 4.28: Riduzione della mutua distanza fra i conduttori

Arrivati a $l=800$ metri, cioè presso S_3 , si nota un brusco scalino per l'andamento dell'induzione calcolata con il vecchio approccio che si traduce in un brusco scalino anche nell'andamento dello scostamento relativo tra i due approcci. Questo brusca variazione dell'induzione è dovuta alla riduzione della mutua distanza tra i conduttori indefiniti passando dalla seconda alla terza campata, causata a sua volta dal fatto che il piano verticale su cui giacciono i punti di sospensione presso il sostegno S_3 non coincide con quello che biseca l'angolo che formano gli assi delle due campate. Come si vede in figura 4.28 i conduttori rettilinei che si riferiscono alla campata S_2S_3 sono distanziati di d_1 metri l'uno dall'altro mentre quelli relativi alla campata S_3S_4 sono distanziati di d_2 metri. In genere la diminuzione della mutua distanza tra i conduttori di una linea determina un abbassamento dei livelli di

induzione magnetica a parità di distanza dai conduttori stessi; in questo caso quando si calcola l'induzione magnetica lungo l'asse delle campate si passa da una configurazione di conduttori all'altra *senza soluzione di continuità* e ciò determina l'effetto notato.

Il secondo fenomeno inatteso si verifica lungo l'asse della linea per $l=931$ metri cioè presso il sostegno S_4 . Questa volta il piano verticale su cui giacciono i punti di sospensione coincide con quello che biseca l'angolo fra le campate S_3S_4 e S_4S_5 e dunque non si verifica quanto appena descritto. In questo caso, ad avere un andamento diverso da quello che ci si sarebbe potuti aspettare è il campo calcolato lungo l'asse della linea secondo il nuovo approccio. In particolare l'effetto osservato è dovuto al forte cambio di direzione (90°) insieme alla presenza dei due conduttori laterali; entrambi questi elementi tendono a dissimmetrizzare fortemente la distribuzione dei campi rispetto all'asse della linea.

Volendo trarre delle conclusioni da quanto visto nelle pagine precedenti si osserva che:

- a)** le condizioni in cui il vecchio approccio mostra più evidentemente i suoi limiti si verificano nelle seguenti tre situazioni: all'inizio e alla fine della linea, presso cambi di direzione fra le campate prossimi ai 90° e presso i sostegni per cui i relativi punti di sospensione non giacciono sul piano verticale che divide in due parti uguali l'angolo formato dagli assi delle campate.

Tutte queste situazioni hanno però scarsa rilevanza ai fini di valutare quale sia l'approccio migliore per eseguire il calcolo dell'induzione magnetica nell'ambito di uno studio VIA in quanto:

- le condizioni di inizio e di fine linea riguardano generalmente le

aree occupate da stazioni e sottostazioni e quindi hanno poca rilevanza ai fini di uno studio VIA (vengono normalmente trattate a parte, in una sezione dedicata dello studio);

- secondo l'unificazione ENEL i piani di giacenza dei punti di sospensione coincidono con quelli che bisecano l'angolo formato dalle relative campate ed è questo che si assume normalmente.
- i cambi di direzione tra campate che si avvicinano ai 90° sono assai rari; per le linee elettriche a 380 kV oggetto dello studio svolto, l'angolo massimo registrato è pari a 61° .

b) Esistono altre circostanze in cui i due approcci danno risultati significativamente diversi; sebbene tali differenze siano in assoluto più piccole di quelle legate alle situazioni descritte al punto **(a)**, le circostanze a cui si riferiscono sono frequentemente riscontrabili per linee reali.

- Per campate che si succedono senza cambiare direzione, si ha che col vecchio approccio vengono sottostimati i campi al suolo presso i sostegni (scostamento relativo non superiore a 10%);
- per campate che cambiano direzione non si può prevedere come si sovrapporranno i contributi dei conduttori delle diverse campate presso i sostegni e quindi si potranno osservare, al variare degli angoli fra le campate e della mutua disposizione dei conduttori, sia accordo fra i due approcci, sia notevoli differenze.
- riferendosi ancora a campate che cambiano direzione l'una rispetto all'altra, si può ragionevolmente supporre che, per livelli di campo bassi (e quindi non troppo vicini ai conduttori delle linee), le linee isocampo relative ai due approcci risulteranno sostanzialmente diverse (ovviamente a parità di valore di campo). Questa tendenza

aumenta con l'ampiezza dell'angolo di deviazione fra le campate tanto che, già per angoli di 45° , può determinare “spostamenti” delle linee isocampo dell'ordine della decina di metri. I cambi di direzione tra campate che superano i 45° non sono molto frequenti, spesso però vengono utilizzati proprio dove si vuole far assumere alla linea un percorso obbligato per evitare siti sensibili e quindi in aree dove assume particolare importanza la precisione nella determinazione della distribuzione dei campi.

In base a tutte queste osservazioni si può concludere che il nuovo approccio introduce dei sensibili miglioramenti rispetto al vecchio, miglioramenti che giocano un ruolo importante proprio in condizioni che richiedono particolare precisione; conseguentemente rimane giustificata la sua introduzione e con essa anche il rallentamento della fase di calcolo comportato dalla maggiore complessità del nuovo approccio.

Prima di concludere è necessario chiedersi quanto quello che si è identificato col “vecchio approccio” sia rappresentativo di come venivano effettivamente calcolati i campi utilizzando le precedenti applicazioni.

Il fatto di considerare il conduttore rettilineo indefinito passante per *l'intersezione sezione-catenaria*, presuppone di conoscere le coordinate di tale punto.

A meno di non ricavare tali coordinate mediante sopralluoghi (...), per determinarle deve essere nota l'espressione analitica della catenaria che modella ciascun conduttore. Le applicazioni precedenti delegavano all'utente il compito di determinare le coordinate del problema e si incaricavano della sola parte di calcolo supponendo implicitamente che le coordinate in questione fossero in qualche modo note.

L'aver creato un modello tridimensionale per ciascuna catenaria ha quin-

di introdotto due possibili livelli di sviluppo per il calcolo dell'induzione magnetica ed in particolare:

1. la possibilità di stabilire automaticamente le coordinate del punto P *di intersezione sezione-catenaria* relativo ad un punto Q di coordinate note e quindi di calcolare l'induzione in Q considerando il conduttore rettilineo indefinito passante per il punto P determinato;
2. la possibilità di calcolare i campi considerando il modello tridimensionale di ciascun conduttore.

Quello che è stato denominato “vecchio approccio” è dunque collocato al primo dei due livelli descritti.

Capitolo 5

Presentazione dei risultati, proposte per la minimizzazione degli impatti e considerazioni finali

Come è già stato più volte sottolineato, il principale risultato delle procedure esposte è la stesura di mappe di isocampo, cioè di mappe tematiche in cui, alla cartografia di base, vengono sovrainpresse le curve di livello per i campi relative ad alcuni valori ritenuti significativi.

Esauriti nel paragrafo 4.3 gli aspetti puramente tecnici riguardanti le linee isocampo ed il loro tracciamento, nella prima parte di questo capitolo si motiveranno le scelte effettuate in merito ai valori di campo relativi a ciascuna linea isocampo e ai valori di corrente attribuiti a ciascuna linea elettrica ai fini del calcolo dell'induzione magnetica; entrambi questi aspetti sono molto importanti per attribuire a ciascuna delle mappe il giusto significato.

Verranno poi esposte alcune considerazioni di carattere generale relativa-

mente alla fase di sintesi dei risultati ed alla formulazione di proposte concrete per la minimizzazione degli impatti.

Infine verranno elencati alcuni dei possibili ed auspicabili sviluppi per le applicazioni e le procedure sviluppate.

Al termine del capitolo inoltre sono inseriti degli esempi di mappe di isocampo ed una scheda di “valutazione puntuale” dell’induzione magnetica per uno dei “*siti sensibili*” individuati.

5.1 Definizione dei parametri di calcolo

Per stabilire a quali valori di campo è opportuno riferirsi per tracciare le linee isocampo è necessario chiedersi cosa significhi “impatto ambientale” in relazione al campo elettrico ed al campo magnetico dispersi da un elettrodotto. I campi di per sé sono invisibili e quindi non hanno impatto visivo. Se vi sono effetti sul terreno, sulla flora e sulla fauna, questi sono talmente piccoli da non essere mai stati rilevati da alcuno. Restano unicamente gli aspetti relativi ad un eventuale impatto sanitario sugli individui che frequentano l’ambiente considerato.

Per il campo elettrico la situazione è relativamente poco problematica poiché si ritiene improbabile che esso possa avere un’incidenza significativa sull’esposizione cronica della popolazione e quindi i limiti delle normative vigenti (tabella 1.1 paragrafo 1.1) non vengono messi in discussione. Questo convincimento è basato da una parte sul fatto che il campo elettrico a 50 Hz prodotto da sorgenti esterne (elettrodotti) viene efficacemente schermato dalle pareti degli edifici, dall’altra sulla constatazione che le sorgenti interne agli edifici (elettrodomestici), lavorando a bassa tensione (fino a tre ordini di grandezza inferiore a quella degli elettrodotti), non generano un campo elet-

trico di intensità rilevante. Inoltre il valore di 5 kV/m si raggiunge raramente sul territorio, se non in condizioni di particolare vicinanza dei conduttori al terreno.

Per il campo magnetico invece la situazione è più complessa; *se infatti si prendessero in considerazione i limiti delle normative vigenti, la valutazione sarebbe istantanea, poiché in nessuna situazione realistica nei pressi di un elettrodotto si possono rilevare valori di quell'ordine di grandezza. Per raggiungere i 100 microtesla sarebbe infatti necessario avvicinarsi ad almeno 3 metri da un conduttore percorso da una corrente di 1500 A, una situazione che per la popolazione non può avere luogo.* Tuttavia, come esposto nel paragrafo 1.1, è noto che controverse indagini epidemiologiche hanno fatto prendere in considerazione la possibilità che esposizioni assai prolungate nel tempo (“croniche”) a livelli molto più bassi di quelli ammessi dalle normative (fino a valori dell'ordine di pochi decimi di microtesla) possano comportare aumenti di rischio in relazione a patologie anche gravi. Sebbene tale evenienza sia ben lungi da essere confermata, essa ha finito per generare in molti settori della popolazione ed anche in diverse amministrazioni pubbliche la convinzione che sia necessario limitare l'esposizione degli individui a valori assai più bassi di quelli ammessi dalle normative ufficiali.

Stando così le cose (ma senza con questo voler avallare l'idea che sia opportuno rivedere verso il basso le normative in vigore per il campo magnetico), in seno al Gruppo di Lavoro VIA si è convenuto di far riferimento, per il tracciamento delle curve isocampo per il campo magnetico, ai valori di 0,2 - 0,5 - 2 - 5 microtesla.

Per il campo elettrico, considerato che valori inferiori ad 1 kV/m hanno scarsa rilevanza sanitaria e valori superiori a 2 kV/m si incontrano raramente nei pressi di un elettrodotto, si farà riferimento solo ai due valori di 1 e 2

kV/m.

I livelli di riferimento così scelti consentono di descrivere in modo sintetico, ma sufficientemente accurato, la distribuzione del campo elettrico e del campo magnetico generati da un elettrodotto, dall'asse della linea (dove peraltro sono possibili valori anche più elevati di 5 microtesla e di 2 kV/m) fino ad oltre un centinaio di metri di distanza.

Per quanto riguarda il campo magnetico rimane però da risolvere il problema della variabilità nel tempo ed in particolare si deve specificare quale è il valore di corrente fissato per ciascuna linea elettrica ed impiegato nel programma di calcolo.

Per lo studio svolto, si è scelto di ripetere l'intero processo di costruzione delle curve isocampo in corrispondenza di due valori di corrente ritenuti significativi: il valore medio annuale (che può considerarsi il più indicativo qualora si abbiamo in mente gli eventuali effetti a lungo termine) ed un valore massimo (di esercizio per linee esistenti sottoposte a ristrutturazione oppure nominale per linee progettate ma non ancora esistenti), per una valutazione massimamente cautelativa.

L'ultimo aspetto da considerare è quello dell'altezza dal suolo per cui tracciare le linee isocampo. La prima osservazione da fare a tal proposito è che, a distanza dall'asse della linea, l'intensità dei campi è poco sensibile a variazioni di altezza dal suolo. Infatti, mentre nelle zone sottostanti i conduttori attivi i campi al suolo e quelli a 2 metri di altezza da esso possono essere significativamente diversi, allontanandosi trasversalmente dalla linea si ha che tali differenze si assottigliano in quanto tende a dominare la componente orizzontale della distanza r dai conduttori stessi, rispetto alla quale i campi mostrano, da un certo punto in poi, una dipendenza del tipo $\frac{1}{r^2}$.

Detto questo, si è scelto di adottare per tale parametro il valore di 1 metro,

ritenuto significativo sia per quanto riguarda l'esposizione di soggetti in età adulta, sia in relazione alla possibile esposizione di individui in età infantile (a cui viene dedicata una attenzione particolare in relazione ad alcuni, già citati, studi epidemiologici). L'indicazione di tale valore sembra inoltre emergere come preferenza anche dalla norma CEI 211-6 del gennaio 2001 [20].

5.2 Proposte per la minimizzazione degli impatti

Tra le valutazioni che compongono uno Studio di Impatto Ambientale relativo alla realizzazione di un elettrodotto, la determinazione della distribuzione dell'intensità del campo elettrico e del campo magnetico occupa sicuramente una posizione peculiare, soprattutto perché si tratta di uno dei pochi settori (se non l'unico) in cui, in fase di analisi, è possibile produrre valutazioni intrinsecamente quantitative. Tuttavia, a questa situazione non ne corrisponde una altrettanto ideale quando si passi a considerare l'aspetto di sintesi. In altre parole, mentre si è in grado di prevedere con sufficiente accuratezza i livelli di intensità di campo elettrico e, soprattutto, di campo magnetico nei punti del territorio circostante l'elettrodotto da costruire, non si è altrettanto certi di poter attribuire ai valori previsti con l'analisi teorica un preciso significato in termini di impatto sanitario o ambientale. Questa difficoltà si riflette anche sulla formulazione di ipotesi di mitigazioni o alternative che tipicamente accompagna gli studi di questo tipo. Con "mitigazione" qui si intende l'adozione di provvedimenti tecnici atti a ridurre i valori delle intensità del campo elettrico e/o del campo magnetico attesi intorno all'elettrodotto, mentre con "alternativa" si intende la scelta di un percorso diverso da quello inizialmente individuato, allo scopo di abbattere i livelli di campo in aree

ritenute particolarmente sensibili. La questione presenta due aspetti diversi e tra loro complementari. Innanzitutto, occorre chiarire quando è necessario ricorrere a provvedimenti di mitigazione o alla ricerca di alternative. In secondo luogo, bisogna vedere come sia tecnicamente possibile, nei casi individuati come necessari, realizzare una mitigazione o individuare una alternativa. I due aspetti sono evidentemente collegati anche da considerazioni di tipo economico: per esempio, quanto meno costoso risulta un provvedimento di mitigazione, tanto più si tenderà ad adottarlo anche al di là dei casi di effettiva necessità.

5.2.1 Quando è opportuno ricorrere a mitigazioni o alternative?

Si possono adottare due atteggiamenti nei confronti di questo problema: un atteggiamento **radicale** ed un atteggiamento **razionale**. Chi adotta il primo atteggiamento considera il campo elettrico ed il campo magnetico come elementi estranei all'ambiente, quindi indesiderati, e sostiene l'opportunità di adottare in ogni caso qualunque provvedimento di mitigazione sia disponibile, a prescindere dai valori di campo stimati. Chi propende per un approccio più razionale, richiede che siano individuate delle soglie al di sotto delle quali i valori di campo possano essere considerati accettabili; in questo caso, si adotteranno provvedimenti di mitigazione solo in corrispondenza di quei siti sensibili (in genere edifici adibiti ad abitazione o permanenza prolungata) dove la valutazione abbia fatto prevedere valori superiori alla soglie prestabilite.

Sebbene l'approccio **radicale** possa sembrare allettante, in quanto apparentemente in grado di fornire la massima tutela possibile, tuttavia esso risulta subito meno attraente non appena si consideri che le risorse investite

per una mitigazione non necessaria (quindi tale da non portare alcun vantaggio certo in termini sanitari) dovranno con molta probabilità essere distolte dall'impiego in altri settori, dove forse avrebbero potuto apportare benefici maggiori.

