

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dell'Energia Elettrica

Tesi di Laurea

UN CASO REALE DI AUMENTO DELLA POTENZA
TRASMISSIBILE DA UNA LINEA AEREA
IN DOPPIA TERNA A 132 KV

Relatore:

Prof. BENATO ROBERTO

Laureando:

CATARGIU

EDUARD GABRIEL

Correlatore aziendale:

Ing. DIEGO BEGGIATO

ANNO ACCADEMICO 2023-2024

Per tutta la gente che c'è dall'inizio,

E per tutti quelli che ho incontrato lungo il cammino...

È stato un lungo viaggio!

Indice

1	Introduzione	3
2	Trasmissione dell'energia elettrica	5
2.1	Storia della trasmissione	5
2.1.1	I grandi impianti	7
2.1.2	Liberalizzazione del settore elettrico	7
2.2	Metodi di trasmissione	8
2.2.1	I tralicci	8
2.2.2	Cavi	13
2.2.3	GIL	15
2.2.4	Linee ibride di trasmissione	16
3	Campi elettromagnetici	17
3.1	Elettricità e magnetismo: storia e spiegazione.	17
3.2	Campi elettromagnetici generati da elettrodotti	23
3.2.1	Confronto con campi generati dai cavi	26
3.2.2	Elementi di calcolo per la valutazione del campo magnetico	28
3.3	Effetti.sulla.salute dei campi elettromagnetici.	33
4	Studio pratico	35
4.1	Incremento portata: sistemi real-time	37
4.1.1	Sistema DTR (Dynamic Thermal Rating)	39
4.1.2	Ampacimon	42

4.2	Normative vigenti riguardo le distanze dei conduttori	45
4.3	Studio e misurazione del franco	47
4.3.1	Estrapolazione dati DPM-3D	48
4.3.2	Metodi risolutivi adoperati	51
5	Verifica dei campi magnetici	53
5.1	Studio teorico dei campi generati	53
6	Conclusioni	57
	Bibliografia	59
	Elenco delle figure	63
	Ringraziamenti	66

Capitolo 1

Introduzione

Dopo aver introdotto la storia della trasmissione dell'energia elettrica, dalla sua nascita all'uso quotidiano e sicuro della stessa, analizzeremo i metodi utilizzati al fine di trasportare questa energia dal punto di generazione a quello di utilizzo, con un'elencazione dei pregi e dei difetti delle rispettive tecnologie. Andremo successivamente a descrivere la storia delle scoperte che hanno portato alla conoscenza delle onde elettromagnetiche, citando le scoperte cardine nella postulazione del fenomeno fino alla sua totale comprensione. Utilizzeremo i concetti sopra citati per analizzare i comportamenti degli elettrodotti aerei e in cavo per un confronto puramente esemplificativo, e i metodi adoperati alla mitigazione di tale fenomeni. Verranno inoltre citati i possibili effetti dei campi elettromagnetici sulla salute delle persone che hanno dimora in prossimità di palificazioni elettrificate. Attraverso il programma di Terna "DPM-3D", che si basa sulla proiezione di punti digitali sulle superfici solide, si andranno ad analizzare le distanze dei franchi da dover rispettare. Queste distanze verranno studiate anche grazie ad un sistema real-time, nello specifico il "Dynamic Thermal Rating", che permette di valutare istantaneamente, in funzione del tempo atmosferico, la massima capacità di carico di un conduttore attraverso una centralina elettrica posta in prossimità dell'elettrodotto aereo.

Capitolo 2

Trasmissione dell'energia elettrica

Prima di poter essere utilizzata dagli utenti finali, l'energia elettrica necessita di essere trasportata dal luogo di generazione a quello di consegna. Tale trasporto avviene attraverso diversi sistemi, ognuno dei quali con i rispettivi pregi e difetti. Dopo aver introdotto la storia della trasmissione dell'energia elettrica analizzeremo di seguito il suo trasporto attraverso cavi e tralicci, soffermandoci sugli aspetti teorici che caratterizzano il funzionamento di entrambe le tecnologie e su quelli pratici riguardo le tipologie e la posa degli stessi.

2.1 Storia della trasmissione

La prima trasmissione dell'energia elettrica avvenne in corrente continua, nel 1882 e collegava un motore a vapore al palazzo di vetro di Monaco di Baviera dove si stava tenendo una mostra sull'elettricità. La centrale di produzione dell'energia e il punto d'arrivo distavano 57 chilometri, mentre la tensione elettrica utilizzata era di 2 kV, trasmettendo solamente 2,5 kiloWatt di potenza che servì ad alimentare una cascata artificiale. Per la trasmissione venne adoperato un cavo telegrafico progettato da Oskar von Miller e Marcel Deprez.[20].

Il 4 settembre dello stesso anno venne realizzata da Thomas A. Edison una centrale elettrica sempre in corrente continua per la distribuzione commerciale dell'energia a Pearl Street- Manhattan [26]. Essa prevedeva:

- Generatore (dinamo) "Jumbo" da 27-ton a 100 kW, con rendimento molto basso.
- Sistema in corrente continua a 110 V (non pericolosi).
- Linee isolate ed interrate.
- Contatori per la fatturazione dell'energia (conta-carica elettrica).

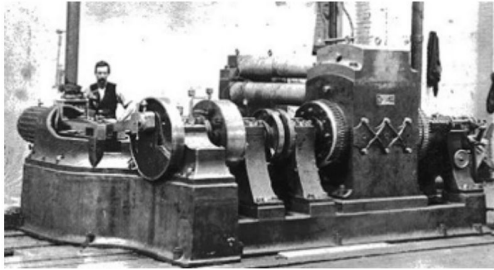


Figura 2.1: Dinamo Jumbo

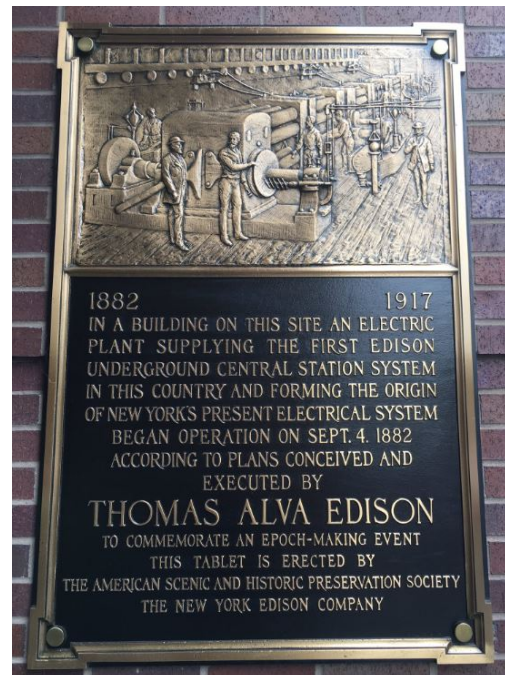


Figura 2.2: Memoriale

Per quanto riguarda la trasmissione in regime trifase bisognerà aspettare il 1891, quando, durante la mostra internazionale sull'elettricità a Francoforte sul Meno, venne installata la prima linea sperimentale in media tensione. Questo progetto aveva lo scopo di dimostrare l'efficacia delle idee di Galileo Ferraris e aveva una lunghezza di 177 km, alimentata a 15kV e 40Hz. Questo tipo di sistema trifase, tra quelli polifase, mostrava le minori perdite di energia per effetto Joule. L'efficienza della linea risultò essere del 77% [20].

2.1.1 I grandi impianti

Per assistere alla realizzazione di un grande impianto bisognerà aspettare il 1896, quando la società Westinghouse negli Stati Uniti collegò con successo la centrale delle cascate del Niagara alla città di Buffalo, distante 32 km. Questo grande impianto segnò la fine della "guerra delle correnti" e rese la corrente trifase il mezzo universale per il trasporto dell'energia elettrica su lunghe distanze. È stata un'impresa che ha cambiato il modo in cui l'energia elettrica veniva trasportata e ha avuto un impatto significativo sulle tecnologie future. Dopo la centrale degli Stati Uniti, nel 1898 venne avviata la centrale di Paderno d'Adda in Italia, che riusciva a fornire 9 MW di potenza ad una tensione di 13.5 kV. Questa centrale rappresentava il maggiore impianto europeo dell'epoca e permetteva la diffusione dell'energia idroelettrica in nord Italia grazie alle risorse alpine[26]. Negli anni successivi tante altri collegamenti vennero attivati, nello specifico:

- Nel 1912 fu realizzata la prima linea trifase a 110 kV tra Lauchhammer e Riesa.
- Il 17 aprile 1929 fu inaugurata la prima linea a 220 kV in Germania tra Brauweiler (vicino a Colonia) via Kelsterbach (presso Francoforte) fino all'Austria.
- La prima linea invece a 380 kV fu attivata il 5 ottobre 1957 tra le stazioni di Rommerskirchen e Ludwigsburg/Hoheneck.
- In Unione Sovietica fu attivato nel 1982 un elettrodotto da 1.200 kV.

2.1.2 Liberalizzazione del settore elettrico

Seguendo una direttiva comunitaria del 1996, venne introdotto in Italia nel 1999 il decreto Bersani, che ha portato alla liberalizzazione del settore elettrico. Questo ha aperto un mercato che era stato essenzialmente monopolistico, con Enel come unico operatore nazionale capace di produrre e vendere energia agli utenti. Con il

decreto, altri operatori sono diventati concorrenti, cambiando il panorama dell'energia elettrica in Italia. Per favorire questa apertura del mercato, Enel ha dovuto cedere la gestione della rete di trasporto dell'energia elettrica e successivamente vendere a concorrenti centrali di produzione pari a 15.000 MW. Inoltre, ha ceduto la rete di distribuzione e i relativi contratti di fornitura alle ex municipalizzate, interessando le principali città come Roma, Milano, Torino, e altre[20]. Il 31 maggio 1999 nasce Terna (Trasmissione Elettrica Rete Nazionale), società dedicata proprio alla trasmissione dell'energia elettrica. Nell'anno 2022 Terna contava su:

- 74910 km di linee
- 901 stazioni di trasformazione e smistamento
- 1 centro Nazionale di Controllo (CNC)
- 26 linee di interconnessione con l'estero
- Il cavo sottomarino più profondo al mondo, il SAPEI, lungo 435 km, con una potenza di 1000 MW.

2.2 Metodi di trasmissione

Andiamo ora ad elencare i metodi utilizzati per la trasmissione dell'energia elettrica.

2.2.1 I tralicci

Il metodo forse più conosciuto a tale scopo, data la visibilità da grandi distanze e l'occupazione del suolo, è quello tramite i tralicci. Esistono varie tipologie di pali che vengono utilizzati e la stessa stesura dei conduttori può essere di diversi tipi. Queste differenze dipendono non solo dal livello di tensione che viene applicato (bassa < 1kV - media < 30kV - alta e altissima > 30kV), ma anche dalle condizioni ambientali che dovranno essere rispettate. Tuttavia, quando parliamo di trasmissione dell'energia, ci riferiamo solo ai valori di alta ed altissima tensione. Gli altri

livelli più bassi concernono la distribuzione della stessa, ovvero il trasporto dalle cabine primarie di tensione (AT/MT) a quelle secondarie (MT/BT), oltre agli allacciamenti civili ed industriali che seguono alla trasformazione in bassa tensione.

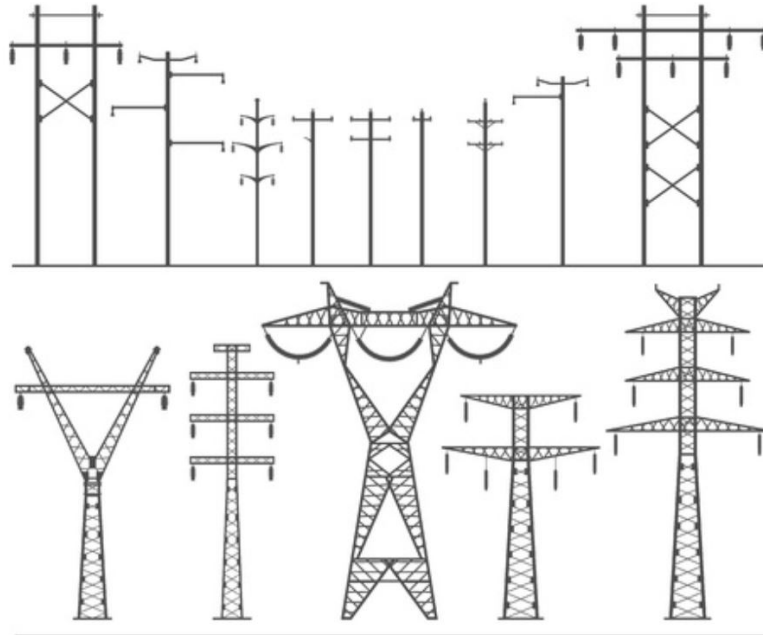


Figura 2.3: Esempi di sostegni a traliccio

Si definiscono linee elettriche aeree esterne le “linee installate all’aperto, al di sopra del suolo e costituite da conduttori nudi con i relativi isolatori, dai sostegni ed accessori”. Esse sono costituite da una o due terne (si parla rispettivamente di semplice e doppia terna) sempre su palificazione unica. Possiamo ora elencare i componenti delle linee elettriche aeree. Avremo dunque[2]:

- Le fondazioni:

Nei sostegni tradizionali di tipo a traliccio, ciascun sostegno è dotato di quattro piedi e delle relative fondazioni. La fondazione è la struttura interrata atta a trasferire i carichi strutturali (compressione, trazione e taglio) dal sostegno al sottosuolo. Nel caso dei sostegni di tipo tubolare la fondazione

è invece costituita da un blocco unico in cemento armato.



- I sostegni:

Il sostegno è l'elemento deputato a sostenere i conduttori, esso è costituito da più elementi strutturali, di cui uno deputato al collegamento con le fondazioni. La struttura del sostegno ospita le mensole, cui sono ancorati gli armamenti, cioè l'insieme di elementi di morsetteria che consente di ancorare meccanicamente i conduttori al sostegno pur mantenendoli elettricamente isolati da esso, che possono essere di sospensione o di amarro. In cima vi sono i cimini, atti a sorreggere le funi di guardia.



- Conduttori e funi di guardia:

I conduttori sono gli elementi preposti al trasporto dell'energia, opportunamente distanziati tra loro. Per elettrodotti a 132-150 e 220 kV usualmente si utilizza per ciascuna fase elettrica un conduttore, mentre per elettrodotti a 380 KV si usa preferenzialmente per ciascuna fase elettrica un fascio di 3 conduttori (trinato) collegati fra loro da distanziatori o in alternativa un fascio di 2 conduttori (binato). In questo caso ciascun conduttore di energia è costituito da una corda di alluminio-acciaio.

