



# Comune di Villetta Barrea

Provincia di L'Aquila

## OGGETTO

INTERVENTI DI MANUTENZIONE STRAORDINARIA PER  
LA RIATTIVAZIONE DELLA CENTRALE IDROELETTRICA  
CON POTENZA NOMINALE DI CONCESSIONE  
352,94 KW

## Studio Preliminare Ambientale

IL TECNICO

TITOLO ELABORATO

## VALUTAZIONE DI IMPATTO Elettromagnetico

ID ELABORATO

# A<sub>3</sub>

REVISIONE

00

DATA

16-07-2021

MOTIVO REVISIONE

Prima emissione



**ECOPOINT Engineering s.r.l.**

Via Cavour, 435 - 67051 Avezzano (AQ)  
Tel. 0863-509492 - Fax 0863-489749

[info@ecopointsr.l.it](mailto:info@ecopointsr.l.it)

## INDICE

1. Premessa .....	3
2. Riferimenti normativi .....	3
3. Inquadramento dell'area di studio e caratterizzazione dello stato ante operam .....	3
3.1 Inquadramento territoriale e urbanistico .....	3
3.2 Individuazione delle sorgenti esistenti.....	6
3.3 Individuazione dei recettori .....	9
3.4 Limiti di riferimento .....	9
3.5 Livelli CEM di fondo.....	9
4. Analisi di impatto elettromagnetico .....	16
4.1 Metodologia .....	16
4.2 Individuazione e caratterizzazione delle sorgenti di progetto.....	17
4.2.1 Descrizione del progetto .....	17
4.2.2 Sorgenti previste dal progetto .....	19
4.3 Simulazione dei valori di campo.....	20
5. Conclusioni .....	26
Allegati .....	26

## 1. PREMESSA

Il presente studio è relativo al progetto per interventi di manutenzione straordinaria finalizzato alla riattivazione di una centrale idroelettrica esistente di proprietà del Comune di Villetta Barrea ed ha lo scopo di valutare l'impatto elettromagnetico previsionale causato dall'opera con particolare riferimento a:

- linee MT interrate;
- cabina di trasformazione.

## 2. RIFERIMENTI NORMATIVI

- Legge n. 36 del 22.02.2001 – *Legge quadro sulla protezione delle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici*;
- D.P.C.M. del 08.07.2003 – *Fissazione dei limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni ai campi elettrici e magnetici alla frequenza di rete (50 Hz) generati dagli elettrodi*;
- D.M. 29 maggio 2008 – *Approvazione della metodologia di calcolo per la determinazione delle fasce di rispetto degli elettrodotti*;
- D.Lgs. 9 aprile 2008 n. 81 – *Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro*;
- Norma 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*;
- Norma CEI 211-4 – *Guida ai metodi di calcolo dei campi elettrici e magnetici generati da linee elettriche*;
- Norma CEI 106-11 – *Guida per la determinazione delle fasce di rispetto per gli elettrodotti secondo le disposizioni del DPCM 8 luglio 2003 (art. 6). Parte 1: linee elettriche aeree e in cavo*.

## 3. INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO E CARATTERIZZAZIONE DELLO STATO ANTE OPERAM

### 3.1 Inquadramento territoriale e urbanistico

L'area oggetto di studio trova la sua ubicazione nel tratto originario del Fiume Sangro, nel suo corso montano, dalle sorgenti, alle pendici del Monte Turchio a circa 1400 m s.l.m. nel territorio del Comune di Pescasseroli (AQ) fino al Lago di Barrea a quota di 980 m s.l.m..

Dal punto di vista cartografico l'area è inquadrata come segue:

- IGM serie 25.000: Foglio 391, Sezione I – “Barrea”;
- CTRN 5.000: Sezione 391044.



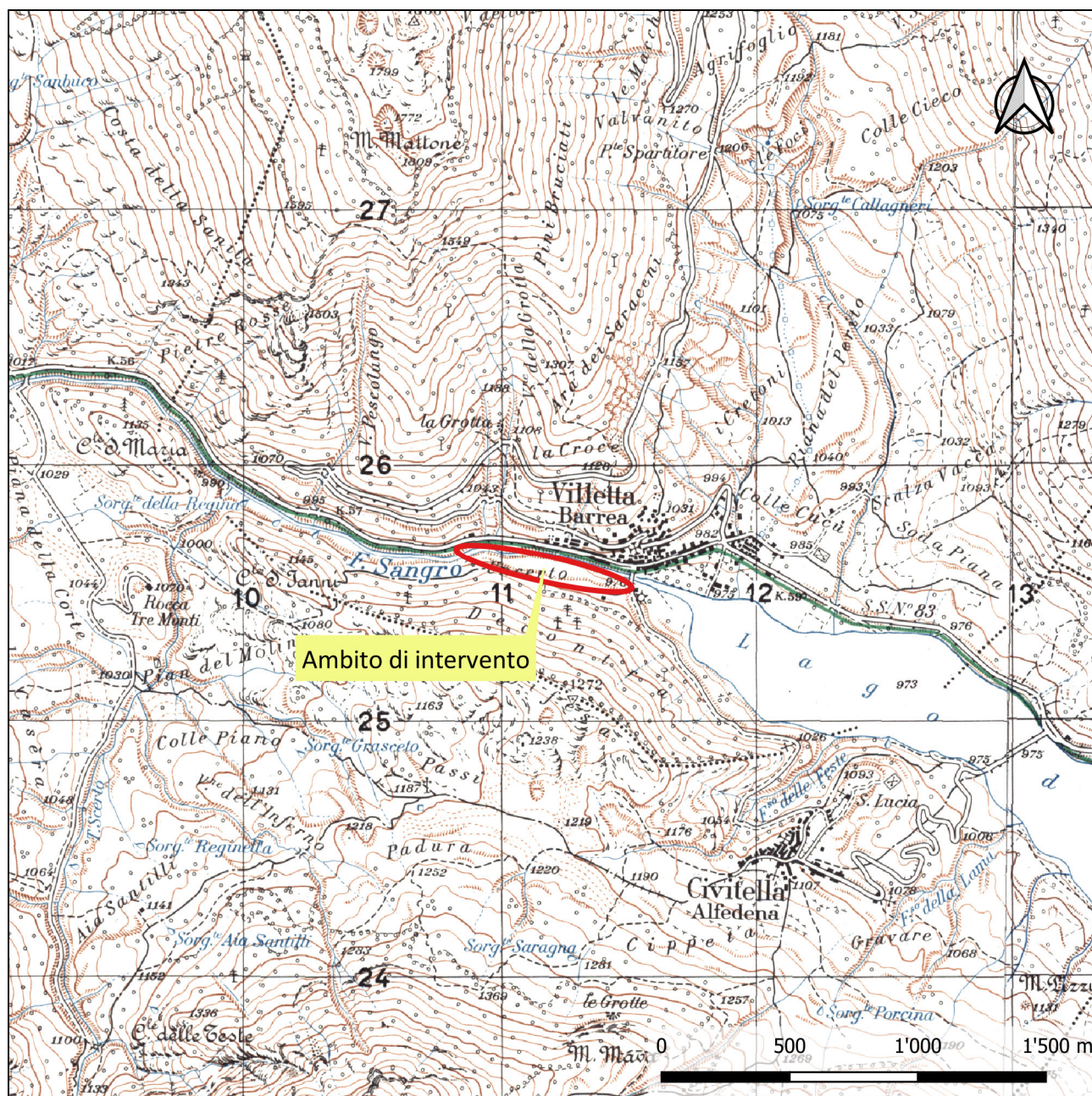


Figura 1 - Inquadramento dell'area su base CTR, scala 1: 25.000



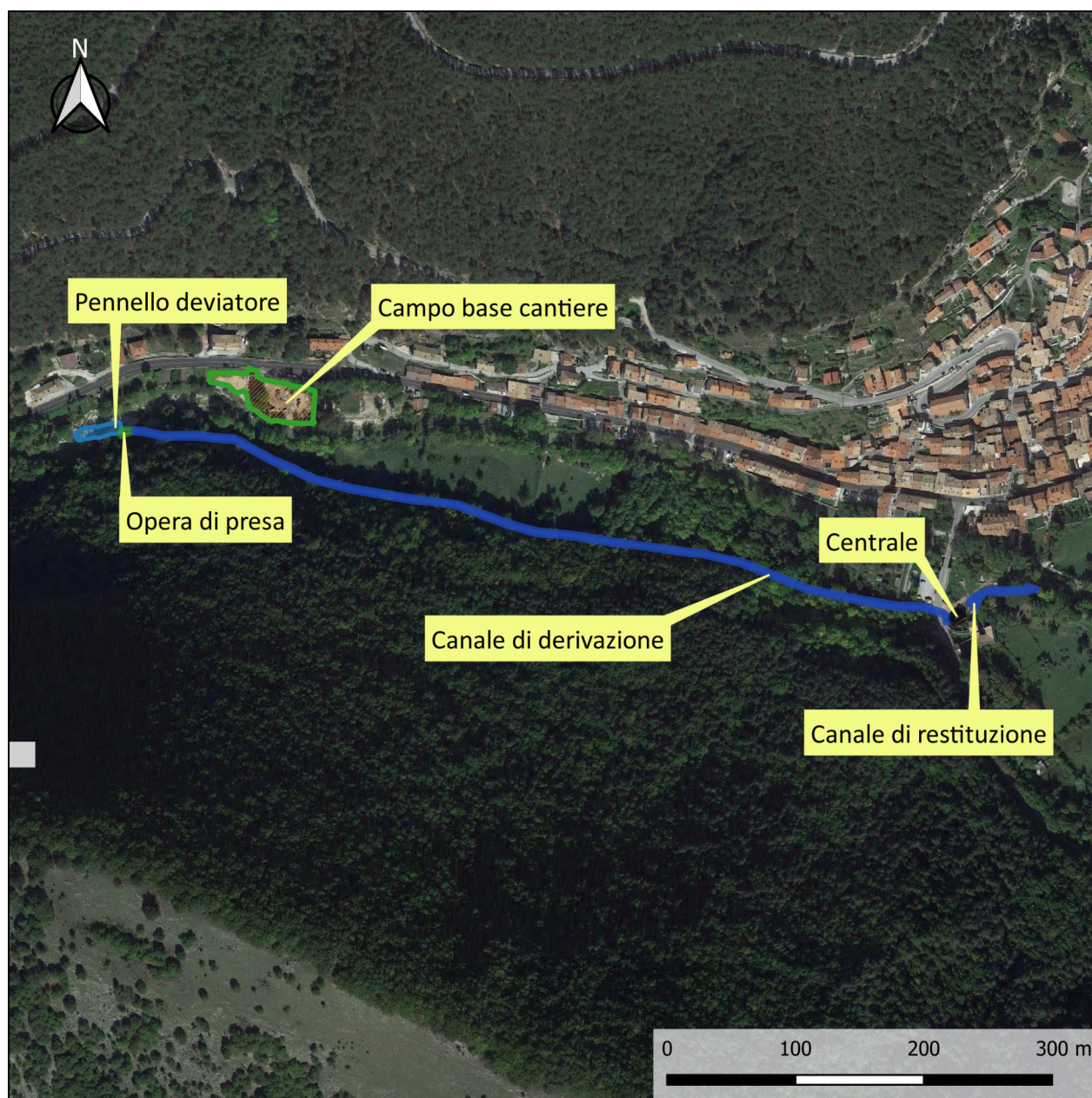


Figura 2 – Inquadramento dell'area in esame (Fonte: Google Earth)



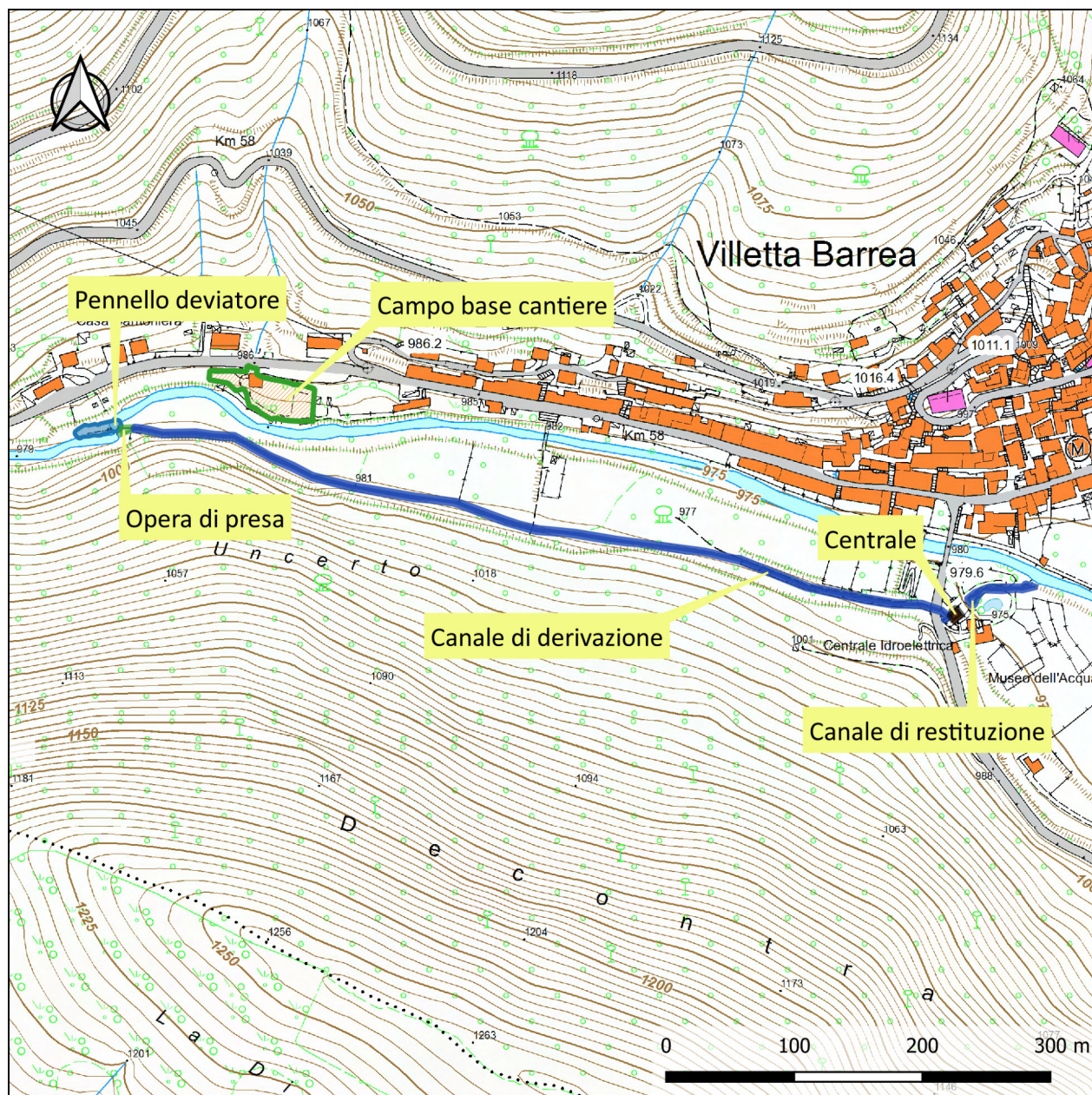


Figura 3 – Inquadramento dell'area su base CTR, scala 1: 5.000

### 3.2 Individuazione delle sorgenti esistenti

Allo stato attuale la centrale idroelettrica risulta inattiva. Le uniche sorgenti di CEM presenti nell'area di studio sono riconducibili alla cabina ENEL di connessione alla rete elettrica nazionale e un cavidotto.



