

COMUNE DI: SASSARI

PROVINCIA: SASSARI  
REGIONE: SARDEGNA

"FATTORIA SOLARE CASA SCACCIA"  
AGRIVOLTAICO DI TIPO ELEVATO E AVANZATO

**PROGETTO DEFINITIVO**

**RELAZIONE CAMPI ELETTROMAGNETICI**

Tipo Elaborato	Codice Elaborato	Data	Scala CAD	Formato	Foglio / di	Scala
REL.	2202_R.18	25/03/2024	-	A4	1/72	-

**PROPONENTE**

**AGRI BRUZIA Società Agricola A R.L.**  
Corso Europa, 1  
87021 - Belvedere Marittimo (CS)

**SVILUPPO**



**SET SVILUPPO s.r.l.**  
Corso Trieste, 19  
00198 - Roma (RM)

**PROGETTAZIONE**

Ing. Marco Marsico



Rev.	Data	Descrizione	Redatto	Verificato	Approvato
00	20/02/2023	Prima Emissione	Ing. M. Marsico	Ing. M. Marsico	Ing. M. Marsico
01	25/03/2024	Seconda Emissione	Ing. M. Marsico	Ing. M. Marsico	Ing. M. Marsico

**RELAZIONE CAMPI ELETTROMAGNETICI**

**FATTORIA SOLARE “CASA SCACCIA”  
AGRIVOLTAICO DI TIPO ELEVATO E AVANZATO**

**di potenza pari a 43,940 MWp  
e sistema di accumulo pari a 12,50 MW**

Progetto: Fattoria Solare “Casa Scaccia” AGRI BRUZIA SOCIETÀ AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione Campi Elettromagnetici	Pagina: 3
--	---	--------------

## Sommario

<b>1. PREMESSA</b> .....	5
<b>2. DATI GENERALI</b> .....	6
<b>3. INTRODUZIONE</b> .....	7
2.1. Campo di forza.....	7
2.2. Fondo naturale di radiazione elettromagnetica.....	8
2.3. Radiazione elettromagnetica dovuta al progresso tecnologico.....	8
2.3.1. Trasporto e distribuzione dell’energia elettrica.....	9
2.3.2. Impianti per radio telecomunicazione.....	10
2.4. Il campo magnetico.....	10
2.5. Lo spettro elettromagnetico.....	12
2.6. Effetti delle radiazioni.....	12
2.6.1. Radiazioni ionizzanti.....	13
2.6.2. Radiazioni non ionizzanti.....	13
2.7. Effetti termici e non-termici.....	13
2.8. Effetti del campo magnetico a 50 Hz e normative.....	14
2.9. Studi epidemiologici.....	14
<b>4. NORMATIVA DI RIFERIMENTO</b> .....	18
3.1. Le linee guida internazionali.....	18
3.2. Raccomandazioni e direttive europee.....	18
3.3. La normativa italiana.....	18
3.4. La legislazione italiana.....	18
3.5. DM 29/05/08 (fasce di rispetto per elettrodotti).....	20
<b>5. METODOLOGIA DI CALCOLO</b> .....	22
4.1. Valutazione delle fasce di rispetto.....	22
4.2. Valutazione del volume di rispetto dell’obiettivo di qualità.....	22
4.3. Linee elettriche a media tensione.....	22
4.4. Induzione magnetica infrastrutture elettriche.....	23
4.4.1. Moduli Fotovoltaici.....	23
4.4.2. Inverter.....	23
4.4.3. Elettrodotti interrati.....	24
4.4.4. Cabine elettriche.....	26
<b>6. ANALISI E CALCOLO INDUZIONE MAGNETICA</b> .....	27
5.1. Linee AT (36 kV) in cavo interrato con cavi unipolari posati a trifoglio.....	27
5.2. Linee BT.....	37
5.3. Cabina di Raccolta.....	38
5.4. Power Station.....	41

Progetto: Fattoria Solare “Casa Scaccia” AGRI BRUZIA SOCIETÀ AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione Campi Elettromagnetici	Pagina: 4
--	---	--------------

---

5.4.1. PS (SMA SC2660 UP) .....	42
5.4.2. PS (SMA SC4200 UP) .....	45
5.5. Storage Power Station .....	48
<b>7. CONCLUSIONI</b> .....	<b>51</b>
<b>ALLEGATO</b> .....	<b>52</b>

---

Progetto: Fattoria Solare "Casa Scaccia" AGRI BRUZIA SOCIETÀ AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione Campi Elettromagnetici	Pagina: 5
--	---	--------------

## 1. PREMESSA

Il progetto agrivoltaico denominato "Fattoria Solare Casa Scaccia" è un progetto di agricoltura innovativa che introduce in Sardegna un nuovo modello di sviluppo sostenibile che combina la coltivazione delle superfici agricole con la produzione di energie rinnovabili, rispondendo alle esigenze ambientali, climatiche e di tutela dei territori rurali.

Il progetto prevede il miglioramento fondiario di un'area di circa 82 Ha nel Comune di Sassari (SS), tramite l'implementazione di un piano agronomico integrato con strutture fotovoltaiche elevate e ad inseguimento solare monoassiale (c.d. tracker). L'insieme dei moduli fotovoltaici supportati da queste strutture e opportunamente connessi, determinerà nel complesso una potenza di picco pari a 43,94 MWp. L'impianto agrivoltaico sarà inoltre corredato da un sistema di accumulo (c.d. storage) in assetto AC Coupling, capace sia di assorbire che di immettere energia verso la Rete Elettrica Nazionale. Tale sistema è stato previsto all'interno dell'area di impianto, perseguendo obiettivi di funzionalità e di ottimizzazione degli spazi, ed avrà una potenza nominale pari a 12,5 MW.

Le opere di connessione necessarie per il collegamento dell'impianto agrivoltaico e del sistema di accumulo alla RTN sono costituite da un cavidotto interato a 36 kV di circa 5,6 km che si estende lungo la fascia a nord della Strada Provinciale SP65 fino allo stallo arrivo produttore a 36 kV nella nuova Stazione Elettrica (SE) di Trasformazione 380/150/36 kV "Olmedo 380" da inserire in entra-esce alla RTN a 380 kV "Fiumesanto Carbo-Ittiri".

L'impianto agrivoltaico e le parti che lo caratterizzano, nonché lo Storage in assetto AC Coupling, costituiranno il cosiddetto "Impianto di Produzione". Per le opere di connessione, il cavidotto interrato a 36 kV da collegare in antenna allo stallo arrivo produttore a 36 kV nella suddetta SE costituisce opera di utenza per la connessione mentre la nuova SE, incluso lo stallo produttore a 36 kV, si configura come "Opere di Rete".

Progetto: Fattoria Solare "Casa Scaccia" AGRI BRUZIA SOCIETÀ AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione Campi Elettromagnetici	Pagina: 6
--	---	--------------



Figura 1: Inquadramento area impianto, percorso cavidotto e area nuova SE Olmedo su Ortofoto

## 2. DATI GENERALI

<b>Proponente</b>	EF AGRI SOCIETÀ AGRICOLA A R.L.
<b>Progetto</b>	<b>Agrivoltaico:</b> progetto di miglioramento fondiario integrato da strutture fotovoltaiche elevate di potenza nominale pari a 43,940 MWp e completato da un sistema di accumulo di potenza nominale pari a 12,5 MW, per una potenza in immissione complessivamente pari a 56,44 MW.
<b>Coordinate geografiche</b>	Latitudine: 40°41'46.67" NORD Longitudine: 8°20'32.65" EST
<b>Comuni Interessati dal progetto</b>	Sassari (SS)

Progetto: Fattoria Solare "Casa Scaccia" AGRI BRUZIA SOCIETÀ AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione Campi Elettromagnetici	Pagina: 7
--	---	--------------

### 3. INTRODUZIONE

L'oggetto della presente relazione è il calcolo dei campi elettrici e magnetici generati dalle componenti elettriche dell'impianto agrivoltaico e del relativo cavidotto di collegamento alla SE Terna, al fine di verificare la conformità alla normativa di riferimento.

Nei capitoli seguenti verranno:

- Illustrate sinteticamente le considerazioni scientifiche che stanno alla base degli standard di sicurezza in materia di campi elettromagnetici;
- Presentanti i livelli tipici di campo magnetico a 50 Hz che si possono riscontrare in prossimità delle sorgenti presenti nell'ambiente esterno;
- Esposta la normativa europea e nazionale di riferimento;
- Descritte le emissioni elettromagnetiche associate alle infrastrutture elettriche interessate dal progetto e le metodologie di calcolo;
- Calcolati i valori di campo magnetico per le sorgenti derivanti dalla realizzazione del progetto, cabine ed elettrodotti.

Sarà inoltre allegata alla presente relazione lo studio effettuato sul cavidotto di collegamento alla stazione elettrica Terna, i calcoli e risultati ottenuti dall'analisi delle relative sezioni di scavo.

#### 2.1. Campo di forza

Un campo di forza in fisica è una regione di spazio attorno ad un oggetto particolare (detto sorgente del campo) nella quale si manifestano forze su altri oggetti.

Progetto: Fattoria Solare "Casa Scaccia" AGRI BRUZIA SOCIETÀ AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione Campi Elettromagnetici	Pagina: 8
--	---	--------------

Seguono esempi di campi di forze:

	<b>Campo gravitazionale</b>	<b>Campo elettrico</b>	<b>Campo magnetico</b>
Generato da:	qualsunque oggetto dotato di <b>massa</b>	qualsunque oggetto dotato di <b>carica elettrica</b>	qualsunque conduttore percorso da <b>corrente elettrica</b>
È una regione di spazio nella quale si manifestano forze che agiscono su:	altri oggetti dotati di <b>massa</b>	altri oggetti dotati di <b>carica elettrica</b>	altri conduttori percorsi da <b>corrente elettrica</b>

## 2.2. Fondo naturale di radiazione elettromagnetica

Sulla Terra è presente un fondo naturale di radiazione elettromagnetica di origine cosmica, (prodotto dal sole e dalle stelle), e di origine atmosferica, dovuto a fenomeni meteorologici (scariche elettrostatiche). Le radiazioni elettromagnetiche si propagano nello spazio sotto forma di onde (onde elettromagnetiche), le cui caratteristiche dipendono dalla frequenza, ossia dal numero di oscillazioni compiute in un secondo, che si misura in cicli al secondo o Hertz (Hz). Maggiore è la frequenza, maggiore è l'energia trasportata dall'onda.

L'insieme di tutte le possibili onde elettromagnetiche, in funzione della frequenza, costituisce lo spettro elettromagnetico. Al suo interno si possono distinguere due grandi zone, quella delle radiazioni ionizzanti (IR), che hanno un'energia tale da rompere i legami atomici che tengono unite le molecole e quella delle radiazioni non ionizzanti (NIR), che non hanno energia sufficiente per ionizzare la materia: è in questa regione dello spettro che si parla comunemente di campi elettromagnetici.

Un campo elettromagnetico è costituito da due grandezze che variano periodicamente nel tempo: il campo elettrico e il campo magnetico. Il primo si definisce come una proprietà o perturbazione dello spazio, dovuta alla presenza di cariche elettriche, la sua intensità si misura in Volt per metro (V/m). Analogamente, il campo magnetico è legato alla presenza di cariche elettriche in movimento (correnti elettriche) e la sua intensità si esprime in ampère per metro (A/m) o in microtesla ( $\mu\text{T}$ ).

## 2.3. Radiazione elettromagnetica dovuta al progresso tecnologico

Accanto alle sorgenti naturali, il progresso tecnologico ha introdotto un contributo sostanziale dovuto alle sorgenti legate alle attività umane. L'uso sempre crescente delle nuove tecnologie ha infatti portato, negli ultimi decenni, ad un aumento della presenza di sorgenti di campo elettrico,

Progetto: Fattoria Solare "Casa Scaccia" AGRI BRUZIA SOCIETÀ AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione Campi Elettromagnetici	Pagina: 9
--	---	--------------

magnetico ed elettromagnetico, rendendo di sempre maggiore attualità la problematica dell'esposizione alle radiazioni non ionizzanti.

Le principali sorgenti artificiali di campi elettromagnetici nell'ambiente sono gli impianti per la distribuzione e l'utilizzo di energia elettrica, insieme agli apparati per radiotelecomunicazione, che operano a frequenze comprese tra 0 e 300 GHz. Più precisamente, i sistemi per la trasmissione, distribuzione e utilizzo dell'energia elettrica funzionano nell'intervallo di frequenze compreso tra 0 e 300 Hz, ed i campi elettromagnetici da essi prodotti sono chiamati ELF (Extremely Low Frequency: campi a frequenza estremamente bassa o semplicemente a bassa frequenza), mentre gli impianti per radio telecomunicazione operano nell'intervallo di frequenze da 100 kHz a 300 GHz e generano campi elettromagnetici RF (campi a radiofrequenza, microonde o semplicemente ad alta frequenza).

### **2.3.1. Trasporto e distribuzione dell'energia elettrica**

I sistemi di trasporto e distribuzione dell'energia elettrica, comunemente detti elettrodotti, sono costituiti dalle linee elettriche e dalle stazioni e cabine di trasformazione elettrica. Le caratteristiche principali di una linea elettrica sono la tensione di esercizio, che si misura in chilovolt (kV) e la corrente trasportata, che si esprime in ampère (A). La tensione di esercizio, che determina l'intensità del campo elettrico generato, è un parametro costante all'interno della linea. Le tensioni di esercizio delle linee elettriche in Italia sono 0,4 kV per la bassa tensione, 15, 20 e 30 kV per la media tensione, 36, 132, 150, 220 e 380 kV per l'alta e altissima tensione. La corrente trasportata, parametro dal quale dipende l'intensità del campo magnetico generato, è variabile nel tempo in funzione delle richieste di energia e mediamente può assumere valori da alcuni ampère a qualche migliaio di ampère, a seconda della linea elettrica.

Gli elettrodotti distribuiti sul territorio italiano danno luogo nel loro complesso alla rete elettrica nazionale, che è articolata in una rete di trasmissione e in tre reti di distribuzione ad alta, media e bassa tensione. La Rete di Trasmissione Nazionale (RTN) comprende le reti di trasmissione ad altissima tensione (AAT: 380 kV e 220 kV) e ad alta tensione (AT: 132 kV e 150 kV) e le stazioni elettriche AAT/AT (380-220/150-132 kV). La RTN costituisce l'ossatura principale della rete elettrica nazionale e svolge il ruolo di interconnessione degli impianti di produzione nazionale e di collegamento con la rete elettrica internazionale. La Rete di Distribuzione ad alta tensione (AT: 132-150 kV) collega le stazioni elettriche AAT/AT e le centrali di produzione alle cabine primarie (CP) AT/AT (150-132/36 kV) o AT/MT (150-132/30-15 kV) ubicate nel territorio provinciale e precisamente nelle aree interessate dai più elevati fabbisogni di potenza ed energia elettrica. La Rete di distribuzione a media tensione (MT: 15, 20, 30 kV) serve a garantire l'energia elettrica per le diverse aree territoriali ed i diversi settori produttivi. Tale rete è composta da linee principali

Progetto: Fattoria Solare "Casa Scaccia" AGRI BRUZIA SOCIETÀ AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione Campi Elettromagnetici	Pagina: 10
--	---	---------------

denominate "dorsali" (la cui alimentazione è garantita dalle cabine primarie), che interessano, di norma, il territorio di più Comuni e servono ad alimentare grandi clienti, e da linee secondarie dette "derivazioni" (derivate appunto dalle dorsali medesime), che di norma interessano i singoli territori comunali. Le linee dorsali collegano tra loro le cabine secondarie MT/BT (15 o 20/0,4 kV). Infine, la Rete di distribuzione a bassa tensione (BT: 400-230 V) costituisce il sistema di distribuzione al servizio delle piccole utenze (abitazione, commercio, artigianato, piccola industria e similari). L'alimentazione delle linee a bassa tensione che interessano il territorio è garantita dalle cabine secondarie MT/BT.

### 2.3.2. Impianti per radio telecomunicazione

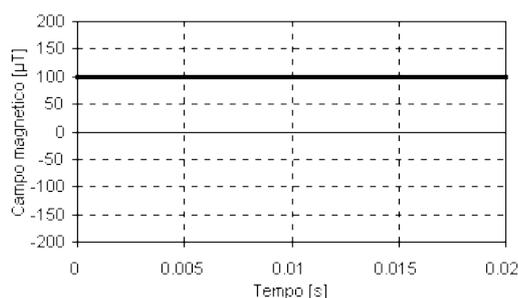
Le principali sorgenti di campi elettromagnetici ad alta frequenza nell'ambiente sono gli impianti per radio telecomunicazione (stazioni radio base, sistemi di diffusione radiotelevisiva, ponti radio, radar, ecc.); una delle caratteristiche principali delle sorgenti RF, da cui dipende il campo elettrico generato, è la potenza immessa in antenna, espressa in Watt (W). Nei centri abitati assumono particolare importanza gli impianti fissi per la telefonia mobile o stazioni radio base (SRB).

## 2.4. Il campo magnetico

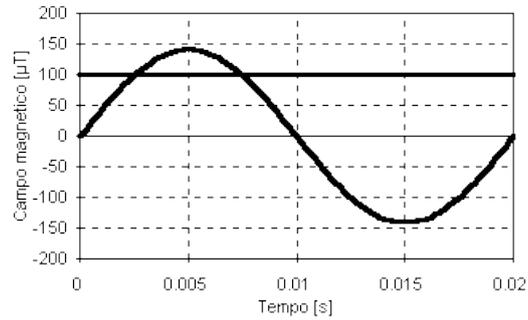
Il campo magnetico si misura in Tesla (T); si usano soprattutto i sottomultipli:

millitesla	<b>mT</b>	un millesimo di Tesla
microtesla	<b>μT</b>	un milionesimo di Tesla
nanotesla	<b>nT</b>	un miliardesimo di Tesla

Il campo magnetico prodotto da una corrente continua è costante nel tempo e si dice campo magnetostatico (Figura 1); il campo magnetico prodotto da una corrente alternata varia con l'andamento di una sinusoide nel tempo e si dice campo magnetico alternato o oscillante (Figura 2); la frequenza del campo (misurata in Hertz, simbolo Hz) indica quante volte la sinusoide si ripete ogni secondo; in questa relazione si tratteranno unicamente di campi magnetici oscillanti a 50 Hz.



*Figura 2: Campo magnetico corrente continua*



*Figura 3: Campo magnetico corrente alternata*

L'intensità di un campo magnetico oscillante si esprime attraverso il suo valore efficace, dato dall'intensità di un campo magnetostatico di pari contenuto energetico; si può dimostrare che essa è pari al 70% circa del valore di picco. Una delle caratteristiche più importanti del campo magnetico alternato è la sua capacità di provocare, o indurre, correnti elettriche all'interno degli oggetti conduttori esposti, come per esempio un organismo umano.

Progetto: Fattoria Solare "Casa Scaccia" AGRI BRUZIA SOCIETÀ AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione Campi Elettromagnetici	Pagina: 12
--	---	---------------

### **IN SINTESI:**

- Il campo magnetico è generato da una qualunque corrente elettrica, come quella che scorre in un elettrodotto ad alta tensione o nell'impianto elettrico domestico o in un apparecchio utilizzatore;
- Il campo magnetico si manifesta come forza che agisce su altre correnti elettriche;
- Il campo magnetico si misura in Tesla [T] e sottomultipli; se ha andamento oscillante nel tempo, la frequenza, misurata in Hertz [Hz], indica il numero delle oscillazioni in un secondo;
- Il campo magnetico oscillante è in grado di provocare correnti elettriche negli oggetti conduttori esposti, quindi anche in un organismo umano.

### **2.5. Lo spettro elettromagnetico**

Al variare della frequenza, l'onda elettromagnetica assume delle proprietà caratteristiche. Poiché ad ogni onda è associata un'energia trasportata, e questa è proporzionale alla frequenza, le onde ad alta frequenza trasporteranno una maggiore quantità di energia.

Lo spettro può essere suddiviso in sette regioni principali, con frequenza ed energia crescente:

<b>Nome</b>	<b>Intervallo di frequenze</b>	<b>Sorgenti</b>
Basse frequenze	0 - 10 <sup>4</sup> Hz	Elettrodotti, elettrodomestici
Radiofrequenze	10 <sup>4</sup> - 10 <sup>8</sup> Hz	Antenna radio e televisive
Microonde	10 <sup>8</sup> - 10 <sup>11</sup> Hz	Forni a microonde, telefoni cellulari
Infrarosso	10 <sup>11</sup> - 10 <sup>13</sup> Hz	Lampade termiche, fonti di calore
Visibile	10 <sup>13</sup> - 10 <sup>14</sup> Hz	Luce solare, lampade
Ultravioletto	10 <sup>14</sup> - 10 <sup>17</sup> Hz	Lampade UV
Raggi X, raggi gamma	10 <sup>17</sup> - 10 <sup>20</sup> Hz	Radiografia medica, raggi cosmici

### **2.6. Effetti delle radiazioni**

La frequenza di 10<sup>15</sup> Hz (nel campo dell'ultravioletto) divide le radiazioni in ionizzanti e non-ionizzanti.

Progetto: Fattoria Solare "Casa Scaccia" AGRI BRUZIA SOCIETÀ AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione Campi Elettromagnetici	Pagina: 13
--	---	---------------

### 2.6.1. Radiazioni ionizzanti

Le radiazioni ionizzanti sono quelle che hanno frequenza superiore a 10<sup>15</sup> Hz, e comprendono l'UV lontano, raggi X e raggi gamma.

Sono gravemente dannose per la salute umana: essendo onde ad altissima energia sono in grado di generare ionizzazione, ovvero la rottura dei legami covalenti molecolari, e quindi di danneggiare i DNA delle cellule.

### 2.6.2. Radiazioni non ionizzanti

Le radiazioni non ionizzanti hanno frequenza inferiore a 10<sup>15</sup> Hz, e comprendono i campi delle basse frequenze, radiofrequenze, microonde e infrarosso. La quantità di energia trasportata, e quindi trasferita ai tessuti umani quando questi vengono irradiati, non è sufficiente a rompere i legami chimici delle molecole. Vi sono però dei dubbi sulla loro innocuità, come vedremo in dettaglio.

### 2.7. Effetti termici e non-termici

Gli effetti biologici dei campi elettromagnetici dipendono principalmente dalla potenza trasportata dalla radiazione.

L'energia trasportata da un'onda elettromagnetica che attraversa un tessuto biologico viene dissipata all'interno del tessuto stesso sotto forma di calore. Il campo magnetico oscillante induce nel tessuto una corrente elettrica che dissipa potenza a causa delle proprietà dielettriche del mezzo.

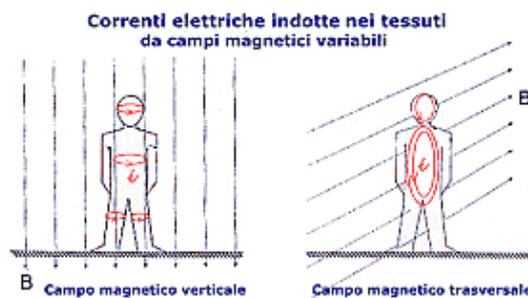


Figura 4: Correnti elettriche indotte nei tessuti

Campi elettromagnetici con densità di potenza superiore a 10 mW/cm<sup>2</sup> possono provocare danni biologici per effetto termico: gli effetti acuti del campo magnetico sono dovuti all'induzione di corrente elettrica nei tessuti (fino a 10 A/m<sup>2</sup> per campi magnetici molto intensi), e vanno da interferenze nella percezione sensoriale (visiva e tattile), alla fibrillazione ventricolare, fino al riscaldamento dei tessuti.

Progetto: Fattoria Solare "Casa Scaccia" AGRI BRUZIA SOCIETÀ AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione Campi Elettromagnetici	Pagina: 14
--	---	---------------

## 2.8. Effetti del campo magnetico a 50 Hz e normative

La sperimentazione su volontari ha permesso di accertare quali sono gli effetti immediati ed oggettivi provocati dalla corrente indotta in un individuo esposto al campo magnetico a 50 Hz. I più significativi sono riportati in tabella, elencati in ordine decrescente di intensità.

<b>Effetti acuti del campo magnetico</b>		
<b>Effetto</b>	<b>Campo magnetico</b>	<b>Densità di corrente</b>
Riscaldamento dei tessuti (0,4 W/kg)	1.600.000 $\mu$ T	10.000 mA/m <sup>2</sup>
Induzione di extrasistole (rischio di fibrillazione)	130.000 $\mu$ T	800 mA/m <sup>2</sup>
Percezione sensoriale, magnetofosfeni	16.000 $\mu$ T	100 mA/m <sup>2</sup>
Normativa italiana	100 $\mu$ T	0,6 mA/m <sup>2</sup>
Soglia di attenzione epidemiologica	0,2 $\mu$ T	-

Si ipotizza che le radiofrequenze e i campi a basse frequenze, anche se emessi con potenza inferiore a 10 mW/cm<sup>2</sup>, possano causare danni biologici con effetti non termici. Sulla possibile dannosità dei campi elettromagnetici sono tuttora in corso molti studi medici che cercano di individuare una correlazione tra l'esposizione prolungata a campi, anche deboli, e l'insorgenza di malattie (tra cui tumori infantili), e allo stesso tempo di scoprire il funzionamento biologico dell'interazione tra campi elettromagnetici e sistemi biologici.

## 2.9. Studi epidemiologici

Le commissioni tecniche nazionali ed internazionali che hanno redatto le proposte di normativa non hanno ritenuto di poter tenere conto degli studi epidemiologici per formulare i limiti di esposizione.

I motivi di tale scelta - che è stata più volte ribadita anche dall'Organizzazione Mondiale della Sanità - non sono oggetto di questa relazione; però occorre chiarire alcuni concetti:

Progetto: Fattoria Solare "Casa Scaccia" AGRI BRUZIA SOCIETÀ AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione Campi Elettromagnetici	Pagina: 15
--	---	---------------

Le commissioni hanno redatto normative da applicarsi esclusivamente alle esposizioni acute.	Non è vero: i testi delle varie norme precisano esplicitamente che i limiti per la popolazione si applicano ad esposizioni di durata indefinita, anche se raccomandano di applicare criteri cautelativi ispirati al principio ALARA e al concetto di evitare le esposizioni non necessarie.
Nel redigere le normative le commissioni hanno del tutto ignorato i risultati degli studi epidemiologici.	Non è vero: i risultati di tali studi vengono citati, analizzati, confrontati e commentati in dettaglio nei documenti che descrivono l'attività svolta dalle commissioni.
I commissari hanno deliberatamente voluto mantenere un atteggiamento compiacente nei confronti delle grandi aziende produttrici e distributrici di energia elettrica.	La composizione delle commissioni internazionali, che raccolgono esperti da un gran numero di paesi e da tipologie di istituzioni diverse, personalità spesso all'apice della carriera, sono una buona garanzia di comportamento super partes.

