

COMMITTENTE



GRV Wind Sardegna 5 s.r.l.
 Via Durini, 9 Tel. +39.02.5004315920122
 Milano PEC:
grwindsardegna5@legalmail.it

GRV WIND SARDEGNA 5 S.r.l.
 Via Durini, 9
 20122 Milano (MI)
 P. IVA 11875460963

PROGETTISTI

Progettisti:
 ing. Mariano Marseglia
 ing. Giuseppe Federico Zingarelli

M&M ENGINEERING S.r.l.
 Sede Operativa:
 Via I Maggio, n.4 Tel./fax +39.0885.791912
 Orta Nova (FG) Mail: ing.marianomarseglia@gmail.com

Collaborazioni:
 Ing. Giovanna Scuderi
 Ing. Dionisio Staffieri



REGIONE AUTONOMA
 DELLA SARDEGNA



PROVINCIA
 SASSARI



COMUNE ERULA



COMUNE TULA

PROGETTO

**PROGETTO DEFINITIVO PER LA REALIZZAZIONE DI UN PARCO EOLICO
 DENOMINATO "SA FIURIDA" COMPOSTO DA 5 AEROGENERATORI DA 6,3 MW,
 PER UNA POTENZA COMPLESSIVA DI 31,5 MW SITO NEL COMUNE DI ERULA (SS),
 CON OPERE DI CONNESSIONE NEL COMUNE DI ERULA E TULA (SS)**

ELABORAT

Titolo:
RELAZIONE IMPATTO ELETTROMAGNETICO

Tav./Doc.:
SIA-20

Codice elaborato:
EOL-SIA-20

Scala/Formato:
A4

0	Aprile/2022	Prima emissione	M&M	M&M	GRVALUE
REV.	DATA	DESCRIZIONE	ELABORAZIONE	VERIFICA	APPROVAZIONE

INDICE

1.	PREMESSA.....	3
2.	NORME E DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO	4
3.	INQUADRAMENTO NORMATIVO	5
4.	DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO	7
4.1	GENERALITÀ.....	7
4.2	LINEE DI DISTRIBUZIONE IN MT	7
4.3	LINEE DI DISTRIBUZIONE IN AT	9
4.4	SOTTOSTAZIONI ELETTRICHE DI UTENZA	11
4.5	QUADRO MT DI STAZIONE ELETTRICA SSE AT/MT	11
5.	METODOLOGIA DI CALCOLO MAGNETICO	12
5.1	DEFINIZIONI	12
5.2	DISTANZA DI PRIMA APPROSSIMAZIONE (DPA).....	12
5.3	CENNI TEORICI SUL MODELLO UTILIZZATO	12
5.4	METODO DI CALCOLO	13
6.	METODOLOGIA DI CALCOLO CAMPO ELETTRICO	14
6.1	CENNI TEORICI	14
7.	CAMPI ELETTROMAGNETICI AEROGENERATORE.....	15
7.1	INTERFERENZE ELETTROMAGNETICHE	15
7.2	CABINA TRASFORMAZIONE MT/BT	15
8.	LINEA IN CAVO INTERRATO IN MT E AT.....	16
8.1	DETERMINAZIONE DEI CAMPI MAGNETICI	16
8.2	DETERMINAZIONE DELLA DISTANZA DI PRIMA APPROSSIMAZIONE (DPA)	30
9.	SOTTOSTAZIONI ELETTRICHE AT E CABINA MT DI STAZIONE	32
10.	CONCLUSIONI.....	38

1. PREMESSA

La presente relazione tecnica è relativa alla redazione del progetto per la realizzazione di un parco eolico denominato "Sa Fiurida" proposto dalla società **GRV Wind Sardegna 5 srl** con sede legale a Roma via Durini n.9.

La proposta progettuale è finalizzata alla realizzazione di un impianto eolico per la produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile eolica, costituito da 5 aerogeneratori, ciascuno di potenza nominale pari a 6,3 MW per una potenza complessiva di 31,5 MW, da realizzarsi nella Provincia di Sassari, nel territorio Comunale di Erula, in cui insistono gli aerogeneratori e parte dell'elettrodotto esterno, mentre nel territorio comunale Tula ricade la restante parte dell'elettrodotto esterno e le opere di connessione alla RTN.

Più in dettaglio l'impianto eolico presenta:

- 5 aerogeneratori ad asse orizzontale da 6,3 MW con l'obiettivo di realizzare una centrale di potenza complessiva pari a 31,5 MW;
- 5 cabine di trasformazione poste all'interno della torre;
- Un cavidotto in cavo sotterraneo in media tensione (30 kV) per il collegamento tra il gruppo di aerogeneratori denominato cavidotto interno;
- Un cavidotto in cavo sotterraneo in media tensione (30 kV) per il collegamento tra gli aerogeneratori e la stazione di trasformazione denominato cavidotto esterno;
- Realizzazione di una stazione elettrica di trasformazione 150/30 kV (SSE AT/MT) e di una Sottostazione di raccolta 150kV (SSE AT) adiacente alla SSE AT/MT e condivisa con altri impianti di produzioni. Entrambe le Sottostazioni elettriche sono ubicate nel Comune di Tula (SS);
- Cavidotto AT di connessione alla RTN che uniscono la Sottostazione di Raccolta 150 kV e la Stazione Elettrica RTN di Tula.

La relazione è stata redatta al fine di determinare i valori di campo elettrico e campo magnetico attesi (calcolo previsionale) e la valutazione degli effetti ambientali conseguenti ai sensi della legge 36/01 e DPCM 08/07/2003.

2. NORME E DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO

- Legge 22 febbraio 2001, n. 36 “Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici”.
- DPCM 8 luglio 2003 “Fissazione dei limiti di esposizione, valori di attenzione ed obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni ai campi elettrici e magnetici alla frequenza di rete (50 Hz) generati dagli elettrodotti”.
- DM 29 maggio 2008, GU n. 156 del 5 luglio 2008, “Approvazione della metodologia di calcolo per la determinazione delle fasce di rispetto degli elettrodotti”.
- "Metodologia di calcolo per la determinazione delle fasce di rispetto degli elettrodotti" APAT.
- CEI 11-17 “Impianti di produzione, trasmissione, distribuzione pubblica di energia elettrica - Linee in cavo”.
- CEI 20-21 “Calcolo della portata di corrente” (IEC 60287).
- CEI 106-11 “Guida per la determinazione delle fasce di rispetto per gli elettrodotti secondo le disposizioni del DPCM 8 luglio 2003 (Art. 6). Parte I”.
- "La protezione dai campi elettromagnetici" - Edizione TNE.
- "Inquinamento elettromagnetico" - P. Bevitori et al. - Maggioli Editore.
- "La valutazione dell'inquinamento elettromagnetico" - Edizione Maggioli Editore.
- Documento di progetto: Elaborato - “EOL-OEL-03 “Calcolo Preliminari impianti”.
- Documento di progetto: Elaborato - “EOL-OEL-06 “Schema unifilare impianto eolico”.
- Documento di progetto: Elaborato - “EOL-OEL-07 “Planimetria elettromeccanica”.

3. INQUADRAMENTO NORMATIVO

La normativa nazionale per la tutela della popolazione dagli effetti dei campi elettromagnetici disciplina separatamente le basse frequenze (es. elettrodotti) e le alte frequenze (es. impianti radiotelevisivi, stazioni radiobase, ponti radio).

Il 14 febbraio 2001 è stata approvata dalla Camera dei deputati la legge quadro sull'inquinamento elettromagnetico (L.36/01). In generale il sistema di protezione dagli effetti delle esposizioni agli inquinanti ambientali distingue tra:

Allegato A1. Effetti acuti (o di breve periodo), basati su una soglia, per cui si fissano limiti di esposizione che garantiscono - con margini cautelativi - la non insorgenza di tali effetti;

Allegato B1. Effetti cronici (o di lungo periodo), privi di soglia e di natura probabilistica (all'aumentare dell'esposizione aumenta non l'entità ma la probabilità del danno), per cui si fissano livelli operativi di riferimento per prevenire o limitare il possibile danno complessivo.

È importante dunque distinguere il significato dei termini utilizzati nelle leggi (riportiamo nella tabella 1 le definizioni inserite nella legge quadro).

Tabella 1: Definizioni di limiti di esposizione, di valori di attenzione e di obiettivi di qualità secondo la legge quadro.

Limiti di esposizione	Valori di CEM che non devono essere superati in alcuna condizione di esposizione, ai fini della tutela dagli effetti acuti.
Valori di attenzione	Valori di CEM che non devono essere superati negli ambienti abitativi, scolastici e nei luoghi adibiti a permanenze prolungate. Essi costituiscono la misura di cautela ai fini della protezione da possibili effetti di lungo periodo.
Obiettivi di qualità	Valori di CEM causati da singoli impianti o apparecchiature da conseguire nel breve, medio e lungo periodo, attraverso l'uso di tecnologie e metodi di risanamento disponibili. Sono finalizzati a consentire la minimizzazione dell'esposizione della popolazione e dei lavoratori ai CEM anche per la protezione da possibili effetti di lungo periodo.