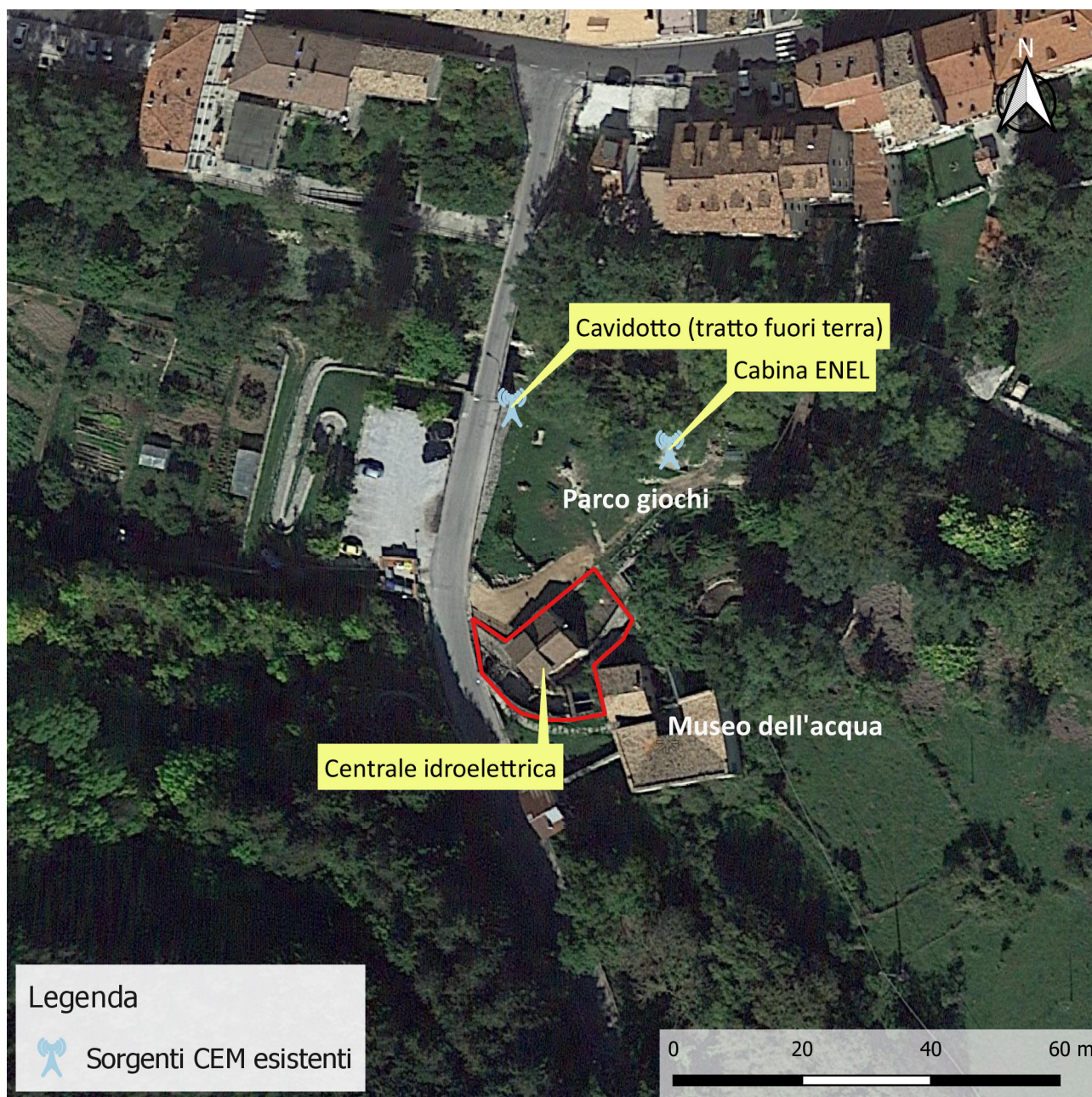


Figura 4 - Mappa delle sorgenti di CEM esistenti





**Figura 5 - Sorgente CEM esistente: cavidotto**



**Figura 6 - Sorgente CEM esistente: cabina ENEL**

### 3.3 Individuazione dei recettori

Nelle vicinanze del sito sono presenti aree in cui sono previste permanenze della popolazione per più di 4 ore e in particolare:

- l'area giochi prospiciente la centrale idroelettrica sul lato nord;
- il museo dell'acqua confinante sul lato sud-est della centrale;
- l'area residenziale distante circa 60 m a nord della centrale idroelettrica.

### 3.4 Limiti di riferimento

Ai fini della protezione della popolazione dall'esposizione ai campi elettrici e magnetici alla frequenza di rete (50Hz) generati da linee e cabine elettriche, il DPCM 8 luglio 2003 (artt. 3 e 4) fissa, in conformità alla Legge 36/2001 (art. 4, c. 2):

- i limiti di esposizione del campo elettrico (5 kV/m) e del campo magnetico (100  $\mu$ T) come valori efficaci, per la protezione da possibili effetti a breve termine;
- il valore di attenzione (10  $\mu$ T) e l'obiettivo di qualità (3  $\mu$ T) del campo magnetico da intendersi come mediana nelle 24 ore in normali condizioni di esercizio, per la protezione da possibili effetti a lungo termine connessi all'esposizione nelle aree di gioco per l'infanzia, in ambienti abitativi, in ambienti scolastici e nei luoghi adibiti a permanenza non inferiore a 4 ore giornaliere (luoghi tutelati).

Il valore di attenzione si riferisce ai luoghi tutelati esistenti nei pressi di elettrodotti esistenti; l'obiettivo di qualità si riferisce, invece, alla progettazione di nuovi elettrodotti in prossimità di luoghi tutelati esistenti o alla progettazione di nuovi luoghi tutelati nei pressi di elettrodotti esistenti

**Tabella 1 - Limiti D.P.C.M. 8 luglio 2003 - Popolazione**

	Intensità di campo elettrico (E) [KV/m]	Intensità di campo magnetico (B) [ $\mu$ T]	Note
Limite di esposizione	5	100	Limite generale
Valore di attenzione	5	10	Aree di gioco per l'infanzia, in ambienti abitativi, in ambienti scolastici e nei luoghi adibiti a permanenze non inferiori a 4 ore giornaliere
Obiettivo di qualità	5	3	Nuove installazioni

### 3.5 Livelli CEM di fondo

In data 21/06/2021 sono state eseguite indagini strumentali nelle aree limitrofe della centrale idroelettrica in modo da caratterizzare le sorgenti esistenti, già individuate al paragrafo 3.2 *Individuazione delle sorgenti esistenti*.

Le modalità di rilevamento seguite sono quelle indicate dalla Norma 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) con strumentazione tarata; si riporta di seguito una tabella esemplificativa dei risultati. Per effettuare misure di esposizione nell'intervallo di frequenze di interesse è stata utilizzata strumentazione in banda larga per la misura delle seguenti grandezze:

- valore efficace del campo elettrico E (espresso in V/m);
- valore efficace dell'induzione magnetica B (espresso in  $\mu$ T).

I punti di misura dell'esposizione sono stati scelti attraverso una caratterizzazione spaziale preliminare in modo da individuare le zone più critiche.

In conformità con la Norma Italiana CEI 211-6 durante le misurazioni sono state adottate le seguenti precauzioni:

- Durante la misura, lo strumento non ha subito interferenze (viene considerata tale anche uno sbalzo termico);
- Lo strumento non è stato appoggiato su strutture conduttrici;
- Il corpo dell'operatore è rimasto distante almeno 3 m dallo strumento;

#### CARATTERISTICHE STRUMENTAZIONE DI MISURA

Tipo	Misuratore	Sonda triassiale
Marca	Wavecontrol	Wavecontrol
Modello	SMP2	WP400
N. serie	21SN1613	21WP100815

Di seguito si riporta la sintesi dei risultati ottenuti dai rilievi strumentali applicando anche l'incertezza strumentale. Per maggiori dettagli sul rilievo si rimanda al report allegato alla presente relazione (Allegato 1).

Data/ora	ID punto	Valore	UM	X WGS84 33N [m]	Y WGS84 33N [m]	Quota s.l.m. [m]
21/06/2021 11:48:42	CEM-01-E	0,4496	V/m	411444,628	4625362,636	981
21/06/2021 11:48:07	CEM-01-B	8,837	$\mu$ T	411444,628	4625362,636	981
21/06/2021 11:11:36	CEM-02-E	0,4136	V/m	411468,089	4625357,394	983
21/06/2021 11:10:45	CEM-02-B	0,5701	$\mu$ T	411468,089	4625357,394	983

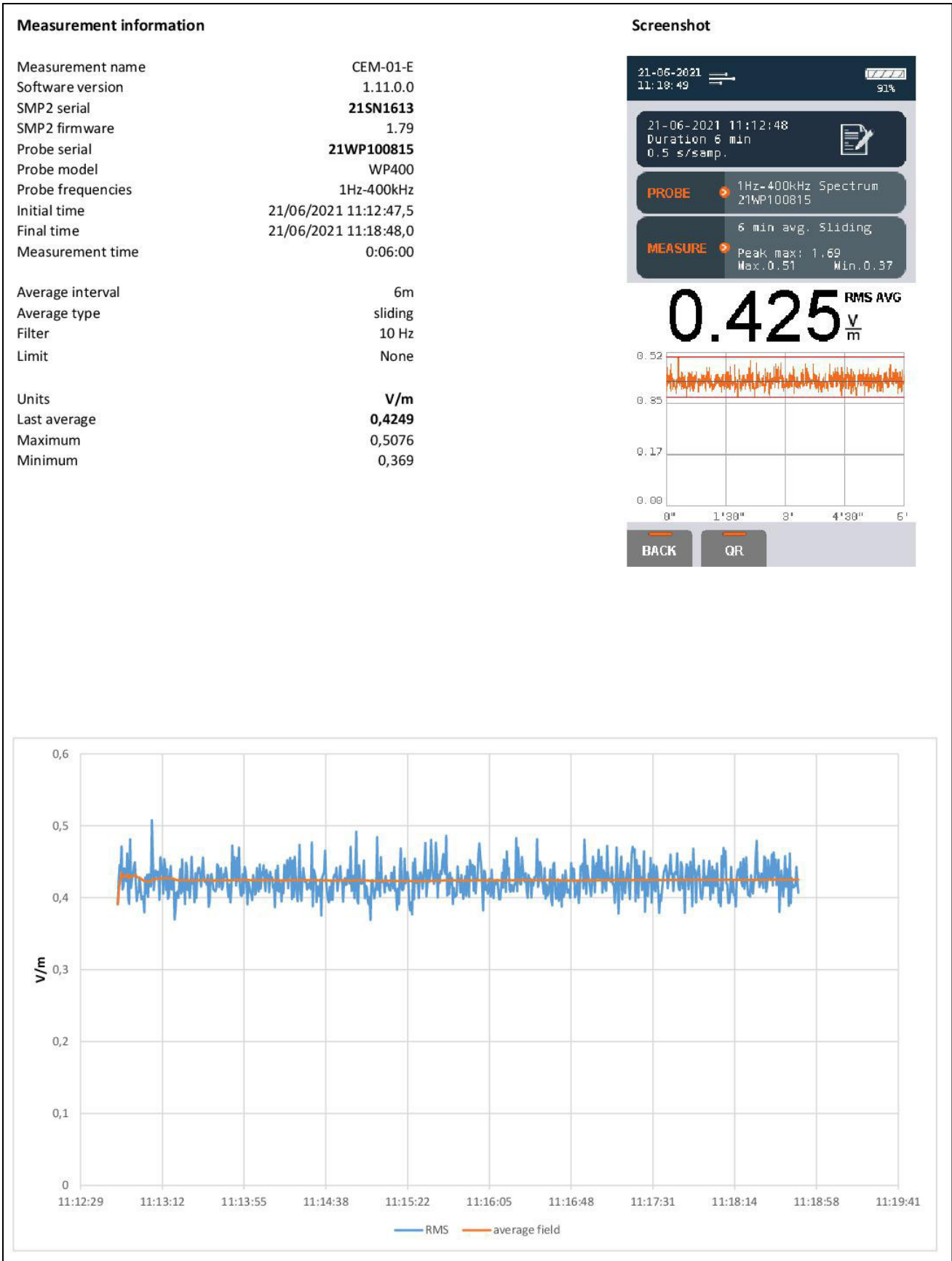
I valori più alti riscontrati riguardano la cabina ENEL nella parte posteriore in cui si osservano valori di induzione magnetica superiori a 8  $\mu$ T.

La caratterizzazione spaziale effettuata nella zona in cui si possono presentare permanenze della popolazione per più di 4 ore al giorno (parco giochi, museo dell'acqua) non ha evidenziato la presenza di valori anomali di campo elettrico e induzione magnetica.





**Figura 7 - Punti di misura CEM**



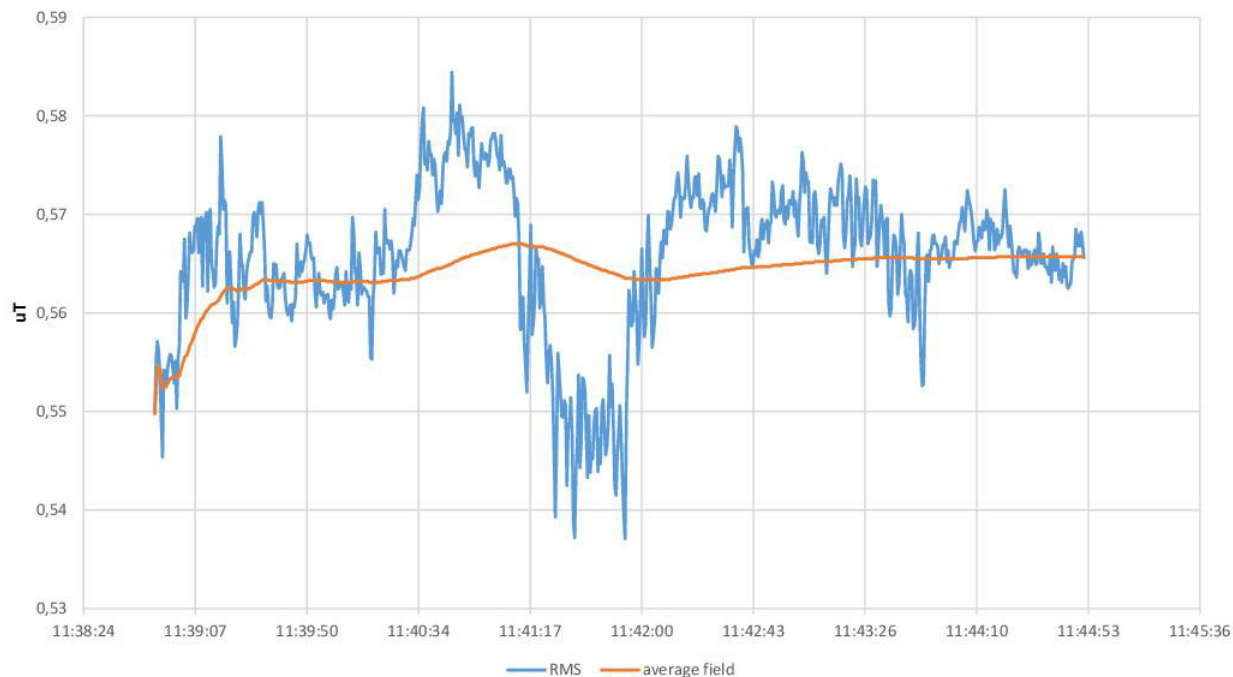
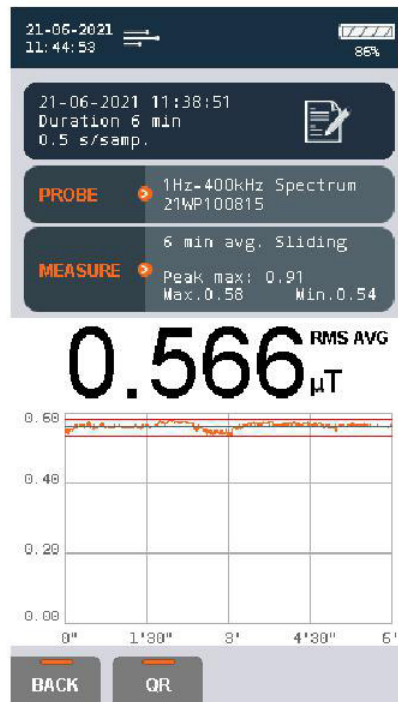
## Measurement information