Le persone particolarmente esposte sono quelle che abitano, lavorano o comunque risiedono per lunghi periodi nelle vicinanze di elettrodotti ad alta tensione.

Studi epidemiologici, condotti a partire dalla fine degli anni '70, suggeriscono che i campi elettromagnetici a bassa frequenza possano essere considerati come "probabili cancerogeni", anche se l'associazione tra esposizione a tali campi e l'insorgenza di tumori appare di modesta entità e non è sufficiente a stabilire con certezza una correlazione tra esposizione ed effetto.

La prima ipotesi di cancerogenicità dei campi elettromagnetici a bassa frequenza (ELF, Extremely Low Frequency) fu formulata per la prima volta da Nancy Wertheimer e Ed Leeper nel 1979, con l'articolo "Electrical wiring configurations and childhood cancer" pubblicato sull'American Journal of Epidemiology.

Numerose successive indagini su residenti in abitazioni vicine a installazioni elettriche (esposti a campi magnetici di frequenza 50-60 Hz e intensità 0,2-0,4  $\mu$ T) hanno evidenziato un possibile aumento del rischio di leucemie e tumori cerebrali nei bambini; indagini su categorie di lavoratori professionalmente esposti hanno evidenziato un aumento di rischio di leucemie e di tumori mammari nella donna.

Altri studi, altrettanto ben condotti, hanno dato risultati negativi o contraddittori: i casi di tumori si sono dimostrati solo in alcuni casi leggermente superiori alla media, e non attribuibili con certezza all'esposizione a radiazioni.

Progetto: Fattoria Solare "Casa Scaccia" AGRI BRUZIA SOCIETÀ AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione Campi Elettromagnetici	Pagina: 16
--	---	---------------

La correlazione tra l'esposizione cronica a campi elettromagnetici a bassa frequenza e l'insorgere di certi tipi di tumori, in particolare leucemie infantili, è quindi ancora incerta. Inoltre, non vi sono ancora conferme sperimentali dell'azione dei campi a basse frequenze sul materiale genetico cellulare, né è stata ancora formulata una convincente ipotesi di meccanismo biologico che spieghi l'effetto di questi campi sulle cellule.

Si ipotizza invece un'azione non tanto diretta (l'energia trasportata dalle onde elettromagnetiche è troppo bassa per rompere anche il più debole legame chimico), quanto piuttosto di promozione dell'insorgenza dei tumori.

Infatti, perché si sviluppi un tumore, è necessaria per prima una mutazione genetica, dovuta a diversi fattori, come l'esposizione ad agenti genotossici (ad esempio l'esposizione a radiazioni ionizzanti) o un errore nella replicazione del DNA. Ma è comunque necessario che vi sia anche un'azione "epigenetica", ovvero capace di favorire la trasformazione di una cellula pre-cancerogena in cellula cancerogena.

Le modalità d'interazione delle radiazioni non ionizzanti con la materia ed i sistemi biologici, gli effetti di tali interazioni e le possibili applicazioni dipendono strettamente dalla frequenza e di conseguenza anche i riferimenti normativi sono differenziati.

### **IN SINTESI:**

- L'esposizione al campo magnetico a 50 Hz di intensità superiore a circa 130.000  $\mu\text{T}$  può avere conseguenze sanitarie gravissime;
- Non esistono effetti accertati per esposizioni al di sotto di circa 1.600  $\mu\text{T}$ ;
- L'Italia è una delle poche nazioni ad avere una legge che prescrive un livello massimo ammissibile per le esposizioni al campo magnetico a 50 Hz; il valore previsto (100  $\mu\text{T}$ ) risulta notevolmente cautelativo rispetto agli effetti accertati.
- Le commissioni di esperti internazionali e l'Organizzazione Mondiale della Sanità hanno più volte ribadito che i risultati degli studi epidemiologici, sebbene non possano essere ignorati, non sono abbastanza consolidati e coerenti da poter essere utilizzati per identificare dei limiti di esposizione;
- L'adozione generalizzata di limiti di esposizione basati sulla SAR (Specific Absorption Rate) (0,2  $\mu\text{T}$ ) comporterebbe dover destinare ingenti risorse economiche all'abbattimento dei livelli di campo magnetico a 50 Hz nell'ambiente e nelle abitazioni; tali risorse dovrebbero inevitabilmente essere distolte da altri settori di prevenzione sanitaria, dove il loro utilizzo sarebbe stato probabilmente molto più efficace, anche in considerazione del limitato impatto sanitario che, pur se dovessero trovare conferma le

Progetto: Fattoria Solare "Casa Scaccia" AGRI BRUZIA SOCIETÀ AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione Campi Elettromagnetici	Pagina: 17
--	---	---------------

---

ipotesi peggiori, risulterebbe associato alle esposizioni al campo magnetico a 50 Hz ai livelli consentiti dalle normative vigenti.

---

Progetto: Fattoria Solare "Casa Scaccia" AGRI BRUZIA SOCIETÀ AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione Campi Elettromagnetici	Pagina: 18
--	---	---------------

## 4. NORMATIVA DI RIFERIMENTO

### 3.1. Le linee guida internazionali

- ✓ 644-1994 IEEE "Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines";
- ✓ ICNIRP Guidelines "1998 Health Physics Society "Guidelines for limiting exposure to time varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)".

### 3.2. Raccomandazioni e direttive europee

- ✓ Raccomandazione del Consiglio 1999/519/CE "Raccomandazione del Consiglio del 12 luglio 1999 relativa alla limitazione dell'esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici da 0 Hz a 300 GHz";
- ✓ Direttiva 2004/40/CE, 29 aprile 2004 "Directive 2004/40/EC of the European Parliament and of the Council on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risk arising from physical agents (electromagnetic fields)".

### 3.3. La normativa italiana

- ✓ CEI 211-6 "Guida per la misura e per la valutazione dei campi elettrici e magnetici nell'intervallo di frequenza 0 Hz – 10 kHz, con riferimento all'esposizione umana".
- ✓ CEI R014-001 "Guida per la valutazione dei campi elettromagnetici attorno ai trasformatori di potenza"
- ✓ CEI 11-60 "Portata al limite termico delle linee elettriche aeree esterne con tensione maggiore di 100 kV"
- ✓ CEI 211-4 "Guida ai metodi di calcolo dei campi elettrici e magnetici generati da linee elettriche".

### 3.4. La legislazione italiana

- ✓ Legge 22 febbraio 2001, n. 36 "Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici";
- ✓ D.P.C.M. 08 luglio 2003 "Fissazione dei limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni a campi elettrici e magnetici alla frequenza di rete (50 Hz) generati dagli elettrodotti".

Questo decreto, per i limiti di esposizione, i valori di attenzione e gli obiettivi di qualità sui campi elettromagnetici alla frequenza di 50 Hz, ha stabilito quanto segue:

Progetto: Fattoria Solare "Casa Scaccia" AGRI BRUZIA SOCIETÀ AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione Campi Elettromagnetici	Pagina: 19
--	---	---------------

*100μT per l'induzione magnetica e 5 kV/m per il campo elettrico, intesi come valori efficaci.*

A titolo di misura cautelativa per la protezione da possibili effetti a lungo termine, eventualmente connessi con l'esposizione ai campi magnetici generati alla frequenza di rete (50Hz), nelle aree gioco per l'infanzia, in ambienti abitativi, in ambienti scolastici e nei luoghi adibiti a permanenza non inferiori a quattro ore giornaliere, si assume per l'induzione magnetica il valore di attenzione di 10μT, da intendersi come mediana dei valori nell'arco di 24 ore nelle normali condizioni di esercizio.

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 dei nuovi insediamenti e delle nuove aree di cui sopra in prossimità di linee ed installazioni elettriche già presenti nel territorio, ai fini della progressiva minimizzazione dell'esposizione ai campi elettrici e magnetici generati dagli elettrodotti operanti alla frequenza di 50 Hz, è fissato l'obiettivo di qualità di 3 μT per il valore dell'induzione magnetica, da intendersi come mediana dei valori nell'arco di 24 ore nelle normali condizioni di esercizio.

Frequenza f = 50 Hz	Intensità di campo elettrico E [kV/m]	Induzione magnetica B [μT]
Limite di esposizione * (da non superare mai)	5	100
Valore di attenzione ** (da non superare in ambienti abitativi già esistenti e comunque nei luoghi adibiti a permanenze non inferiori a 4 ore)	-	10
Obiettivo di qualità ** (da non superare per i nuovi elettrodotti o le nuove abitazioni in prossimità di elettrodotti esistenti dove per nuovo si intende costruiti/e dopo il 13/09/2003)	-	3

\* Valori efficaci

\*\* Mediana dei valori nell'arco delle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio

*Limiti di esposizione, valori di attenzione e obiettivi di qualità fissati dal DPCM 08/07/2003  
(G. U. Serie Generale n.199 del 28/08/2003)*

Progetto: Fattoria Solare "Casa Scaccia" AGRI BRUZIA SOCIETÀ AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione Campi Elettromagnetici	Pagina: 20
--	---	---------------

### 3.5. DM 29/05/08 (fasce di rispetto per elettrodotti)

Differenza simbolica tra fascia di rispetto e area (o distanza) di prima approssimazione:

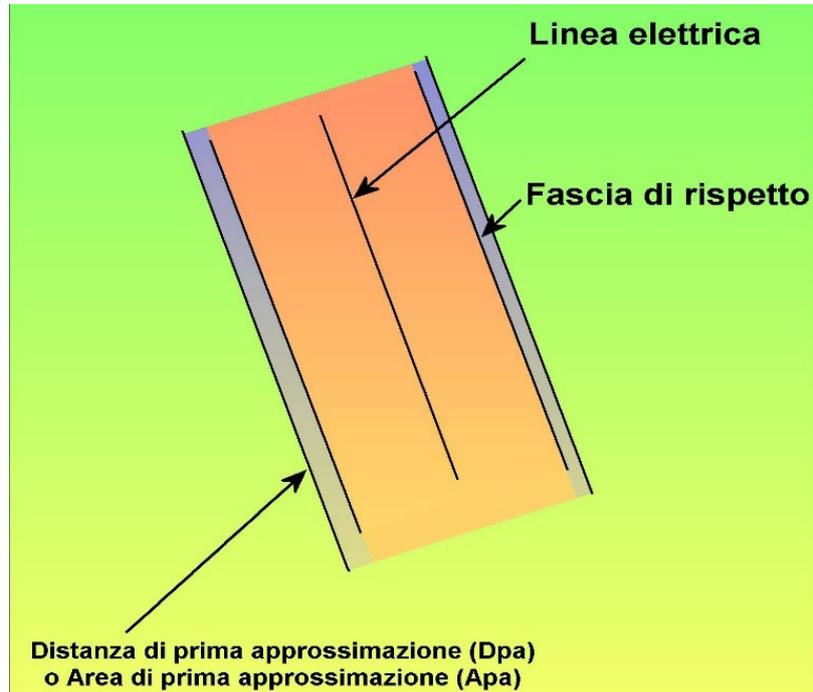


Figura 5: Fascia di rispetto, Dpa e Apa

Tabella 1: Correnti per il calcolo delle fasce di rispetto nei diversi tipi di linee

	<b>Tipo di corrente da utilizzare per il calcolo della fascia di rispetto</b>
<b>Linee aeree con tensione superiore a 100 kV</b>	Portata in corrente in servizio normale come definita dalla norma Cei 11-60 articolo 2.6: "È la 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". Deve essere calcolata per il periodo stagionale (caldo o freddo) in cui essa è più elevata.
<b>Linee aeree con tensione inferiore a 100 kV</b>	Portata in corrente in regime permanente fissata dai proprietari/gestori della linea in relazione ai carichi attesi con riferimento alle condizioni progettuali assunte per il dimensionamento dei conduttori.
<b>Linee in cavo</b>	Portata in regime permanente come definita dalla norma Cei 11-17 articolo 3.5 "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".

Progetto: Fattoria Solare "Casa Scaccia" AGRI BRUZIA SOCIETÀ AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione Campi Elettromagnetici	Pagina: 21
--	---	---------------

Tabella 2: Campo di applicazione del DM 29/05/08 (fasce di rispetto per elettrodotti)

<b>Il DM 29/05/08 si applica a:</b>	Elettrodotti (linee, cabine, stazioni) esistenti (solo se vicini a nuovi fabbricati) o in progetto, con linee aeree o interrate														
<b>Il DM 29/05/08 non si applica a:</b>	Linee esercite a frequenza diversa da quella di rete (50 Hz)	In tutti questi casi, la non applicabilità del decreto deriva dalla considerazione che le fasce di rispetto che si calcolerebbero sarebbero comunque inferiori alle distanze previste dal DI 449/88 e dal DM 16/01/91. Tali decreti prevedono delle distanze minime dei conduttori da fabbricati, terreni e acque non navigabili, in riferimento a possibili effetti sulla salute derivanti dai campi elettromagnetici prodotti dalle linee.													
	Linee definite di classe zero secondo il DI 449/88 ( <i>"le linee telefoniche, telegrafiche, per segnalazione e comando a distanza in servizio di impianti elettrici, le quali abbiano tutti o parte dei loro sostegni in comune con linee elettriche di trasporto o di distribuzione o che, pur non avendo con queste alcun sostegno in comune, siano dichiarate appartenenti a questa categoria in sede di autorizzazione"</i> )														
	Linee definite di prima classe secondo il DI 449/88 ( <i>"le linee di trasporto o distribuzione di energia elettrica, la cui tensione nominale è inferiore o uguale a 1000 V e le linee in cavo per illuminazione pubblica in serie la cui tensione nominale è inferiore o uguale a 5000 V"</i> )	<table border="1"> <thead> <tr> <th data-bbox="858 689 1040 943">Tipologia linea</th> <th data-bbox="1040 689 1273 943">Distanza dai fabbricati [m]</th> <th data-bbox="1273 689 1490 943">Altezza minima da terreni e specchi d'acqua non navigabili [m]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="858 943 1040 1308">Classe zero e prima</td> <td data-bbox="1040 943 1273 1308">I conduttori devono essere inaccessibili dai fabbricati senza l'aiuto di mezzi speciali o senza deliberato proposito</td> <td data-bbox="1273 943 1490 1308">5</td> </tr> <tr> <td data-bbox="858 1308 1040 1384">MT a 15-20kV</td> <td data-bbox="1040 1308 1273 1384">3,15</td> <td data-bbox="1273 1308 1490 1384">6</td> </tr> <tr> <td data-bbox="858 1384 1040 1527">Linee in cavo aereo di qualsiasi classe</td> <td data-bbox="1040 1384 1273 1527">Non è richiesta nessuna distanza</td> <td data-bbox="1273 1384 1490 1527">5</td> </tr> </tbody> </table>	Tipologia linea	Distanza dai fabbricati [m]	Altezza minima da terreni e specchi d'acqua non navigabili [m]	Classe zero e prima	I conduttori devono essere inaccessibili dai fabbricati senza l'aiuto di mezzi speciali o senza deliberato proposito	5	MT a 15-20kV	3,15	6	Linee in cavo aereo di qualsiasi classe	Non è richiesta nessuna distanza	5	
	Tipologia linea	Distanza dai fabbricati [m]	Altezza minima da terreni e specchi d'acqua non navigabili [m]												
	Classe zero e prima	I conduttori devono essere inaccessibili dai fabbricati senza l'aiuto di mezzi speciali o senza deliberato proposito	5												
MT a 15-20kV	3,15	6													
Linee in cavo aereo di qualsiasi classe	Non è richiesta nessuna distanza	5													
Linee MT in cavo cordato ad elica (interrate o aeree)	MT a 15-20kV	3,15	6												
	Linee in cavo aereo di qualsiasi classe	Non è richiesta nessuna distanza	5												

Progetto: Fattoria Solare "Casa Scaccia" AGRI BRUZIA SOCIETÀ AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione Campi Elettromagnetici	Pagina: 22
--	---	---------------

## 5. METODOLOGIA DI CALCOLO

### 4.1. Valutazione delle fasce di rispetto

La regione di calcolo deve avere un'estensione almeno pari a quella del sito di interesse.

Devono essere effettuate tutte le sezioni del campo magnetico a partire dalla quota più bassa del sito di interesse fino oltre l'altezza dei conduttori (nel caso di linee interrate dalla quota più bassa a quella più alta di interesse).

L'estensione della fascia di rispetto è la massima distanza dall'asse della linea, proiettata al suolo verticalmente (filo a piombo), alla quale si calcolano i 3  $\mu\text{T}$ . Per tale valutazione si utilizzano i parametri normativi.

### 4.2. Valutazione del volume di rispetto dell'obiettivo di qualità

Il volume di rispetto dell'obiettivo di qualità è racchiuso dall'isosuperficie di campo magnetico a 3  $\mu\text{T}$ . Per tale valutazione si utilizzano i parametri di cui al paragrafo 3.1 con la mediana nelle 24 ore come corrente di calcolo.

Per la determinazione di detto volume, si calcola la distanza massima dall'asse della linea a cui compaiono i 3  $\mu\text{T}$  per almeno tre altezze ritenute significative: due metri dal suolo, altezza in gronda dell'edificio più alto aumentata di 2 m, altezza relativa alla massima estensione del volume.

Nel caso di linee elettriche interrate vengono fornite tutte le distanze di cui sopra oltre alla valutazione effettuata a livello del suolo.

### 4.3. Linee elettriche a media tensione

La struttura da considerare per il calcolo, comunicata dal gestore, può venire verificata mediante sopralluogo.

Per le linee aeree l'estensione della fascia di rispetto per le varie tipologie di sostegni è riportata nella seguente tabella. Il calcolo è stato effettuato in base alle tipologie di traliccio fornite dal gestore rappresentative dei sostegni con la massima spaziatura tra i conduttori e con le portate massime dichiarate dal gestore.

Progetto: Fattoria Solare "Casa Scaccia" AGRI BRUZIA SOCIETÀ AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione Campi Elettromagnetici	Pagina: 23
--	---	---------------

Tipologia	Estensione della fascia	Note	Portata di calcolo
Sostegno Stelo Semplice Terna	7.1 m / 7.6 m	(lato 1 cond. / lato 2 cond.)	350 A
Sostegno Stelo Doppia Terna	10.7 m	(struttura simmetrica)	350 A
Sostegno Traliccio Semplice Terna	8.6 m / 9.1 m	(lato 1 cond. / lato 2 cond.)	350 A
Sostegno Traliccio Doppia Terna	11.5 m	(struttura simmetrica)	350 A
Cavo Cordato Aereo	1.0 m	(struttura simmetrica)	350 A

#### 4.4. Induzione magnetica infrastrutture elettriche

Scopo del presente capitolo è quello di descrivere le emissioni elettromagnetiche associate alle infrastrutture elettriche che verranno installate e connesse.

In particolare, saranno valutate le emissioni elettromagnetiche derivanti dalle cabine elettriche - ovvero dalle Power Station (PS) e dalla Cabine di Raccolta - e ai cavidotti previsti per la connessione dell'impianto alla Rete di Distribuzione come previsto in STMG.

##### 4.4.1. Moduli Fotovoltaici

I moduli fotovoltaici lavorano in corrente e tensione continue e non in corrente alternata; per cui la generazione di campi variabili è limitata ai soli transitori di corrente (durante la ricerca del MPP da parte dell'inverter, e durante l'accensione o lo spegnimento) e sono comunque di brevissima durata. Nella certificazione dei moduli fotovoltaici alla norma CEI 82-8 (IEC 61215) non sono comunque menzionate prove di compatibilità elettromagnetica, poiché assolutamente irrilevanti.

##### 4.4.2. Inverter

Gli inverter sono apparecchiature che al loro interno utilizzano un trasformatore ad alta frequenza per ridurre le perdite di conversione. Essi, pertanto, sono costituiti per loro natura da componenti elettronici operanti ad alte frequenze. D'altro canto, il legislatore ha previsto che tali macchine, prima di essere immesse sul mercato, possiedano le necessarie certificazioni a garantirne sia l'immunità dai disturbi elettromagnetici esterni, sia le ridotte emissioni per minimizzarne l'interferenza elettromagnetica con altre apparecchiature elettroniche posizionate nelle vicinanze o con la rete elettrica stessa (via cavo).

A questo scopo gli inverter prescelti possiedono la certificazione di rispondenza alle normative di compatibilità elettromagnetica (EMC) (CEI EN 50273 (CEI 95-9), CEI EN 61000-6-3 (CEI 210-65), CEI EN 61000-2-2 (CEI 110-10), CEI EN 61000-3-2 (CEI 110-31), CEI EN 61000-3-3 (CEI 110-28), CEI EN 55022 (CEI 110-5), CEI EN 55011 (CEI 110-6)).

Progetto: Fattoria Solare "Casa Scaccia" AGRI BRUZIA SOCIETÀ AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione Campi Elettromagnetici	Pagina: 24
--	---	---------------

Tra gli altri aspetti queste norme riguardano:

- Livelli armonici: le direttive del gestore di rete prevedono un THD globale (non riferito al massimo della singola armonica) inferiore al 5% (inferiore all'8% citato nella norma CEI 110-10). Gli inverter presentano un THD globale contenuto entro il 3%;
- Disturbi alle trasmissioni di segnale operate dal gestore di rete in super-imposizione alla trasmissione di energia sulle sue linee;
- Variazioni di tensione e frequenza: la propagazione in rete di queste ultime è limitata dai relè di controllo della protezione di interfaccia asservita al dispositivo di interfaccia (le fluttuazioni di tensione e frequenze sono però causate per lo più dalla rete stessa, e quindi si rendono necessarie finestre abbastanza ampie per evitare una continua inserzione e disinserzione dell'impianto fotovoltaico);
- La componente continua immessa in rete: il trasformatore elevatore contribuisce a bloccare tale componente (il dispositivo di interfaccia di ogni inverter interviene in presenza di componenti continue maggiori dello 0,5% della corrente nominale);
- Le questioni di compatibilità elettromagnetica concernenti i buchi di tensione (fino ai 3 s in genere) sono in genere dovute al coordinamento delle protezioni effettuato dal gestore di rete locale.

#### 4.4.3. Elettrodotti interrati

Per quanto riguarda il rispetto delle distanze da ambienti presidiati ai fini dei campi elettrici e magnetici, si è tenuto conto del limite di qualità dei campi magnetici, fissato dalla suddetta legislazione a 3 µT.

La tipologia di cavidotti presenti nell'impianto prevede all'interno del campo fotovoltaico l'utilizzo di soli cavi tripolari ad elica (disposti a trifoglio), per i quali vale quanto riportato nella norma CEI 106-11 e nella norma CEI 11-17.

Come illustrato nella suddetta norma CEI 106-11 la ridotta distanza tra le fasi e la loro continua trasposizione, dovuta alla cordatura, fa sì che l'obiettivo di qualità di 3µT, anche in condizioni limite con conduttori di sezione elevata, venga raggiunto già a brevissima distanza dall'asse del cavo stesso.

L'analisi che si applica è relativa alle linee in cavo interrato con cavi unipolari posati a trifoglio:

$$B = \frac{P * I}{R^2} * 0,1 * \sqrt{6}$$

Formula valida per  $R \gg P$ . Dove:

- B [µT] è l'induzione magnetica calcolata alla distanza R;

Progetto: Fattoria Solare "Casa Scaccia" AGRI BRUZIA SOCIETÀ AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione Campi Elettromagnetici	Pagina: 25
--	---	---------------

- P [m] è la distanza fra i conduttori disposti ai vertici di un triangolo (in caso di distanze differenti, P diventa la media delle distanze fra i conduttori);
- I [A] è la corrente, simmetrica ed equilibrata che attraversa i conduttori;
- R [m] è la distanza dal baricentro dei conduttori.

È anche possibile calcolare le distanze R' ed R<sub>0</sub>:

$$R' = 0,286 * P * I$$

$$R' = d + h$$

Formula valida per R >> P. Dove:

- R' [m] è la distanza dal baricentro dei conduttori alla quale l'induzione magnetica si riduce al valore dell'obiettivo di qualità;
- P [m] è la distanza fra i conduttori disposti ai vertici di un triangolo (in caso di distanze differenti, P diventa la media delle distanze fra i conduttori);
- I [A] è la corrente, simmetrica ed equilibrata che attraversa i conduttori;
- d [m] è la profondità di posa;
- h [m] è l'altezza dal livello del suolo.

$$R_0 = \sqrt{(0,082 * P * I - d^2)}$$

Formula valida per R >> P. Dove:

- R<sub>0</sub> [m] è la distanza dall'asse della linea a livello del suolo alla quale l'induzione magnetica si riduce al valore dell'obiettivo di qualità;
- P [m] è la distanza fra i conduttori disposti ai vertici di un triangolo (in caso di distanze differenti, P diventa la media delle distanze fra i conduttori);
- I [A] è la corrente, simmetrica ed equilibrata che attraversa i conduttori;
- d [m] è la profondità di posa.

Si può prevedere infine un campo magnetico preesistente, in base alla area in cui si trova il campo fotovoltaico da analizzare. Di conseguenza:

$$B_{TOT} = B_0 + B$$

Dove:

- B<sub>TOT</sub> [μT] è l'induzione magnetica totale;
- B<sub>0</sub> [μT] è l'induzione magnetica preesistente;
- B [μT] è l'induzione magnetica dell'elettrodotto.

Progetto: Fattoria Solare "Casa Scaccia" AGRI BRUZIA SOCIETÀ AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione Campi Elettromagnetici	Pagina: 26
--	---	---------------

#### 4.4.4. Cabine elettriche

Per quanto riguarda le cabine elettriche, sia di trasformazione che di raccolta, le principali sorgenti di emissione sono i trasformatori e i quadri elettrici, all'interno dei quali confluiscono i cavi.

Occorre calcolare la Distanza di Prima Approssimazione (DPA), intesa come distanza da ciascuna delle pareti (tetto, pavimento e pareti laterali), applicando la seguente formula:

$$DPA = 0,40942 * X^{0.5242} * \sqrt{I}$$

Dove:

- DPA [m] è la distanza di prima approssimazione;
- I [A] è la corrente nominale BT;
- x [m] è il diametro esterno del cavo ottenuto simulando una linea trifase con cavi paralleli in uscita dal trasformatore.

Tale formula è valida per cabine elettriche con un unico trasformatore, nonché per cabine elettriche di tipo box (dimensioni mediamente di 4 m x 2,4 m, altezze di 2,4 m e 2,7 m) oppure cabine secondarie di specifica tecnica DG2061 edizioni 7 e 8 (dimensioni di circa 5,6m x 2,4 m, altezza 2,4 m).

