

**Cliente** TERNA S.p.A

**Oggetto** Elettrodotto 380 kV "Cassano-Chiari" in progetto. Rapporto finale sulla valutazione dell'interferenza elettromagnetica indotta sui sistemi di telecomunicazione TLC della linea ad A.V. Torino – Venezia, tratta Milano - Verona, lotto Treviglio – Brescia, esistenti nelle vicinanze.

**Ordine** n° 4000040578 del 30/08/2011 – Pos.000080 – SRI97-INTERF-RFI – Linee AT poste in prossimità di linee ferroviarie: valutazione degli effetti mutui

**Note** AT11ESS018 – Lettera di trasmissione B2013666

La parziale riproduzione di questo documento è permessa solo con l'autorizzazione scritta del CESI.

**N. pagine** 32 **N. pagine fuori testo** -

**Data** 02/05/2012

**Elaborato** ESS - Pedretti Luigi Angelo  
B1027427 3493 AUT

**Verificato** ESS - Sala Maurizio  
B1027427 3741 VER

**Approvato** ESS - Capra Davide (Project Manager)  
B1027427 3293 APP

**CESI S.p.A.**

Via Rubattino 54  
I-20134 Milano - Italy  
Tel: +39 02 21251  
Fax: +39 02 21255440  
e-mail: info@cesi.it  
www.cesi.it

Capitale sociale € 8.550.000 interamente versato  
C.F. e numero iscrizione Reg. Imprese di Milano 00793580150  
P.I. IT00793580150  
N. R.E.A. 429222

© Copyright 2012 by CESI. All rights reserved

Pag. 1/32

## *Indice*

<b>1</b>	<b>SOMMARIO</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>GENERALITÀ</b> .....	<b>4</b>
2.1	Concetti fondamentali di interferenza elettromagnetica.....	4
2.2	Normativa di riferimento.....	5
2.2.1	Limiti relativi alla sicurezza (delle persone).....	5
2.2.2	Limiti relativi al danno agli impianti.....	6
2.2.3	Valori ammissibili in casi speciali.....	7
2.2.4	Applicazione dei limiti.....	7
2.2.5	Condizioni dell'impianto inducente.....	7
<b>3</b>	<b>METODO ED ALGORITMI DI CALCOLO</b> .....	<b>9</b>
3.1	Accoppiamento induttivo.....	10
3.1.1	Auto e mutua impedenza. Formule di Carson.....	11
3.1.2	Formule di Carson-Clem.....	12
3.2	Determinazioni delle tensioni e correnti in linea.....	13
3.2.1	Modello a parametri concentrati.....	14
3.2.2	Calcolo del regime della linea.....	14
<b>4</b>	<b>TRACCIATI DEGLI IMPIANTI INTERFERENTE ED INTERFERITO</b> .....	<b>16</b>
<b>5</b>	<b>DATI TECNICI DEGLI IMPIANTI INTERFERENTE ED INTERFERITO</b> .....	<b>19</b>
5.1	Impianto interferente: Elettrodotto AT.....	19
5.2	Linea ferroviaria AV.....	20
5.3	Impianti interferiti della Linea ferroviaria AV.....	21
5.4	Modello di impianto interferito.....	23
<b>6</b>	<b>RISULTATI DI SIMULAZIONE</b> .....	<b>26</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONI</b> .....	<b>32</b>

## STORIA DELLE REVISIONI

Numero revisione	Data	Protocollo	Lista delle modifiche e/o dei paragrafi modificati
0	02/05/2012	B1027427	Prima emissione

## 1 SOMMARIO

La scheda INTERF-RFI (SRI097) riguarda l'esecuzione di calcoli di interferenza elettromagnetica che la futura linea elettrica a 380 kV "Cassano-Chiari" può generare sulle linee del sistema di telecomunicazioni TLC della linea ad A.V. Torino – Venezia, tratta Milano - Verona, lotto Treviglio – Brescia.

Il programma delle attività prevede il calcolo delle tensioni indotte nelle strutture metalliche della linea ferroviaria (linee di alimentazione, di comando e segnalazione) in condizioni di esercizio normale e di guasto verso terra dell'elettrodotto AT limitandosi ad analizzare un tratto di elettrodotto di lunghezza massima di 20 km.

La programmazione originale delle attività prevede tre fasi:

- Calcolo dei livelli di tensione e correnti indotte nelle strutture metalliche della linea ferroviaria (ivi inclusi impianti di segnalamento e controllo) e dell'elettrodotto ad alta tensione;
- Analisi di conformità alla normativa tecnica nelle diverse condizioni (normali condizioni di esercizio e guasto verso terra).
- Proposta di interventi per risolvere eventuali situazioni critiche.

Le valutazioni dell'interferenza sono eseguite prendendo in considerazione la condizione di guasto monofase a terra come previsto dalla Norma CEI 103-6<sup>1</sup>. Per il calcolo delle tensioni e correnti indotte si è adottata una procedura multi-conduttore che permette di studiare il regime alla frequenza fondamentale di circuiti elettrici accoppiati. La valutazione dei risultati dell'interferenza è fatta in accordo con la già citata norma CEI 103-6.

Il lavoro descritto nel presente rapporto è basato sui calcoli effettuati dal prof. Roberto Turri della facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Padova riguardanti i livelli di tensione indotta sulle linee del sistema di telecomunicazione.

<sup>1</sup> Norma CEI 103-6 (1997): "Protezione delle linee di telecomunicazione dagli effetti dell'induzione elettromagnetica provocata dalle linee elettriche vicine in caso di guasto". Fascicolo 4091

## 2 GENERALITÀ

### 2.1 Concetti fondamentali di interferenza elettromagnetica

Con interferenza elettromagnetica si intende il fenomeno in base al quale una linea elettrica in corrente alternata genera su conduttori metallici posti nelle sue vicinanze, tensioni e correnti indotte. La linea inducente è costituita da una o più linee di trasporto di energia o da linee di trazione ferroviaria, mentre la linea indotta è costituita da linee di telecomunicazione, tubazioni metalliche, ecc.

I parametri elettrici che caratterizzano la linea inducente ai fini della descrizione di questo fenomeno sono la tensione, che genera interferenza per accoppiamento elettrico, e la corrente, che genera interferenza per accoppiamento magnetico.

L'accoppiamento elettrico è presente solo in caso di linee inducenti aeree e manifesta i suoi effetti solo su linee indotte aeree poste nelle immediate vicinanze delle linee inducenti.

L'accoppiamento magnetico invece, è presente nel caso di linee inducenti aeree ed interrate e può manifestare i suoi effetti anche a notevoli distanze dalle linee inducenti.

Per linee elettriche trifasi, le correnti circolanti nelle tre fasi, sono in genere equilibrate. Ciò si traduce nel fatto che l'interferenza elettromagnetica in condizione di funzionamento normale delle linee inducenti è solitamente trascurabile, e comunque manifesta effetti solo su linee indotte estremamente vicine alle linee inducenti. In condizioni di guasto monofase a terra viceversa, le correnti sono, non solo di valore più elevato, ma totalmente squilibrate. Questa è dunque la situazione fondamentale di interferenza elettromagnetica che deve essere esaminata.

Risulta necessario distinguere chiaramente tra i risultati dell'interferenza e gli effetti dell'interferenza.

Con risultati dell'interferenza si intendono le grandezze elettriche, con i relativi valori numerici, che caratterizzano l'ammontare dell'interferenza sulla linea indotta: si tratta sostanzialmente di tensioni e correnti indotte. I risultati rappresentano un elemento cardine dell'interferenza elettromagnetica perché permettono di individuarla quantitativamente in maniera oggettiva: ciò spiega perché gli accordi tra gli enti proprietari degli impianti inducenti e degli impianti indotti, esplicitati dalle Norme tecniche, definiscono i limiti da applicare ai risultati dell'interferenza che si manifestano sull'impianto indotto.

L'approccio metodologico con cui è trattata l'interferenza elettromagnetica differisce in modo sostanziale dall'approccio con cui è affrontata la compatibilità elettromagnetica (EMC), a cui spesso l'interferenza elettromagnetica è associata. In EMC, l'impianto inducente e quello indotto sono considerati indipendentemente gli uni dagli altri. L'impianto inducente non deve emettere più di un certo limite (limite di emissione); l'impianto indotto deve resistere fino ad un certo limite (limite di immunità): la compatibilità elettromagnetica è assicurata in senso statistico dal fatto che i limiti di emissione sono adeguatamente inferiori ai limiti di immunità.

Nell'interferenza elettromagnetica non esiste un concetto analogo al limite di emissione, ma solo il concetto analogo al limite di immunità dell'impianto indotto: la verifica del rispetto di tale limite deve però essere esaminata caso per caso.

Gli effetti dell'interferenza sono ciò che le tensioni e correnti indotte possono produrre sull'impianto indotto e sulle persone che si trovano a contatto con esso. In funzione del valore assunto dai risultati e di altre condizioni, quali il tipo di servizio svolto dall'impianto indotto e la presenza di persone a contatto con l'impianto indotto, si possono manifestare danni all'impianto, perturbazioni al suo funzionamento (fino all'interruzione del servizio svolto dall'impianto), pericoli per le persone a contatto con l'impianto indotto.

Il concetto chiave associato agli effetti definiti precedentemente ed ai limiti di interferenza stabiliti dalle Norme di interferenza è il seguente: rispetto dei limiti significa che

l'interferenza, pur producendo risultati non nulli, non produce effetti, ovvero non produce danni, non produce perturbazioni, non dà luogo a pericoli per le persone. In sintesi, il soddisfacimento dei limiti significa che l'interferenza è accettabile.

## 2.2 Normativa di riferimento

Le ipotesi di calcolo, l'approccio metodologico su cui i calcoli si basano e i limiti applicati sono fondati, oltre che su una riconosciuta bibliografia scientifica, sui seguenti documenti:

- [1] CCITT – Directives concerning the protection of telecommunication lines against harmful effects from electric power and electrified railway lines – ITU – 1989.
- [2] ITU.T – Limits for people safety related to coupling into telecommunications system from a.c. electric power and a.c. electrified railway installations in fault conditions. ITU –T Recommendation K.33.
- [3] CEI 103-6 – Protezione delle linee di telecomunicazione dagli effetti dell'induzione elettromagnetica provocata dalle linee elettriche vicine in caso di guasto.

La norma italiana di riferimento relativamente ai fenomeni di interferenza elettromagnetica causati da sistemi elettrici di potenza su sistemi di telecomunicazione, caso oggetto del presente studio, è la summenzionata Norma CEI 103-6.

Di seguito, per comodità di lettura, sono descritti sommariamente i contenuti della norma citata per quanto riguarda l'interferenza elettromagnetica tra elettrodotti e linee di telecomunicazione.

Gli effetti dell'interferenza da considerare sono:

- danno per le persone che a qualsivoglia titolo possono venire in contatto con qualunque elemento metallico dell'impianto di telecomunicazione (punto 2.1.02 della Norma CEI 103-6),
- danno all'impianto di telecomunicazione (punto 2.1.03 della Norma).

### 2.2.1 Limiti relativi alla sicurezza (delle persone)

In condizione di guasto monofase a terra della linea elettrica, i limiti da rispettare per la protezione da shock elettrici di persone che possono entrare in contatto con qualunque elemento metallico dell'impianto di telecomunicazione sono espressione della combinazione dei valori limite di tensione indotta verso terra e della durata del guasto. Tali valori, estratti dalla Norma CEI 103-6 – punto 2.1.02, sono riportati nella Tabella 1 seguente.

**Tabella 1:** Limiti relativi alla sicurezza delle persone (tensione indotta verso terra) in condizioni di guasto monofase a terra della linea elettrica.

Durata del guasto [s]	Tensione (v. efficace) [V]
$t \leq 0,1$	2000
$0,1 < t \leq 0,2$	1500
$0,2 < t \leq 0,35$	1000
$0,35 < t \leq 0,5$	650
$0,5 < t \leq 1$	430
$t > 3$	60

I limiti sopra indicati si applicano in qualsivoglia posizione.