L' elettrodotto è inoltre equipaggiato con una fune di guardia destinata, oltre che a proteggere l'elettrodotto stesso dalle scariche atmosferiche, a migliorare la messa a terra dei sostegni. La fune di guardia è in acciaio o in

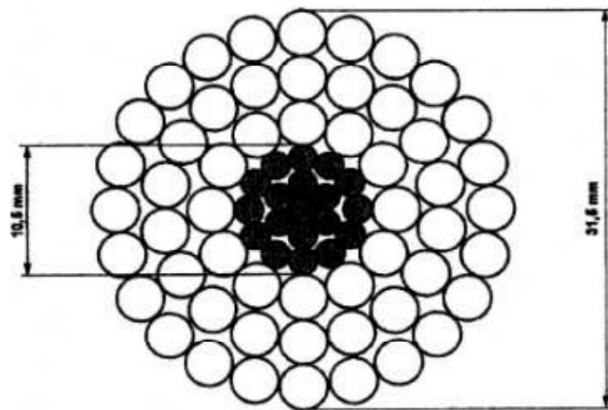


Figura 2.4: Conduttore a fascio

acciaio rivestito di alluminio. In alternativa è possibile l'impiego di una fune di guardia con fibre ottiche.

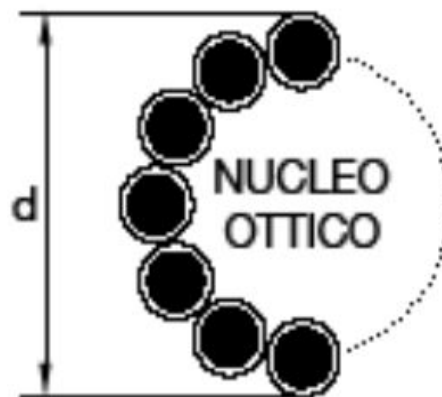


Figura 2.5: Fune di guardia con nucleo ottico

- Isolatori:

L'isolamento degli elettrodotti viene realizzato con isolatori a cappa e perno in vetro temprato, nei due tipi "normale" e "antisale", connessi tra loro a formare catene di almeno 18 elementi per elettrodotti a 380 kV, 14 elementi per elettrodotti a 220 kV e 9 elementi per elettrodotti a 132-150 kV.

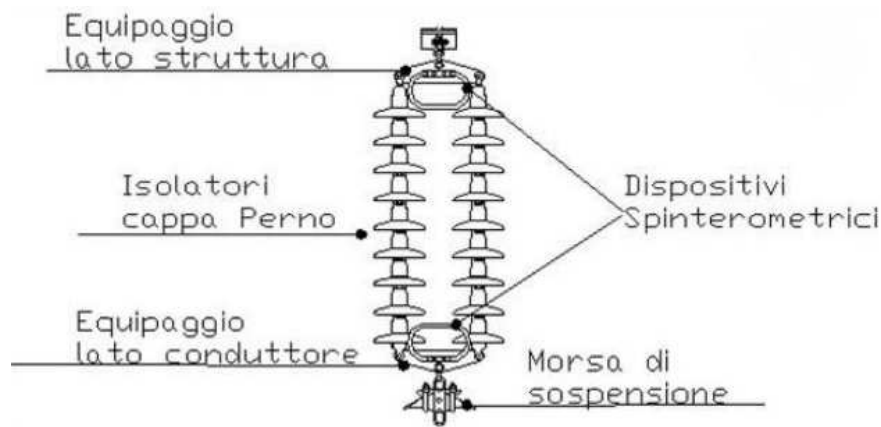


Figura 2.6: Isolatore cappa-ferro

Andiamo ora a valutare la potenza trasmissibile attraverso le linee aeree. Dovremmo considerare due casistiche differenti[22]:

1. Se la linea aerea è "relativamente" corta (ovvero presenta una distanza $d \leq 150 \text{ km}$), essa può trasmettere potenze molto più elevate della potenza naturale S_{nat} , fino a tre volte.
2. Se la linea aerea è "relativamente" lunga ($d > 150 \text{ km}$), la potenza trasmissibile sarà circa la potenza naturale.

La potenza naturale rappresenta, in pratica, la massima potenza trasmissibile nel modo economicamente più conveniente ed è data dal rapporto tra il quadrato della tensione concatenata in arrivo e l'impedenza caratteristica.

$$S_{nat} = \frac{U_r^2}{Z_c^*}$$

Le linee aeree hanno capacità di esercizio ridotte ma induttanze più elevate, con un'impedenza caratteristica di circa 250/400 Ω .

Possiamo quindi dedurre che la potenza naturale trasmissibile varia dai 120 MVA per tensioni di 220 kV a potenze di 600 MVA per una tensione di 380kV.

2.2.2 Cavi



Figura 2.7: Cavo elettrico per media tensione

L'altro metodo adoperato per la trasmissione della corrente elettrica è tramite cavi. Anch'essi possono essere di varie tipologie, in base alle portate che dovranno sopportare e alle differenti pose utilizzate. Per loro natura i cavi sarebbero ideali alla trasmissione dell'energia elettrica, in quanto presentano una potenza naturale circa 5 volte più elevata rispetto alle linee aeree[28], con una $S_{nat} = 3221$ [MVA], avendo una $Z_c \cong \frac{1}{5}$ di $Z_{c,aerea}$. Le linee in cavo presentano quest'ultimo valore molto più ridotto, nell'ordine dei 40Ω e applicando la suddetta formula risulta evidente perchè la potenza naturale dei cavi risulta maggiore. Il loro grande vincolo risulta essere il limite termico al quale verrebbero portati se dovessero tenere la corrente massima per soddisfare la richiesta della potenza naturale. Infatti, conoscendo la corrente al limite termico e ipotizzando un fattore di potenza tipico del

$\cos\varphi = 0.98$, possiamo applicare la seguente formula

$$S_a = \sqrt{3}U_R I_{amp}(\cos\varphi + j\sin\varphi) \quad (1)$$

ed ottenere una potenza all'ampacity di $S_a = 1214 + j248$ [MW + jMvar].

Un cavo che merita di essere analizzato, avendolo anche citato nella sezione di

storia, è il SAPEI (acronimo di SARdegna-PENisola Italiana). Esso funziona ad altissima tensione (500kV) in corrente continua e corre tra Nettuno in Lazio e Punta Tramontana in Sardegna. Esso ha inoltre il primato di essere il cavo per il trasporto dell'energia elettrica più profondo del mondo, raggiungendo il punto massimo di 1650 metri sul fondo del mar Tirreno, posa resa possibile grazie alla nave posacavi Giulio Verne di Prysmian. Nella sua "carriera", la Giulio Verne ha posato sui fondali marini circa 1.800 km di cavi per il trasporto di elettricità[21].

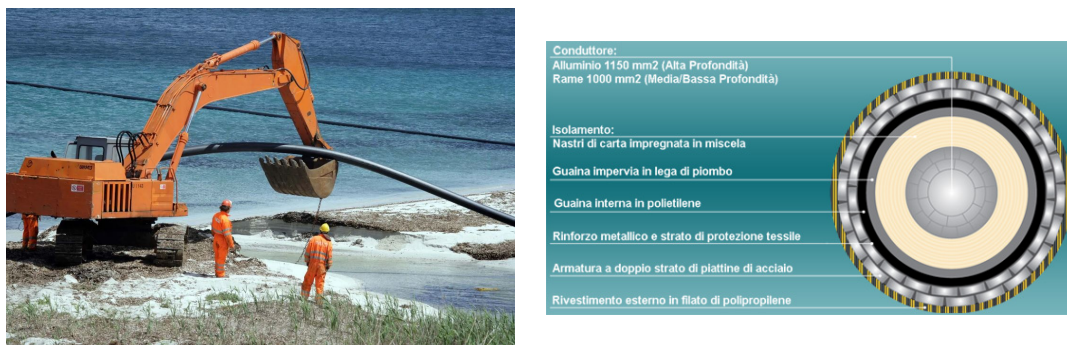


Figura 2.8: Conduttore SAPEI

La struttura del sistema HVDC è bipolare, con due poli distinti che presentano polarità opposta: l'anodo e il catodo. Il conduttore di ritorno è collegato a terra e normalmente non trasporta corrente durante il funzionamento regolare del sistema. Tuttavia, in caso di un guasto, i due poli possono operare in modo indipendente e ciò può causare il flusso di corrente nel conduttore di ritorno. Per quanto riguarda le stazioni di conversione, dove la corrente viene livellata, l'opera di realizzazione dei locali è stata affidata ad ABB, per un valore complessivo dell'investimento di 750.000.000€.

Nel 2010 viene istituito da Terna, proprietaria del collegamento, un nuovo nucleo operativo stazioni (NOS) nella sede di Latina allo scopo di garantire un supporto immediato alla risoluzione di eventuali problemi riguardanti il funzionamento del collegamento. Il SAPEI è stato inaugurato giovedì 17 marzo 2011 in occasione del centocinquantenario dell'Unità d'Italia[12].

Un altro cavo adoperato per la trasmissione dell'energia, questa volta in corrente alternata e ad alta tensione, è il cavo "Milliken". Esso viene utilizzato per sezioni uguali o maggiori di 1200 mm^2 per il rame e 1600 mm^2 per l'alluminio.



Figura 2.9: Cavo Milliken a sei settori isolato in XLPE

Questo tipo di cavo, isolato in polietilene reticolato, comunemente abbreviato in PEX, XPE o XLPE, offre notevoli vantaggi rispetto agli isolanti in semplice polietilene, come una temperatura massima di esercizio di 90° rispetto ai 70° del PVC, nonché una capacità di resistenza all'umidità di 100 volte rispetto a quest'ultimo[13]. Inoltre, date le sue ottime capacità dielettriche, esso diviene molto utile per cavi di media tensione, da 1 a 69 kV, e ad alta tensione, fino a 380 kV. Tuttavia il suo prezzo risulta essere maggiore rispetto al polivinilcloruro e allo stesso polietilene.

2.2.3 GIL

Per GIL si intende una linea isolata in gas (Gas Insulated Line). Questo tipo di linea viene realizzata attraverso un conduttore interno che si trova in un tubo il cui diametro è di circa 50 cm. Viene mantenuto centrale mediante dischi o supporti isolanti in resina epossidica. Il tubo è riempito con gas isolante, che può essere

o esafluoruro di zolfo puro (100% SF₆) oppure una miscela composta dal 80% di azoto (N₂) e 20% SF₆, per motivi ambientali [9].

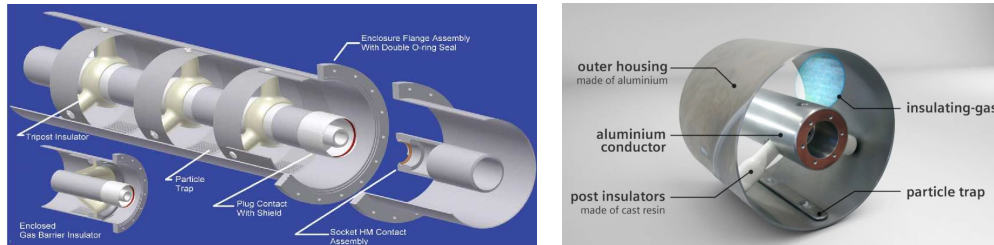


Figura 2.10: Sezione conduttore GIL

Da un punto di vista della potenza che si riesce a trasportare attraverso questa tecnologia, possiamo calcolare la sua potenza naturale, partendo dalla tensione di 400kV e conoscendo l'impedenza caratteristica di $62,849+j4 \Omega$, otteniamo dunque come risultato che $|S_{nat}| \cong 2541 [MVA]$. Possiamo dunque dedurre che il GIL ha un'attitudine alla trasmissione dell'energia elettrica che è quattro volte quella aerea ma 0.8 volte quella dei cavi. Calcolandoci la potenza complessa al limite termico attraverso la (7), otterremo come risultato:

$$S_a = 1623 + j330 [MW + jMvar]$$

Da quest'ultimo dato possiamo dedurre che anche il GIL è limitato dal regime termico.

2.2.4 Linee ibride di trasmissione

Per linea ibrida di trasmissione si vuol intende l'uso di più tecnologie sopra citate al fine di trasportare l'energia elettrica in più punti del territorio. Questo tipo di soluzione risolve il problema legato alla geografia dei territori interessati, oppure all'opposizione locale alla costruzione di linee interamente aeree[22].

Capitolo 3

Campi elettromagnetici

3.1 Elettricità e magnetismo: storia e spiegazione

La scoperta dell'elettricità e del magnetismo costituisce un affascinante racconto che ha le sue radici nell'antichità e ha coinvolto il contributo prezioso di numerosi pensatori nel corso dei secoli. Un vasto spettro di fenomeni naturali è intrinsecamente legato a forze elettromagnetiche, contribuendo così alla formazione di un campo di studi di enorme rilevanza. Queste indagini non solo hanno plasmato il nostro sapere scientifico, ma hanno anche svolto un ruolo cruciale nell'evoluzione della tecnologia moderna, delineando il nostro mondo contemporaneo[8].

Fin dall'epoca dell'antica Grecia (VII - VI sec. a.C.), erano già in evidenza fenomeni riconducibili all'elettricità e al magnetismo. Ad esempio, si osservava la straordinaria capacità dell'ambra fossile, quando strofinata, di attrarre materiali leggeri come frammenti di carta o di paglia, così come la magnetite manifestava il suo potere di attrarre il ferro. Questi fenomeni antichi sono tra i primi osservati nell'ambito dell'elettromagnetismo, gettando le basi per ulteriori esplorazioni e scoperte nel corso dei secoli.

Prima della formulazione della Legge di Coulomb nel 1785, che consentì di misurare la forza di attrazione tra cariche elettriche, si sapeva che strofinando il vetro con un panno si generava una carica elettrica capace di attrarre piccoli pezzettini di

carta. Gli esperimenti con l'elettroscopio permisero una misurazione quantitativa di questi fenomeni, ottenuta tramite la bilancia di torsione. Ogni corpo contiene cariche negative (elettroni) e positive (protoni), equilibrandosi nello stato neutro con uguale numero di entrambe. Le alterazioni di questo equilibrio generano fenomeni di elettrizzazione, spesso causati dallo spostamento degli elettroni tra i corpi. I materiali vengono classificati come isolanti o conduttori in base al comportamento elettrico: i conduttori, come i metalli, permettono la propagazione della carica, mentre gli isolanti, come la plastica, mantengono la carica localizzata. Nei conduttori, a differenza degli isolanti, alcuni elettroni sono mobili, liberi di muoversi all'interno del materiale. Da prove sperimentali, Coulomb dedusse che la forza di interazione elettrica è inversamente proporzionale al quadrato della distanza r tra le cariche considerate ovvero $F \propto \frac{1}{r^2}$.

Se consideriamo invece anche la quantità di carica elettrica, la forza sarà direttamente proporzionale alle cariche interagenti Q_1 e Q_2 . Per ottenere la formulazione del Sistema Internazionale, se le cariche sono nel vuoto, possiamo scrivere la seguente equazione:

$$F = K * \left(\frac{Q_1 * Q_2}{r^2} \right) \quad (3.1)$$

con $K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$, dove ϵ_0 indica la costante dielettrica del vuoto ($8,859 * 10^{-12} \frac{C^2}{Nm^2}$). Precisiamo inoltre che la direzione della forza è lungo la congiungente i due corpi e risulta attrattiva se le due cariche sono di segno opposto, e repulsiva se sono dello stesso segno.

