

# **TECNICHE DI VALIDAZIONE DI PROGRAMMI DI CALCOLO DELL'INDUZIONE MAGNETICA GENERATA DA ELETTRODOTTI. DEFINIZIONE DI PROCEDURE GENERALI E APPLICAZIONE AD UN CASO PARTICOLARE: IL SOFTWARE PHIDEL**

Comelli M., Benes M., Bampo A., Villalta R.

*ARPA Friuli Venezia Giulia, piazza Grande 1 – 33057 Palmanova (UD)*  
*comelli@arpa.fvg.it*

## **ABSTRACT**

Nel presente lavoro, a partire da quanto disponibile in Letteratura concernente la realizzazione di applicativi dedicati al calcolo dell'induzione magnetica in prossimità di linee elettriche, si sono raccolte in un contesto organico tutte le problematiche connesse a tale argomento, fino a giungere alla definizione di una procedura generale di validazione.

Ne viene proposta una suddivisione in due fasi: la prima considera la struttura dell'algoritmo implementato, e confronta i risultati con il calcolo analitico di alcuni casi in cui sia possibile ottenere una soluzione esatta dalla sola analisi teorica. La seconda prevede il confronto dei risultati del software con le misure eseguite sul territorio in particolari configurazioni di linee, in modo da estendere il processo di verifica ai casi in cui sia prevedibile un utilizzo del programma. Si possono quindi applicare gli strumenti offerti dall'analisi statistica per fornire una valutazione quantitativa della validità del codice.

In particolare tale procedura è stata applicata al software Phidel, il nuovo strumento informatico per la valutazione del campo di induzione magnetica generato da elettrodotto: vengono qui presentati i risultati ottenuti.

## **1. INTRODUZIONE**

Diversi lavori in Letteratura [1, 2, 3, 4, 5] analizzano vari software per il calcolo del campo magnetico efficace generato da elettrodotto, soffermandosi o su alcune caratteristiche del programma o sul confronto con i dati sperimentali di situazioni specifiche, senza però definire un protocollo di verifica generale.

La procedura di validazione sviluppata presso ARPA FVG si articola in due fasi successive. Nella prima si considera l'algoritmo che porta alla realizzazione del programma, e lo si usa per calcolare il campo generato da alcune configurazioni caratteristiche che siano calcolabili esattamente (campo di un segmento, di una spira) o di cui sia predicibile l'andamento (variazione del campo con la distanza dal cavo o con lo sfasamento relativo tra le correnti di due linee): il software analizzato deve riprodurre esattamente quanto previsto dalla teoria. La seconda parte consiste nel confronto dei dati forniti dal software con i risultati di misure eseguite presso varie configurazioni di elettrodotto, in modo da testare l'affidabilità del programma tramite un test del chi quadro ridotto nelle varie situazioni in cui se ne prevede l'utilizzo.

Nel presente lavoro la procedura appena descritta è applicata a Phidel, un software per il calcolo dell'induzione magnetica generata da elettrodotto rispondente ai requisiti della norma CEI 211-4 [6].