In condizione di funzionamento normale della linea elettrica i valori ammissibili sono i seguenti:

- la tensione tra un elemento conduttore dell'impianto di telecomunicazione e la terra di riferimento non deve superare in qualsivoglia posizione il valore di 60 V (efficaci);
- in condizioni di particolare difficoltà, il valore ammissibile può essere portato a 150 V (efficaci) adottando particolari precauzioni. Queste precauzioni possono includere:
  - istruzioni particolari fornite al personale che può avere accesso a tensioni superiori a 60 V, in modo tale da applicare speciali misure di lavoro;
  - avvertimenti esposti sulle parti accessibili degli elementi conduttori.

Da notare che il nostro Paese non ha ritenuto necessario dotarsi di una normativa specifica riguardante l'interferenza elettromagnetica tra linee elettriche e linee di telecomunicazione in condizioni di normale funzionamento del sistema elettrico, riferendosi la Norma CEI 103-6 esplicitamente per la sola situazione di guasto della linea elettrica inducente.

### **2.2.2 Limiti relativi al danno agli impianti**

a) In condizioni di guasto della linea elettrica di durata  $\leq 1$  s, i valori ammissibili sono i seguenti:

- la tensione tra un elemento conduttore dell'impianto di telecomunicazione e la terra di riferimento non deve superare in qualsivoglia posizione il valore di:
  - 1) per impianti in cavo a cp. simmetriche: 650 Veff
  - 2) per impianti in cavo a cp. coassiali: 2000 Veff
  - 3) per impianti in cavo a fibra ottica: 2000 Veff.

In presenza di telealimentazione in corrente continua su alcuni conduttori dell'impianto di telecomunicazione, i valori ammissibili sono adeguatamente diminuiti in modo tale che la somma aritmetica del valore di picco della tensione indotta verso terra ammissibile per quei conduttori e del valore della tensione verso terra dovuta alla telealimentazione sia inferiore ai valori indicati in 1) e 2) moltiplicati per 1,41.

La tensione tra due elementi conduttori qualsivoglia dell'impianto di telecomunicazione, in una qualsiasi posizione, non deve superare il valore di tenuta dell'isolante interposto fra gli elementi: il suddetto valore non può comunque essere inferiore a 430 Veff.

b) In condizione di guasto della linea elettrica di durata  $> 1$  s, i valori ammissibili sono i seguenti:

- la tensione tra un elemento conduttore dell'impianto di telecomunicazione e la terra di riferimento non deve superare in qualsivoglia posizione il valore di 150 Veff;
- la tensione tra due elementi conduttori qualsivoglia dell'impianto di telecomunicazione, in una qualsiasi posizione, non deve superare il valore di 150 Veff.

c) Nelle condizioni ordinarie di esercizio, la tensione (valore efficace) causata dall'interferenza non deve eccedere 150 V, sia come tensione tra un elemento conduttore dell'impianto di telecomunicazione e la terra di riferimento, sia come tensione tra due elementi conduttori qualsivoglia dell'impianto di telecomunicazione.

### **2.2.3 Valori ammissibili in casi speciali**

I valori ammissibili di cui ai paragrafi 2.2.1 (§2.1.02 della norma CEI 103-6) e 2.2.2 (§2.1.03 della norma CEI 103-6) possono essere superati in casi eccezionali quando uno studio approfondito della situazione di interferenza (calcoli, misure) mostri l'impossibilità pratica del loro rispetto.

Nei casi in cui i valori che si decide di accettare siano superiori a quelli indicati al §2.1.02, debbono essere adottate norme di esercizio particolari, tali che il pericolo di danno per le persone non risulti aumentato.

### **2.2.4 Applicazione dei limiti**

Circa l'applicazione dei limiti, si sottolineano i seguenti aspetti.

- I limiti si applicano all'interferenza totale.  
Pertanto quando esistono più linee elettriche inducenti, i limiti di interferenza per la situazione di funzionamento normale devono essere confrontati con la tensione indotta totale, opportunamente calcolata a partire dalle tensioni indotte da ciascuna linea elettrica.  
I limiti di interferenza per la situazione di guasto monofase a terra devono essere invece confrontati con le tensioni indotte da ciascuna linea, in quanto si suppone che la probabilità di guasto contemporaneo delle linee inducenti sia estremamente bassa o, in altri termini, che una sola linea inducente alla volta sia in condizioni di guasto.
- I limiti relativi al pericolo per le persone si applicano a tutti i punti della linea di telecomunicazione con l'ipotesi che codeste persone indossino vestiario comune e non dispongano di dispositivi di protezione individuale contro le tensioni (ad esempio guanti isolanti).
- I limiti relativi al danno alla linea di telecomunicazione si applicano a qualsivoglia posizione lungo la linea.

### **2.2.5 Condizioni dell'impianto inducente**

In generale, le condizioni di impianto elettrico inducente per le quali si possono verificare i fenomeni di interferenza sono:

1. la condizione di funzionamento normale;
2. la condizione di guasto monofase a terra.

Per entrambe le suddette condizioni la Norma, nei casi applicabili, indica di prendere in considerazione situazioni ragionevolmente cautelative ai fini dell'interferenza elettromagnetica.

In condizione di funzionamento normale si dovrebbe considerare la massima corrente di esercizio ragionevolmente prevedibile e, se lo squilibrio di carico tra le fasi può giocare un ruolo significativo, anche per tale parametro si assume il valore massimo ragionevolmente prevedibile.

Per la condizione di guasto monofase a terra si utilizzano i valori di corto circuito massimi (ipotizzando che la rete elettrica sia completamente magliata ed alimentata ad una tensione pari al 110 % della tensione nominale). Si suppone inoltre che la posizione del guasto sia quella che dà luogo ai valori più elevati dei risultati dell'interferenza.

D'altra parte, la Norma CEI 103-6 specifica, per la tipologia di problematiche in oggetto, la sola condizione che è necessario considerare per eseguire uno studio di interferenza sugli effetti prodotti alle linee di telecomunicazione dall'induzione elettromagnetica provocata da linee elettriche vicine è quella di guasto.

In particolare, l'ipotesi di guasto da considerare per eseguire lo studio è il cortocircuito tra una fase della linea elettrica e la terra.

Per la resistenza di guasto si assumono, ai sensi della norma, i seguenti valori:

- guasto in stazione:  $0 \Omega$
- guasto in linea, con linea provvista di funi di guardia:  $15 \Omega$
- guasto in linea, con linea non provvista di funi di guardia:  $50 \Omega$

La posizione del guasto da considerare è quella corrispondente all'estremo dell'avvicinamento dove è maggiore la corrente di guasto.

### 3 METODO ED ALGORITMI DI CALCOLO

Le tensioni e le correnti indotte a frequenza fondamentale sono calcolate utilizzando gli algoritmi raccomandati dalle Direttive della International Communication Union (ITU)<sup>2</sup>. In particolare, il software utilizzato per i calcoli, sviluppato in ambiente Matlab™, si avvale del metodo multiconduttore che permette di studiare circuiti elettrici accoppiati, costituiti ciascuno da un conduttore con ritorno a terra (Vol. III Cap. III, IV e V delle Direttive ITU).

**Nota:** Si è ritenuto opportuno utilizzare una procedura generalizzata multiconduttore, anziché l'approccio semplificato indicato nella Norma CEI 103-6 basato sull'utilizzo di fattori di riduzione opportunamente tarati per tener conto dei molteplici fenomeni schermanti che possono esserci, stante la particolare composizione e configurazione degli impianto indotto, costituito da un numero imprecisato di cavi di telecomunicazione, segnalamento e di potenza con differenti modalità di messa a terra degli schermi e armature, le quali possono essere collegate o meno lungo il percorso ad un collettore di terra e ai binari.

Nelle linee di trasmissione dell'energia elettrica, gli accoppiamenti elettromagnetici hanno un notevole effetto sulle grandezze di regime (tensione e corrente) della linea; inoltre possono dar luogo a tensioni e correnti su elementi conduttori che si trovano in prossimità della linea stessa.

Nella valutazione di questi effetti si tiene conto principalmente di tre tipi di accoppiamento:

- 1) Accoppiamento capacitivo, che tiene conto dell'effetto del *campo elettrico*.
- 2) Accoppiamento induttivo, che tiene conto degli effetti legati al *campo magnetico*.
- 3) Accoppiamento conduttivo, che tiene conto del campo di conduzione dovuto alle *correnti nel terreno*.

Questi tre fenomeni possono manifestarsi contemporaneamente anche se nella maggior parte dei casi un tipo di accoppiamento è predominante rispetto agli altri due, permettendo l'adozione di metodi di calcolo semplificati che tengono conto solo di un tipo di accoppiamento.

L'accoppiamento capacitivo è legato all'esistenza di una capacità mutua tra il circuito inducente (costituito dalla linea elettrica con ritorno a terra) ed il circuito indotto. Tale capacità mutua è influente solo nel caso in cui entrambe le opere, inducente e indotta, siano aeree. In questi casi, tramite la capacità mutua, una tensione presente nel circuito inducente tra i conduttori dell'elettrodotta e la terra, produce tensioni e correnti indotte nel circuito indotto costituito dalla linea di telecomunicazione con ritorno a terra.

L'accoppiamento induttivo è legato all'esistenza di una mutua induttanza tra due circuiti elettrici prossimi tra loro: a fronte di un circuito inducente costituito dalla linea elettrica con ritorno a terra, esiste un'induttanza mutua rispetto al circuito indotto, costituito ad esempio da linea di telecomunicazione o tubazione metallica con ritorno a terra. Tale induttanza mutua è presente per tutte le combinazioni possibili di linea elettrica aerea o sotterranea e linea di telecomunicazione / tubazione metallica, siano esse aeree o sotterranee. Tramite tale

---

<sup>2</sup> The International Telegraph and Telephone Consultative Committee (1989): "*Directives concerning the protection of telecommunication lines against harmful effects from electric power and electrified railway lines*".

mutua induttanza, una corrente circolante nel circuito inducente costituito dalla linea elettrica con ritorno a terra (corrente inducente) produce tensioni e correnti indotte nel circuito indotto.

Con riferimento a questo tipo di accoppiamento, la situazione più gravosa è, in generale, quella che corrisponde alla condizione di guasto monofase a terra della linea elettrica, in quanto in questa circostanza la corrente inducente, che circola nel circuito elettrodotto-terra, può raggiungere valori molto elevati (dell'ordine di diversi kA capaci di indurre tensioni massime anche dell'ordine di qualche kV). In condizioni di funzionamento normale della linea elettrica la corrente circolante nel circuito elettrodotto-terra ha invece valori dell'ordine di pochi A (capaci, normalmente, di indurre tensioni massime di pochi V).

L'accoppiamento conduttivo è legato all'esistenza di una conduttanza mutua tra il circuito inducente (costituito dalla linea elettrica con ritorno a terra) ed il circuito indotto: tale conduttanza mutua può esistere esclusivamente nel mezzo conduttivo utilizzato quale ritorno comune dai due circuiti inducente ed indotto, dunque nel terreno. In pratica tale fenomeno può manifestarsi nei casi in cui la linea di telecomunicazione (o la tubazione metallica interrata) transitino in vicinanza di punti in cui vi è circolazione nel terreno di un significativo valore di corrente, tipicamente in vicinanza di un traliccio di una linea elettrica aerea AT o in vicinanza di una sottostazione, in quanto attraverso il dispersore di terra del traliccio o della sottostazione, in condizioni di guasto dissimmetrico, la corrente di guasto fluisce a terra.

Nel presente caso di esteso parallelismo tra linea elettrica e circuiti di telecomunicazione / segnalamento per la trazione ferroviaria, possibili interferenze possono insorgere a causa solo di accoppiamenti di tipo induttivo risultando del tutto trascurabili quelli di tipo capacitivo e conduttivo. In questo studio, comunque, il metodo multiconduttore utilizzato è di completa generalità e tiene conto di tutti e tre tipi di accoppiamento.

Nel seguito è riportata una succinta descrizione del metodo e degli algoritmi di calcolo utilizzati, con qualche dettaglio relativo alla modellazione solo dell'accoppiamento di tipo induttivo essendo gli altri due fenomeni trascurabili in questo caso.