La normativa di riferimento in Italia per le linee elettriche è il DPCM del 08/07/2003 (G.U. n. 200 del 29.08.2003) "Fissazione dei limiti massimi di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni ai campi elettrici e magnetici generati alla frequenza di rete (50 Hz) generati dagli elettrodotti"; tale decreto, per effetto di quanto fissato dalla legge quadro sull'inquinamento elettromagnetico, stabilisce:

Allegato C1. I limiti di esposizione, i valori di attenzione e gli obiettivi di qualità per la tutela della salute della popolazione nei confronti dei campi elettromagnetici generati a frequenze non contemplate dal D.M. 381/98, ovvero i campi a bassa frequenza (ELF) e a frequenza industriale (50 Hz);

Allegato D1. I limiti di esposizione, i valori di attenzione e gli obiettivi di qualità per la tutela della salute dei lavoratori professionalmente esposti nei confronti dei campi elettromagnetici generati a frequenze comprese tra 0 Hz e 300 GHz (esposizione professionale ai campi elettromagnetici);

Allegato E1. Le fasce di rispetto per gli elettrodotti.

Relativamente alla definizione di limiti di esposizione, valori di attenzione e obiettivi di qualità per l'esposizione della popolazione ai campi di frequenza industriale (50 Hz) relativi agli elettrodotti, il DPCM 08/07/03 propone i valori descritti in tabella 2, confrontati con la normativa europea.

Tabella 2: Limiti di esposizione, limiti di attenzione e obiettivi di qualità del DPCM 08/07/03, confrontati con i livelli di riferimento della Raccomandazione 1999/512CE.

Normativa	Limiti previsti	Induzione magnetica B (μT)	Intensità del campo elettrico E (V/m)
DPCM	Limite d'esposizione	100	5.000
	Limite d'attenzione	10	
	Obiettivo di qualità	3	
Racc. 1999/512/CE	Livelli di riferimento (ICNIRP1998, OMS)	100	5.000

Il valore di attenzione di 10 μT si applica nelle aree di gioco per l'infanzia, negli ambienti abitativi, negli ambienti scolastici e in tutti i luoghi in cui possono essere presenti persone per almeno 4 ore al giorno. Tale valore è da intendersi come mediana dei valori nell'arco delle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio.

L'obiettivo di qualità di 3 μT si applica ai nuovi elettrodotti nelle vicinanze dei sopraccitati ambienti e luoghi, nonché ai nuovi insediamenti ed edifici in fase di realizzazione in prossimità di linee e di installazioni elettriche già esistenti (valore inteso come mediana dei valori nell'arco delle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio). Da notare che questo valore corrisponde approssimativamente al livello di induzione prevedibile, per linee a pieno carico, alle distanze di rispetto stabilite dal vecchio DPCM 23/04/92.

Si ricorda che i limiti di esposizione fissati dalla legge sono di 100 μT per lunghe esposizioni e di 1000 μT per brevi esposizioni.

Per quanto riguarda la determinazione delle fasce di rispetto degli elettrodotti, il Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare, sentite le ARPA, ha approvato, con Decreto 29 Maggio 2008, "La metodologia di calcolo per la determinazione delle fasce di rispetto degli elettrodotti". Tale metodologia, ai sensi dell'art. 6 comma 2 del D.P.C.M. 8 luglio 2003, ha lo scopo di fornire la procedura da adottarsi per la determinazione delle fasce di rispetto pertinenti alle linee elettriche aeree e interrate, esistenti e in progetto. I riferimenti contenuti in tale articolo implicano che le fasce di rispetto debbano attribuirsi ove sia applicabile l'obiettivo di qualità: "Nella progettazione di nuovi elettrodotti in corrispondenza di aree di gioco per l'infanzia, di ambienti abitativi, di ambienti scolastici e di luoghi adibiti a permanenze non inferiori a quattro ore e nella progettazione di nuovi insediamenti e delle nuove aree di cui sopra in prossimità di linee ed installazioni elettriche già presenti nel territorio" (Art. 4).

Al fine di semplificare la gestione territoriale e il calcolo delle fasce di rispetto è stato introdotto nella metodologia di calcolo un procedimento semplificato che trasforma la fascia di rispetto (volume) in una distanza di prima approssimazione (distanza).

4. DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO

4.1 GENERALITÀ

I campi a frequenze estremamente basse (ELF), quali quelli che si manifestano nell'esercizio delle linee elettriche, sono quelli con frequenze fino a 300 Hz. A frequenze così basse corrispondono lunghezze d'onda in aria molto grandi (6000 km a 50 Hz e 5000 km a 60 Hz) e, in situazioni pratiche, il campo elettrico e quello magnetico agiscono in modo indipendente l'uno dall'altro e sono calcolati e misurati separatamente.

I campi magnetici sono prodotti dal moto delle cariche elettriche, cioè dalla corrente. La loro intensità si misura in ampere al metro (A/m), ma è spesso espressa in termini di una grandezza corrispondente, l'induzione magnetica, che si misura in Tesla (T), milliTesla (mT) o microTesla (μ T). I campi magnetici sono massimi vicino alla sorgente e diminuiscono con la distanza e non vengono schermati dalla maggior parte dei materiali di uso comune che ne vengono facilmente attraversati.

Le opere elettriche di impianto sulle quali rivolgere l'attenzione al fine della valutazione dell'impatto elettrico e magnetico sono di seguito descritte:

- Sezione MT degli aerogeneratori;
- Il cavidotto MT di collegamento tra gli aerogeneratori costituente il collegamento interno;
- Il cavidotto MT di collegamento tra gli aerogeneratori e la stazione elettrica esistente costituente il collegamento esterno;
- La sezione in media ed alta tensione all'interno delle Sottostazioni Elettriche SSE AT/MT e SSE AT.
- Il cavidotto AT di collegamento tra la Sottostazione di raccolta AT utente SSE AT e la Stazione Elettrica RTN di Tula

4.2 LINEE DI DISTRIBUZIONE IN MT

Gli aerogeneratori sono connessi tra di loro da una rete di distribuzione in cavo interrato esercita in media tensione a 30 kV, costituente il collegamento interno. Quest'ultimi sono connessi alla stazione elettrica attraverso una rete di distribuzione in media tensione a 30 kV, costituente il collegamento esterno.

I cavi impiegati fino alla sezione 630 mm² saranno del tipo ARE4H5EE o similari, tripolari cordati ad elica visibile oppure unipolari con posa a trifoglio. Essi sono costituiti con conduttori di alluminio rivestito da un primo strato di semiconduttore, da un isolante primario in polietilene reticolato (XLPE), da un successivo strato di semiconduttore, da uno schermo a fili di rame e da una guaina esterna protettiva in PVC rosso. Sia il semiconduttore (che ha la funzione di uniformare il campo elettrico) che l'isolante primario sono di tipo estruso. Il semiconduttore è asportabile a freddo. Il cavo suddetto è definito a campo radiale in quanto, essendo ciascuna anima rivestita da uno schermo metallico, le linee di forza elettriche risultano perpendicolari agli strati dell'isolante.

La sezione dei singoli cavi componenti le terne, presenta le seguenti caratteristiche dimensionali:

Tabella 3: Caratteristiche dimensionale dei cavi.

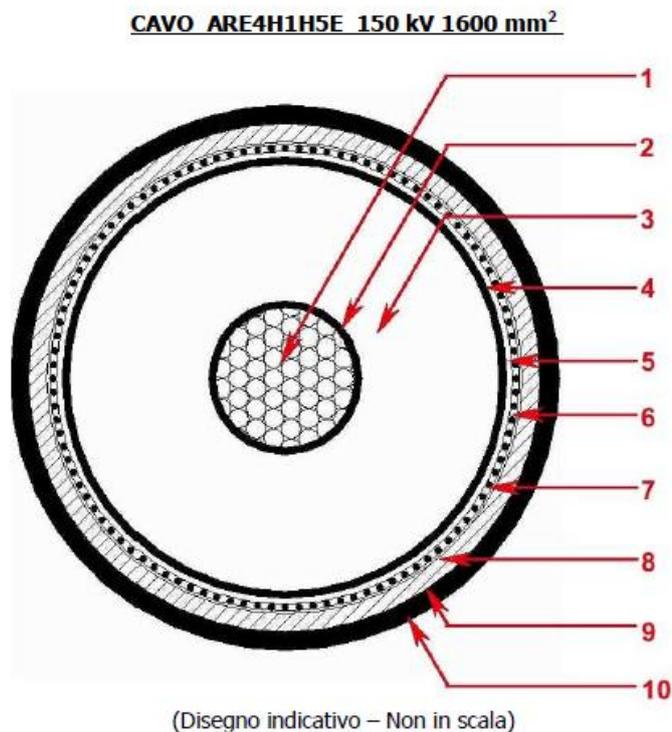
Sezione conduttore	Diametro conduttore	Spessore Isolante	Diametro cavo	Portata al limite termico
[mm ²]	[mm]	[mm]	[mm]	[A]
3x1x120	13.1	27.7	40.6	302
3x1x400	20.7	34.3	47.6	571
3x1x630	30.0	44.5	58.3	740

Si precisa che, i cavi MT ad elica visibile (di tipo pre-cordato) sono esclusi dalla metodologia di calcolo prevista dalla normativa di riferimento. Tuttavia, al fine di dare evidenza dei rischi dovuti all'induzione magnetica ed al campo elettrico vengono di seguito esposti i risultati anche per cavi di questa tipologia.