## **2. VALIDAZIONE TEORICA**

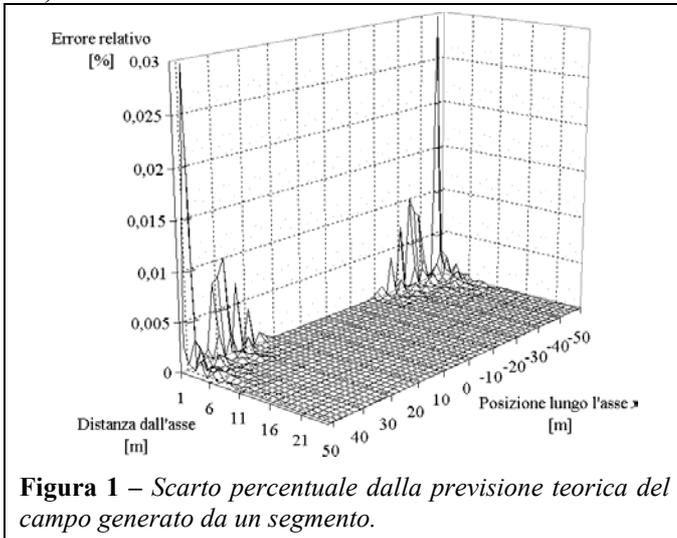
Al fine di eseguire i test atti a fornire la validazione teorica di un software, è necessario conoscerne le condizioni di funzionamento e le approssimazioni utilizzate dall'algoritmo implementato. L'unica approssimazione presente in Phidel consiste nella discretizzazione della campata che descrive il conduttore in una spezzata costituita da segmenti di lunghezza definita dall'utente. Di conseguenza, la prima verifica è data dalla riproduzione del campo generato da un conduttore rettilineo di lunghezza finita, e dal confronto con quanto previsto dalla teoria.

### **2.1 - Campo di un segmento**

Il campo generato da un segmento è descritto dalla formula [7]:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \eta \hat{\varepsilon}$$

in cui  $I$  è la corrente circolante,  $\hat{\varepsilon}$  è il versore che identifica l'orientamento del campo e la quantità  $\eta$  dipende dalla geometria del sistema (lunghezza del segmento e posizione ad esso relativa del punto di calcolo).



**Figura 1** – Scarto percentuale dalla previsione teorica del campo generato da un segmento.

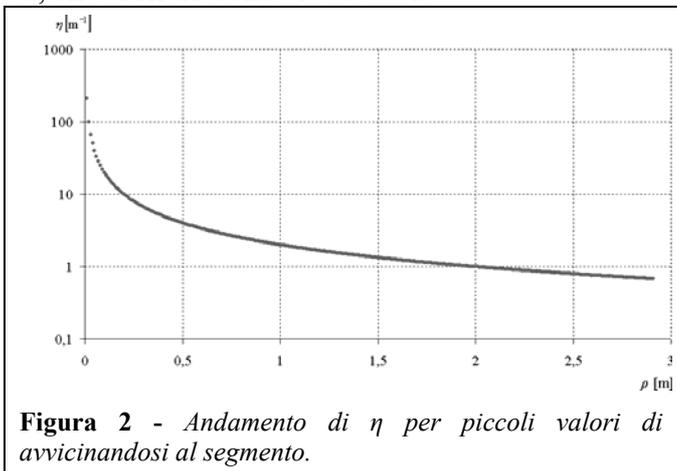
A partire da questa relazione si calcola lo scarto relativo dalla previsione teorica in funzione della posizione del punto di calcolo rispetto al segmento considerato, come riportato in Figura 1. Tale valore è sempre inferiore allo 0.03%, e la differenza percentuale maggiore si ha per i valori di campo più bassi, quando diventano più importanti le approssimazioni dovute alle perdite di cifre significative.

Si tratta di differenze non rilevabili dagli strumenti di misura utilizzati da ARPA FVG, in quanto la sensibilità è tipicamente inferiore di almeno tre ordini di grandezza ai valori calcolati in tali punti (per i rivelatori PMM 8053 ed EMDEX II, ad esempio, vale 10 nT).

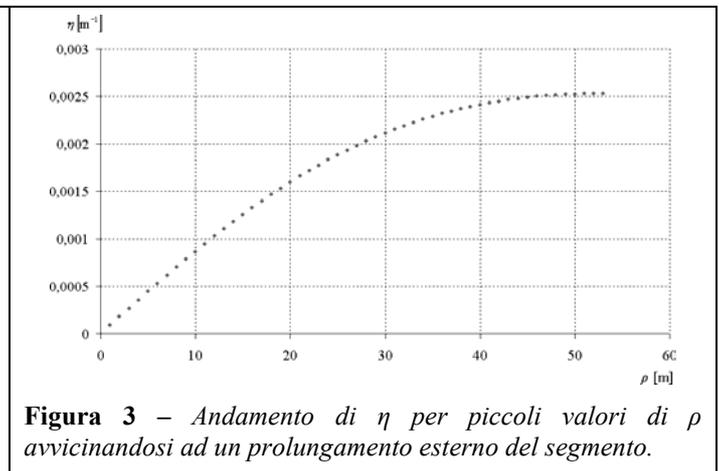
## 2.2 - Comportamento a piccole distanze dal cavo

Disponendo del codice sorgente del software da analizzare, è possibile effettuare un'analisi sulle variabili utilizzate, e confrontarne l'andamento con quello atteso dalla teoria.