### 3.1 Accoppiamento induttivo

Lo studio degli accoppiamenti induttivi viene fatto sulla base della teoria di Carson per le linee con ritorno nel terreno che permette di determinare i valori dell'auto e della mutua impedenza di ciascun conduttore. A seconda del tipo di linea da studiare è possibile introdurre alcune approssimazioni che consistono nell'assumere le seguenti ipotesi valide nella maggior parte dei casi pratici:

- 1) La linea elettrica è orizzontale e segue una linea retta di lunghezza infinita nella stessa direzione in cui scorre la corrente.
- 2) Le linee di cui vengono calcolate le mutue induttanze sono parallele tra loro.
- 3) Il terreno è omogeneo, con resistenza finita e permeabilità magnetica relativa  $\mu_r = 1$ .

Inoltre, la corrente nel terreno scorre nella stessa direzione della linea. In alcuni casi specifici non possono essere assunte tali ipotesi e le relazioni per il calcolo delle auto e mutue induttanze vanno modificate con metodi appropriati. Gli effetti che possono farsi sentire sono dovuti a:

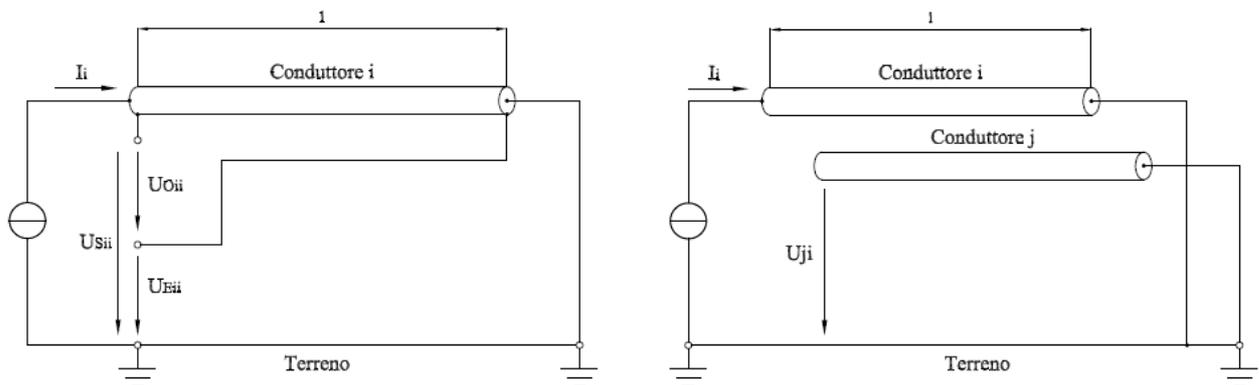
- 1) Linee di lunghezza finita: nel caso di linee relativamente corte si fa sentire il cosiddetto "end effect", dovuto alla concentrazione della corrente di terra in prossimità degli elettrodi di terra.
- 2) Esposizione obliqua o incroci di linee: se ne tiene conto utilizzando speciali espressioni.
- 3) Effetto della stratificazione del terreno. Spesso il terreno non è omogeneo. Numerose sperimentazioni hanno mostrato che anche in regioni dove il terreno è composto da più di 2 strati di differente natura è possibile determinare una resistività equivalente.

Nella trattazione seguente comunque non verranno esaminati questi casi specifici.

### 3.1.1 Auto e mutua impedenza. Formule di Carson

Le equazioni per il calcolo dell'auto e mutua induttanza derivano dall'applicazione della teoria di Carson e sono valide per i sistemi multiconduttore con ritorno nel terreno.

Per la determinazione dell'auto e della mutua impedenza si fa riferimento ai simboli richiamati in Figura 3.1. I conduttori vengono considerati omogenei lungo la lunghezza considerata.



**Figura 3.1** (a) Grandezze per il calcolo dell'autoimpedenza (b) Grandezze per il calcolo delle mutue impedenze

In base alla teoria del Carson, l'impedenza interna può essere calcolata come:

$$Z_{oi} = \left( R_i + j 2 \cdot 10^{-4} \omega \frac{\mu_r}{4} \right), [\Omega/km] \quad (1)$$

Mentre la parte esterna dell'autoimpedenza è data da

$$Z_{Ei} = j \omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln 2 \frac{h_i}{r} + 2(\Delta R_{ii} + j \Delta X_{ii}) \quad (2)$$

e la mutua impedenza vale:

$$Z_{ij} = j \omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{ij}}{d_{ij}} + 2(\Delta R_{ij} + j \Delta X_{ij}) \quad (3)$$

dove:

$D_{ij}$  : è la distanza tra l'i-esimo e immagine del j-esimo conduttore (in [m]);

$d_{ij}$  : è la distanza tra l'i-esimo e il j-esimo conduttore (in [m]);

$h_i$  : è l'altezza del conduttore dal terreno (in [m]);

$R_i$  : è la resistenza in DC del conduttore (in [ $\Omega/km$ ]);

$\mu_0$ : è la permeabilità del vuoto ( $4\pi \cdot 10^{-4}$  [H/km])  
 $\Delta R_{ii}$ ,  $\Delta X_{ii}$ ,  $\Delta R_{ij}$ ,  $\Delta X_{ij}$ : sono termini correttivi.

I primi due termini danno l'impedenza nel caso in cui il terreno abbia resistenza nulla, mentre i termini tra parentesi sono delle correzioni che tengono conto della resistività del terreno e che in alcuni casi danno valori maggiori del primo termine. Nelle formule originali di Carson i termini correttivi sono dati sotto forma di integrali infiniti. Per valutare questi integrali si può ricorrere all'integrazione numerica, ma risulta difficile anche se si usano calcolatori. Un modo differente per avere un'espressione approssimata è quella di ricorrere agli sviluppi in serie; generalmente si adotta questa soluzione, perché facilmente implementabile sui calcolatori. Le espressioni di tali serie sono riportate in diversi testi.

### 3.1.2 Formule di Carson-Clem

Le serie per la determinazione dei termini correttivi delle formule di Carson, nonostante risultino più semplici rispetto al calcolo degli integrali, richiedono comunque una procedura elaborata. Sono state quindi studiate delle formule che consentono di determinare le auto e mutue impedenze in modo più semplice. Queste equazioni semplificate, che prendono il nome di "Formule di Carson-Clem", contengono solamente il primo termine della serie per la determinazione di  $\Delta R$  e i primi due termini per la determinazione di  $\Delta X$ . Inoltre si omettono i termini logaritmici in quanto risultano trascurabili. L'autoimpedenza risulta quindi:

$$Z_{ii} = R_i + \pi^2 \cdot 10^{-4} \cdot f + j\omega 2 \cdot 10^{-4} \ln\left(\frac{D_e}{r_i}\right) \left[\frac{\Omega}{km}\right] \quad (4)$$

e la mutua impedenza:

$$Z_{ij} = R_{earth} + j \cdot \omega \cdot 2 \cdot 10^{-4} \ln\left(\frac{D_e}{d_{ij}}\right) \left[\frac{\Omega}{km}\right] \quad (5)$$

dove:

$R_i$ : è la resistenza chilometrica del conduttore, espressa in [ $\Omega/km$ ];

$R_{earth}$ : è la resistenza del conduttore equivalente di ritorno nel terreno, calcolata come

$$R_{earth} = \pi^2 \cdot f \cdot 10^{-4} \left[\frac{\Omega}{km}\right] \quad (6)$$

$f$ : è la frequenza della corrente che percorre i conduttori [Hz];

$r_i$ : è il raggio del conduttore considerato;

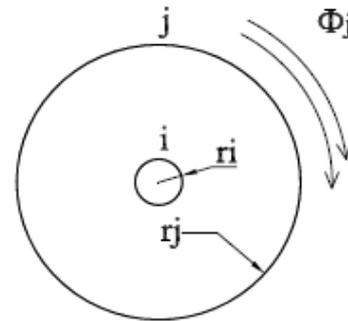
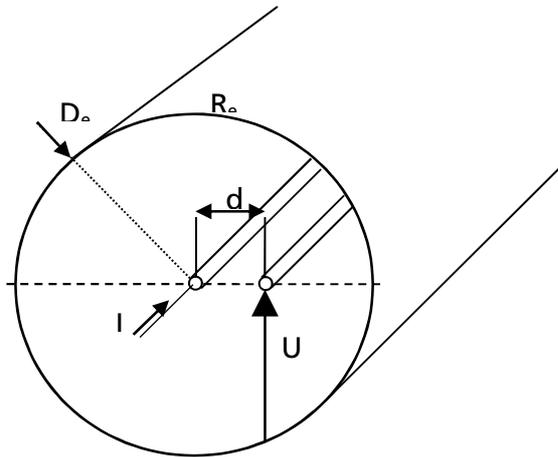
$D_e$ : è la distanza dei conduttori dal baricentro delle correnti che ritornano nel terreno valutata secondo la formula:

$$D_e = 659 \sqrt{\frac{\rho}{f}}, [m] \quad (7)$$

$d_{ij}$ : è la distanza tra l'asse del conduttore i-esimo rispetto al conduttore j-esimo nel caso di conduttori paralleli (vedi Figura 3.2), mentre, in accordo con la formulazione di Hochrainer, corrisponde al raggio interno del conduttore esterno nel caso di conduttori concentrici (Figura 3.3), quali ad esempio i cavi schermati.

La rappresentazione del conduttore equivalente è illustrata in Figura 3.2

Queste espressioni possono essere applicate quando la distanza tra i conduttori risulta inferiore del 15% della "distanza equivalente del ritorno nel terreno"  $D_e$ . Si dimostra che, se questa condizione viene rispettata, l'errore commesso nella determinazione delle impedenze risulta inferiore al 2.5%.



**Figura 3.2** Conduttore equivalente di ritorno nel terreno. **Figura 3.3** Conduttori cilindrici concentrici.

### 3.2 Determinazioni delle tensioni e correnti in linea

Le linee di trasmissione dell'energia elettrica formano un sistema multiconduttore. L'accoppiamento tra conduttori viene simulato da elementi longitudinali e trasversali che rappresentano le cause degli accoppiamenti. La soluzione per la determinazione delle tensioni e correnti in linea si basa su un adeguato:

- a) Modello di circuito (circuito equivalente);
- b) Formulazione matematica (equazione del circuito);
- c) Tecniche di risoluzione (algoritmi delle soluzioni e implementazioni su computer).

Il metodo applicato è il "Multiconductor Line Solution" (o sistema multiconduttore) che può essere utilizzato sfruttando due diverse modellizzazioni:

- 1) a parametri distribuiti;
- 2) a parametri concentrati.

Dal punto di vista teorico e matematico la prima è la migliore. La soluzione viene calcolata risolvendo un sistema di equazioni differenziali del primo ordine con condizioni al contorno (che rappresentano carichi o generatori inseriti nella linea).

La seconda soluzione è meno matematica e più fisica rispetto la precedente. Infatti si ottiene partendo dalle leggi di Ohm applicate al circuito equivalente, nel quale le sezioni della linea sono descritte da parametri concentrati. La precisione di questo metodo dipende solo dai parametri utilizzati mentre l'algoritmo non introduce errori.

Nello studio effettuato, si è utilizzato il modello a parametri concentrati.

### 3.2.1 Modello a parametri concentrati

Questo modello consiste nel suddividere l'intera linea in n celle (vedi Figura 3.3). Per ognuna di queste celle viene calcolata la matrice delle ammettenze, considerando il modello equivalente a pi greco illustrato in Figura 3.4.

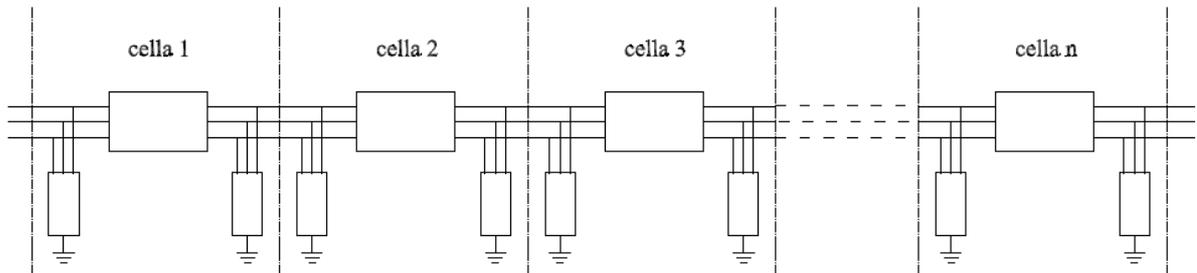


Figura 3.3: Suddivisione della linea in celle.