Progetto: Fattoria Solare "Casa Scaccia" AGRI BRUZIA SOCIETÀ AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione Campi Elettromagnetici	Pagina: 27
--	---	---------------

## 6. ANALISI E CALCOLO INDUZIONE MAGNETICA

Nel presente capitolo si riportano i calcoli effettuati sui vari componenti di impianto, sulla base delle leggi fisiche e dei richiami normativi sopra descritti.

Le suddette formule sono state applicate al fine di confermare il rispetto dei limiti previsti sui singoli componenti proposti in impianto. Nella fattispecie le stesse sono state applicate sulle singole linee elettriche BT ed AT (36 kV) di impianto. Al fine di valutare, invece, il contributo di più linee vicine nonché il contributo delle Cabine Elettriche di impianto, anche al netto dell'allestimento delle stesse (correnti in gioco, componenti elettrici e il loro reciproco posizionamento, ecc.), è stata condotta analisi mediante software Magic®, che permette di studiare le sorgenti mediante l'integrazione della legge di Biot-Savart.

I calcoli sono stati eseguiti considerando la profondità di posa delle linee interrate pari a:

- 1,2 m per le linee AT interne al campo fotovoltaico;
- 1,1 m per le linee BT interne al campo fotovoltaico.

È stato altresì considerato un campo magnetico preesistente pari a 0,07  $\mu$ T.

Le valutazioni sono state condotte in ogni caso in riferimento ad un'altezza dal livello del suolo pari a 1,5 m (altezza uomo) e nel caso delle Cabine elettriche è stata altresì valutata la quota pari al piano di campagna per la determinazione della DPA.

### 5.1. Linee AT (36 kV) in cavo interrato con cavi unipolari posati a trifoglio

L'impianto agrivoltaico denominato "Casa Scaccia" ha n°11 Power Station (c.d. PS) e n°5 Storage Power Station (c.d. SPS). Le PS sono connesse alla Cabina di Raccolta mediante n°2 linee ad anello; le SPS, invece, sono collegate alla stessa Cabina di Raccolta tramite n°1 linea ad anello. Tali linee ad anello sono caratterizzate da livelli di tensione 20,8/36 kV e risultano così strutturate:

- **1° anello PS:** Linea in cavo interrato con cavi unipolari posati a trifoglio del tipo (N)A2XS(F)2Y 3x1x500 mmq che collega n°6 PS (1-2-3-4-7-6);
- **2° anello PS:** Linea in cavo interrato con cavi unipolari posati a trifoglio del tipo (N)A2XS(F)2Y 3x1x500 mmq che collega n°5 PS (5-8-9-10-11);
- **Anello SPS:** Linea in cavo interrato con cavi unipolari posati a trifoglio del tipo (N)A2XS(F)2Y 3x1x150 mmq che collega n°5 SPS (1-2-3-4-5).

Si evidenzia che all'interno dell'area di impianto i conduttori di andata e di ritorno appartenenti allo stesso anello o ad anelli diversi possono condividere lo stesso cavidotto, come mostrato nelle tavole di progetto.

Si riporta di seguito una tabella contenente i dati utilizzati per le verifiche del limite di esposizione, del valore di attenzione e dell'obiettivo di qualità di una generica linea 20,8/36 kV appartenente agli anelli che collegano le PS:

		1° anello PS	2° anello PS
Potenza apparente	S [VA]	23.667.000	21.000.000
Tensione	V [V]	36000	36000
Fattore di potenza	cos(Φ) [rad]	0,9	0,9
Corrente	I [A]	421,73	374,21
Diametro esterno cavo	Φ <sub>est</sub> [mm]	54	54
Distanza fra i conduttori	P [m]	0,054	0,054
Distanza obiettivo di qualità	R' [m]	1,36	1,29
Profondità di posa	d [m]	1,2	1,2
Altezza dal livello del suolo	h [m]	0,16	0,09
Distanza dall'asse della linea	R <sub>0</sub> [0]	0,65	0,47
Induzione magnetica preesistente	B <sub>0</sub> [μT]	0,07	0,07
Induzione magnetica totale ad altezza uor	B <sub>tot</sub> (h = 1,5 m) [μT]	0,84	0,75
<b>VERIFICA LIMITE ESPOSIZIONE</b>		<b>VERIFICATO</b>	<b>VERIFICATO</b>
<b>VERIFICA VALORE DI ATTENZIONE</b>		<b>VERIFICATO</b>	<b>VERIFICATO</b>
<b>VERIFICA OBIETTIVO DI QUALITÀ</b>		<b>VERIFICATO</b>	<b>VERIFICATO</b>

Si riporta di seguito una tabella contenente i dati utilizzati per le verifiche del limite di esposizione, del valore di attenzione e dell'obiettivo di qualità di una generica linea 20,8/36 kV appartenente agli anelli che collegano le SPS:

		Anello SPS
Potenza apparente	S [VA]	12.500.000
Tensione	V [V]	36000
Fattore di potenza	cos(Φ) [rad]	0,9
Corrente	I [A]	222,74
Diametro esterno cavo	Φ <sub>est</sub> [mm]	41
Distanza fra i conduttori	P [m]	0,041
Distanza obiettivo di qualità	R' [m]	0,86
Profondità di posa	d [m]	1,2
Altezza dal livello del suolo	h [m]	< 0
Distanza dall'asse della linea	R <sub>0</sub> [0]	< 0
Induzione magnetica preesistente	B <sub>0</sub> [μT]	0,07
Induzione magnetica totale ad altezza uor	B <sub>tot</sub> (h = 1,5 m) [μT]	0,38
<b>VERIFICA LIMITE ESPOSIZIONE</b>		<b>VERIFICATO</b>
<b>VERIFICA VALORE DI ATTENZIONE</b>		<b>VERIFICATO</b>
<b>VERIFICA OBIETTIVO DI QUALITÀ</b>		<b>VERIFICATO</b>

Si riporta di seguito la modellazione mediante software di quanto sopra descritto, tenendo conto della mutua influenza delle linee 20,8/36 kV che condividono lo stesso cavidotto:

- **CAVIDOTTO INTERRATO CON 1 TERNA DI CAVI DISPOSTI A TRIFOGLIO APPARTENENTE AGLI ANELLI CHE COLLEGANO LE PS**

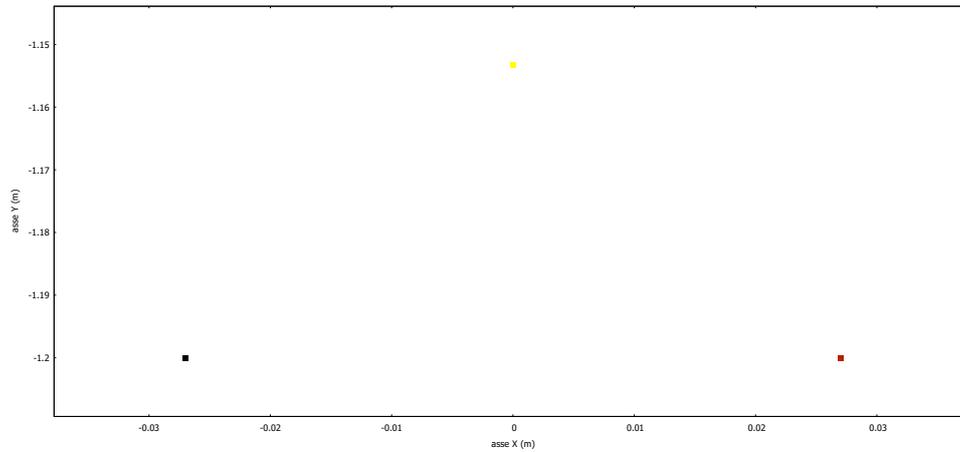


Figura 6: Anello PS, 1 terna, geometria

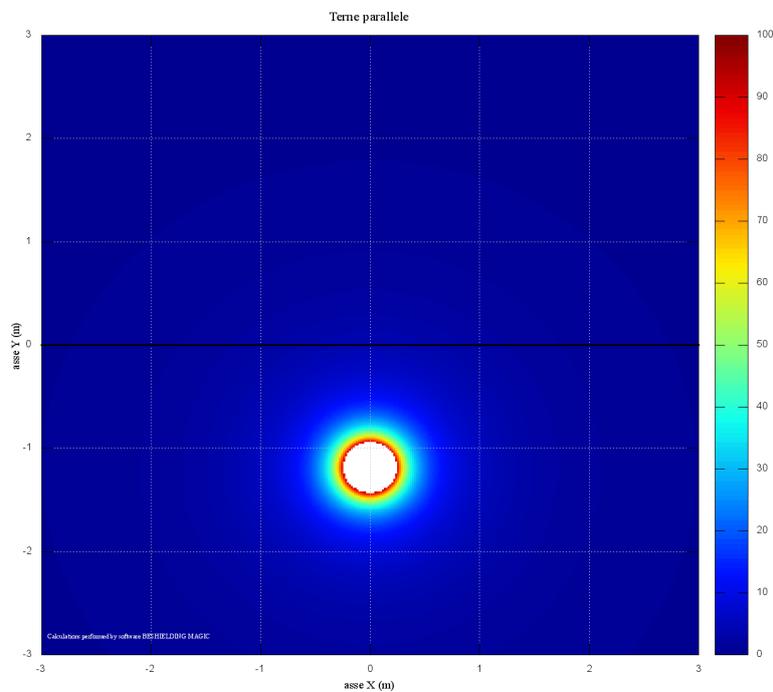


Figura 7: Anello PS, 1 terna, mappa 2D

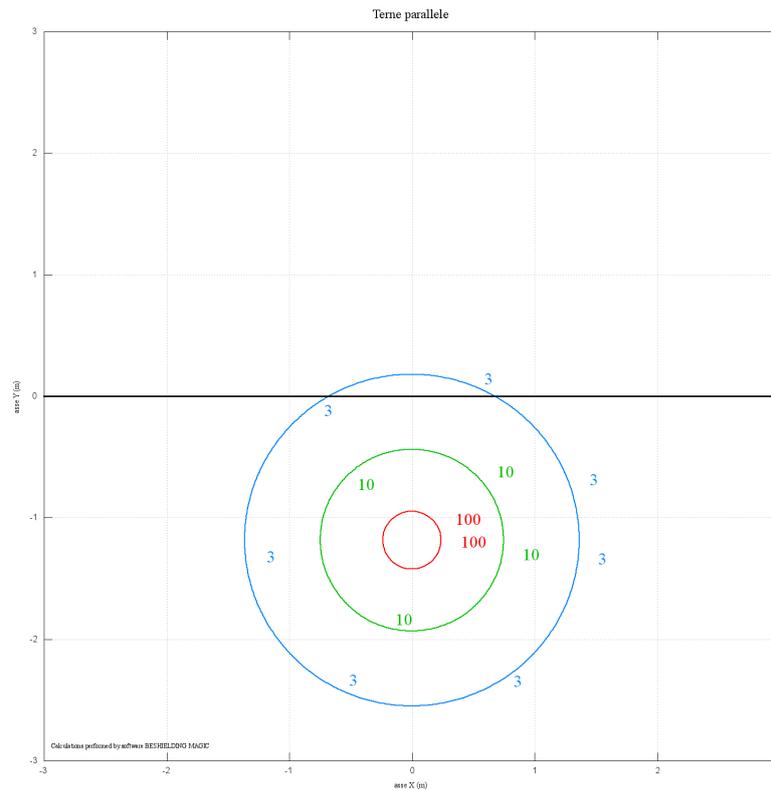


Figura 8: Anello PS, 1 terna, curve isolivello

L'obiettivo di qualità risulta soddisfatto a circa 0,2 m dal livello del suolo, (indicato dalla linea nera).

- **CAVIDOTTO INTERRATO CON 2 TERNE DI CAVI DISPOSTI A TRIFOGLIO APPARTENENTI AGLI ANELLI CHE COLLEGANO LE PS**

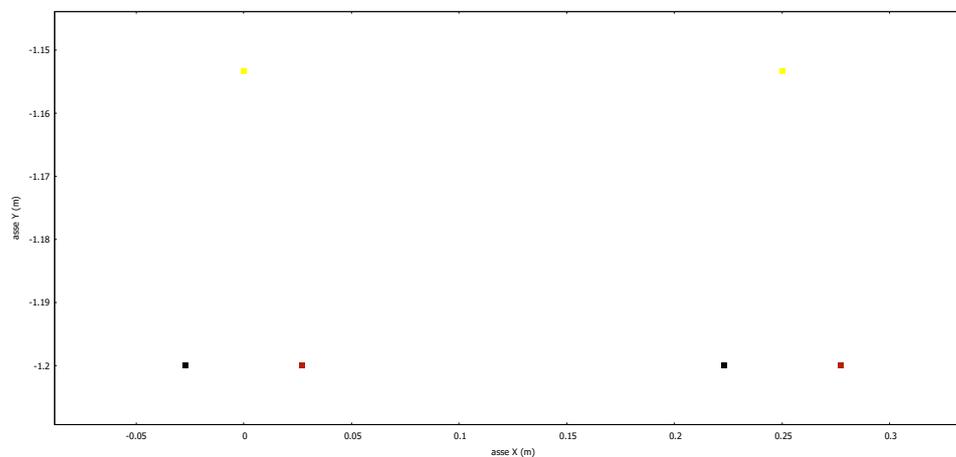


Figura 9: Anello PS, 2 terne, geometria

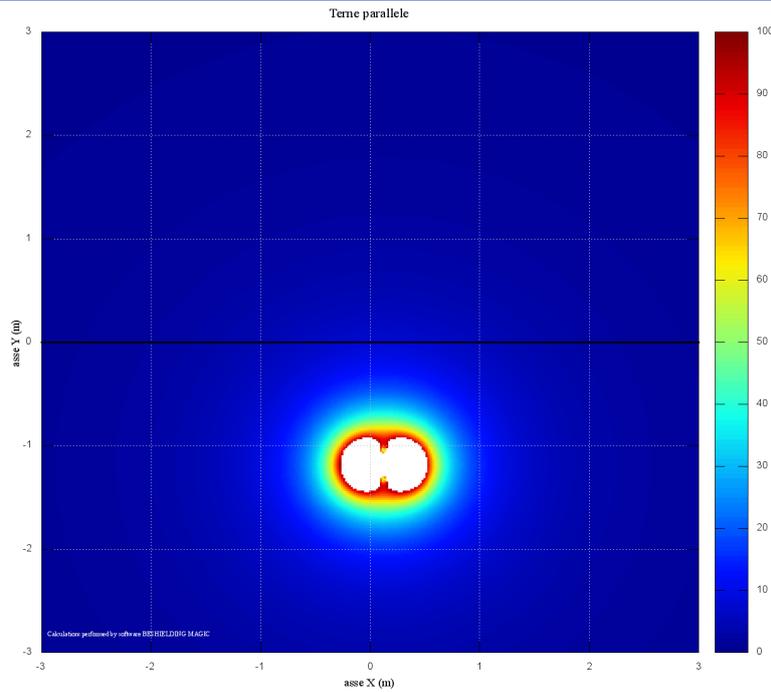


Figura 10: Anello PS, 2 terne, mappa 2D

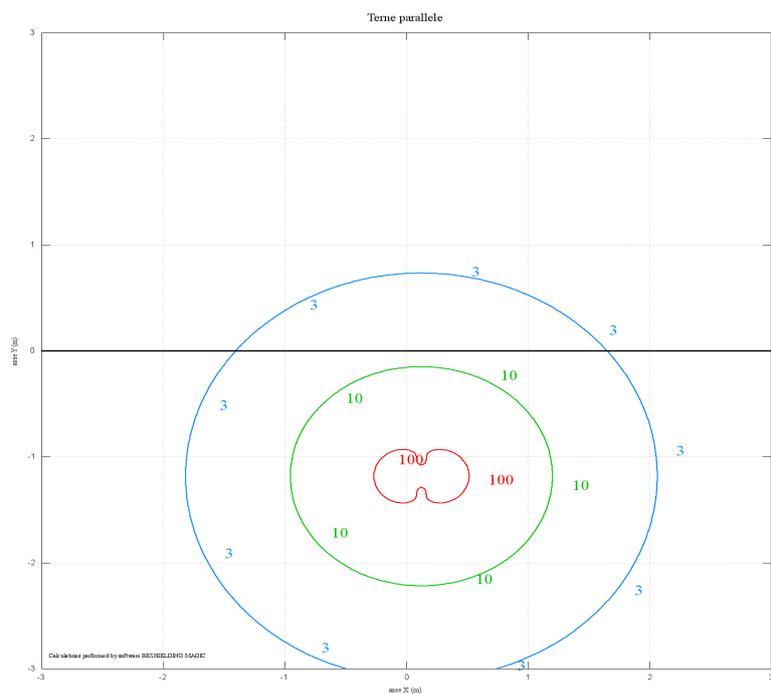


Figura 11: Anello PS, 2 terne, curve isolivello

L'obiettivo di qualità risulta soddisfatto a circa 0,7 m dal livello del suolo (indicato dalla linea nera).

**- CAVIDOTTO INTERRATO CON 3 TERNE DI CAVI DISPOSTI A TRIFOGLIO APPARTENENTI AGLI ANELLI CHE COLLEGANO LE PS**

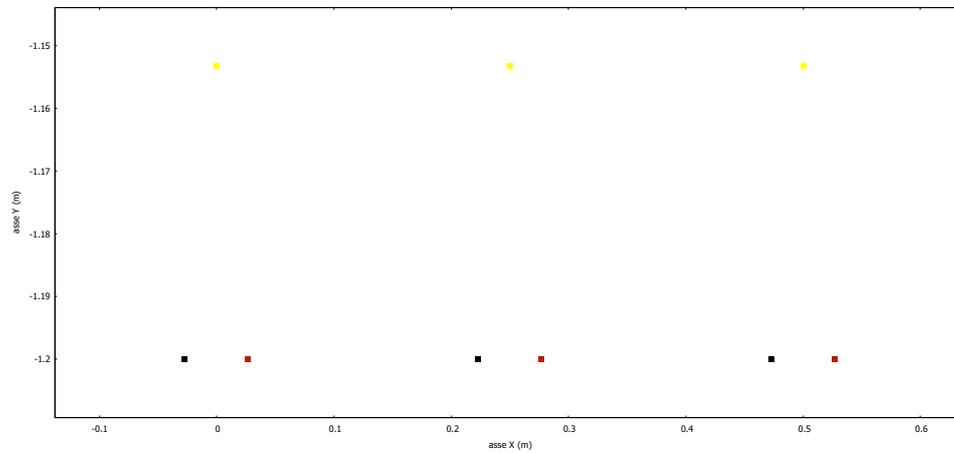


Figura 12: Anello PS, 3 terne, geometria

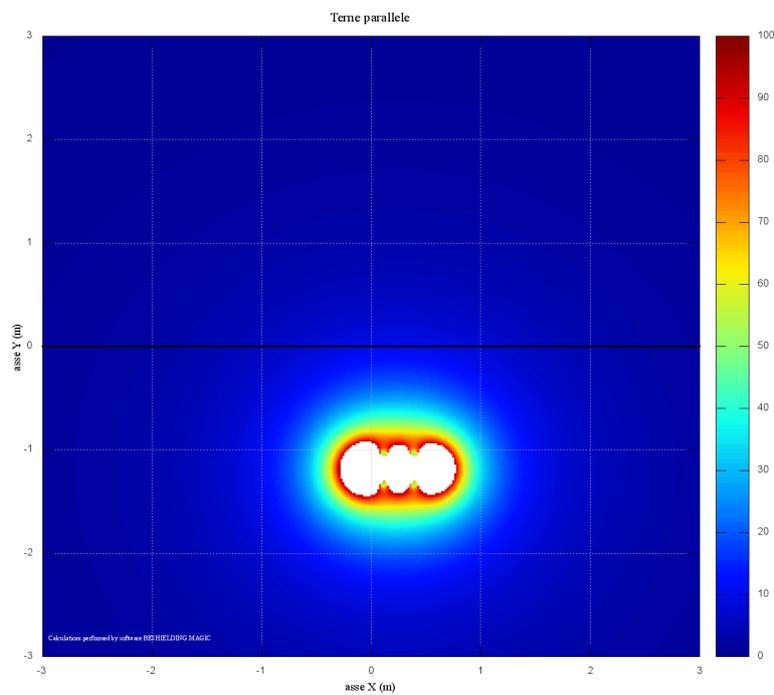


Figura 13: Anello PS, 3 terne, mappa 2D

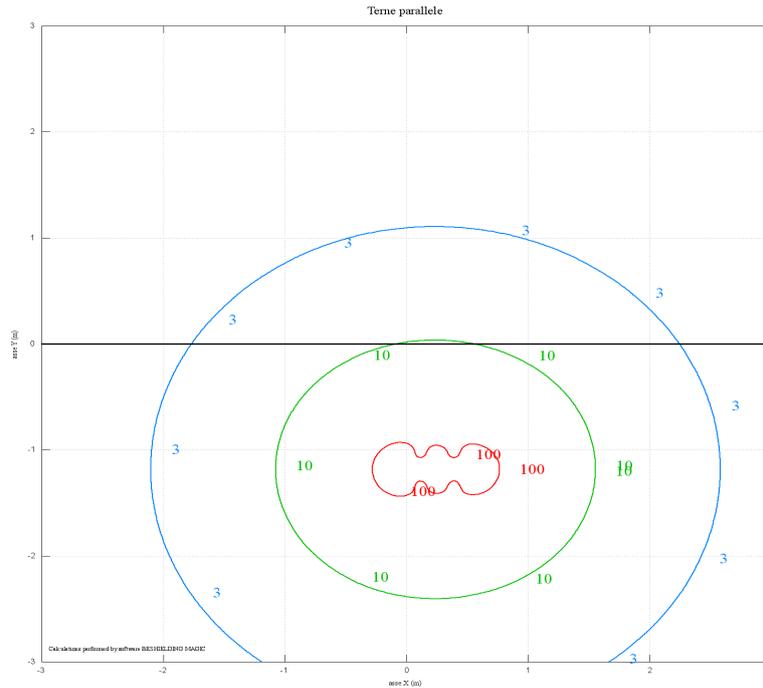


Figura 14: Anello PS, 3 terne, curve isolivello

L'obiettivo di qualità risulta soddisfatto a circa 1,1 m dal livello del suolo. Si evidenzia il raggiungimento del valore di attenzione a circa il livello del suolo (indicato dalla linea nera).

- **CAVIDOTTO INTERRATO CON 4 TERNE DI CAVI DISPOSTI A TRIFOGLIO APPARTENENTI AGLI ANELLI CHE COLLEGANO LE PS**

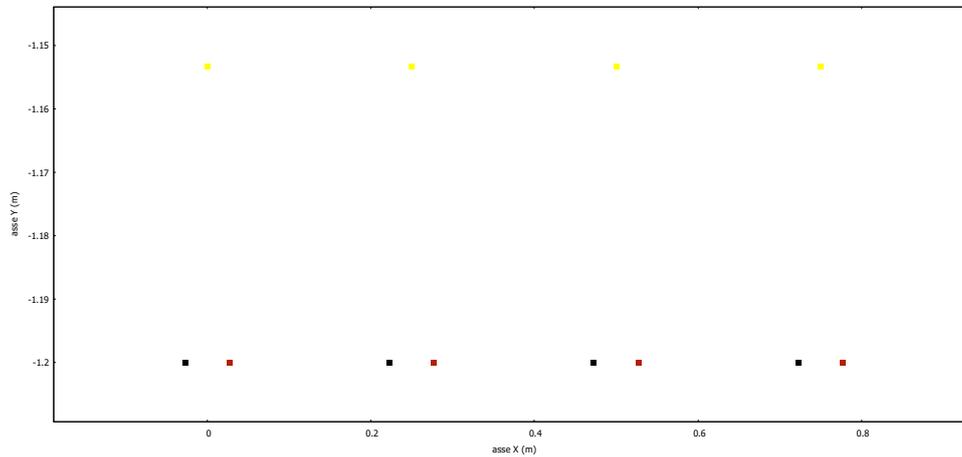


Figura 15: Anello PS, 4 terne, geometria

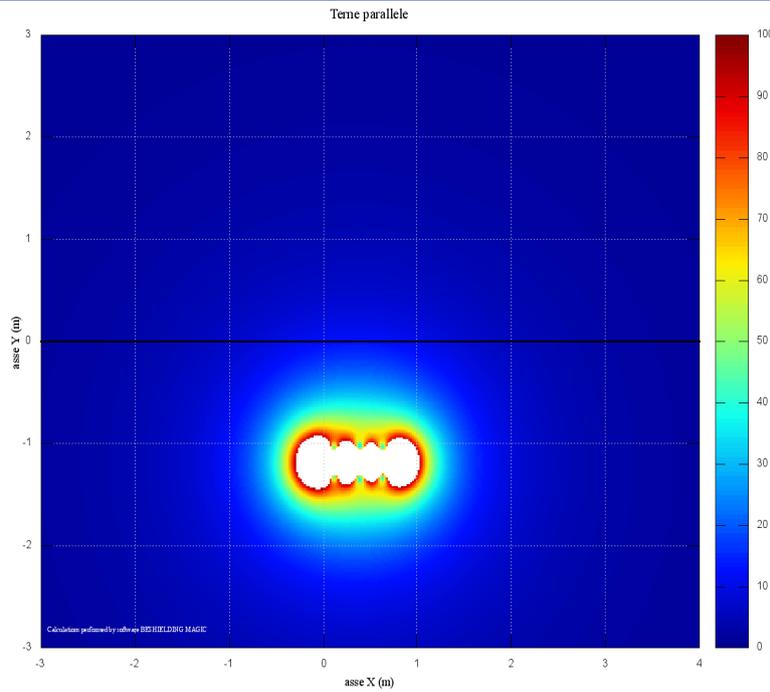


Figura 16: Anello PS, 4 terne, mappa 2D

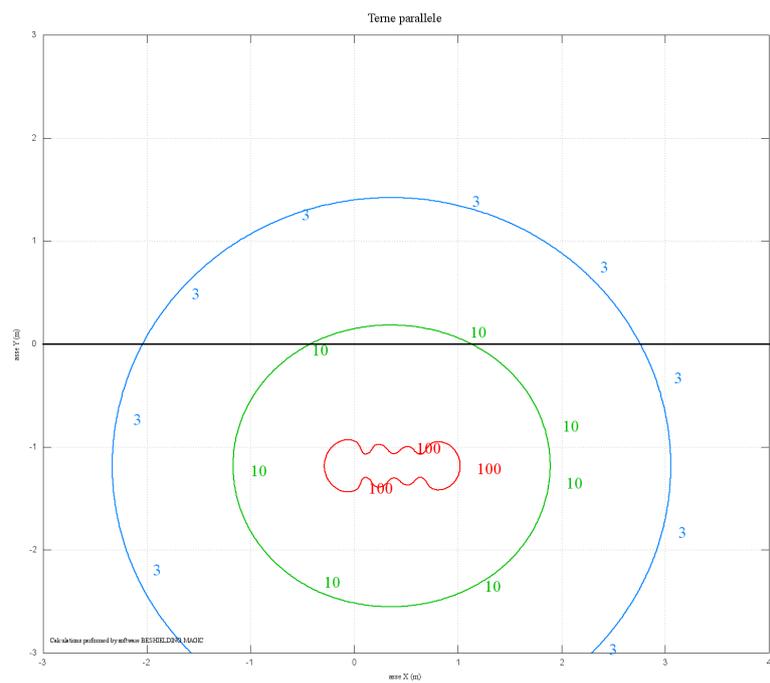


Figura 17: Anello PS, 4 terne, curve isolivello

L'obiettivo di qualità risulta soddisfatto a circa 1,5 m dal livello del suolo. Si evidenzia il raggiungimento del valore di attenzione a circa 0,2 m dal livello del suolo (indicato dalla linea nera).