4.3 LINEE DI DISTRIBUZIONE IN AT

Per il collegamento dello stallo (RTN) arrivo produttore della Stazione Elettrica AT RTN di Tula con la sottostazione di raccolta AT (SSE AT) del produttore, si utilizzeranno cavi AT con formazione un unipolare (87/150 kV ARE4H1H5E da 1600 mmq o similari) con posa direttamente interrata e disposizione a trifoglio. Il tracciato e le sezioni e profondità di scavo sono indicati negli elaborati progettuali.

Di seguito viene riportato le caratteristiche principali del cavo AT, la modalità di posa e la sezione potranno variare in fase di progettazione esecutiva.



1	Conduttore	Corda rotonda compatta (tamponata) a fili di alluminio
2	Schermo semiconduttivo	Mescola estrusa semiconduttiva
3	Isolamento	XLPE
4	Schermo semiconduttivo	Mescola estrusa semiconduttiva
5	Tamponamento longitudinale	Nastro semiconduttivo rigonfiante
6	Schermo metallico	Fili di rame
7	Controspirale	Nastro di rame
8	Tamponamento longitudinale	Nastro rigonfiante
9	Guaina metallica	Nastro longitudinale di alluminio monoplaccato
10	Guaina esterna	Polietilene (grafitato)

**ARE4H1H5E-87/150kV
1x1600**

CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE	U.M.	Dati
CONDUTTORE	Materiale	ALLUMINIO
Sezione	mm ²	1.600
Diametro	mm	49,1
Numero minimo di fili (secondo IEC 60228)	n°	N.A.
ISOLANTE	Materiale	XLPE
SPESSORE ISOLANTE - nominale	mm	20,0
DIAMETRO SULL'ISOLANTE min - max	mm - mm	90 - 94
SCHERMO A FILI DI RAME - sezione	mm ²	100
NASTRO DI ALLUMINIO - spessore nominale	mm	0,2
GUAINA ESTERNA	Materiale	PE
SPESSORE GUAINA - nominale	mm	4,0
DIAMETRO ESTERNO min - max	mm - mm	105 - 109
PESO DEL CAVO - indicativo	kg/m	11,9
CARATTERISTICHE FUNZIONALI	U.M.	Dati
Resistenza elettrica max a 20 °C - Conduttore	Ohm/km	0,0186
Resistenza elettrica max a 90 °C - Conduttore	Ohm/km	0,0289
Reattanza di fase a 50 Hz	Ohm/km	0,118
Resistenza elettrica max a 20 °C - Schermo	Ohm/km	0,208
Capacità di fase	mF/km	0,24
Raggio minimo di curvatura	m	3,0
⁽¹⁾ PORTATA - I _z	A	1.096
⁽²⁾ CORRENTE TERMICA di C.C. - Conduttore	kA x 0,5 s	213
⁽²⁾ CORRENTE TERMICA di C.C. - Schermo	kA x 0,5 s	31,5
⁽³⁾ SOVRACCARICO - 5 ore	kA	1,81
⁽³⁾ SOVRACCARICO - 50 ore	kA	1,44

(1) I valori delle portate sono state calcolate in regime permanente per una terna di cavi posati:

- formazione dei cavi:	a trifoglio
- collegamento degli schermi:	cross-bonding
- temperatura del conduttore (°C):	90
- distanza interassiale fra cavi adiacenti (mm):	cavi a contatto
- profondità di posa (piano di appoggio dei cavi) (m):	1,4
- temperatura del terreno (°C):	20
- resistività termica del terreno (°Cm/W):	1,0

(2) Le correnti termiche di corto circuito del conduttore sono state calcolate nelle seguenti condizioni:

- durata del corto circuito (s):	0,5
- temperatura iniziale dei conduttori (°C):	90
- temperatura finale dei conduttori (°C):	250
- temperatura iniziale degli schermi (°C):	80
- temperatura finale degli schermi (°C):	250

(3) I valori delle portate in sovraccarico in funzione delle durate (5h e 50h), sono stati calcolati con corrente iniziale pari all'80% della portata iniziale.

4.4 SOTTOSTAZIONI ELETTRICHE DI UTENZA

La sottostazione elettrica di trasformazione AT/MT (SSE AT/MT) utenza sarà costituita da un'area chiusa composta da un locale comando e controllo, locale BT, locale MT (contenente i quadri MT, il trasformatore MT/BT) con una sezione di arrivo MT dall'impianto eolico ed una sezione di trasformazione AT/MT.

La Sottostazione elettrica di raccolta AT utente (SSE AT) sarà caratterizzata da una sezione di partenza in AT per la consegna dell'energia prodotta alla Rete di Trasmissione Nazionale.

4.5 QUADRO MT DI STAZIONE ELETTRICA SSE AT/MT

All'interno della cabina di stazione sono ubicati i quadri in MT, per la protezione ed il sezionamento delle linee elettriche in arrivo dal parco eolico e in partenza verso il trasformatore di potenza AT/MT.

5. METODOLOGIA DI CALCOLO MAGNETICO

5.1 DEFINIZIONI

In riferimento all'allegato del D.M. del 29 Maggio 2008 "Metodologia di calcolo per la determinazione delle fasce di rispetto" si introducono le seguenti definizioni:

Corrente

Valore efficace dell'intensità di corrente elettrica.

Portata in corrente in servizio normale

Corrente che può essere sopportata da un conduttore per il 100% del tempo con limiti accettabili del rischio di scarica sugli oggetti mobili e sulle opere attraversate e dell'invecchiamento. Essa è definita nella norma CEI 11-60 par. 2.6 e sue successive modifiche e integrazioni.

Portata in regime permanente

Massimo valore della corrente che, in regime permanente e in condizioni specificate, il conduttore può trasmettere senza che la sua temperatura superi un valore specificato (secondo CEI 11-17 par. 1.2.05).

Fascia di rispetto

Spazio circostante un elettrodotto, che comprende tutti i punti, al di sopra e al di sotto del livello del suolo, caratterizzati da un'induzione magnetica di intensità maggiore o uguale all'obiettivo di qualità.

5.2 DISTANZA DI PRIMA APPROSSIMAZIONE (DPA)

Distanza, in pianta sul livello del suolo, dalla proiezione del centro linea che garantisce che ogni punto la cui proiezione al suolo disti dalla proiezione del centro linea più di Dpa si trovi all'esterno delle fasce di rispetto. Per le cabine è la distanza, in pianta sul livello del suolo, da tutte le pareti della cabina stessa che garantisce i requisiti di cui sopra.

5.3 CENNI TEORICI SUL MODELLO UTILIZZATO

L'induzione magnetica B generata da NR conduttori filiformi, numerati da 0 a $(NR-1)$, può essere calcolata con l'espressione riportata di seguito; si fa notare che solo i conduttori reali contribuiscono al campo magnetico, perché si assume il suolo perfettamente trasparente dal punto di vista magnetico e non si considerano quindi i conduttori immagine.

$$\vec{B} = -\frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{k=0}^{NR-1} \int_{C_k} \frac{i}{r^3} \vec{r} \times d\vec{l}$$

Dove μ_0 è la permeabilità magnetica del vuoto, NR è il numero dei conduttori (nel nostro caso pari a 3), i la corrente, C_k il conduttore generico, $d\vec{l}$ un suo tratto elementare, r la distanza tra questo tratto elementare ed il punto dove si vuole calcolare il campo.

Il modello adottato (conduttori cilindrici rettilinei orizzontali indefiniti paralleli tra di loro) consente di eseguire facilmente l'integrazione e semplificare i calcoli.

Indicato con **Q** il punto dove si vuole determinare il campo, definiamo sezione normale il piano verticale passante per Q e ortogonale ai conduttori; indichiamo quindi con **P_k** il punto dove il generico conduttore **C_k** interseca la *sezione normale*, e con **I_k** la corrente nel singolo conduttore (si è preso l'asse **z** nella direzione dei conduttori).

Con queste posizioni, per l'induzione magnetica in Q si ottiene l'espressione

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{k=0}^{NR-1} \frac{i_k \vec{z} \times (Q - P_k)}{|Q - P_k|^2}$$

La formula indica che l'induzione magnetica è inversamente proporzionale al quadrato della distanza del punto di interesse dai conduttori; esiste inoltre una proporzionalità diretta tra l'induzione e la distanza tra i singoli conduttori di ogni terna.