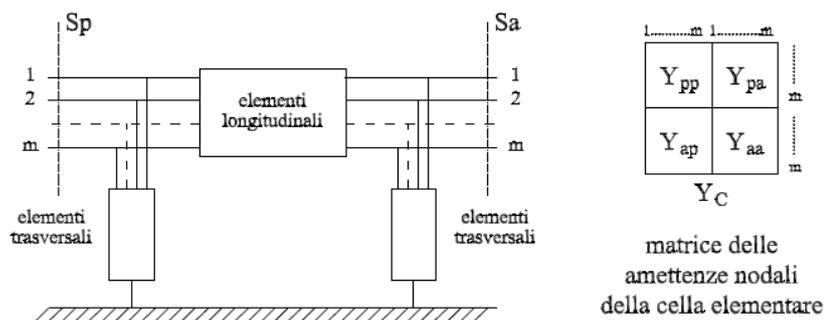


Figura 3.4: Rappresentazione a pi greco della cella.

La determinazione della matrice delle ammettenze della cella, viene calcolata considerando separatamente il contributo degli elementi longitudinali e degli elementi trasversali.

### 3.2.2 Calcolo del regime della linea

Tenendo conto delle matrici delle ammettenze di linea e degli elementi concentrati, è possibile determinare la matrice delle ammettenze dell'intera rete Y. A questo punto diventa semplice ricavare le grandezze (tensioni e correnti) in corrispondenza delle varie sezioni; infatti la rete viene descritta dal sistema lineare:

$$[I] = [Y][E] \tag{8}$$

dove:

- I: è il vettore delle correnti imposte;
- E: è il vettore delle tensioni imposte.

Innanzitutto il vettore delle tensioni può essere suddiviso in due parti:  $E_k$  che rappresenta le tensioni imposte dai generatori ("known") e  $E_u$  che è il vettore contenente le tensioni incognite ("unknown"). Il sistema può quindi essere scritto come:

$$\begin{bmatrix} I_k \\ I_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{kk} & Y_{ku} \\ Y_{uk} & Y_{uu} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_k \\ E_u \end{bmatrix} \quad (9)$$

Le tensioni incognite possono essere determinate con la seguente espressione:

$$[E_u] = [Y_{uu}]^{-1} \{ [I_u] - [Y_{uk}] [E_k] \} \quad (10)$$

È noto che il vettore  $I_u$  è uguale a zero perché la matrice  $Y$  rappresenta l'intera rete passiva, compresi i carichi. A questo punto, assumendo come matrice delle ammettenze nodali la matrice  $Y_0$  che rappresenta la rete senza carichi, è possibile valutare le correnti nella sezione di arrivo con la seguente espressione:

$$[I] = [Y_0] [E] \quad (11)$$

Con i procedimenti sopra esposti è possibile quindi determinare le tensioni e le correnti in un sistema multiconduttore, note che siano le caratteristiche fisiche e geometriche dei conduttori e la loro disposizione nello spazio.

Il sistema multiconduttore può rappresentare linee con un numero qualsiasi di conduttori; possono essere considerati parte del sistema anche elementi conduttori "passivi" non facenti parte della linea di trasmissione, come ad esempio funi di guardia, tubature idrauliche, rotaie, linee di telecomunicazione.

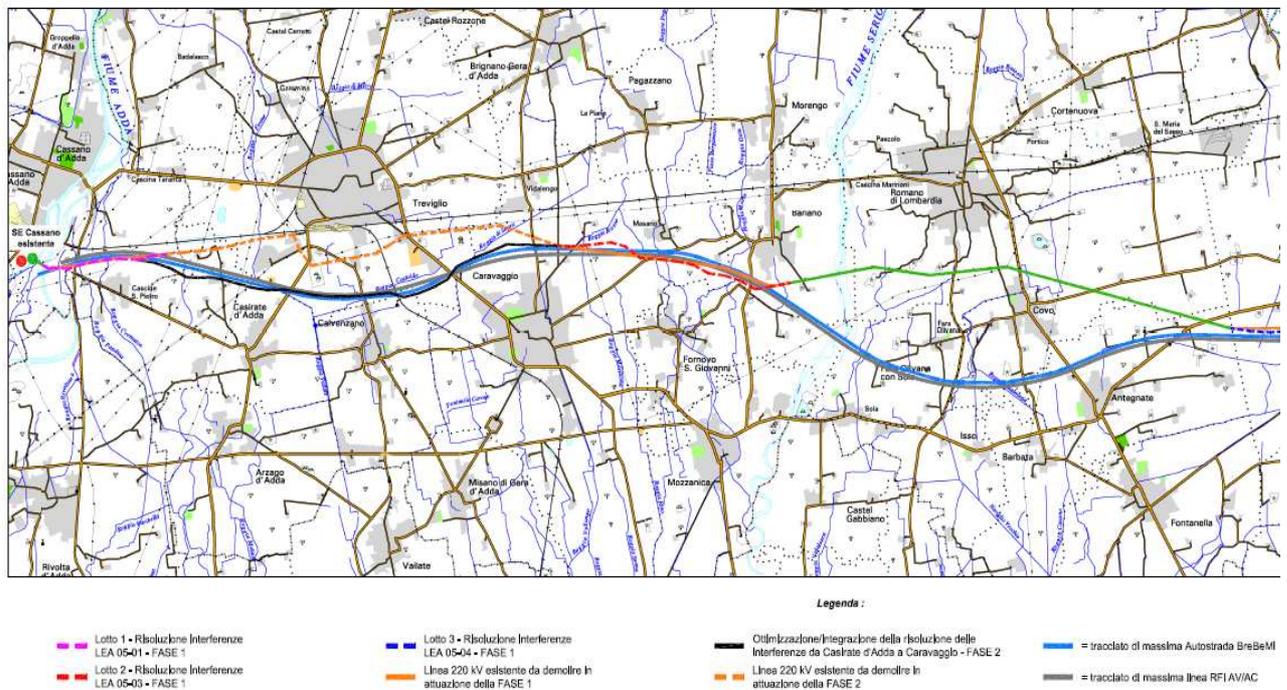
Il Multiconductor Line Solution viene spesso utilizzato proprio per calcolare tensioni e correnti su questi elementi, in modo da verificare se gli accoppiamenti elettromagnetici introducono situazioni di pericolo per le persone o per le apparecchiature. Nella letteratura tecnica si possono trovare diversi testi che descrivono in modo approfondito questi problemi, oltre che i disturbi introdotti dagli accoppiamenti elettromagnetici sulle linee di telecomunicazione.

## 4 TRACCIATI DEGLI IMPIANTI INTERFERENTE ED INTERFERITO

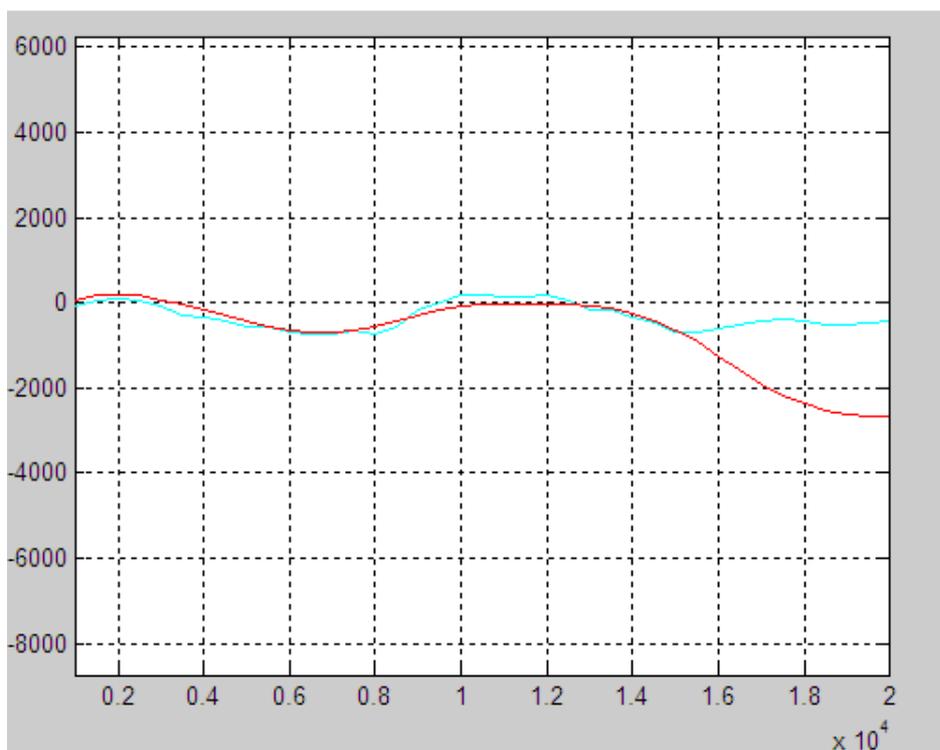
In prima analisi, si è proceduto a creare un modello equivalente sufficientemente dettagliato dei tracciati dei due impianti interferente ed interferito, necessario per la valutazione numerica delle interferenze.

In Figura 4.1 è riportato un estratto della corografia fornitaci in formato Autocad™, dalla quale sono stati estratti i primi 20 km dei tracciati della linea ferroviaria AV e della variante dell'elettrodotto AT in progetto; le informazioni digitalizzate del percorso dei due tracciati, elemento fondamentale per il calcolo delle interferenze, sono state quindi importate nel programma di calcolo come rappresentato nella a pagina successiva in Figura 4.2.

**COROGRAFIA Tracciato linea L-18 "S.E. Cassano - S.E. Ric.Ovest Brescia" con risoluzione**

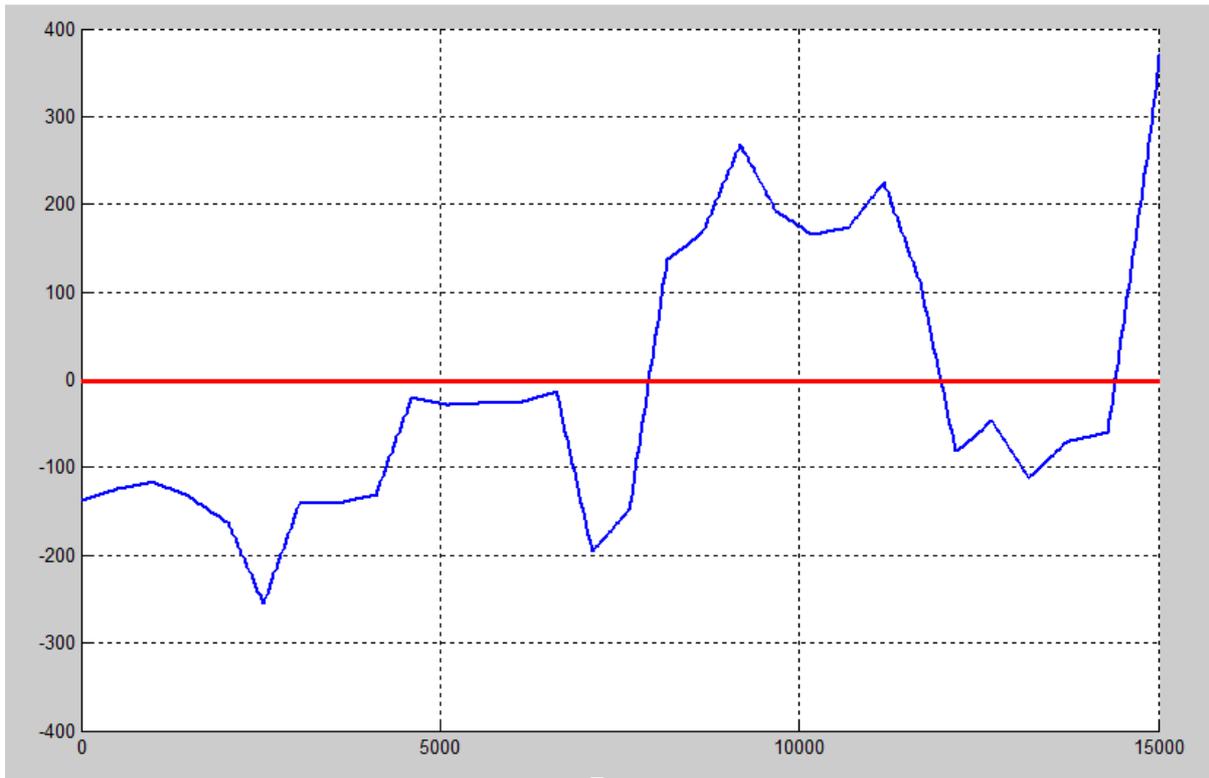


**Figura 4.1:** Corografia dell'area di interesse.



**Figura 4.2:** rappresentazione schematica dei tracciati dell'elettrodotta (in colore azzurro) e della linea A.V. (in colore rosso)

Per poter procedere ad una modellizzazione utile per i calcoli di interferenza, successivamente è stata effettuata una opportuna linearizzazione del tracciato della linea ferroviaria AV di Figura 4.2, rappresentando quindi il percorso dell'elettrodotta AT inducente riferito al tracciato linearizzato AV, ottenendo il sistema di Figura 4.3. In questa maniera le ordinate (curva blu rappresentante la linea AT) corrispondono, in ciascuna sezione, alla distanza mutua tra i due tracciati.