Al diminuire della distanza, nel seguito indicata con  $\rho$ , del punto in cui si calcola il campo dal segmento considerato, si può dimostrare che la quantità  $\eta$  definita nella 1 si comporta in maniera diversa a seconda che ci si avvicini al segmento ( $\lim_{\rho \rightarrow 0} \eta = \infty$ ), o ad un suo prolungamento esterno ( $\lim_{\rho \rightarrow 0} \eta = 0$ ). I risultati ottenuti dal software sono concordi con quanto previsto dalla teoria, come visualizzato nelle figure seguenti, che si riferiscono ai due casi.



**Figura 2** - Andamento di  $\eta$  per piccoli valori di  $\rho$  avvicinandosi al segmento.



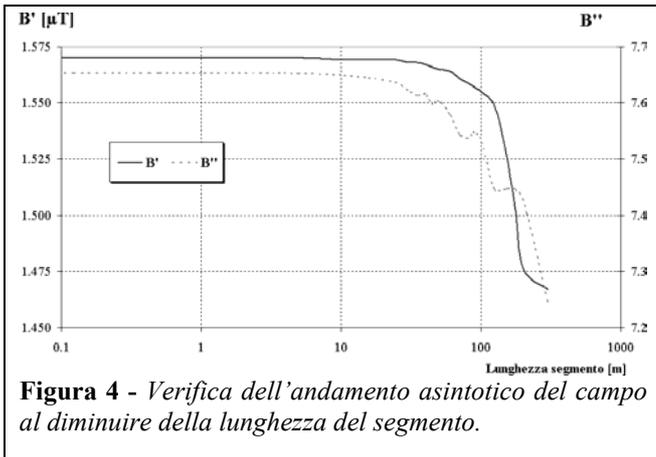
**Figura 3** - Andamento di  $\eta$  per piccoli valori di  $\rho$  avvicinandosi ad un prolungamento esterno del segmento.

## 2.3 - Risultato al variare della lunghezza del segmento

Quando la lunghezza dei segmenti costituenti la spezzata che approssima la catenaria si avvicina allo zero, il calcolo tende al caso non approssimato. Ci si aspetta quindi un andamento asintotico, come quello effettivamente ottenuto e visualizzato in scala semilogaritmica nei due esempi riportati nella Figura 4.

Tali grafici sono riferiti a due punti, uno posto in prossimità della base di un traliccio di una linea aerea (linea continua nera), l'altro più distante dalla stessa linea (linea tratteggiata grigia). In entrambi i casi la lunghezza del segmento costituente la spezzata è stata fatta variare da 0.1 a 300 m.

È ottimale scegliere, in entrambe le condizioni, una lunghezza di 10 m, poiché il valore di campo rimane costante per lunghezze inferiori, che comportano tuttavia un incremento dei tempi di calcolo.



Lunghezze superiori sono preferibili nel caso di configurazioni con numerosi conduttori o punti di calcolo, per una valutazione preliminare in tempi brevi.

L'andamento irregolare nel grafico tratteggiato, che presenta una successione di minimi e massimi relativi, è dovuto alla particolare configurazione scelta, in cui il punto di misura può trovarsi più o meno vicino ai segmenti che approssimano la campata a seconda della lunghezza definita per questi dall'utente. Anche questo problema viene tuttavia risolto utilizzando il valore consigliato di 10 m.