5.4 METODO DI CALCOLO

Lo studio dell'impatto elettromagnetico nel caso di linee elettriche aeree e non, si traduce nella determinazione di una fascia di rispetto. Per l'individuazione di tale fascia si deve effettuare il calcolo dell'induzione magnetica basato sulle caratteristiche geometriche, meccaniche ed elettriche della linea presa in esame. Esso deve essere eseguito secondo modelli tridimensionali o bidimensionali con l'applicazione delle condizioni espresse al paragrafo 6.1 della norma CEI 106-11.

Al fine di semplificare la gestione territoriale e il calcolo delle fasce di rispetto, in prima approssimazione è possibile:

- Calcolare la fascia di rispetto combinando la configurazione dei conduttori, geometrica e di fase, e la portata in corrente in servizio normale che forniscono il risultato più cautelativo sull'intero tronco;
- Proiettare al suolo verticalmente tale fascia;
- Individuare l'estensione rispetto alla proiezione del centro linea (DPA).

6. METODOLOGIA DI CALCOLO CAMPO ELETTRICO

6.1 CENNI TEORICI

In generale, per il calcolo del campo elettrico si ricorre al principio delle immagini in base al quale il terreno, considerato come piano equipotenziale a potenziale nullo, può essere simulato con una configurazione di cariche immagini. In altre parole per ogni conduttore reale, sia attivo che di guardia, andrà considerato un analogo conduttore immagine la cui posizione è speculare, rispetto al piano di terra, a quella del conduttore reale e la cui carica è opposta rispetto a quella del medesimo conduttore reale.

In particolare, il campo elettrico di un conduttore rettilineo di lunghezza infinita con densità lineare di carica costante può essere espresso come:

$$\vec{E} = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 d} \vec{u}_r$$

Dove: λ = densità lineare di carica sul conduttore;
 ϵ_0 = permittività del vuoto;
 d = distanza del conduttore rettilineo dal punto di calcolo;
 u_r = versore unitario con direzione radiale al conduttore.

7. CAMPI ELETTROMAGNETICI AEROGENERATORE

7.1 INTERFERENZE ELETTROMAGNETICHE

Gli aerogeneratori possono essere fonte di interferenza elettromagnetica a causa della riflessione e della diffusione delle onde radio che investono la struttura. L'origine di disturbi elettromagnetici dovuti alla presenza di aerogeneratori è da ricercare nella interferenza delle pale (specialmente se in materiali metallici o riflettenti o se dotate di strutture metalliche all'interno) e dei sostegni con campi elettromagnetici, supporto di telecomunicazioni (televisione, segnali di ponti radio, mezzi di aiuto alla radionavigazione, ecc.).

Gli effetti di questo fenomeno possono essere studiati e calcolati facendo ricorso a modelli matematici predittivi che permettono di individuare, in maniera conservativa, la zona oltre la quale il rapporto tra segnale e disturbo è tale da non incidere sulla qualità del radioservizio. La misurazione degli effetti è possibile attraverso prove sperimentali.

Sulla base di quanto riportato a questo proposito in letteratura sulla caratterizzazione di macchine di media taglia, considerando che l'impianto è costituito da un solo aerogeneratore e che lo stesso non si frappone a ripetitori di segnali di telecomunicazione, si ritiene che il rischio di tali disturbi possa considerarsi irrilevante. Si consideri altresì che i moderni aerogeneratori utilizzano pale in materiale non metallico e antiriflettente, cosa che come detto riduce ulteriormente il disturbo.

7.2 CABINA TRASFORMAZIONE MT/BT

Il sistema elettrico degli aerogeneratori è costituito da apparecchiature in bassa tensione collocati sulla navicella e cavi di bassa tensione che da quest'ultima raggiungono il trasformatore MT/BT. Per i cavi in BT non è applicabile la metodologia di calcolo per la determinazione delle fasce di rispetto degli elettrodotti (art. 3.2 DM 29/05/2008).

Riguardo i trasformatori MT/BT il valore dell'induzione magnetica decresce rapidamente al crescere della distanza dal trasformatore. Per distanze comprese tra 1 m e 10 m da un trasformatore in resina si può calcolare il valore del campo magnetico con la seguente formula:

$$B = 5 \frac{u_{cc}}{6} \sqrt{\frac{S_r}{630}} \left(\frac{3}{a}\right)^{2,8}$$

Dove

- U_{cc} è la tensione percentuale di cortocircuito;
- S_r è la potenza nominale del trasformatore (kVA);
- a è la distanza dal trasformatore.

Un valore di DPA pari a 5 m attorno al trasformatore garantisce valori di campo magnetico inferiori al limite consentito dalla legge.

8. LINEA IN CAVO INTERRATO IN MT E AT

8.1 DETERMINAZIONE DEI CAMPI MAGNETICI

Per la realizzazione dei cavidotti di collegamento, sono stati considerati tutti gli accorgimenti che consentono la minimizzazione degli effetti elettromagnetici sull'ambiente e sulle persone. In particolare, la scelta di operare con linee in MT ed AT interrate permette di eliminare la componente elettrica del campo, grazie all'effetto schermante del terreno; inoltre la limitata distanza tra i cavi (ulteriormente ridotta grazie all'impiego di terne cosiddette "a trifoglio") fa sì che l'induzione magnetica risulti significativa solo in prossimità dei cavi.

In dettaglio saranno simulati i seguenti tratti di cavidotto alla tensione nominale di 30 kV:

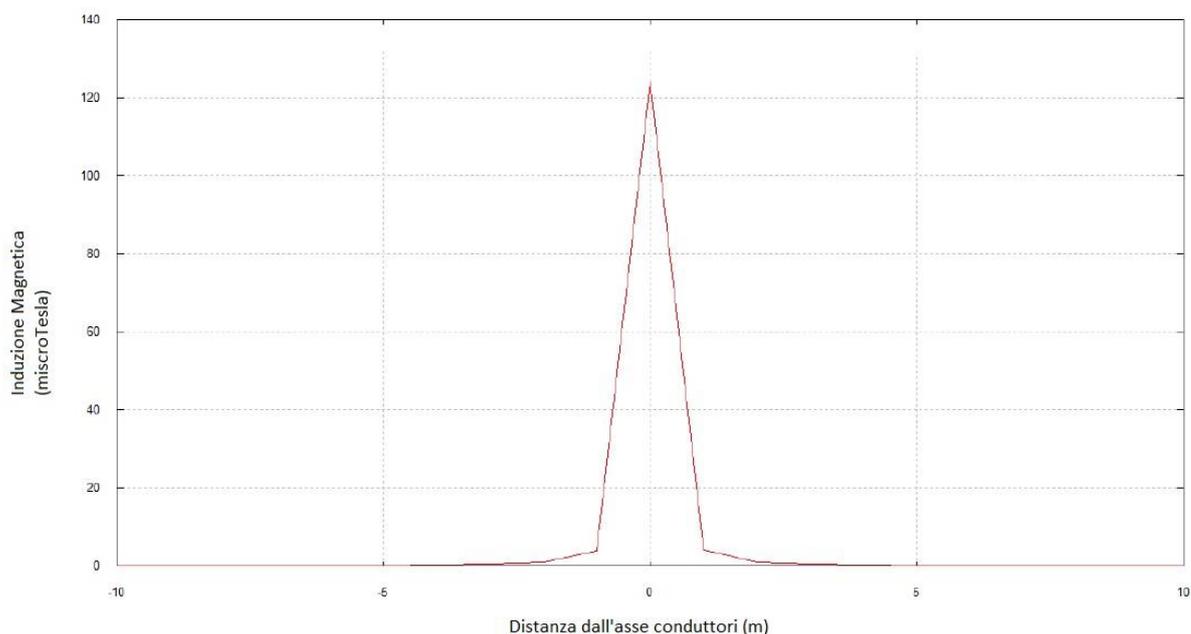
- **S1:** una terna di conduttori disposti a trifoglio di sezione 120 mm^2 percorsa da corrente massima pari a 302 A ed interrata ad una profondità di 1,20 m;
- **S2:** una terna di conduttori disposti a trifoglio di sezione 400 mm^2 percorsa da corrente massima pari a 571 A ed interrata ad una profondità di 1,20 m;
- **S3:** una terna di conduttori disposti a trifoglio di sezione 630 mm^2 percorsa da corrente massima pari a 740 A ed interrata ad una profondità di 1,20 m;
- **S4:** una terna di conduttori di sezione 120 mm^2 percorsa da corrente massima pari a 302 A e una terna di sezione 400 mm^2 percorsa da corrente massima pari a 571 A, disposti a trifoglio ed interrate ad una profondità di 1,20 m;
- **S5:** una terna di conduttori di sezione 120 mm^2 percorsa da corrente massima pari a 302 A e una terna di sezione 630 mm^2 percorsa da corrente massima pari a 740 A, disposti a trifoglio ed interrate ad una profondità di 1,20 m.
- **S6:** una terna di conduttori di sezione 400 mm^2 percorsa da corrente massima pari a 571 A e una terna di sezione 630 mm^2 percorsa da corrente massima pari a 740 A, disposti a trifoglio ed interrate ad una profondità di 1,20 m;

Per quanto riguarda il cavidotto AT sarà simulato il seguente tratto alla tensione nominale 150kV:

- **S7:** una terna di conduttori disposti a trifoglio di sezione 1600 mm^2 percorsa da corrente massima pari a 1110 A ed interrata ad una profondità di 1,7 m;

Per la definizione della distanza di prima approssimazione, i valori del campo magnetico sono stati misurati ad altezza conduttori. Più precisamente, i risultati di seguito riportati illustrano l'andamento del campo magnetico in funzione della distanza dall'asse dei conduttori (asse x) e l'andamento del campo magnetico su di un asse ortogonale all'asse dei conduttori (asse y)

S1 - Cavidotto MT ad una terna di sezione 120 mm² interrata a 1.20 m dal piano di campagna – terne disposte a trifoglio



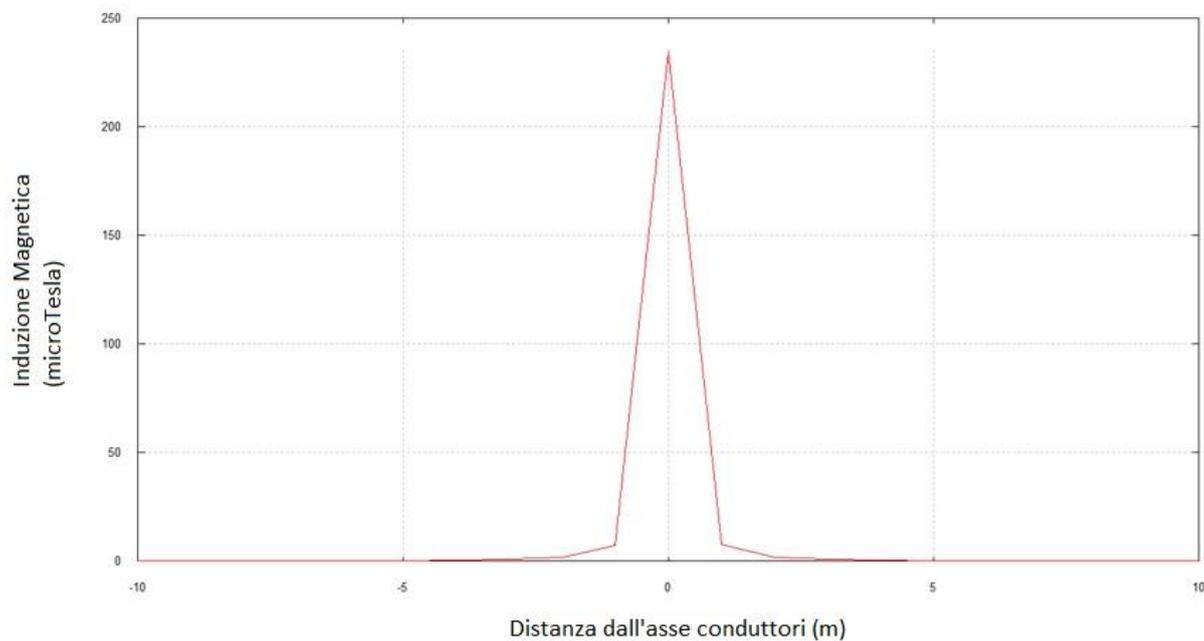
Andamento del campo magnetico in funzione della distanza dall'asse dello scavo in forma grafica relativa alla simulazione S1.

<i>Distanza dai cavi [m]</i>	<i>Induzione Magnetica [μT]</i>
-10	.04
-9	.05
-8	.07
-7	.09
-6	.12
-5	.17
-4	.26
-3	.46
-2	1.03
-1	4.18
0	123.95
1	4.18
2	1.03
3	.46

4	.26
5	.17
6	.12
7	.09
8	.07
9	.05
10	.04

Andamento del campo magnetico in funzione della distanza dall'asse dello scavo in forma tabellare relativa alla simulazione S1.

S2 - Cavidotto MT ad una terna di sezione 400 mm² interrata a 1.20 m dal piano di campagna – terne disposte a trifoglio



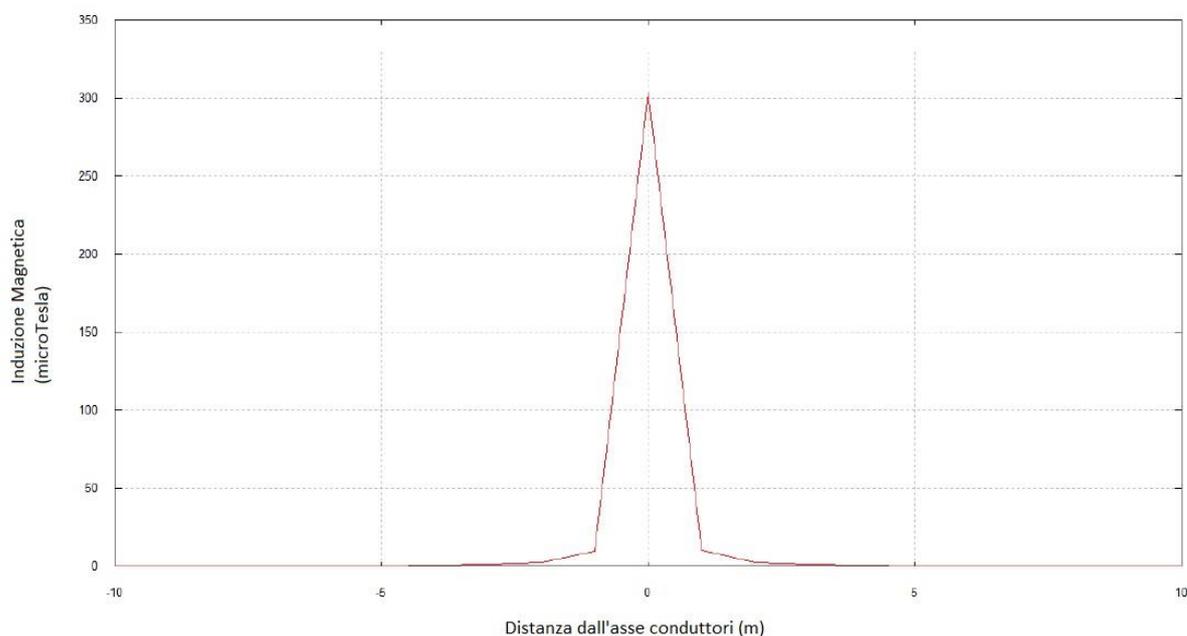
Andamento del campo magnetico in funzione della distanza dall'asse dello scavo in forma grafica relativa alla simulazione S2.

<i>Distanza dai cavi [m]</i>	<i>Induzione Magnetica [μT]</i>
-10	.08
-9	.1
-8	.12
-7	.16
-6	.22
-5	.32
-4	.5
-3	.89
-2	2
-1	7.91
0	234.35
1	7.91
2	2
3	.89

4	.5
5	.32
6	.22
7	.16
8	.12
9	.1
10	.08

Andamento del campo magnetico in funzione della distanza dall'asse dello scavo in forma tabellare relativa alla simulazione S2.

S3 - Cavidotto MT ad una terna di sezione 630 mm² interrata a 1.20 m dal piano di campagna – terne disposte a trifoglio



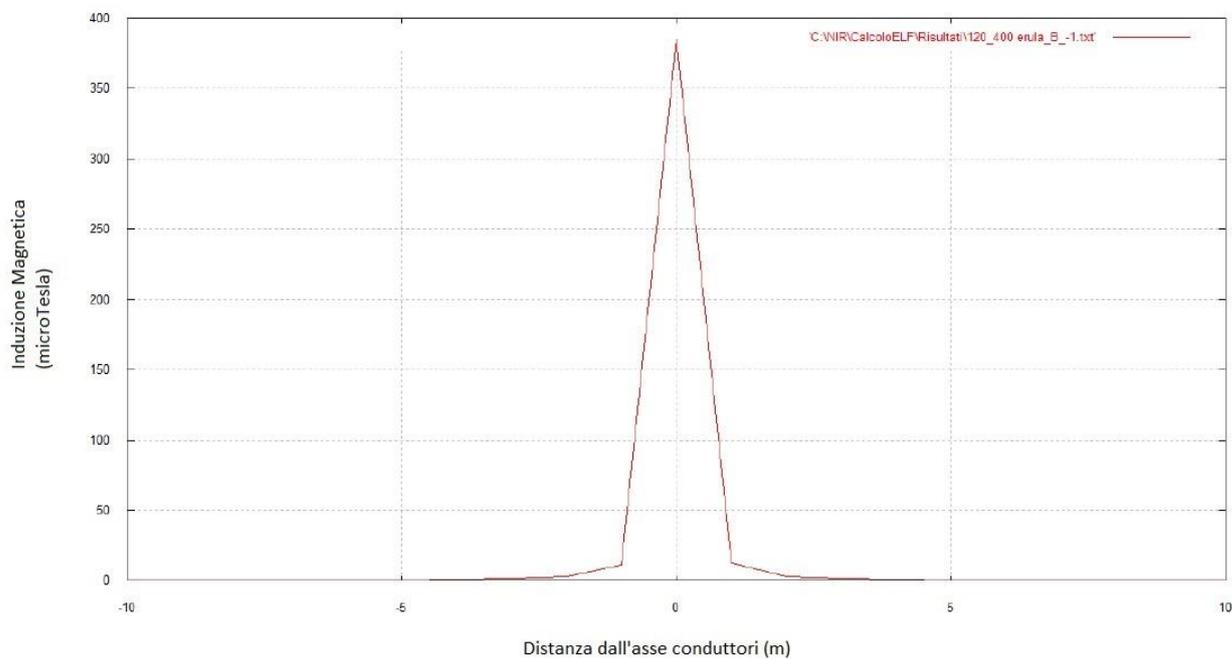
Andamento del campo magnetico in funzione della distanza dall'asse dello scavo in forma grafica relativa alla simulazione S3.