Nel 1820, H. C. Oersted (1777-1851) identificò le interazioni magnetiche delle correnti elettriche. Anticipò una connessione tra i fenomeni elettrici e magnetici, dimostrando che la corrente elettrica generava un campo magnetico nello spazio circostante. Nel corso del 1821, osservò che un ago magnetico collocato sotto un filo conduttore, se posto parallelamente ad esso, si allineava perpendicolarmente quando il filo trasportava una corrente di sufficiente intensità. La direzione di questa deviazione dipendeva dal verso della corrente. Questi studi rappresentarono un notevole stimolo per lo sviluppo dell'elettromagnetismo, aprendo nuove

strade per la comprensione dei legami tra elettricità e magnetismo.

Nel periodo compreso tra il 1820 e il 1826, Ampère (1775-1836) esplicò la correlazione tra il campo magnetico e le correnti elettriche. Dimostrò, per esempio, che due conduttori posti in parallelo e attraversati da corrente interagiscono fra loro generando forze attrattive o repulsive, a seconda che la corrente scorra nei due conduttori nella stessa direzione o in direzioni opposte. In particolare, considerando due conduttori paralleli posti a una distanza d e di lunghezza l , si può dimostrare sperimentalmente che la forza di interazione F sarà:

$$F = \frac{\mu_0}{2 * \pi} \frac{i_1 * i_2 * l}{d} \quad (3.2)$$

Nel 1831 M. Faraday (1792-1867) riuscì a produrre corrente elettrica mediante variazioni di un campo magnetico. Faraday eseguì due esperienze fondamentali. In entrambi gli esperimenti di Faraday, il circuito soggetto a induzione elettromagnetica (detto circuito indotto) è immerso in un campo magnetico. Nella prima esperienza, questo campo è creato da una bobina, alimentata attraverso una batteria; nella seconda, il campo magnetico è generato direttamente dal magnete. In entrambi i casi, le correnti indotte si manifestano quando il campo magnetico che attraversa la superficie del circuito indotto subisce variazioni nel tempo.

Nel 1865, Maxwell (1831-1879) concepì le celebri equazioni che portano il suo nome, rappresentando la teoria completa dell'elettromagnetismo. Queste equazioni introdussero una simmetria senza precedenti tra i campi elettrici e magnetici, sottolineando come l'interazione elettromagnetica su un corpo dipendesse dalle condizioni fisiche dello spazio in cui esso si trovava o dalle proprietà fisiche modificate della regione interessata dal campo. Inoltre, Maxwell dimostrò che la velocità di propagazione della radiazione elettromagnetica coincideva con quella della luce, rivelando così una connessione fondamentale tra la luce e i fenomeni dell'elettricità e del magnetismo. Andiamo ora ad elencare in maniera più dettagliata queste equazioni[10]:

1. Legge di Gauss elettrica: La legge di Gauss descrive il rapporto tra un

campo elettrostatico e le cariche che lo generano: il campo si dirige verso l'esterno dalle cariche positive e verso l'interno dalle cariche negative. Il flusso del campo elettrico attraverso una superficie chiusa è proporzionale alla carica contenuta all'interno di quella superficie. Visualizzando il campo tramite le sue linee, queste iniziano dalle cariche positive e terminano sulle cariche negative. "Contare" il numero di linee di campo che attraversano una superficie chiusa fornisce la carica totale, comprensiva della polarizzazione elettrica, racchiusa da quella superficie. Questo valore, diviso per la permittività del vuoto, offre la misura della carica totale contenuta.

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (3.3)$$

2. Legge di Gauss magnetica: La legge di Gauss applicata al campo magnetico, invece, stabilisce l'assenza di "cariche magnetiche" singolari, noti come monopoli magnetici, analoghi alle cariche elettriche. Invece, il campo magnetico prodotto dai materiali è generato da strutture chiamate dipoli magnetici, e il flusso del campo magnetico attraverso qualsiasi superficie chiusa è nullo. Anche se i dipoli magnetici possono sembrare simili a una coppia di cariche magnetiche positive e negative (come avviene nel caso del dipolo elettrico), è più accurato rappresentarli come spire attraversate da corrente. Dal punto di vista tecnico, la legge afferma che il flusso magnetico totale attraverso una superficie gaussiana è zero, o equivalentemente, che il campo di induzione magnetica costituisce un campo vettoriale solenoidale.

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3.4)$$

3. Legge di Faraday: La versione di Maxwell-Faraday della legge di Faraday spiega come un campo magnetico variabile nel tempo produca ("induca") un campo elettrico. In termini integrali, questa legge afferma che l'energia necessaria per spostare una carica unitaria lungo una spira chiusa è uguale al tasso di cambiamento del flusso magnetico attraverso la superficie racchiusa. L'induzione elettromagnetica costituisce il principio fondamentale di molti

generatori elettrici: per esempio, una calamita rotante crea un campo magnetico in continua variazione, il quale a sua volta genera un campo elettrico in un filo conduttore nelle vicinanze.

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3.5)$$

4. Legge di Ampère-Maxwell: La legge di Ampère, ampliata da Maxwell, stabilisce che i campi magnetici possono essere generati in due modi: attraverso correnti elettriche (come indicato dalla legge originale di Ampère) e da campi elettrici in variazione (questo è l'apporto di Maxwell, definito da lui come corrente di spostamento). Nella sua formulazione integrale, il campo magnetico attorno a un circuito chiuso dipende dalla somma della corrente elettrica che attraversa il circuito e dalla corrente di spostamento (legata al tasso di variazione del flusso del campo elettrico) attraverso la superficie chiusa. L'integrazione di Maxwell assume un'importanza cruciale poiché rende il sistema di equazioni matematicamente coeso per campi non statici, senza alterare le leggi di Ampère e di Gauss per campi statici. Tuttavia, come conseguenza diretta, implica che un campo magnetico in variazione induca un campo elettrico e viceversa. Queste equazioni consentono quindi a onde elettromagnetiche di propagarsi nello spazio vuoto.

$$\nabla \times B = \mu_0 J + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (3.6)$$

con μ_0 =permeabilità magnetica del vuoto.

Possiamo quindi definire il termine "elettromagnetismo" come quel settore della fisica che si occupa dello studio dei fenomeni elettrici e magnetici e delle loro interazioni. I campi E e B sono perpendicolari e proporzionali tra loro; inoltre sono perpendicolari alla direzione di propagazione dell'onda. L'onda elettromagnetica è, quindi, un'onda trasversale, in quanto le due grandezze che variano oscillano in senso perpendicolare allo spostamento dell'onda. Immaginiamo di scattare un'istantanea dell'onda:

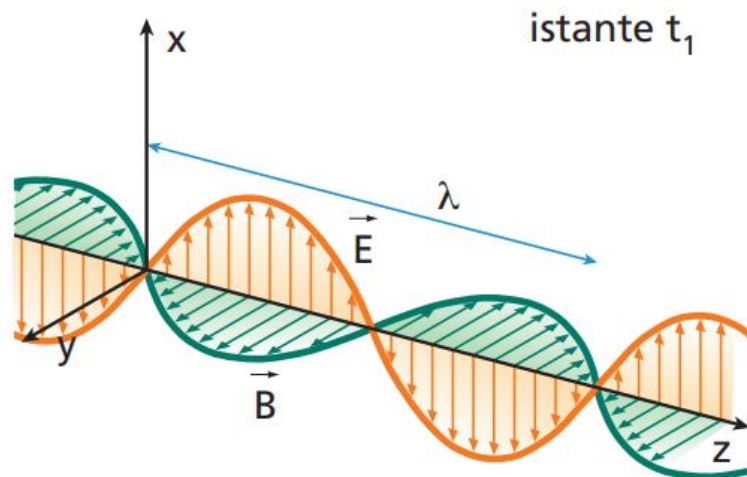
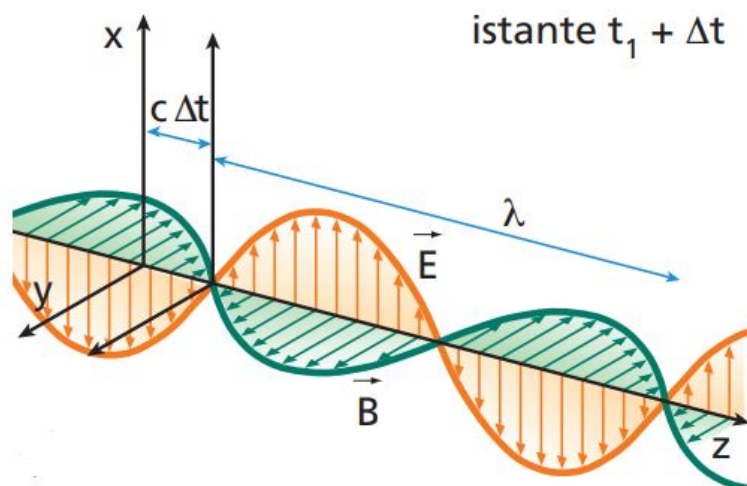


Figura 3.1: Propagazione dell'onda elettromagnetica

Osserviamo che i valori dei due campi variano nello spazio in modo regolare, descrivendo un'onda che ha lunghezza d'onda λ .

Dopo un intervallo di tempo Δt , l'intera onda si è spostata del tratto $c \Delta t$, dove c è la velocità della luce.

Figura 3.2: Propagazione dell'onda elettromagnetica dopo $t_1 + \Delta t$

Ora, mettendoci in un punto P fissato e osservando come variano E e B al passare

del tempo notiamo come i due vettori varino continuamente con la stessa legge del moto armonico: essi aumentano insieme fino a un valore massimo, si annullano insieme e giungono poi, contemporaneamente, ai loro valori minimi. Tutto ciò si ripete in modo regolare con un periodo pari a T . La frequenza f di tale ripetizione è inversamente proporzionale al periodo: $f = \frac{1}{T}$ [14].

3.2 Campi elettromagnetici generati da elettrodotti

Come abbiamo visto, l'intensità del campo elettrico misurata in volt per metro (V/m), è strettamente correlata alla tensione e alla distanza dal conduttore elettrico. Nei pressi di una linea ad alta tensione da 380 kV, il campo elettrico a livello del suolo può raggiungere i 5000 V/m. Questo valore diminuisce man mano che la tensione scende: sotto una linea da 200 kV si registra un campo di circa 3000 V/m, mentre sotto linee da 110 kV o 50 kV i valori massimi sono rispettivamente di 700 V/m e 400 V/m[1].

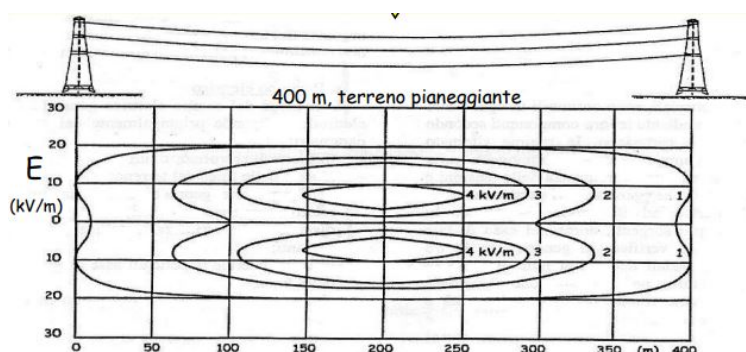


Figura 3.3: Curve di livello del campo elettrico ad 1 m dal suolo

Già la presenza di materiali poco conduttivi come alberi, arbusti o case influisce sul campo elettrico, indebolendolo e distorcendolo. Fortunatamente, la maggior parte dei materiali da costruzione degli edifici offre una conduttività sufficiente per attenuare oltre il 90% dell'intensità del campo elettrico proveniente dall'esterno.

Per quanto riguarda i campi magnetici, le pareti degli edifici non forniscono alcuna protezione. Di conseguenza, entro una distanza di 150-200 metri, le linee aeree da 380 kV possono aumentare l'esposizione ai campi magnetici all'interno delle abitazioni vicine. Solo a distanze maggiori si ritorna a livelli di esposizione magnetica considerati normali, che solitamente si aggirano intorno a 0,02-0,04 microtesla.

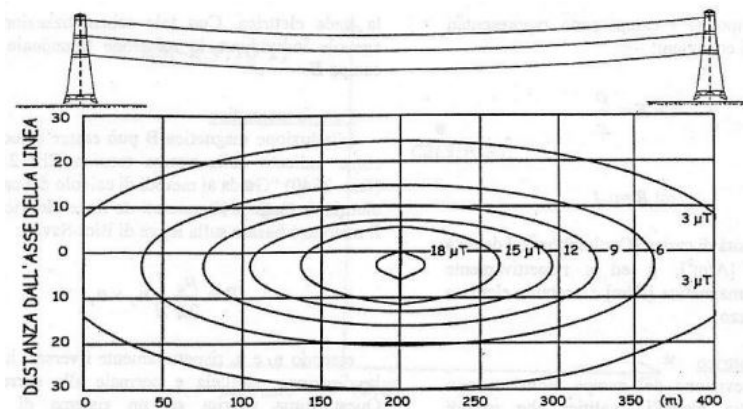


Figura 3.4: Curve di livello dell'induzione magnetica ad 1 m dal suolo

Tuttavia il campo magnetico dipende dall'intensità di corrente e quindi dal consumo di corrente nelle economie domestiche e nelle aziende. Il tracciato temporale del campo magnetico in prossimità delle linee dell'alta tensione riflette pertanto le variazioni del consumo di corrente a seconda del periodo della giornata e della stagione.

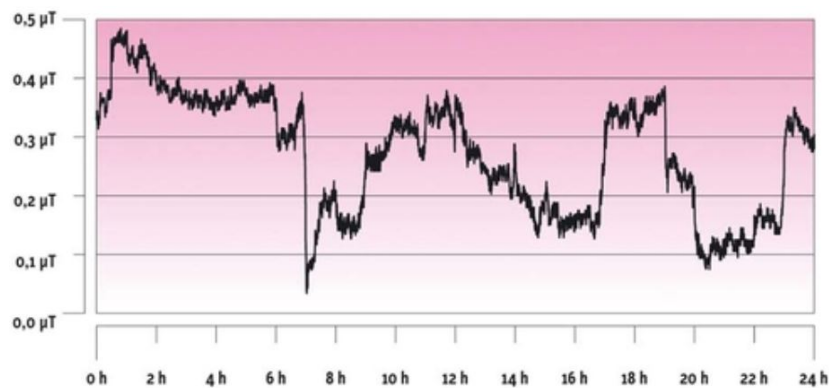


Figura 3.5: Andamento del campo magnetico in funzione del tempo

Per poter mitigare i campi magnetici delle linee aeree, possiamo ricorrere a tre metodi[4]:

- Sdoppiare una terna:

La corrente transitante in ognuna delle fasi del tratto in semplice terna si dimezza in ognuna delle fasi omologhe del tratto in doppia terna. Questo permette di considerare per i due rami in doppia terna un valore di corrente pari alla metà della portata in corrente in servizio normale associata al tratto in semplice terna, ed essendo il campo magnetico proporzionale alla corrente avremmo come risultato il dimezzamento dello stesso.