- **CAVIDOTTO INTERRATO CON 1 TERNA DI CAVI DISPOSTI A TRIFOGLIO APPARTENENTI ALL'ANELLO CHE COLLEGA LE SPS**

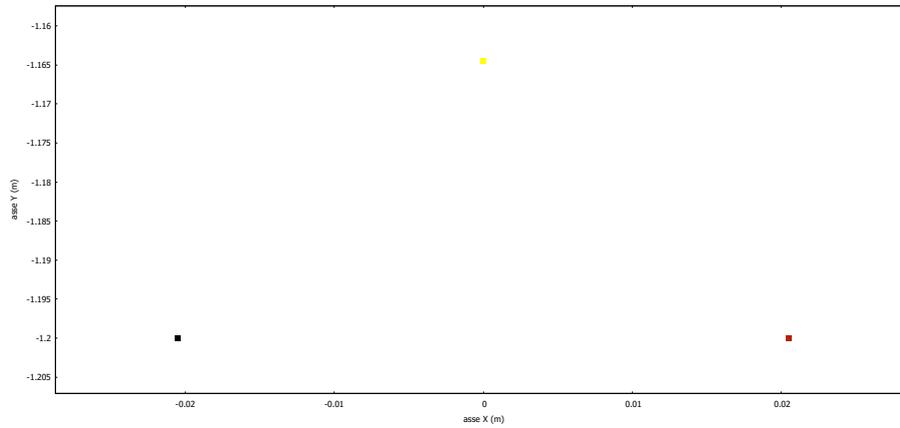


Figura 18: Anello SPS, 1 terna, geometria

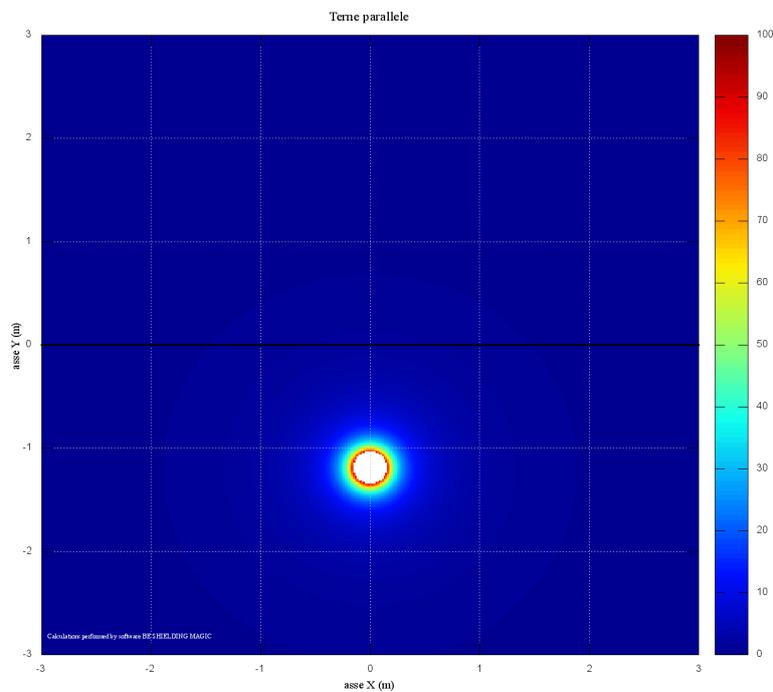


Figura 19: Anello SPS, 1 terna, mappa 2D

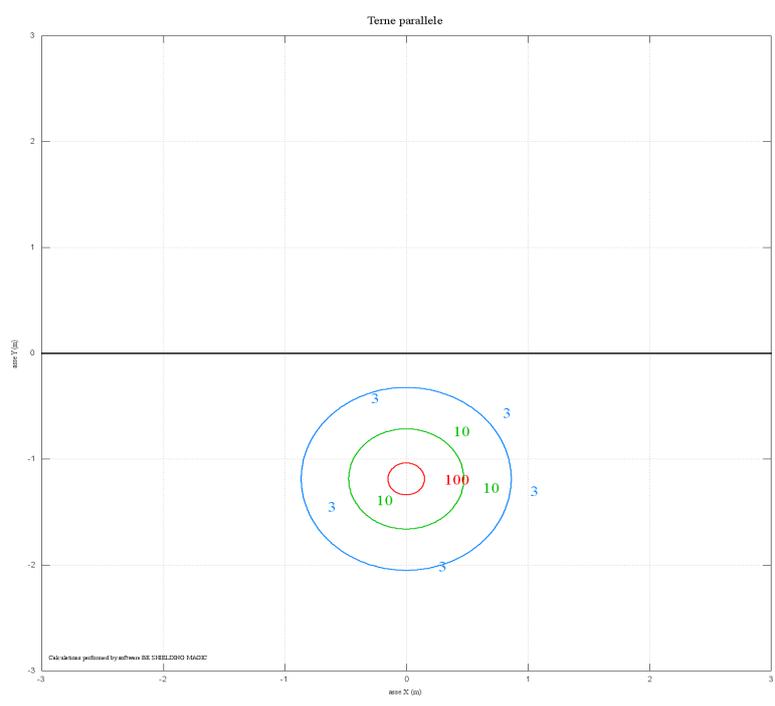


Figura 20: Anello SPS, 1 terna, curve isolivello

L'obiettivo di qualità risulta soddisfatto a circa 0,3 m al di sotto del livello del suolo, pertanto sempre soddisfatto al livello del suolo (indicato dalla linea nera).

- **CAVIDOTTO INTERRATO CON 1 TERNA DI CAVI DISPOSTI A TRIFOGLIO APPARTENENTI ALL'ANELLO CHE COLLEGA LE SPS**

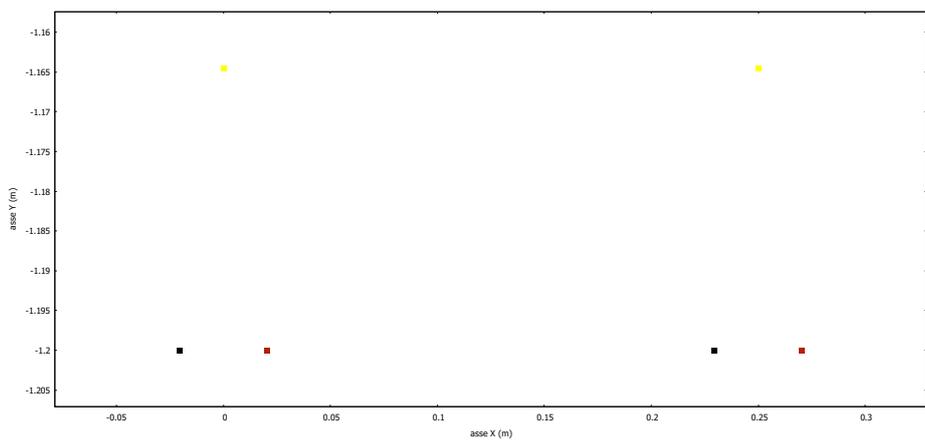


Figura 21: Anello SPS, 2 terne, geometria

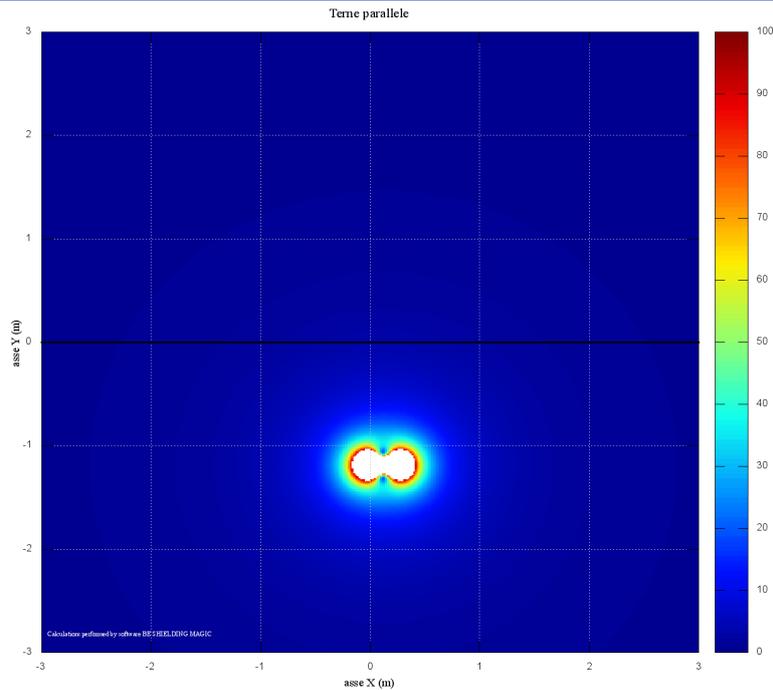


Figura 22: Anello SPS, 2 terne, mappa 2D

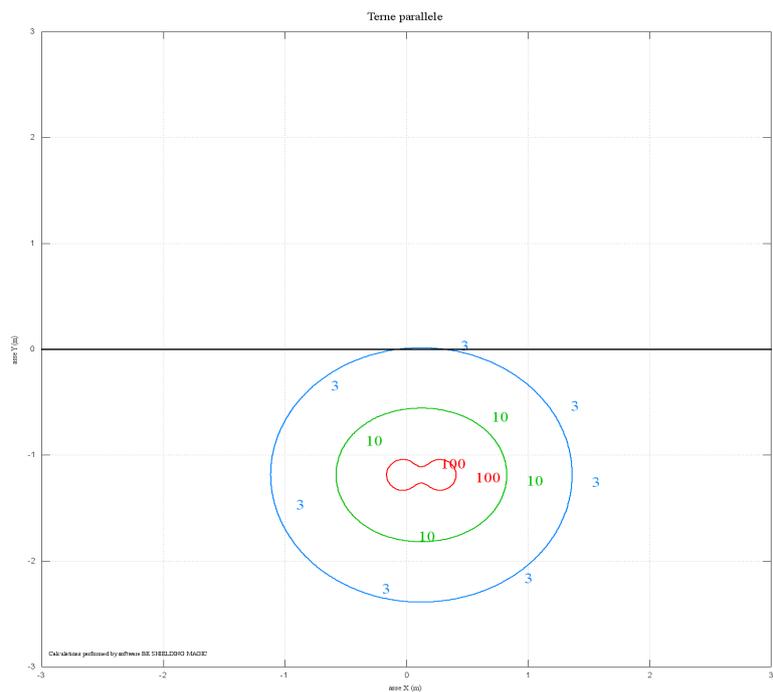


Figura 23: Anello SPS, 2 terne, curve isolivello

L'obiettivo di qualità risulta soddisfatto circa al livello del suolo (indicato dalla linea nera).

## 5.2. Linee BT

All'interno di ogni Power Station è presente uno degli inverter delle seguenti tipologie:

Progetto: Fattoria Solare "Casa Scaccia" AGRI BRUZIA SOCIETÀ AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione Campi Elettromagnetici	Pagina: 38
--	---	---------------

- SMA SC2660 UP;
- SMA SCS2900;
- SMA SC4200 UP.

All'inverter del tipo SMA SC2660 UP e agli inverter del tipo SMA SC4200 UP fanno capo le linee BT provenienti dai Quadri di Parallelo Stringa (c.d. QPS), mentre agli inverter del tipo SMA SCS2900 giungono le linee BT dagli Storage Container del sistema di accumulo.

In entrambi i casi si tratta di linee BT DC che, essendo in corrente continua, non costituiscono sorgenti di induzione magnetica e, pertanto, non sono oggetto della presente relazione.

### 5.3. Cabina di Raccolta

Nel calcolo della distanza di prima approssimazione dalla Cabina di Raccolta, sono state considerate le sorgenti di induzione magnetica elencate:

- Trasformatore 36/0,4 kV da 50 kVA a secco, a servizio degli ausiliari (massima corrente circolante dell'avvolgimento secondario pari a 80,19 A);
- Quadro Parallelo 1 con n°5 celle, nello specifico n°3 partenze linea verso la Cabina Utente (corrente massima circolante nelle linee pari a 339,86 A), n°1 dispositivo generale (corrente massima 1019,57 A) e n°1 scomparto misure;
- Quadro Parallelo 2 con n°8 celle, nello specifico n°4 arrivi linea appartenenti agli anelli di collegamento delle PS (corrente massima circolante negli anelli pari a 421,73 A per il primo e 374,21 A per il secondo anello), n°2 arrivi linea appartenenti all'anello di collegamento delle SPS (corrente massima circolante nell'anello pari a 222,74 A), n°1 protezione trasformatore a servizio degli ausiliari (corrente massima circolante nella linea pari a 0,89 A) e n°1 partenza linea verso il QMT 1;
- QBT 1 a servizio degli ausiliari (corrente massima circolante negli interruttori pari a 40,1 A);
- QBT 2 a servizio degli ausiliari (corrente massima circolante negli interruttori pari a 40,1 A).

Si riportano di seguito i risultati ottenuti mediante lo studio software a livello del suolo ( $h = 0$  m) e ad altezza uomo ( $h = 1,5$  m):

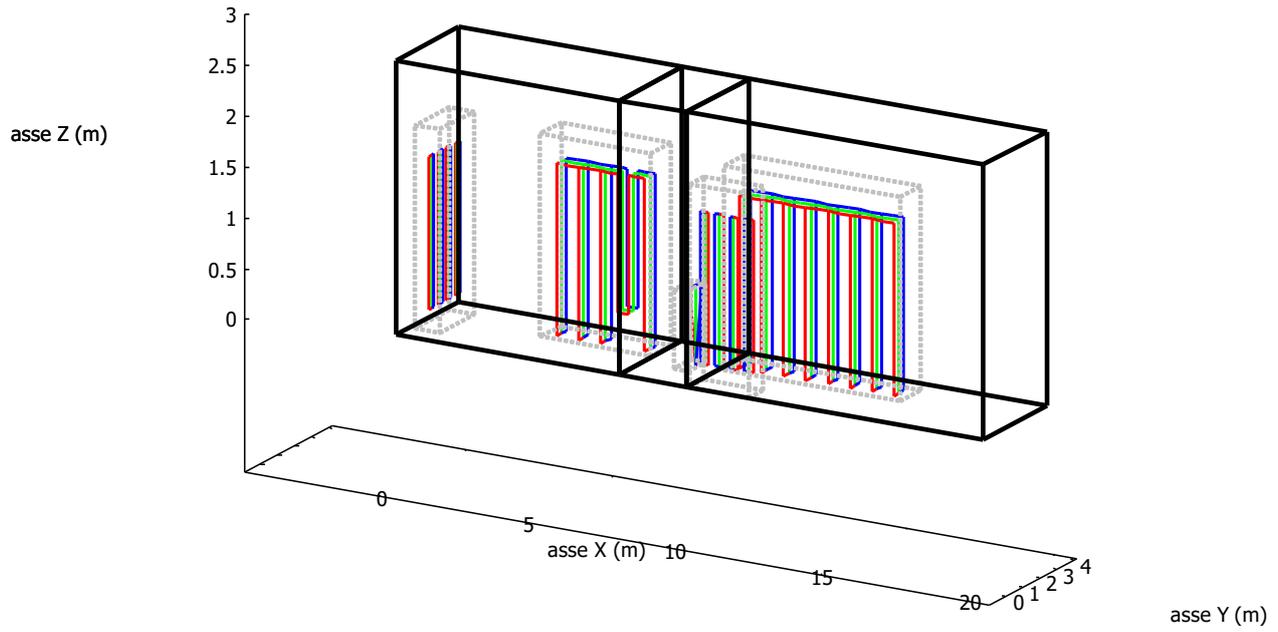


Figura 24: Cabina di Raccolta, geometria

- **CABINA DI RACCOLTA ( $h = 0$  m)**

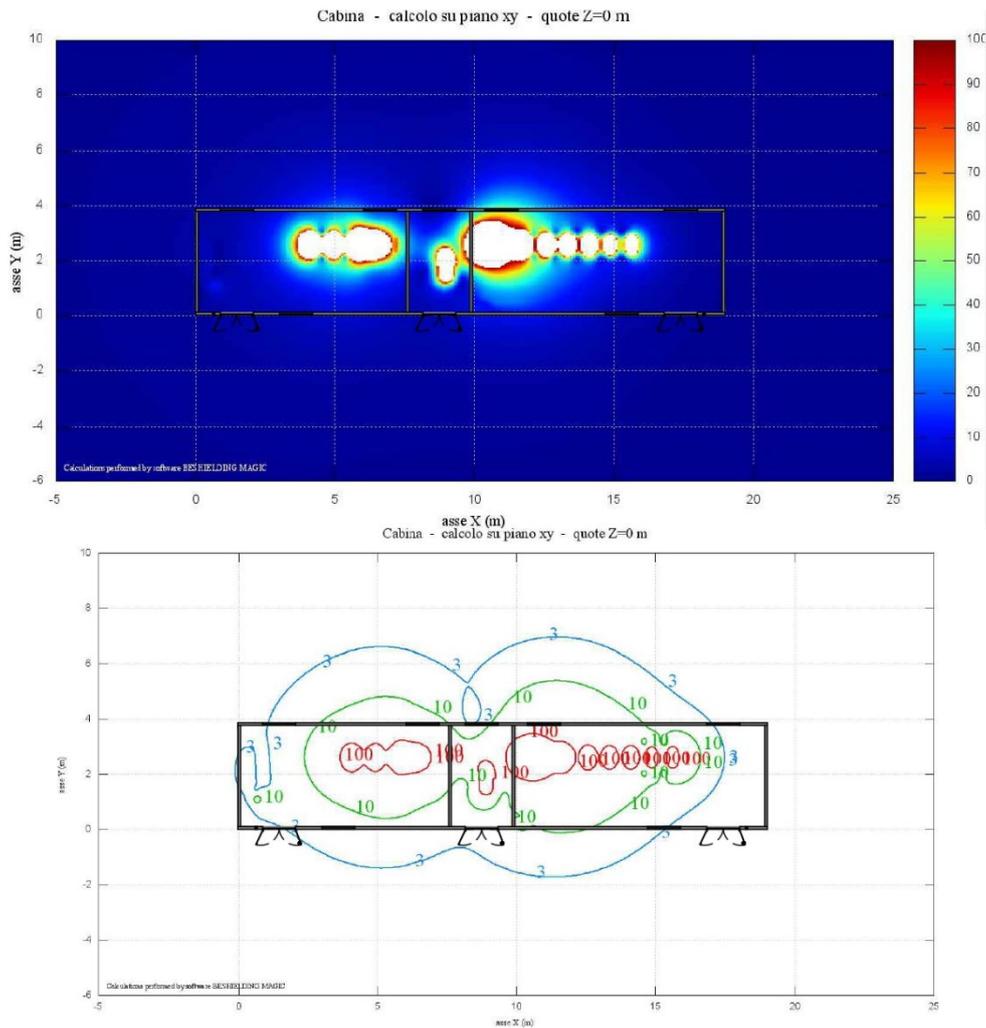


Figura 25: Cabina di Raccolta,  $h = 0$  m, mappa 2D e curve isolivello

L'obiettivo di qualità dalle pareti della cabina si raggiunge a circa 1,8 m dalla parete anteriore, circa 3,1 m dalla parete posteriore, circa 0,2 m dalla parete laterale sinistra e 0 m dalla parete laterale destra. Si evidenzia il raggiungimento del valore di attenzione a circa 0,2 m dalla parete anteriore e circa 1,6 m dalla parete posteriore.

La DPA dalla cabina risulta quindi pari a circa 3,1 m.

- **CABINA DI RACCOLTA ( $h = 1,5\text{ m}$ )**

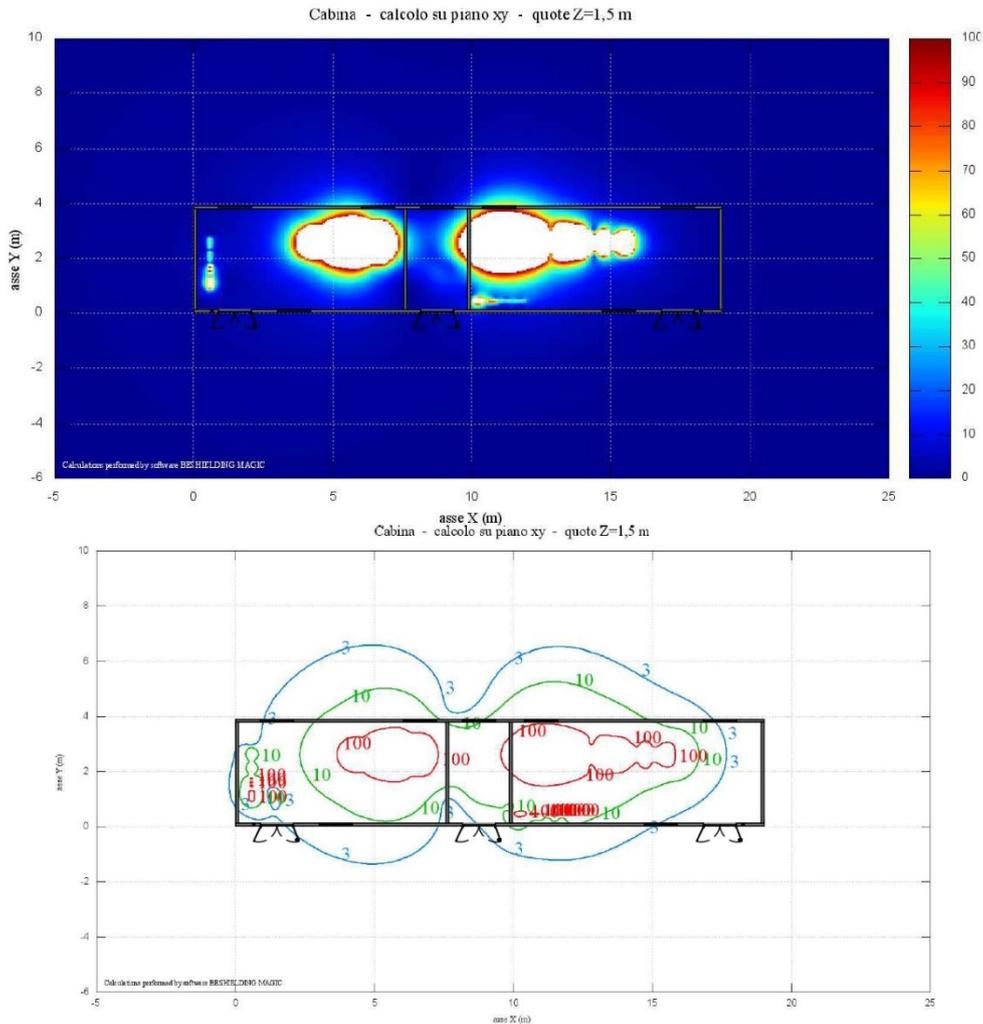


Figura 26: Cabina di Raccolta,  $h = 1,5\text{ m}$ , mappa 2D e curve isolivello

L'obiettivo di qualità dalle pareti della cabina si raggiunge a circa 1,4 m dalla parete anteriore, circa 2,8 m dalla parete posteriore, circa 0,3 m dalla parete laterale sinistra e 0 m dalla parete laterale destra. Si evidenzia il raggiungimento del valore di attenzione a circa 0,2 m dalla parete anteriore e 1,4 m dalla parete posteriore.

#### 5.4. Power Station

Ognuna delle n°11 Power Station (c.d. PS) e delle n°5 Storage Power Station (c.d. SPS) è equipaggiata con un inverter centralizzato. Nello specifico, n°1 PS è caratterizzata da un inverter del tipo SMA SC2660 UP, n°10 PS dispongono di un inverter del tipo SMA SC4200 UP, mentre tutte le SPS sono dotate di un inverter del tipo SMA SCS2900. Si riportano di seguito le modellazioni software delle varie tipologie di PS e SPS.

Progetto: Fattoria Solare "Casa Scaccia" AGRI BRUZIA SOCIETÀ AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione Campi Elettromagnetici	Pagina: 42
--	---	---------------

#### 5.4.1. PS (SMA SC2660 UP)

Nel calcolo della distanza di prima approssimazione valido per la n°1 Power Station equipaggiata con l'inverter centralizzato del tipo SMA SC2660 UP, sono state considerate le sorgenti di induzione magnetica elencate:

- Trasformatore 36/0,6 kV da 2500 kVA in olio (massima corrente circolante dell'avvolgimento secondario pari a 2566 A);
- Trasformatore 600/400 V da 2,5 kVA a secco, a servizio degli ausiliari (massima corrente circolante dell'avvolgimento secondario pari a 4,01 A);
- Quadro Parallelo con n°3 celle, nello specifico n°1 protezione trasformatore (corrente massima circolante nella linea pari a 47,52 A) e n°2 arrivi/partenze linea appartenenti all'anello di collegamento delle PS (corrente massima circolante nelle linee pari a 421,73 A);
- QBT a servizio degli ausiliari (corrente massima circolante negli interruttori pari a 4,01 A).