**Figura 4.3:** rappresentazione della linearizzazione dei tracciati dell'elettrodotto (in colore blue) e della linea A.V. (in colore rosso)

Infine, per il modello di calcolo si è ritenuto sufficientemente significativo rappresentare la linea AT con una spezzata di circa 30 segmenti, per una lunghezza di parallelismo (misurata lungo la linea ferroviaria AV) di circa 15 km (oltre i quali la distanza della linea inducente dalla linea ferroviaria è tale da rendere ininfluente l'interferenza).

I punti principali della spezzata sono riportati nella Tabella 4.1 sottostante, dalla quale si può facilmente ricavare che nei 15 km di parallelismo i tracciati si possono avvicinare a distanze comprese tra 15 e 250 metri, con una distanza media di circa 145 metri.

**Tabella 4.1:** distanze tra il tracciato AV e l'elettrodotto Terna nei punti principali.

Nodo	Ascissa (m)	Ordinata(m)
1	0	-138
2	1010	-117
3	2535	-256
4	4598	-21
5	6610	-15
6	7635	-147
7	8152	137
8	9177	268
8	10179	165
10	11179	226
11	12180	-81
12	14271	-61
13	15447	647

## 5 DATI TECNICI DEGLI IMPIANTI INTERFERENTE ED INTERFERITO

### 5.1 Impianto interferente: Elettrodotto AT

L'impianto inducente è la variante dell' elettrodotto di TERNA denominato L-18 a 380 kV tra Cassano St. e Chiari, lunghezza 35,5 km.

#### Caratteristiche generali e geometriche dell'elettrodotto

- tipologia della linea: sostegni doppia terna monostelo;
- numero dei conduttori per ciascuna fase: fascio trinato di conduttori con diametro  $\varnothing$  31,5 mm (vedi RQUT0000C2\_01);
- numero delle funi di guardia. N. 1 fune di guardia da  $\varnothing$  17,9 mm (vedi UX LC60\_00);

#### Caratteristiche elettriche:

- tensione nominale della linea: 380 kV
- corrente in condizioni di funzionamento normale: 2310 A (CEI 11-60<sup>3</sup>) per ciascuna fase;
- corrente inducente in condizioni di guasto (corto circuito per guasto a terra monofase): vedi Tabella 5.1.

Le correnti di guasto a terra, forniti dal gestore della linea elettrica e calcolati ipotizzando una resistenza del guasto pari a 15 ohm lungo linea, presentano i valori riportati in Tabella 5.15.1. Durata del guasto < 0,5 s.

**Tabella 5.1:** valore delle correnti di corto circuito monofase per guasto lungo la linea.

#### Corto Circuito Lungo Linea: (\*) CASSANO St. - CHIARI a 380 kV

Parametri della linea:						
km	Rd ( $\Omega$ )	Xd ( $\Omega$ )	Bd ( $\mu S$ )	RO ( $\Omega$ )	XO ( $\Omega$ )	BO ( $\mu S$ )
35,50	0,369	5,269	288,00	6,110	28,600	97,00
Primi 31 km da Cassano, linea in trinato AA585 ammazzettato, per i restanti 4,5 km in trinato AA585 semplice						

caso 1: Situazione di Rete correnti massime  $R_g = 15 \Omega$

Distanza da Cassano punto	[km]	Per guasto MONOFASE			CORRENTE 3FO			Per guasto TRIFASE		
		TOTALE [kA]	Da Cassano [kA]	Da Chiari [kA]	TOTALE [kA]	Cassano [kA]	Da Chiari [kA]	TOTALE [kA]	da Cassano [kA]	da Chiari [kA]
1	2,7	14,03	9,97	4,06	14,03	11,23	2,80	14,81	9,86	4,95
2	5,8	13,74	9,24	4,50	13,74	10,32	3,43	14,76	9,36	5,40
3	8,0	13,57	8,78	4,80	13,57	9,73	3,85	14,73	9,01	5,72
4	11,7	13,36	8,07	5,29	13,36	8,82	4,54	14,69	8,46	6,23
5	16,7	13,17	7,18	5,99	13,17	7,67	5,50	14,66	7,71	6,94
6	25,6	13,13	5,79	7,34	13,13	5,84	7,29	14,67	6,44	8,23
7	31,3	13,30	4,98	8,32	13,30	4,76	8,55	14,72	5,64	9,09

<sup>3</sup> Norma CEI 11-60 (2002): "Portata al limite termico delle linee elettriche aeree esterne con tensione maggiore di 100 kV". Fascicolo 6507.

La Norma CEI 103-6 indica che la situazione di guasto da considerare è il corto circuito tra una fase della linea elettrica e terra, mentre la posizione del guasto da considerare per lo studio dell'interferenza elettromagnetica è quella corrispondente all'estremo dell'avvicinamento dove è maggiore la corrente di guasto. Nel rispetto dei dettami della Norma, nel presente studio si sono adottate le seguenti ipotesi cautelative relativamente al circuito inducente:

- 1) **Come circuito inducente, si è considerato in condizioni di corto circuito a terra la fase più bassa, posta ad una altezza dal terreno di 20 m.**
- 2) **Posizione del guasto:** come si evince dalla Tabella 5.1, le correnti inducenti variano a seconda della posizione del punto di guasto. Per la scelta della condizione di guasto peggiore (non nota a priori), i calcoli sono stati eseguiti in un certo numero di sezioni a distanze crescenti (tra 1 e 15 km) considerando le correnti alimentanti il guasto provenienti dalle due estremità, estrapolate dalla Tabella 5.1, come da Tabella 5.2 sottostante.

**Tabella 5.2:** sezioni di guasto e corrispondenti correnti di linea alimentanti il corto circuito monofase.

	Sezione di guasto	Corrente da Cassano	Corrente da Chiari
1	4,5 km	9,3 kA	4,5 kA
2	7 km	8,8 kA	4,8 kA
3	11 km	8 kA	5,3 kA
4	15 km	7,2 kA	6,0 kA

- 3) **Come ulteriore ipotesi cautelativa, non si è considerato alcun effetto mitigante ai fini dell'interferenza dovuto a riduzione della corrente di guasto per la presenza di funi di guardia.**

## 5.2 Linea ferroviaria AV

La linea AV è una linea a doppio binario (Pari e Dispari) per la cui modellizzazione generalmente si rappresenta un sistema a 14 conduttori la cui tipica disposizione, in sezione, è mostrata in Figura 5.1; il feeder, unitamente alla coppia fune portante e filo di contatto, sono i conduttori di alimentazione (posti rispettivamente alla tensione di -25kV e 25kV) mentre rotaie, corde di terra e dispersori (che sono in parallelo elettrico), insieme al terreno, sono i conduttori di ritorno per la corrente.

Poiché il presente studio è focalizzato sulle possibili interferenze agli impianti di telecomunicazione e segnalamento causate dall'elettrodotto AT in condizioni di guasto, per la costruzione del modello degli impianti interferiti si è intenzionalmente trascurata la presenza dei conduttori di alimentazione, mentre particolare attenzione è stata rivolta alla modellizzazione del circuito di ritorno, poiché ad esso sono collegati gli schermi e le armature dei cavi di telecomunicazione e segnalamento.

Per ciascun binario, il circuito di ritorno è costituito dai seguenti conduttori:

- Rotaie
- Conduttore di terra aereo (trefolo ceraunico), sez. 150 mm<sup>2</sup>, in lega di Alluminio
- Dispersore lineare interrato in rame, sez. 95 mm<sup>2</sup>;

I dispersori dei binari pari e dispari vengono collegati tra loro ogni 750 m; inoltre ogni 1500 m circa ciascun dispersore è collegato al proprio binario attraverso una cassa induttiva. Al dispersore lineare, inoltre, sono collegate tutte le masse che rientrano in zona a rischio di tensionabilità.

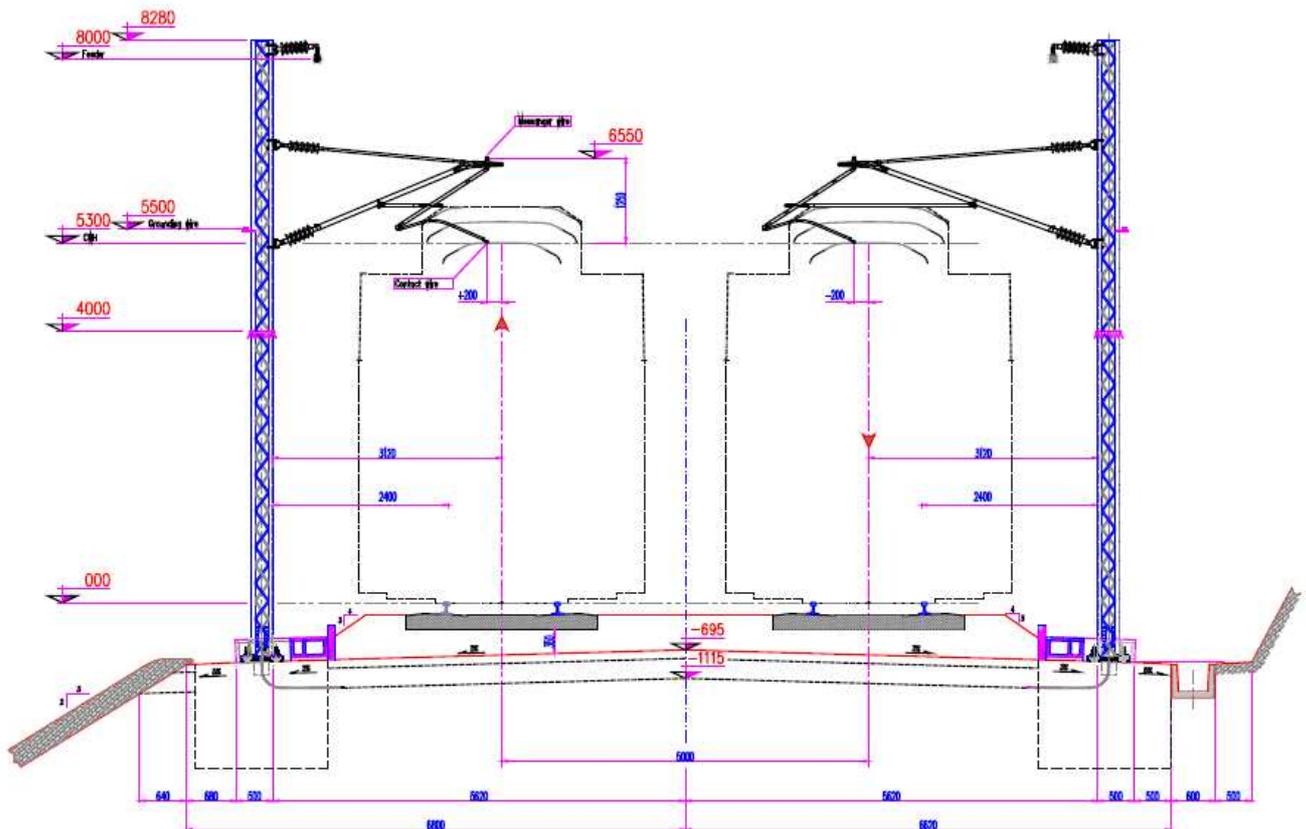


Figura 5.1 Sezione tipo di linea ferroviaria AV

### 5.3 Impianti interferiti della Linea ferroviaria AV

Gli impianti interferiti oggetto di questa analisi sono costituiti dai cavi di telecomunicazione, comando e segnalamento collocati nell'apposita canaletta disposta parallelamente alle rotaie a circa 1,5 m da esse.