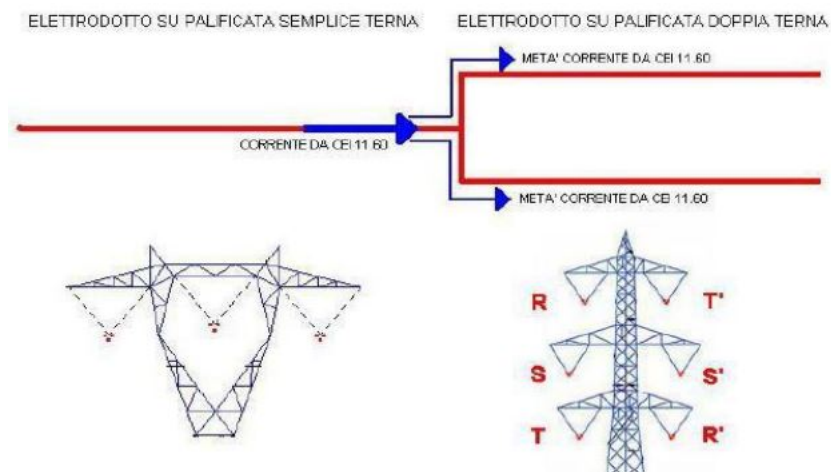


Figura 3.6: Corda sdoppiata

- La delocalizzazione: ovvero l'individuazione di un percorso alternativo alla linea per minimizzare l'esposizione;
- Rimodellamento della geometria dei conduttori: Andando a modificare i sostegni sui quali vengono posizionati i conduttori avremmo come risultato un aumento della distanza dal suolo. Questo, come chiaramente visibile nell'immagine sottostante, comporta un decremento del valore di campo magnetico presente al suolo.

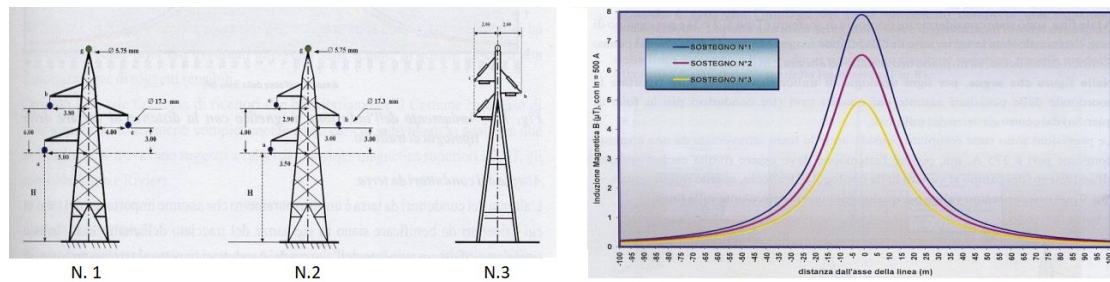


Figura 3.7: Cambio geometria delle corde

3.2.1 Confronto con campi generati dai cavi

1. Il campo elettrico generato dai cavi risulta ridotto in maniera significativa per l'effetto combinato dovuto alla speciale guaina metallica schermante ed alla presenza del terreno che presenta una conducibilità elevata. La riduzione così operata del campo elettrico consente agli individui di avvicinarsi maggiormente ai conduttori stessi, i quali, come già detto, sono di solito interrati a pochi metri di profondità. Per le linee elettriche di MT a 50 Hz, i campi elettrici misurati attraverso prove sperimentali sono risultati praticamente nulli, per l'effetto schermante delle guaine metalliche e del terreno sovrastante i cavi interrati[18].
2. Per quanto riguarda i valori di campo magnetico, sono notevolmente al di sopra della soglia di attenzione epidemiologica (SAE) che è di $0,2 \mu\text{T}$. Infatti, solo distanze superiori a circa 80 m dal conduttore permettono di rilevare un valore così basso del campo magnetico. È possibile ridurre questi valori di campo interrando gli elettrodotti. Questi vengono posti a circa 1,5-1,85 metri di profondità e sono composti da un conduttore cilindrico, una guaina isolante, una guaina conduttrice (la quale funge da schermante per i disturbi esterni, i quali sono più acuti nel sottosuolo in quanto il terreno è molto più conduttore dell'aria) e un rivestimento protettivo.

Dall'immagine sotto riportata possiamo notare come i cavi interrati generano, a parità di corrente trasportata, un campo magnetico al livello del suolo più intenso degli elettrodotti aerei (circa il doppio), però l'intensità di

campo magnetico si riduce molto più rapidamente con la distanza (i circa 80 m diventano in questo caso circa 24). Tra i vantaggi sono valori di intensità di campo magnetico che decrescono molto più rapidamente con la distanza, ma tra gli svantaggi i problemi di perdita di energia legati alla potenza reattiva (produzione, oltre ad una certa lunghezza del cavo, di una corrente capacitiva, dovuta all'interazione tra il cavo ed il terreno stesso, che si contrappone a quella di trasmissione).

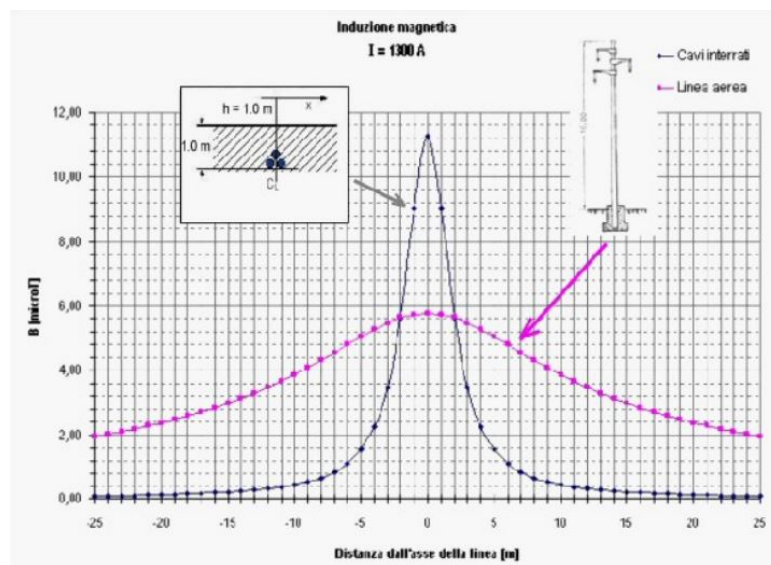


Figura 3.8: Variazione dell'induzione magnetica cavo-linea aeree

In generale si può affermare che l'intensità a livello del suolo immediatamente al di sopra dei cavi di una linea interrata è inferiore a quella immediatamente al di sotto di una linea aerea ad alta tensione. Ciò è dovuto soprattutto ad una maggiore compensazione delle componenti vettoriali associate alle diverse fasi, per effetto della reciproca vicinanza dei cavi, che essendo isolati, possono essere accostati l'uno all'altro, operazione impossibile da farsi per una linea aerea.

3.2.2 Elementi di calcolo per la valutazione del campo magnetico

Andiamo ad analizzare la metodologia di calcolo adoperata allo studio dei campi. Possiamo approssimare un elettrodotto come un'insieme di conduttori con giaciture imposte dalle dimensioni e quote dei sostegni. Con queste ipotesi il calcolo del campo magnetico H , nonché dell'induzione magnetica B nell'area adiacente alla linea può essere condotto ricorrendo alla seguente relazione vettoriale, che esprime l'integrazione della legge di Biot-Savart differenziale[16]:

$$B = -\frac{\mu_0}{4\pi} \sum_k \int \left(\frac{I_k}{r^3} \right) \mathbf{r} \times d\mathbf{l} \quad (2)$$

dove:

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ H/m è la permeabilità magnetica del vuoto;

I_k è il valore efficace della corrente relativa al conduttore k-esimo;

$d\mathbf{l}$ è il versore supportato dall'elemento infinitesimo del conduttore percorso dalla corrente I_k ;

\mathbf{r} è il vettore spiccato tra il punto di calcolo di \mathbf{B} e l'elemento infinitesimo $d\mathbf{l}$;

r è il modulo di \mathbf{r} .

La sommatoria è estesa a tutti i conduttori interessati da corrente in base al principio di sovrapposizione degli effetti, poiché l'aria è un mezzo lineare ed isotropo, ove vale la seguente relazione di legame materiale:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$$

Adottando alcune ipotesi semplificative, la legge di Biot-Savart in forma integrale si semplifica considerevolmente. Queste ipotesi sono le seguenti: terreno piano di estensione infinita e permeabilità magnetica relativa unitaria (quindi, contributo delle correnti-immagini nel terreno trascurabile); conduttori di linea filiformi, rettilinei, paralleli ed infiniti; correnti di linea equilibrate. In particolare, adottando un sistema di coordinate cartesiane bidimensionali x-y ortogonali all'asse dell'elettrodotto, il vettore induzione

magnetica \mathbf{B} relativo ad un generico istante di tempo t e ad un punto campo P identificato da un vettore \mathbf{x}_j di coordinate x_j, y_j può scriversi in termini delle sue componenti scalari istantanee $B_x(P, t)$ e $B_y(P, t)$, come segue:

$$B_x(P, t) = \frac{\mu_0}{\pi\sqrt{2}} \sum_{k=1}^M \left\{ \frac{I_k \sin [\omega t - \Delta_k - 2(k-1)\frac{\pi}{3}] (y_k - y_P)}{(x_k - x_P)^2 + (y_k - y_P)^2} \right\} \quad (3)$$

$$B_y(P, t) = \frac{\mu_0}{\pi\sqrt{2}} \sum_{k=1}^M \left\{ \frac{I_k \sin [\omega t - \Delta_k - 2(k-1)\frac{\pi}{3}] (x_k - x_P)}{(x_k - x_P)^2 + (y_k - y_P)^2} \right\} \quad (4)$$

dove:

ω è la pulsazione alla frequenza di rete;

$M=3$ per elettrodotti a terna semplice, $M=6$ per elettrodotti a terna doppia;

I_k è il valore efficace della k -esima corrente di fase dell'elettrodotto, essendo $k=1,2,3$ per le correnti di fase della terna, detta d'ora in poi terna A (per la quale dunque $I_k=I_A$) e $k=4,5,6$ per le correnti di fase della seconda terna, detta d'ora in poi terna B (per la quale dunque $I_k=I_B$);

Δ_k è una grandezza tale che:

- $\Delta_k = 0$ per $k=1,2,3$, cioè per le correnti di fase della terna A (assunta come riferimento di fase);

- $\Delta_k = \Delta\phi$ per $k=4,5,6$, cioè per le correnti di fase della terna B, essendo $\Delta\phi$ l'angolo di sfasamento tra le correnti delle due terne, supposte come anzidetto equilibrate.

I valori efficaci di $B_x(P, t)$ e $B_y(P, t)$, detti $B_x(P)$, $B_y(P)$, si calcolano a partire dalle (3), (4), rispettivamente applicando la definizione di valore efficace. Per una linea a terna singola, le (3) e (4) mostrano che la corrente di linea I_A può essere estratta a fattor comune e quindi:

$$B_x(P) = K_{px} I_A$$

$$B_y(P) = K_{py} I_A$$

dove K_{px} e K_{py} sono opportuni coefficienti di proporzionalità derivabili dalle (3),(4) in base alla definizione di valore efficace.

In tal caso, il valore efficace di induzione magnetica nel punto P, detto semplicemente d'ora in poi B_p , si ottiene come:

$$B_P = \sqrt{[B_x(P)]^2 + [B_y(P)]^2} = \sqrt{K_{Px}^2 + K_{Py}^2} I_A = K_{PA} I_A \quad (5)$$

che risulta direttamente proporzionale alla corrente di linea, come precedentemente ipotizzato.

Per una linea a doppia terna, invece, si verifica facilmente che nel caso che $\Delta\phi = 0$, $B_x(P)$ e $B_y(P)$ possono calcolarsi come somma dei valori efficaci dei contributi delle due terne A e B alle componenti \mathbf{x} e \mathbf{y} del vettore induzione magnetica nel punto campo P, rispettivamente. Ovvero:

$$B_x(P) = B_{Ax}(P) + B_{Bx}(P)$$

$$B_y(P) = B_{Ay}(P) + B_{By}(P)$$

In tal caso, B_p può derivarsi come:

$$\begin{aligned} B_P &= \sqrt{[B_x(P)]^2 + [B_y(P)]^2} = \sqrt{[B_{Ax}(P) + B_{Bx}(P)]^2 + [B_{Ay}(P) + B_{By}(P)]^2} = \\ &= \sqrt{[B_A(P) \cos \theta_1 + B_B(P) \cos \theta_2]^2 + [B_A(P) \sin \theta_1 + B_B(P) \sin \theta_2]^2} \end{aligned} \quad (6)$$

Possiamo notare dalla figura sotto riportata come, nel caso in cui $\theta_1 = \theta_2 = 0$ (ovvero $\Delta\theta = 0$), otteniamo dall'equazione precedente, in virtù della (7):

$$\begin{aligned} B_P &= \sqrt{[B_A(P) + B_B(P)]^2 \cos^2 \theta + [B_A(P) + B_B(P)]^2 \sin^2 \theta} = \\ &= B_A(P) + B_B(P) = K_{PA} I_A + K_{PB} I_B \end{aligned} \quad (7)$$

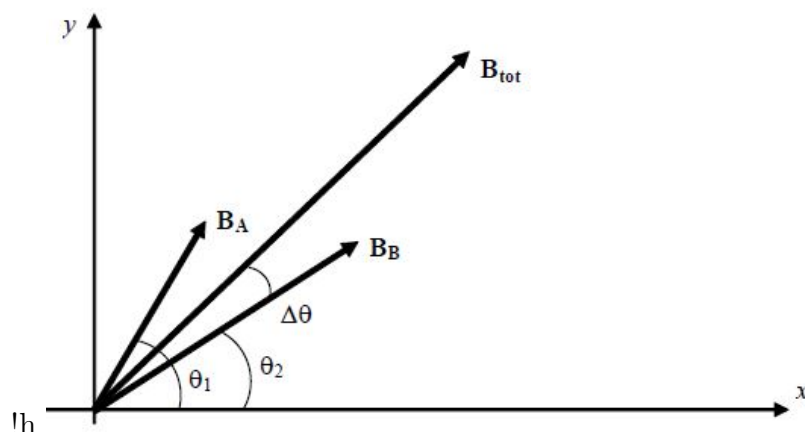


Figura 3.9: Rappresentazione vettoriale dei due vettori induzione B_A e B_B generati in un punto P dalle due terne simmetriche di corrente A e B, di valore efficace I_A e I_B , rispettivamente.

Quest'ultima relazione consente di affermare che sotto le ipotesi semplificative sopra citate di opportune fasi vettoriali il campo totale è esprimibile come combinazione bilineare delle correnti di ogni terna. Come si evince dalle relazioni precedenti, il calcolo del valore efficace di induzione magnetica, B , individuato in [2] come grandezza essenziale da monitorare “per la protezione della popolazione dalle esposizioni a campi magnetici alla frequenza di rete (50 Hz) connessi al funzionamento e all'esercizio degli elettrodotti” presuppone la conoscenza delle correnti di linea, I_A ed I_B . Imponendo nel calcolo una opportuna corrente di riferimento si perviene ad un valore di B corrispondente a tale corrente. Questo valore di riferimento di B può essere confrontato con i limiti imposti dalla legge. Quando l'approssimazione di conduttori paralleli rettilinei infiniti non può essere impiegata e si hanno anche altre tipologie di sorgenti a bassa frequenza (ad es. una cabina) e linee non parallele alla prima, il calcolo di B diviene più complesso. Può allora essere opportuno ricorrere a codici di calcolo numerici di tipo tridimensionale[15][17][5].