Il principale problema connesso con l'adozione di un atteggiamento **razionale** risiede, come si intuisce facilmente, nella definizione dei valori di soglia, a proposito dei quali non esiste purtroppo una identità di vedute nella comunità scientifica e soprattutto tra la comunità scientifica e la popolazione, i media o le istituzioni. In problemi di questo tipo, il riferimento preferenziale dovrebbe ovviamente essere costituito dalle normative di sicurezza nazionali ed internazionali. Come già esposto nel primo capitolo, le più autorevoli linee guida disponibili in proposito sono quelle rilasciate nel 1998 dall'ICNIRP che, alla frequenza di 50 Hz, indicano come accettabili per l'esposizione della popolazione i valori di 5 kV/m per il campo elettrico e di 100 microtesla per l'induzione magnetica. Anche la normativa italiana tuttora in vigore (DPCM 23 aprile 1992) è allineata sugli stessi valori limite. Si ricorda che l'ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) è la prestigiosa commissione normativa internazionale, collegata all'Organizzazione Mondiale della Sanità, nel cui operato si riconosce gran parte della comunità scientifica mondiale. Esistono però opinioni diverse, sostenute anche all'interno della comunità scientifica, ma soprattutto da varie organizzazioni di carattere ambientalista o di tutela dei consumatori, secondo le quali i valori proposti dall'ICNIRP non tutelano sufficientemente la popolazione poiché non tengono in debito conto del possibile rischio cancerogeno associato ad esposizioni croniche a campi magnetici di livello assai inferiore al limite ICNIRP. Chi sostiene questo punto di vista, mentre nella maggior parte dei casi non solleva obiezioni a proposito del limite per il campo elettrico, chiede

che il valore accettabile per l'induzione magnetica venga fissato sugli 0,2 o 0,5 microtesla. Si tratta, come è noto, dei valori al di sopra dei quali alcuni studi epidemiologici evidenziano un possibile aumento del rischio di leucemia infantile.

5.2.2 Mitigazioni ed alternative

Vi sono sostanzialmente due possibilità tecniche relativamente semplici per ridurre l'intensità dei campi dispersi da un elettrodotto aereo senza modificare i parametri elettrici nominali (tensione di esercizio e potenza trasportata) e senza alterarne il percorso: (1) aumentare l'altezza dei sostegni e (2) adottare sostegni compatti, che riducano l'interdistanza tra i vari conduttori di fase. A queste si deve poi aggiungere l'eventualità dell'interramento, che sarà brevemente discussa a parte, e quella di ricorrere a tecnologie più avanzate (per esempio schermature, linee split-phase oppure elettrodotti blindati), sulle quali invece non si ritiene di poter trattare in questa sede, salvo un piccolo accenno alla possibilità di ricorrere a tratte in doppia terna invece che in semplice terna. In linea di massima, aumentare l'altezza dei sostegni significa allontanare i conduttori dai siti sensibili e quindi ridurre i campi valutati in tali punti; occorre però una precisazione. Il metodo risulta abbastanza efficace per abbattere i valori riscontrabili direttamente al di sotto di un elettrodotto o nelle sue immediate vicinanze (al massimo alcune decine di metri), mentre è assai poco efficace (o addirittura controproducente, nel caso del campo elettrico) per ridurre i valori ad una certa distanza (oltre un centinaio di metri). Questo comportamento è ben documentato in Figura 5.1, che mostra il profilo laterale dell'induzione magnetica ad 1 metro dal suolo, generata da un elettrodotto semplice terna 380 kV/1500 A con sostegni standard a traliccio; in figura, la curva superiore si riferisce alla situazione

in cui il conduttore più basso si trova a 15 metri dal suolo, mentre la curva inferiore fa riferimento ad una altezza di 35 metri dal suolo.

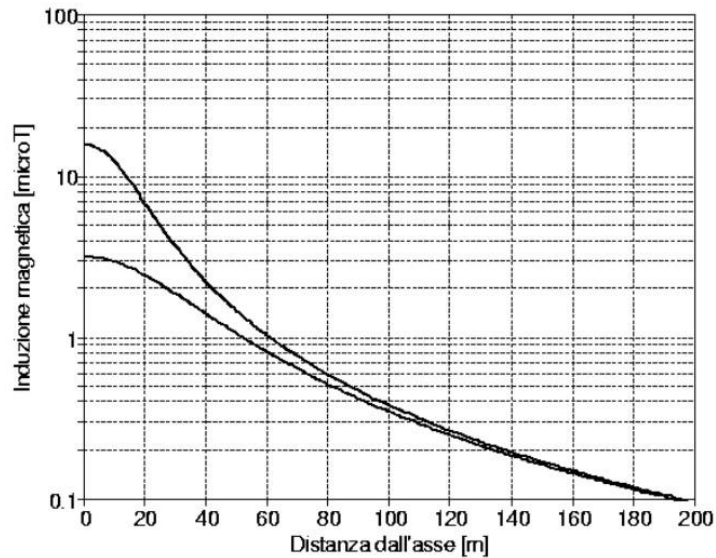


Figura 5.1: Effetto dell'innalzamento dei conduttori

Il campo elettrico ed il campo magnetico dispersi da un elettrodotto dipendono in maniera sensibile dalle mutue distanze tra i vari conduttori che costituiscono la linea, cosicché l'adozione di sostegni compatti, che tendono a ridurre per quanto possibile tali mutue distanze, comporta una marcata riduzione delle intensità dei campi in tutti i punti circostanti l'elettrodotto, anche e soprattutto ad una certa distanza da esso. Questo fenomeno è illustrato in Figura 5.2, dove si confrontano i profili laterali dell'induzione magnetica ad 1 metro dal suolo, generata da un elettrodotto semplice terna 380 kV/1500 A con sostegni standard a traliccio (curva superiore) e da un elettrodotto analogo, ma con sostegni innovativi tipo Foster and partners (curva inferiore); in entrambi i casi il conduttore più basso si trova ad una altezza di 25 metri dal suolo.

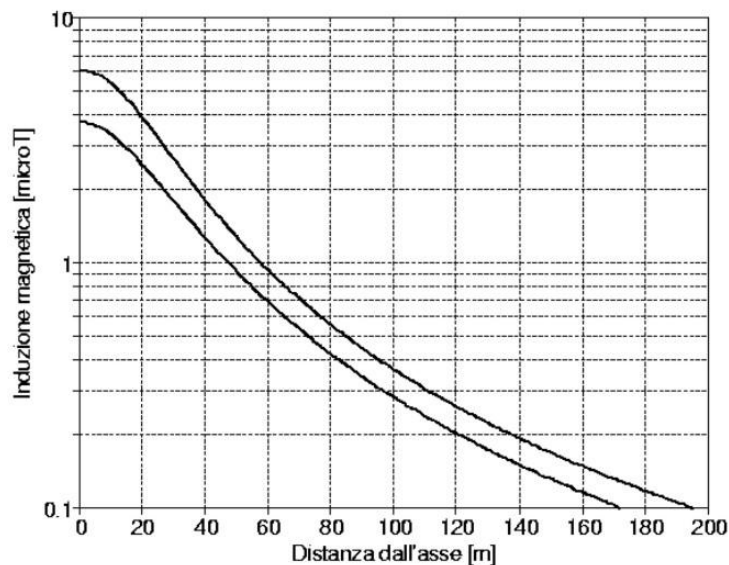


Figura 5.2: Utilizzo dei sostegni “compatti”

Una delle tecniche più efficaci per abbattere il campo magnetico disperso da un elettrodotto è quella nota col termine *split-phase*, che consiste nel ripartire tra due o più conduttori la corrente trasportata da un singolo conduttore di fase, in modo da avere correnti minori su ciascun conduttore e contemporaneamente poter scegliere lo schema di cablaggio in modo da ottenere la massima cancellazione tra i contributi dei conduttori stessi al campo totale. Una forma minimale di questa tecnica può consistere nel convertire a doppia terna una tratta a semplice terna, a parità di tensione e di potenza trasportata. La Figura 5.3 illustra il risultato della sostituzione di una tratta a semplice terna da 380 kV/1 MW (corrente 1500 A, curva superiore) con un doppia terna di uguale tensione e potenza (la corrente scende quindi a 750 A, curva inferiore); al solito, in figura viene riportato il profilo laterale dell'induzione magnetica ad 1 metro dal suolo; in entrambi i casi si fa riferimento ai sostegni standard a traliccio e ad una altezza minima dei conduttori di 25

metri dal suolo.

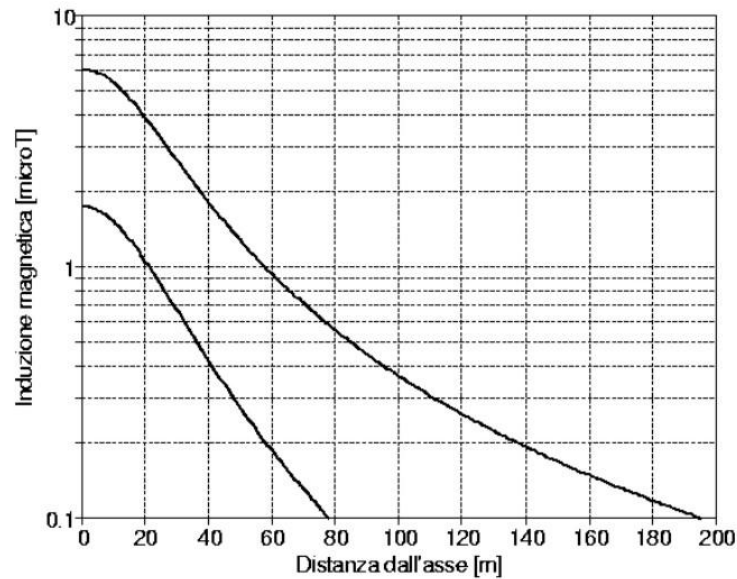


Figura 5.3: Tecnica Split-Phase

Per venire all'ipotesi di interrimento di tratti di linea, questo comporta un duplice meccanismo di abbattimento. In primo luogo, il campo elettrico disperso viene praticamente azzerato dall'azione schermante operata dal terreno che, a differenza dell'aria (assimilabile ad un buon isolante), si comporta come un discreto conduttore elettrico. In secondo luogo, la maggior compattezza (ovvero la minore interdistanza mutua tra i vari conduttori) di un elettrodotto interrato rispetto alla configurazione aerea determina una rapida attenuazione dell'intensità del campo magnetico con la distanza dalla linea. Infatti, mentre nelle immediate vicinanze di una linea interrata ci si devono aspettare valori dello stesso ordine di grandezza di quelli riscontrabili sotto una linea aerea di caratteristiche corrispondenti, non appena ci si allontani anche di pochi metri dalla linea interrata i valori attesi decadono assai rapidamente a livelli che, per la linea aerea, richiederebbero distanze di molte

decine di metri. Questo è ben visibile in Figura 5.4, dove vengono riportati i profili laterali ad 1 metro dal suolo dell'induzione magnetica generata da un elettrodotto semplice terna 132 kV/450 A di tipo aereo con sostegni standard a traliccio (curva superiore) e di tipo interrato a trifoglio (curva inferiore); nel primo caso il conduttore più basso si trova ad una altezza di 18 metri dal suolo, nel secondo il centro del trifoglio è interrato ad una profondità di circa 1.5 metri.

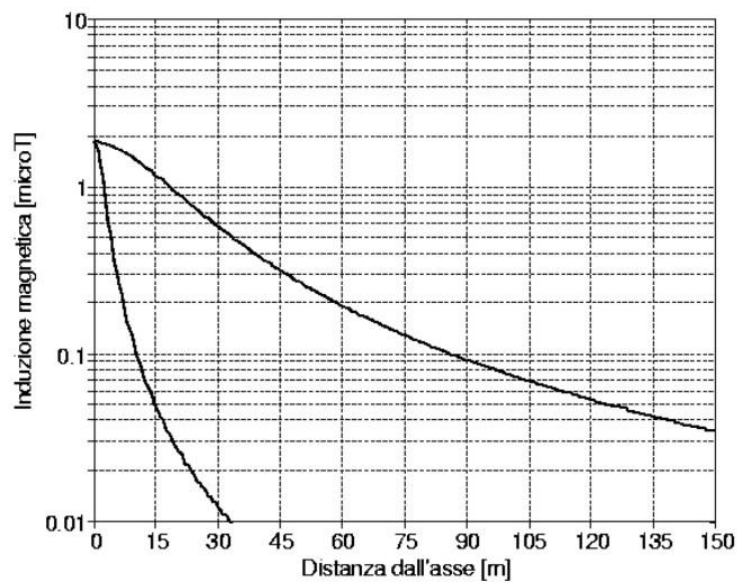


Figura 5.4: Interramento della linea

Infine, la scelta di un percorso alternativo può rappresentare in alcuni casi una possibilità per ridurre il campo elettrico e il campo magnetico valutato in un sito sensibile, qualora l'alternativa permetta di aumentare la distanza di tale sito dall'elettrodotto responsabile del campo. Come indicazione di massima, potrà essere utile ricordare che il campo magnetico a grande distanza da un elettrodotto (grande rispetto alla mutua distanza tra i conduttori)

è con buona approssimazione inversamente proporzionale al quadrato della distanza stessa.

In conclusione, esistono diversi provvedimenti tecnici in grado di ridurre l'impatto ambientale di un elettrodotto per quanto attiene ai campi elettromagnetici. L'innalzamento di sostegni, l'individuazione di percorsi alternativi e l'interramento di campate rappresentano alcune delle opzioni disponibili, sebbene comportino numerosi problemi di varia natura; possibilità interessanti e per alcuni versi meno problematiche consistono nell'adozione di sostegni a geometria compatta e nella trasformazione a doppia terna di tratte a semplice terna.

Una volta che si siano definiti i criteri per decidere in quali casi intervenire con provvedimenti di mitigazione e si siano quindi evidenziati i siti dove è richiesto un intervento, non può che essere il gestore delle infrastrutture a stabilire quale provvedimento tecnico sia più adatto a ciascuna situazione contingente. Chi esegue lo Studio di Impatto si potrà successivamente fare carico di ulteriori valutazioni per accertare l'efficacia dell'intervento e l'entità del beneficio conseguito.

5.3 L'integrazione dei vari aspetti della VIA

Sviluppando un metodo sperimentale per l'esecuzione di uno degli aspetti da inserire nel quadro di riferimento ambientale di uno studio VIA, non si può prescindere da prendere in considerazione anche gli altri aspetti che caratterizzano lo stesso quadro e mirare alla maggiore compatibilità possibile, soprattutto per quanto riguarda la forma di presentazione dei risultati. Nel caso dei campi elettrici e magnetici, tale processo di integrazione è risultato, come vedremo, particolarmente difficoltoso.

Molti degli aspetti che caratterizzano il quadro di riferimento ambientale hanno come denominatore comune quello di riferirsi ad aree estese di territorio; è naturale infatti che una zona boschiva, con caratteristiche botaniche, geomorfologiche ed insediative omogenee, sia presa in considerazione come singola entità per la valutazione degli impatti legati al passaggio dell'elettrodotto dal punto di vista ecologico, paesaggistico e geologico; lo stesso vale per un'area a carattere residenziale senza particolari siti di rilievo storico o paesaggistico.

Per questa ragione, prima di valutare e sintetizzare gli impatti dell'opera sottoposta a VIA, è stata effettuata preventivamente una analisi del territorio in una fascia larga 1000 metri che ha per asse centrale il tracciato della linea; il territorio analizzato è stato quindi suddiviso in “*Ambiti Paesistici Omogenei*” (APO) cioè in aree con caratteristiche omogenee dai vari punti di vista. Per ogni APO sono stati inoltre individuati vari “*siti sensibili*”, ad esempio ville o nuclei abitativi di particolare rilievo storico dal punto di vista archeologico o paesaggistico, zone di frana dal punto di vista geologico o particolari ecosistemi da quello faunistico e forestale.

In fase di sintesi si sono quindi valutati gli impatti della rete di elettrodotto e delle infrastrutture ad essa connesse *per ogni APO* con particolari riferimenti ai rispettivi *siti sensibili*. Tutto ciò ha permesso l'utilizzo di schede, schemi e matrici in grado di riassumere in modo immediato i risultati della sintesi valutativa che si adatta in tal modo al territorio secondo la frammentazione in ambiti. In particolare, per ogni aspetto della VIA, è stata definita una *classificazione degli impatti* da applicare a ciascun APO come quella riportata nella tabella 5.1.

Ora, al momento di inserire la parte riguardante i campi elettrici e magnetici entro tali schemi si sono presentate le seguenti difficoltà:

classe	descrizione
0	nessun impatto
1	impatto basso
2	impatto medio
3	impatto alto

Tabella 5.1:

1. avendo a che fare con *campi di forza*, le cui relative intensità assumono valori generalmente diversi in ogni punto dello spazio, risulta difficile adattarsi ad una sintesi valutativa basata sulla divisione del territorio in ambiti i quali, da questo punto di vista, perdono le caratteristiche di omogeneità;
2. essendo i limiti di legge per i campi in genere molto maggiori di quelli effettivamente raggiunti e mancando una univoca interpretazione dei dati epidemiologici risulta assai difficile definire una *classificazione degli impatti* basata sui livelli di campo. In altre parole, chi e in base a quali criteri definisce quando il campo è *alto*?

Per aggirare il primo problema si sono legati gli impatti su ciascun APO ai siti sensibili in esso presenti. Dal punto di vista dei campi, i siti sensibili sono gli edifici abitati; dunque, oltre alla loro individuazione sulla cartografia, si sono resi necessari dei sopralluoghi, documentati fotograficamente, per individuare il tipo di edificio ed in particolare l'uso a cui è adibito (abitativo, annesso agricolo, rudere,...). Ogni APO è dunque caratterizzato dal valore di campo calcolato sui suoi siti sensibili e dalle caratteristiche di uso di ciascuno di essi. Un'alternativa forse più interessante è quella di definire

l'impatto dei campi su ciascun APO in base alla densità abitativa di ciascuno di essi.