Si riportano di seguito i risultati ottenuti mediante lo studio software a livello del suolo ( $h = 0$  m) e ad altezza uomo ( $h = 1,5$  m):

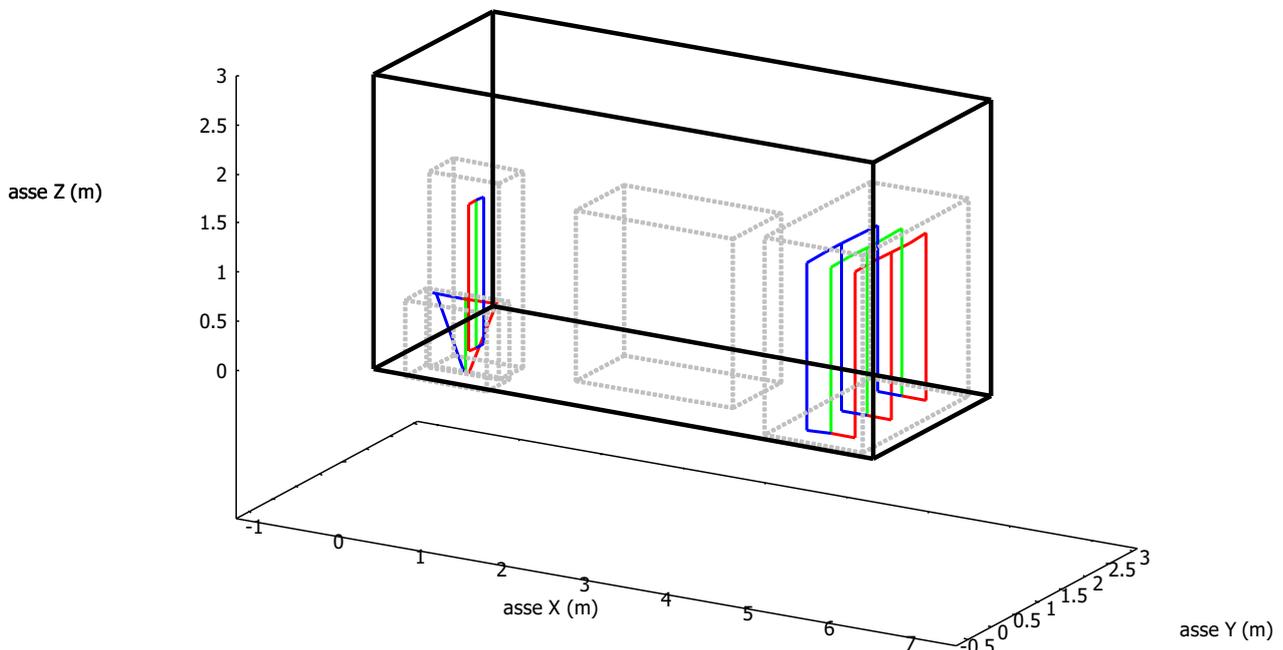


Figura 27: PS (SMA SC2660 UP), geometria

- **POWER STATION ( $h = 0$  m)**

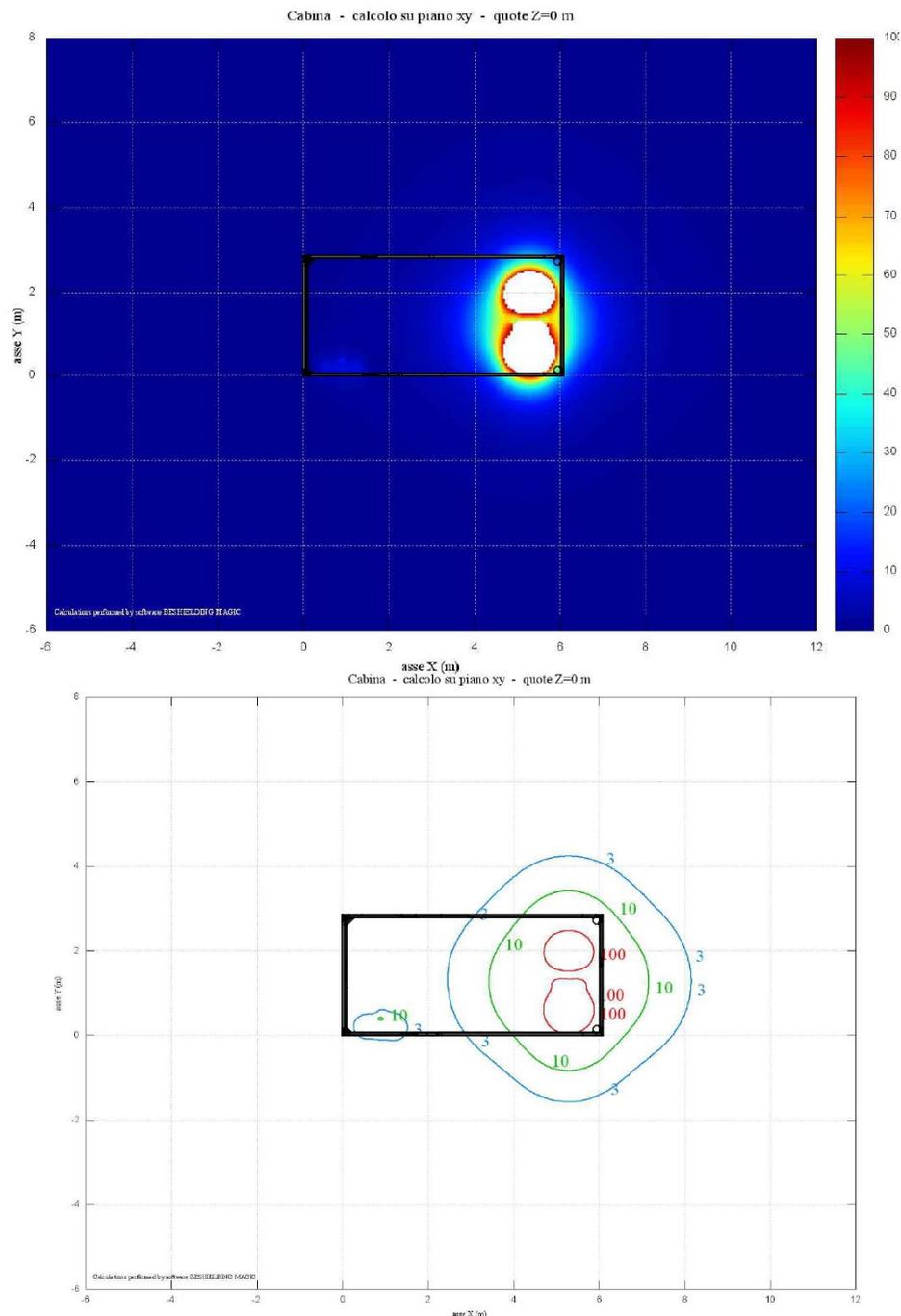


Figura 28: PS (SMA SC2660 UP),  $h = 0$  m, mappa 2D e curve isolivello

L'obiettivo di qualità dalle pareti della PS si raggiunge a circa 1,6 m dalla parete anteriore, circa 1,4 m dalla parete posteriore, 0 m dalla parete laterale sinistra e circa 2,1 m dalla parete laterale destra. Si evidenzia il raggiungimento del valore di attenzione a circa 0,9 m dalla parete anteriore, circa 0,6 m dalla parete posteriore e circa 1,1 m dalla parete laterale destra.

La DPA dalla cabina risulta quindi pari a circa 2,1 m.

- **POWER STATION ( $h = 1,5$  m)**

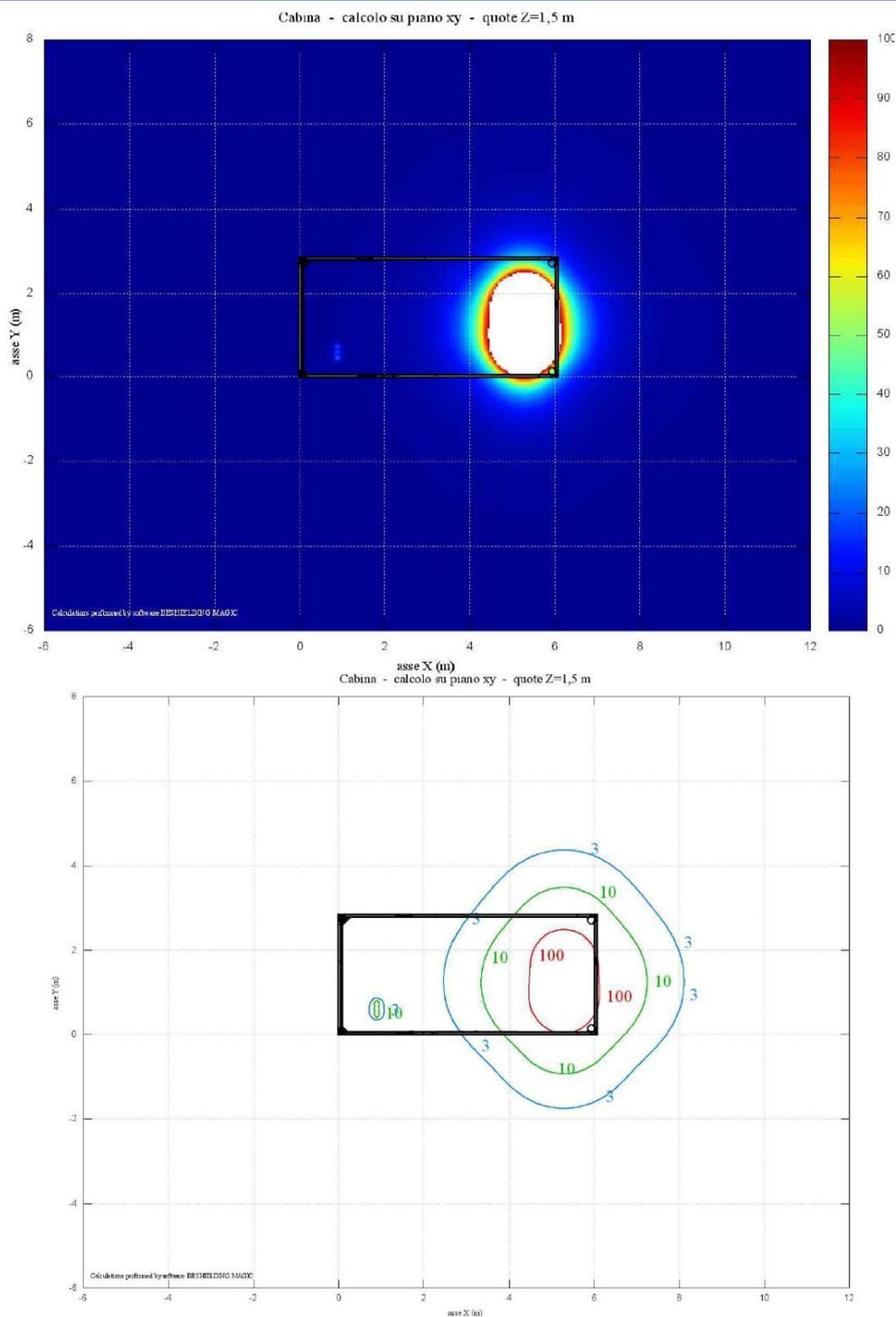


Figura 29: PS (SMA SC2660 UP),  $h = 1,5$  m, mappa 2D e curve isolivello

L'obiettivo di qualità dalle pareti della PS si raggiunge a circa 1,8 m dalla parete anteriore, circa 1,6 m dalla parete posteriore, 0 m dalla parete laterale sinistra e circa 2,1 m dalla parete laterale destra. Si evidenzia il raggiungimento del valore di attenzione a circa 1 m dalla parete anteriore, circa 0,7 m dalla parete posteriore e circa 1,2 m dalla parete laterale destra.

Progetto: Fattoria Solare "Casa Scaccia" AGRI BRUZIA SOCIETÀ AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione Campi Elettromagnetici	Pagina: 45
--	---	---------------

#### 5.4.2. PS (SMA SC4200 UP)

Nel calcolo della distanza di prima approssimazione valido per le n°10 Power Station equipaggiate con l'inverter centralizzato del tipo SMA SC4200 UP, sono state considerate le sorgenti di induzione magnetica elencate:

- Trasformatore 36/0,63 kV da 4000 kVA in olio (massima corrente circolante dell'avvolgimento secondario pari a 3850 A);
- Trasformatore 630/400 V da 2,5 kVA a secco, a servizio degli ausiliari (massima corrente circolante dell'avvolgimento secondario pari a 4,01 A);
- Quadro Parallelo con n°3 celle, nello specifico n°1 protezione trasformatore (corrente massima circolante nella linea pari a 74,84 A) e n°2 arrivi/partenze linea appartenenti all'anello di collegamento delle PS (corrente massima circolante nelle linee pari a 421,73 A);
- QBT a servizio degli ausiliari (corrente massima circolante negli interruttori pari a 4,01 A).

Si riportano di seguito i risultati ottenuti mediante lo studio software a livello del suolo ( $h = 0$  m) e ad altezza uomo ( $h = 1,5$  m):

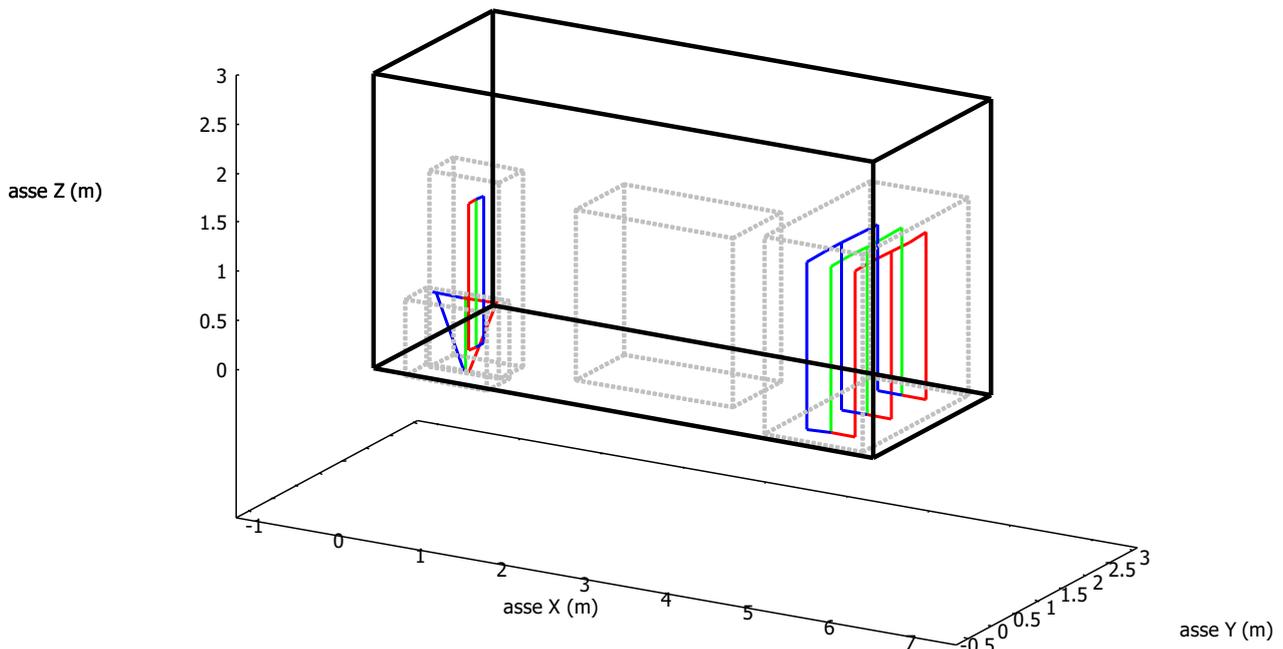


Figura 30: PS (SMA SC4200 UP), geometria

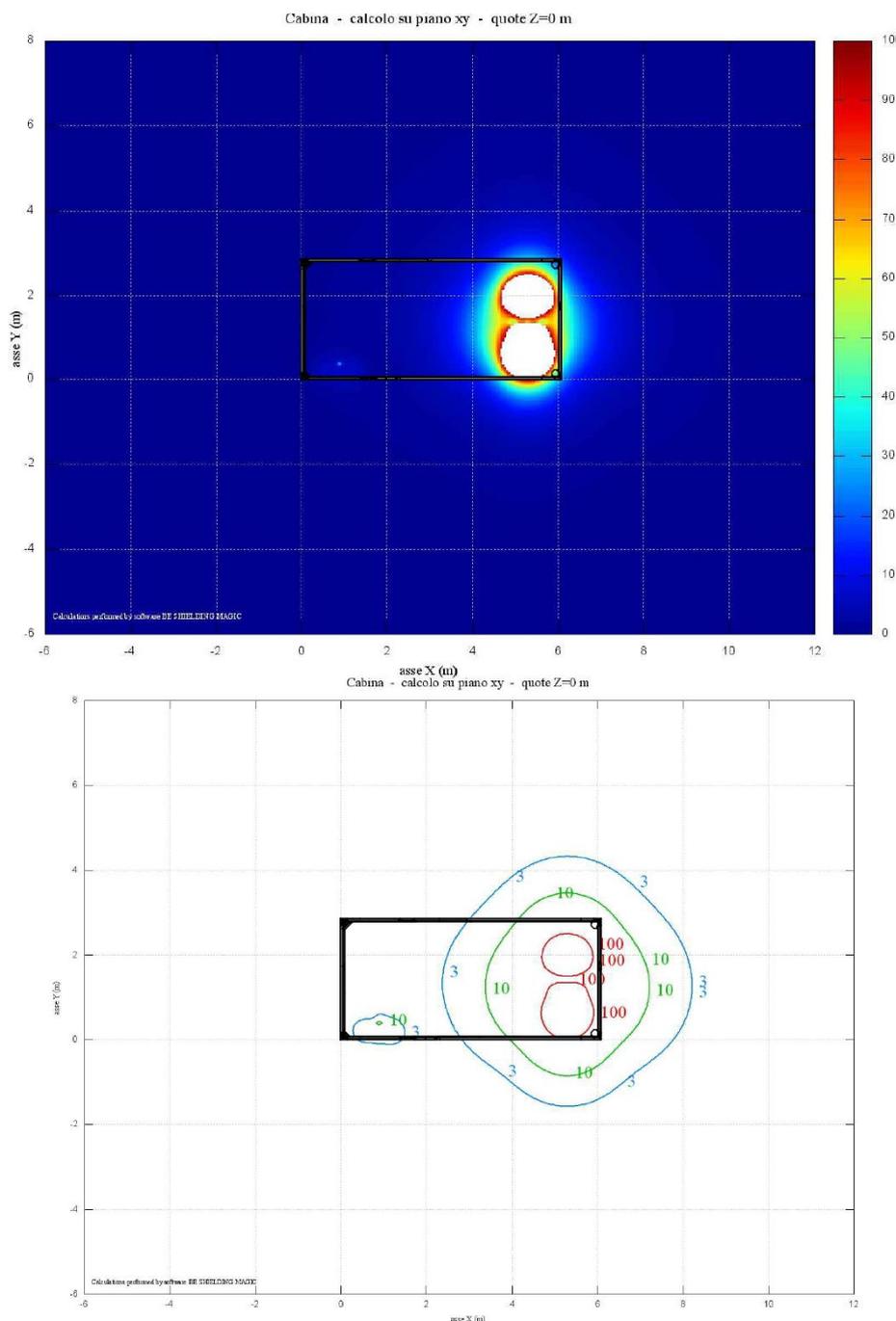
- **POWER STATION ( $h = 0$  m)**

Figura 31: PS (SMA SC4200 UP),  $h = 0$  m, mappa 2D e curve isolivello

L'obiettivo di qualità dalle pareti della PS si raggiunge a circa 1,6 m dalla parete anteriore, circa 1,5 m dalla parete posteriore, 0 m dalla parete laterale sinistra e circa 2,2 m dalla parete laterale destra. Si evidenzia il raggiungimento del valore di attenzione a circa 0,9 m dalla parete anteriore, circa 0,7 m dalla parete posteriore e circa 1,2 m dalla parete laterale destra.

La DPA dalla cabina risulta quindi pari a circa 2,2 m.

- **POWER STATION ( $h = 1,5$  m)**

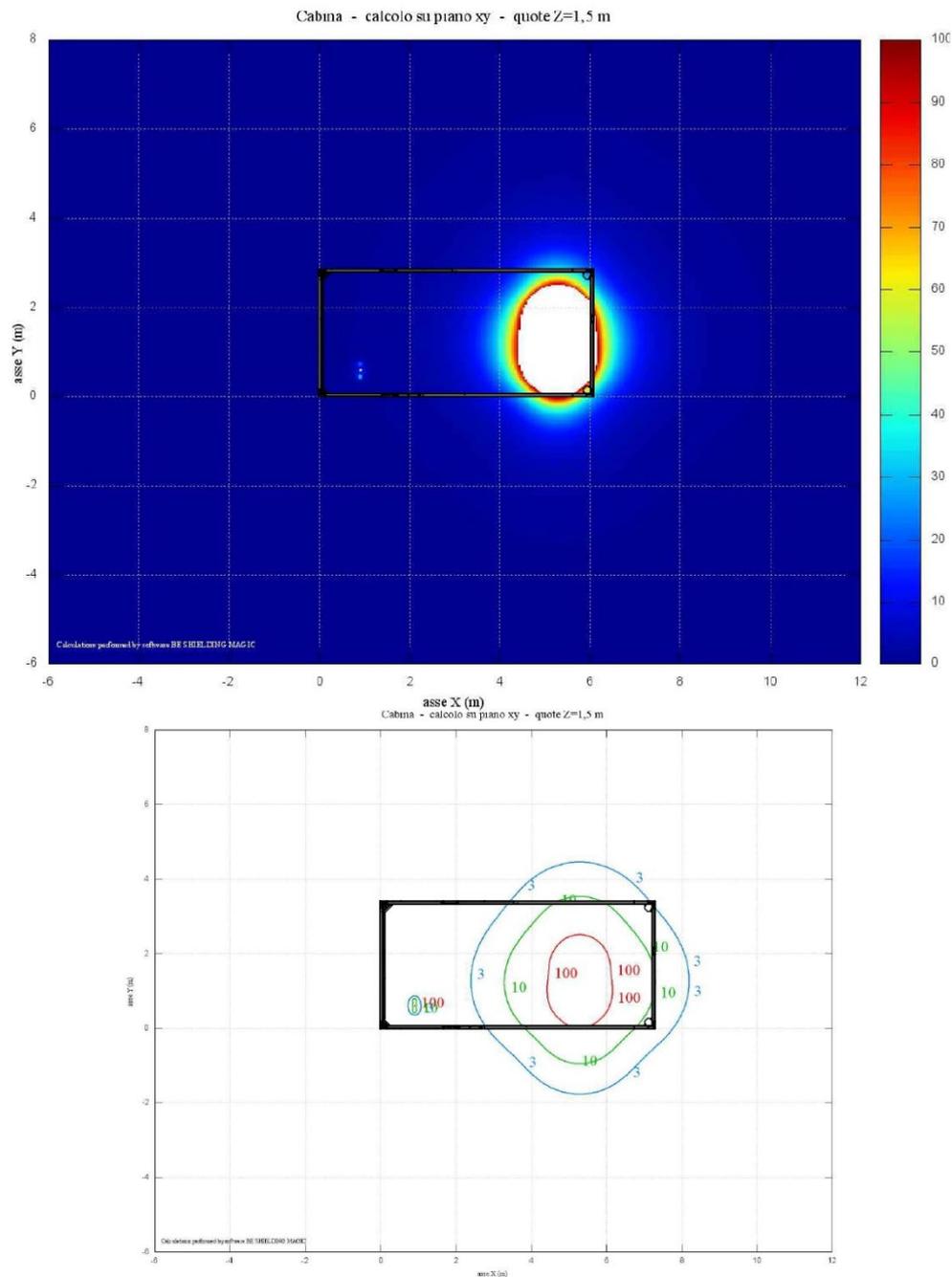


Figura 32: PS (SMA SC4200 UP),  $h = 1,5$  m, mappa 2D e curve isolivello

L'obiettivo di qualità dalle pareti della PS si raggiunge a circa 1,5 m dalla parete anteriore, circa 0,9 m dalla parete posteriore, 0 m dalla parete laterale sinistra e circa 0,8 m dalla parete laterale destra. Si evidenzia il raggiungimento del valore di attenzione a circa 0,8 m dalla parete anteriore e circa 0,2 m dalla parete posteriore.

Progetto: Fattoria Solare "Casa Scaccia" AGRI BRUZIA SOCIETÀ AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione Campi Elettromagnetici	Pagina: 48
--	---	---------------

## 5.5. Storage Power Station

Nel calcolo della distanza di prima approssimazione valido per le n°5 Storage Power Station, sono state considerate le sorgenti di induzione magnetica elencate:

- Trasformatore 36/0,52 kV da 2500 kVA in olio (massima corrente circolante dell'avvolgimento secondario pari a 3084,14 A);
- Trasformatore 520/400 V da 2,5 kVA a secco, a servizio degli ausiliari (massima corrente circolante dell'avvolgimento secondario pari a 4,01 A);
- Quadro Parallelo con n°3 celle, nello specifico n°1 protezione trasformatore (corrente massima circolante nella linea pari a 44,55 A) e n°2 arrivi/partenze linea appartenenti all'anello di collegamento delle SPS (corrente massima circolante nelle linee pari a 222,74 A);
- QBT a servizio degli ausiliari (corrente massima circolante negli interruttori pari a 4,01 A).