3.3 Effetti sulla salute dei campi elettromagnetici

Negli ultimi anni, l'ampio utilizzo dell'energia elettrica ha aumentato significativamente l'esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici. Questo ha suscitato preoccupazioni riguardo ai potenziali impatti sulla salute umana, considerando la complessità del corpo umano e la sua sensibilità alle radiazioni elettromagnetiche. Gli studi sulle interazioni tra campi magnetici a bassa frequenza e il corpo umano hanno identificato alcuni effetti biologici noti, mentre altri rimangono ancora da confermare sperimentalmente.

È importante distinguere inoltre tra esposizione "residenziale" e "occupazionale", seguendo le normative vigenti. Quest'ultima si riferisce a individui professionalmente esposti ai campi elettromagnetici. Le conoscenze attuali provengono da studi di laboratorio ed epidemiologici. Ad esempio, sono noti i meccanismi biologici attraverso cui campi magnetici a 50 Hz, con intensità superiore a 500 mT, producono effetti biologici. Tuttavia, a livelli di esposizione tipici delle situazioni residenziali o occupazionali (inferiori a 50 mT), non sono stati identificati effetti biologici riproducibili, poiché la variabilità nelle caratteristiche dei materiali biologici e nelle modalità di esposizione rende difficile il confronto tra i risultati di diversi laboratori.

L'esposizione a campi elettromagnetici può generare una serie di effetti sia a breve termine che a lungo termine. Gli effetti immediati comprendono sensazioni come microscosse, vibrazioni dei capelli e influenze sul sistema nervoso quando si è esposti a intensità elevate di campi elettrici e magnetici. Si è notato che l'uomo può percepire campi elettrici con livelli di soglia compresi tra 2 e 10 kV/m.

Gli effetti a lungo termine più studiati si concentrano su quelli non tumorali e tumorali. Tra i non tumorali, si segnalano disturbi neurologici, circolatori, del sonno, irritabilità e diminuzione della libido. Uno studio del Dipartimento di Salute Pubblica degli Stati Uniti, pubblicata sull'*American Journal of Epidemiology*, ha evidenziato un aumento dei casi di depressione e cefalee in individui esposti a un campo magnetico di $0,2 \mu\text{T}$, residenti in prossimità di elettrodotti[32].

Le principali preoccupazioni della popolazione riguardano la possibile correlazione tra l'esposizione cronica ai campi elettromagnetici, tipica di chi vive vicino alle linee elettriche, e lo sviluppo a lungo termine di tumori. Indagini epidemiologiche hanno indicato un possibile collegamento tra l'esposizione a campi elettromagnetici a bassa frequenza e un aumento del rischio di leucemia e tumori del sistema nervoso nei bambini residenti in prossimità di linee ad alto voltaggio[11].

Ricerche condotte fin dagli anni '80 hanno studiato maggiormente questa associazione, analizzata più recentemente da progetti in Svezia, Finlandia e Danimarca. Studi condotti anche su lavoratori uomini delle società elettriche, hanno indicato un aumento del rischio di cancro alla prostata a causa di esposizioni a campi magnetici superiori a $3,7 \mu\text{T}/\text{anno}$ [24]. Gli esperti concordano sul fatto che gli effetti sulla salute siano principalmente attribuibili alla componente magnetica dei campi, dato che, come abbiamo già discusso, quella elettrica può essere facilmente schermata.

In termini di meccanismi biologici, è stata dimostrata un'interferenza dei campi elettromagnetici a frequenze estremamente basse sulla produzione notturna di melatonina negli animali, con possibili implicazioni sulla risposta immunitaria umana[33].

Da ricerche condotte in vitro emerge che a livello molecolare i campi magnetici possono influenzare molecole cariche elettricamente. Sotto l'effetto di tali forze, strutture molecolari come i biopolimeri possono subire movimenti o deformazioni, mentre le molecole dipolari possono orientarsi. Anche le strutture cellulari possono essere coinvolte in tali interazioni, sebbene il tessuto biologico, essendo di natura "non magnetica", mostri una debolezza in queste dinamiche. Queste interazioni hanno il potenziale di alterare l'afflusso di ioni calcio attraverso la membrana cellulare e la loro concentrazione all'interno della cellula. Un aumento in questo flusso potrebbe influenzare la velocità di metabolismo di alcuni tessuti e la regolazione di diversi processi biologici. Va notato che, nonostante l'effetto sulle molecole e sulle strutture cellulari, l'interazione risulta limitata a causa della bassa reattività del tessuto biologico, che è considerato appunto "non magnetico".

Capitolo 4

Studio pratico

Gli operatori delle reti elettriche, come Terna, hanno bisogno di informazioni dettagliate circa la posizione e le condizioni del loro patrimonio, che siano esse stazioni, sottostazioni o linee. L'applicativo georeferenziato, utilizzato da Terna, consente di analizzare il comportamento dei conduttori e di calcolare la massima corrente ammissibile al fine di verificare i franchi dal terreno e dalle altre opere interferenti[6]. Il programma DPM-3D utilizza una tecnologia chiamata LIDAR, la quale, attraverso la scansione dell'aerea di un territorio utilizzando un telemetro laser, misura la distanza tra il punto di emissione del laser, rappresentato dal telemetro, e il punto di riflessione sulla superficie rilevata, che può essere qualsiasi punto colpito dal raggio stesso.

Di seguito si riporta la modalità di esecuzione di un rilievo LIDAR.

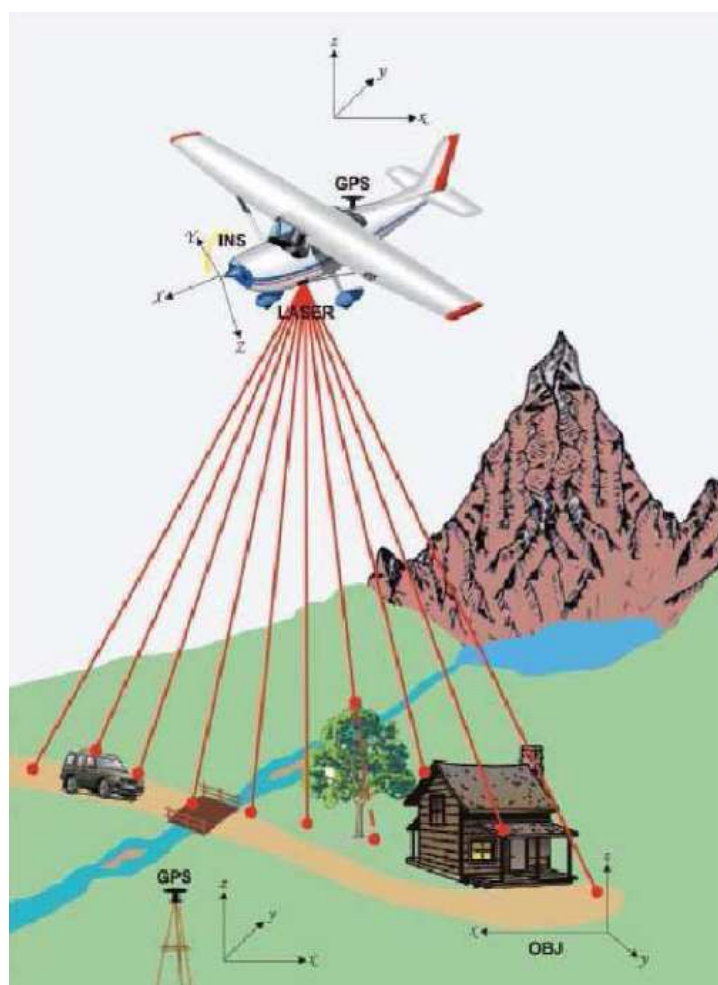


Figura 4.1: Modalità di esecuzione del rilievo LIDAR

Il segnale elettrico generato da un generatore produce un raggio infrarosso (lunghezza d'onda $\lambda=1064\text{nm}$), il quale varia in divergenza in base alla qualità dello strumento. Questo segnale riflesso dal punto colpito viene rilevato da un fotodiode ricevitore, creando un segnale elettrico di ricezione. Il telemetro calcola il tempo Δt , noto come tempo di volo, che è il tempo che l'impulso laser impiega per viaggiare in andata e ritorno. Questo tempo viene misurato da un orologio con una frequenza stabile, grazie a un quarzo. La distanza (D) è correlata al tempo di volo Δt attraverso l'equazione $D=(\Delta t \cdot c)/2$, dove c rappresenta la velocità della luce (circa $3 \cdot 10^8$ m/s).

Il risultato chiave di un rilievo LIDAR è ottenere le coordinate x , y , z di ogni

punto misurato. Oltre alla distanza tra il veicolo e il punto a terra, è essenziale conoscere la posizione e l'orientamento del velivolo in ogni istante. Il sistema LIDAR integra un sistema inerziale che rileva l'assetto del velivolo nei tre gradi di libertà (rollio, beccheggio, deriva) e un GPS che determina la posizione assoluta del telemetro rispetto al sistema di coordinate di riferimento.

Una volta note le coordinate del telemetro e l'orientamento della retta normale all'aereo, è possibile calcolare l'equazione della retta che passa attraverso il sensore montato sull'aereo e il punto colpito dall'impulso laser. Conoscendo la distanza tra questi due punti, è quindi possibile ottenere le coordinate x , y , z del punto bersaglio.

Alcuni strumenti non solo misurano il tempo di volo necessario per determinare la posizione del punto colpito, ma valutano anche l'intensità del segnale di ritorno. Questa intensità fornisce informazioni sulle caratteristiche fisiche delle superfici riflettenti.

Attraverso operazioni di post-elaborazione basate su algoritmi di filtraggio dei dati grezzi della nuvola di punti iniziale (raw data), che comprendono informazioni come vegetazione, edifici, veicoli, linee elettriche e uccelli in volo, è possibile ottenere il Modello Digitale del Terreno (DTM). Questo modello rappresenta esclusivamente le quote dei punti a terra, ottenute tramite opportune tecniche di interpolazione. Si parla, invece, di Modello Digitale delle Superfici (DSM) nel caso di un modello digitale costruito a partire dai dati LIDAR non filtrati[30][23].

4.1 Incremento portata: sistemi real-time

L'aumento costante della produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili, insieme alle sfide nell'espandere la rete di trasmissione con nuove linee, spinge i Transmission System Operator (TSO) a massimizzare l'efficienza degli attuali elettrodotti. Questo capitolo si concentra sulle strategie e le metodologie documentate che permettono di aumentare la capacità di trasporto di corrente all'interno degli elettrodotti esistenti. Il metodo che andremo a studiare e che viene applicato al-

lo studio in questione è il real-time, che permette una valutazione immediata delle condizioni operative delle linee, fornendo ai servizi di dispacciamento informazioni sulla capacità di trasporto di corrente di ciascun elettrodotto. Questa capacità di adattare istantaneamente la corrente consente di modulare la portata degli elettrodotti, consentendo, in condizioni climatiche favorevoli o sotto specifici carichi, un aumento della medesima, quindi un maggior flusso di potenza. Possiamo infatti notare dall'immagine sottostante come l'ampacity sia correlato alla velocità del vento che colpisce la fune (in questo caso assunto costante con un'incidenza sulla fune di 45°) e la temperatura esterna[27].

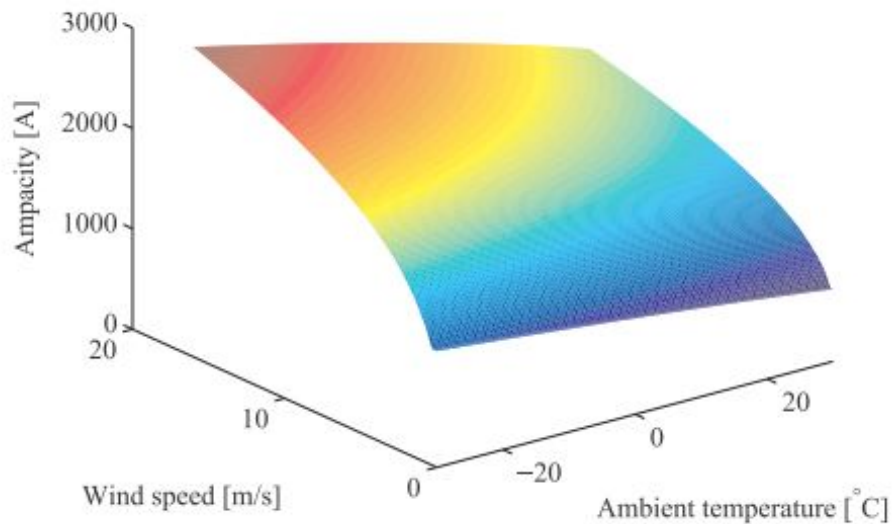


Figura 4.2: Variazione della portata in funzione del vento e della temperatura

4.1.1 Sistema DTR (Dynamic Thermal Rating)

I sistemi DTR permettono di valutare istantaneamente la massima capacità di carico di un conduttore senza comprometterne le proprietà meccaniche, considerando i parametri atmosferici che influenzano la dispersione del calore prodotto dall'effetto Joule. Questi sistemi si basano su una struttura che comprende una o più stazioni meteorologiche lungo la linea elettrica. Queste stazioni misurano le condizioni ambientali vicino alla linea e trasmettono i dati a un computer remoto. Utilizzando il modello termico del conduttore, questo elaboratore prevede in tempo reale la portata di corrente per specifici intervalli temporali, mantenendo un adeguato margine di sicurezza tra i franchi e il suolo.