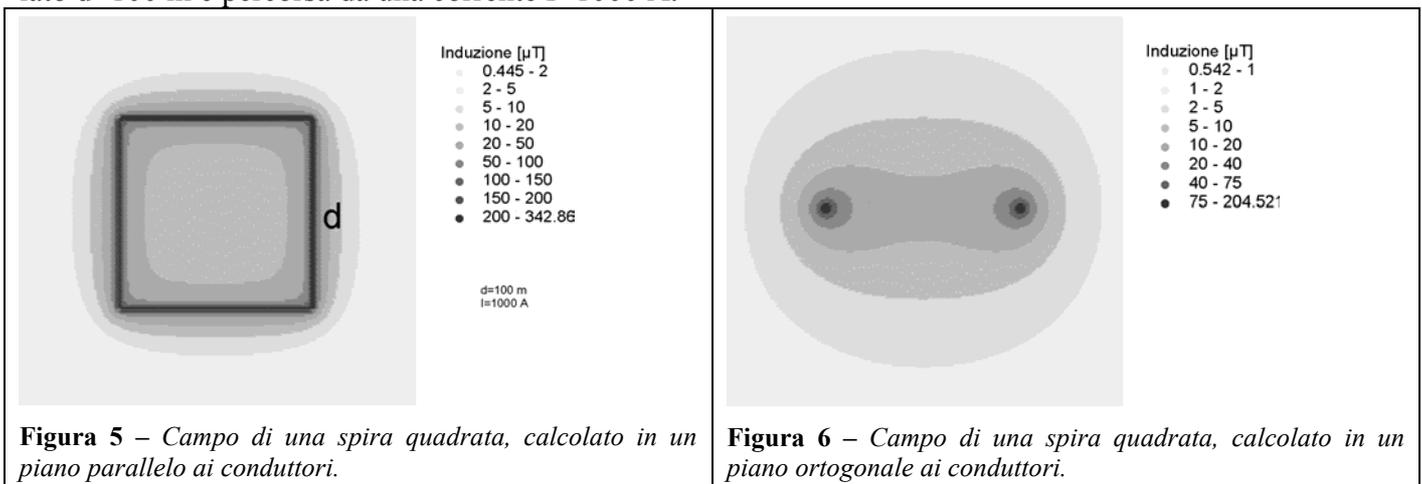
## 2.4 - Campo di una spira

Nel centro di una spira a forma di poligono regolare avente lato di lunghezza  $l$ , il valore del campo è dato da [8]:

$$B = \frac{n\mu_0 I}{\pi l} \sin \frac{\pi}{n} \tan \frac{\pi}{n} \quad 2$$

ove  $n$  è il numero di lati della spira. L'esatto accordo di tale formula con i risultati forniti dal software è stato provato sino alla quarta cifra significativa per  $n=3, 4, 5, 6, 8$  lati.

Nell'esempio visualizzato nelle figure seguenti in ambiente GIS è considerata una spira quadrata, di lato  $d=100$  m e percorsa da una corrente  $I=1000$  A.



## 2.5 - Variazione dello sfasamento relativo

Considerando il caso di una configurazione costituita da due linee distinte, il campo efficace in un punto deve essere una funzione periodica dello sfasamento relativo tra le correnti delle due linee.

Si consideri a tal proposito la campata, lunga 300 m, tra due da tralicci il cui schema è riportato in Figura 7; sono indicate le fasi dei conduttori e i due punti in cui è effettuato il calcolo. Nell'esempio le costanti di tesatura dei cavi riferiti alle due linee valgono 1600 m e 1700 m, e le correnti 960 A e 1300 A, rispettivamente.

Il risultato atteso è un campo variante periodicamente in funzione dello sfasamento, ed avente un minimo a  $360^\circ$  a distanza infinita: infatti a piccole distanze il punto di misura risente della geometria del sistema (ossia della distanza da ciascun conduttore), mentre allontanandosi dalla sorgente la distanza relativa tra i cavi diventa trascurabile rispetto alle dimensioni del problema. Conforme alle aspettative, tale andamento è riportato in Figura 8.