Si riportano di seguito i risultati ottenuti mediante lo studio software a livello del suolo ( $h = 0$  m) e ad altezza uomo ( $h = 1,5$  m):

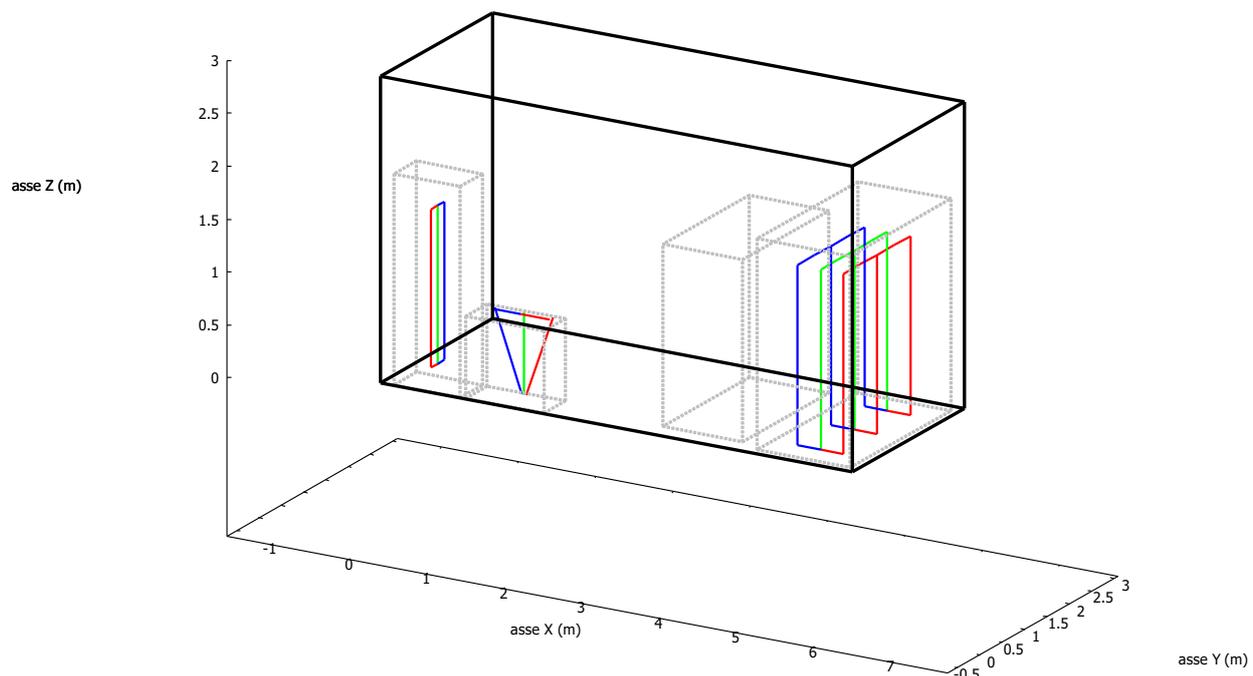


Figura 33: Storage Power Station, geometria

- **STORAGE POWER STATION (h = 0 m)**

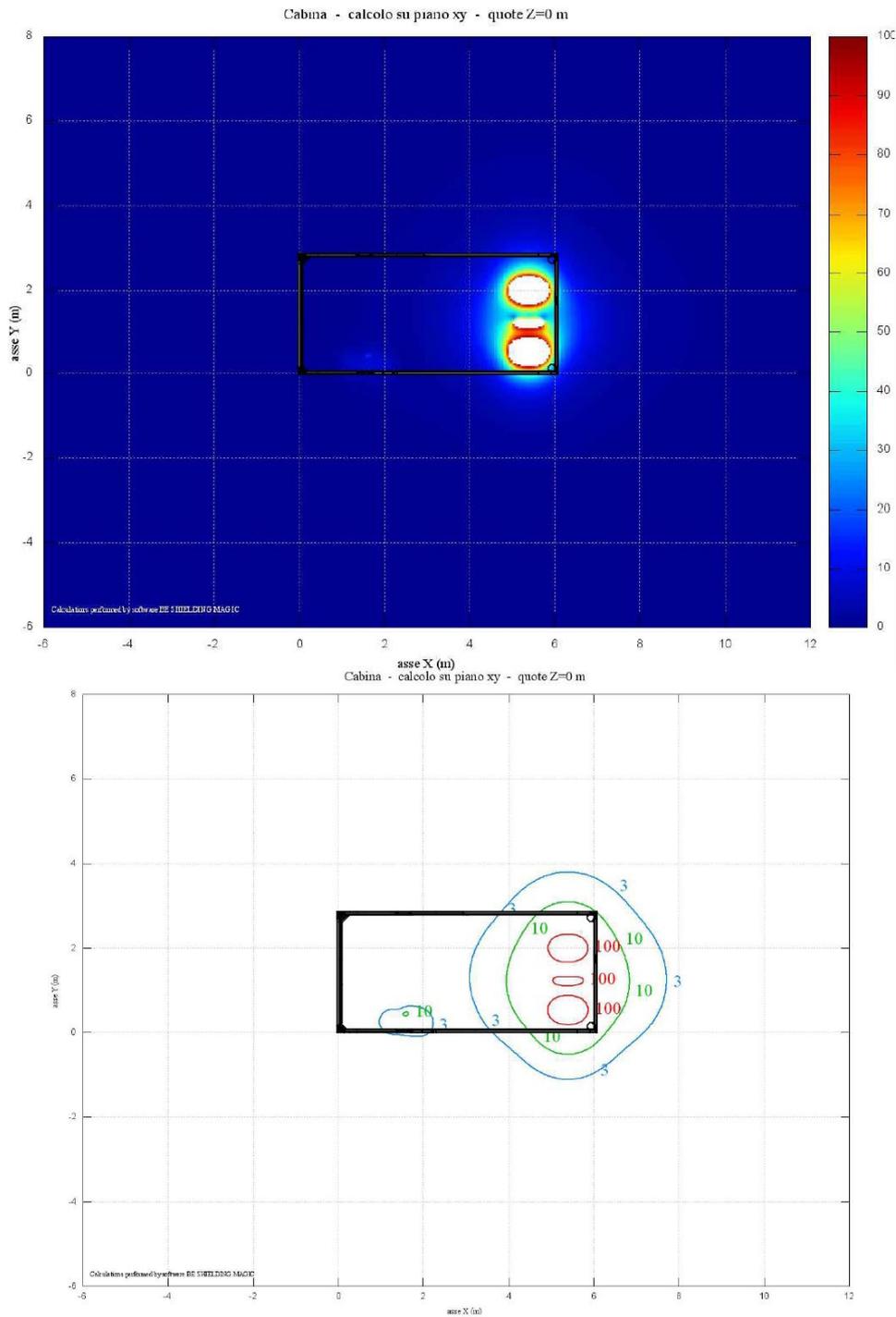


Figura 34: Storage Power Station, h = 0 m, mappa 2D e curve isolivello

L'obiettivo di qualità dalle pareti della SPS si raggiunge a circa 1,2 m dalla parete anteriore, circa 1 m dalla parete posteriore, 0 m dalla parete laterale sinistra e circa 1,7 m dalla parete laterale destra. Si evidenzia il raggiungimento del valore di attenzione a circa 0,5 m dalla parete anteriore, circa 0,3 m dalla parete posteriore e circa 0,8 m dalla parete laterale destra. La DPA dalla cabina risulta quindi pari a circa 1,7 m.

- **STORAGE POWER STATION (h = 1,5 m)**

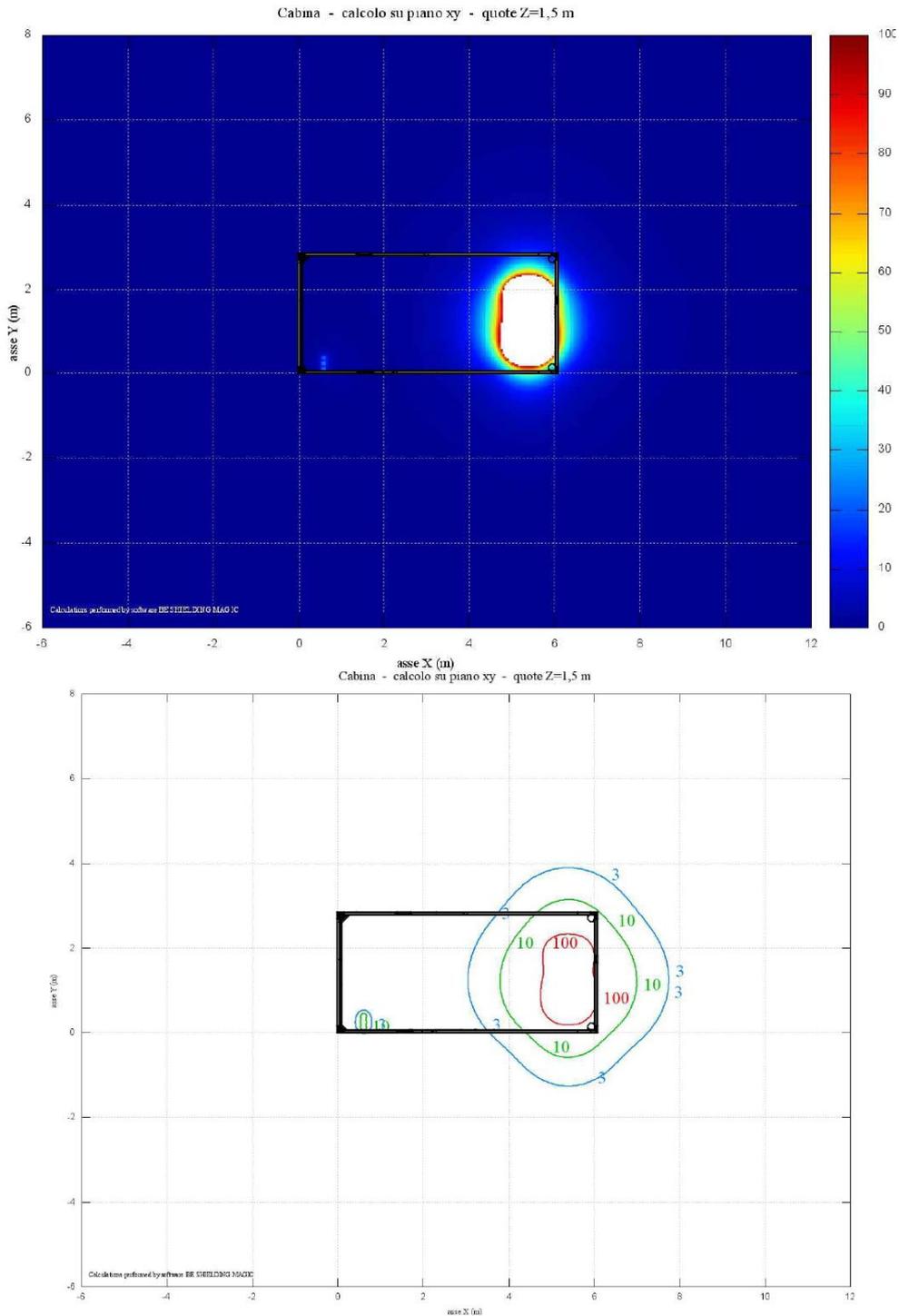


Figura 35: Storage Power Station, h = 1,5 m, mappa 2D e curve isolivello

L'obiettivo di qualità dalle pareti della SPS si raggiunge a circa 1,3 m dalla parete anteriore, circa 1,1 m dalla parete posteriore, 0 m dalla parete laterale sinistra e circa 1,7 m dalla parete laterale destra. Si evidenzia il raggiungimento del valore di attenzione a circa 0,6 m dalla parete anteriore, circa 0,4 m dalla parete posteriore e circa 1 m dalla parete laterale destra.

Progetto: Fattoria Solare "Casa Scaccia" AGRI BRUZIA SOCIETÀ AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione Campi Elettromagnetici	Pagina: 51
--	---	---------------

## 7. CONCLUSIONI

Il DPCM 8 Luglio 2003 fissa i limiti di esposizione per la popolazione ai campi elettrici e magnetici generati da elettrodotti alla frequenza di rete (50Hz). Tali limiti sono pari a 100  $\mu$ T, 10  $\mu$ T e 3  $\mu$ T rispettivamente come limite di esposizione, valore di attenzione e obiettivo di qualità: gli ultimi due sono validi per esposizioni superiori alle 4 ore/giorno.

In base alla definizione del DM del 29 Maggio 2008, occorre applicare la DPA alle stazioni elettriche, alle cabine primarie e secondarie e agli elettrodotti ad esse collegati.

In merito alle radiazioni non ionizzanti, ovvero le uniche associabili ad impianti fotovoltaici come quello in progetto, si è dimostrato il rispetto dei parametri di qualità. Per quanto concerne il campo elettrico, in virtù della schermatura e dell'isolamento dei cavi, il valore rispetta a pieno il limite di 5kV/m, in quanto esso può considerarsi trascurabile.

In riferimento al campo magnetico, lo studio delle varie sorgenti presenti in impianto ha dimostrato l'assenza di fattori di rischio per la salute umana a causa delle azioni di progetto.

In particolare, si sottolineano i seguenti aspetti:

- Le apparecchiature e i dispositivi risultano certificati dai produttori in materia di compatibilità elettromagnetica;
- Il calcolo, sia per le opere di impianto che per il cavidotto di collegamento alla SE Terna, è stato effettuato nelle condizioni peggiori, non tenendo conto della mediana dei valori nell'arco delle 24 ore nelle normali condizioni di utilizzo (di conseguenza le curve isolivello relative al valore di attenzione e all'obiettivo di qualità effettive corrisponderanno a valori di DPA inferiori);
- Le varie sorgenti, considerate in fase di calcolo a regime, non veicolano praticamente mai la massima corrente teorica, data la natura dell'opera in progetto;
- Ad una distanza inferiore delle varie DPA, calcolate per le apparecchiature di impianto e per il cavidotto di collegamento con la SE Terna, in tutte le sue possibili combinazioni di posa lungo il tracciato, non sono ubicati ricettori sensibili, abitazioni o luoghi dove sia ragionevole supporre una permanenza di persone per più di 4 ore al giorno o per periodi prolungati;
- I lavori di manutenzione verranno tutti effettuati in assenza di tensione e pertanto in assenza di emissioni.

In conclusione, il progetto rispetta i limiti di cui al DPCM 08/07/2003 ed è conforme alla normativa vigente.

Progetto: Fattoria Solare "Casa Scaccia" AGRI BRUZIA SOCIETÀ AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione Campi Elettromagnetici	Pagina: 52
--	---	---------------

---

**ALLEGATO**

**RELAZIONE**  
**CAMPI ELETTRICI E MAGNETICI**  
**CAVIDOTTO DI COLLEGAMENTO**  
**CON LA SE TERNA**

---

## 1 PREMESSA

Oggetto della presente relazione è il calcolo dei campi elettrici e magnetici generati dal cavidotto a 36 kV funzionale al collegamento alla rete elettrica nazionale dell'impianto agrivoltaico di tipo elevato e avanzato denominato "Fattoria solare Casa Scaccia" della società "Agribruzia Società Agricola A.R.L." avente una potenza massima di immissione di 59,80 MVA.

L'interno impianto è ubicato in Comune di Sassari, provincia di Sassari

Il cavidotto della lunghezza di complessiva di 5,5 km collega l'impianto con la nuova stazione elettrica 380/150/36 kV RTN "Olmedo" percorrendo quasi interamente i coltivi a fianco della strada pubblica, ad eccezione del tratto di accesso all'impianto agrivoltaico e del tratto terminale in ingresso alla futura SE 380/150/36 kV Olmedo. Il primo tratto di cavidotto è costituito da tre terne di cavi in parallelo per una lunghezza 5,37 km mentre il secondo tratto, adiacente alla stazione è formato da due terne di lunghezza 134 m.

L'impianto agrivoltaico è costituito da 2 distinti sottocampi collocati nord e sud della strada provinciale n. 65, circa 15 km a ovest dell'abitato di Sassari. Il cavidotto esce dalla cabina MT di smistamento, posta nel agrivoltaico a sud della SP65, direttamente sulla strada provinciale n. 65 da dove prosegue verso nord est fino a poche centinaia di metri dalla futura stazione 380/150/36 kV di Olmedo, posta 1 km prima dello svincolo con la strada Statale 291var della Nurra.

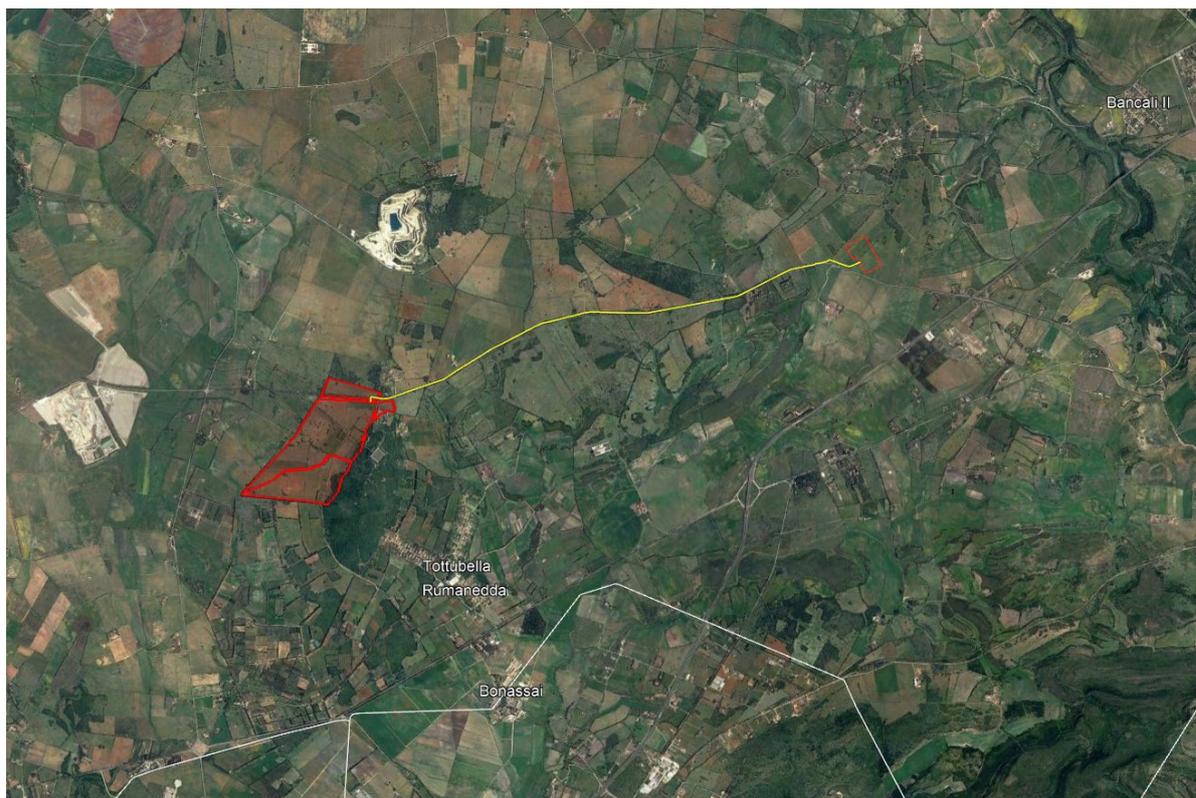


Figura 1: Ortofoto con indicazione del percorso del cavidotto

Nel primo tratto le tre terne saranno formate da cavi unipolari in alluminio del tipo (N)A2X5(F)2Y 20,8/36 kV, ciascuno della sezione di 630 mm<sup>2</sup>; solamente nell'ultimo tratto di circa 134 m in ingresso all'ampliamento a 36 kV della SE 380/150/36 kV "Olmedo", il cavidotto sarà composto da sole due terne di cavo, una dello stesso tipo e sezione delle precedenti; mentre la seconda sarà sempre di sezione 630 mm<sup>2</sup> ma in rame del tipo N2XS(FL)2Y 20,8/36 kV. Ciò si rende necessario per trasportare la corrente in transito in due delle tre terne costituenti la tratta principale del cavidotto, tramite una giunzione "T", da installarsi nell'ultimo giunto localizzato nell'area pozzetti esterna all'ampliamento 36 kV della SE 380/150/36 kV "Olmedo 380".

Nella tabella seguente sono sintetizzati i dati principali riferiti al cavidotto a 36 kV in esame:

Impianto	n. Linee	Partenza	Arrivo	Potenza in transito (MVA)	km	Formazione
Casa Scaccia	3	Cabina di raccolta	Area pozzetti esterni - SE 380/150/36 kV Olmedo	59,80	5,36	3 x 1 x 630
Casa Scaccia	2	Area pozzetti esterni - SE 380/150/36 kV Olmedo	Fabbricato 36 kV - SE 380/150/36 kV Olmedo	59,80	0,134	3 x 1 x 630

\*(Le cadute di tensione e potenza percentuali, sono riferite ad una tensione di esercizio pari al 90% della tensione nominale e  $\cos\varphi=0,944$ ).

## 2 QUADRO NORMATIVO

La normativa che regola l'esposizione della popolazione a campi elettromagnetici risale ai primi anni '90. La prima legge emanata, ora abrogata, è il DPCM 23 Aprile 1992 "Limiti massimi di esposizione ai campi elettrico e magnetico generati alla frequenza industriale nominale (50 Hz) negli ambienti abitativi e nell'ambiente esterno": tale normativa fissava la distanza da mantenersi dagli elettrodotti aerei e i valori massimi di esposizione per la popolazione. Con il crescente interesse da parte della popolazione per la tematica in oggetto, è stata avvertita la necessità di una regolamentazione più dettagliata dell'esposizione ai campi elettrici e magnetici, cui ha fatto seguito l'emanazione di numerose leggi regionali e della legge quadro nazionale.

In particolare, la Legge Quadro No. 36 del 22 Febbraio 2001 "Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici" ha lo scopo di assicurare la tutela della salute dei lavoratori, delle lavoratrici e della popolazione dagli effetti dell'esposizione a determinati livelli di campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici e di assicurare la tutela dell'ambiente e del paesaggio promuovendo l'innovazione tecnologica.

Con i successivi decreti attuativi, DPCM 8 Luglio 2003, sono stati fissati i livelli di esposizione, di attenzione e l'obiettivo di qualità da rispettarsi al fine della tutela della salute della popolazione.

Nella tabella 3 seguente riportiamo i valori fissati come limite di esposizione, valore di attenzione e obiettivo di qualità per campi elettrici e magnetici prodotti alla frequenza di rete (50 Hz) connessi al funzionamento e all'esercizio degli elettrodotti.

	Campo magnetico ( $\mu\text{T}$ )	Campo elettrico (V/m)	NOTE
<b>Limite di esposizione</b>	100	5000	-
<b>Valore di attenzione</b>	10	-	Da verificarsi in luoghi adibiti a permanenza non inferiore alle 4 ore
<b>Obiettivo di qualità</b>	3	-	

Tabella 1 - valori come da normativa in vigore

Con il DM del 29 Maggio 2008 "Approvazione della metodologia di calcolo per la determinazione delle fasce di rispetto per gli elettrodotti" viene approvata la metodologia di calcolo per la determinazione delle fasce di rispetto degli elettrodotti, in relazione a quanto previsto dal DPCM 8 Luglio 2003: uno degli scopi è la regolamentazione delle nuove installazioni e/o nuovi insediamenti presso elettrodotti o edifici esistenti. A tal fine occorre approntare i corretti strumenti di pianificazione territoriale come la previsione di fasce di rispetto, calcolate sulla base di parametri certi e stabili nel lungo periodo. Le fasce di rispetto sono infatti definite come "lo 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: all'interno delle fasce di rispetto non è consentita alcuna destinazione di edifici ad uso residenziale scolastico sanitario ovvero ad uso che comporti una permanenza non inferiore a quattro ore giorno". Tali fasce di rispetto sono variabili in funzione ai dati caratteristici di ogni tratta o campata considerata in relazione ai dati caratteristici della stessa. Al fine di facilitare la gestione territoriale è stato introdotto il concetto di **Distanza di Prima Approssimazione (Dpa)** quale: "la 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".

La metodologia definita si applica alle linee elettriche aeree e interrate, esistenti o in progetto, **con esclusione delle linee a media tensione in cavo cordato ad elica**, siano esse interrate o aeree, in quanto in questi casi

 <p>Reggio nell'Emilia - ITALIA</p>	<p>Progetto</p> <p style="text-align: center;"><b>FATTORIA SOLARE CASA SCACCIA</b></p> <p style="text-align: center;"><b>Relazione campi elettrici e magnetici</b></p>	<p>Documento e revisione</p> <p style="text-align: center;"><b>81204B</b></p> <p style="text-align: center;"><b>4</b></p>
--	--	---

le fasce associabili hanno ampiezza ridotta, **inferiore alle distanze previste dal Decreto Interministeriale 21 Marzo 1988, No. 449 e del DMLLPP del 16 Gennaio 1991.**

Al fine di stimare il campo elettrico e magnetico prodotto dagli elementi di rete e determinare le Dpa da applicarle, sono state prese in considerazione le "Linee Guida per l'applicazione del punto 5.1.3 dell'allegato al DM 29/05/2008" elaborate da Enel ad uso pubblico, *"al fine di semplificare ed uniformare l'approccio al calcolo della Distanza di Prima Approssimazione (procedimento semplificato per il calcolo della fascia di rispetto) dei propri impianti, fruibile sia da parte di privati in sede di realizzazione di nuovi insediamenti, che da parte degli organi di controllo in sede di verifica"*.

Si sottolinea che la tensione di 36 kV, a cui sono eserciti i cavi di collegamento tra l'impianto agrivoltaico e la stazione RTN, non è indicata nelle linee guida sopra indicate, in quanto di recente introduzione nel Codice di Rete di Terna, per la connessione degli impianti di produzione con potenza fino a 100 MW.

### 3 CALCOLO DEL CAMPO MAGNETICO

La rete elettrica nazionale, a cui il cavidotto a 36 kV di collegamento tra l'impianto agrivoltaico **"Fattoria solare Casa Scaccia"** e la nuova stazione elettrica 380/150/36 kV di Olmedo sarà connesso, è esercita alla frequenza di 50 Hz. A questa frequenza i campi elettrici e magnetici generati dall'elettrodotta stesso sono due fenomeni distinti, il primo proporzionale alla tensione della linea stessa, mentre il secondo proporzionale alla corrente che vi circola.

**Non si procede con il calcolo dei livelli di campo elettrico dato che, per le tensioni in gioco, le sopra citate linee guida specificano, a valle di misure e valutazioni effettuate sulle linee elettriche facenti parte della rete di Enel, che "il campo elettrico al suolo in prossimità di elettrodotti a tensione uguale o inferiore a 150 kV non supera mai il limite di esposizione per la popolazione pari a 5 kV/m".**

Al fine di stimare il campo magnetico prodotto dai cavidotti in oggetto e determinare le Dpa da applicare, si è proceduto considerando prima le indicazioni fornite dalle "Linee Guida per l'applicazione del punto 5.1.3 dell'allegato al DM 29/05/2008" elaborate da Enel e poi effettuando il calcolo teorico sempre in considerazione di quanto previsto dal Decreto Ministeriale succitato.

È stato predisposto il calcolo teorico utilizzando la corrente massima che può transitare sull'elettrodotta come descritto nel capitolo seguente.

Il calcolo del campo magnetico è stato effettuato utilizzando il software "Magic" di BEShielding di cui riportiamo in allegato il documento di validazione. Il software permette di calcolare i campi magnetici generati da sorgenti di tipo elettrico, quali trasformatori, sistemi di linee elettriche, cabine MT/BT, buche giunti, blindosbarre e impianti elettrici. Il software permette la determinazione delle fasce di rispetto per linee elettriche e cabine MT/BT, secondo quanto previsto dalla Legge Quadro n. 36/2001 (esposizione ai campi magnetici della popolazione) e dal D.Lgs. n. 81/08 (valutazione dei rischi in ambiente lavorativo).

Permette inoltre di studiare le singole sorgenti (linee elettriche, cavi, sistemi multiconduttori, trasformatori) mediante configurazioni bidimensionali e tridimensionali attraverso l'integrazione della legge di Biot-Savart o lo studio di sistemi complessi, come le cabine elettriche MT/BT, tenendo conto della tridimensionalità delle sorgenti, della loro reale posizione e della sovrapposizione degli effetti delle diverse componenti.

#### 3.1 Correnti di calcolo

I cavidotti saranno realizzati con conduttori in alluminio con sezione di 630 mm<sup>2</sup> (diametro esterno complessivo di 58,0 mm). I conduttori in alluminio di sezione 630 mm<sup>2</sup> in posa interrata a trifoglio hanno una portata in corrente pari a 690 A. Tale portata è superiore alla corrente che può essere prodotta dall'impianto agrivoltaico, pertanto a determinare la portata massima sarà la potenza dell'impianto stesso.