Nonostante esistano delle dettagliate specifiche tecniche di riferimento, la tipologia, composizione, modalità di posa e messa a terra degli schermi/armature e lunghezza dei cavi presenti in tale canaletta può essere alquanto variegata lungo il tracciato, dando luogo a condizioni diverse di fattori di schermatura agli effetti dell'induzione elettromagnetica. Ad esempio, maggiore è il numero di cavi, con le armature collegate regolarmente al collettore di terra, maggiore è l'effetto schermante complessivo sui conduttori dei cavi di telecomunicazione e segnalamento.

Allo scopo di considerare un modello, benché conservativo, sufficientemente rappresentativo del sistema reale, è stato richiesto a CEPV2 di definire una configurazione tipica di cavi, con rispettive caratteristiche elettriche e modalità di posa e messa a terra degli schermi/armature, da prendere a riferimento per la realizzazione del modello di impianto interferito.

È stato quindi fornito l'elenco cavi riportato in Tabella 5.3 e, a titolo di esempio, la Figura 5.2 riportante le caratteristiche costruttive di un cavo di TLC da 20 CP in rame, da cui si possono valutare i valori di resistenza di guaina e armatura.

**Tabella 5.3:** elenco cavi, configurazione di riferimento in piena linea.

PIENA LINEA - TABELLA CAVI TIPOLOGICA CANALETTA AV DA PK 29 A PK 42

Denominazione	N° cavi	Formazione	Tipo	Tipo di isolamento	Schermato	Armato	Lunghezza MAX	Schema di collegamento a terra
	singola canaletta						m	
<b>TLC</b>								
CAVO 64 F.O.(66 SMR:8 SMNZD)	1	64 F.O.	EKHBE	politene	SI		10000	np
CAVO 50 CP RAME PRINCIPALE	1	50 CP	AENE	polietilene espanso FOAM SKIN	SI	SI	10000	armatura ogni 1000m, guaina AL ogni 2 Km circa
CAVO 20 CP RAME SECONDARIO	1	20 CP	AE	politene compatto	SI		4000	guaina AL ogni 2 Km circa
<b>IS(IS/LF)</b>								
CAVO PER CDB Linea	5	2x2x1,5+2x0,8			SI	SI	5000	spec.A10160CE11SIS0000A69C 6.6.4.2
CAVO PER CDB Linea	1	2x1,5+2x0,8			SI	SI	6000	spec.A10160CE11SIS0000A69C 6.6.4.2
<b>LF</b>								
CAVO PER UAD	1	2X10+1X10PE						
CAVO PER BTS/RTB	1	3X35	RG50NM1	gomma etilenpropilenica alto modulo HEPR Tipo G6	SI	SI	8000	spec.A10160BE11XLP0000N50B (tipico tipo 28kV)
CAVO ALIM RISERVA PFD	1	2X1X70 +1X70 PE				SI	2500	
<b>TE</b>								
CAVO ALIMENTAZ.QTE	1	2X6	FG70H1R	gomma etilenpropilenica	SI	NO	2500	schema del cavo collegato a terra alle estremità ad ogni 1000m circa in corrispondenza dei pali TE
CAVO COMANDO E CONTR.QTE	1	5X1,5	FG70H1R	gomma etilenpropilenica	SI	NO	2500	
CAVO COMANDO E CONTR.QTE	1	12X1,5	FG70H1R	gomma etilenpropilenica	SI	NO	2500	

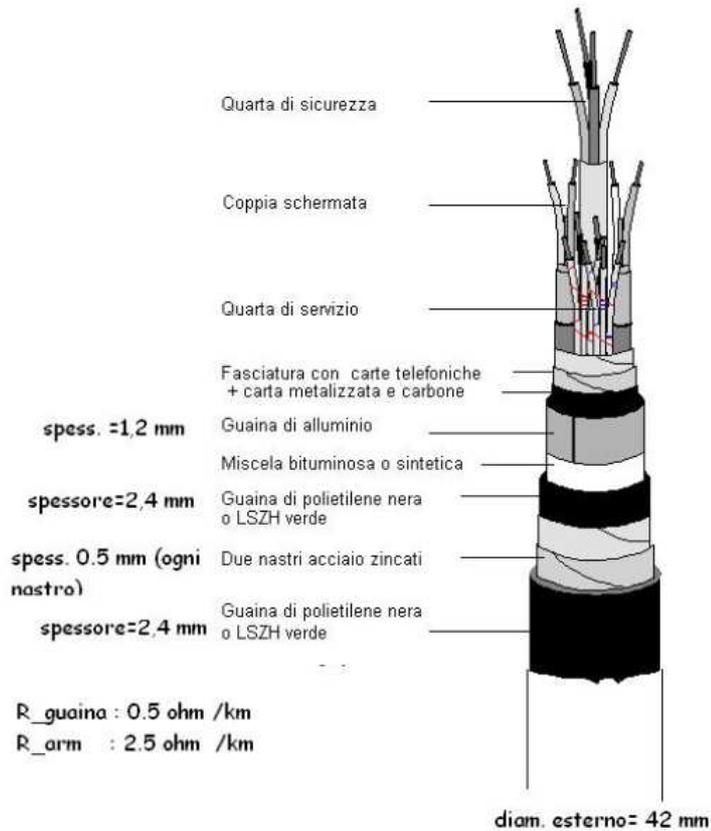
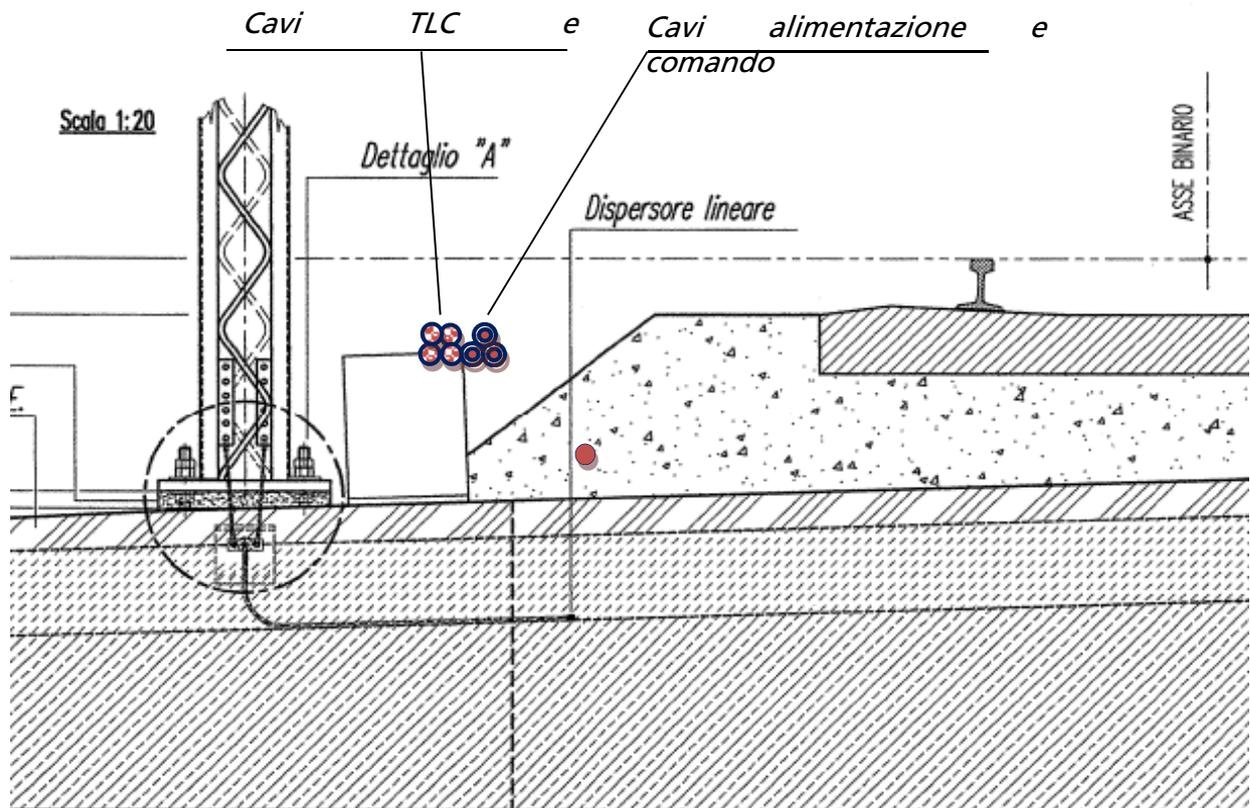


Figura 5.2 esempio cavo per TLC, 20 CP rame.

## 5.4 Modello di impianto interferito

In base alle informazioni ricevute (riguardanti numero e tipo di cavi presenti, modalità di messa a terra delle armature, ecc) e a dati disponibili in letteratura, si è realizzato il modello di riferimento, da considerarsi cautelativo ai fini del calcolo, ma sufficientemente rappresentativo della realtà impiantistica del circuito indotto.



**Figura 5.3** Particolare della sezione tipo di linea ferroviaria AV con indicazione dei circuiti indotti

Il modello, rappresentato in bozza in Figura 5.3, è costituito da:

- **Terreno** di resistività  $100 \Omega\text{m}$
- **Binario**: 2 rotaie in ferro,  $R_{\text{binario}} = 0,6 \Omega/\text{km}$ , conduttanza  $g_{\text{binario}} = 0,5 \text{ S}/\text{km}$
- **Collettore** (dispersore lineare): rame da  $95 \text{ mm}^2$ ,  $R_{\text{coll}} = 0,2 \Omega/\text{km}$ , conduttanza  $g_{\text{coll}} = 5 \text{ S}/\text{km}$ , collegato al binario con passo di circa  $1,5 \text{ km}$ . Il collettore è posizionato ad una distanza di  $1,5 \text{ m}$  dall'asse del binario e a quota  $-0,8$  rispetto al piano del ferro.
- **9 cavi (TLC e segnalamento) + 3 cavi di alimentazione**, aventi le caratteristiche dettagliate nella Tabella 5.4 (si sono trascurati i cavi in fibra ottica poiché gli schermi non risultano connessi a terra). I cavi sono collocati in una trincea posta ad una distanza di  $2,5 \text{ m}$  dall'asse del binario e a quota  $-0,5$  rispetto al piano del ferro.