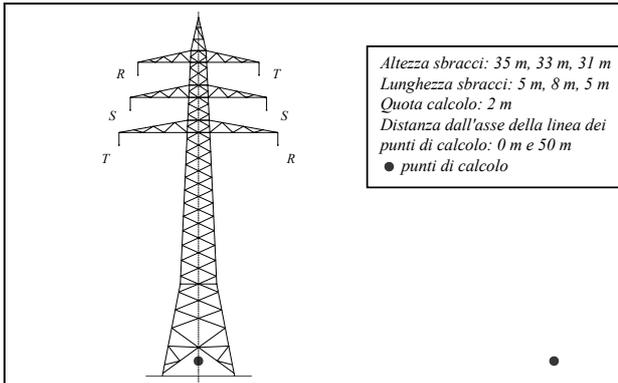


Figura 7 – Traliccio e punti in cui viene calcolato il campo.

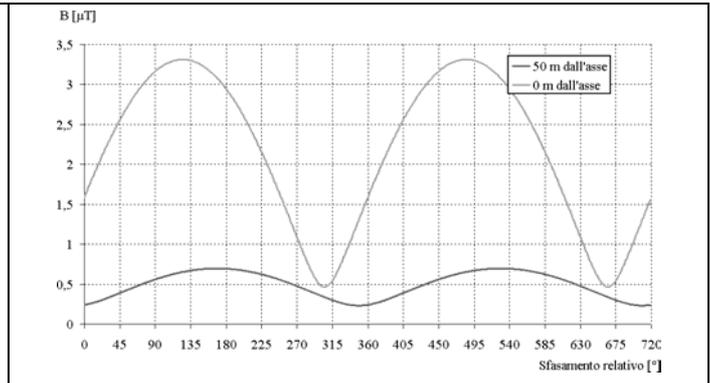


Figura 8 – Campo in funzione dello sfasamento relativo.

### 3. VALIDAZIONE SPERIMENTALE

#### 3.1 - Misura effettuata presso terna singola

In presenza di una linea costituita da una terna singola, l'induzione magnetica in un punto è proporzionale alla corrente circolante, per la legge di Biot-Savart:

$$\vec{B}(P) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_C \frac{I(P') d\vec{l}' \times \vec{R}}{R^3}$$

3

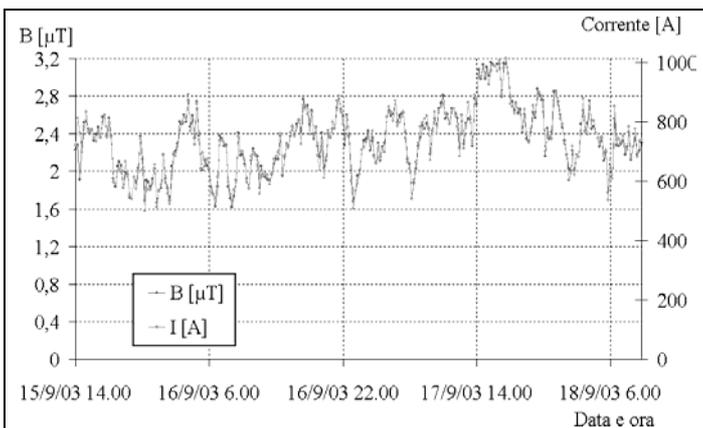


Figura 9 - Andamento temporale di corrente di linea e di induzione magnetica nei pressi di una linea a 380 kV.

Per verificare sperimentalmente l'accordo in tale caso dei risultati del software con quelli sperimentali, è stata effettuata una misura avvalendosi di una centralina di tipo PMM 8055S, adatta per le misure in continuo, e i dati raccolti nell'arco di quattro giornate sono stati rapportati ai valori di corrente forniti dall'ente gestore.

Supposta una relazione del tipo  $B=mI$  tra campo e corrente, il valore ricavato sperimentalmente per il coefficiente di proporzionalità,  $m=(3.2\pm 0.1)\text{nT/A}$ , deve essere confrontato con quello ottenuto dal calcolo effettuato tramite Phidel,  $m_c=(3.2\pm 0.3)\text{nT/A}$ .