Measurement name CEM-01-B  
Software version 1.11.0.0  
SMP2 serial 21SN1613  
SMP2 firmware 1.79  
Probe serial 21WP100815  
Probe model WP400  
Probe frequencies 1Hz-400kHz  
Initial time 21/06/2021 11:38:50,5  
Final time 21/06/2021 11:44:51,0  
Measurement time 0:06:00

Average interval 6m  
Average type sliding  
Filter 10 Hz  
Limit None

Units  $\mu\text{T}$   
Last average 0,5657  
Maximum 0,5844  
Minimum 0,5371

## Screenshot

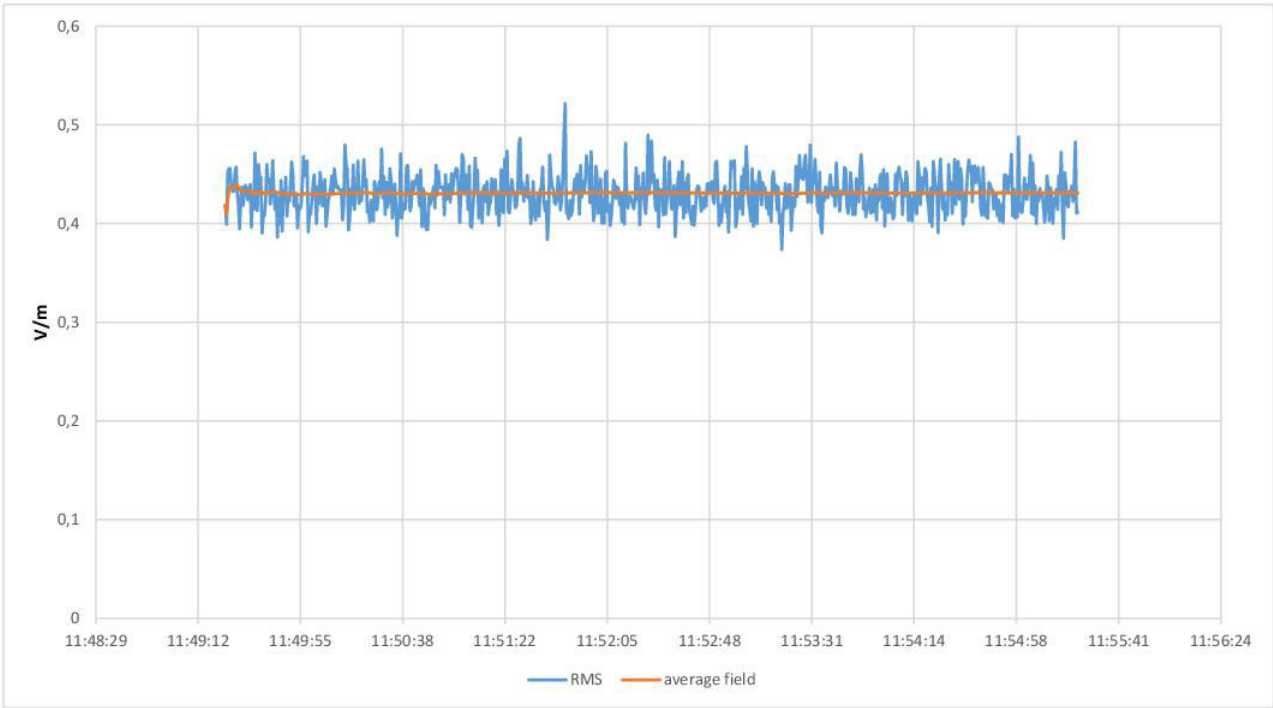
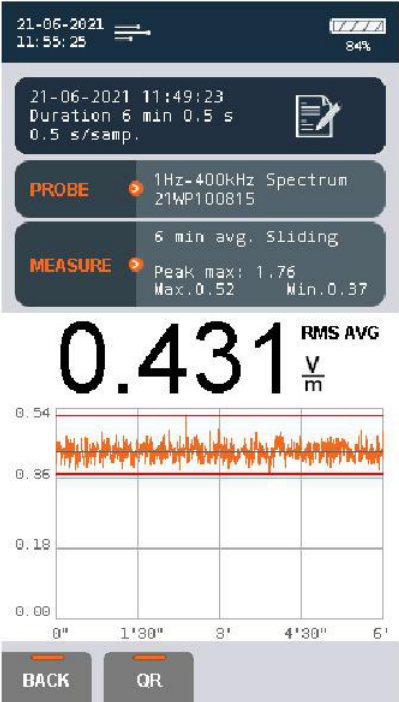




**Measurement information**

Measurement name	CEM-02-E
Software version	1.11.0.0
SMP2 serial	<b>21SN1613</b>
SMP2 firmware	1.79
Probe serial	<b>21WP100815</b>
Probe model	WP400
Probe frequencies	1Hz-400kHz
Initial time	21/06/2021 11:49:22,5
Final time	21/06/2021 11:55:23,5
Measurement time	0:06:00,5
Average interval	6m
Average type	sliding
Filter	10 Hz
Limit	None
Units	<b>V/m</b>
Last average	<b>0,4309</b>
Maximum	0,5216
Minimum	0,3736

**Screenshot**



## Measurement information

Measurement name CEM-02-B  
Software version 1.11.0.0  
SMP2 serial 21SN1613  
SMP2 firmware 1.79  
Probe serial 21WP100815  
Probe model WP400  
Probe frequencies 1Hz-400kHz  
Initial time 21/06/2021 11:58:06,5  
Final time 21/06/2021 12:04:07,0  
Measurement time 0:06:00

Average interval 6m  
Average type sliding  
Filter 10 Hz  
Limit None

Units  $\mu\text{T}$   
Last average 8,898  
Maximum 11,41  
Minimum 7,789

## Screenshot

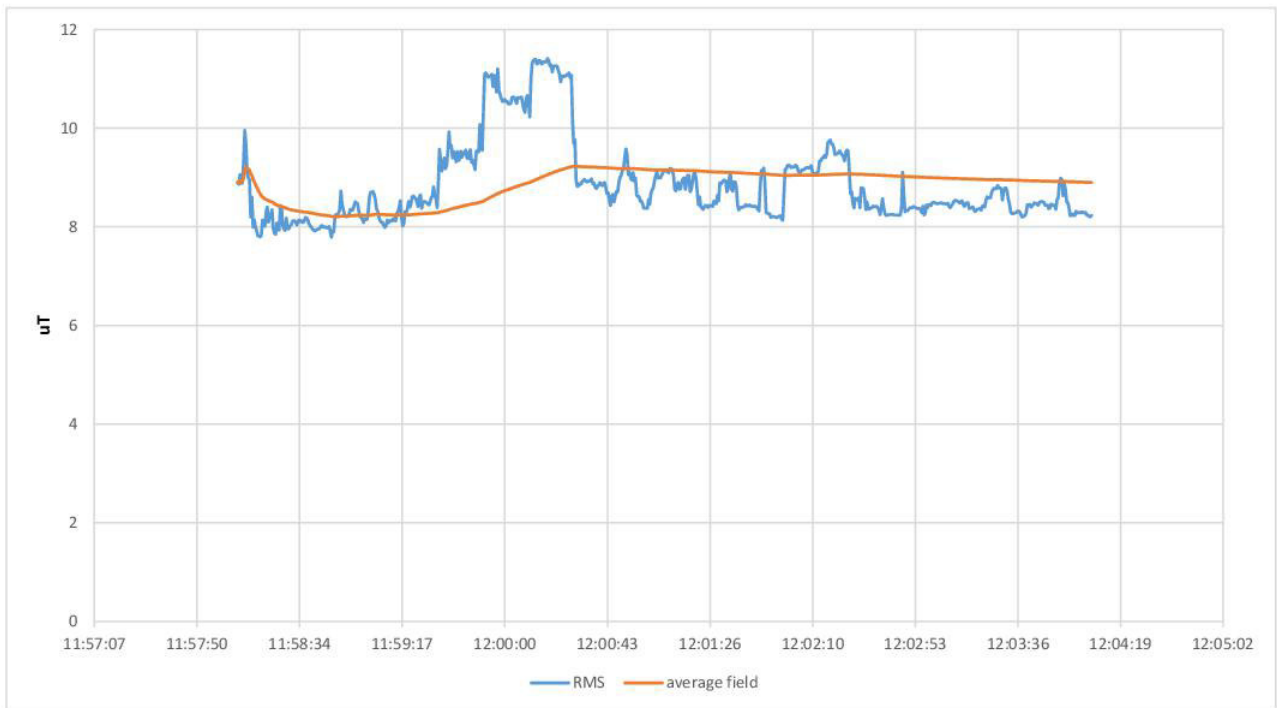
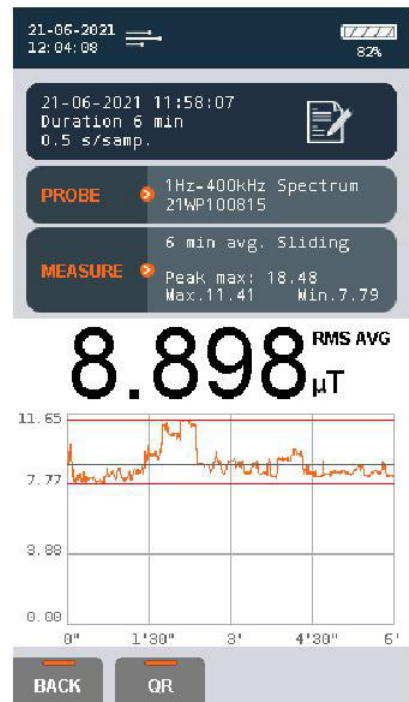




Figura 8 - Mappa ubicazione punti di misura CEM

#### 4. ANALISI DI IMPATTO ELETTROMAGNETICO

##### 4.1 Metodologia

Il DPCM 8 luglio 2003, all'art. 6, in attuazione della Legge 36/01 (art. 4 c. 1 lettera h), introduce la metodologia di calcolo delle fasce di rispetto, definita nell'allegato al Decreto 29 maggio 2008 (Approvazione della metodologia di calcolo per la determinazione delle fasce di rispetto degli elettrodotti). Detta fascia comprende tutti i punti nei quali, in normali condizioni di esercizio, il valore di induzione magnetica può essere maggiore o uguale all'obiettivo di qualità.



I casi di studio contemplati dal succitato decreto si riferiscono a geometrie semplici (es: linee aeree o in cavo), mentre nei casi più complessi viene raccomandato l'utilizzo di algoritmi di calcolo appositi.

Nel caso oggetto di studio, vista la particolare geometria di alcune sorgenti, la valutazione è stata eseguita tramite software di calcolo MAGIC® basato sulla discretizzazione delle sorgenti, sull'integrazione della legge di Biot e Savart e sul principio della sovrapposizione degli effetti attraverso la modellizzazione di sorgenti filiformi e solenoidi.

In allegato alla presente relazione si riporta il documento di validazione del software.

## **4.2 Individuazione e caratterizzazione delle sorgenti di progetto**

### **4.2.1 Descrizione del progetto**

L'impianto oggetto di riattivazione è una centrale idroelettrica ad acqua fluente realizzata tra la fine del XIX e l'inizio del XX secolo nel comune di Villetta Barrea. Dismessa nel secondo dopoguerra e in stato di abbandono, la centrale fu sottoposta negli anni 1994-95 a un intervento di rifacimento e riattivazione, con ripresa della produzione elettrica nel settembre 1996. Negli anni seguenti l'impianto ha subito un progressivo degrado dovuto a carenza di manutenzione, con frequenti fuori servizio e bassi rendimenti di produzione.

Al momento la centrale non è operativa a seguito di un consistente danneggiamento subito dalle opere di presa a causa di evento alluvionale.

L'impianto esistente è connesso alla rete MT di E-Distribuzione tramite inserimento in antenna da cabina MT/BT esistente, denominata "Pinus Nigra" AQ107, E2717, situata a circa 30 metri dalla centrale. La centrale idroelettrica è costituita da un edificio in muratura in cui è installato il gruppo di produzione d'energia elettrica con le relative apparecchiature di protezione, comando e controllo, nonché i quadri elettrici di bassa e media tensione e vari servizi ausiliari.

Il fabbricato si sviluppa su due livelli collegati tramite scala interna in muratura e ha accesso carrabile dalla Strada Provinciale su entrambi i livelli.

Il piano terra è suddiviso in due locali:

- locale utente: ospita il trasformatore e i quadri MT;
- locale misure e del Distributore (unico).

I due locali sono comunicanti per mezzo di un'apertura chiusa da porta di ferro.

Il primo piano ospita i quadri BT e le apparecchiature di controllo della centrale. In un apposito vano è alloggiato il gruppo turbina-generatore.

La centrale è equipaggiata con una turbina FLYGT, modello EL 7600 – 835 a flusso assiale, ad asse verticale, tipo semi-Kaplan o a singola regolazione, cioè con pale della girante regolabili e distributore fisso.

La regolazione della portata da turbinare si effettua tramite una paratoia cilindica a movimento verticale che varia la luce per il passaggio dell'acqua dalla camera di aspirazione al rotore.

La turbina sarà riparata e messa a punto dal costruttore.

Il generatore è una macchina asincrona di tipo sommerso montata in asse con la turbina.

Il generatore ha le seguenti caratteristiche:

- Potenza: 245 kW;
- $\cos\phi$ : 0,82;
- Tensione nominale: 400 V.

Il trasformatore MT/BT, costruito dalla MACE S.r.l., è in olio con conservatore e ha le seguenti caratteristiche elettriche:

- Potenza 315 kVA
- Rapporto di trasformazione  $20 \pm 5\%$  / 0,4 kV
- Tensione di cortocircuito 4%
- Collegamento Dyn11
- Modalità di raffreddamento ONAN
- Matricola n. 7049
- Anno di costruzione 1994

Nel piano terra della centrale, nel locale utente, è installato il quadro MT composto di uno scomparto di arrivo linea e uno scomparto interruttore

Ai fini dell'adeguamento alla norma CEI 0-16 sarà sostituito il quadro di media tensione esistente con un nuovo quadro costituito da due unità funzionali:

- Arrivo linea
- Interruttore/sezionatore

Il quadro, isolato in aria e conforme alla norma CEI EN 62271-200, avrà le seguenti caratteristiche generali:

- Grado di protezione: IP3X;
- Classificazione arco interno (IAC – Internal Arc Classified): Accessibilità Frontale
- Temperatura ambiente (min/max): -5°C/40°C;
- Altitudine:  $\leq 1000$ ;
- Tensione nominale: 24 kV;
- Tensione di servizio: 20 kV;
- Tensione di prova a frequenza industriale: 50 kV;
- Tensione di tenuta ad impulso (1.2/50 micro-sec. onda): 125 kV;
- Frequenza nominale: 50 Hz;

- *Corrente nominale delle sbarre principali:* 630 A;
- *Corrente nominale di breve durata:* 16 kA;
- *Durata:* 1 s;
- *Corrente di cresta:* 40 kA;
- *Durata arco interno 1s* (In accordo alla IEC 62271-200): 16 kA

Sarà inoltre installato un UPS con funzione di sorgente ausiliaria.

Il cavo di collegamento sarà verificato in fase di installazione e se necessario sostituito. In quest'ultimo caso, si adotteranno tre cavi tipo RG7H1M1 12/20 kV (CPR Eca) di sezione 95 mm<sup>2</sup> come da CEI 0-16, Art. 8.5.3.2.

Analogo discorso per il cavo tra quadro MT e trasformatore. In questo caso, se necessario, sarà sostituito con cavi unipolari aventi la stessa sezione di quelli esistenti.