<i>Distanza dai cavi [m]</i>	<i>Induzione Magnetica [μT]</i>
-10	.1
-9	.13
-8	.16
-7	.21
-6	.28
-5	.41
-4	.65
-3	1.13
-2	2.59
-1	10.25
0	303.71
1	10.25
2	2.59
3	1.15

4	.65
5	.41
6	.29
7	.21
8	.16
9	.13
10	.1

Andamento del campo magnetico in funzione della distanza dall'asse dello scavo in forma tabellare relativa alla simulazione S3.

S4 - Cavidotto MT a due terne di sezione 120 mm² e 400 mm² interrate a 1.20 m dal piano di campagna – terne disposte a trifoglio



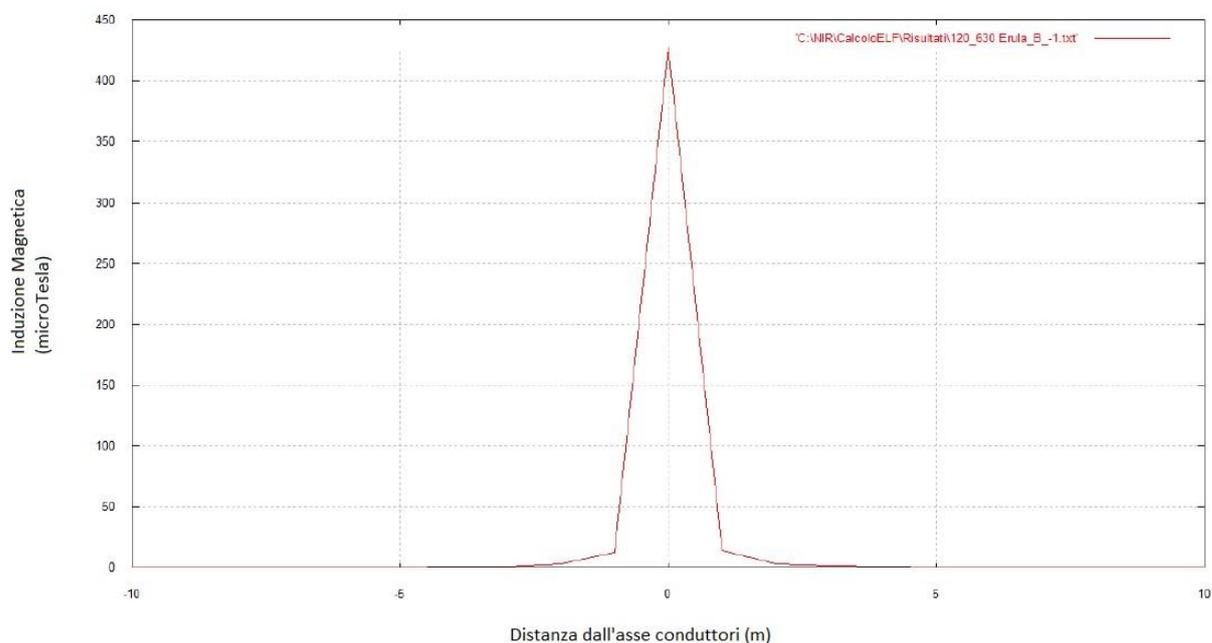
Andamento del campo magnetico in funzione della distanza dall'asse dello scavo in forma grafica relativa alla simulazione S4.

<i>Distanza dai cavi [m]</i>	<i>Induzione Magnetica [μT]</i>
-10	.12
-9	.15
-8	.19
-7	.24
-6	.33
-5	.48
-4	.74
-3	1.31
-2	3.01
-1	11.34
0	385.23
1	12.43
2	3.06

3	1.35
4	.76
5	.48
6	.34
7	.25
8	.19
9	.15
10	.12

Andamento del campo magnetico in funzione della distanza dall'asse dello scavo in forma tabellare relativa alla simulazione S4.

S5 - Cavidotto MT a due terne di sezione 120 mm² e 630 mm² interrate a 1.20 m dal piano di campagna – terne disposte a trifoglio



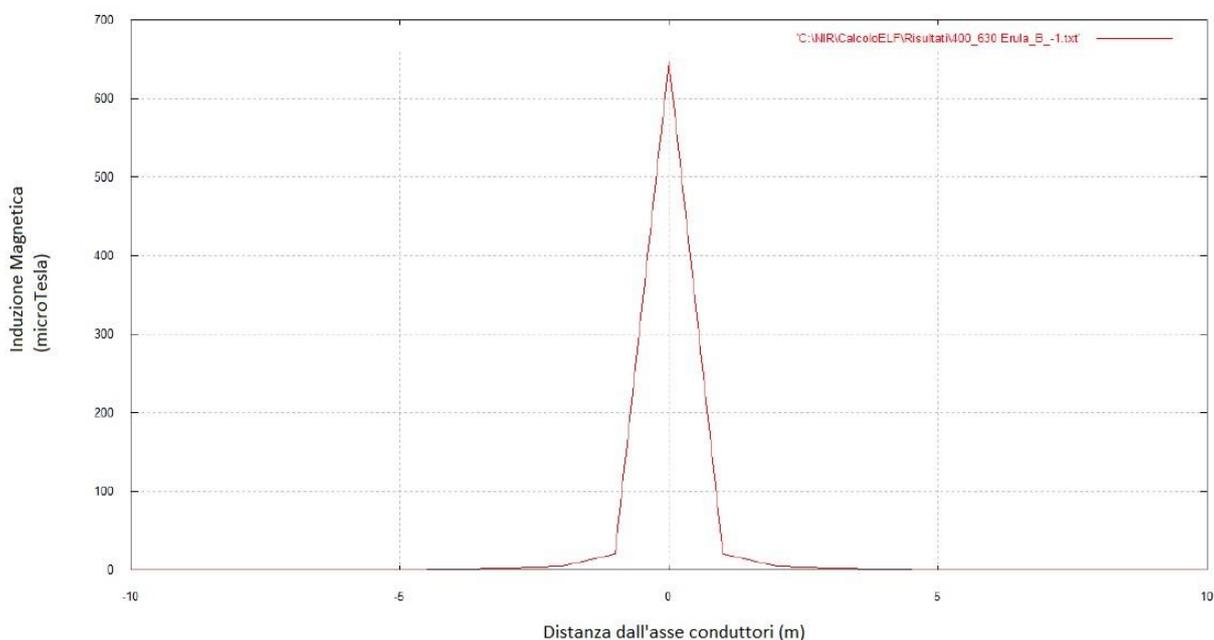
Andamento del campo magnetico in funzione della distanza dall'asse dello scavo in forma grafica relativa alla simulazione S5.

<i>Distanza dai cavi [m]</i>	<i>Induzione Magnetica [μT]</i>
-10	.13
-9	.16
-8	.2
-7	.27
-6	.36
-5	.52
-4	.81
-3	1.43
-2	3.18
-1	12.23
0	427.07
1	13.88
2	3.39
3	1.49

4	.84
5	.53
6	.37
7	.27
8	.21
9	.16
10	.13

Andamento del campo magnetico in funzione della distanza dall'asse dello scavo in forma tabellare relativa alla simulazione S5.