Tuttavia, riassumere in un singolo “valore” l'impatto dei campi su un'area estesa rimane pur sempre una forzatura. Si suggerisce quindi di valutare in sede istituzionale e di coordinamento l'opportunità di tale scelta per VIA future; in particolare sarà necessario valutare fino a che punto si debba tener conto delle esigenze di integrazione dei vari aspetti della valutazione degli impatti, specie quando queste contrastino con una presentazione aderente alla realtà fisica.

Evitando la divisione in ambiti cadrebbe anche il secondo dei due problemi: non essendo più necessario classificare gli impatti per un'area estesa verrebbe meno la necessità di creare una classificazione qualitativa che associ dei termini del tipo “alto” o “basso” in mancanza di punti di riferimento. Dove questa classificazione si è resa indispensabile, è stato comunque sottolineato che i termini utilizzati nella classificazione sono *del tutto svincolati da considerazioni di carattere sanitario o riguardanti effetti biologici dei campi*. Nonostante questo si teme che tale classificazione possa generare confusione più che semplificare la presentazione, rischiando così di vanificare gli sforzi fatti per dare un quadro sintetico, esauriente ma soprattutto fisicamente corretto della situazione sul territorio.

5.4 Sviluppi futuri

Si ritiene auspicabile procedere, nell'immediato futuro, ad un ulteriore sviluppo del software per la valutazione dei livelli di campo.

Le applicazioni sviluppate devono infatti essere considerate dei prototipi che necessitano di una fase di industrializzazione. Il codice di calcolo ha

dimostrato peraltro buone caratteristiche di accuratezza, stabilità ed affidabilità per cui non si avverte la necessità di apportare modifiche al modello fisico o alle relazioni fra le classi. Varrebbe forse solo la pena di valutare se sia possibile ottimizzare la velocità di calcolo, soprattutto per quanto riguarda le procedure di integrazione numerica. Tuttavia, il calcolo dei campi non costituisce il “collo di bottiglia” delle procedure esposte, per quanto riguarda i tempi di esecuzione. La fase sicuramente più onerosa in termini di tempo è quella di *sezionamento del terreno*, che dipende ovviamente dal modello digitale di cui si dispone, dall'estensione delle aree interessate e dalle caratteristiche di hardware del computer utilizzato.

Si individuano dunque le seguenti esigenze.

1. Integrazione *in un'unica applicazione* delle due procedure sviluppate (interfacciamento all'archivio cartografico e calcolo dei campi).
2. Definizione, per questa nuova applicazione, di un'interfaccia utente di tipo grafico che utilizzi menù e finestre.
3. Valutazione dell'opportunità di integrare il codice di calcolo dei campi direttamente all'interno di un'applicazione CAD; una prospettiva molto interessante legata a questo tipo di sviluppo potrebbe essere quella di rendere possibile il sezionamento del terreno senza la necessità di attingere da un modello digitale del terreno ma partendo dalla cartografia digitale di base georeferenziata, oppure integrando nell'applicazione di calcolo stessa degli strumenti in grado di estrarre dalla cartografia digitale un modello del terreno.
4. Introduzione della possibilità di tenere conto in modo automatico delle condizioni ambientali e di carico ai fini della costruzione del modello geometrico per le catenarie.

mappa di isocampo per l'induzione magnetica:

tavola fuori testo

**Elettrodotto 380 kV semplice trina
Casellina-Tavarnuzze-Santa Barbara
ed impianti connessi**

Studio di Impatto Ambientale

Lotto 1 - Tratta 380 kV Casellina-Tavarnuzze

Sito n.16 - impatto alto



Figura 5.5: Scheda di “valutazione puntuale” dell’induzione magnetica relativa ad un “sito sensibile”.

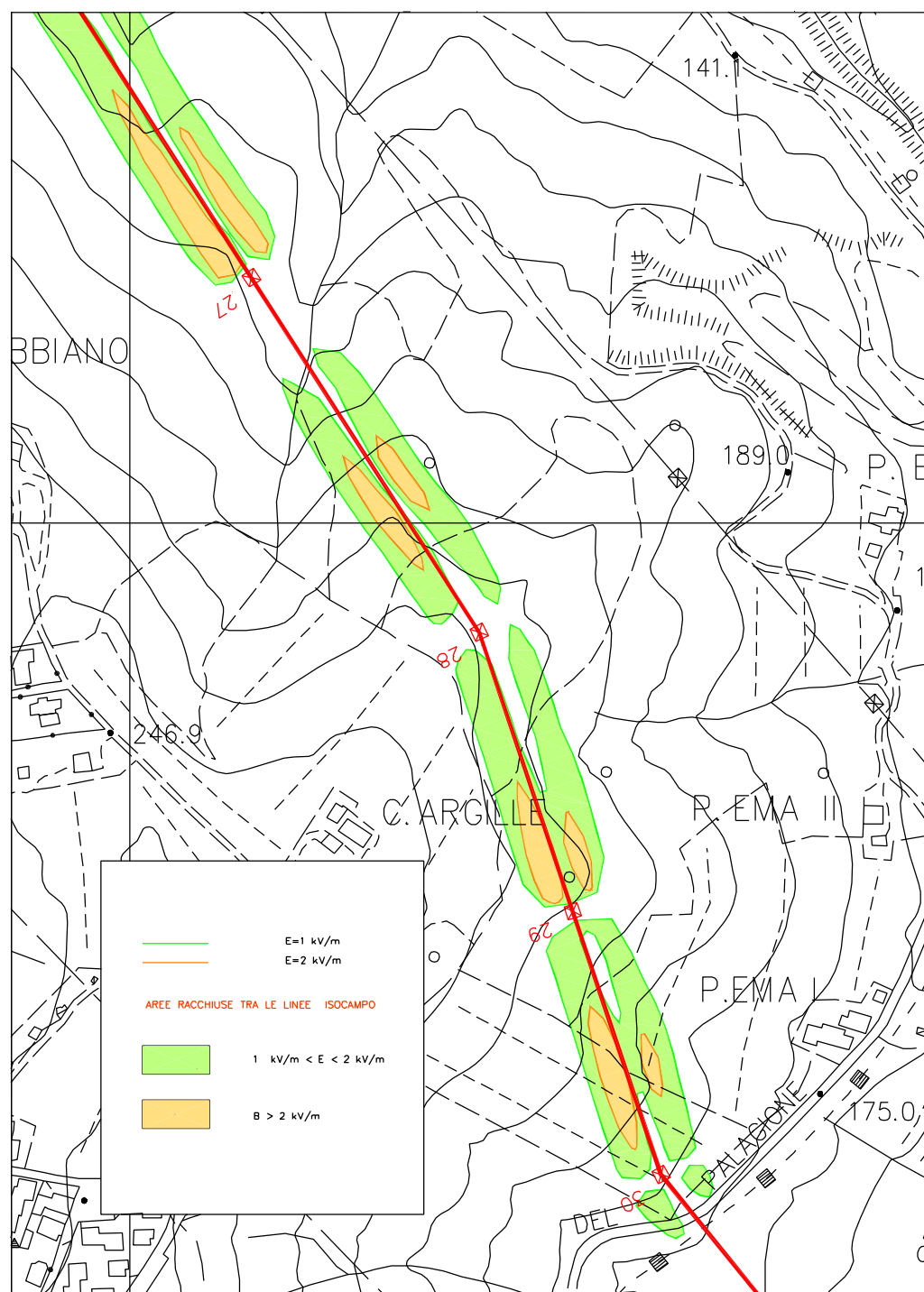


Figura 5.6: Porzione di mappa di isocampo per il campo elettrico (scala 1:5000)

Sintesi conclusiva

In questa Tesi di Laurea si è presentato un metodo innovativo per l'esecuzione di studi di impatto ambientale di elettrodotti, relativamente all'aspetto dei campi elettrici e magnetici.

Sebbene si tratti di un aspetto previsto dalla legge, non era disponibile una metodologia di indagine sufficientemente accurata e dettagliata. Il metodo proposto in questa sede permette di affrontare il problema superando l'approccio precedente basato sulla generalizzazione di considerazioni ricavate dall'analisi di casi particolari.

Gli elementi fondamentali attraverso cui si sviluppa il nuovo approccio, si possono riassumere nei seguenti:

1. definizione di un sistema di archiviazione per le caratteristiche delle linee elettriche e sviluppo di un'applicazione "client-server" che gestisce la comunicazione di dati da e verso tale archivio;
2. sviluppo di un'applicazione in grado di estrarre dalla cartografia digitale georeferenziata sia le informazioni relative alla localizzazione delle linee elettriche che devono essere inserite nell'archivio, sia quelle relative all'andamento del terreno, che vengono utilizzate dall'applicazione che calcola i campi;
3. sviluppo di una applicazione di calcolo dei campi che:

- (a) attinge automaticamente all'archivio delle linee elettriche per ottenere i dati necessari a costruire il modello informatico delle sorgenti;
 - (b) tiene conto della reale disposizione dei conduttori nello spazio; in particolare, a partire dai dati di archivio, crea un modello geometrico individuale per ogni conduttore, basandosi, per quelli aerei, sulla espressione analitica della curva secondo la quale i conduttori si dispongono ("catenaria") e per quelli interrati, su un campionamento lungo il tracciato della linea delle quote del terreno, rispetto al quale i conduttori si trovano a una profondità nota ed in genere costante.
 - (c) tiene conto dell'effettivo andamento del terreno, di cui viene costruito un modello, basato sui dati estratti dalla cartografia digitale georeferenziata;
 - (d) permette, sia di eseguire valutazioni puntuali dei campi, sia di mapparne la distribuzione ad una altezza dal suolo assegnata;
4. rappresentazione dei risultati del calcolo dei campi attraverso *mappe di isocampo*, (la cui definizione risultava improponibile secondo gli approcci precedenti), che hanno le seguenti caratteristiche:
- (a) sono *sintetiche*, in quanto sono ottenute dall'integrazione di dati eterogenei, quali le caratteristiche delle linee e l'andamento del terreno;
 - (b) sono comprensibili anche da un pubblico non specializzato e dunque si prestano ad essere utilizzate come strumento per l'informazione dei cittadini, per i quali è previsto un intervento diretto nella procedura di VIA.

La determinazione della distribuzione dell'intensità dei campi può essere essa stessa utilizzata come base per altri studi o applicazioni, ad esempio:

- per conferire validità scientifica agli studi epidemiologici relativi ai possibili effetti biologici dei campi elettrici e magnetici ELF;
- per permettere una corretta “pianificazione territoriale”, ad esempio in fase di stesura di piani regolatori. Se infatti, come sembra probabile, i limiti di esposizione verranno abbassati a valori realisticamente raggiungibili sul territorio, nel caso si considerino zone già interessate dal passaggio di elettrodotti, non sarà più sufficiente poter calcolare o misurare i campi in singoli punti, ma diventerà necessario disporre di strumenti con cui mappare la distribuzione dei campi. Infatti, solo così è possibile distinguere con precisione le zone in cui i campi oltrepassano gli ipotetici limiti fissati da quelle in cui tali valori non sono superati e che dunque risultano, almeno da questo punto di vista, compatibili con uno sviluppo di tipo residenziale o industriale.

L'applicazione di calcolo sviluppata per l'esecuzione di studi VIA fornisce risultati affetti da incertezze generalmente piccole, dovute essenzialmente alle approssimazioni usate nel modello. Riferendosi al tracciamento di linee isocampo per il campo magnetico, si può infatti affermare che in condizioni comuni si determina la posizione dei punti di passaggio di tali linee con incertezza inferiore a quella legata all'imperfezione cartografica. Tuttavia (come viene evidenziato nell'Appendice A: “Giustificazione dell'approssimazione quasi statica”), esistono casi in cui le incertezze legate al modello possono crescere ed i relativi risultati devono essere interpretati tenendone conto. In particolare, per correnti sulle linee molto intense e per terreni particolarmente conduttivi, si ha che, già a distanze di un centinaio di metri dall'asse della

linea, all'intensità dell'induzione magnetica totale contribuiscono in modo significativo i campi generati dalle correnti indotte nel terreno e sulle funi di guardia. In tali casi questi contributi possono pesare più del 10% dell'intensità dell'induzione magnetica dovuta alle sole correnti sui conduttori attivi. Ciò può determinare uno spostamento della linea isocampo relativa a 0,2 microtesla dell'ordine della decina di metri, e dunque apprezzabile anche su cartografia in scala 1:10000.

Per ognuna di queste situazioni, generalmente poco frequenti, è richiesta un'analisi più accurata e dettagliata, che tenga conto ad esempio delle condizioni locali specifiche del terreno e che può essere affrontata con gli strumenti presentati nell'Appendice A.

Appendice A

Giustificazione dell'approssimazione quasi statica

Nel capitolo 4 sono stati descritti gli algoritmi di calcolo per i campi partendo dall'ipotesi di regime quasi statico e di terreno perfettamente conduttore.

La approssimazione quasi statica è assunta valida in base alla considerazione che la lunghezza d'onda in aria a 50 Hz è pari a 6000 km e che dunque si possono trascurare tutti i fenomeni di propagazione.

In questa appendice si intende fornire un quadro fisico più generale in cui, rimanendo nelle condizioni quasi statiche ma considerando la presenza di terreno caratterizzato da conducibilità finita, si valuta *cosa viene trascurato se si utilizzano gli algoritmi di calcolo presentati*. In seguito, utilizzando dei modelli semplificati si darà un “peso” alle componenti dei campi trascurate; in particolare si verificherà se queste, come ipotizzato, contribuiscono in modo trascurabile ai campi totali rispetto alle componenti principali calcolate oppure se ed in quali condizioni se ne debba tener conto.

A.1 Il modello

Per delineare un quadro teorico è necessario ricondursi ad un modello che renda per quanto possibile semplici i procedimenti ed i calcoli. La situazione di riferimento scelta è quella di uno filo conduttore rettilineo ed indefinito uniformemente carico con densità lineare di carica λ e percorso da corrente I . Questo filo è posto a distanza b da un piano che rappresenta la superficie di separazione tra l'aria (mezzo 1), in cui è immerso il filo, ed un mezzo omogeneo, isotropo e non magnetico ($\mu = \mu_0$) caratterizzato da conducibilità finita σ , che rappresenta il terreno (mezzo 2).

Il raggio r del conduttore è supposto molto piccolo rispetto alla distanza b dalla superficie del terreno ed anche rispetto alla distanza del filo da altri eventuali conduttori.

La frequenza è ovviamente fissata a 50 Hz mentre la conducibilità del terreno può assumere come massimo il valore di $0,1 \text{ S/m}$, caratteristico di terreni molto umidi e come minimo il valore di 10^{-3} S/m tipico di terreni rocciosi [16], [3], [14].

Prima di iniziare l'analisi teorica vera e propria è opportuno sottolineare che si è interessati ai campi *in aria* e che il terreno deve essere preso in considerazione solo in relazione a quanto esso è in grado di influire sui campi in aria stessi.

A.2 La scomposizione dei campi

In aria $\sigma = 0$ e dunque la densità di corrente $\vec{J}$ che compare nelle equazioni di Maxwell è quella che scorre sui conduttori presenti. La lunghezza d'onda enormemente maggiore della regione di spazio interessata dai fenomeni ($\lambda = 6 \cdot 10^6 \text{ m}$ a 50 Hz) fa sì che si possa trascurare il termine di spostamento nella

equazione di Maxwell relativa al $\nabla \vec{B}$ che può essere scritta:

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 (\vec{J}_{sorgenti} + \vec{J}_{indotte})$$

dove la $\vec{J}_{indotte}$ scorre sia nel terreno sia in eventuali spire di conduttore.

Anche la densità di carica può scomporsi in un termine “primario”, relativo alle cariche sui conduttori della linea ($\rho_{sorgenti}$) e ad un termine che rappresenta le cariche che si addensano presso la superficie di separazione terreno-aria ($\rho_{indotte}$). Le equazioni di Maxwell sia in aria che nel terreno sono dunque:

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \times \vec{B} = \mu_0 (\vec{J}_{sorgenti} + \vec{J}_{indotte}) \\ \nabla \times \vec{E} = -j\omega \vec{B} \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \\ \nabla \cdot \vec{E} = \frac{1}{\epsilon_0} (\rho_{sorgenti} + \rho_{indotte}) \end{array} \right. \quad (\text{A.1})$$

dove in aria saranno presenti i termini $\rho_{sorgenti}$ e $\vec{J}_{sorgenti}$ mentre nel terreno i termini $\rho_{indotte}$ e $\vec{J}_{indotte}$.