#### 4.2.2 Sorgenti previste dal progetto

Le principali sorgenti di Campi Elettromagnetici sono riconducibili alle linee elettriche e alle costruzioni elettriche presenti all'interno della centrale idroelettrica e alla linea MT in uscita dal locale del distributore.

In particolare, all'interno della centrale si possono individuare le seguenti sorgenti:

- generatore
- trasformatore
- quadro MT
- quadro BT
- linee di connessione in BT e MT

Sulla base della potenza disponibile in prelievo e immissione (245 kW), in media tensione si stima un valore di corrente non superiore a 9,5 A, mentre in bassa tensione i valori non andranno oltre i 400 A.

Per la connessione della centrale con la cabina ENEL "Pinus Nigra" AQ107, sarà sfruttata la linea esistente di cui non se ne conoscono le caratteristiche tecniche. Di seguito si indicano comunque i parametri principali stimati utilizzati come input al modello di calcolo:

- *Tensione nominale:* 20 KV;
- *Portata di corrente:* 9,5 A;
- *Lunghezza complessiva della linea:* 30 m;
- *Profondità di posa dei cavi:* 1 m;
- *Tipo di posa terna:* formazione piana (condizione a favore della sicurezza);
- *Distanza tra i conduttori:* 0,02 m.

Per la modellizzazione del trasformatore sono stati considerati i seguenti parametri di input:

- *Corrente:* 400 A (condizione a favore della sicurezza);



- *Tipo trasformatore:* ad olio;
- *Ingresso cavi BT:* lato anteriore verso il basso.

#### **4.3 Simulazione dei valori di campo**

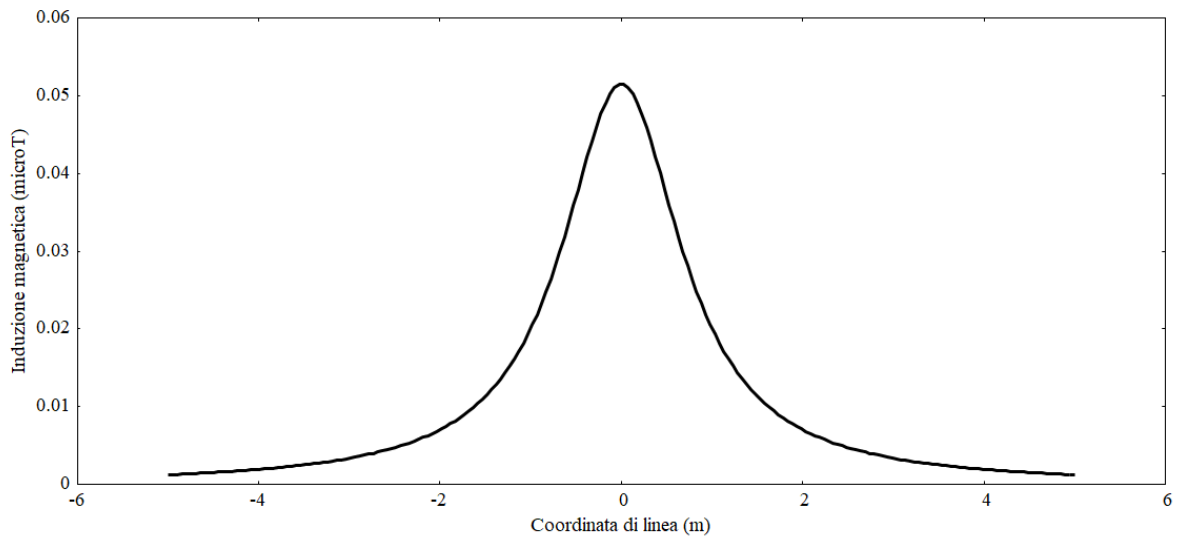
Attraverso il modello di calcolo indicato nel paragrafo 4.1 *Metodologia* è stato calcolato il livello di induzione magnetica verificando il rispetto dei limiti di legge.

Si osserva che per la linea MT interrata, applicando il modello bidimensionale della norma CEI 211-4, il valore dell'induzione magnetica massimo (sull'asse della linea) calcolato al livello del suolo, è pari a 0,06  $\mu\text{T}$  (cfr. *Figura 9*).

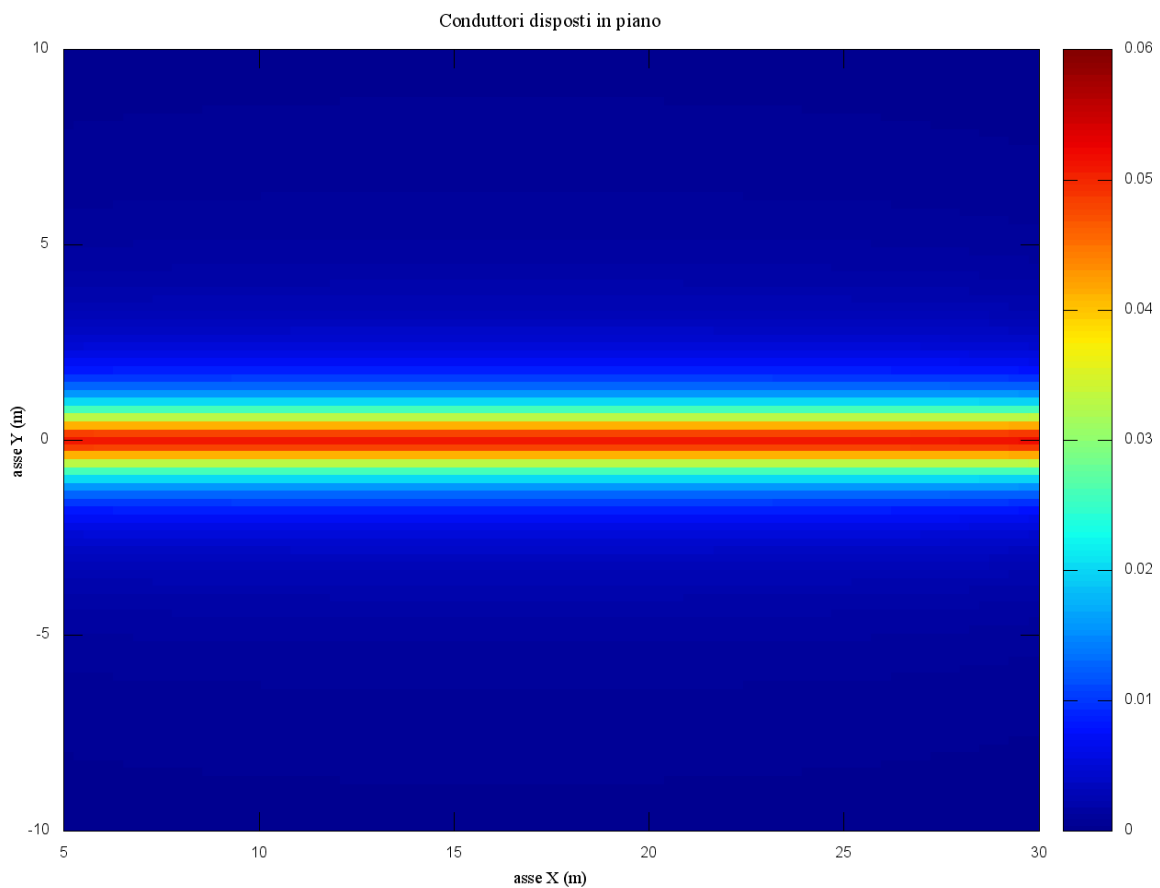
Per quanto riguarda la centrale nelle figure successive si riporta l'esito dei calcoli effettuati alle seguenti quote:

- piano terra al livello del pavimento
- piano terra a quota + 1.5 dal pavimento
- piano primo al livello del pavimento
- piano primo a quota + 1.5 m dal pavimento

Dalle simulazioni si evince che la DPA relativa a 3  $\mu\text{T}$  non interessa aree esterne alla perimetrazione della centrale, pertanto nelle condizioni più sfavorevoli la popolazione non sarà esposta a valori superiori a quelli previsti dal D.P.C.M. 8 luglio 2003.



**Figura 9 - Induzione magnetica linea MT interrata calcolata al livello del suolo**



**Figura 10 - Valori di induzione magnetica sull'intera linea MT interrata calcolata al livello del suolo**

## VALORI DI INDUZIONE MAGNETICA PIANO TERRA CENTRALE AL LIVELLO DEL PAVIMENTO

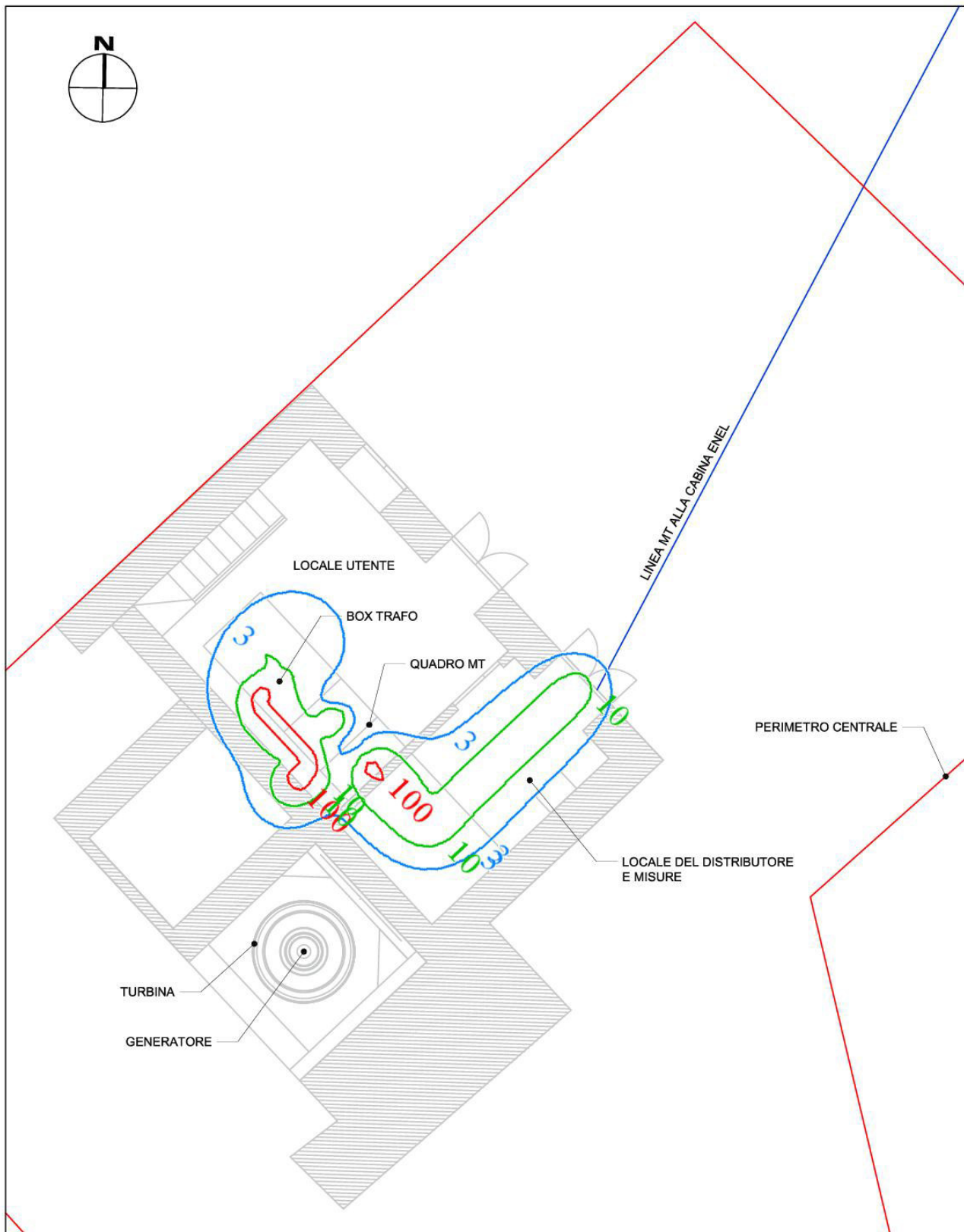
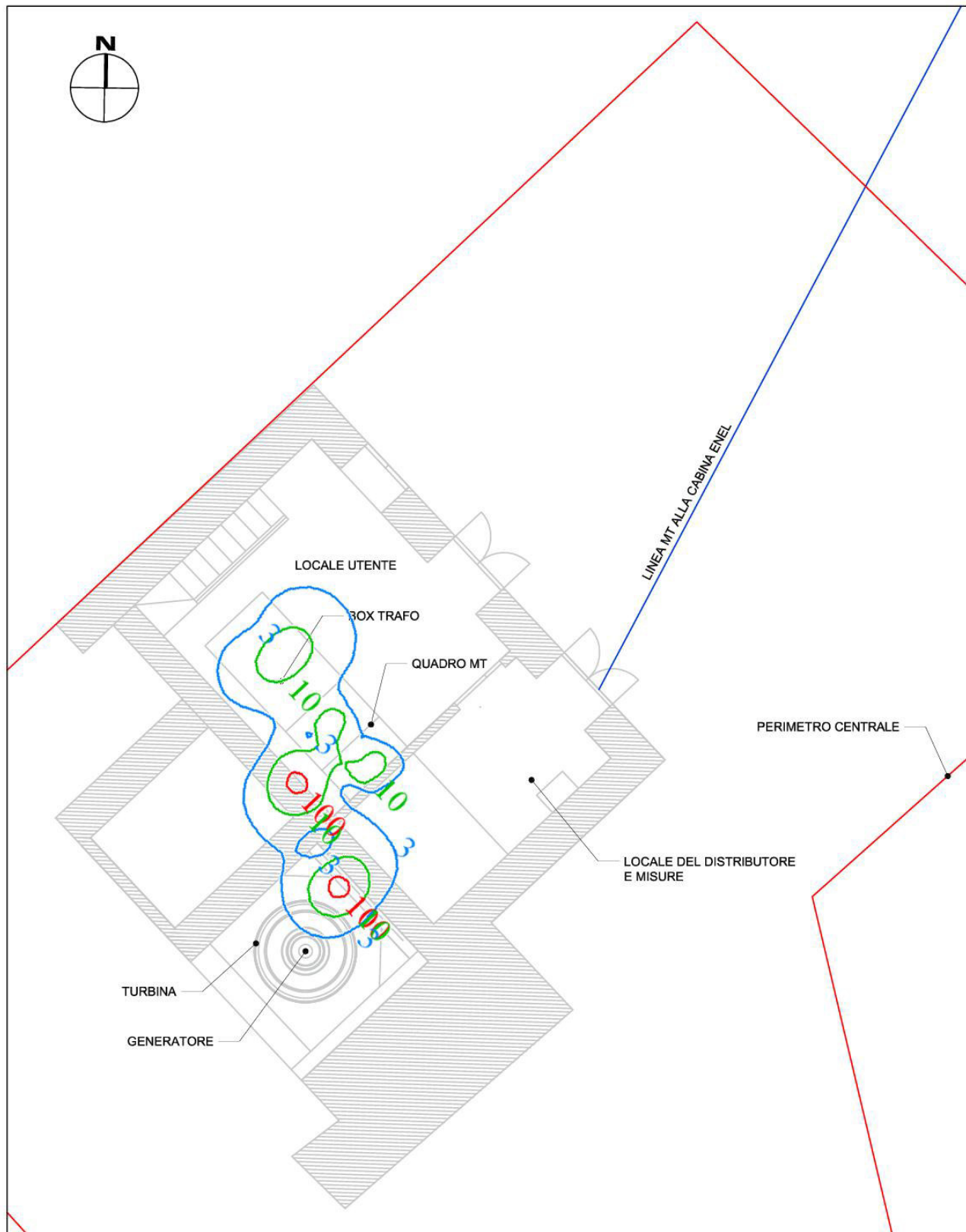