S6 - Cavidotto MT a due terne di sezione 400 mm² e 630 mm² interrate a 1.20 m dal piano di campagna – terne disposte a trifoglio



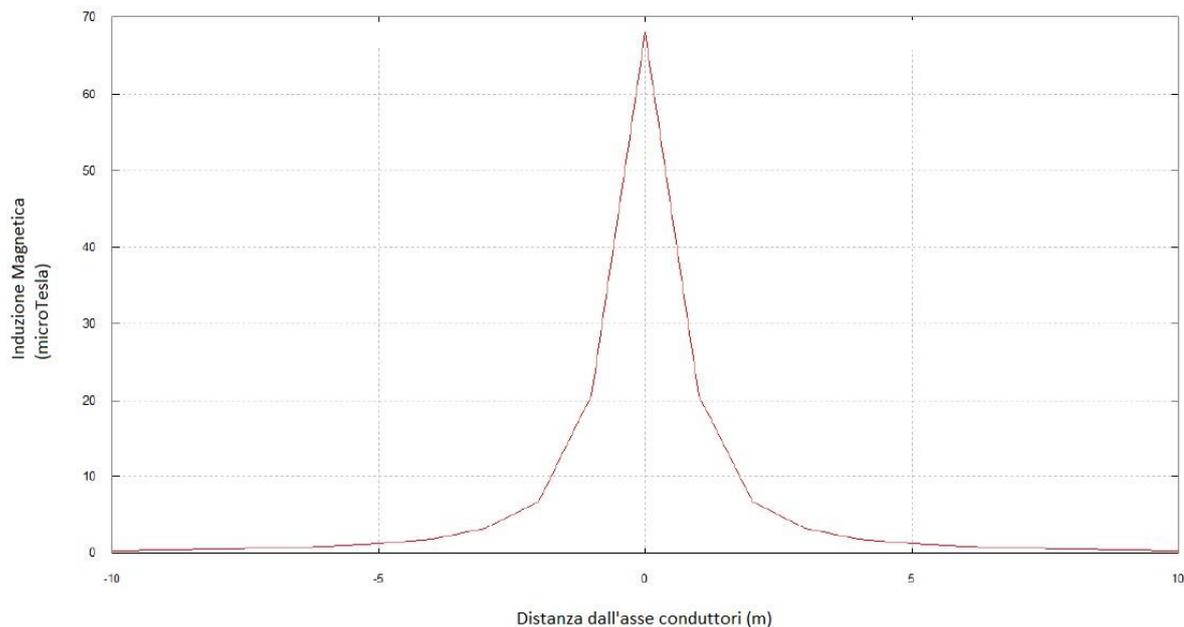
Andamento del campo magnetico in funzione della distanza dall'asse dello scavo in forma grafica relativa alla simulazione S6.

<i>Distanza dai cavi [m]</i>	<i>Induzione Magnetica [μT]</i>
10	.21
-9	.26
-8	.32
-7	.42
-6	.57
-5	.83
-4	1.29
-3	2.29
-2	5.12
-1	20
0	647.25
1	21.01
2	5.24
3	2.32

4	1.31
5	.84
6	.58
7	.43
8	.33
9	.26
10	.21

Andamento del campo magnetico in funzione della distanza dall'asse dello scavo in forma tabellare relativa alla simulazione S6.

S7 - Cavidotto AT a una terna di sezione 1600 mm² interrate a 1.7 m dal piano di campagna – terne disposte a trifoglio



Andamento del campo magnetico in funzione della distanza dall'asse dello scavo in forma grafica relativa alla simulazione S7.

<i>Distanza dai cavi [m]</i>	<i>Induzione Magnetica [μT]</i>
-10	.3
-9	.37
-8	.46
-7	.61
-6	.82
-5	1.18
-4	1.82
-3	3.17
-2	6.74
-1	20.77
0	68.01
1	20.77
2	6.74
3	3.17
4	1.82

5	1.18
6	.82
7	.61
8	.46
9	.37
10	.3

Andamento del campo magnetico in funzione della distanza dall'asse dello scavo in forma tabellare relativa alla simulazione S7.

8.2 DETERMINAZIONE DELLA DISTANZA DI PRIMA APPROSSIMAZIONE (DPA)

Il calcolo della DPA per i cavidotti di collegamento in MT e in AT simulati si traduce graficamente nell'individuazione di una distanza che ha origine dal punto di proiezione dall'asse del cavidotto al suolo e ha termine in un punto individuato sul suolo il cui valore del campo magnetico risulta essere uguale o inferiore ai 3 μ T. Si riportano nella seguente tabella le distanze di prima approssimazione per i tratti di cavidotto presi in esame:

Tabella 15: Distanza di prima approssimazione per cavidotti di collegamento del parco eolico.

CASO DI STUDIO	N° TERNE	SEZIONI [mm ²]	TIPOLOGIA CAVO	TENSIONE [kV]	DPA [m]
S1	1	3x1x120	Posa a trifoglio	30	2
S2	1	3x1x400	Posa a trifoglio	30	2
S3	1	3x1x630	Posa a trifoglio	30	2
S4	2	3x1x120 3x1x400	Posa a trifoglio	30	3
S5	2	3x1x120 3x1x400	Posa a trifoglio	30	3
S6	2	3x1x400 3x1x630	Posa a trifoglio	30	3
S7	1	3x1x1600	Posa a trifoglio	150	4

Le DPA sono state calcolate con una approssimazione non superiore al metro così come indicato nel paragrafo 5.1.2 della guida allegata al DM del 29/05/2008, ovvero:

- **CASO S1** - Valore a 3 μ T: 1 m - Valore DPA: 2 m;
- **CASO S2** - Valore a 3 μ T: 2 m - Valore DPA: 2 m;
- **CASO S3** - Valore a 3 μ T: 2 m - Valore DPA: 2 m;
- **CASO S4** - Valore a 3 μ T: 2 m - Valore DPA: 3 m;
- **CASO S5** - Valore a 3 μ T: 3 m - Valore DPA: 3 m;
- **CASO S6** - Valore a 3 μ T: 3 m - Valore DPA: 3 m;
- **CASO S7** - Valore a 3 μ T: 4 m - Valore DPA: 4 m

9. SOTTOSTAZIONI ELETTRICHE AT E CABINA MT DI STAZIONE

Il calcolo del campo elettrico e magnetico per una stazione elettrica AT è stato effettuato sulle sbarre a 150 kV all'interno dell'area di stazione e sulle sbarre a 30 kV dei quadri in MT localizzati anch'essi all'interno della recinzione della stazione.

I parametri geometrici ed elettrici utilizzati per il calcolo sulle sbarre a 150 kV risultano i seguenti:

- Altezza delle sbarre: 4.5 m;
- Distanza tra le sbarre: 2.2 m;
- Valore efficace della corrente delle sbarre: 1250 A;
- Valore efficace della tensione fra conduttore e terra: 86705 V

I parametri geometrici ed elettrici utilizzati per il calcolo sulle sbarre a 30 kV risultano, invece, i seguenti:

- Altezza delle sbarre: 1.6 m;
- Distanza tra le sbarre: 0.37 m;
- Valore efficace della corrente delle sbarre: 1250 A;
- Valore efficace della tensione fra conduttore e terra: 17341 V

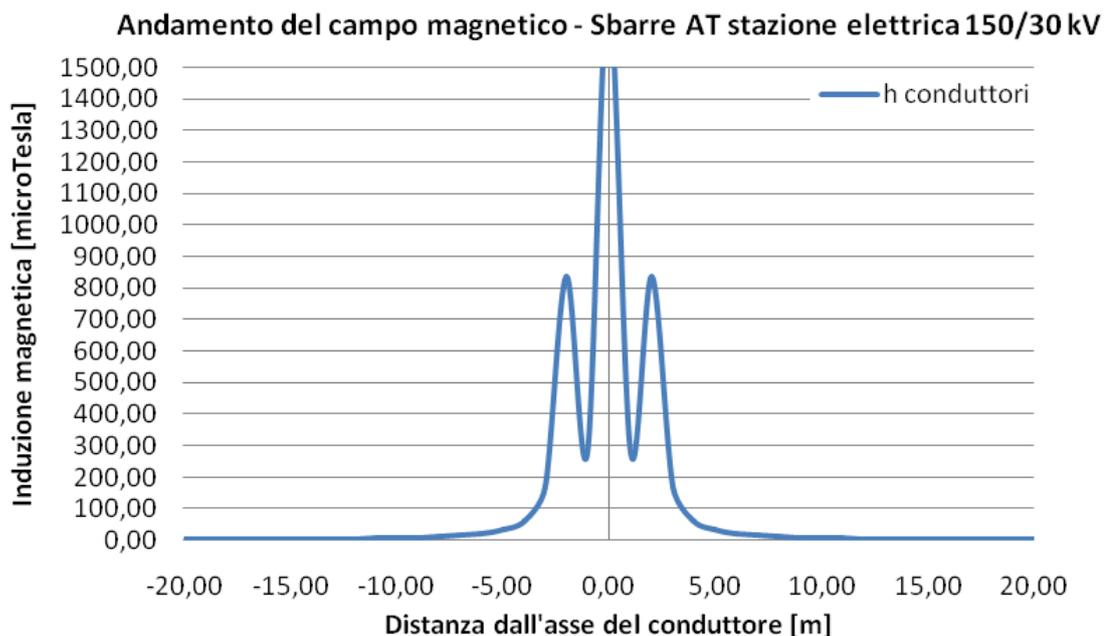


Figura 12: Andamento del campo magnetico in funzione della distanza dall'asse dei conduttori in forma grafica - Sbarre AT stazione elettrica 150/30 kV - Valutazione della Distanza di prima Approssimazione.