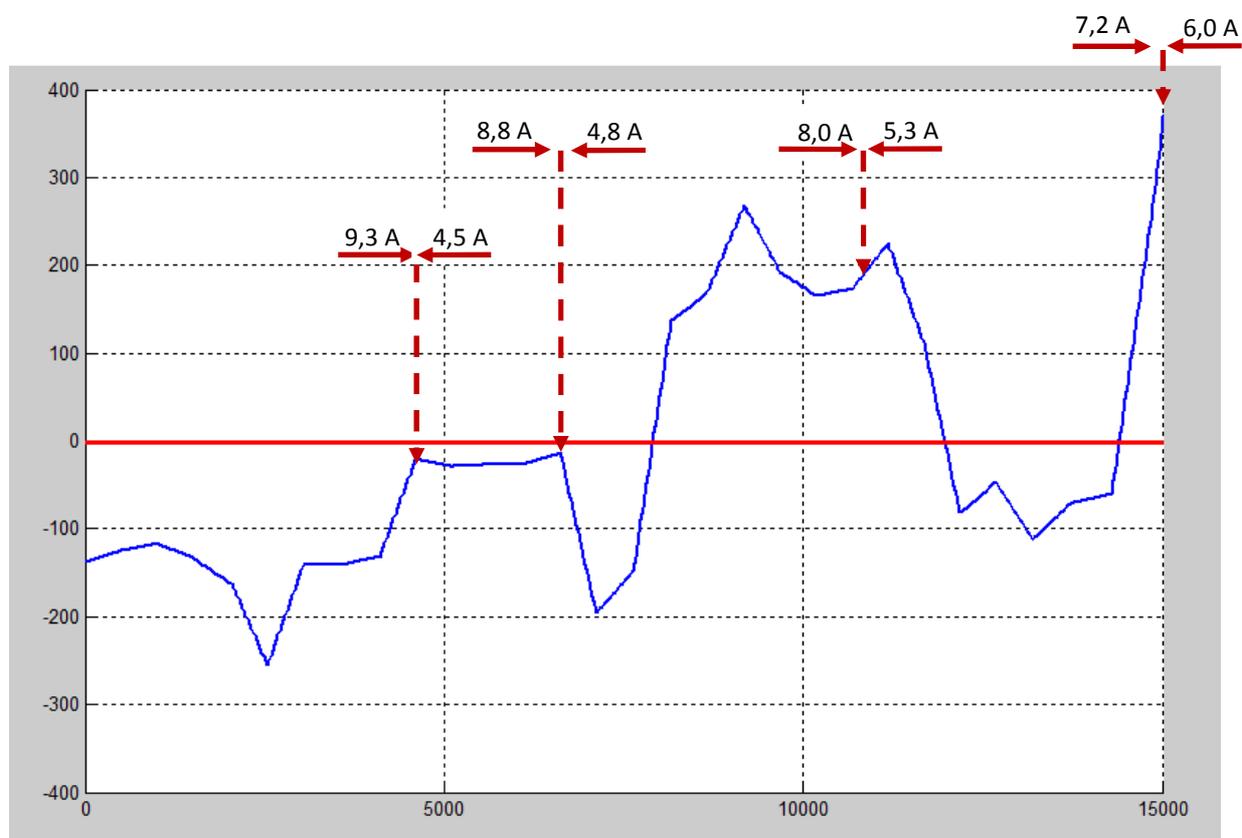
**Tabella 5.4:** caratteristiche dei cavi e modalità messa a terra schermi/armature.

Tipo Cavo	Quantità	Schermo	Armatura
CAVO 50 CP RAME PRINCIPALE	1	guaina AL, R guaina = 0,5 Ω/km a terra ogni 2 Km circa	Armatura , R = 2,5 Ω/km a terra ogni 1 Km circa
CAVO 20 CP RAME SECONDARIO	1	guaina AL, R guaina = 0,5 Ω/km a terra ogni 2 Km circa	
CAVI PER CDB Linea	6	Guaina AL, R guaina = 0,5 Ω/km sezionata e messa a terra ad una estremità ogni 2 km	Armatura , R = 2,5 Ω/km a terra ogni 1 Km circa
CAVO PER BTS/RTB	1	Schermo a nastro d'acciaio, R = 2,5 Ω/km, a terra ogni 1 Km circa	
CAVI alimentazione, comando e controllo	3	schermo del cavo R= = 0,25 Ω/km collegato a terra alle estremità ed ogni 1 km circa	

## 6 RISULTATI DI SIMULAZIONE

Il calcolo della interferenza elettromagnetica è stato condotto valutando, come riferimento, la tensione indotta su uno dei conduttori in rame del cavo per TLC 50 CP principale, considerando una lunghezza del cavo di 20 km e la presenza alle estremità di scaricatori con tensione di innesco di 250 V (considerati intervenuti nell'evento di guasto). I risultati sono validi per qualsiasi altro cavo (tlc o segnalamento) presente nella trincea.

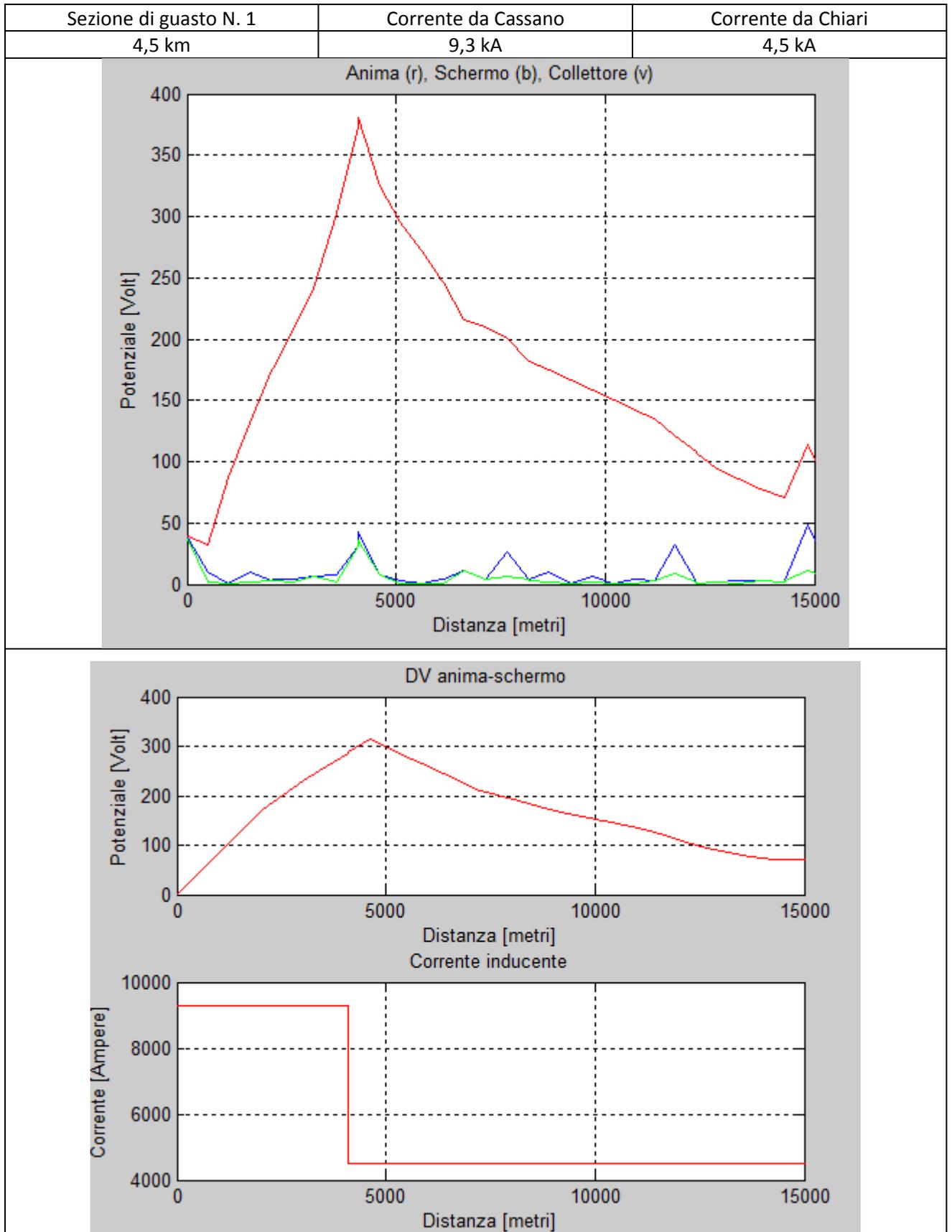
La valutazione dell'interferenza è stata effettuata con la linea elettrica in condizioni di guasto monofase a terra, ipotizzando 4 sezioni di guasto a distanza crescente, alle quali corrispondono le correnti inducenti prima elencate in Tabella 5.2 e riportate nella sottostante Figura 6.1.