Il campo elettrico totale può essere pensato come la somma di due termini distinti: una componente *conservativa* $\vec{E}_C$ ed una *non conservativa* $\vec{E}_{1N}$.

$$\vec{E} = \vec{E}_C + \vec{E}_N$$

In particolare è possibile definire un potenziale V tale che $\vec{E}_C = -\nabla V$; considerando invece il potenziale vettore $\vec{A}$ definito dalla relazione $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$, si ha che $\vec{E}_N = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$, cosicché, dalle A.1, si ha che:

$$\nabla \times \vec{E}_C = 0 \quad \nabla \times \vec{E}_N = -j\omega \vec{B}_1$$

e dunque:

$$\vec{E} = -\nabla V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$$

dove $\vec{E}_C$ è generato “quasi elettrostaticamente” dalle cariche libere (sul conduttore e nel terreno) mentre $\vec{E}_N$ è la componente generata dalle variazioni temporali del flusso di induzione magnetica.

Anche per l'induzione magnetica si possono individuare due componenti distinte $\vec{B}_F$ e $\vec{B}_I$ dove:

$$\nabla \times \vec{B}_F = \mu_0 \vec{J}_{sorgenti} \quad \nabla \times \vec{B}_I = \mu_0 \vec{J}_{indotte}$$

Ricapitolando si ha che:

$$\begin{cases} \vec{E} = \vec{E}_C + \vec{E}_N \\ \vec{B} = \vec{B}_F + \vec{B}_I \end{cases}$$

È facile convincersi che gli algoritmi di calcolo utilizzati per l'esecuzione dello studio VIA calcolano $\vec{B}_F$ e $\vec{E}_C$ in aria (paragrafi 4.1.1 ed 4.1.2) e che dunque $\vec{B}_I$ e $\vec{E}_N$ sono i contributi trascurati, dei quali si vuole in qualche modo valutare il “peso”. Ovviamente il modello utilizzato ha dei limiti intrinseci e quindi al campo reale contribuiscono altre componenti di cui il modello non tiene conto; un esempio relativo all'induzione è dato dall'effetto delle correnti indotte su eventuali corpi conduttori non modellati (per esempio binari o tubazioni) mentre un esempio relativo al campo elettrico è l'influenza della vegetazione, dei manufatti o degli stessi sostegni che possono influire localmente sulla distribuzione del campo in misura assai rilevante.

A.3 La caratterizzazione del terreno

La densità di corrente che scorre nel terreno si compone di due termini che rappresentano la corrente di conduzione ($\vec{J}_\sigma$) e quella di spostamento ($\vec{J}_\epsilon$):

$$\vec{J}_{tot} = \vec{J}_\sigma + \vec{J}_\epsilon = \sigma \vec{E}_2 + j\omega\epsilon_2\epsilon_0 \vec{E}_2 = j\omega\epsilon_0 \left(\epsilon_2 - j \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0} \right) \vec{E}_2$$

Anche nel caso di terreno a bassa conducibilità ($\sigma = 10^{-3} \text{ S/m}$) si ha che:

$$\vec{J}_{tot} \simeq \sigma \vec{E}_2$$

in quanto $\frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \simeq 3,6 \cdot 10^5 \gg \epsilon_2$ e dunque la corrente che scorre nel terreno è praticamente tutta corrente di conduzione.

Un altro parametro che gioca un ruolo determinante è il “*tempo di rilassamento*” delle cariche libere nel terreno che debbono obbedire alle seguenti equazioni:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \vec{E}_2 = \frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon_2} \\ \nabla \cdot \vec{J}_2 = \frac{\partial \rho}{\partial t} \end{cases}$$

e poiché $\vec{J}_2 = \sigma \vec{E}_2$, si può ricavare:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\sigma}{\epsilon_0 \epsilon_2} \rho$$

Imponendo la condizione iniziale $\rho(t_0) = \rho_0$ si ottiene che

$$\rho(t - t_0) = \rho_0 e^{-\frac{\sigma}{\epsilon_0 \epsilon_2}(t/t_0)}$$

La densità di carica all'interno del terreno si estingue dunque con la costante di tempo $\tau = \frac{\epsilon_0 \epsilon_2}{\sigma}$. Come si vede questa è inversamente proporzionale alla conducibilità e risulta molto piccola anche nel caso di terreno roccioso ($\sigma \simeq 10^{-3}$) in cui $\tau \simeq 8,85 \cdot 10^{-9} \epsilon_2 \text{ s}$.

Alla frequenza di 50 Hz ($T = 2 \cdot 10^{-2} \text{ s}$) si può affermare che non c'è carica libera nel terreno, ma che questa si addensa in tempi molto piccoli sulla sua superficie e che pertanto *il terreno si comporta a 50 Hz come un buon conduttore*.

A.4 Il campo elettrico

Analizziamo separatamente i contributi che compongono il campo elettrico totale; come si è detto essi sono la componente conservativa $\vec{E}_C$ e quella non conservativa $\vec{E}_N$.

A.4.1 Il campo elettrico conservativo

L'assimilazione del terreno ad un buon conduttore ed insieme l'aver modellato la sua superficie con un piano, rende possibile l'applicazione del metodo delle cariche immagine per il calcolo della componente $\vec{E}_{1C}$. Secondo questo approccio si sostituisce il terreno con un sistema di cariche fittizie dette *cariche immagine* (in questo caso si tratterà di densità lineari di carica) tali che, nel mezzo di interesse (aria), il potenziale da esse prodotto soddisfi l'equazione di Laplace e le condizioni al contorno del problema originario.

Come si è visto nel paragrafo 4.1.2, noti i potenziali sui conduttori reali e sui conduttori immagine, usando l'algoritmo proposto si imposta un sistema lineare le cui incognite sono le densità di carica sui conduttori, che una volta determinate, vengono utilizzate per calcolare il campo elettrico in aria attraverso un'estensione della nota legge di Coulomb per cariche distribuite.

Tale metodo è caratteristico dell'elettrostatica ed è applicabile a situazioni “quasi statiche” qualora la conducibilità σ del mezzo 2 sia sufficientemente elevata per poter trascurare i tempi di rilassamento delle cariche rispetto al periodo di oscillazione delle sorgenti (condizione ampiamente verificata, come si è visto nel paragrafo A.3).

Nel caso reale la carica libera si dispone sulla superficie del terreno in tempi molto brevi (dell'ordine del tempo di rilassamento τ) in modo che vi sia *campo nullo (o quasi) al suo interno*.

Si noti infine che l'algoritmo utilizzato per il calcolo del campo elettrico relativamente allo studio VIA svolto, utilizzando il metodo delle cariche immagine, prende in considerazione la sola componente conservativa del campo elettrico totale.

A.4.2 Il campo elettrico longitudinale

Rimanendo nel semispazio al di sopra del terreno (mezzo 1), si prende adesso in considerazione la componente non conservativa $\vec{E}_{1N}$ del campo elettrico confrontandola con la componente conservativa $\vec{E}_{1C}$. Per farlo ci si riferisce ad una situazione in cui gran parte dei calcoli possono essere eseguiti analiticamente, cioè quella di due fili distanziati fra loro di $2a$, sollevati da terra ad un'altezza b , percorsi da corrente $\pm I$, tenuti a potenziale $\pm V$ rispetto alla superficie della terra, dove questa terra ha permeabilità magnetica pari a quella del vuoto.

Con queste assunzioni si può dimostrare [12] che il potenziale vettore in un generico punto P di coordinate (x,y) su una qualsiasi sezione trasversa vale:

$$\vec{A}(x, y) = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln \left[\frac{(x-a)^2 + (y-b)^2}{(x+a)^2 + (y-b)^2} \right] \hat{i}_z$$

e quindi che:

$$|\vec{E}_{1N}| = \frac{\omega \mu_0 I}{2\pi} \ln \left[\frac{(x-a)^2 + (y-b)^2}{(x+a)^2 + (y-b)^2} \right]$$

Anche il campo conservativo $\vec{E}_{1C}$ può essere valutato analiticamente con il già citato metodo delle cariche immagine. La densità lineare di carica sui conduttori è legata al loro potenziale dalla relazione

$$\pm \lambda = \pm C_l V = \frac{2\pi \epsilon_0 V}{\ln \left[\frac{2ab}{r_c \sqrt{a^2 + b^2}} \right]}$$

dove la capacità C_l per unità di lunghezza di una linea bifilare in presenza di piano di terra vale:

$$C_l = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left[\frac{2ab}{r_c\sqrt{a^2+b^2}}\right]}$$

posto r_c il raggio dei conduttori.

Utilizzando l'estensione della legge di Coulomb integrata lungo conduttori caratterizzati da densità di carica lineari costante si ottiene:

$$|\vec{E}_{1C}| = \frac{C_l V}{2\pi\epsilon_0} \sqrt{f^2(x, y) + g^2(x, y)}$$

dove

$$f(x, y) = \frac{(x+a)}{(x+a)^2+(y-b)^2} - \frac{(x-a)}{(x-a)^2+(y-b)^2} + \frac{(x-a)}{(x-a)^2+(y+b)^2} - \frac{(x+a)}{(x+a)^2+(y+b)^2}$$

$$g(x, y) = \frac{(y-b)}{(x+a)^2+(y-b)^2} - \frac{(y-b)}{(x-a)^2+(y-b)^2} + \frac{(y+b)}{(x-a)^2+(y+b)^2} - \frac{(y+b)}{(x+a)^2+(y+b)^2}$$

Come detto, si ha interesse a calcolare il rapporto:

$$\frac{|\vec{E}_{1N}|}{|\vec{E}_{1C}|} = \frac{\frac{\omega\mu_0 I}{2\pi} \left| \ln\left[\frac{(x-a)^2 + (y-b)^2}{(x+a)^2 + (y-b)^2}\right] \right|}{\frac{C_l V}{2\pi\epsilon_0} \sqrt{f^2(x, y) + g^2(x, y)}}$$

cioè

$$\frac{|\vec{E}_{1N}|}{|\vec{E}_{1C}|} = \omega \frac{1}{c^2 C_l} \frac{I}{V} F(x, y)$$

dove c è la velocità della luce e

$$F(x, y) = \frac{\left| \ln\left[\frac{(x-a)^2 + (y-b)^2}{(x+a)^2 + (y-b)^2}\right] \right|}{\sqrt{f^2(x, y) + g^2(x, y)}}$$

Ad esempio, con $a = 5$ metri e $b = 20$ metri si ottiene per $F(x, y = 1 \text{ m})$ l'andamento riportato in figura A.1

Posto $I = 1500 \text{ A}$, $V = \frac{380 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \text{ V}$ e considerato che se $r_c = 1 \text{ cm}$, $a = 5$, $b = 20$ si ottiene $C_l \simeq 8 \frac{\text{pF}}{\text{m}}$ e

$$\omega \frac{1}{c^2 C_l} \frac{I}{V} \simeq 3 \cdot 10^{-6}$$

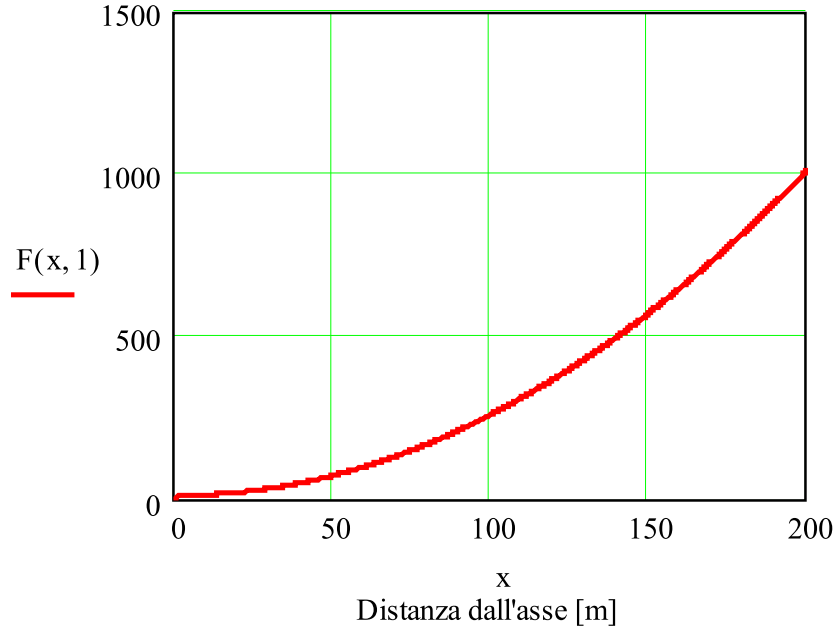


Figura A.1: Funzione ausiliaria $F(x,y)$

Come si vede, per $x=100$ metri si ha che il rapporto $\frac{|\vec{E}_{1N}|}{|\vec{E}_{1C}|}$ vale meno di 10^{-3} , e conseguentemente il campo elettrico longitudinale può essere considerato trascurabile rispetto a quello conservativo.

A.5 Induzione magnetica

L'induzione magnetica calcolata mediante l'algoritmo implementato per lo studio VIA è quella dovuta alle correnti che scorrono sui conduttori della linea (correnti primarie) mentre viene trascurato il contributo dovuto a tutte le correnti indotte, sia quelle nel terreno, sia quelle sulle eventuali spire conduttrici chiuse presenti. Per valutare la validità di questa assunzione

confronteremo l'induzione dovuta alle correnti primarie con quella legata a tutte le correnti indotte; tale confronto avverrà ovviamente nel semispazio di interesse (aria).

A.5.1 Induzione magnetica primaria

Come si è già detto, l'induzione magnetica primaria $\vec{B}_F$ è quella dovuta alle correnti che scorrono sui conduttori della linea e soddisfa pertanto la seguente relazione:

$$\nabla \times \vec{B}_{1F} = \mu_0 \vec{J}_{sorgenti}$$

L'algoritmo utilizzato per risolvere questa equazione è quello descritto in 4.1.1, mentre vari esempi di risultati del calcolo sono riportati nel paragrafo 4.4.

A.5.2 L'induzione magnetica dovuta alle correnti indotte

Si sono individuati tre principali fenomeni che possono determinare induzione di correnti relativamente al modello considerato:

1. primo fra tutti è quello che chiameremo “*effetto Faraday diretto*”: esistendo nel terreno un'induzione magnetica non nulla, questa genera un campo elettrico solenoidale (divergenza nulla, rotore non nullo) che a sua volta sostiene una densità di corrente che tende ad opporsi alla causa che la ha generata cioè alle variazioni di flusso magnetico nel terreno. Chiameremo questa densità di corrente $\vec{J}_{Ind}$.
2. Come si è accennato nel paragrafo A.3, sulla superficie del terreno viene indotta una densità di carica che varia “quasi-staticamente”. A

sostenere tale variazione di carica deve esistere una densità di corrente all'interno del terreno che renda conto del movimento di carica libera richiamata e respinta a ciclo alternato dalla superficie del terreno a causa dell'oscillazione di carica sul filo conduttore. Chiameremo questa densità di corrente $\vec{J}_\rho$.

3. Esiste infine un “*effetto Faraday di spira*”, legato alle eventuali spire conduttrici chiuse. È il caso della spira formata da due funi di guardia oppure da una fune di guardia, dai tralicci e dal terreno. La variazione del flusso di induzione magnetica accoppiato alla spira genera su di essa una differenza di potenziale e dunque una corrente che chiameremo $\vec{J}_{sp}$.

Dunque esistono almeno tre componenti di densità di corrente indotte con origine fisica diversa:

$$\vec{J}_{indotte} = \vec{J}_{Ind} + \vec{J}_\rho + \vec{J}_{sp}$$

dove la $\vec{J}_{sp}$ si può sia richiudere attraverso il terreno, sia “rimanere” sulle sole funi di guardia. Conseguentemente anche per l'induzione magnetica in aria si possono distinguere tre componenti, cioè:

$$\vec{B}_{1I} = \vec{B}_{Ind} + \vec{B}_\rho + \vec{B}_{sp}$$

Nelle pagine seguenti si valuterà quanto “pesa” ciascuna di queste componenti ed in particolare se è valida e con che limiti l'approssimazione

$$\vec{B}_1 = \vec{B}_{1F} + \vec{B}_{1I} \simeq \vec{B}_{1F}$$

Effetto Faraday “diretto”

Per determinare la densità di corrente indotta nel terreno a causa del campo elettrico longitudinale generato dalle variazioni di flusso di induzione si

parte dalle equazioni differenziali per il potenziale vettore, sia in aria che nel terreno:

$$\begin{cases} \nabla^2 \vec{A}_1 = 0 \\ \nabla^2 \vec{A}_2 = j\omega\mu\sigma \vec{A}_2 = jp^2 \vec{A}_2 \end{cases}$$

dove $\mu = \mu_0$ e $p^2 = \omega\mu\sigma$.

Grazie alla simmetria del problema si può assumere che, sia in aria sia nel terreno, il potenziale vettore abbia solo la componente secondo z , cioè:

$$\vec{A} = A(x, y) \hat{i}_z$$

ed in particolare che [13]:

$$A_1(x, y) = \int_0^\infty [Q_1(m)e^{my} + Q_2(m)e^{-my}] \cos[m(x-a)] dm$$

dove si assume che tutta la corrente sul filo ritorni attraverso il terreno e dove ci si è riferiti al caso di un solo conduttore rettilineo la cui intersezione col piano $z = 0$ è posta in (a, b) (figura A.2).