La seguente figura riporta l'architettura di un sistema DTR:

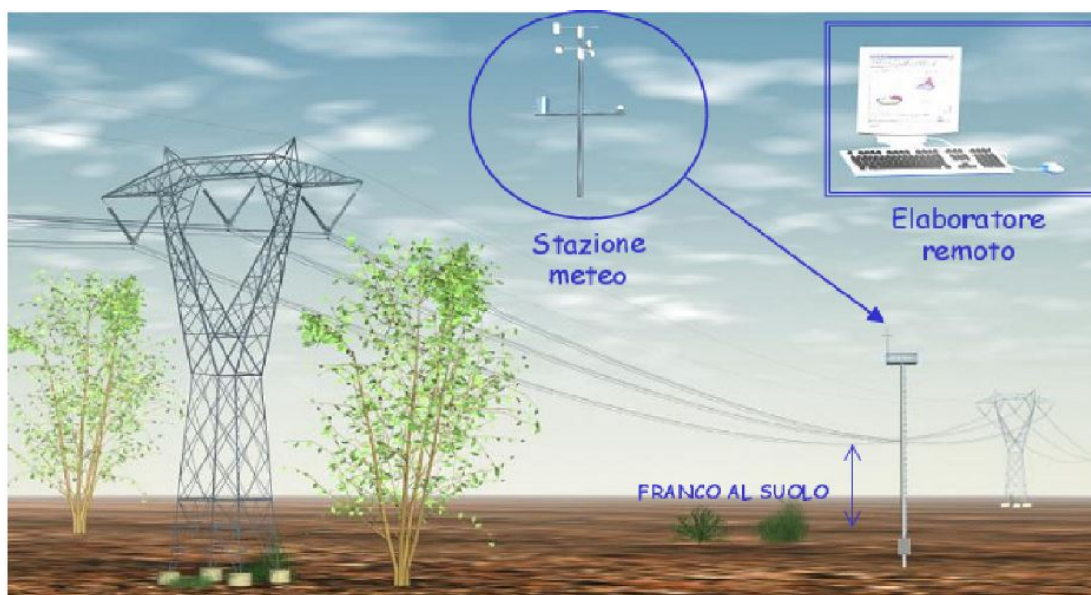


Figura 4.3: Architettura di un sistema DTR

Ciascuna stazione di acquisizione dei parametri ambientali è costituita da:

- Un sistema di alimentazione elettrica;
- Una centralina elettrica con microprocessore;
- Una serie di sensori per la misura dei parametri;

- Un sistema di trasmissione dati;

Per poter monitorare stavolta la temperatura effettiva del conduttore, e non quella ambientale, viene agganciato alla corda un dispositivo capace di misurare tale valore a seconda della corrente che porta nell'istante in cui viene effettuata la misura. Esso viene dotato di una batteria che garantisce il suo funzionamento per una durata di circa 10 anni. Di seguito possiamo apprezzare tale dispositivo pre e post montaggio:



Figura 4.4: Rilevatore di temperatura

L'intero gruppo di misura può inoltre essere installato direttamente sul traliccio, alimentando la centralina elettrica attraverso dei pannelli fotovoltaici. La conformazione della stessa sarà di conseguenza come segue:



Figura 4.5: DTR su palo

4.1.2 Ampacimon

L'Ampacimon è un sensore innovativo, che si collega anch'esso direttamente alla corda della linea elettrica aerea per monitorare istantaneamente la sagoma del conduttore senza richiedere dati extra come carichi, topologia, specifiche del conduttore o informazioni meteorologiche. Originariamente sviluppato in Belgio, questo dispositivo rileva le vibrazioni alla frequenza di oscillazione del conduttore, permettendo una valutazione diretta della sua sagoma. In questo caso però, volta installato su una porzione di conduttore, l'Ampacimon si autoalimenta utilizzando il campo magnetico locale, diventando così autonomo. Durante la traversata di un tratto di linea, l'unico dato rilevante è la frequenza di oscillazione, poiché questa è correlata direttamente con la sagoma del conduttore. Grazie a un sistema di monitoraggio del movimento della campata, l'abbassamento viene rilevato senza necessitare di ulteriori informazioni.



Figura 4.6: Ampacimon installato su una corda - Dispositivo aperto

Andiamo ora a definire le principali equazioni che permettono il funzionamento di questo dispositivo allo scopo a noi interessato.

Facendo riferimento alla figura appena riportata, di definiscono:

- a è la distanza orizzontale tra due punti di attacco [m];
- h è il dislivello [m];

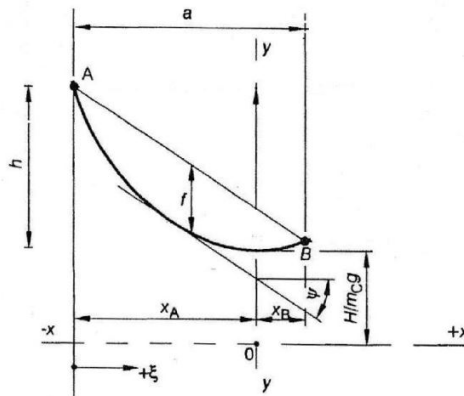


Figura 4.7: Catenaria di un conduttore con attacchi a dislivello[19]

- f è la freccia [m];
- X_A e X_B sono le coordinate dei punti di attacco [m];
- m_c è la massa del conduttore per unità di lunghezza [kg/m];
- g è l'accelerazione gravitazionale [9.81 m/s^2];
- ψ angolo [adimensionale];
- H è il tiro orizzontale [N];

L'equazione della catenaria utilizzata è la seguente:

$$y(x) = \frac{H}{m_c g} \cosh\left(\frac{m_c g a x}{H}\right) \quad (4.1)$$

Nell'ipotesi di campata a livello $L=a$ (lunghezza della campata uguale alla distanza tra i due punti di attacco della linea) la freccia massima si può trovare come:

$$f_{max} = \frac{m_c g L^2}{8H} \quad (4.2)$$

Mentre la frequenza di oscillazione della linea vale:

$$f_0 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{H}{m_c}} \quad (4.3)$$

Esprimendo H nella (4.2) in funzione di f_{max} e sostituendo nella (4.3) si otterrà:

$$f_0 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{H}{m_c}} = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{\left(\frac{m_c g L^2}{8 f_{max}}\right)}{m_c}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{g}{8 f_{max}}} \quad (4.4)$$

Dalla quale si ricava la freccia massima come:

$$f_{max} = \frac{1}{32} \frac{g}{f_0^2} \quad (4.5)$$

In questo modo si ottiene una valutazione continua della massima deviazione del conduttore, consentendo di determinare se è possibile aumentare o al massimo mantenere costante la corrente nella linea in tempo reale. Per calcolare la tensione della fune in una linea aerea, è necessario considerare l'equilibrio termico-tensionale del conduttore. Per calcolare la corrente massima per una data temperatura di esercizio, è necessario risolvere il bilancio energetico tra il calore generato nel conduttore dall'effetto Joule ($I^2 R$) e lo scambio termico sulla sua superficie. Lo scambio termico della linea aerea dipende dal calore trasferito al conduttore mediante radiazione solare (Q_S) e dissipato nell'ambiente attraverso meccanismi convettivi (Q_C) e radiativi (Q_R), come indicato dalla seguente formula:

$$I^2 \cdot R + Q_S = Q_C + Q_R \quad (4.6)$$

Pertanto, la capacità massima di corrente consentita del conduttore, in determinate condizioni meteorologiche è la seguente[29]:

$$I = \sqrt{\frac{(Q_C + Q_R - Q_S)}{R}} \quad (4.7)$$

In Belgio, alcuni di questi moduli sono stati installati su linee di trasmissione, registrando notevoli miglioramenti nell'aumento della corrente e, di conseguenza, della potenza trasferita[7][25].

4.2 Normative vigenti riguardo le distanze dei conduttori

La misura del franco, che ricordiamo essere quella tra terreno e il punto minimo del conduttore rispetto al suolo, è essenziale per poter rispettare la norma CEI 11-60, che ha come scopo quello di definire le portate in corrente al limite termico nelle linee elettriche aeree, in relazione alla tipologia della linea, alla loro posizione nel territorio nazionale e alle condizioni di funzionamento sia in termini di livello di carico in corrente che di periodo stagionale. Il mantenimento minimo di questa distanza ci previene dal rischio di scarica, ovvero dalla probabilità che si verifichi una scarica elettrica sulle opere attraversate dall'elettrodotto aereo o sugli oggetti mobili presenti sotto di esso, per effetto dell'incremento di freccia del conduttore dovuto alla dilatazione termica. La suddetta norma[3] ha elaborato un protocollo sulle portate in corrente dei conduttori delle linee elettriche aeree che deve essere regolata in modo da mantenere entro limiti ragionevoli:

- l'invecchiamento del materiale del conduttore, dei giunti e delle morse terminali dovuto al permanere di temperature elevate rispetto a quelle di progetto della linea.
- il rischio di scarica sulle opere attraversate o sugli oggetti mobili presenti sotto la linea, associato al permanere di temperature elevate rispetto a quelle di progetto.

Sapendo che la temperatura del conduttore dipende dalla corrente che lo attraversa e dalle condizioni ambientali, la norma definisce le portate in corrente attraverso due criteri:

1. In relazione alla loro possibile durata (corrente in servizio normale, corrente in servizio temporaneo).
2. In relazione alle possibili condizioni atmosferiche.

Le condizioni atmosferiche, sia in termini di probabilità che di durata non possono che essere presunte in base a statistiche meteorologiche e pertanto si possono avere limiti di portata in corrente diversi per le diverse stagioni e regioni. Si avrà così una configurazione corrispondente alla temperatura di 55°C nella zona climatica A e di 40°C nella zona climatica B. Tali valori rappresentano un riferimento progettuale e non i valori limite per la temperatura che i conduttori possono assumere nelle reali condizioni di esercizio. Nello specifico, le suddette zone vengono divise come segue:

- Zona A, comprendente le località ad altitudine non maggiore di 800 m s.l.m. dell'Italia Centrale, Meridionale ed Insulare;
- Zona B, comprendente tutte le località dell'Italia Settentrionale e le località ad altitudine maggiore di 800 m s.l.m. dell'Italia Centrale, Meridionale ed Insulare.

Mentre, per quanto riguarda il periodo stagionale, la norma prevede due distinti periodi:

- Periodo C, caldo, comprendente i mesi di maggio, giugno, luglio, agosto e settembre;
- Periodo F, freddo, comprendente i mesi di ottobre, novembre, dicembre, gennaio, febbraio, marzo e aprile.

Abbiamo applicato dunque la suddetta norma allo studio della linea in questione, facende parte della zona B, in entrambi i periodi stagionali, e abbiamo verificato grazie al DTR, lo scostamento del conduttore in funzione della temperatura atmosferica esterna, come successivamente descritto.

4.3 Studio e misurazione del franco

In questa sezione si andrà ad analizzare, previa ricezione dei dati provenienti dal sistema DTR e la variazione di portata ad essi correlati, una rappresentazione grafica dello scostamento della corda alle diverse temperature e condizioni atmosferiche.

La linea presa in esame è una doppia terna ad alta tensione 132 kV, che parte dalla stazione di Rovereto ed arriva ad Arco. Di seguito possiamo apprezzare una visione della stessa presa dal software Google Earth Pro.

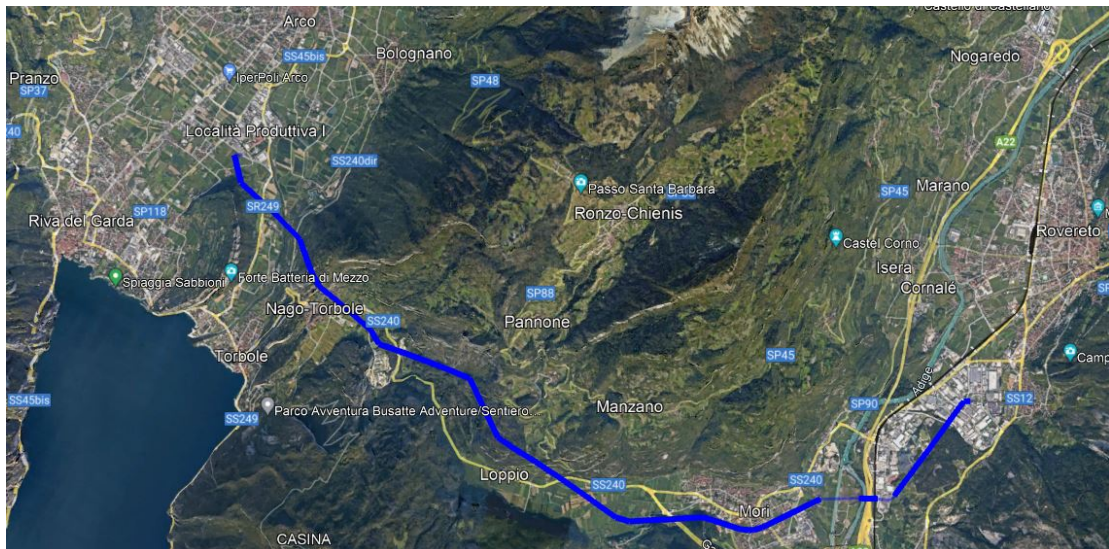


Figura 4.8: Linea in doppia terna a 132 kV

Per poter studiare il fenomeno di dilatazione termica del conduttore, con successivo abbassamento dello stesso, ci siamo concentrati in particolare sulla porzione di linea sopra la località di Loppio, circa a metà linea.

La campata in questione ha la problematica di presentare un franco fuori norma già ad una temperatura di 40°C .

Essendo un traliccio in doppia terna, è giusto precisare che entrabe le terne sono soggette a tale fenomeno, anche se non in maniera uguale l'una rispetto all'altra.

4.3.1 Estrapolazione dati DPM-3D

La prima immagine vuole mostrare l'intera campata della linea, che presenta i conduttori, come già accennato, ad una distanza non conforme all'esercizio in condizioni pienamente adempienti alle norme vigenti. I colori arancioni delle funi indicano le normali distanze dei conduttori rispetto al suolo presa una temperatura esterna di $32,7^{\circ}\text{C}$, mentre quelli colorati stanno a rappresentare l'effettivo scostamento delle corde.

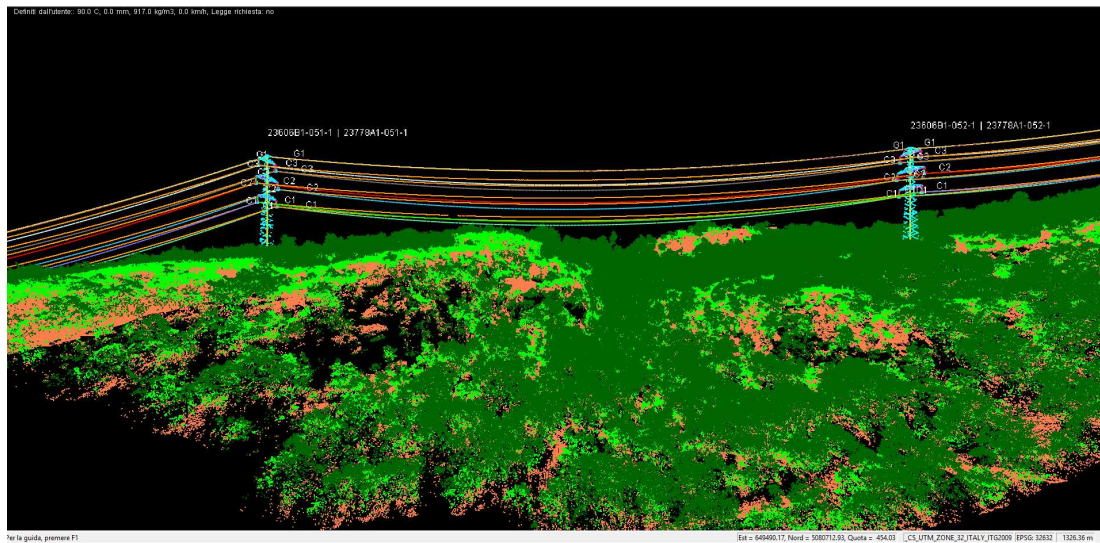


Figura 4.9: Estrapolazione tramite DPM-3D dell'intera campata

Come possiamo notare, con una temperatura esterna di 90°C il franco generato dal conduttore scende di quasi 1 metro rispetto alla distanza che normalmente detiene già ad una temperatura di 40°C , limitando così ulteriormente il trasposto della corrente che potrebbe fluire attraverso di esso, ottenendo come risultato un minor flusso di potenza. Potendo dunque monitorare in tempo reale le condizioni meteorologiche, possiamo gestire da remoto la portata della linea in funzione della temperatura assunta dalla corda, sia per massimizzare la potenza trasmessa in caso di tempo freddo (minima resistenza), sia per limitare la corrente in caso di temperature esterne elevate, per prevenire appunto l'eccessivo scostamento della corda dalla sua posizione di regime.