Figura 11



**VALORI DI INDUZIONE MAGNETICA PIANO TERRA CENTRALE A QUOTA + 1.5 m DAL PAVIMENTO****Figura 12**

## VALORI DI INDUZIONE MAGNATICA PIANO PRIMO CENTRALE AL LIVELLO DEL PAVIMENTO

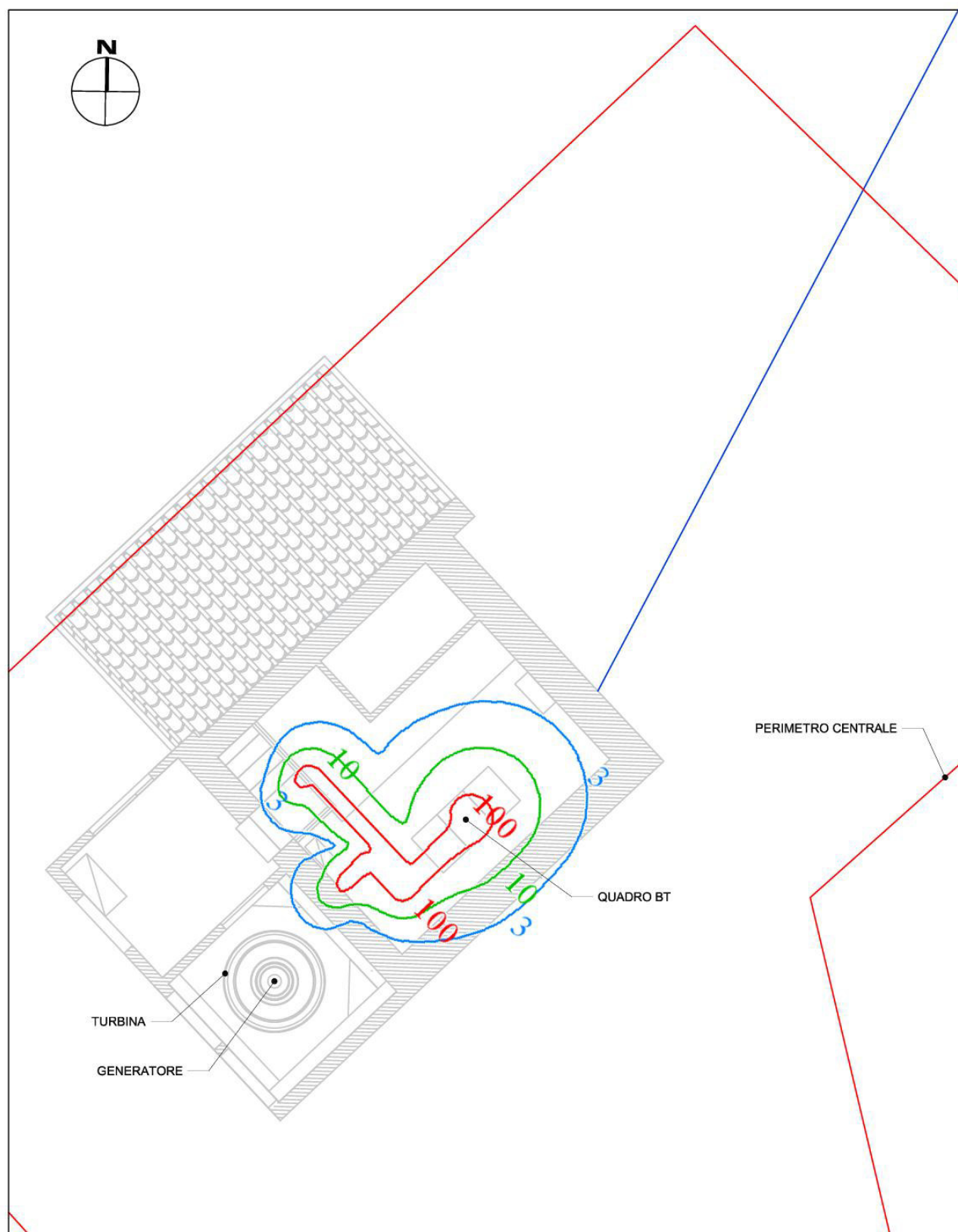
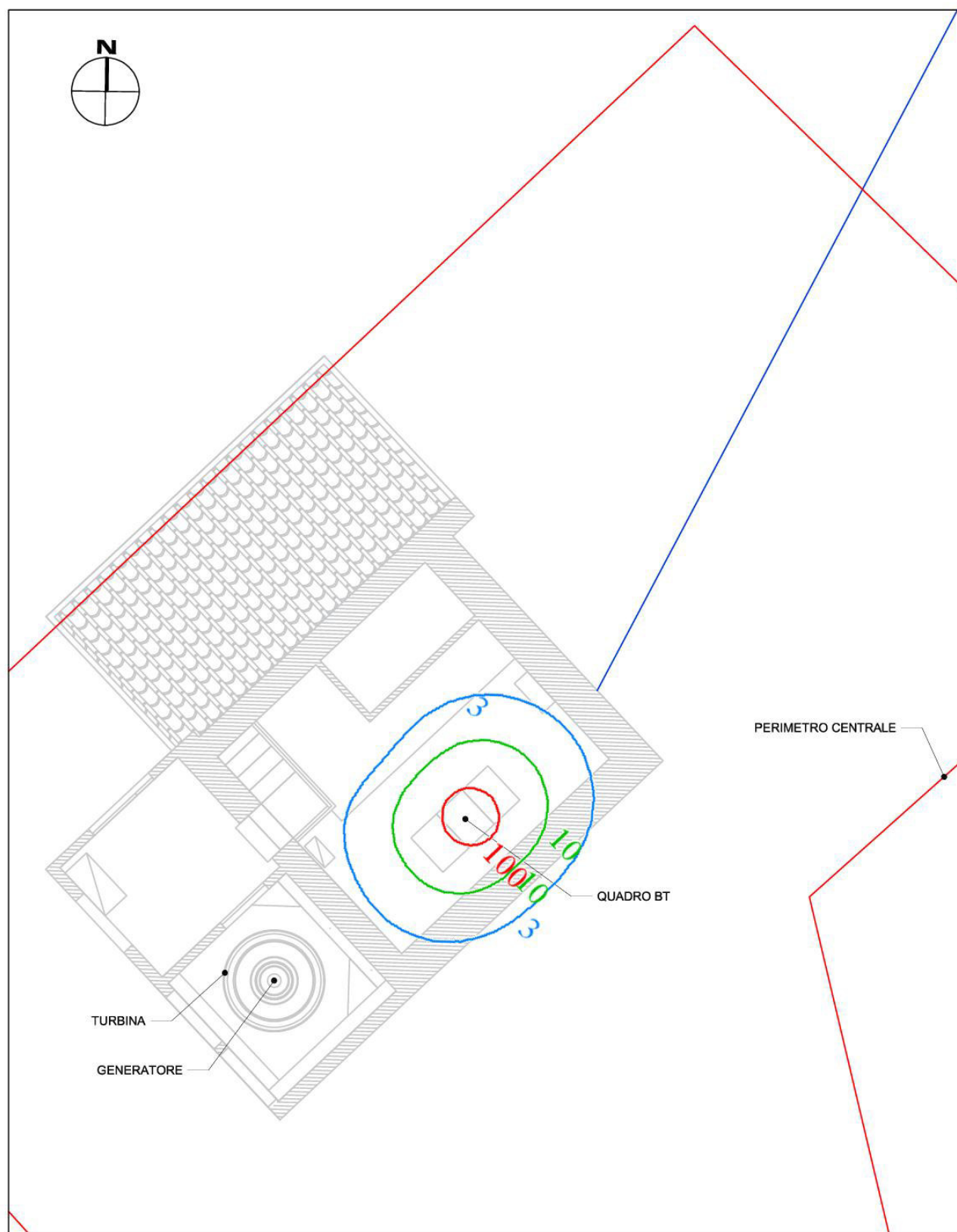


Figura 13

**VALORI DI INDUZIONE MAGNETICA PIANO PRIMO CENTRALE A QUOTA + 1.5 m DAL PAVIMENTO****Figura 14**



## 5. CONCLUSIONI

Sulla base dei risultati ottenuti dalla valutazione di impatto elettromagnetico risulta che:

- Relativamente ai valori di campo elettrico, in base alla letteratura di settore e a misurazioni effettuate in casi analoghi si possono escludere superamenti dei limiti indicati dal DPCM 08/07/03;
- Relativamente ai valori di esposizione dell'induzione magnetica, in un'ottica di cautela tenendo conto anche dei contributi di induzione magnetica rilevati in campo, non risultano superati i valori limite del DPCM 08/07/03; infatti all'interno delle DPA non si rilevano strutture in cui è prevista la presenza di popolazione per più di 4 ore né è prevista dalla pianificazione urbanistica vigente;
- Relativamente ai limiti di esposizione dei valori di induzione magnetica da parte degli operatori professionalmente esposti, in merito al D.Lgs 81/2008 s.m.i., nelle normali condizioni operative non si evidenziano superamenti del valore di azione per la frequenza di rete anche per le sorgenti interne alla centrale.

## ALLEGATI

- Certificati di taratura della strumentazione di misura
- Documento di Validazione - Algoritmi di calcolo del software MAGIC®



## CERTIFICATE OF CALIBRATION

Number 21/06379

Measurements marked with this symbol (\$) are not covered by the scope of the Laboratory's accreditation.

Page 1 of 8 pages

LabCal - Wavecontrol  
Radio-electric Calibration Laboratory  
C/ Pallars 65-71  
08018 Barcelona (Spain)

# WAVECONTROL

ITEM	EM Field Meter + Isotropic EM Field Probe
BRAND	Wavecontrol
MODEL	Meter: SMP2 Probe: WPF8
IDENTIFICATION	Meter: 21SN1613 Probe: 21WP041391
APPLICANT	Wavecontrol C/ Pallars 65-71 08018 Barcelona
DATE/S OF CALIBRATION	01/06/2021

Authorized Signatories:

Date of issue: 07/06/2021

Álvaro Granero  
Laboratory Technician

Laboratory Director

*This certificate is issued in accordance with the conditions of accreditation granted by ENAC, according to standard ISO 17025, which has assessed the measurement capability of the laboratory and its traceability to national and international standards. ENAC is one of the signatories of the Multilateral Agreement of the European Cooperation for Accreditation (EA) and the International Laboratories Accreditation Cooperation (ILAC). This Certificate may not be partially reproduced, except with the prior written permission of Wavecontrol.*

### **Measurement:**

The calibration of field strength monitors involves the generation of a known linearly polarised electromagnetic field, approximating to a plane wave, into which the probe or sensor is placed.

Over the frequency range of 0.1 – 800 MHz, an absorber loaded TEM cell is used to generate the known field. The probe under test is positioned parallel to the electric field and perpendicular to the direction of propagation.

Over the frequency range of 800 MHz – 8 GHz the probe is positioned on a low reflectivity mount inside a microwave anechoic chamber on the bore sight of a linearly polarised horn antenna. The probe under test is always perpendicular to the direction of propagation and parallel to the electric field.

Three calibration parameters are obtained:

#### **1- Correction factor (CF)**

For each measurement, the input power to the test facility is adjusted so that the actual field strength is set to a specific value. The field strength indicated by the probe under calibration is then read and the correction factor calculated using the following definition:

$$CF = \frac{\text{Actual Field Strength}}{\text{Indicated Field Strength}} \quad CF^2 = \frac{\text{Actual Power Density}}{\text{Indicated Power Density}}$$

The indicated field strength must be multiplied by the appropriate correction factor to give the actual field strength.

#### **2- Linearity**

The linearity can be calculated as the variation of the Correction Factor as a function of the field strength applied to the probe for a frequency value.

#### **3- Frequency response**

The frequency response can be calculated as the variation of the Correction Factor as a function of the frequency for a fixed field value applied to the probe.

### **Traceability:**

DARE Calibrations  
NPL (National Physical Laboratory)  
Applus Metrología



### **Reference standards:**

IEEE Std 1309:2013 “Standard for Calibration of Electromagnetic Field Sensors and Probes, Excluding Antennas, from 9 kHz to 40 GHz”.

### **Uncertainties:**

The uncertainty of calibration for this device is as follows:

<b>0.1 MHz - 10 MHz:</b>	<b>± 1.19 dB</b>
<b>10 MHz - 300 MHz:</b>	<b>± 1.33 dB</b>
<b>300 MHz – 500 MHz:</b>	<b>± 1.08 dB</b>
<b>500 MHz - 800 MHz:</b>	<b>± 1.46 dB</b>
<b>800 MHz - 1 GHz:</b>	<b>± 1.20 dB</b>
<b>1 GHz - 2.5 GHz:</b>	<b>± 1.20 dB</b>
<b>2.5 GHz - 8 GHz:</b>	<b>± 1.30 dB</b>

The measurement uncertainties above apply only when the probe is supported in a low reflectivity mount. The user should be aware of the effects of reflections from nearby objects, including human body, and should allow additional measurement uncertainties accordingly.

The reported expanded uncertainty is based on a standard uncertainty multiplied by a coverage factor  $k = 2$ , providing a level of confidence of approximately 95 %. The uncertainty evaluation has been carried out in accordance with the EA-4/02 document.

### **Environmental conditions:**

Humidity	Temperature
(43.7 ± 0.5) % rH	(23.5 ± 0.2) °C

The uncertainties refer to the measured devices only. They relate to the on-the-day values and make no allowance for drift or operation under other environmental conditions.

### **Procedure:**

PC-1205 – Calibration of electric field probes in the range 100 kHz – 800 MHz

PC-1206 – Calibration of electric field probes in the range 800 MHz – 18 GHz

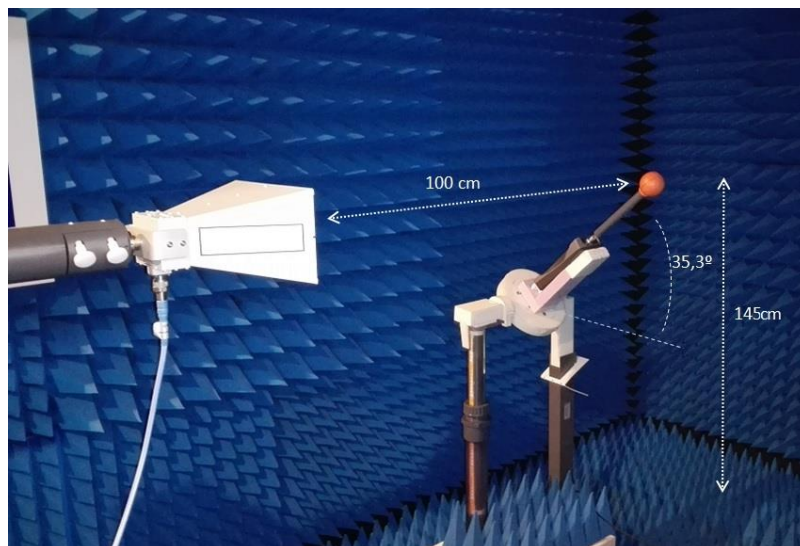
Both methods follow the *Standard probe method*. A reference probe is used to measure and calibrate the field used for calibrating the probe under calibration.