Scrivendo le espressioni per le componenti lungo x e y dell'induzione magnetica $\vec{B}_1$ e considerando che il contributo dovuto al filo soddisfa la legge di Biot-Savart, si ottiene che:

$$Q_1(m) = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{e^{-bm}}{m}$$

e quindi che:

$$B_{1x} = \frac{\partial \vec{A}_1}{\partial y} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{(b-y)}{(x-a)^2 + (b-y)^2} - \int_0^\infty Q_2(m) e^{-my} m \cos[m(x-a)] dm$$

$$B_{1y} = -\frac{\partial \vec{A}_1}{\partial x} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{(x-a)}{(x-a)^2 + (b-y)^2} + \int_0^\infty Q_2(m) e^{-my} m \sin[m(x-a)] dm$$

dove il secondo termine di ciascuna delle due componenti rappresenta il contributo all'induzione dovuto alle correnti indotte nel terreno per effetto

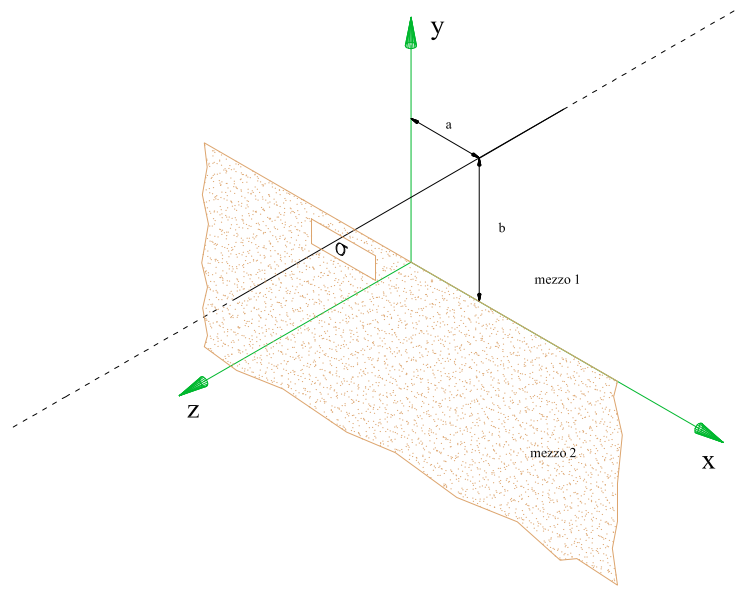


Figura A.2: Il sistema di riferimento utilizzato

Faraday:

$$B_{Ind\ x} = - \int_0^\infty Q_2(m) e^{-my} m \cos[m(x - a)] dm$$

$$B_{Ind\ y} = + \int_0^\infty Q_2(m) e^{-my} m \sin[m(x - a)] dm$$

Per determinare $Q_2(m)$ si deve considerare il potenziale vettore nel terreno $\vec{A}_2 = A_2(x, y) \hat{i}_z$; imponendo sia le condizioni al contorno sulla superficie del terreno sia che i campi tendano a zero per $y \rightarrow -\infty$, si ottiene che [13]:

$$\begin{cases} Q_2(m) = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left(\frac{\mu_2 m - q}{\mu_2 m + q} \right) e^{-bm} \\ q = q(m) = \sqrt{m^2 + jp^2} \end{cases}$$

dove al solito $p^2 = \omega\mu\sigma$. L'espressione per le due componenti di $\vec{B}_{Ind}$ è

quindi:

$$B_{Ind\ x} = -\frac{\mu_0 I}{2\pi} \int_0^\infty \frac{\mu_2 m - q}{\mu_2 m + q} e^{-m(y+b)} m \cos[m(x-a)] dm$$

$$B_{Ind\ y} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \int_0^\infty \frac{\mu_2 m - q}{\mu_2 m + q} e^{-m(y+b)} m \sin[m(x-a)] dm$$

L'effetto delle correnti indotte nel terreno dipende dalla conducibilità σ del terreno stesso; in figura A.3 è riportato l'andamento dell'induzione magnetica “primaria” al suolo ($y=0$) insieme a quella dovuta alle correnti indotte per diversi valori di conducibilità.

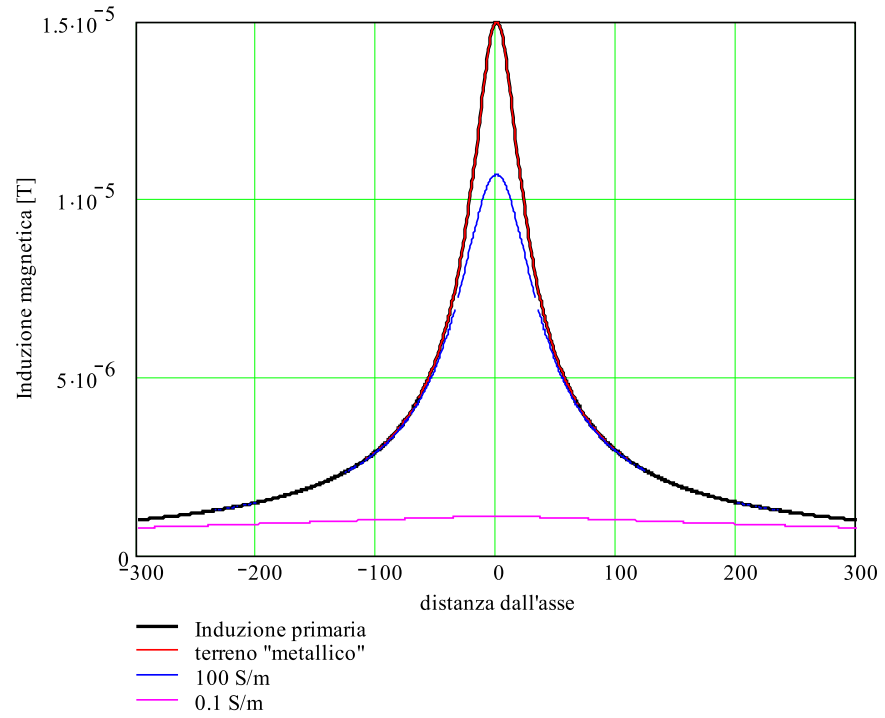


Figura A.3: Contributo all'induzione magnetica dovuto alle correnti indotte.

Come si nota, l'effetto è modesto anche per i massimi valori riscontrati per terreni reali ($\sigma = 0.1\ S/m$). Per conducibilità “metalliche” ($\sigma \simeq 10^7\ S/m$)

invece, l'andamento dell'induzione magnetica dovuto alle correnti indotte è praticamente identico a quello dovuto alle correnti primarie. Ciò corrisponde al fatto che, nel caso di buoni conduttori, si possa applicare per il calcolo di $\vec{B}$ il principio delle *correnti immagine*, analogamente a quanto si fa con le cariche quando si calcola il campo elettrico.

Può essere interessante fare un'ultima osservazione: la densità di corrente indotta nel terreno ha la seguente espressione [13]:

$$\vec{J}_{Ind} = -j \frac{p^2 I}{\pi} \int_0^\infty \frac{e^{-mb} e^{qy}}{\mu_2 m + q} \cos[m(x-a)] dm \hat{i}_z$$

se se ne determina il flusso su una generica sezione trasversa del terreno si ha che questo è uguale alla corrente che scorre sul conduttore cambiata di segno [13]:

$$\left\{ \int_{-\infty}^\infty \left[\int_0^\infty \vec{J}_{Ind} \cdot \hat{i}_z dy \right] dx \right\} = -I$$

Il caso di singolo conduttore è interessante dal punto di vista concettuale ma non corrisponde a situazioni realistiche. Per riportarsi ad un caso più vicino alla realtà è opportuno analizzare il caso di un sistema di più conduttori con correnti bilanciate, cioè tali che il flusso netto di corrente che fluisce lungo la linea sia nullo in ogni istante. Mentre la densità di corrente nel terreno sarà localmente non nulla, lo è invece il suo flusso su qualsiasi sezione trasversa.

In figura A.4 è rappresentata la disposizione dei tre conduttori a cui si farà riferimento per tutti i calcoli che seguono, mentre in figura A.5 è riportato l'andamento del rapporto:

$$\frac{|\vec{B}_F + \vec{B}_{Ind}|}{|\vec{B}_F|}$$

ad un metro dal suolo, allontanandosi dall'asse del sistema di conduttori trasversalmente ad esso e assumendo per la conducibilità del terreno tre valori distinti pari a 10^{-1} , 10^{-2} e 10^{-3} S/m (si veda il paragrafo A.1). L'ampiezza

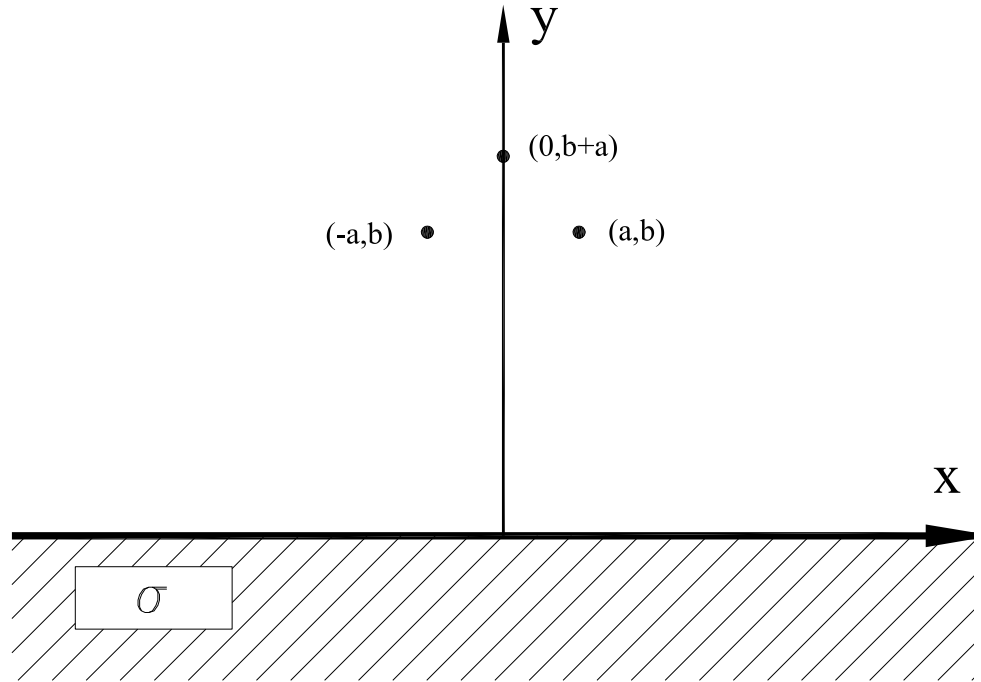


Figura A.4: Configurazione a tre conduttori

della corrente è pari a 1500 A, dove tra ogni conduttore e gli altri due la corrente è sfasata di $\pm \frac{2}{3}\pi$.

I calcoli effettuati si riferiscono al caso in cui $a = 5 \text{ m}$ e $b = 20 \text{ m}$: come si nota, se la conducibilità del terreno è bassa, l'effetto delle correnti indotte è sicuramente trascurabile in quanto il modulo del vettore somma $|\vec{B}_F + \vec{B}_{Ind}|$ è praticamente uguale a $|\vec{B}_F|$ (con $\sigma = 10^{-2}$ si ha che lo scostamento di $|\vec{B}_F + \vec{B}_{Ind}|$ rispetto a $|\vec{B}_F|$ è inferiore al 5% a 200 metri dall'asse del sistema di conduttori). Per terreni più conduttivi ($\sigma = 10^{-1}$) si ha invece che per $x = 200$ metri si raggiungono scostamenti dell'ordine del 10% e dunque in questo caso si deve procedere con maggior cautela.

Analizzato il comportamento del rapporto tra i vari termini, si consideri adesso l'andamento dei campi veri e propri; in particolare, in figura A.6 sono

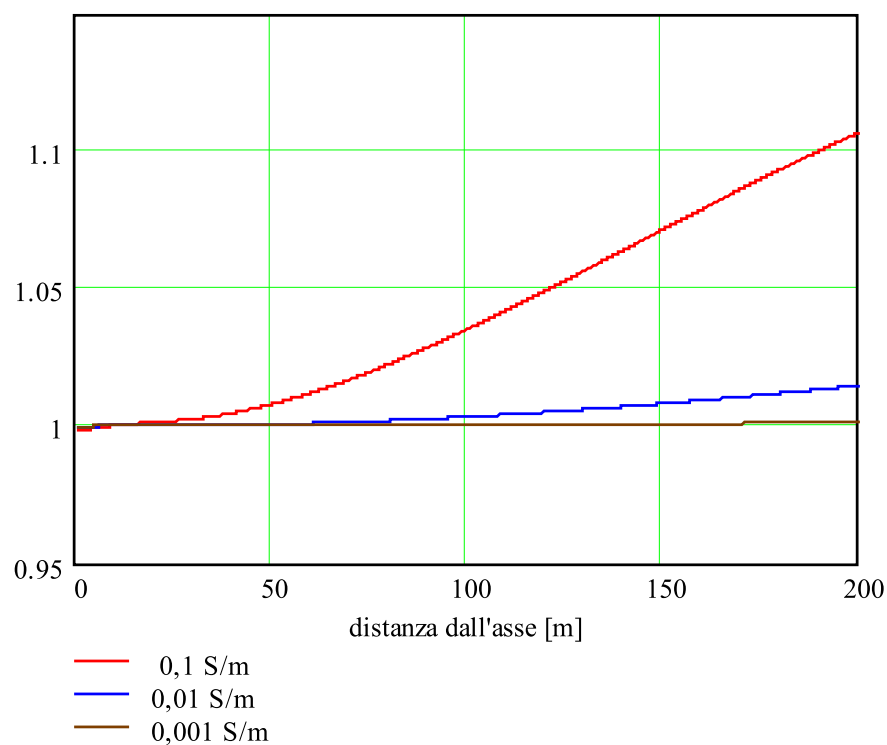


Figura A.5: Influenza correnti indotte

riportati quelli di $|\vec{B}_F|$ (in blu), di $|\vec{B}_F + \vec{B}_{Ind}|$ (in nero), e di $|\vec{B}_F| + |\vec{B}_{Ind}|$ (in rosso).

Ciò che attira subito l'attenzione è il fatto che il modulo del vettore somma è, a parità di x , sensibilmente più piccolo della somma dei moduli ad indicare che i due addendi non sono paralleli ed in fase come si sarebbe potuto pensare.

Visto che per lo studio di impatto ambientale il valore minimo per cui si sono tracciate le linee di isocampo è 0,2 microtesla, vediamo quali sono le differenze riscontrate quando si considerano le correnti indotte rispetto al caso in cui si trascurano.

Come si vede in figura A.6, se non si considerano le correnti indotte si

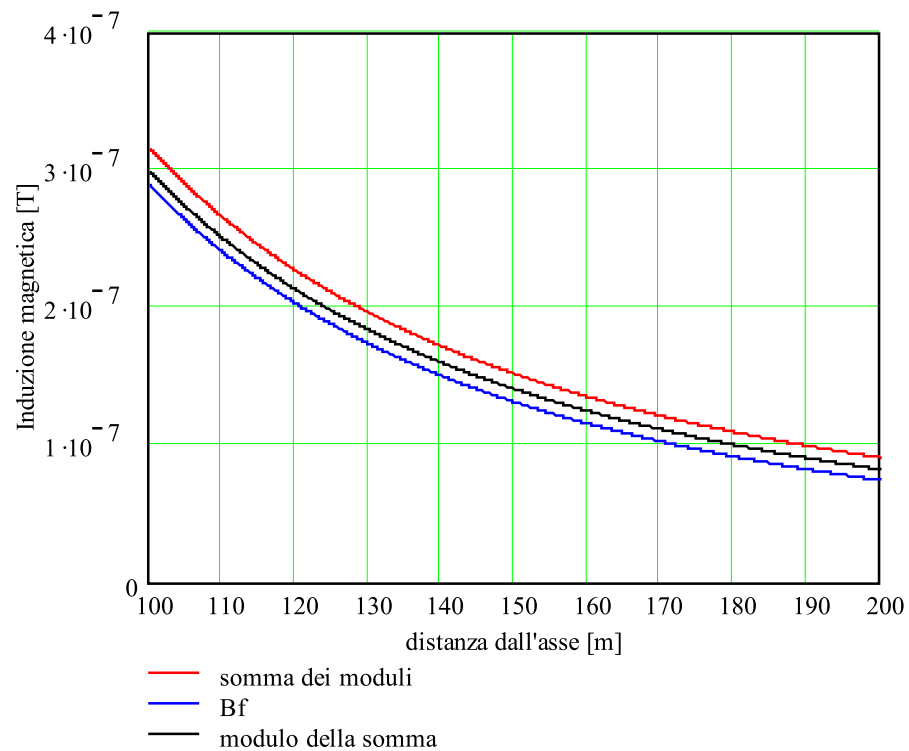


Figura A.6: Influenza correnti indotte a distanza dai conduttori

raggiungono gli 0,2 microtesla per $x \simeq 121$ metri (curva blu); nel caso invece se ne tenga conto (curva nera) si ha che lo stesso valore di campo è raggiunto con $x \simeq 124,2$ metri. L'incremento di 3,2 metri è appena rilevabile in scala 1:10000 (corrisponde a 0,32 millimetri).