Per apprezzare maggiormente questo fenomeno possiamo rappresentare la campata attraverso lo stesso programma, andando ad estrapolare solamente la corda più vicina al terreno ed il terreno stesso. Come già accennato, entrambe le terne subiscono questo scostamento, ma non in equal modo.

In queste due immagini possiamo apprezzare il conduttore alla temperatura di 40°C, prima sulla terna sinistra poi sulla destra.

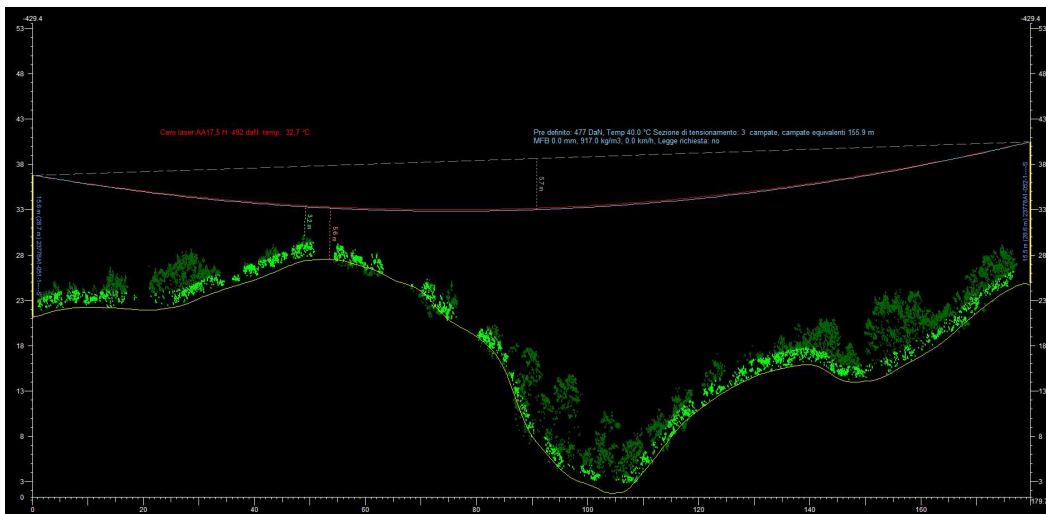


Figura 4.10: Campata sx a 40°C

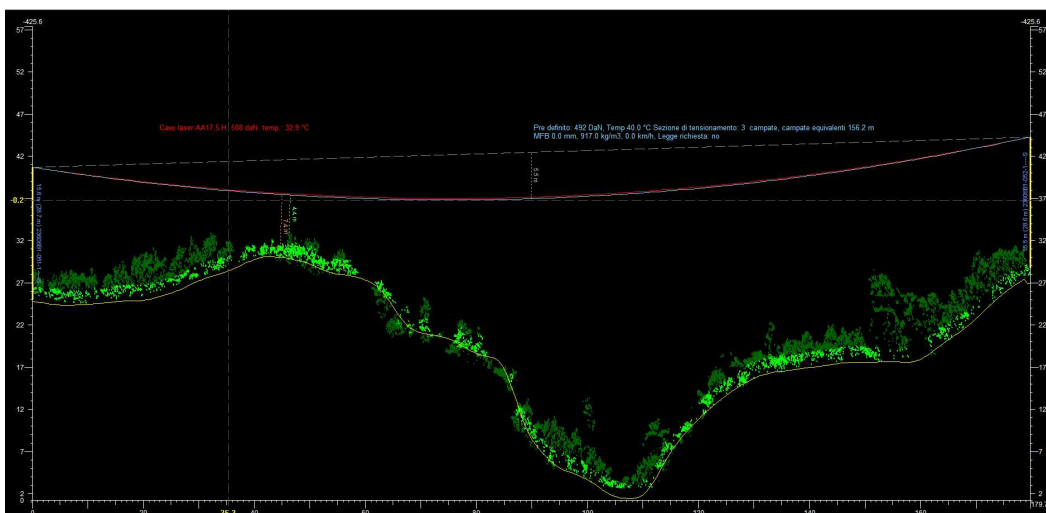


Figura 4.11: Campata dx a 40°C

Possiamo dunque notare come solamente la terna di sinistra presenti un franco di 5.6 metri, inferiore ai 6.3 previsti dalle normative, rispetto ai 7.7 metri della terna di destra. Questo è possibile grazie appunto alla diversa conformazione territoriale, come già accennato.

Proviamo ora ad aumentare la temperatura esterna a 90°C.

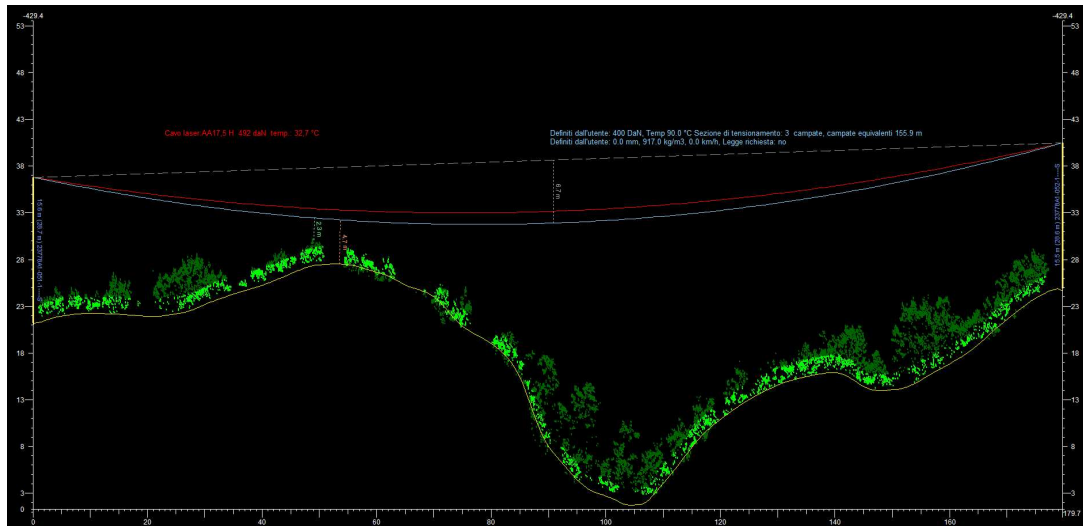


Figura 4.12: Campata sx a 90°C

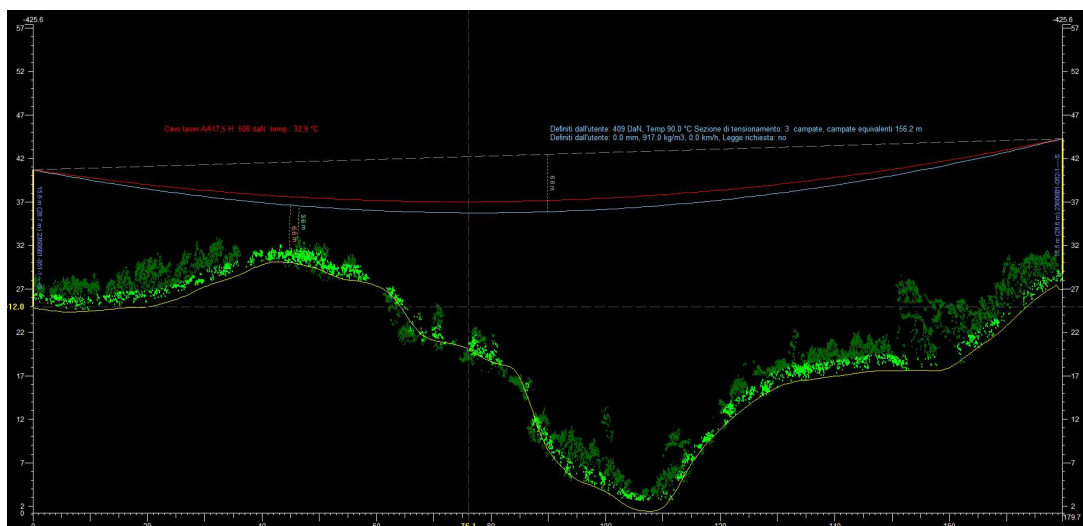


Figura 4.13: Campata dx a 90°C

Come possiamo notare, il conduttore più basso della corda di sinistra è sceso di altri 0.9 metri, mentre quello di destra di 0.8 metri, quest'ultimo rimanendo comunque all'interno della distanza minima prevista, con i suoi 6.6 metri corda-terreno.

4.3.2 Metodi risolutivi adoperati

Per poter rientrare all'interno delle normative già citate, si è dovuti intervenire per ripristinare le corrette distanze dei conduttori rispetto al suolo, ovviamente per entrambe le terne della campata. Sono stati valutati due metodi volti alla risoluzione del problema, entrambi focalizzati sull'accorciamento della distanza tra il conduttore e il terreno, dunque al sollevamento dello stesso rispetto alla posizione che normalmente deteneva. Prima di essere cambiata, la corda veniva isolata dalla mensola del traliccio attraverso un armamento a sospensione, nella così detta conformazione ad "i". Tale posa tuttavia genera la maggior distanza del conduttore dalla mensola stessa e verso terra. Per poter ovviare a questo problema, i metodi studiati sono stati:

- 1) Utilizzo della sospensione ad amarro bilanciato: Questa conformazione permette di alzare il conduttore, mantenendo invariato il traliccio, che per caratteristiche strutturali non poteva ospitare sulle sue mensole un amarro classico. Vediamo dunque nella figura sottostante la posa ad amarro sospeso.



Figura 4.14: Amarro bilanciato

2) Utilizzo della sospensione a V :



Figura 4.15: Sospensione a V

Questo tipo di sospensione invece, oltre ad avvicinare i conduttori gli uni agli altri, prevenendo così eventuali problemi relativi ai campi magnetici, riduce maggiormente anche la distanza rispetto al terreno.

Dopo aver valutato quindi entrambe le possibilità da attuare, si è optato per la seconda, di maggior rilievo alla risoluzione del nostro problema (la figura mostra un l'esempio dell'operazione che si dovrà svolgere in futuro alla linea presa in esame, lavoro pianificato per l'estate 2024).

Capitolo 5

Verifica dei campi magnetici

5.1 Studio teorico dei campi generati

Per questo studio si è tenuto conto della conformazione della linea presa in questione, ovvero il tralicio in doppia terna che, al momento dell'analisi portava una corrente corrispondente a 375 Ampere.

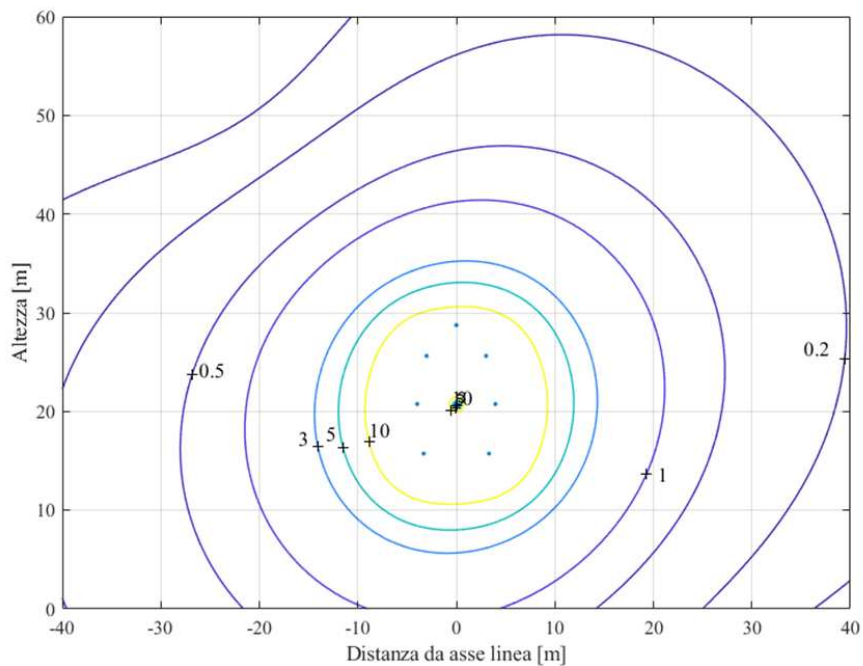


Figura 5.1: Campo-distanza

Possiamo quindi notare dalla precedente figura il valore del campo magnetico che i conduttori generano attorno al primo traliccio, con le rispettive distanze al suolo ai diversi valori di campo. Nella figura si può apprezzare il valore di $3 \mu\text{T}$, imposto come valore limite dalle norme vigenti, ad una distanza di 13,8 metri, presa una corrente concorde in entrambe le terne.

Un'altra rappresentazione di tale fenomeno possiamo ottenerla attraverso le seguenti immagini, forse più esplicative.