Valutazione Distanza di prima approssimazione			
<i>Distanza dai cavi [m]</i>	<i>Altezza conduttori [μT]</i>	<i>Distanza dai cavi [m]</i>	<i>Altezza conduttori [μT]</i>
-20	1,68	1	277,17
-19	1,87	2	835,8
-18	2,08	3	171,7
-17	2,34	4	62,23
-16	2,65	5	33,91
-15	2,96	6	21,74
-14	3,48	7	15,26
-13	4,06	8	11,35
-12	4,79	9	8,79
-11	5,75	10	7,02
-10	7,02	11	5,75
-9	8,79	12	4,79
-8	11,35	13	4,06
-7	15,26	14	3,48
-6	21,74	15	2,96
-5	33,91	16	2,65
-4	62,23	17	2,34
-3	171,7	18	2,08
-2	835,8	19	1,87
-1	277,17	20	1,68
0	1741,79		

Tabella 16: Andamento del campo magnetico in funzione della distanza dall'asse dei conduttori in forma tabellare - Sbarre AT stazione elettrica 30/150 kV - Valutazione della Distanza di prima Approssimazione.

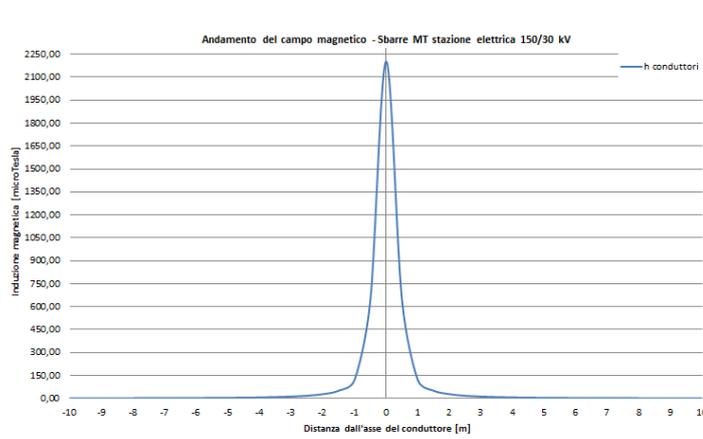


Figura 13: Andamento del campo magnetico in funzione della distanza dall'asse dei conduttori in forma grafica - Sbarre MT stazione elettrica 30/150 kV - Valutazione della Distanza di prima Approssimazione.

<i>Distanza dall'asse [m]</i>	<i>Valori di campo magnetico [μT]</i>
	<i>Altezza conduttori</i>
-10,00	1,10
-9,00	1,36
-8,00	1,72
-7,00	2,25
-6,00	3,07
-5,00	4,42
-4,00	6,93
-3,00	12,37
-2,00	28,20
-1,00	121,25
0,00	2203,17
1,00	121,25
2,00	28,20
3,00	12,37
4,00	6,93
5,00	4,42
6,00	3,07
7,00	2,25
8,00	1,72
9,00	1,36
10,00	1,10

Tabella 17: Andamento del campo magnetico in funzione della distanza dall'asse dei conduttori in forma tabellare – Sbarre MT stazione elettrica 150/30 kV - Valutazione della Distanza di prima Approssimazione.

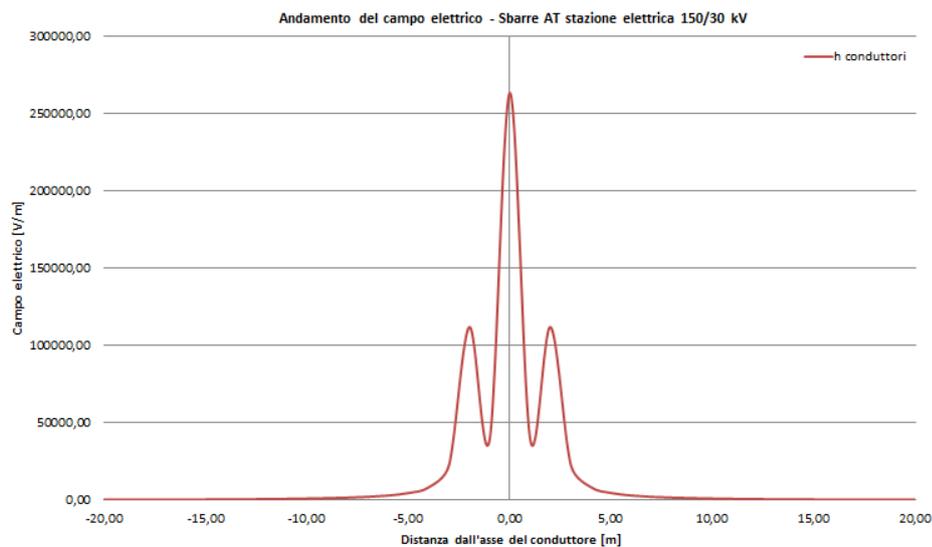


Figura 14: Andamento del campo elettrico in forma grafica - Sbarre AT stazione elettrica 150/30 kV.

Distanza dall'asse [m]	Valori di campo elettrico [V/m]
	Altezza conduttori
0	263460,50
1	39261,50
2	112013,90
3	22797,40
4	8360,50
5	4645,20
6	3040,60
7	2173,40
8	1640,30
9	1283,90
10	1031,40
11	844,70
12	702,40
13	591,20
14	502,60
15	431,10
16	372,50
17	324,00
18	283,60
19	249,50
20	220,70

Tabella 18: Andamento del campo elettrico in forma tabellare – Sbarre AT stazione elettrica 150/30 kV.

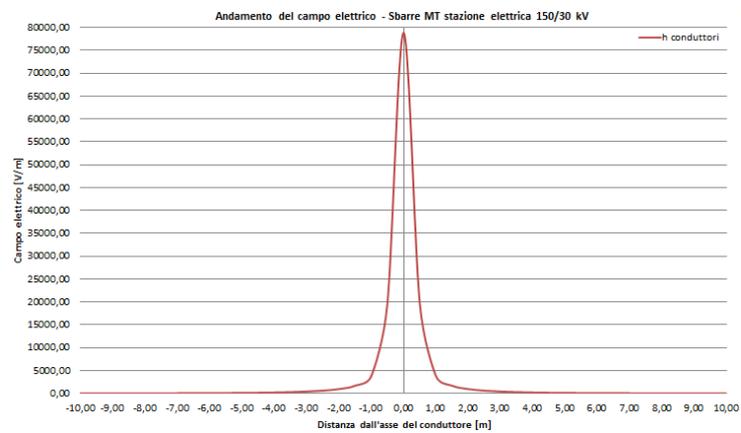


Figura 15: Andamento del campo elettrico in forma grafica - Cabina MT in stazione elettrica 150/30 kV.

Distanza dall'asse [m]	Valori di campo magnetico [V/m]
	Altezza conduttori
0,00	78925,50
0,50	19701,50
1,00	3846,20
1,50	1714,70
2,00	983,20
2,50	632,90
3,00	435,50
3,50	313,50
4,00	233,60
4,50	178,90
5,00	140,20
5,50	112,10
6,00	91,20
6,50	75,40
7,00	63,10
7,50	53,50
8,00	45,80
8,50	39,70
9,00	34,60
9,50	30,40
10,00	27,00

Tabella 19: Andamento del campo elettrico in forma tabellare – Cabina MT in stazione elettrica 30/150 kV.

Come si evince dalla simulazione del calcolo, dalle figure 12 e 13 e dalle relative tabelle, sia i valori di campo magnetico ad altezza conduttori sia quelli ad 1 m dal suolo restano al di sotto dei 3 μT ad una distanza di circa 15 m dall'asse delle sbarre in AT e 7 m circa dal confine della cabina MT della stazione 150/30 kV.

Riguardo al campo elettrico, dai risultati delle simulazioni (figure 14 e 15 e relative tabelle), si ottengono valori di intensità inferiore ai limiti di 5000 V/m imposti dalla normativa a soli 5 m dalle sbarre in AT ed 1 m da quelle in MT.

10. CONCLUSIONI

La determinazione delle DPA è stata effettuata in accordo al D.M. del 29/05/2008 riportando per ogni opera elettrica la summenzionata DPA. Dalle analisi, i cui risultati sono riassunti nei grafici e tabelle riportati nei paragrafi precedenti si può desumere quanto segue:

- Per i cavidotti in media tensione del parco eolico sia per il cavidotto interno che per il cavidotto esterno la distanza di prima approssimazione non eccede il range di ± 2 m rispetto all'asse del cavidotto tranne che per il caso a due terne con range ± 3
- Per le sottostazioni elettriche, la distanza di prima approssimazione è stata valutata in ± 15 m per le sbarre in alta tensione (150 kV) e 7 m per le barre in media tensione (30 kV) della cabina utente nella SSE AT/MT.

I valori di campo elettrico risultano rispettare i valori imposti dalla norma (<5000 V/m) in quanto le aree con valori superiori ricadono all'interno delle cabine MT ed in generale nelle sottostazioni elettriche AT il cui accesso è consentito al solo personale autorizzato.

All'interno delle aree summenzionate delimitate dalle DPA non risultano recettori sensibili ovvero aree di gioco per l'infanzia, ambienti abitativi, ambienti scolastici, luoghi adibiti a permanenza di persone per più di quattro ore giornaliere.

Si può quindi concludere che la realizzazione delle opere elettriche relative alla realizzazione dell'impianto eolico rispetta la normativa vigente.