**Calibration engineer:** Álvaro Granero

### Calibration set-up:



**Figure 1: Calibration set-up in the absorber loaded TEM cell**

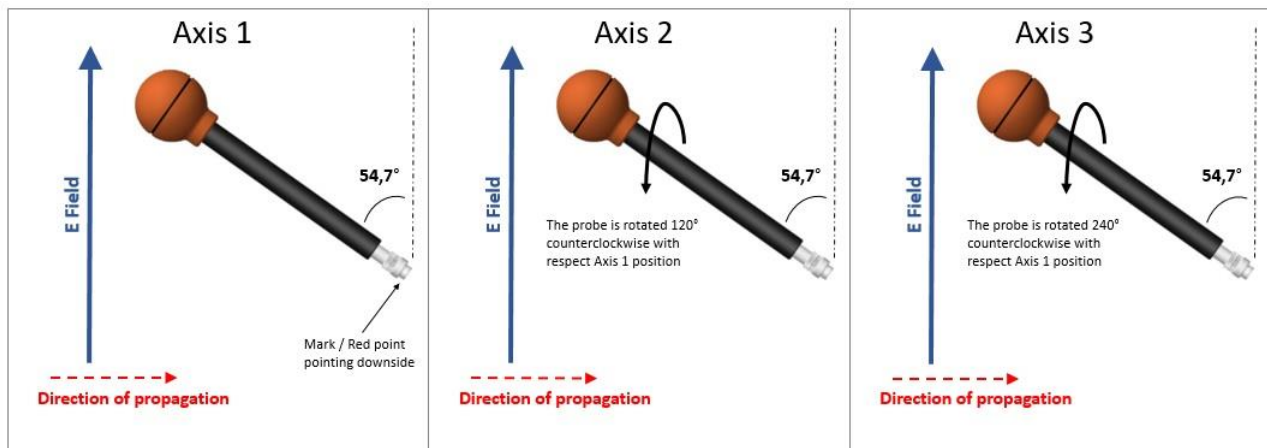


**Figure 2: Calibration set-up in the anechoic chamber**

The position of the probe inside the TEM cell is specified in Figure 1. The main axis of the probe is parallel to the cell walls.

The probe is positioned on the bore sight of the horn antenna inside the anechoic chamber, at the distance and height specified in Figure 2.

The position and orientation of the probe relative to the applied field to calibrate the 3 axis is specified in Figure 3.



**Figure 3: Position and orientation of the probe**



### Results:

The correction factors (CF) for the requested calibration points are shown below.

The correction factors for each axis and the average correction factor are given. This average correction factor must be applied to the measured value for the total field.

The average correction factor is the arithmetic mean of the correction factors for the three axes.

The correction factors given below must be multiplied by the measured value for the field in order to obtain the actual field value:

Linearity						
Freq. (MHz)	Actual Field (V/m)		CF			
			Axis 1	Axis 2	Axis 3	Mean
100	1		1.02	1.08	1.02	1.04
100	2.5		0.99	1.00	0.98	0.99
100	5		1.01	1.01	1.00	1.01
100	10		1.03	1.02	1.02	1.02
100	20		1.03	1.03	1.02	1.03
100	30		1.06	1.05	1.05	1.05
100	40		1.04	1.03	1.03	1.03
100	50		1.04	1.04	1.03	1.04
100	60		1.06	1.05	1.04	1.05
100	80		1.04	1.03	1.03	1.03
100	100		1.02	1.01	1.01	1.01

## Certificate of Calibration

Page 7 of 8

Number: 21/06379

Frequency response						
Freq. (MHz)	Actual Field (V/m)		CF			
			Axis 1	Axis 2	Axis 3	Mean
0.1	10		1.50	1.50	1.50	1.50
0.3	10		0.97	0.97	0.95	0.96
0.5	10		0.88	0.87	0.86	0.87
1	10		0.85	0.85	0.84	0.85
10	10		0.96	0.95	0.95	0.95
30	10		0.99	0.98	0.98	0.98
100	10		1.03	1.02	1.02	1.02
200	10		1.04	1.05	1.05	1.05
400	10		0.91	0.88	0.87	0.89
600	10		1.06	1.10	1.11	1.09
700	10		0.93	0.90	0.89	0.91
800	10		0.93	0.94	0.90	0.92
1000	10		0.98	0.97	0.95	0.97
1200	10		0.94	0.94	0.97	0.95
1400	10		0.99	0.95	0.99	0.98
1600	10		1.06	1.01	1.09	1.05
1800	10		1.05	1.04	1.01	1.04
2000	10		1.01	1.02	0.97	1.00
2200	10		1.02	1.02	0.97	1.01
2400	10		1.00	1.03	0.98	1.00
2600	10		0.96	0.95	0.95	0.95
2800	10		0.86	0.83	0.88	0.86
3000	10		0.98	0.96	1.02	0.99
3200	10		0.99	0.97	1.02	0.99
3400	10		1.00	0.99	0.97	0.99
3600	10		1.00	1.01	1.00	1.01
3800	10		1.00	1.03	0.97	1.00
4000	10		0.97	0.98	0.94	0.96
4250	10		0.99	1.02	0.98	0.99
4500	10		1.02	1.02	1.05	1.03
4750	10		0.98	0.93	0.97	0.96
5000	10		0.88	0.86	0.91	0.88
5250	10		1.07	1.10	1.07	1.08
5500	10		1.14	1.16	1.12	1.14
5750	10		0.96	0.95	0.89	0.93
6000	10		0.92	0.93	0.92	0.92
6250	10		1.06	1.07	1.13	1.09
6500	10		1.22	1.23	1.17	1.20
6750	10		1.02	0.95	0.98	0.99
7000	10		0.87	0.87	0.82	0.85
7250	10		1.32	1.37	1.34	1.34
7500	10		0.98	1.01	0.89	0.96
7750	10		0.87	0.89	0.87	0.88
8000	10		1.04	0.97	1.04	1.02

## Certificate of Calibration

Page 8 of 8

Number: **21/06379**

The following values summarise the Linearity and Frequency response uncertainties of the calibrated device. These values can be used to calculate the total uncertainty of the measurements realised with the calibrated device:

Linearity error			
±	0.27		dB (1 - 100 V/m)
Frequency response			
+	1.44	/ -	1.62 dB (1 MHz - 6,5 GHz)





# CERTIFICATE OF CALIBRATION

Number **21/06382**

Measurements marked with this symbol (\$) are not covered by the scope of the Laboratory's accreditation.

Page 1 of 8 pages

LabCal - Wavecontrol  
Radio-electric Calibration Laboratory  
C/ Pallars 65-71  
08018 Barcelona (Spain)

# WAVECONTROL

ITEM	EM Field Meter + Isotropic EM Field Probe
BRAND	Wavecontrol
MODEL	Meter: SMP2 Probe: WP400
IDENTIFICATION	Meter: 21SN1613 Probe: 21WP100815
APPLICANT	Wavecontrol C/ Pallars 65-71 08018 Barcelona
DATE/S OF CALIBRATION	04/06/2021

Authorized Signatories:

Date of issue: 07/06/2021

Álvaro Granero  
Laboratory Technician

Laboratory Director

*This certificate is issued in accordance with the conditions of accreditation granted by ENAC, according to standard ISO 17025, which has assessed the measurement capability of the laboratory and its traceability to national and international standards. ENAC is one of the signatories of the Multilateral Agreement of the European Cooperation for Accreditation (EA) and the International Laboratories Accreditation Cooperation (ILAC). This Certificate may not be partially reproduced, except with the prior written permission of Wavecontrol.*

### **Measurement:**

The calibration of a magnetic or electric field meter is done by introducing the probe into a nearly uniform magnetic or electric field of known magnitude and direction.

To calibrate the magnetic field sensor a Helmholtz coil system is used to generate the low frequency nearly uniform magnetic field needed.

To calibrate the electric field sensor a parallel plates system, energized with a centre-tapped transformer, is used.

In both cases, the probe is positioned on a low reflectivity mount inside the nearly uniform field area. The probe axis under test is placed perpendicular to the direction of the magnetic field when calibrating the magnetic field, and parallel to the electric field when calibrating the electric field.

Three calibration parameters are obtained:

#### **1- Correction factor (CF)**

For each measurement, the input power to the test facility is adjusted so that the actual field strength is set to a specific value. The field strength indicated by the probe under calibration is then read and the correction factor calculated using the following definition:

$$CF = \frac{\text{Actual Field Strength}}{\text{Indicated Field Strength}} \quad CF^2 = \frac{\text{Actual Power Density}}{\text{Indicated Power Density}}$$

The indicated field strength must be multiplied by the appropriate correction factor to give the actual field strength.

#### **2- Linearity**

The linearity can be calculated as the variation of the Correction Factor as a function of the field strength applied to the probe for a frequency value.

#### **3- Frequency response**

The frequency response can be calculated as the variation of the Correction Factor as a function of the frequency for a fixed field value applied to the probe.

### **Traceability:**

Swarzbeck Mess – Elektronik  
PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt)  
Metaltest  
LME – CIRCE  
AT4 Wireless  
Siemsa-Trescal

### **Reference standards:**

IEC 61786-1:2013 “Measurement of DC magnetic, AC magnetic and AC electric fields from 1 Hz to 100 kHz with regard to exposure of human beings - Part 1: Requirements for measuring instruments”.

### **Uncertainties:**

The uncertainty of calibration for this device is as follows:

<b>Electric field:</b>	<b>10 Hz – 100 kHz:</b>	<b>± 2.60 %</b>
	<b>100 – 400 kHz:</b>	<b>± 4.92 %</b>
<b>Magnetic field:</b>	<b>10 Hz – 3 kHz:</b>	<b>± 2.53 %</b>
	<b>3 – 100 kHz:</b>	<b>± 2.53 %</b>

The measurement uncertainties above apply only when the probe is supported in a low reflectivity mount. The user should be aware of the effects of reflections from nearby objects, including human body, and should allow additional measurement uncertainties accordingly.

The reported expanded uncertainty is based on a standard uncertainty multiplied by a coverage factor  $k = 2$ , providing a level of confidence of approximately 95 %. The uncertainty evaluation has been carried out in accordance with the EA-4/02 document.

### **Environmental conditions:**

Humidity	Temperature
(49.7 ± 2.7) % rH	(24.4 ± 0.7) °C

The results and uncertainties relate to the on-the-day values and make no allowance for drift or operation under other environmental conditions.

### **Procedure:**

PC-1104 – Calibration of ELF electric field probes in the range 10 Hz – 400 kHz.

PC-1207 – Calibration of ELF magnetic field probes in the range DC & 10 Hz – 200 kHz.

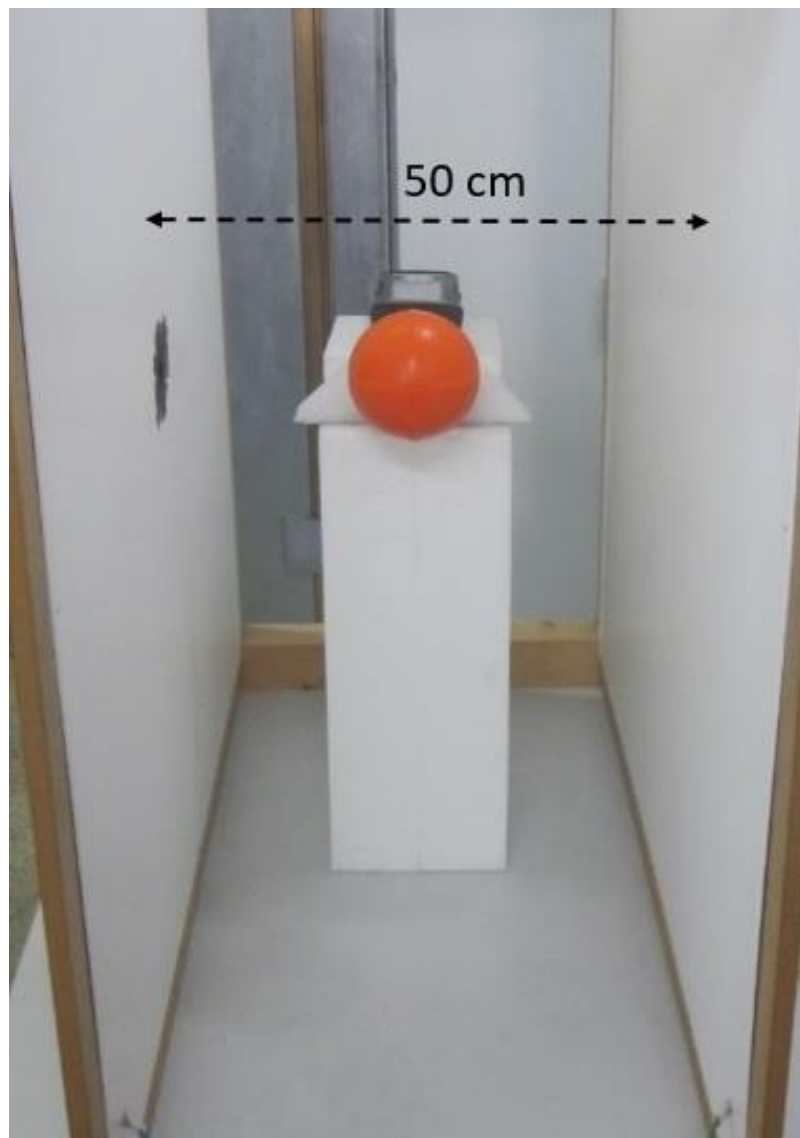
**Calibration engineer:** Álvaro Granero



### **Calibration set-up:**

The position of the probe inside the electric and magnetic field calibration systems is specified in Figure 1 and Figure 2 respectively.

The axis under test is placed perpendicular to the direction of the magnetic field when calibrating the magnetic field, and parallel to the electric field when calibrating the electric field. The probe is placed in the 1% field uniformity zone of the field generator.



**Figure 1: Calibration set-up in the parallel plates system – E field**



**Figure 2: Calibration set-up in the Helmholtz coils system – B field**

### **Results:**

The correction factors (CF) for the electric and magnetic field calibrations are shown.

The correction factors for each axis and the average correction factor are given. This average correction factor must be applied to the measured value for the total field. The average correction factor is the arithmetic mean of the correction factors for the three axes.

The correction factors given below must be multiplied by the measured value for the field in order to obtain the actual field value:

### 1. Electric field

Linearity										
Frequency (Hz)	Applied Field (V/m)			Measured Field (V/m)			CF			
	X axis	Y axis	Z axis	X axis	Y axis	Z axis	X axis	Y axis	Z Axis	Mean
50	800.2	800.3	800.3	800.3	799.5	801.1	1.00	1.00	1.00	1.00
50	748.0	748.1	748.1	748.0	747.7	748.8	1.00	1.00	1.00	1.00
50	498.7	498.6	498.7	498.8	498.9	499.2	1.00	1.00	1.00	1.00
50	249.4	249.4	249.5	248.9	249.1	249.6	1.00	1.00	1.00	1.00
50	100.2	100.2	100.2	100.0	100.0	100.3	1.00	1.00	1.00	1.00
50	50.3	50.3	50.3	50.2	50.2	50.3	1.00	1.00	1.00	1.00
50	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	1.00	1.00	1.00	1.00

Frequency response										
Frequency (Hz)	Applied Field (V/m)			Measured Field (V/m)			CF			
	X axis	Y axis	Z axis	X axis	Y axis	Z axis	X axis	Y axis	Z Axis	Mean
10	748.4	748.4	748.5	747.5	741.9	745.5	1.00	1.01	1.00	1.00
25	747.6	747.6	747.6	748.3	744.9	746.0	1.00	1.00	1.00	1.00
50	748.0	748.1	748.1	748.0	747.7	748.8	1.00	1.00	1.00	1.00
100	748.0	748.0	748.1	750.5	743.2	750.5	1.00	1.01	1.00	1.00
500	748.1	748.1	748.2	751.1	742.1	751.1	1.00	1.01	1.00	1.00
1 000	748.3	748.2	748.3	751.2	742.3	752.0	1.00	1.01	1.00	1.00
2 000	748.4	748.4	748.5	752.1	742.6	752.6	1.00	1.01	0.99	1.00
10 000	750.6	750.5	750.6	752.7	745.6	753.0	1.00	1.01	1.00	1.00
100 000	748.9	748.8	748.9	744.0	731.4	741.0	1.01	1.02	1.01	1.01
200 000	298.7	299.1	298.7	293.0	286.4	292.9	1.02	1.04	1.02	1.03
300 000	298.8	298.8	298.5	286.9	279.9	286.3	1.04	1.07	1.04	1.05
400 000	299.9	300.1	299.9	280.6	274.9	281.3	1.07	1.09	1.07	1.08



### 2. Magnetic field

Linearity										
Frequency (Hz)	Applied Field (μT)			Measured Field (μT)			CF			
	X axis	Y axis	Z axis	X axis	Y axis	Z axis	X axis	Y axis	Z Axis	Mean
50	1999.0	1999.1	1999.3	2005.1	2005.9	2004.2	1.00	1.00	1.00	1.00
50	1497.9	1497.5	1497.9	1502.9	1502.7	1501.9	1.00	1.00	1.00	1.00
50	1000.1	999.7	1000.0	1003.1	1002.5	1002.3	1.00	1.00	1.00	1.00
50	748.5	749.7	748.2	750.7	751.3	749.6	1.00	1.00	1.00	1.00
50	499.1	499.5	498.8	499.4	499.1	498.8	1.00	1.00	1.00	1.00
50	249.8	249.5	249.9	250.4	249.5	250.1	1.00	1.00	1.00	1.00
50	99.8	99.9	99.8	100.0	99.9	99.8	1.00	1.00	1.00	1.00
50	50.0	49.9	50.0	50.2	50.0	50.1	1.00	1.00	1.00	1.00
50	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	1.00	1.00	1.00	1.00
50	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	1.00	1.00	1.00	1.00

Frequency response										
Frequency (Hz)	Applied Field (μT)			Measured Field (μT)			CF			
	X axis	Y axis	Z axis	X axis	Y axis	Z axis	X axis	Y axis	Z Axis	Mean
10	100.0	99.9	100.0	100.4	99.7	100.0	1.00	1.00	1.00	1.00
30	99.9	99.9	99.9	100.4	100.1	100.0	1.00	1.00	1.00	1.00
50	99.8	99.9	99.8	100.0	99.9	99.8	1.00	1.00	1.00	1.00
100	100.1	100.0	100.0	100.5	100.3	100.0	1.00	1.00	1.00	1.00
500	100.0	100.0	100.0	100.2	100.2	99.8	1.00	1.00	1.00	1.00
1 000	100.0	100.0	100.0	100.2	100.2	99.8	1.00	1.00	1.00	1.00
2 000	100.1	100.1	100.1	100.5	100.2	99.9	1.00	1.00	1.00	1.00
10 000	25.0	25.0	25.0	25.2	25.0	25.2	0.99	1.00	0.99	1.00
100 000	25.0	25.0	25.0	24.7	24.5	24.7	1.01	1.02	1.01	1.02
200 000 (\$)	20.0	20.0	20.0	19.5	19.2	19.4	1.03	1.04	1.03	1.03

(\$): Measurements marked with this symbol are not covered by the scope of the Laboratory's accreditation.