L'esempio numerico presentato si riferisce a conduttori alti 20 metri da terra e a valori di corrente molto alti; in condizioni di correnti più basse si raggiungono gli 0,2 microtesla più vicino alla linea, dove il campo ha un gradiente secondo x più elevato. Essendo dunque il profilo del campo “più ripido”, $|\vec{B}_F|$ e $|\vec{B}_F + \vec{B}_{Ind}|$ assumeranno la stessa intensità per valori di x tendenzialmente più vicini.

Il fatto che le correnti indotte diano contributi sensibili solo lontano dalle sorgenti primarie (i conduttori percorsi da corrente) e che comunque tali contributi siano contenuti, può non essere considerato un motivo sufficiente per trascurarle, soprattutto in relazione alle preoccupazioni legate alle esposizioni croniche, che fanno ritenere come potenzialmente nocivi anche valori di induzione dell'ordine delle frazioni di microtesla; tale aspetto verrà trattato più approfonditamente nel paragrafo A.6.

Corrente indotta “quasi staticamente”

Come si è già detto, la densità di carica lineare che caratterizza i conduttori, determina l'induzione elettrostatica di una corrispondente densità superficiale di carica sul terreno. Questa densità di carica superficiale varia sinusoidalmente nel tempo a causa della corrispondente variazione del potenziale sui conduttori e quindi della densità lineare di carica su di essi.

La variazione di carica libera sulla superficie del terreno deve essere sostenuta da un relativo movimento di cariche libere e quindi da una densità di corrente. Di tale densità di corrente non si conosce altro che l'andamento presso la superficie di separazione ottenuto applicando le legge di continuità della corrente presso la superficie stessa.

Prima di procedere è opportuno notare che, calcolando il campo elettrico conservativo in aria, si era partiti dall'ipotesi che nel terreno il campo elettrico fosse nullo, comportandosi esso come un buon conduttore. In realtà ciò è vero solo in prima approssimazione, in quanto esiste nel terreno un campo elettrico $\vec{E}_\rho$ molto piccolo tale che $\vec{E}_\rho = \frac{\vec{J}_\rho}{\sigma}$ dove $\vec{J}_\rho$ è la densità di corrente di conduzione che sostiene la variazione della carica superficiale indotta “quasi-elettrostaticamente”.

Si consideri dunque la densità di corrente presso la superficie del terreno:

per $y < 0$ si ha che

$$\vec{J}_\rho(x, 0^-) = \sigma \vec{E}_2(x, 0^-) + j\omega\epsilon_2\epsilon_0 \vec{E}_2(x, 0^-) \simeq \sigma \vec{E}_2(x, 0^-)$$

mentre, per $y > 0$, essendo $\sigma = 0$, si ha solo la densità di corrente di spostamento $j\omega\epsilon_0 \vec{E}_1$. Imponendo la continuità della corrente per $y=0$ si ha dunque che:

$$\frac{|\vec{E}_2(x, 0^-)|}{|\vec{E}_1|} \simeq \frac{\omega\epsilon_0}{\sigma}$$

Alla frequenza di 50 Hz e nel caso in cui $\sigma = 0,1 \text{ S/m}$ si ha

$$\frac{|\vec{E}_2(x, 0^-)|}{|\vec{E}_1|} \simeq \frac{2,8 \cdot 10^{-9}}{\sigma} = 2,8 \cdot 10^{-8} \quad |\vec{J}_\rho(x, 0^-)| \simeq 2,8 \cdot 10^{-9} |\vec{E}_1(x, 0^+)|$$

Dalla seconda delle due espressioni si ricava che la densità di corrente $\vec{J}_\rho$ presso la superficie del terreno è legata all'ampiezza del campo elettrico in aria. Avendo al suolo delle intensità di campo al massimo dell'ordine della decina di $\frac{kV}{m}$, ci si aspettano delle densità di corrente con intensità non maggiori della decina di $\frac{\text{microampere}}{m^2}$. In figura A.7 si grafica l'andamento di $\frac{|\vec{J}_\rho|}{|\vec{J}_{Ind}|}$ per la configurazione a 3 conduttori con tensioni su ciascuno di essi di intensità pari a $\frac{380000}{\sqrt{3}}$ opportunamente sfasate, dove si è aggiunto un quarto conduttore rettilineo a potenziale di terra la cui intersezione col piano $z = 0$ è posta in $(0, 30)$ per modellare una fune di guardia.

Considerato che il contributo della $\vec{J}_{Ind}$ è appena sensibile, e comunque solo a distanza dai conduttori e visto che il rapporto $\frac{|\vec{J}_\rho|}{|\vec{J}_{Ind}|}$ vale circa 10^{-3} a 100 metri dall'asse del sistema dei conduttori, si può fin da ora affermare che le $\vec{J}_\rho$ sono trascurabili per quanto riguarda il loro contributo all'induzione magnetica in aria.

Con il calcolo appena descritto si è determinata la densità di corrente $\vec{J}_\rho$ presso la superficie del terreno ma niente si è detto riguardo al suo andamento

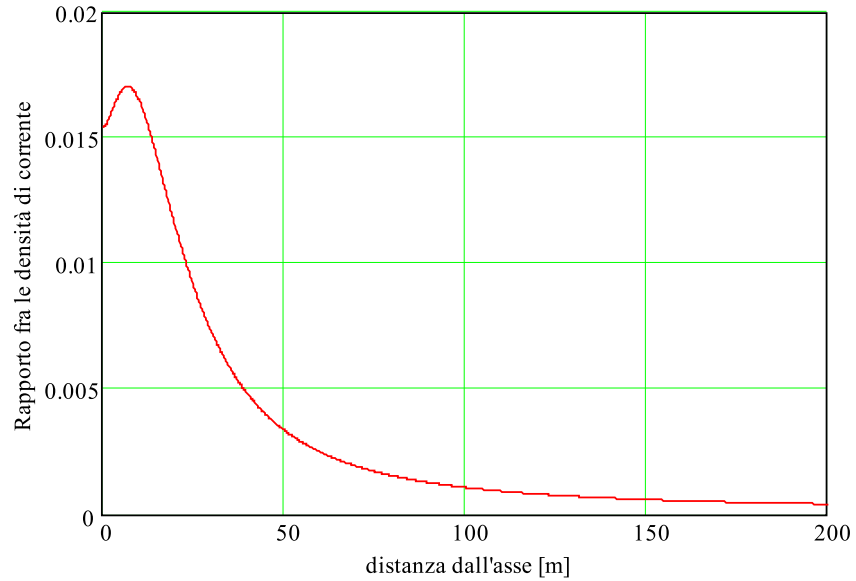


Figura A.7: Correnti indotte “quasi-elettrostaticamente”

all’interno del terreno stesso; tale problema è tutt’altro che banale e non verrà qui affrontato.

In questa sede ci basta aver valutato, almeno come ordine di grandezza, che questa corrente porta un contributo trascurabile all’induzione totale nella regione di interesse.

Accoppiamento con i conduttori di guardia

In questo paragrafo si considerano, relativamente ad ogni campata, le correnti indotte per effetto Faraday, nella spira formata dalla fune di guardia, dai sostegni e dal terreno tra di essi compreso.

Detta al solito $\vec{B}_F$ l’induzione magnetica generata dalle correnti primarie, si considera una campata lunga l_c metri con la fune di guardia posta a b_g metri dalla superficie del terreno (ci si riferisce ovviamente al modello con conduttori rettilinei ed indefiniti), se le basi dei sostegni sono poste rispet-

tivamente alle coordinate $(0, 0, 0)$ e $(0, 0, l_c)$, si ha che il flusso di induzione attraverso la spira considerata è dato da:

$$\Phi_s = \left\{ \int_0^{b_g} \left[\int_0^{l_c} \vec{B}_F(0, y) \cdot \hat{i}_x dz \right] dy \right\} = l_c \int_0^{b_g} \vec{B}_F(0, y) \cdot \hat{i}_x dy$$

La tensione indotta nella spira è dunque

$$V_s = -j\omega\Phi_s = -j\omega l_c \int_0^{b_g} \vec{B}_F(0, y) \cdot \hat{i}_x dy$$

La corrente indotta nella spira è data da:

$$I_s = \frac{V_s}{Z_s} \quad Z_s = R_s + j\omega L_s$$

La R_s è dovuta in parte alla fune di guardia ma soprattutto alla resistenza di “messa a terra” di ciascun sostegno. La fune di guardia ha una resistenza per unità di lunghezza dell'ordine dei $2 \frac{\Omega}{km}$ (dati Terna), mentre per ogni sostegno si hanno resistenze di messa a terra con valori compresi tra 1 e 5 Ω [10]; si possono dunque assumere per R_s valori compresi tra i 2 e i 10 Ω . Si suppone che la resistenza opposta dal terreno al passaggio di corrente sia trascurabile, non tanto in virtù della sua limitata conducibilità, quanto del fatto che la sezione S_t attraverso cui la corrente può scorrere è praticamente indefinita.

Per quanto riguarda L_s si può utilizzare in prima approssimazione l'espressione valida per una spira quadrata [3], [6]:

$$L_s = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[4(l_c + b_g) \ln \left(\frac{2l_c}{r} \right) - 4l_c \ln \left(\frac{l_c + \sqrt{l_c^2 + b_g^2}}{b_g} \right) - 4b_g \ln \left(\frac{b_g + \sqrt{l_c^2 + b_g^2}}{b_g} \right) - 8 \left(b_g + l_c - \sqrt{l_c^2 + b_g^2} \right) \right]$$

anche se l'induttanza reale sarà diversa in quanto la corrente si richiude attraverso il terreno diffondendosi in esso.

Per una campata lunga 400 metri con i conduttori di fase disposti come in figura A.4 ed il conduttore di guardia che interseca il piano a z costante in

(0,30), posta $R_s = 2 \Omega$ e $\sigma = 0,1 S/m$, si ottiene $Z_s \simeq 2 + j0,4 \Omega$ e poste le correnti sui conduttori di ampiezza pari a 1500 A, opportunamente sfasate, si ha che:

$$|I_s| \simeq 18,4 A$$

Analizziamo il contributo all'induzione in aria di ciascun ramo della spira: per quanto riguarda il **percorso verticale lungo i tralicci** si può supporre che le correnti relative a campate contigue, essendo in fase ma scorrendo in verso opposto, tendano a cancellarsi.

Per determinare in prima approssimazione il percorso di **ritorno della corrente attraverso il terreno** si valuta l'andamento delle linee di campo elettrico sostenute da una differenza di potenziale applicata tra le basi dei due sostegni. In particolare si assume che la densità di corrente di ritorno $\vec{J}_s$ attraverso il terreno assuma sul piano (x,z) l'andamento tipico delle correnti fra due elettrodi inseriti in un mezzo conduttore [9] (analogo a quello del campo statico di dipolo), cioè:

$$\vec{f}(x, z) = \frac{x\hat{i}_x + (z - l_c)\hat{i}_z}{[x^2 + (z - l_c)^2]^{\frac{3}{2}}} - \frac{x\hat{i}_x + z\hat{i}_z}{[x^2 + z^2]^{\frac{3}{2}}}$$

Per quanto riguarda l'andamento di $\vec{J}_s$ al variare di y, si assume il classico andamento del tipo

$$e^{\frac{y}{\delta}} \quad (y < 0) \quad \text{dove} \quad \delta = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \omega \sigma}}$$

Dunque si impone per $\vec{J}_s$ una espressione del tipo

$$\vec{J}_s = K(z) e^{\frac{y}{\delta}} \vec{f}(x, z)$$

dove $K(z)$ si determina imponendo che il flusso di $\vec{J}_s$ attraverso una sezione trasversa del terreno sia pari a $-I_s$, cioè:

$$K(z) = \frac{-I_s}{\int_{-\infty}^0 e^{\frac{y}{\delta}} dy \int_{-\infty}^{\infty} \vec{f}(x, z) \cdot \hat{i}_z dx} = \frac{-I_s z(z - l_c)}{2\delta l_c}$$

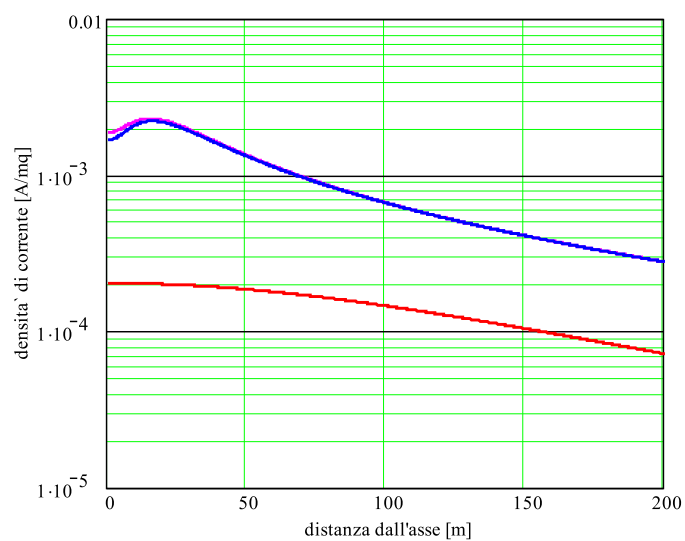


Figura A.8: Densità di corrente nel terreno: $y = -1 \text{ mm}$, x da 0 a 200 m

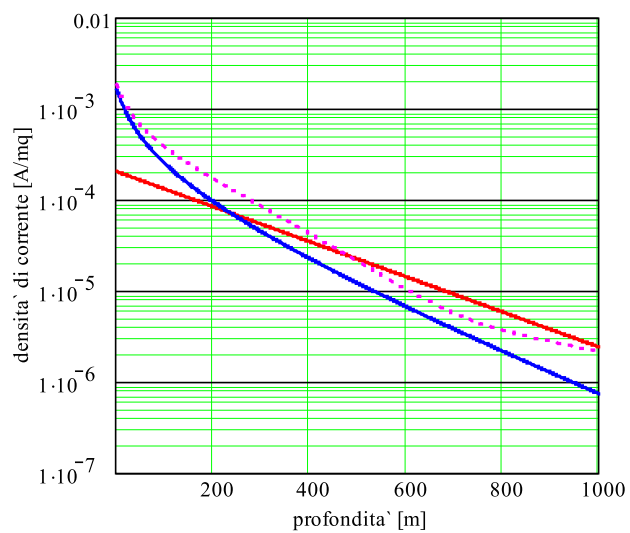


Figura A.9: Densità di corrente nel terreno: $x \simeq 20 \text{ m}$, y da 0 a -1000 m

Nelle figure A.8 ed A.9 si paragona $\vec{J}_s$ (Rosso) con $\vec{J}_{Ind}$ (blu) a metà campata mentre in magenta è graficato $|\vec{J}_{Ind} + \vec{J}_s|$. Come si nota, presso la superficie $|\vec{J}_{Ind}|$ è di un ordine di grandezza più grande rispetto a $|\vec{J}_s|$; andando in profondità si ha che “domina” $|\vec{J}_{Ind}|$ fino ad oltre 200 metri cioè fino a circa $\delta \simeq 225 \text{ m}$, dopodichè prevale $|\vec{J}_s|$, ma siamo ormai piuttosto distanti dalla superficie per poter contribuire significativamente all’induzione in aria. Inoltre, osservando la curva magenta, si nota che presso la superficie, a causa dello sfasamento tra i due contributi, la $\vec{J}_{Ind}$ prevale ancor più di quanto il confronto indiretto facesse prevedere.

Come si è trascurata $\vec{J}_\rho$, è lecito trascurare, almeno in prima approssimazione, anche questo contributo; i calcoli infatti si riferiscono a condizioni peggiorative rispetto alla realtà, sia per quanto riguarda σ (da cui dipende lo spessore della “pelle” δ) che è generalmente più piccolo di $0,1S/m$, sia per quanto riguarda la R_s , il cui valore è comunemente superiori ai 2Ω usati nei calcoli.

In sintesi, appare più che giustificato trascurare $\vec{J}_s$ nel calcolo dell’induzione in aria; tale densità di corrente, diffondendosi nel terreno, contribuisce infatti in misura generalmente piccola e sicuramente inferiore a $\vec{J}_{Ind}$, anch’essa a suo tempo valutata trascurabile nella maggior parte dei casi (paragrafo A.5.2).

Non Altrettanto si può dire per la **corrente che scorre nella fune di guardia**; per quest’ultima infatti non sussiste il fenomeno di compensazione che si verifica fra le correnti primarie e neanche quello di diffusione, come accade alla corrente nel terreno.