Si sottolinea di come la massima potenza dell'impianto agrivoltaico è raggiunta per poche ore all'anno, in condizioni di massimo irraggiamento, e pertanto questa condizione è ampiamente cautelativa.

Nel caso i medesimi elettrodotti dovessero essere funzionali ad un ulteriore impianto da realizzarsi ex-novo o a un ampliamento delle aree esistenti, questi saranno soggetti ad apposito procedimento di autorizzazione e in tale sede si verificheranno nuovamente le DpA associate all'aumento della corrente in transito.

Impianto	n. Linee	Partenza	Arrivo	Potenza in transito (MVA)	km	Formazione	Corrente (A)
Casa Scaccia	3	Cabina di raccolta	Area pozzetti esterni - SE 380/150/36 kV Olmedo	59,80	5,36	3 x 1 x 630	3 x 356
Casa Scaccia	2	Area pozzetti esterni - SE 380/150/36 kV Olmedo	Fabbricato 36 kV - SE 380/150/36 kV Olmedo	59,80	0,134	3 x 1 x 630	2 X 533

Tabella 2 - \*corrente calcolata al 90% della tensione nominale

### 3.2 Risultati

I valori di campo magnetico generati dai cavidotti 36 kV sono calcolati al fine di definire le ampiezze delle Distanze di Prima Approssimazione (DPA) da applicarsi all'asse delle linee. Tali valori sono desunti nell'ipotesi cautelativa che l'impianto agrivoltaico produca alla massima potenza.

Riportiamo nel seguito la sezione del cavidotto 36 kV, con indicazione del livello di campo magnetico prodotto dall'impianto agrivoltaico. Le condizioni di posa sono quelle indicate all'interno del documento No. 2202\_Z\_T.T.11 – Sezioni posa cavidotto.

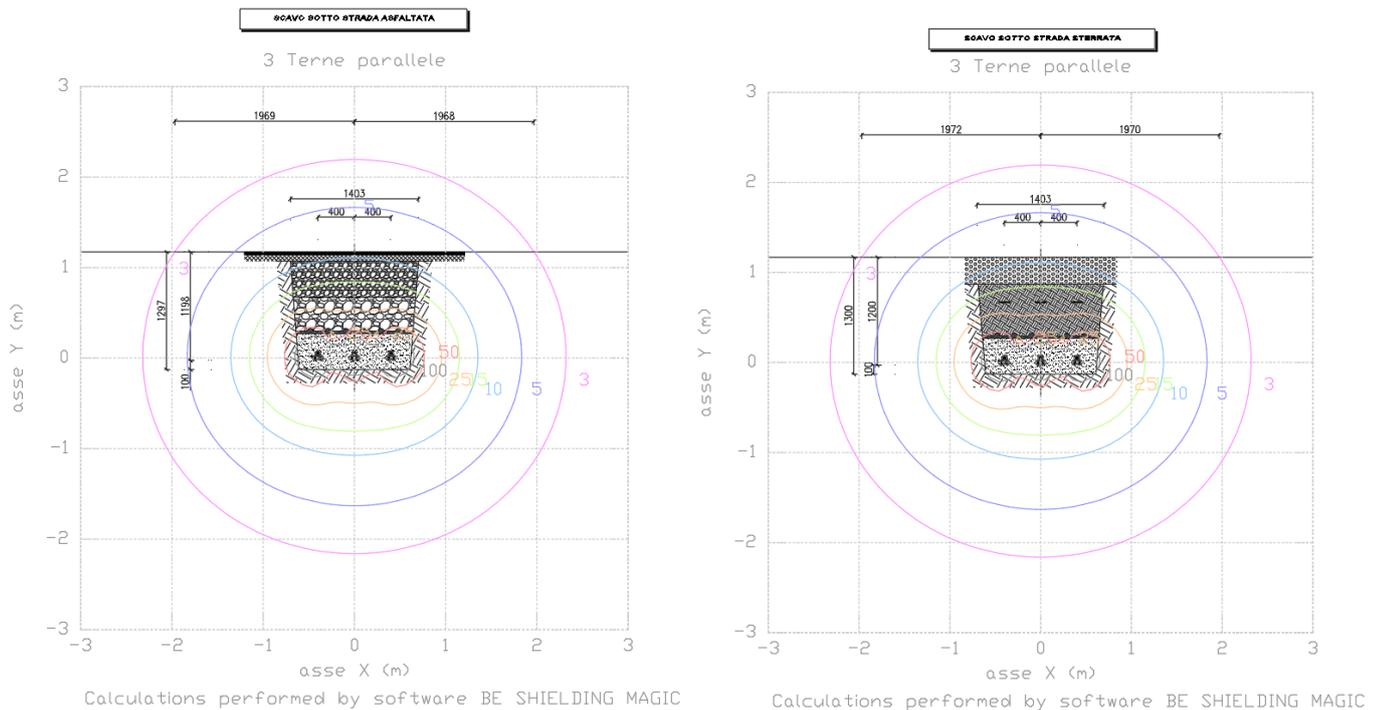


Figura 2 – Livelli di campo magnetico generati dal cavidotto con disposizione su 3 terne

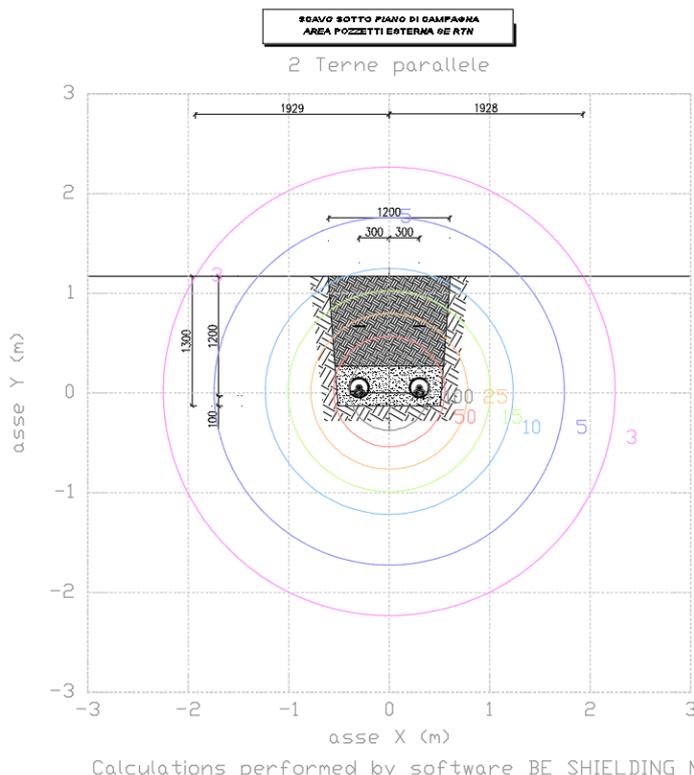


Figura 3 – Livelli di campo magnetico generati dal cavidotto con disposizione su 2 terne

Le ampiezze delle Distanze di Prima Approssimazione (DPA) da applicarsi all'asse delle linee o dall'asse dello scavo nel caso di 3 o 2 linee parallele, sono desunte nell'ipotesi cautelativa che l'impianto agrivoltaiico produca alla massima potenza. I risultati della simulazione sopra riportata sono sintetizzati nella tabella 4 seguente:

Impianto	n. Linee	Potenza in transito (MVA)	km	Formazione	Corrente (A)	Limite $3\mu T$ (m)	Dpa (m)
Casa Scaccia	3	59,80	5,36	3 x 1 x 630	3 x 356	1,97	2
Casa Scaccia	2	59,80	0,134	3 x 1 x 630	2 x 533	1,93	2

Tabella 3 - \*corrente calcolata al 90% della tensione nominale

Le Dpa da applicare al suolo risultano pertanto pari a 2 m dall'asse dello scavo in entrambe le situazioni valutate.

 <p>Reggio nell'Emilia - ITALIA</p>	Progetto <b>FATTORIA SOLARE CASA SCACCIA</b> <b>Relazione campi elettrici e magnetici</b>	Documento e revisione <b>81204B</b> <b>7</b>
--	---	--

#### 4 CONCLUSIONI

Il DPCM 8 Luglio 2003 fissa i limiti di esposizione per la popolazione ai campi elettrici e magnetici generati da elettrodotti alla frequenza di rete (50Hz). Tali limiti sono pari a 100  $\mu$ T, 10  $\mu$ T e 3  $\mu$ T rispettivamente come limite di esposizione, valore di attenzione e obiettivo di qualità: gli ultimi due sono validi per esposizioni superiori alle 4 ore / giorno.

Oggetto della presente relazione è il calcolo dei campi elettrici e magnetici generati dai cavidotti in alta tensione funzionali alla connessione di un impianto agrivoltaico di tipo elevato e avanzato denominato "Fattoria solare Casa Scaccia" della società "Agribruzia Società Agricola A.R.L." avente una potenza massima di immissione di 59,80 MVA, ubicato nel comune di Sassari, in provincia di Sassari.

L'impianto sarà connesso alla rete elettrica nazionale mediante cavi a 36 kV alla futura Stazione Elettrica (SE) RTN 380/150/36kV kV di Terna denominata "Olmedo".

In base alla normativa vigente i cavidotti dovranno essere interrati a una quota di almeno 1,2 m dal piano di campagna, pertanto, approssimando per eccesso i risultati delle simulazioni, si evidenzia che occorre applicare una DPA pari a 2 metri dall'asse dello scavo.

L'elettrodotto sarà interrato principalmente al di fianco di una strada provinciale: le fasce di rispetto della stessa sono tali da garantire il rispetto delle DPA a ogni ricettore sensibile posto lungo il tracciato.

Si sottolinea inoltre che l'abitazione più vicina al tracciato dista oltre 30 metri dallo stesso.

**Allegato 1: Documento di Validazione**



## Documento di Validazione

# Algoritmi di calcolo del software MAGIC<sup>®</sup> (MAGnetic Induction Calculation)

Revisione	Data	Elaborato	Approvato
05	11/01/2021	M.F.	S.G.
00 Emissione	07/01/2014	D.B.	M.M.

## Sommario

Premessa.....	3
1 Verifica del modulo bidimensionale .....	3
1.1 Confronto con CEI 211-04.....	3
1.2 Confronto con codice CESI .....	4
2 Verifica del modulo tridimensionale.....	7
2.1 Campo prodotto da un segmento finito arbitrariamente orientato .....	7
2.2 Validazione sperimentale del modulo tridimensionale .....	8
3 Verifica del modulo tridimensionale:trasformatore di potenza .....	9
3.1 Verifica del modello MAGIC della singola colonna del trasformatore con modello FEM (Finite Element Method).....	9
3.2 Verifica del modello MAGIC del trasformatore completo con misure sperimentali	12
Conclusioni .....	13

## Premessa

Il presente documento riporta le verifiche funzionali del software MAGIC<sup>®</sup> attraverso il confronto con software già esistenti e di comprovata validità e con rilievi sperimentali.

Il confronto si sviluppa in tre parti:

- 1) verifica del modulo bidimensionale
- 2) verifica del modulo tridimensionale
- 3) verifica del modulo tridimensionale di configurazioni impiantistiche con particolare riferimento al trasformatore di potenza

Le principali caratteristiche del software MAGIC<sup>®</sup> sono:

- a) software bi-tridimensionale
- b) integrazione della formula di Biot-Savart
- c) dominio infinito (nessuna condizione al contorno necessaria)
- d) trascurati effetti di mitigazione del campo dovuto a schermatura di fatto (analisi conservativa)
- e) sovrapposizione degli effetti
- f) analisi in regime simbolico (calcolo dei moduli e delle fasi)

Il software è stato sviluppato da tecnici specializzati con la collaborazione e la supervisione di docenti e ricercatori del Politecnico di Torino – Dipartimento Energia (prof. Aldo Canova e Ing. Luca Giaccone).

## 1 Verifica del modulo bidimensionale

La verifica del modulo bidimensionale è stata condotta mediante confronto con la formulazione analitica, come indicato dalla CEI 211-04, e mediante confronto con un codice di calcolo sviluppato dal CESI.

### 1.1 Confronto con CEI 211-04

Una possibile validazione del programma utilizzato può essere effettuata confrontando il campo calcolato con il programma stesso e quello calcolato per via analitica, secondo la norma CEI 211-4 paragrafo 4.3, su di un caso in cui questa seconda procedura è applicabile in modo esatto. Tale caso si riferisce ad un sistema di conduttori rettilinei, paralleli e indefiniti.

Sotto queste ipotesi l'induzione magnetica  $\mathbf{B}$  è data dall'espressione:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{k=1}^N \frac{\bar{I}_k}{d_k} \bar{u}_l \times \bar{u}_r \quad (1)$$

in cui  $N$  è il numero dei conduttori,  $d$  è la distanza tra il conduttore  $k$ -esimo e il punto di calcolo; i vettori  $\bar{u}_l$  e  $\bar{u}_r$  indicano, rispettivamente, il verso della corrente e della relativa normale;  $\times$  indica il prodotto vettoriale.

In particolare è stato analizzato il caso, che verrà riportato successivamente, relativo ad una linea a doppia terna su semplice palificazione con corrente di 310 A. Come si può osservare dalla figura 1, le due curve sono praticamente coincidenti.

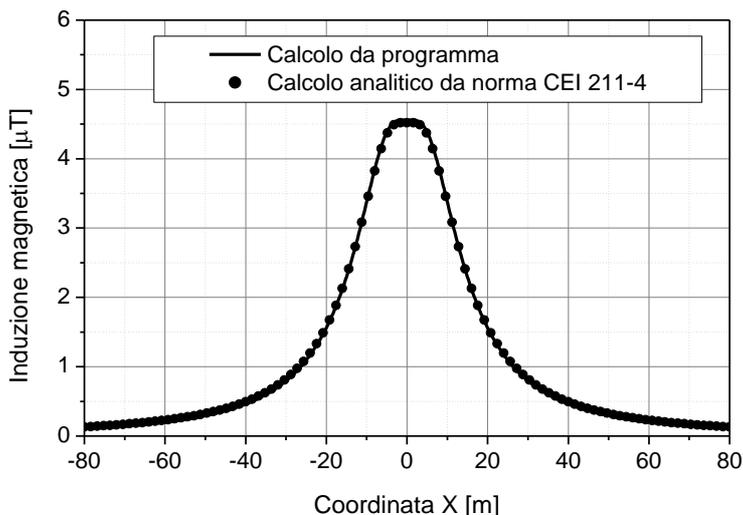


Figura 1: Induzione magnetica al suolo in prossimità di una linea aerea a doppia terna su semplice palificazione con corrente di 310: confronto tra MAGIC® e formula analitica CEI 211-4

**Come si può osservare il profilo di induzione magnetica ottenuto dal software MAGIC® coincide esattamente con i punti calcolati mediante la formula analitica CEI 211-4.**

## 1.2 Confronto con codice CESI

L'analisi del campo magnetico prodotto è stata condotta su due terne trifase di cavi affiancate. Le sezioni di affiancamento riguardano (Fig. 2):

- Buca giunti (interasse 70 cm e livello di interramento pari a 1.25 m)
- Formazione piana (interasse 35 cm e livello di interramento pari a 1.25 m)
- Distanza tra le due terne: 4m

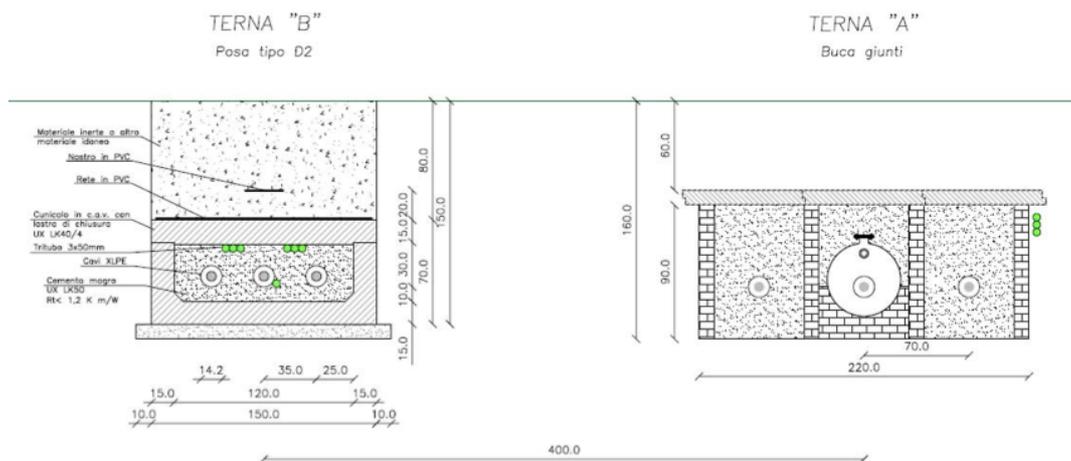


Figura 2: Affiancamento tra due linee interrate AT

Condizioni di carico e relazioni di fase:

- Terna B:  $I_{eff} = 1500$  A (RST)
- Terna A:  $I_{eff} = 1500$  A (TSR)

La configurazione analizzata mediante il codice sviluppato dal CESI porta alla distribuzione di campo riportata in Figura 3.

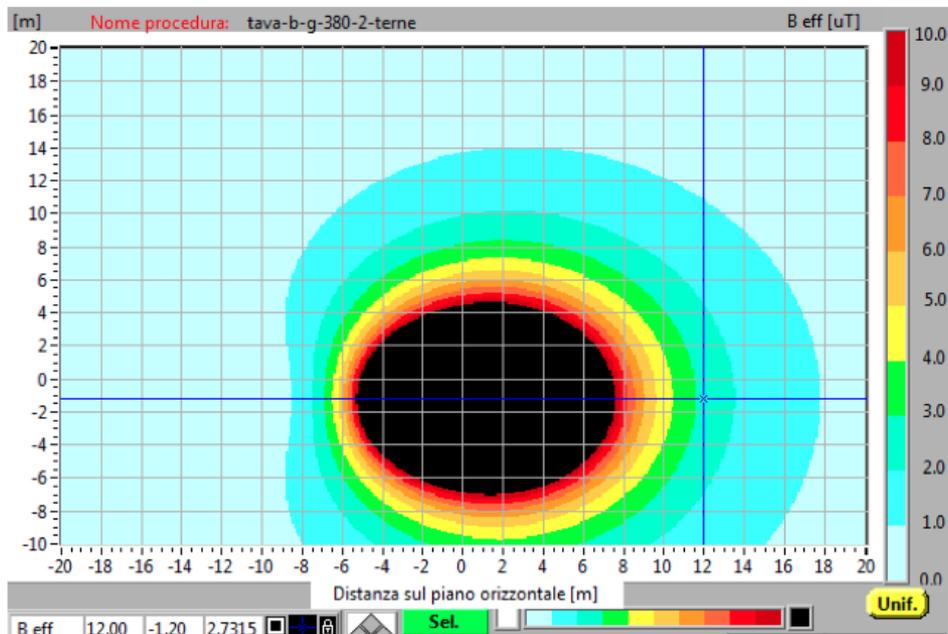
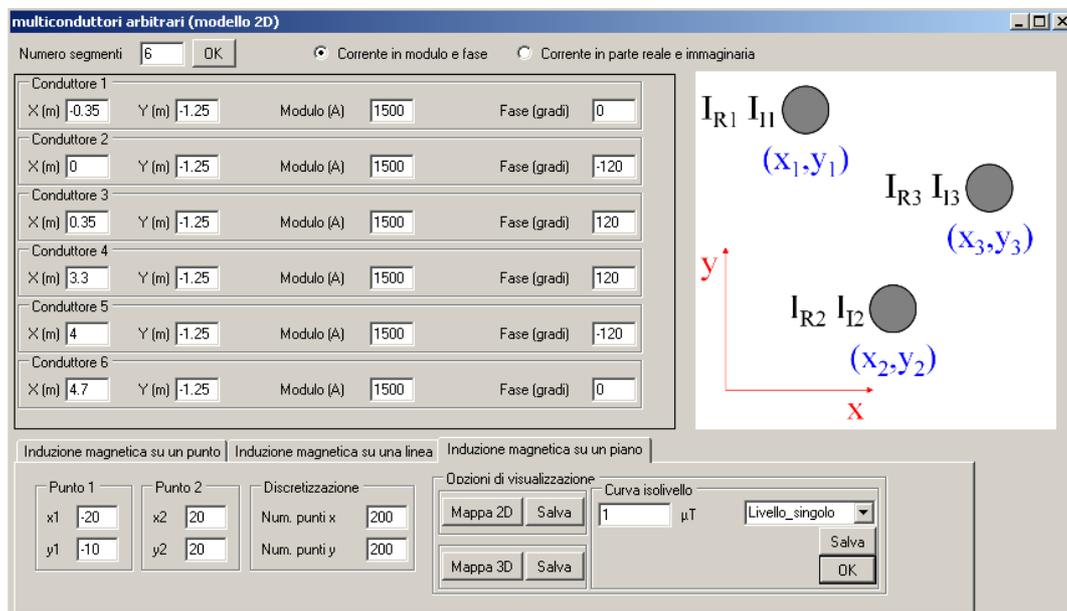


Figura 3: Mappa cromatica delle induzioni magnetiche calcolata mediante software CESI

La stessa configurazione è stata analizzata mediante il codice MAGIC<sup>®</sup> e può essere studiata attraverso due possibili funzioni messe a disposizione dal software:

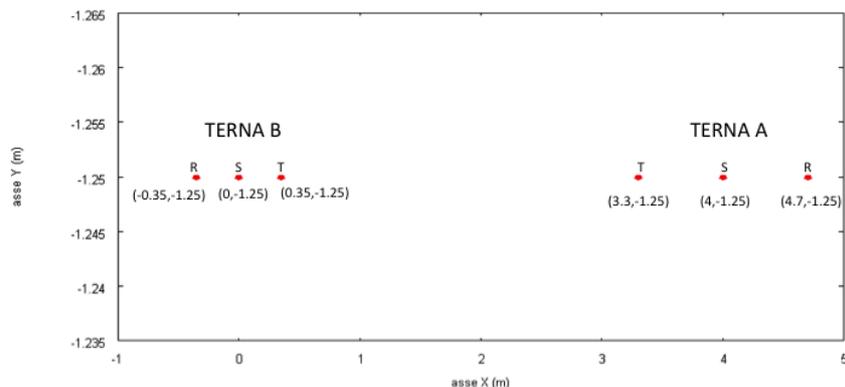
- Terne parallele
- Multiconduttori 2D

In questo documento verrà utilizzato il Multiconduttore 2D (Fig. 4) che permette di definire un sistema di N conduttori posizionati arbitrariamente in cui viene applicata una corrente arbitraria.



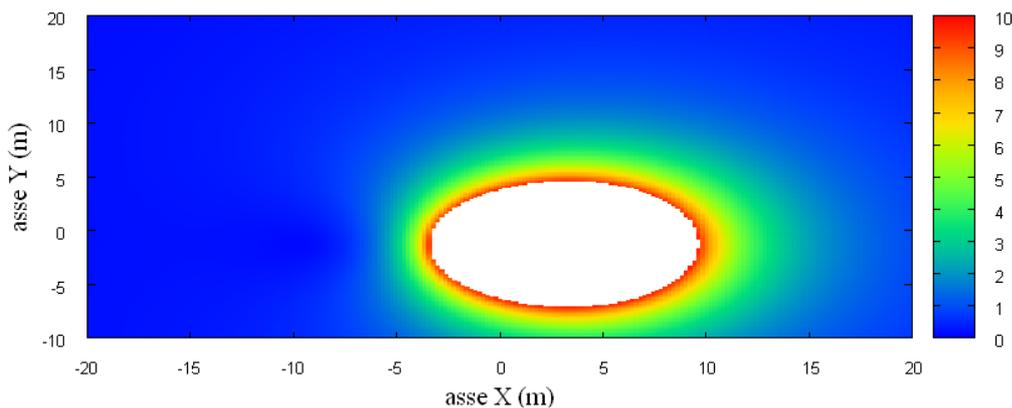
**Figura 4:**Schermata di ingresso modulo “multiconduttori arbitrari (modello 2D)””: dati definizione geometria e sorgenti

Nella seguente Fig. 5 è riportata la “geometria” del sistema che può essere visualizzata al termine dell’inserimento dati.



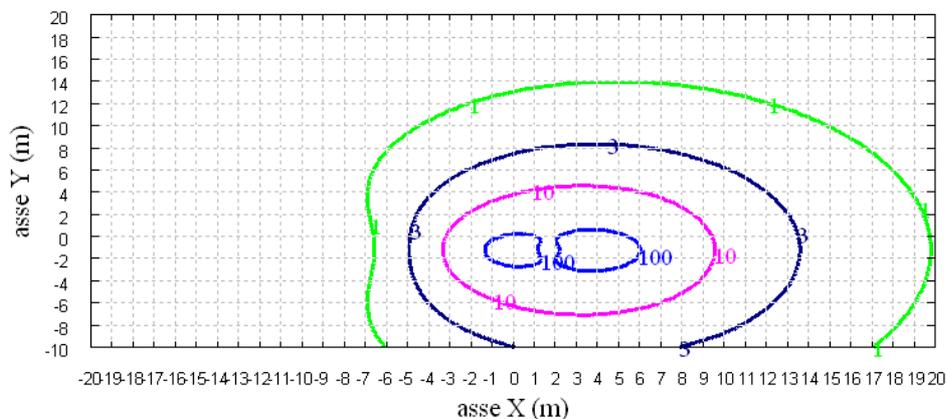
**Figura 5:** Geometria sorgenti

In Fig. 6 è riportata la mappa cromatica dell’induzione magnetica ottenuta dal software MAGIC® (valori in microT):



**Fig. 6:** Mappa cromatica dell’induzione magnetica ottenuta dal software MAGIC® (valori in microT):

In Fig. 7 sono riportate le linee isolivello dell’induzione magnetica (1, 3, 10, 100 microT) visualizzabili dal software MAGIC®.