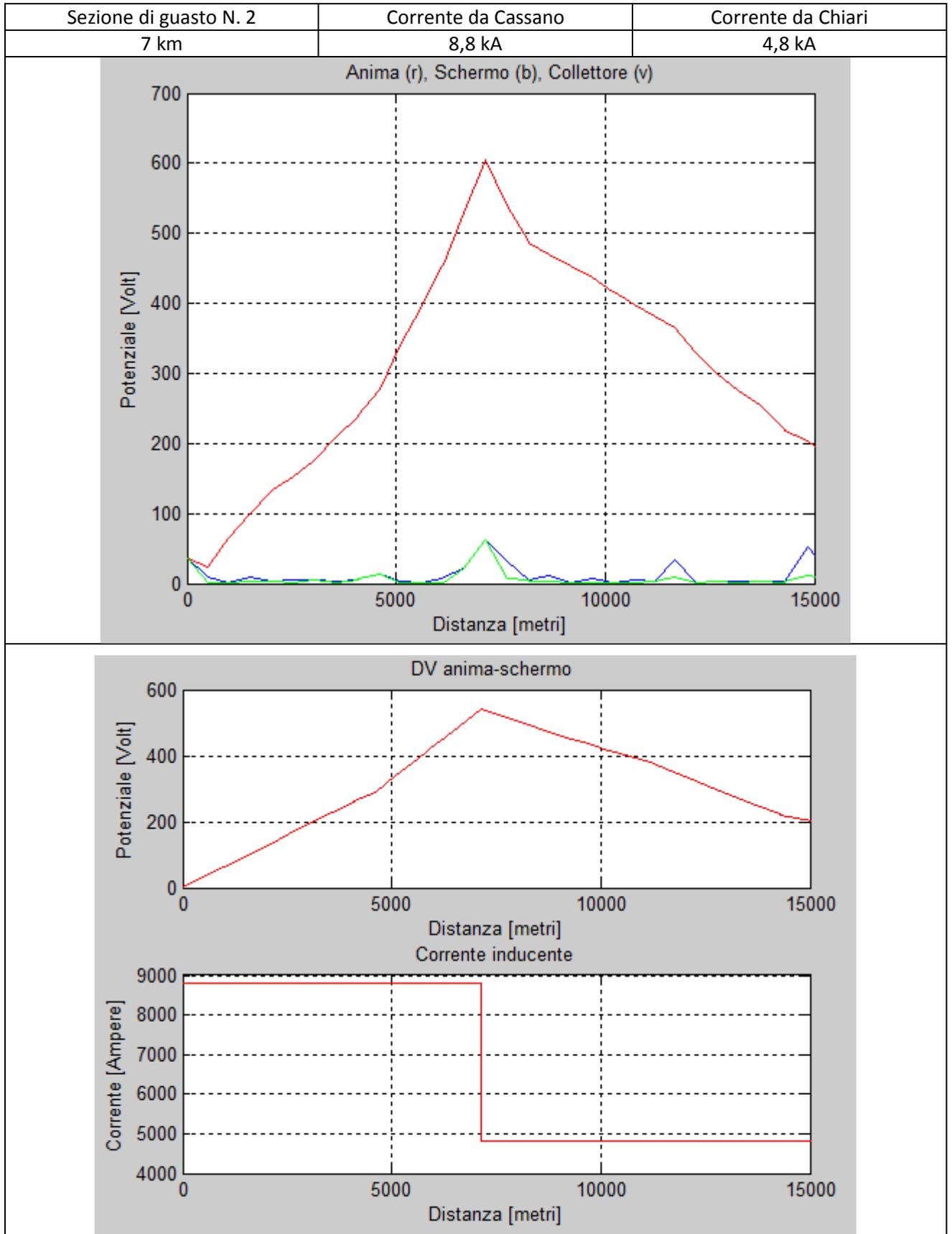


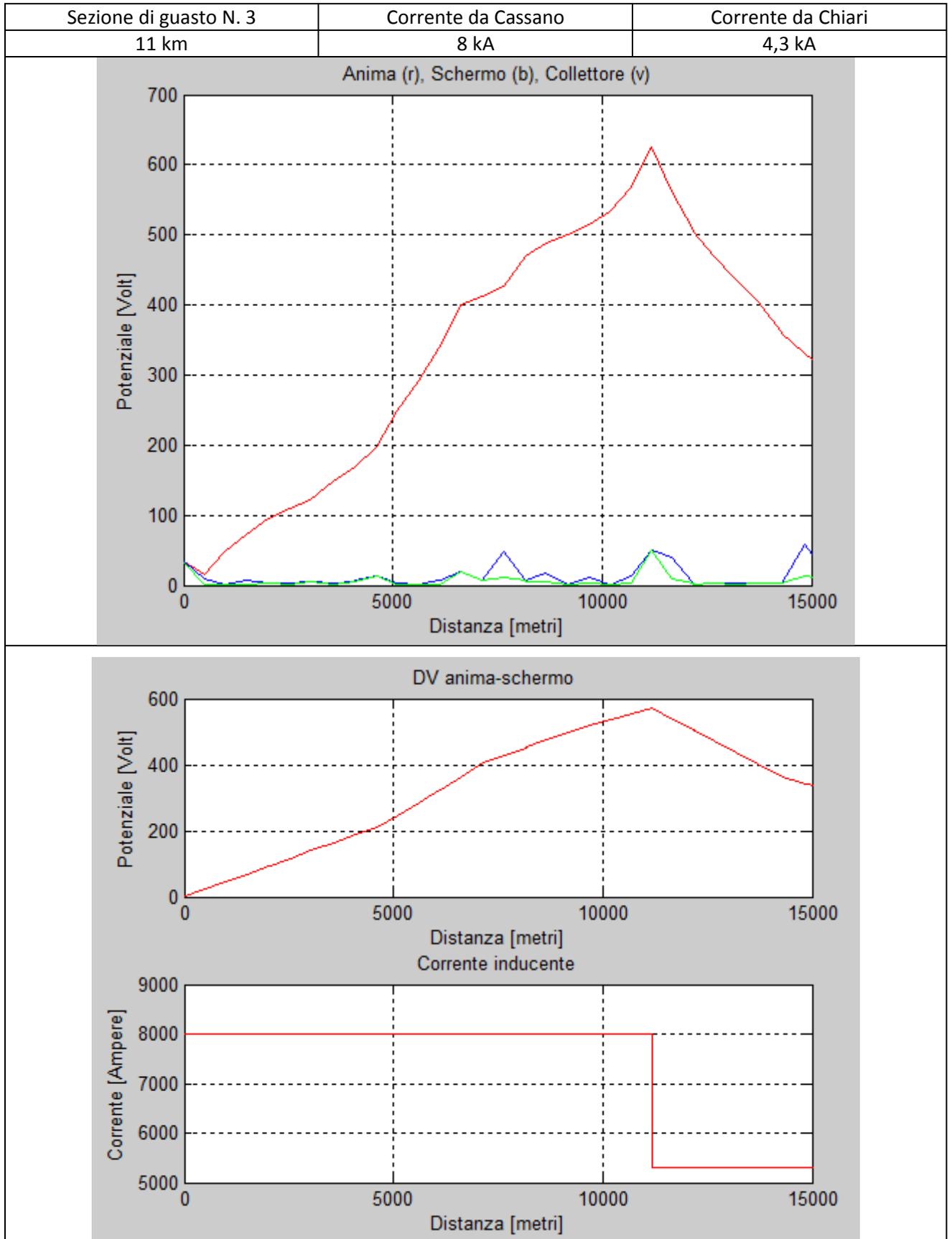
**Figura 6.1** Tracciati linearizzati degli impianti con indicazione delle sezioni di guasto e corrispondenti correnti circolanti sulla linea AT inducente.

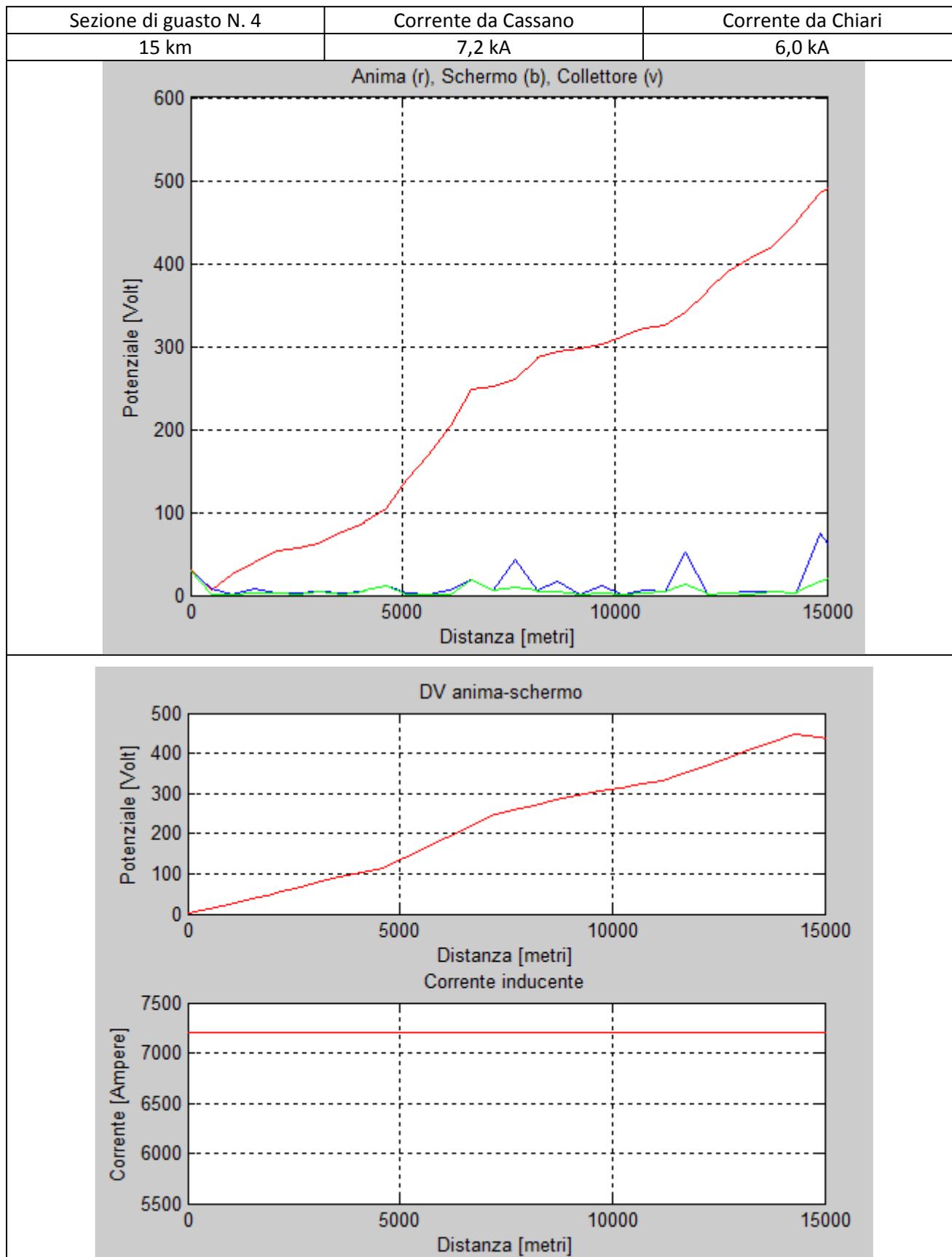
Nelle pagine seguenti sono riportati, per ognuna delle 4 sezioni di guasto considerate, i risultati di calcolo più significativi, rappresentati, per ogni sezione di guasto, dagli andamenti lungo la linea ferroviaria AV di:

- Potenziale assunto dal conduttore di rame del cavo TLC [*Anima (curva rossa)*]
- Potenziale assunto dallo schermo cavo TLC [*Schermo (curva blu)*]
- Potenziale assunto dal dispersore lineare [*Collettore (curva verde)*]
- Differenza di potenziale tra conduttore di rame e schermo [*DV anima-schermo*]
- Ampiezza della corrente alimentante il guasto circolante sulla linea AT [*Corrente inducente*]









**Tabella 5.5:** Tabella riassuntiva dei massimi valori di tensione indotta.

	Sezione di guasto	Corrente da Cassano	Corrente da Chiari	Max Potenziale anima in rame	Max Differenza di Potenziale anima - schermo
1	4,5 km	9,3 kA	4,5 kA	<b>380 V</b>	<b>310 V</b>
2	7 km	8,8 kA	4,8 kA	<b>600 V</b>	<b>550 V</b>
3	11 km	8 kA	5,3 kA	<b>620 V</b>	<b>580 V</b>
4	15 km	7,2 kA	6,0 kA	<b>480 V</b>	<b>450 V</b>

La Tabella 5.5 riassume sinteticamente i valori massimi di tensione indotta calcolati nelle 4 ipotesi di sezione di guasto.

Dal confronto si evince che la situazione peggiore corrisponde al guasto ad una distanza di circa 11 km dalla centrale di Cassano, in corrispondenza al quale si sono valutate:

**massima tensione indotta verso terra di 620 V**  
**massima tensione tra anima e schermo di 580 V**

Ricordiamo che nel caso in esame, relativo ad un impianto inducente costituito da un elettrodotto AAT a 380 kV per il quale la durata del guasto sulla linea elettrica è inferiore a 0,5 s; per escludere danno alle persone il valore della tensione indotta tra un elemento conduttore dell'impianto di telecomunicazione e la terra di riferimento non deve, in qualsiasi posizione, superare il valore di 650 Veff (punto 2.1.02 della norma CEI 103-6).

Per quanto concerne possibili danno all'impianto indotto (punto 2.1.03 della norma CEI 103-6), avendo considerato impianti in cavo a coppie simmetriche, per escludere danno all'impianto TLC, il valore della tensione indotta tra un elemento conduttore dell'impianto TLC e la terra di riferimento non deve superare in qualsiasi posizione il valore di 650 Veff; mentre la tensione in qualsiasi posizione tra due elementi conduttori qualunque dell'impianto TLC, non deve superare la tenuta dell'isolante interposto fra gli elementi, il valore della quale non può essere per Norma inferiore a 430 Veff (dalle informazioni forniteci, i cavi utilizzati hanno tensioni di isolamento tipicamente 0.6/1 kV o superiori).

## 7 CONCLUSIONI

La presente relazione riporta i risultati dell'analisi condotta per la valutazione previsionale dei livelli di interferenza generata dall'elettrodotto AT in progetto "Cassano-Chiari" sugli impianti di telecomunicazione della linea ferroviaria ad A.V. Torino – Venezia nella tratta Milano - Verona, lotto Treviglio – Brescia.

Le tensioni e le correnti indotte sono state calcolate mediante una procedura generalizzata basata sugli algoritmi raccomandati dalle Direttive della International Communication Union (ITU); si è ritenuto opportuno utilizzare una tale procedura generalizzata multiconduttore, anziché l'approccio semplificato indicato nella Norma CEI 103-6 basato sull'utilizzo di fattori di riduzione opportunamente tarati per tener conto dei molteplici fenomeni schermanti che possono esserci, stante la particolare composizione e configurazione degli impianti indotto, costituito da un numero considerevole di cavi di telecomunicazione, segnalamento e di potenza con differenti modalità di messa a terra di guaine e armature, le quali possono essere collegate o meno lungo il percorso ad un collettore di terra e ai binari.

Si è quindi realizzato un modello del sistema sufficientemente rappresentativo della realtà impiantistica e comunque conservativo ai fini della valutazione dei livelli di interferenza elettromagnetica (ciò vale, in particolare, per le correnti inducenti avendo trascurato il contributo di riduzione delle funi di guardia alla corrente di guasto di ritorno attraverso il terreno).

Dai risultati di simulazione si può concludere che, nonostante le ipotesi conservative adottate relativamente alle condizioni di guasto e configurazione del sistema, il limite di 650 V indicato dalla normativa è comunque rispettato. Pertanto la situazione di interferenza non è pericolosa né per danni alle persone né agli impianti.

È opportuno ricordare come la presenza nella canaletta di un numero significativo di cavi (per telecomunicazione, comando, segnalamento e di potenza) con le rispettive armature/schermi collegate regolarmente al collettore di terra, abbia intrinsecamente un elevato effetto schermante ai fini dell'interferenza induttiva, tale da assicurarne l'immunità anche in caso di cortocircuito della linea di contatto a 25 kV, la quale si trova ad una distanza di circa 6 metri dai cavi in un contesto di lungo parallelismo e le cui correnti inducenti di guasto possono arrivare a 8-10 kA.