Detto $\vec{B}_g$ il contributo all’induzione dovuto alla corrente I_s sul conduttore di guardia, in figura A.10 sono riportati gli andamenti di $\vec{B}_F$ (blu), di $(|\vec{B}_F + \vec{B}_g|)$ (rosso) e di $(|\vec{B}_F| + |\vec{B}_g|)$ (nero); come si può notare, considerando

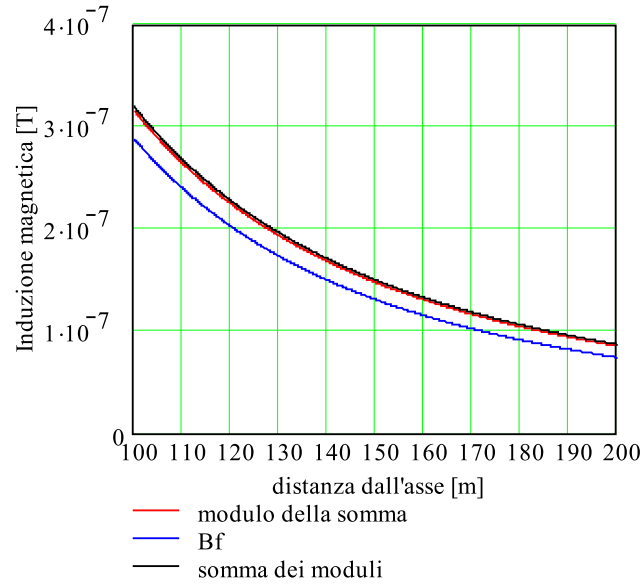


Figura A.10: Induzione magnetica ad 1 m dal suolo dovuta alle correnti sul conduttore di guardia (a distanza dai conduttori)

$|\vec{B}_F + \vec{B}_g|$, si raggiungono gli 0,2 microtesla circa 7 metri più lontano all'asse z rispetto a quando si calcola solo $|\vec{B}_F|$.

Dalle figure A.10 ed A.11 si può notare come sia determinante il contributo dello sfasamento nel calcolo del campo totale ed in particolare che, sotto ai conduttori (figura A.11) $\vec{B}_F$ e $\vec{B}_g$ sono paralleli nello spazio ma in quadratura per quanto riguarda le rispettive fasi, mentre a distanza da essi (figura A.10) i due termini tendono a sommarsi come vettori paralleli ed in fase fra loro.

In figura A.12 sono riportati gli andamenti per

$$\frac{|\vec{B}_F + \vec{B}_g|}{|\vec{B}_F|} \quad (rosso) \quad \frac{|\vec{B}_F| + |\vec{B}_g|}{|\vec{B}_F|} \quad (blu)$$

Come si può notare, a circa 120 metri dall'asse del sistema di conduttori si ha che considerando la corrente sulla fune di guardia si hanno variazioni all'induzione totale dell'ordine del 10-11% rispetto all'induzione primaria.

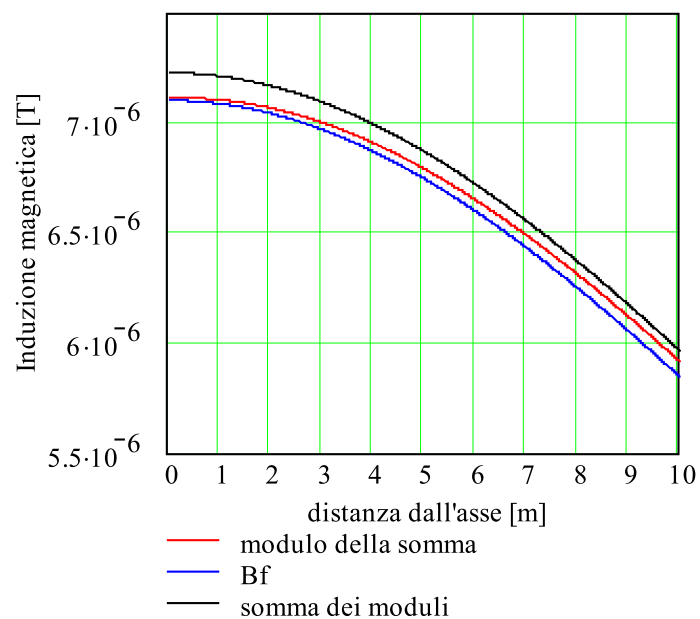


Figura A.11: Induzione magnetica ad 1 m dal suolo dovuta alle correnti sul conduttore di guardia (in prossimità dei conduttori)

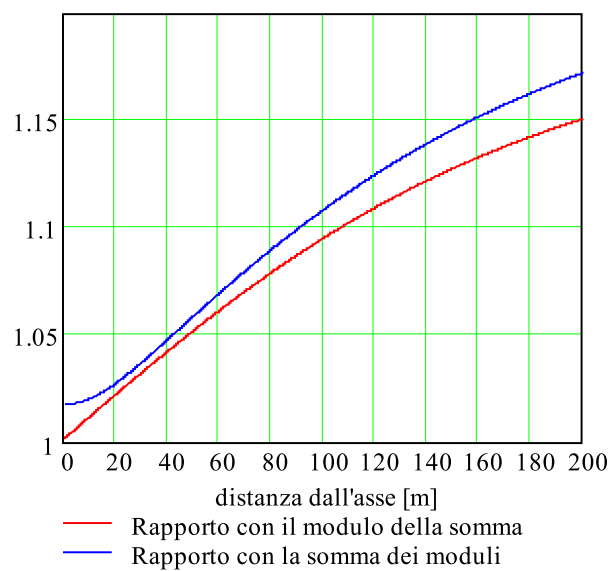


Figura A.12: Rapporto fra $|\vec{B}_g + \vec{B}_F|$ ed induzione primaria $|\vec{B}_F|$.

A.6 Conclusioni

Per quanto attiene al campo elettrico, l'algoritmo utilizzato per l'esecuzione dello studio VIA, prende in considerazione la componente di gran lunga dominante, come evidenziato nel paragrafo A.4.2. Inoltre, come si è ripetuto più volte, il campo elettrico reale può essere anche molto diverso da quello calcolato, in quanto risente localmente di elementi non facilmente modellabili quali la vegetazione o i manufatti. In ogni caso il campo elettrico ha come è noto un interesse limitato dal punto di vista di una valutazione di impatto ambientale (paragrafo 1.1) e non si sente dunque l'esigenza di sviluppare a tale scopo algoritmi di calcolo più sofisticati.

Ben altro interesse rivestono invece le considerazioni riguardanti il calcolo dell'induzione magnetica. Ricapitolando, si sono determinati tre meccanismi che provocano l'induzione di correnti nel terreno o nelle funi di guardia e che dunque sono potenzialmente in grado di alterare l'induzione totale in aria.

1. Si è visto che le correnti indotte per effetto Faraday direttamente nel terreno danno contributi appena significativi solo per terreni particolarmente conduttivi. È però importante notare che tali contributi tendono ad acquisire importanza se ci si allontana dai conduttori della linea.
2. Le correnti indotte nel terreno per induzione “quasi-elettrostatica” sono senza dubbio trascurabili in quanto di almeno due ordini di grandezza inferiori a quelle indotte per effetto Faraday.
3. Infine, esiste una corrente indotta nella spira formata dalla fune di guardia, dai tralicci e che si richiude attraverso il terreno, oppure attraverso un'altra eventuale fune di guardia. Considerando separatamente ciascun ramo della spira si è trovato che si possono trascurare sia i rami

verticali sia la corrente che si richiude attraverso il terreno. Più importante è invece il contributo all'induzione dovuto alla corrente sulla fune di guardia. Questa infatti non è compensata in alcun modo e può influire significativamente specialmente a distanza dalle fasi, dove l'induzione primaria decresce come $\frac{1}{r^2}$.

Fra tutti i contributi analizzati se ne sono dunque individuati due più significativi degli altri: la densità di corrente $\vec{J}_{Ind}$ indotta direttamente nel terreno e quella che scorre sulla fune di guardia.

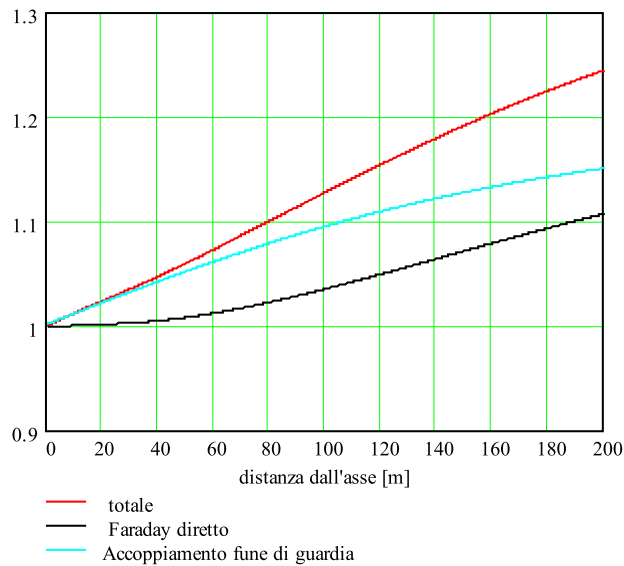


Figura A.13: Contributo all'induzione magnetica totale dovuto alle correnti indotte nel terreno e nelle funi di guardia

Sia l'induzione magnetica primaria, sia quella legata ai due fenomeni di induzione citati, sono proporzionali all'intensità di corrente primaria; ne consegue che qualsiasi rapporto tra combinazioni lineari di questi termini non dipende dalla corrente primaria ma solo dalla geometria del problema.

In figura A.13 sono riportati gli andamenti di $\frac{|\vec{B}_F + \vec{B}_{Ind} + \vec{B}_g|}{|\vec{B}_F|}$ (rosso), $\frac{|\vec{B}_F + \vec{B}_g|}{|\vec{B}_F|}$ (ciano) e di $\frac{|\vec{B}_F + \vec{B}_{Ind}|}{|\vec{B}_F|}$ (nero).

È da notare che già per $x \simeq 80 \text{ m}$ si ha che lo scostamento totale è dell'ordine del 10% di $\vec{B}_F$.

Se le correnti di fase sono piccole si ha che gli 0,2 microtesla si raggiungono per $x < 80 \text{ m}$ e dunque, considerando le sole componenti primarie, non si commettono grossi errori.

Al contrario se si assumono sui conduttori della linea correnti intense (ad esempio quelle nominali) si ha che gli 0,2 microtesla vengono raggiunti a una distanza dall'asse della linea elettrica per cui le correnti indotte possono contribuire significativamente all'induzione totale.

Appendice B

Specifiche per l'utilizzo del programma di calcolo dei campi

Le uniche specifiche da rispettare per l'utilizzo del programma di calcolo dei campi sono la presenza nella cartella che contiene il codice eseguibile, di due documenti di testo: il file “sezioni.txt” ed il file “interfaccia.txt”.

Nella prima parte di questa appendice vedremo come deve essere riempito il file “interfaccia.txt” cioè il documento utilizzato come interfaccia utente al programma di calcolo. Si è scelto per esso una strutturazione “a righe”, per cui, in base al tipo di riga (identificato dalla prima lettera) ed alle informazioni in essa contenute, sono definite le operazioni da effettuare nella sessione di calcolo.

Anche per quanto riguarda i risultati della sessione di calcolo, si sono utilizzati due file di appoggio:

1. un documento denominato “*out.txt*”, in cui sono fornite per esteso informazioni riguardanti lo svolgimento di tutta la sessione di calcolo, dalla costruzione delle linee, alla ricerca all'interno di ciascuna sezione, alle valutazioni lungo la verticale passante per i siti sensibili;

2. un documento denominato “*punti.txt*” in cui, su ciascuna riga, sono salvate le coordinate di ciascun “*punto di isocampo*” trovato dalle procedure di ricerca sulle sezioni.

Del “*file dei punti*” si è parlato descrivendo la fase di tracciamento delle linee di isocampo, nel paragrafo 4.3; del file “*out.txt*” si parlerà nella seconda parte di questa appendice.

Il documento di testo interfaccia.txt

I parametri che definiscono lo svolgimento della sessione di calcolo dei campi si fissano attraverso un file di testo di cui verranno descritte qui le specifiche. È bene specificare preliminarmente quanto segue: il documento “interfaccia.txt” *non serve* per inserire le caratteristiche tecniche delle sorgenti che non siano la corrente di linea; la definizione delle specifiche tecniche delle linee deve essere effettuata in fase di popolamento dell’archivio delle linee preliminarmente ai calcoli. Esso non serve neanche a definire l’andamento del terreno, le cui caratteristiche vengono estratte una volta per tutte dal modello digitale, come descritto nel paragrafo 3.2.1.

Il file di interfaccia permette invece di strutturare la sessione di calcolo in termini di:

1. elettrodotti da considerare nei calcoli;
2. corrente su ciascun elettrodotto considerato;
3. tipo di campo per cui cercare l’andamento delle linee di isocampo;
4. valore di campo per cui di tracciare le curve di livello per i campi;
5. altezza dal suolo da utilizzare per le simulazioni;

6. linee elettriche lungo cui effettuare le ricerche delle curve di livello con esplicita indicazione della prima ed ultima campata per cui effettuare tali ricerche;
7. linee elettriche “secondarie” da considerare come significative per ciascuna ricerca.

È opportuno precisare che in ogni sessione di calcolo sono possibili ricerche per un solo tipo di campo (elettrico o magnetico) e per un solo valore; ciò non toglie che, fissato tale valore, sia possibile effettuare un numero indefinito di ricerche lungo tratti di elettrodotto diversi.

Nella tabella B.1 è schematizzata la struttura del file e di seguito si spiegano le finalità di ciascuna delle righe di cui il file si compone.

L	n_{linee}				
id_{linea}	I_{linea}				
$\vdots$	$\vdots$				
id_{linea}	I_{linea}				
R	B/E	<i>valore cercato</i>	<i>quota</i>	<i>numero ricerche</i>	
se B					
	<i>id primaria</i>	$n_{campate}$	<i>campata iniziale</i>	<i>campata finale</i>	$n_{linee\ s}$
	S		<i>id secondaria</i>		
	$\vdots$		$\vdots$		
	S		<i>id secondaria</i>		
se E					
	<i>id linea</i>	<i>ccampata iniziale</i>	<i>campata finale</i>	S/N	
		se S			
		P	<i>id linea</i>	<i>scorr.</i>	
V	n valutazioni				
X	Y	Z_{suolo}	passo	n_{passi}	n_{linee}
	L	<i>id linea</i>			
	$\vdots$	$\vdots$			
	L	<i>id linea</i>			

Tabella B.1: Formato del file “interfaccia.txt”

- **riga L:**

n_{linee} numero di linee che vengono costruite all'inizio della sessione di calcolo;

- *n_{linee} righe successive:*

id_{linea} identificativo numerico della linea da costruire;

I_{linea} corrente da attribuire alla linea per effettuare le simulazioni;

- **riga R:**

B/E se B si vogliono tracciare linee di isocampo per il vettore induzione; se E si vogliono tracciare linee di isocampo per il campo elettrico;

valore cercato valore del modulo del campo (in microtesla o in kV/m) per cui si vogliono tracciare le linee di isocampo;

quota altezza dal suolo per cui si vogliono tracciare le linee di isocampo;

numero ricerche numero complessivo delle successive righe di ricerca;

- *Riga di ricerca di linee di isocampo per il vettore induzione ($B/E=B$):*

id primaria identificativo numerico della linea lungo cui si vuole tracciare le linee di isocampo;

$n_{campate}$ numero di campate della linea primaria da considerare nel calcolo, sia a monte sia a valle della campata lungo cui è posizionata la sezione su cui si sta effettuando la ricerca; in pratica si considerano in totale $(2n_{campate} + 1)$ campate della linea primaria;

- | | |
|-------------------------|--|
| <i>campata iniziale</i> | è il numero progressivo della prima campata della linea primaria lungo cui si vogliono tracciare le linee di isocampo; |
| <i>campata finale</i> | è il numero progressivo dell'ultima campata della linea primaria lungo cui si vogliono tracciare le linee di isocampo; |
| $n_{linee\ s}$ | numero di linee secondarie relative alle sezioni del tratto di linea individuato da i due progressivi precedenti; |
- *$n_{linee\ s}$ righe $\mathbf{S}$ successive:*

<i>id secondaria</i>	identificativo della linea da assegnare come secondaria a tutte le sezioni relative al tratto di linea individuato dal contenuto dei campi precedenti;
----------------------	--
 - *Riga di ricerca di linee di isocampo per il campo elettrico ($B/E=E$):*

<i>id linea</i>	identificativo numerico della linea lungo cui si vuole tracciare le linee di isocampo;
<i>campata iniziale</i>	è il numero progressivo della prima campata della linea lungo cui si vogliono tracciare le linee di isocampo;
<i>campata finale</i>	è il numero progressivo dell'ultima campata della linea lungo cui si vogliono tracciare le linee di isocampo;
S/N	se S c'è una linea parallela da considerare nei calcoli;
 - **riga $\mathbf{P}$** è la riga in cui si specificano i dati necessari per includere nel computo del campo elettrico due linee “parallele”:

<i>id linea</i>	identificativo linea;
<i>scorr.</i>	indice numerico (positivo o negativo) che indica lo sfalsamento dei progressivi associati alle campate delle due linee parallele;

- **riga V** riga relativa alla valutazione del campo lungo la verticale condotta per un punto di coordinate note; riga usata per la valutazione del campo in “siti sensibili”; per il momento è relativa al solo campo magnetico:

X, Y	coordinate Gauss-Boaga del punto in cui si vuole effettuare la valutazione lungo la verticale;
Z_{suolo}	è la quota del punto più basso per cui si vuole effettuare il calcolo del campo;
$passo$	è la distanza misurata lungo la verticale fra due punti contigui in cui si effettua il calcolo del campo;
n_{passi}	è il numero di punti (presi a distanza <i>passo</i>) in cui si vuole effettuare i calcoli;
n_{linee}	è il numero di linee da considerare come sorgenti di campo nella valutazione “verticale”;

- n_{linee} successive:

id linea identificativo linea.