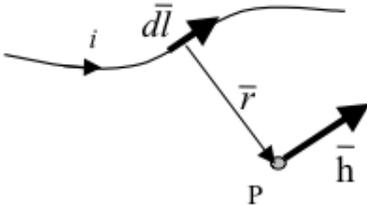


**Fig. 7** Linee isolivello dell’induzione magnetica (1, 3, 10, 100 microT) da software MAGIC®.

**Come si può osservare le mappe cromatiche dei due modelli risultano essere in perfetto accordo.**

## 2 Verifica del modulo tridimensionale

Il modulo tridimensionale del MAGIC® si basa principalmente sull'integrazione della formula di Biot-Savart:

$\vec{h} = \int \frac{i d\vec{l} \times \vec{r}}{4\pi r^3}$	
---	--

Nelle configurazioni impiantistiche si ha spesso a che fare con fasci di cavi che il cui profilo copre percorsi approssimabili con buona precisione a delle spezzate tridimensionali. Ogni spezzata è quindi modellabile mediante una successione di segmenti opportunamente orientati nello spazio. Ne consegue che, sapendo valutare il campo di un segmento arbitrariamente orientato nello spazio, è possibile calcolare il campo prodotto da un fascio di cavi mediante la sovrapposizione degli effetti di tutti i segmenti costituenti il fascio.

### 2.1 Campo prodotto da un segmento finito arbitrariamente orientato

Si consideri il segmento rappresentato nella Fig. 8.

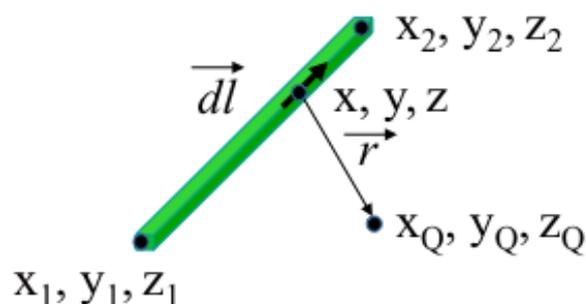


Fig. 8: Modello del segmento.

L'equazione del segmento in forma parametrica diventa la seguente:

$$\hat{x} = x_1 + (x_2 - x_1)t$$

$$\hat{y} = y_1 + (y_2 - y_1)t$$

$$\hat{z} = z_1 + (z_2 - z_1)t$$

Si consideri inoltre che:

$$\vec{r} = (x_Q - x)\vec{a}_x + (y_Q - y)\vec{a}_y + (z_Q - z)\vec{a}_z$$

$$d\vec{l} = dx\vec{a}_x + dy\vec{a}_y + dz\vec{a}_z$$

Facendo le opportune sostituzioni, la formula di Biot-Savart può essere risolta conducendo ad una formula chiusa per il calcolo delle tre componenti di campo  $H_x$ ,  $H_y$  e  $H_z$  (ovvero  $B_x$ ,  $B_y$  e  $B_z$ ). L'integrazione, sebbene sia macchinosa e porti ad espressioni analitiche poco compatte, può essere semplicemente risolta mediante l'utilizzo di un processore simbolico. Per tutti i dettagli circa l'integrazione si consideri la seguente referenza:

Canova A.; F. Freschi; M. Repetto; M. Tartaglia, (2005), *Description of Power Lines by Equivalent Source System*. In: COMPEL, vol. 24, pp. 893-905. - ISSN 0332-1649

## 2.2 Validazione sperimentale del modulo tridimensionale

In Fig. 9 viene rappresentata una spira costituita da 4 conduttori rettilinei che ben rappresenta una sorgente di tipo tridimensionale.

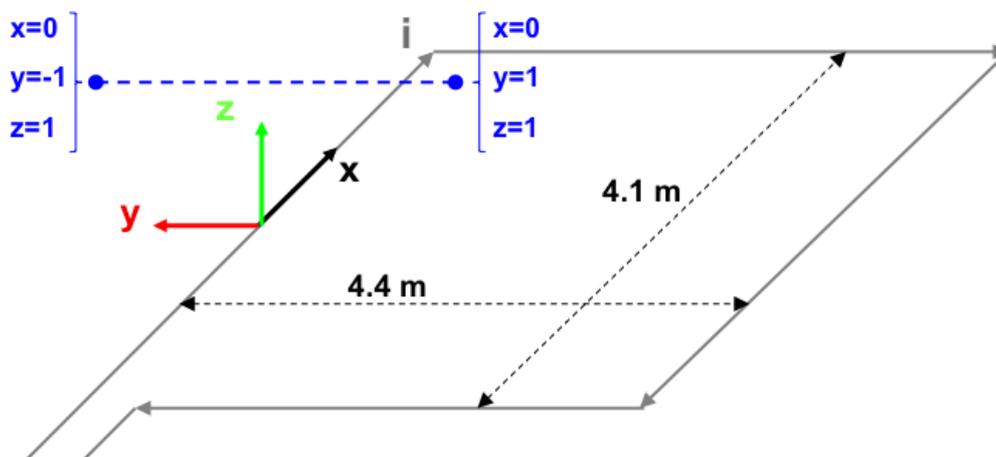


Fig. 9: Schema di spira quadrata.

Nella stessa immagine viene rappresentata una linea di confronto con le seguenti caratteristiche:

- È posta a 1 m da terra →  $z = \text{costante} = 1 \text{ m}$
- Si estenda lungo l'asse  $y$  →  $x = \text{costante} = 0 \text{ m}$
- È lunga due metri: →  $y \text{ minimo} = -1 \text{ m}$ ,  $y \text{ massimo} = 1 \text{ m}$

Su tale linea di confronto sono state eseguite delle misure sperimentali mediante sistema composto da sonda PMM-EHP50 C le cui caratteristiche sono riportate nel seguente elenco:

- Range di frequenze 5Hz – 100 kHz
- Range di campo elettrico 0.01 V/m – 100 kV/m
- Range di campo magnetico 1 nT – 10 mT
- Risoluzione 0.01 V/m - 1 nT
- Tempo di campionamento 30, 60 sec
- Massima acquisizione 1600 ore con acquisizione ogni 60 sec.
- SPAN 100, 200,500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 10 kHz, 100 kHz

Viene infine eseguito il confronto tra misure sperimentali e calcolo eseguito mediante software MAGIC<sup>®</sup>. I risultati di confronto sono riassunti nella seguente figura.

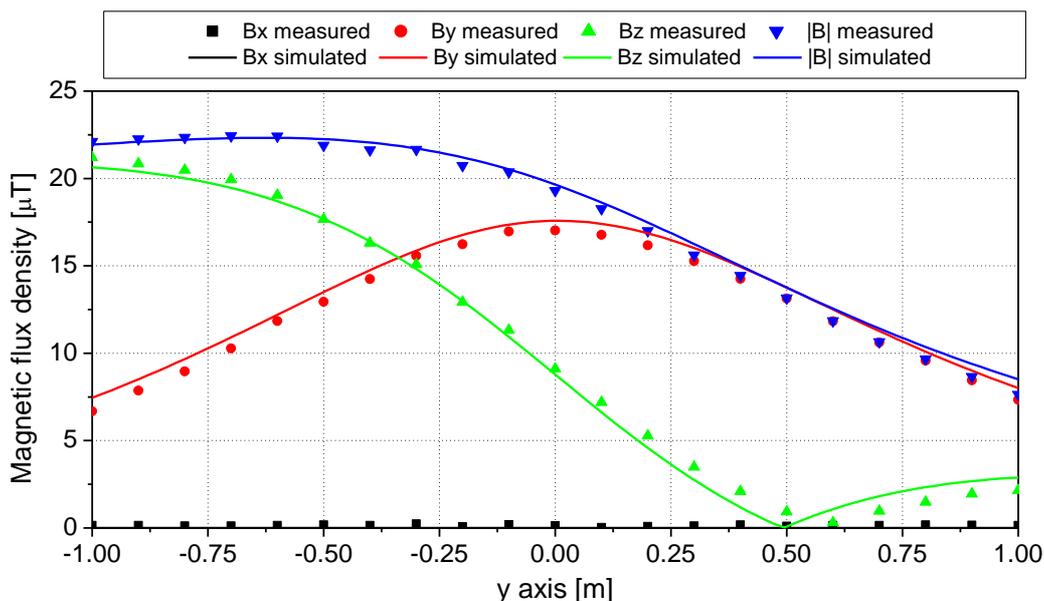


Fig. 10: Induzione magnetica misurata e calcolata mediante software MAGIC®.

***Si dimostra quindi che le misure sperimentali sono in perfetto accordo con il modello implementato nel software MAGIC®.***

### **3 Verifica del modulo tridimensionale:trasformatore di potenza**

In questa sezione vengono riportati i principali risultati ottenuti utilizzando il software MAGIC® nella simulazione dei campi generati da un trasformatore in resina (il trasformatore in olio rappresenta una situazione semplificata rispetto a quello in resina).

La validazione è condotta in due step:

- Verifica del modello MAGIC della singola colonna del trasformatore con modello FEM (Finite Element Method)
- Verifica del modello MAGIC del trasformatore completo con misure sperimentali

Maggiori dettagli sui confronti sono riportati nella seguente referenza:

*A. Canova, L. Giaccone, M. Manca, R. Turri, P. Casagrande, "Simplified power transformer models for environmental magnetic impact analysis", 2° Int. Conf. on EMF-ELF, Paris, 24-25 Marzo 2011.*

#### ***3.1 Verifica del modello MAGIC della singola colonna del trasformatore con modello FEM (Finite Element Method)***

MAGIC® propone due diversi modelli per il trasformatore: il primo di tipo semplificato e valido a partire da circa 0.5-1m dal trasformatore, il secondo più rigoroso valido anche a piccole distanze dal trasformatore. Nel seguito i due modelli verranno indicati come Modello 1 e Modello 2.

Un primo confronto tra i due modelli è stato effettuato con un codice agli elementi finiti (FEMM) di tipo assialsimmetrico. In Figura 11 sono riportate le principali dimensioni del caso analizzato: avvolgimento primario e secondario di un trasformatore di 630 kVA in resina e l'indicazione delle linee di calcolo.

Nei calcoli che seguono i due avvolgimenti sono caratterizzati dalle stesse amperspire in opposizione ( $N1 \cdot I1 = N2 \cdot I2$ ) e verranno considerate, come sorgenti, le correnti nominali.

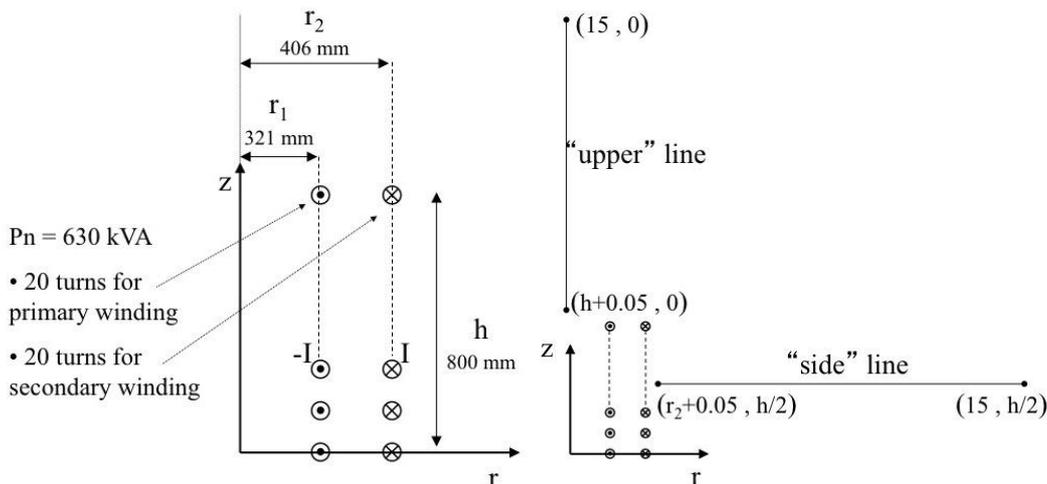


Fig. 11. Geometria del sistema (1) e linee di calcolo (2)

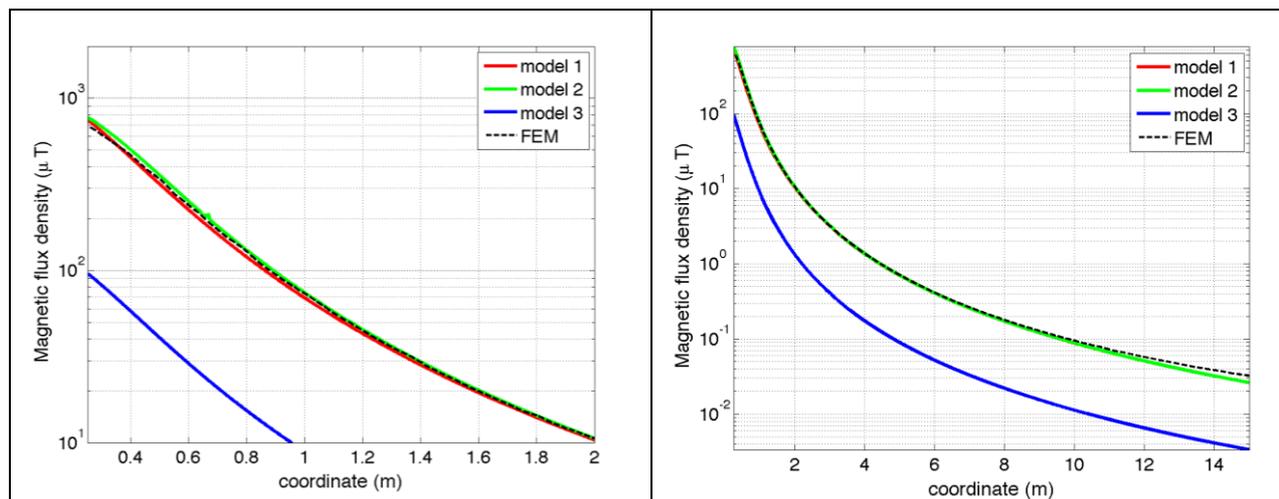
Le Fig. 12 e 13 mostrano, rispettivamente, i valori di induzione magnetica lungo la linea ad 1m dal lato degli avvolgimenti e lungo la linea ad 1.5 m sopra gli avvolgimenti. Le figure mettono a confronto il “modello 1 e 2” ed il calcolo, assunto come riferimento, effettuato mediante codice FEM.

**Si può osservare un ottimo accordo tra i “modelli 1 e 2” adottati nel MAGIC® lungo entrambe le linee mentre per distanze inferiori al metro il modello semplificato, con particolare riferimento al campo lungo la linea verticale, risulta portare a delle discrepanze significative. Per tali distanze è pertanto conveniente utilizzare il “modello 2” che risulta più accurato a spese di un maggiore peso computazionale (nell’ordine comunque delle decine di secondi).**

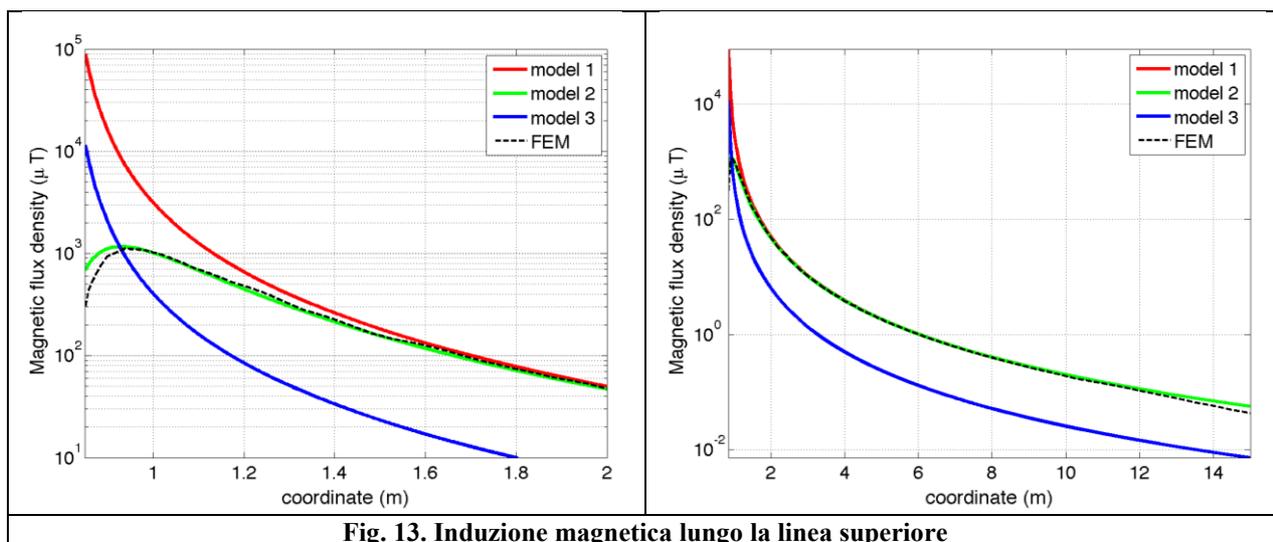
I modelli inseriti nel MAGIC® sono inoltre confrontati con il modello proposto da un altro software commerciale (EFC-400) che verrà denominato “Modello 3”. Tale modello è basato sull’ipotesi che il campo magnetico disperso, essendo correlato con la reattanza di dispersione del trasformatore, risulta quantitativamente correlato alla tensione di corto circuito. Il modello proposto da EFC-400 è quindi costituito da un unico avvolgimento (che sintetizza il primario ed il secondario) percorso da una corrente ridotta, rispetto alla corrente nominale, secondo la seguente formula:

$$I = I_R \cdot \frac{V_{SC} \%}{100} \quad (14)$$

in cui  $I_R$  è la corrente nominale (di primario o secondario) e  $V_{SC}$  è la tensione di cortocircuito percentuale. Può essere utilizzata la corrente di primario o di secondario ( $I_{R1}$  o  $I_{R2}$ ) e corrispondentemente occorre considerare le spire di primario o secondario ( $N_1$  e  $N_2$ ).



**Fig. 12. Induzione magnetica lungo la linea laterale**



**Fig. 13. Induzione magnetica lungo la linea superiore**

Come si può osservare dai profili di induzione magnetica il modello 3 risulta scarsamente idoneo a modellare i due avvolgimenti concentrici di primario e secondario.

### 3.2 Verifica del modello MAGIC del trasformatore completo con misure sperimentali

In questo paragrafo il modelli vengono confrontati con dati sperimentali. Il caso analizzato si riferisce ad un trasformatore in resina da 630 kVA, 15kV/400V, funzionante in condizioni di corto circuito (Fig. 14). Il trasformatore viene alimentato con una tensione che fa circolare negli avvolgimenti una corrente pari al 42% della corrente nominale, si ha quindi 10.4 A di primario (lato MT) e 390 A di secondario (lato BT). Il modello del trasformatore risulta quindi completo e costituito da tutti gli avvolgimenti delle tre fasi.

Le linee di calcolo S1 ed S2 (Fig. 15) sono poste ad 1.5m dal piano di appoggio del trasformatore. E' importante sottolineare che il contributo dei terminali di BT influisce significativamente il campo magnetico ambientale, specialmente nella direzione S1. Pertanto, l'introduzione di tali sorgenti aggiuntive agli avvolgimenti porta ad una riduzione degli scostamenti tra i vari modelli.

In Fig. 16 e 17 sono riportati i confronti tra le induzioni magnetiche, lungo le linee S1 ed S2, misurate e calcolate con i diversi modelli.

**Come si può osservare, in particolare per la linea S2 (dove il contributo delle connessioni è trascurabile) il modello 1 ed il modello 2 approssimano in modo soddisfacente i dati sperimentali.**

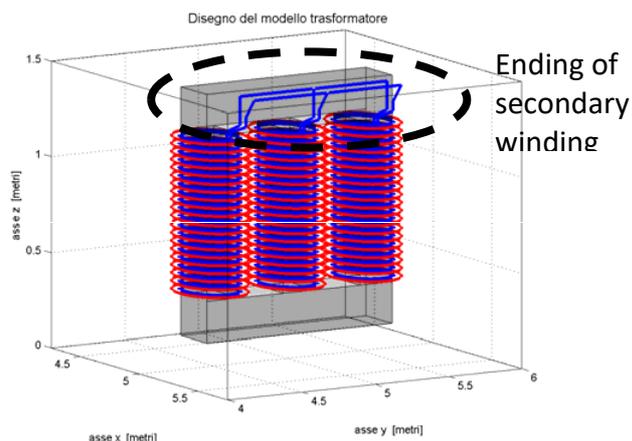


Fig. 14: Connessioni elettriche considerate ai lati BT.

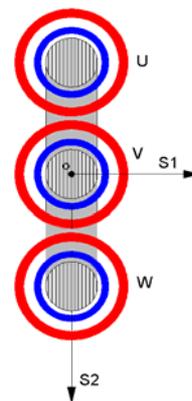


Fig. 15: Linee di calcolo S1 ed S2

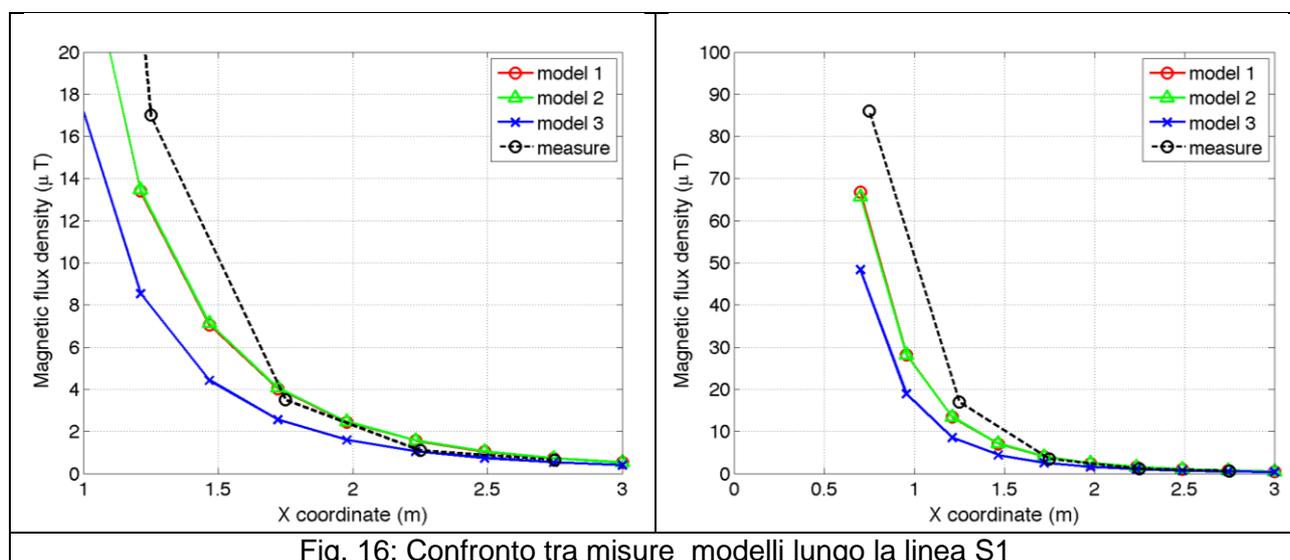


Fig. 16: Confronto tra misure modelli lungo la linea S1

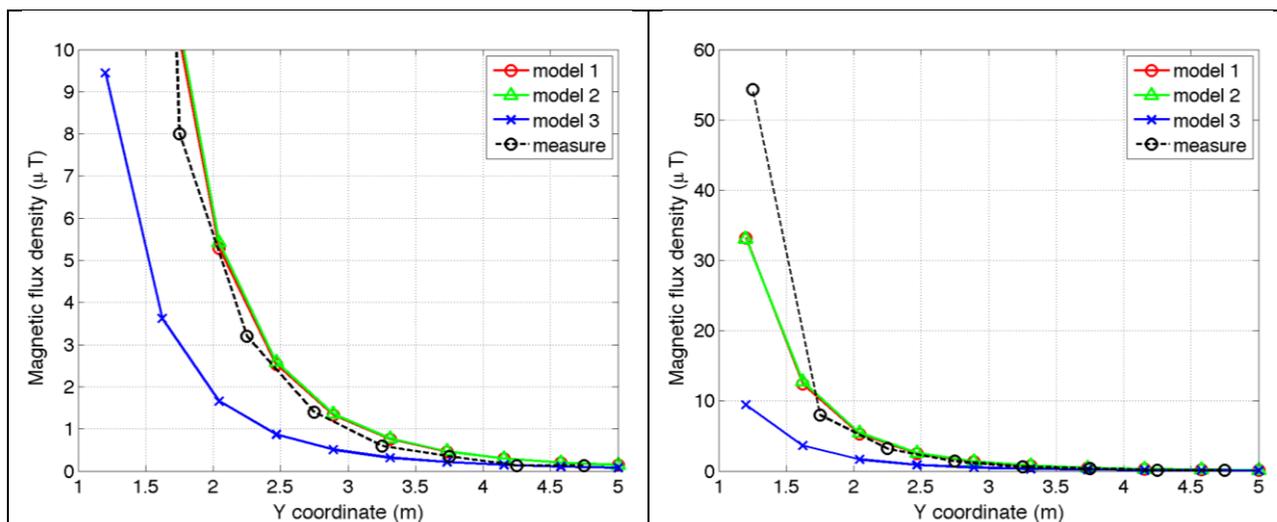


Fig. 17. Confronto tra misure modelli lungo la linea S2

## Conclusioni

Il presente documento si propone di fornire alle autorità competenti tutti gli elementi necessari affinché il software MAGIC® possa essere validato secondo quanto richiesto dal Decreto Ministeriale (160) del 29/05/2008 “Approvazione della metodologia di calcolo per la determinazione delle fasce di rispetto per gli elettrodotti”.

Come indicato nell’art. 5.1.2 (Calcolo delle fasce di rispetto per linee elettriche) del decreto del 29/05/2008, i modelli tridimensionali non sono ancora standardizzati, tuttavia un software in cui i modelli soddisfino ai seguenti requisiti indicati nel decreto:

“...i modelli utilizzati devono essere descritti in termini di algoritmi implementati, condizioni al contorno e approssimazioni attuate. Essi devono essere validati attraverso misure o per confronto con modelli che abbiano subito analogo processo di verifica. La documentazione esplicativa e comprovante i criteri di cui sopra deve essere resa disponibile alle autorità competenti ai fini dei controlli”, può essere ritenuto idoneo allo scopo e, a tal fine, è stato redatto il presente documento.

Per quanto concerne in particolare le cabine elettriche, la complessità delle sorgenti in esame richiede una valutazione accurata che tenga conto principalmente della tridimensionalità delle singole sorgenti e l’effetto prodotto dalla combinazione delle stesse (sovrapposizione degli effetti). Nelle analisi precedentemente svolte sono stati analizzati e validati i principali componenti costituenti le cabine quali linee elettriche di connessione (tratti di conduttori di lunghezza finita), quadri elettrici (tratti conduttori di lunghezza finita) e trasformatori (elementi toroidali e tratti di conduttore di lunghezza finita).

***Dai risultati ottenuti e presentati è quindi possibile concludere che il Software MAGIC® ha le caratteristiche per essere rispondente alle indicazioni richieste dal Decreto Ministeriale (160) del 29/05/2008, lasciando ovviamente alle autorità competenti la verifica ed il giudizio finale.***