## Documento di Validazione

### Algoritmi di calcolo del software **MAGIC<sup>®</sup>** (**MAG**netic Induction **C**alculation)

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® 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® 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.



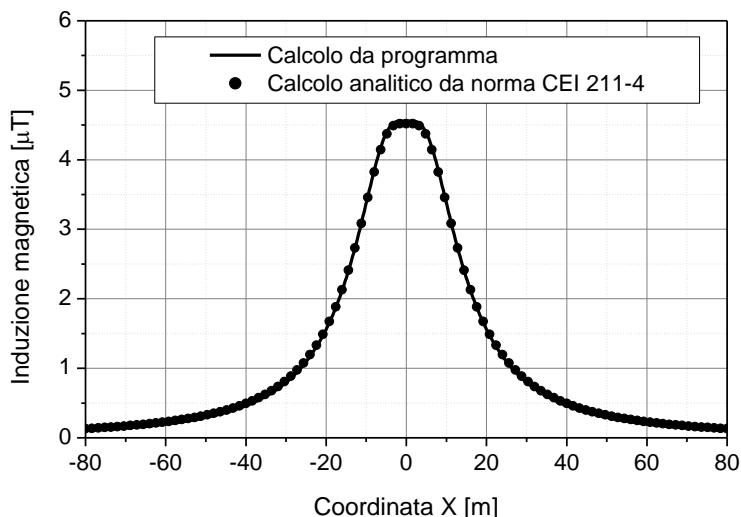


Figura 1: Induzione magnetica al suolo in prossimità di una linea aerea a doppia terna su semplice palificazione con corrente di 310: confronto tra MAGIC® e formula analitica CEI 211-4

**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

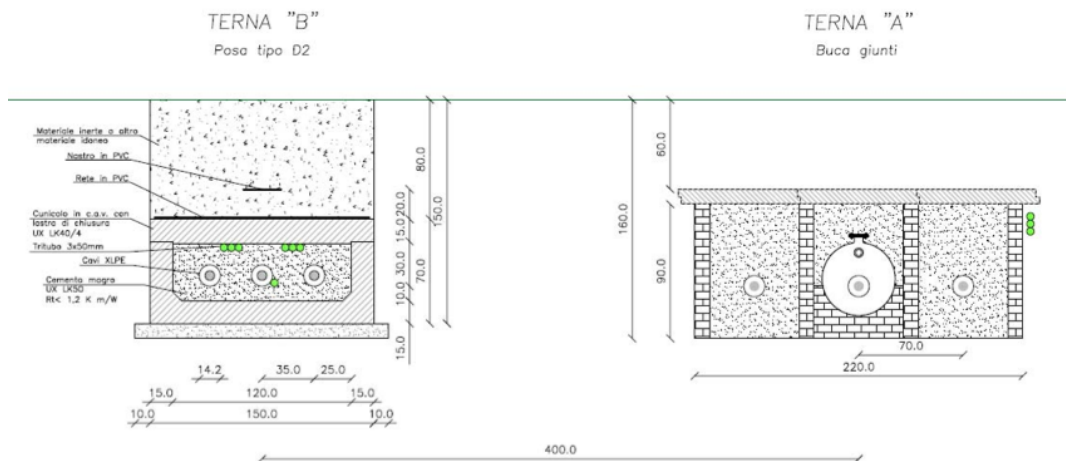


Figura 2: Affiancamento tra due linee interrate AT

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.

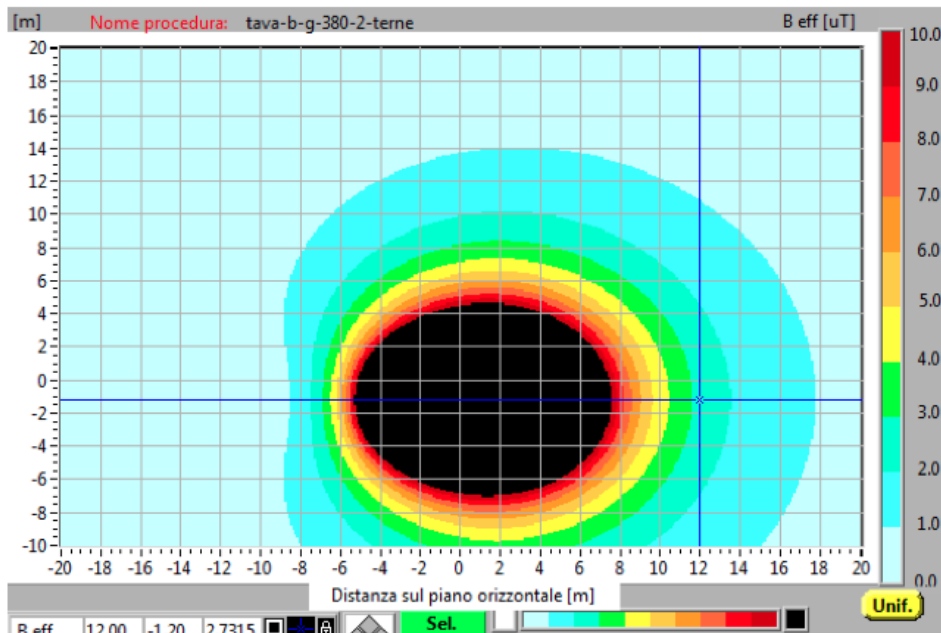
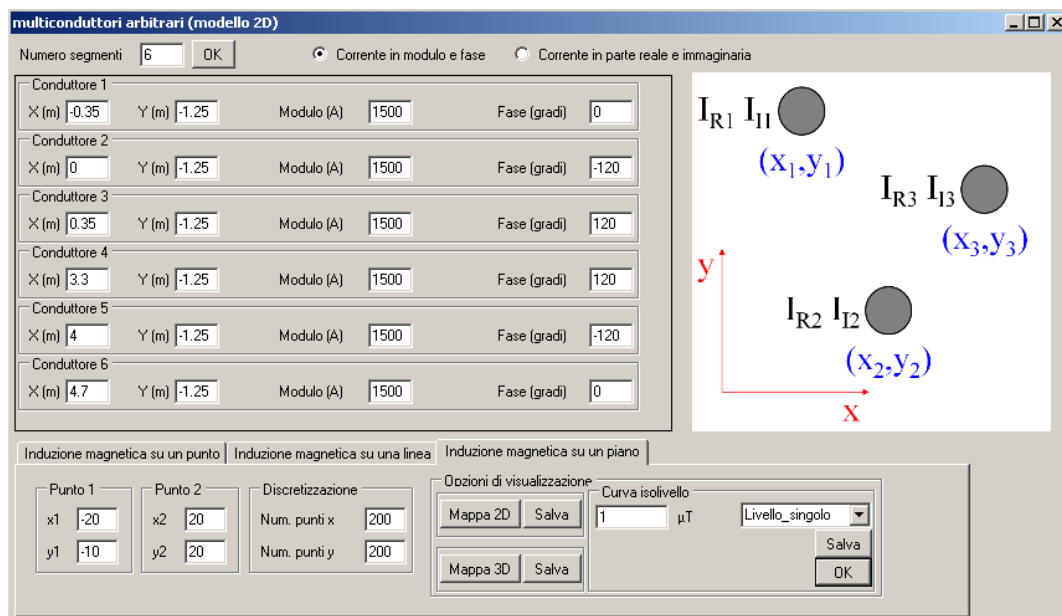


Figura 3: Mappa cromatica delle induzioni magnetiche calcolata mediante software CESI

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

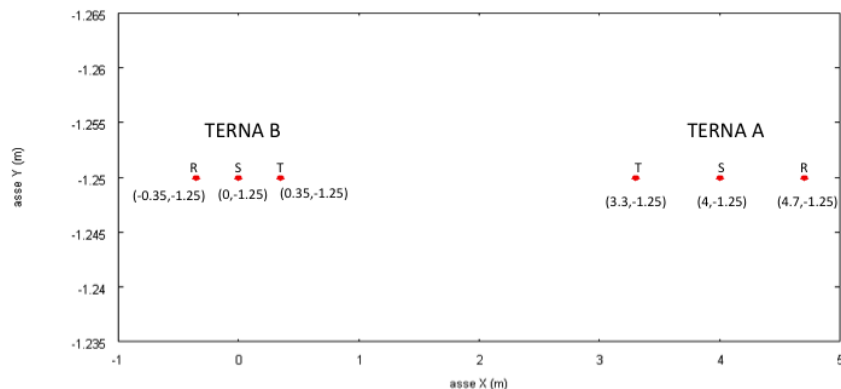
- Terne parallele
- Multiconduttori 2D

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.



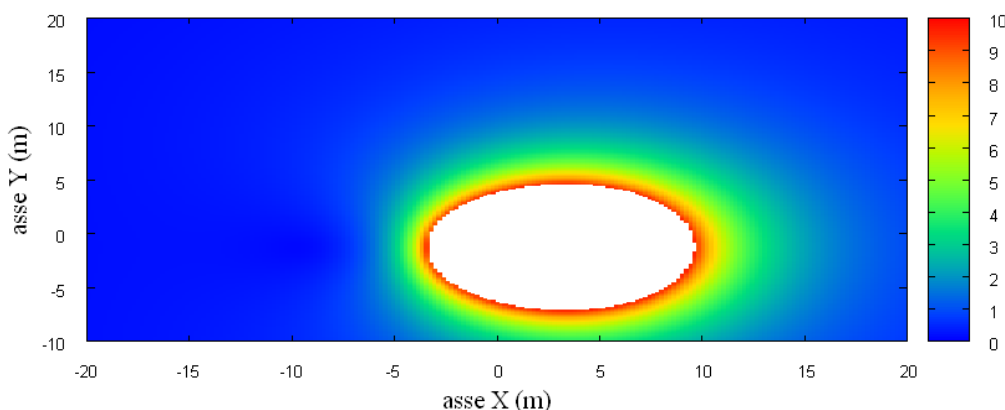
**Figura 4:**Schermata di ingresso modulo “multiconduttori arbitrari (modello 2D)””: dati definizione geometria e sorgenti

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



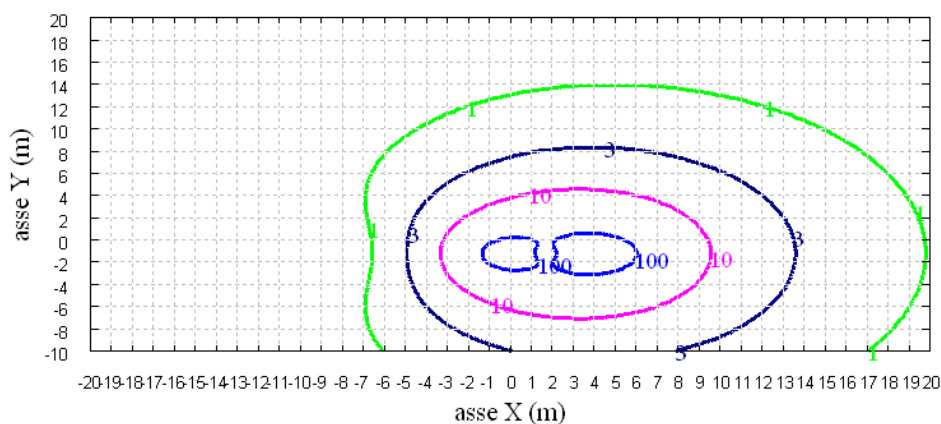
**Figura 5:** Geometria sorgenti

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®.



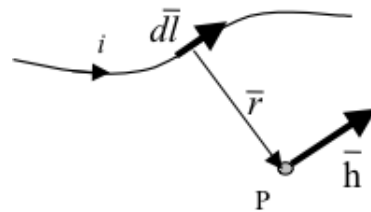
**Fig. 7** Linee isolivello dell’induzione magnetica (1, 3, 10, 100 microT) da software MAGIC®.

**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:

$$\vec{h} = \frac{1}{4\pi} \oint \frac{i d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}$$



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.

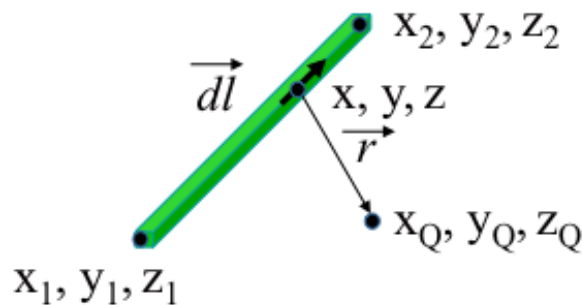


Fig. 8: Modello del segmento.

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

$$\begin{cases} x = x_1 + (x_2 - x_1)t \\ y = y_1 + (y_2 - y_1)t \\ z = z_1 + (z_2 - z_1)t \end{cases}$$

$$\begin{cases} x = x_1 + (x_2 - x_1)t \\ y = y_1 + (y_2 - y_1)t \\ z = z_1 + (z_2 - z_1)t \end{cases}$$

$$\begin{cases} x = x_1 + (x_2 - x_1)t \\ y = y_1 + (y_2 - y_1)t \\ z = z_1 + (z_2 - z_1)t \end{cases}$$

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.