Nell'esempio che segue si riporta il contenuto del file di interfaccia col quale si imposta una sessione di calcolo:

```

L 6
1001 600
1003 600
1004 600
1005 600
1007 250
1008 250
R B 2 1 2
1001 3 1 10 1
S 1005
1003 3 1 13 2
S 1001
S 1004
V 1

```

1675344 4845658 72 0.5 100 1
L 1001

Di seguito si analizza l'esempio riga per riga:
si costruiscono 6 linee

L 6

per ciascuna delle quali si riportano in ordine identificativo numerico (1001)
e corrente (600 A) da assegnare per i calcoli:

1001 600

In seguito si impostano i parametri delle ricerche, in particolare che le ricerche
si riferiranno al vettore induzione (B), che si tratteranno le curve per il
livello di 2 microtesla, che dette curve saranno tracciate relativamente ad
una altezza dal suolo pari ad 1 metro e che nella sessione verranno effettuate
2 ricerche su altrettante linee o tratti di linea.

R B 2 1 2

Prendendo ad esempio la seconda ricerca si ha che: la linea lungo cui si
vogliono tracciare le linee di isocampo è la numero 1003; il numero di campate
di questa linea da considerare nei calcoli *a monte e a valle* di quella su cui
si stanno eseguendo i calcoli è 3, dunque in questo caso si considerano 7
campate della linea 1003, a meno che non si sia all'inizio o alla fine della linea.
Si effettuerà la ricerca delle linee di isocampo dalla prima (1) alla tredicesima
campata della linea (13), ed in ciascun punto il campo sarà calcolato tenendo
conto oltre alla linea 1003, di altre 2 linee.

1003 3 1 13 2

Le due linee “secondarie” da considerare come sorgenti quando si effettua la ricerca delle linee di isocampo lungo le prime tredici campate della linea 1003 sono le linee 1001 e 1004.

S 1001

S 1004

Finita la ricerca si esegue il calcolo del vettore induzione lungo una segmento verticale (V 1) che ha il suo estremo più basso nel punto di coordinate Gauss-Boaga 1675344, 4845658 e quota pari a 72 metri; si esegue il calcolo del campo in 100 punti con un passo tra un punto ed il successivo pari a mezzo metro (0,5) considerando come sorgente 1 sola linea che è la numero 1001.

1675344 4845658 72 0.5 100 1

L 1001

Il contenuto del documento di testo “out.txt”

Questo file è nato come file di “*debug*”, ma è stato mantenuto perché fornisce informazioni complementari a quelle strettamente necessarie alla visualizzazione dei risultati sotto forma di linee di isocampo.

Per quanto riguarda la fase preliminare di ogni sessione di calcolo, cioè quella in cui si costruisce il modello per le linee considerate, il contenuto del file riporta sia i dati ricevuti dall’archivio delle linee, sia informazioni riguardanti la costruzione di ciascun oggetto:

```
Costruttore linea()
Dati Linea
+OK 1001 301 380000.00 1500.00 29 600.00
Dati Campata
```

```

+RDY  1001    1    4001    4002    5 AA
Dati dei conduttori
1678978.48 4842783.43  88.00 1678747.77 4842757.64 134.00 1812.0  0 F 0.190
1678978.00 4842788.00  93.00 1678747.00 4842765.00 135.00 1812.0 120 F 0.190
1678977.52 4842792.57  88.00 1678746.23 4842772.36 134.00 1812.0 240 F 0.190
1678978.00 4842788.00  96.40 1678747.49 4842760.33 141.50 2087.0  0 G 0.012
1678978.00 4842788.00  96.40 1678746.51 4842769.67 141.50 2087.0  0 G 0.012
Punti di sospensione:
Sostegno Iniziale:
1.67898e+006 4.84278e+006 88
1.67898e+006 4.84279e+006 93
1.67898e+006 4.84279e+006 88
1.67898e+006 4.84279e+006 96.4
1.67898e+006 4.84279e+006 96.4
Sostegno Finale:
1.67875e+006 4.84276e+006 134
1.67875e+006 4.84277e+006 135
1.67875e+006 4.84277e+006 134
1.67875e+006 4.84276e+006 141.5
1.67875e+006 4.84277e+006 141.5
La Catenaria e stata campionata con 5 punti :
punto 0 : 1678978.5 , 4842783.4 , 88
punto 1 : 1678920.8 , 4842777 , 96.6
punto 2 : 1678863.1 , 4842770.5 , 107.2
punto 3 : 1678805.4 , 4842764.1 , 119.6
punto 4 : 1678747.8 , 4842757.6 , 134
La Catenaria e stata campionata con 5 punti :
punto 0 : 1678978 , 4842788 , 93
punto 1 : 1678920.3 , 4842782.3 , 100.62086
.....
.....

```

Finita la fase di costruzione delle linee viene documentata la ricerca delle linee di isocampo: per ciascun punto rilevato durante la ricerca vengono riportate informazioni come la distanza d dal relativo caposaldo, il valore di campo calcolato, le campate delle linee secondarie per la sezione considerate.

```

Campata numero 1
Sezione numero 4
71 71 71 71 71 71 71 70 70 69 69 69 71 71 72 73 71 71 71 74

```

```

71 71 72 72 71 71 71 71 71 71 71 71 71 71 72 72 73 71 68 72
Dati linee secondarie:
Linea 1002 indici campate incluse nel calcolo ->1 , 2
Linea 1007 indici campate incluse nel calcolo ->1 - 6
Linea 1008 indici campate incluse nel calcolo ->1 - 3
Dentro Cerca_B_destra
ho trovato 1 zero
Estremi di ricerca:28,32
Dentro biseziona_funzione
Uscita con :
d2=29.654297
E2=-1.39859e-010
f(d2)=1.9998601e-006
n=15
Dentro Cerca_B_sinistra
ho trovato 1 zero
Estremi di ricerca:32,36
Dentro biseziona_funzione
Uscita con :
d2=32.794922
E2=3.0826237e-012
f(d2)=2.0000031e-006
n=15

```

Appendice C

Specifiche per l'utilizzo dell'applicazione che accede all'archivio cartografico

L'organizzazione dei files

Il codice eseguibile può essere posizionato in una cartella qualsiasi, ma è necessario che nella stessa cartella siano archiviati i seguenti documenti:

- **adinit.DAT**: necessario a tutte le applicazioni basate sulle librerie di funzioni OPENDWG, che permettono di leggere, creare e modificare i files dwg.
- **blocco_sostegno.dwg**: in cui è contenuto il blocco attraverso il quale si individua la posizione e l'identificativo dei sostegni nel caso si voglia verificarne la posizione in base al contenuto dell'archivio.
- **interfaccia.txt**: è l'interfaccia all'applicazione; il suo nome (seguito

dall'estensione .txt) è passato come unico parametro nel momento in cui si lancia l'eseguibile.

Il file di testo “interfaccia”

In tabella C.1 si riporta una schematizzazione della struttura del file e, di seguito, si espongono le finalità di ciascuna delle righe di cui il file si compone.

N	n_operazioni						
S	modello .dwg	id_linea	passo long.	passo trasv.	n_punti	i/t	
T	modello .dwg	id_linea	passo long.	passo trasv.	n_punti	i/t	
P	file .dwg	passo					
B	file .dwg						
C	file .dwg						
E	sostegni .dwg	modello .dwg					
V	file .dwg	id_linea					
W	file .dwg	<i>n_linee</i>					
L	id_linea						
:	:						
L	id_linea						
I	file .dwg	file .txt					

Tabella C.1: struttura del file interfaccia

- **riga N:**

n_operazioni è il numero di righe P,B,C,V,W,I che si trovano nella parte seguente del file; ci possono essere righe di un solo tipo piuttosto che di tipo diverso.

- **riga S:** creazione del file delle sezioni relativo ad uno specifico elettrodotto le cui caratteristiche sono contenute nell'archivio delle linee. Il file DWG a cui ci si riferisce deve essere archiviato nella stessa cartella dell'eseguibile e deve contenere il modello del terreno che copre la zona occupata dalla linea elettrica lungo cui si vogliono estrarre le sezioni. Viene utilizzato il *vecchio algoritmo di sezionamento*

modello.dwg è il nome del file .dwg in cui è contenuto il modello del terreno.

id_linea identificativo della linea considerata

passo long. distanza fra i piani di sezioni contigue misurata lungo l'asse della linea.

passo trasv. distanza fra punti contigui appartenenti alla stessa sezione, misurata lungo la direzione orizzontale, trasversale alla linea.

n_punti numero dei punti appartenenti a ciascuna sezione per ciascuno dei due bracci laterali.

i/t se **i** il file del modello è georeferenziato in coordinate Gauss-Boaga, se **t** sono state utilizzate delle coordinate "troncate" che per brevità tralasciano le due cifre più significative delle coordinate Gauss-Boaga "intere".

- **riga T:** ha le stesse finalità e la stessa struttura della precedente riga S con la differenza che viene utilizzato il *nuovo algoritmo di sezionamento*

- **Riga P:** creazione del file in cui si riportano le coordinate dei punti appartenenti alla superficie del suolo lungo il tracciato del tratto interrato, le cui quote sono calcolate in base al modello del terreno. Il file DWG a cui ci si riferisce deve contenere il modello e tutte e sole le polilinee che rappresentano i tracciati dei tratti interrati di cui si vuole estrarre il profilo. Gli elementi di altro tipo (anche le linee) non verranno comunque considerati e non è necessario quindi eliminare dal file gli elementi che non siano polilinee superflue.

file.dwg è il nome del file .dwg in cui è contenuto il modello del terreno e le polilinee che rappresentano i tratti interrati considerati.

passo è la distanza in metri che separa due punti contigui del profilo; nel caso vi sia un “vertice” della polilinea che disti meno di “passo” metri dall’ultimo punto estratto lungo la linea, questo viene comunque considerato.

- **Riga B:** creazione del file di testo in cui vengono riportate le coordinate e gli identificativi di ciascun sostegno; serve in fase di riempimento dell’archivio delle linee allorché le posizioni dei sostegni debbano essere ricavate dalla cartografia digitale. In particolare legge la posizione e l’attributo identificativo di ogni blocco “sostegno” posizionato, sul file referenziato e riporta queste informazioni su un file di testo.

file.dwg è il nome del file su cui si sono disposti opportunamente i blocchi “sostegno” e che deve includere anche il modello del terreno della zona considerata.

- **Riga C:** come la precedente con la differenza che mentre se uso la riga B la quota dei sostegni è ricavata in base al modello del terreno che dunque deve essere presente nel file DWG, con la riga C la quota riportata nel file di uscita è quella immagazzinata nell’attributo “QUOTA” di ciascun blocco “sostegno” e che è stata ricavata da ispezione della cartografia o da un profilo della linea.

file.dwg è il nome del file su cui si sono disposti opportunamente i blocchi “sostegno”;

- **Riga E:** come la precedente riga B; utilizzata nel caso in cui le dimensioni del file che contiene il modello del terreno siano troppo grandi per permettere di modificarlo direttamente con Autocad. Si dispongono i sostegni su un file indipendente.

sostegni.dwg è il nome del file su cui sono disposti opportunamente i blocchi “sostegno”;

modello.dwg è il nome del file che contiene il modello del terreno;

- **Riga V:** creazione di un nuovo DWG in cui siano contenuti i blocchi “sostegno” che rappresentano i sostegni della linea considerata in base alle loro caratteristiche contenute nell’archivio delle linee. È uno strumento di verifica del contenuto dell’archivio.

file.dwg nome del nuovo file in cui verranno posizionati i blocchi “sostegno”;

id_linea è l’identificativo della linea per cui si vuole verificare la posizione dei sostegni.

- **Riga W:** come la precedente riga V con la differenza che vengono riportati sullo stesso file DWG i blocchi “sostegno” relativi a più linee.

file.dwg nome del nuovo file in cui verranno posizionati i blocchi “sostegno”;

n_linee è il numero delle linee di cui si vuole verificare la posizione dei sostegni; è anche il numero delle successive righe L.

- **Righe L:** sono legate alla precedente riga W; sono *n_linee* righe in successione dopo una riga W.

id_linea è l’identificativo della linea per cui si vuole verificare la posizione dei sostegni.

- **Riga I:** creazione di un nuovo file in cui verranno inseriti tutti i punti di passaggio delle linee di isocampo le cui coordinate sono state calcolate durante una sessione di calcolo e che verranno poi uniti secondo le modalità descritte nel paragrafo 4.3.

file.dwg è il nome del nuovo file in cui verranno creati i punti di passaggio delle polilinee;

file.txt è il nome del file di testo in cui sono state salvate le coordinate dei punti di passaggio delle linee di isocampo. Il file deve trovarsi nella stessa cartella dell’eseguibile o in una cartella da essa contenuta; in questo caso il nome file deve contenere l’indicazione del percorso a partire dalla cartella dell’eseguibile, per esempio: “\\cartellafile\\nome file.txt”.

Bibliografia

- [1] D. Andreuccetti: *Campi magnetici a bassissima frequenza - Studi relativi alla valutazione della pericolosità*. Notizie, Dicembre 1996.
- [2] G. Bezoari: *Manuale di topografia moderna*, Città Studi Edizioni, Milano, 1996.
- [3] G. Colombo: *Manuale dell'ingegnere civile ed industriale*, ottantesima edizione, Hoepli, Milano, 1979, p 1374.
- [4] Comba, Grandolfo, Minoia, Oleari, Rossi: *Campi elettromagnetici*, Le Scienze; Ottobre 2001.
- [5] B. Finzi: *Meccanica razionale*, Zanichelli, Bologna, 1973, pp 193-200.
- [6] F. W. Grover *Inductance calculations*, Dover Publications, New York, 1973.
- [7] M. Fondelli, *Manuale di topografia*, Laterza, Bari, 1991.
- [8] A. Hill: *The environment and disease: association or causation?*, Proc. R. Soc. Med. 58:295-300, Bradford (USA), 1961.
- [9] P. L. Nunez, *Electric fields of the brain*, Oxford University Press, New York, 1981, Cap 4.

- [10] L. Olivieri E. Ravelli *Impianti di generazione e di trasporto dell'energia elettrica*, Cedam, Padova, 1980, pp. 415-470.
- [11] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, B. P. Flannery: *Numerical recipes in C -Second Edition*. Cambridge University Press, Cambridge, 1992, pp 55-60, 130-140, 350-354.
- [12] W.R. Smythe *Static and dynamic electricity*, Mc Graw Hill, New York, 1968, pp 289-290.
- [13] J. A. Tegopoulos, E. E. Kriezis, *Eddy currents in linear conducting media*, Elsevier, Amsterdam, 1985, pp 95-100.
- [14] A. D. Watt, *VL F Radio Engeneering*. Pergamon Press, 1967, p 183.
- [15] N. Wertheimer, E. Leeper: *Electrical wiring configurations and childhood cancer*. American Journal of Epidemiology, 1979 (USA).
- [16] D. R. J. White: *Elettromagnetic interference and compatibility*. Don white Consultants, (USA), vol 3 pp 9.21-23.
- [17] Istituto Superiore della Sanità: *Indicazioni per gli studi di impatto ambientale relativamente alla componente "salute pubblica" -Linee elettriche-*, Pubblicazione ISTSAN, dicembre 1994.
- [18] *Manuale per la valutazione di impatto ambientale*. A cura della Regione Lombardia, 1994.
- [19] CEI: *Guida ai metodi di calcolo dei campi elettrici e magnetici generati da linee elettriche*, Norma CEI 211-4, Milano, Luglio 1996.

- [20] CEI: *Guida per la misura e la valutazione dei campi elettrici e magnetici nell'intervallo di frequenza 0 Hz - 10 kHz, con riferimento all'esposizione umana*, Norma CEI 211-6, Milano, Gennaio 2001, pp 21, 22, 83,84.
- [21] CENELEC: *Human exposure to electromagnetic fields -low frequency (0 Hz to 10 kHz)*; CENELEC ENV 50166-1; gennaio 1995.
- [22] INIRC: *Interim guidelines on limits of exposure to 50/60 Hz electric and magnetic fields*. Health Physics, gennaio 1990.
- [23] ICNIRP: *Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)*. Health Physics, 1998, Vol. 74 No 4, pp 494-522.
- [24] Report NIEHS *Report on health effects from exposure to power-line frequency electric and magnetic fields*; NIH Publication, 1998 n. 99-4493.
- [25] Advisory Group on Non-ionising Radiation (AGNIR): *ELF Electromagnetic Fields and the Risk of Cancer*. Documents of the NRPB, 2001 (UK), Volume 12 No 1.