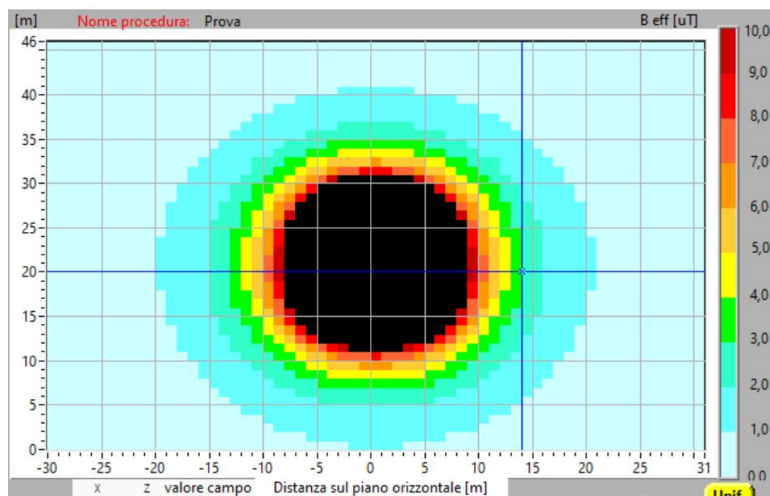


Figura 5.2: Curva isocampo

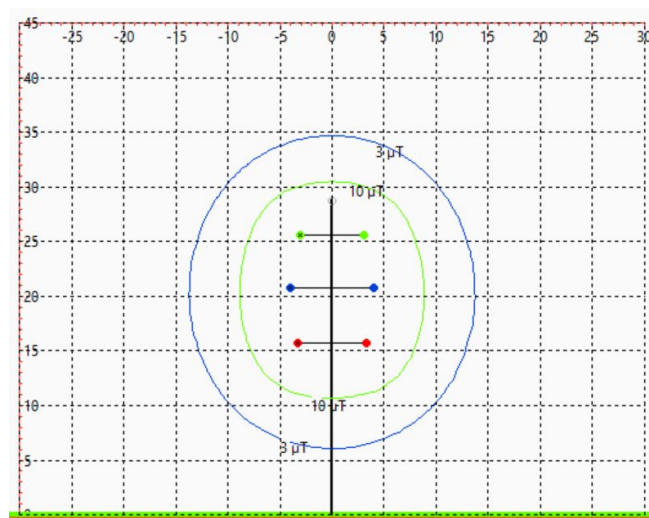


Figura 5.3: Traliccio con curve isocampo

Per ottenere questi dati abbiamo fatto affidamento alle misure dei tralicci prese dal programma sopra descritto. Se vogliamo invece fare un confronto con i campi generati dal secondo traliccio (i due formano la campata studiata per il problema del sotto franco), dobbiamo cambiare i dati delle diverse distanze all'interno del programma di calcolo. Di seguito le immagini della nuova conformazione dei campi:

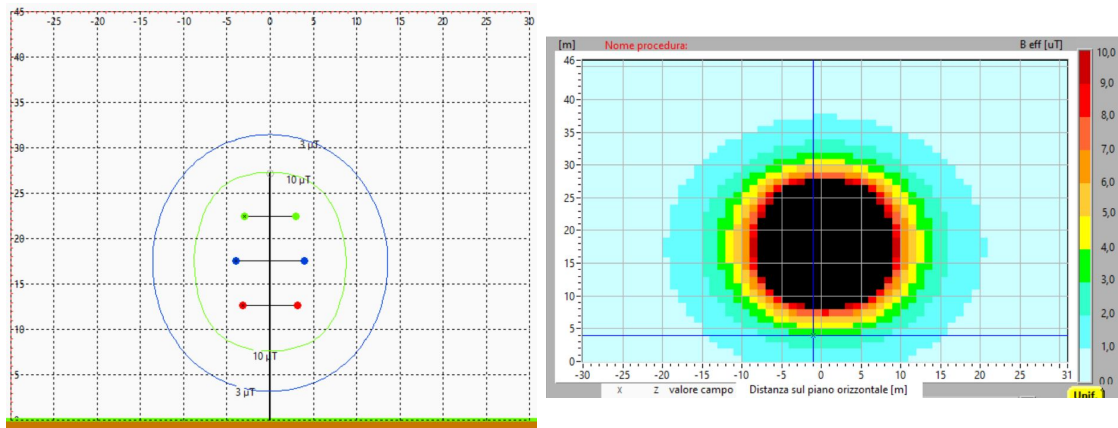


Figura 5.4: Curve campo magnetico secondo traliccio

È giusto comunque precisare che la campata presa in questione è disposta su di un versante montuoso, quindi sotto di essa non vi saranno edifici, tanto meno quelli atti alla permanenza di persone per un tempo prolungato. Anche se fosse comunque i campi al suolo risultano più che rispettati.

Capitolo 6

Conclusioni

Al fine di poter rispettare le norme vigenti che stabiliscono le distanze minime da terra (franco) che i conduttori di fase devono rispettare, in questo lavoro di tesi ho avuto la possibilità di confrontare le impostazioni teoriche inerenti all'argomento con le risultanze sperimentali. A tal fine, ho avuto modo di utilizzare i dati derivanti dal sistema in real-time, Dynamic Thermal Rating (con acronimo DTR): mediante tale sistema, ho potuto acquisire istante per istante le condizioni atmosferiche esterne, che hanno permesso di valutare la portata ottimale della linea affinché i franchi rispettassero i valori normativi. Attraverso il programma DPM-3D, ho potuto acquisire un'immagine digitalizzata della linea in questione, andando a mostrare per via grafica la differenza di scostamento tra la condizione di minima temperatura esterna e quella massima di esercizio. Sono stati elencati poi i metodi adoperati per la risoluzione del problema, ovvero il cambiamento della conformazione degli isolatori affinché il conduttore potesse sollevarsi dal terreno. I metodi risolutivi studiati sono stati sia quello ad amarro bilanciato sia quello a V: si è optato per la seconda soluzione per il maggior franco conseguibile. Infine, ho realizzato uno studio che ha permesso di calcolare i campi magnetici generati dai conduttori, per verificare che le abitazioni ad uso civile rimanessero fuori dalla curva isocampo limite dei $3 \mu\text{T}$ imposta dalla normativa.

Bibliografia

- [1] Campi elettromagnetici generati da elettrodotti.
- [2] Caratteristiche generali delle linee elettriche aeree facenti parte della rtn, pdf.
- [3] Cei 11-60, portata al limite termico delle linee elettriche aeree esterne con tensione maggiore di 100 kv, pdf.
- [4] Corso di formazione su valutazione d'impatto ambientale.
- [5] D. andreuccetti, n. zopetti, r. conti, n. fanelli, a. giorgi, r. rendina, "magnetic fields from overhead power lines: advanced prediction techniques for environmental impact assessment and support to design", atti della 2003 ieee power tech conference, bologna (italia), giugno 2003.
- [6] Decreto ministeriale 21 marzo 1988, n. 449, "approvazione delle norme tecniche per la progettazione, l'esecuzione e l'esercizio delle linee aeree esterne".
- [7] Dynamic ratings increase efficiency, pdf.
- [8] Elettricità e magnetismo: storia, spiegazione e legge di coulomb.
- [9] Entsoe, gas insulated lines.
- [10] Equazioni di maxwell, wikipedia.
- [11] Gli effetti sulla salute dei campi magnetici a bassa frequenza.
- [12] Italia oggi: Terna vara l'elettrodotto sottomarino dei record.

-
- [13] La differenza tra cavo isolato xlpe e cavo isolato in pvc, luoyang asian sun wire cable co.
- [14] Le onde elettromagnetiche, zanichelli.
- [15] M. benes, m. comelli, a. bampo, r. villalta, “procedure di misura di campi elf in prossimità di configurazioni complesse di linee elettriche”, airp- convegno nazionale di radioprotezione: Campi neutronici nella terapia medica catania, 15-17 settembre 2005.
- [16] Misura e valutazione dell’esposizione della popolazione ai campi magnetici generati da elettrodotti aerei a doppia terna, m. landini, g. mazzanti.
- [17] Norma cei 211-4, “guida ai metodi di calcolo dei campi elettrici e magnetici generati da linee elettriche”, 1996, fascicolo 2840.
- [18] Relazione specialistica esposizione ai campi elettromagnetici, pdf.
- [19] Self-powered sensor with vibration-based metrology for direct measurement of conductor sag, windspeed and mean conductor temperature.
- [20] Trasmissione di energia elettrica, wikipedia.
- [21] Trasmissione di energia via mare: il cavo sa.pe.i. 18/03/2011.
- [22] Roberto Benato. La trasmissione dell’energia nelle reti elettriche di potenza, 3^a edizione. 2024.
- [23] Marco cavalli and Paolo Tarolli. Application of lidar technology for rivers analysis. *Italian journal of engineering geology and environment*, page 33–44, Dec. 2011.
- [24] Luenda E. Charles, Dana Loomis, Carl M. Shy, Beth Newman, Robert Millikan, Leena A. Nylander-French, and David Couper. Electromagnetic Fields, Polychlorinated Biphenyls, and Prostate Cancer Mortality in Electric Utility Workers. *American Journal of Epidemiology*, 157(8), 04 2003.

-
- [25] Eric Cloet, Jean-Louis Lilien, and Patrick Ferrières. Experiences of the belgian and french tsos using the “ampacimon” real-time dynamic rating system. 2010.
- [26] Massimo Guarnieri. Appunti del corso di ”storia della tecnologia”.
- [27] Soheil Karimi, Petr Musílek, and Andrew Michael Knight. Dynamic thermal rating of transmission lines: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018.
- [28] Antonio Paolucci. Lezioni di trasmissione dell’energia elettrica. Cleup, 1998.
- [29] Hamid Shaker, Mahmud Fotuhi-Firuzabad, and Farrokh Aminifar. Fuzzy dynamic thermal rating of transmission lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27(4), 2012.
- [30] Luciano Stefanini. I sistemi informativi geografici (gis) e le nuove applicazioni dell’informazione georeferenziata. *Argomenti*, 6, 01 2006.
- [31] Roberto Turri. Appunti del corso di ”sistemi elettrici per l’industria ed i trasporti”.
- [32] pia K. Verkasalo, Jaakko Kaprio, Jyrki Varjonen, Kalle Romanov, Kauko Heikkilä, and Markku Koskenvuo. Magnetic Fields of Transmission Lines and Depression. *American Journal of Epidemiology*, 146(12), 12 1997.
- [33] Olga Zeni, Bruno Bisceglia, Maria Lioi, Rocchina Barbieri, Antonietta Santoro, and Maria Rosaria Scarfi. Evaluation of biological effects induced in cattle living near electromagnetic sources. 06 2000.

Elenco delle figure

2.1	Dinamo Jumbo	6
2.2	Memoriale	6
2.3	Esempi di sostegni a traliccio	9
2.4	Conduttore a fascio	11
2.5	Fune di guardia con nucleo ottico	11
2.6	Isolatore cappa-perno	12
2.7	Cavo elettrico per media tensione	13
2.8	Conduttore SAPEI	14
2.9	Cavo Milliken a sei settori isolato in XLPE	15
2.10	Sezione conduttore GIL	16
3.1	Propagazione dell'onda elettromagnetica	22
3.2	Propagazione dell'onda elettromagnetica dopo $t_1 + \Delta t$	22
3.3	Curve di livello del campo elettrico ad 1 m dal suolo	23
3.4	Curve di livello dell'induzione magnetica ad 1 m dal suolo	24
3.5	Andamento del campo magnetico in funzione del tempo	24
3.6	Corda sdoppiata	25
3.7	Cambio geometria delle corde	26
3.8	Variazione dell'induzione magnetica cavo-linea aeree	27
3.9	Rappresentazione vettoriale dei due vettori induzione B_A e B_B generati in un punto P dalle due terne simmetriche di corrente A e B, di valore efficace I_A e I_B , rispettivamente.	31

4.1	Modalità di esecuzione del rilievo LIDAR	36
4.2	Variazione della portata in funzione del vento e della temperatura	38
4.3	Architettura di un sistema DTR	39
4.4	Rilevatore di temperatura	40
4.5	DTR su palo	41
4.6	Ampacimon installato su una corda - Dispositivo aperto	42
4.7	Catenaria di un conduttore con attacchi a dislivello[19]	43
4.8	Linea in doppia terna a 132 kV	47
4.9	Estrapolazione tramite DPM-3D dell'intera campata	48
4.10	Campata sx a 40°C	49
4.11	Campata dx a 40°C	49
4.12	Campata sx a 90°C	50
4.13	Campata dx a 90°C	50
4.14	Amarro bilanciato	51
4.15	Sospensione a V	52
5.1	Campo-distanza	53
5.2	Curva isocampo	54
5.3	Traliccio con curve isocampo	54
5.4	Curve campo magnetico secondo traliccio	55

Ringraziamenti

Voglio partire ringraziando di cuore i miei colleghi ingegneri, diventati validi amici in un percorso tutt'altro che semplice, senza i quali la data di questa mia laurea non sarebbe stata la stessa! Un grazie quindi ad Ago, Giacomo, Paolo e Marcello, che hanno condiviso con me i loro appunti data la mia poca presenza in università per motivi... istituzionali.

So già cheavrà da ridere per non averlo inserito come primo nome da ringraziare, quindi prima che partano i lamenti, ringrazio il PASSI! Amico cardine della mia vita universitaria e migliore amico (CO_____E!).

A seguire tutti i miei fedelissimi amici, che mi hanno sopportato e supportato in quest'esperienza travagliata!

Lucia, che si sentirà onorata di leggere queste righe, conscia del fatto che entrambi avremmo potuto benissimo non esserci oggi, ma questa è una storia che è meglio che rimanga tra pochi intimi.

Sara e Federica, che anche se mancano 3 volte su 2 alle uscite, faranno sempre parte del mio cuore!

La Izabel, per aver alleggiato i bui momenti della mia vita e aver condiviso con me i suoi!

Alessandro Torti, che mi auguro sia venuto ALMENO alla mia proclamazione, visto che organizzare le uscite con lui è una mission impossibile.

Il Pighi!..... il Pighi??

Massimo, amico di vecchissima data che per vicissitudini della vita frequento non quanto vorrei, ma con la certezza che ci saremo per sempre l'un l'altro!

Matteo ed Enrico (Enrico sarebbe "Gringo"), coinquilini che ormai, dopo 5 anni di convivenza, sono diventati parte del mio quotidiano, rallegrando ogni mia giornata con il loro basso quoziente intellettivo ma alto senso dell'umorismo! Grazie anche ad Izide,

per avermi fatto capire di non prendere mai un gatto femmina...

Giulio, che mi ha permesso di visitare Tolosa e che ringrazierò per il mal di schiena che mi porto dietro da quelle due serate di pernottamento nella sua camera del campus.

Un grazie speciale lo dedico al professor Benato, che mi ha concesso l'opportunità di questa tesi nonché quella di entrare per alcuni mesi all'interno della grande famiglia Terna.

Grazie quindi ai colleghi di Terna! Anita, Simoni(perché sono due), Mauro, Mario, Paoli(semprè perché due) e al mio responsabile Diego. Avete reso il mio stage un'esperienza meravigliosa e divertente!

Un grazie infine a tutte le splendide persone conosciute a Padova in questi anni!! Sareste davvero troppi da nominare, ma vi volevo ricordare almeno con queste poche righe.

Ringrazio al volo anche la Regione del Veneto che mi ha sempre mantenuto con le borse di studio senza le quali sarei stato un pezzente in questi lunghi anni...

Un grazie ora ai colleghi di Borghetto! In particolare Marlene, Angela, Gene e Vincenzo, con i quali ho condiviso momenti di fatica indescrivibili ma che hanno reso tutto ciò molto più sereno.. (ringrazio soprattutto gli stipendi di quel lavoro che mi hanno permesso di viaggiare un sacco!!).

Un infinito grazie di cuore a Diego, Sergio (soprattutto per l'ottimo vino che mi regali sempre) e Luigina, che hanno creduto in me più di quanto io credessi in me stesso, standomi vicini ad ogni passo e in ogni scelta da me intrapresa!

Grazie anche a tutti i miei parenti rumeni, che non sapendo l'italiano preferisco ringraziarli nella nostra lingua, quindi: Vă mulțumesc că sunteți și ați fost mereu alături de mine, chiar dacă de departe! Vă iubesc pe toți!

Ci tengo a citare anche la mia costante fonte di gioia e tenerezza, il mio gatto Tiger che si è subito gran parte dei miei sfoghi! Grazie Tzitzzi!

Ed infine.... ultima ma solamente perchè il dolce arriva come ultima portata... la mia splendida mamma, Mariana, colonna portante nella mia vita, ragione della mia laurea, della mia splendida vita studentesca e del mio sereno futuro! D'ora in poi, sarà tutto in discesa mamma, promesso!

Vostro

Eduard