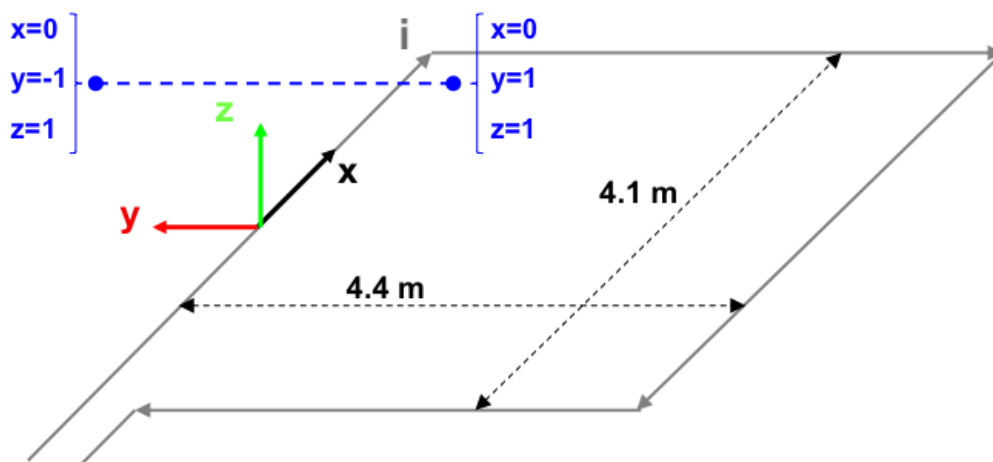


Fig. 9: Schema di spira quadrata.

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®. I risultati di confronto sono riassunti nella seguente figura.

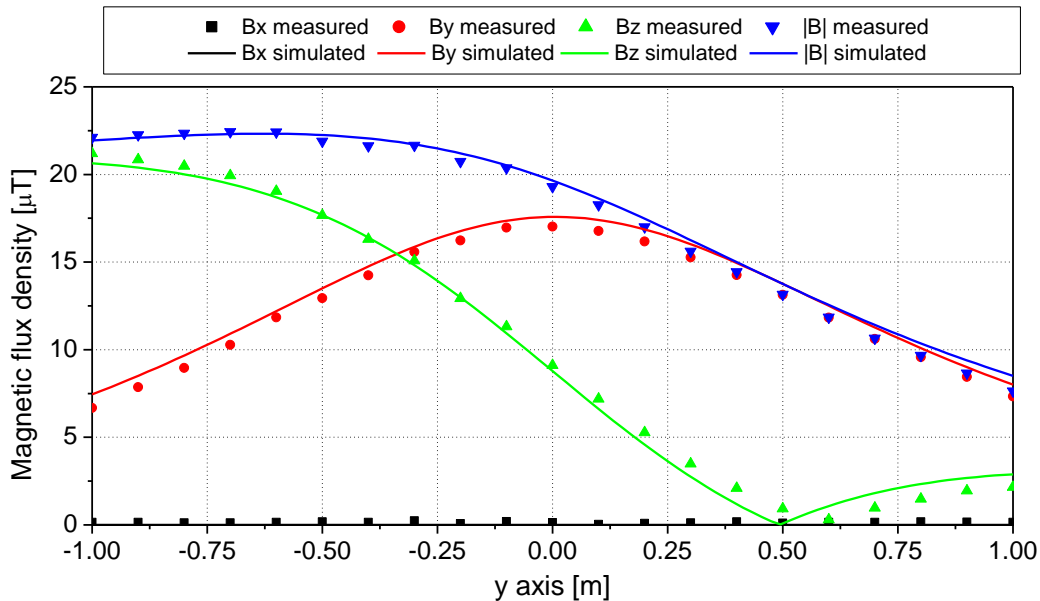


Fig. 10: Induzione magnetica misurata e calcolata mediante software MAGIC®.

***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

Maggiore dettaglio 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.

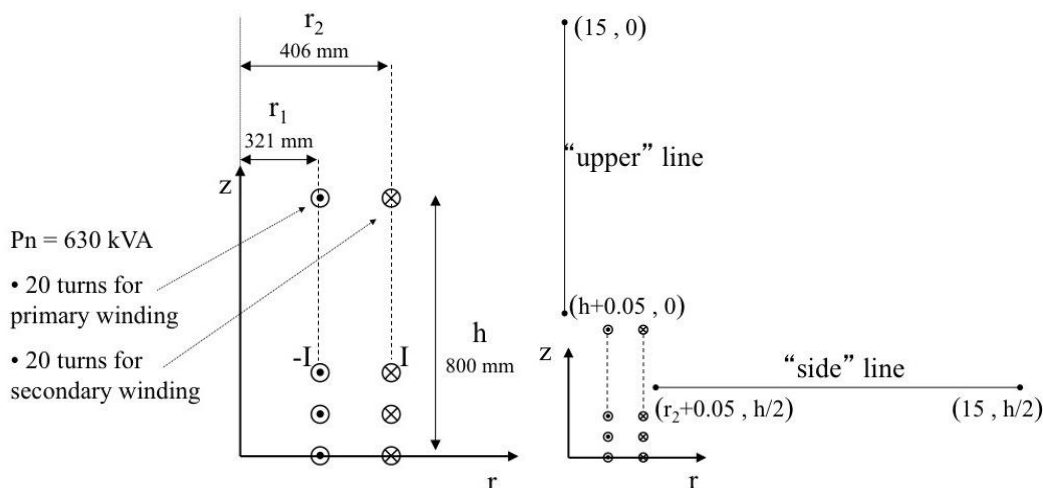


Fig. 11. Geometria del sistema (1) e linee di calcolo (2)

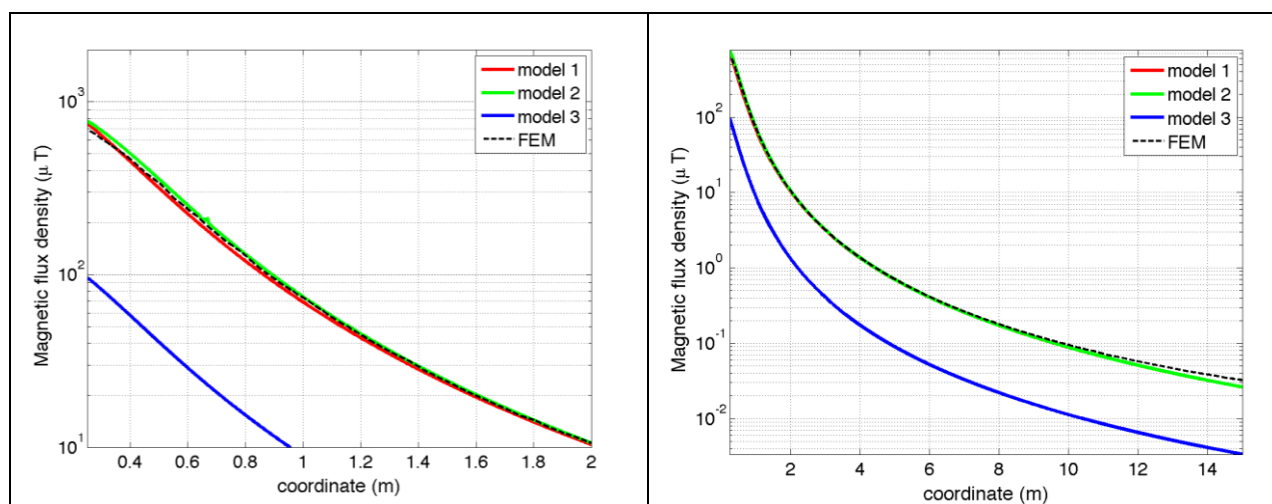
Le Fig. 12 e 13 mostrano, rispettivamente, i valori di induzione magnetica lungo la linea ad 1m dal lato degli avvolgimenti e lungo la linea ad 1.5 m sopra gli avvolgimenti. Le figure mettono a confronto il “modello 1 e 2” ed il calcolo, assunto come riferimento, effettuato mediante codice FEM.

**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).**

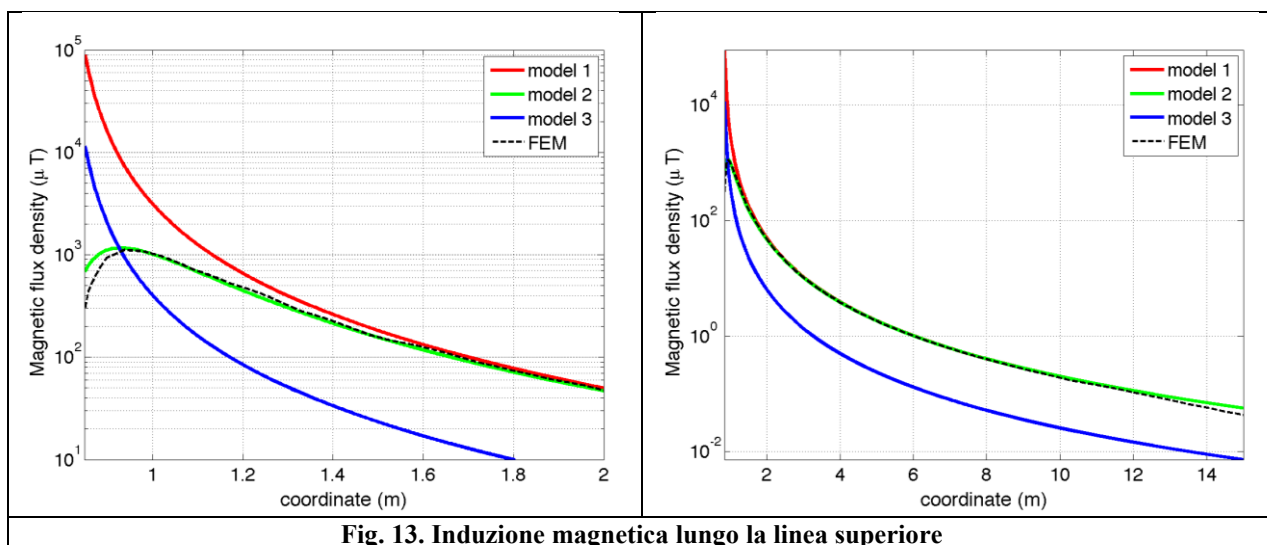
I modelli inseriti nel MAGIC® sono inoltre confrontati con il modello proposto da un altro software commerciale (EFC-400) che verrà denominato “Modello 3”. Tale modello è basato sull’ipotesi che il campo magnetico disperso, essendo correlato con la reattanza di dispersione del trasformatore, risulta 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.**

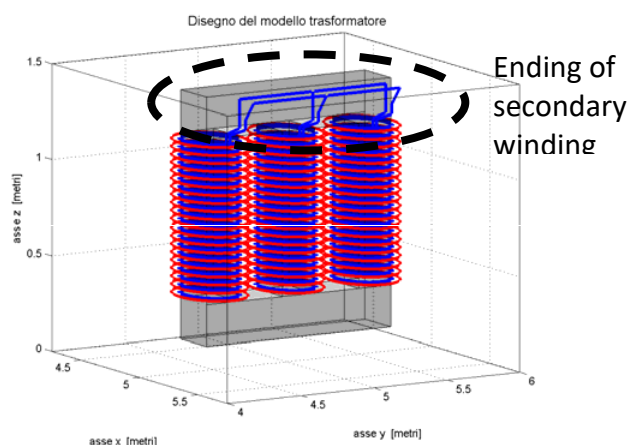


Fig. 14: Connessioni elettriche considerate al lati BT.

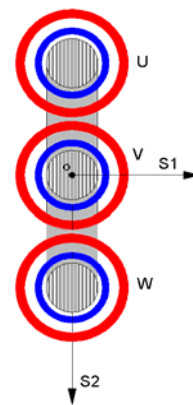


Fig. 15: Linee di calcolo S1 ed S2

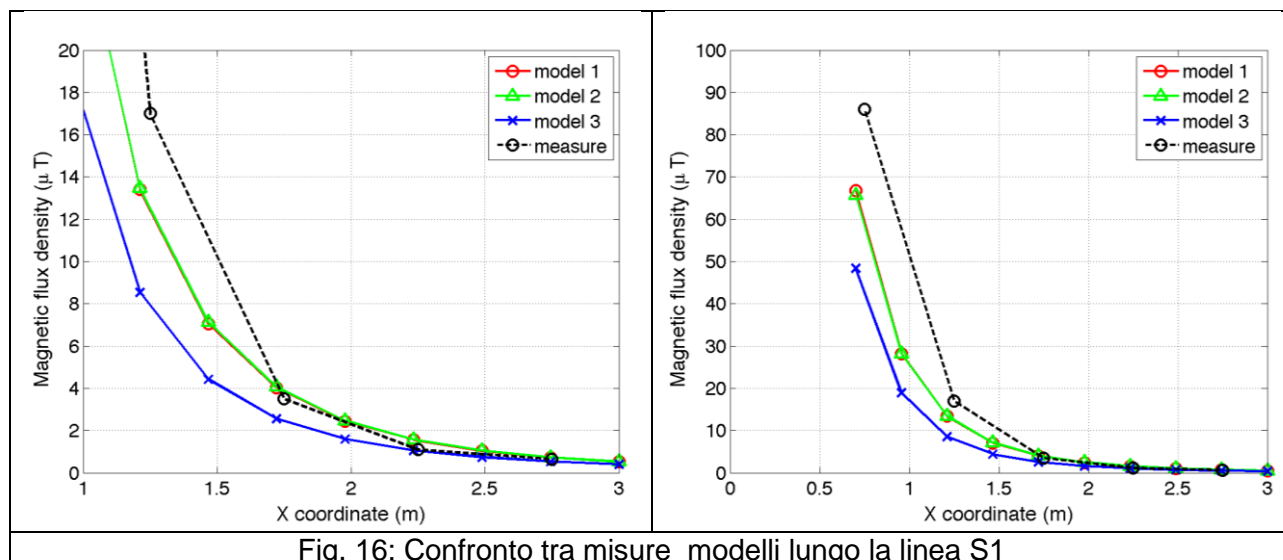


Fig. 16: Confronto tra misure modelli lungo la linea S1

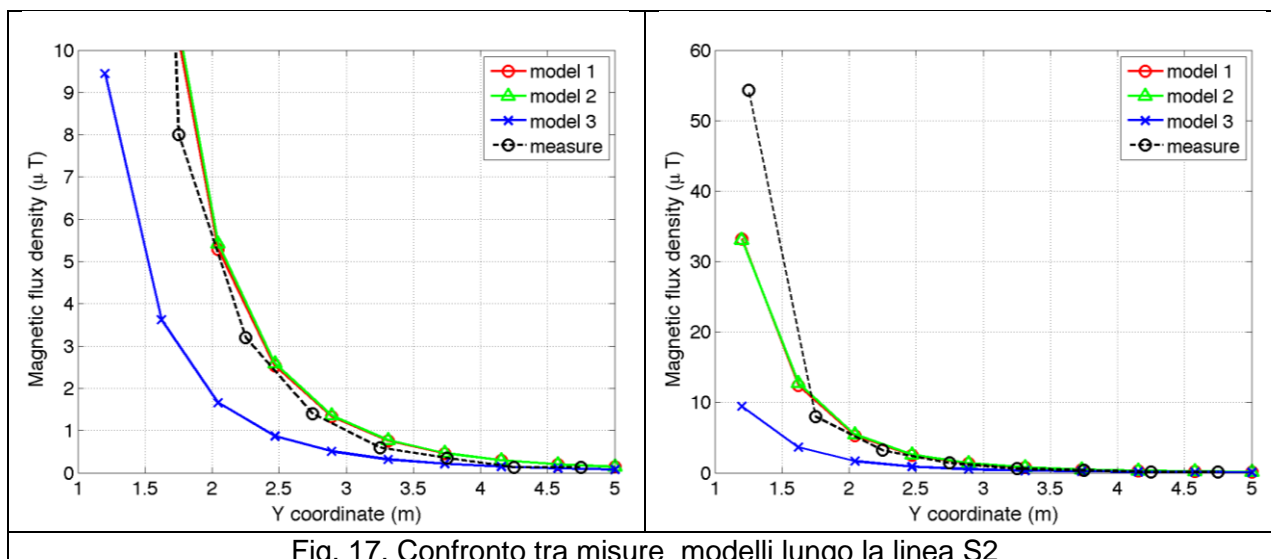


Fig. 17. Confronto tra misure e modelli lungo la linea S2

## 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.***