I due valori sono consistenti, essendo lo scarto inferiore all'incertezza relativa ad entrambi.

#### 3.2 - Misura lungo un percorso

Sono state eseguite due misure di profilo dell'induzione magnetica trasversalmente a due linee singole campione a 380 kV (la 21347 Planais-Salgareda e la 21356 Planais-Redipuglia) utilizzando il sistema di misura EMDEX II nella versione LINDA, in cui lo strumento palmare viene fissato su di un supporto mobile munito di odometro [9]. Nelle Figure 10 e 11 viene mostrato il confronto tra le misure ed il calcolo eseguito con Phidel.

Sui dati è stato fatto uno studio del chi quadrato ridotto. È stato assunto un errore sperimentale del 3%, come riportato nel manuale d'uso dello strumento, al quale viene sommata in quadratura la fluttuazione percentuale di corrente, ricavabile dai dati forniti dall'ente gestore. Nel caso della linea 21347, per un valore della corrente di  $130 \pm 50$  A, si è ottenuto il valore  $\tilde{\chi}_{75}^2 = 0.7$ ; nel caso della linea 21356, per un valore della corrente di  $1110 \pm 90$  A, è stato ottenuto  $\tilde{\chi}_{260}^2 = 0.6$ . In nessun caso il valore del  $\tilde{\chi}^2$  ottenuto comporta il rigetto dell'ipotesi di consistenza fra misure e calcolo, fissata al 5% la soglia di rigetto.

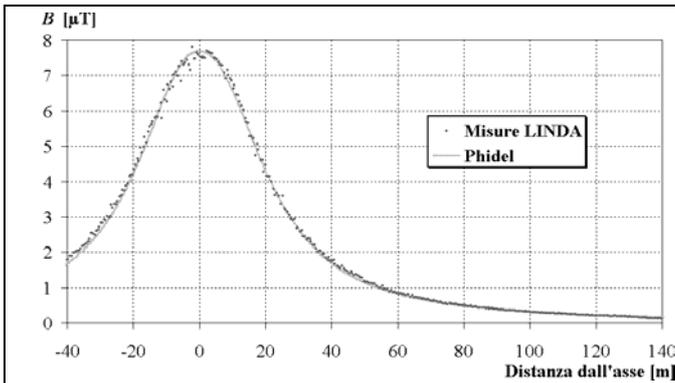


Figura 10 – Confronto tra dati sperimentali e risultati del software (linea 21356).

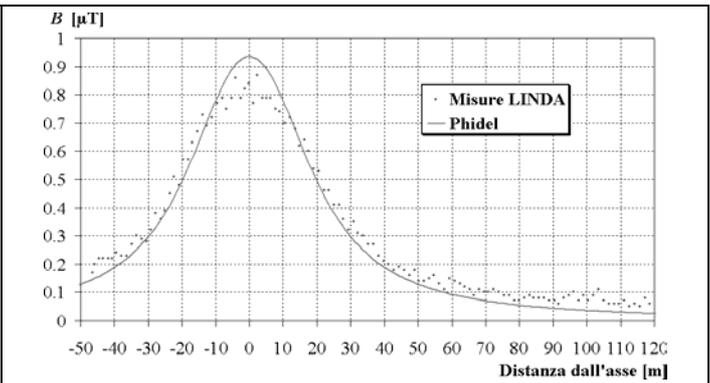


Figura 11 – Confronto tra dati sperimentali e risultati del software (linea 21347).

### 3.3 - Misura presso una doppia linea

Utilizzando Phidel è possibile riprodurre la storia di una doppia linea utilizzando un file di testo contenente i valori di tensione, potenza attiva e reattiva al variare del tempo.

La configurazione costituita da due linee distinte, sostenute dagli stessi tralicci ed aventi sfasamento tra le tensioni noto, è stata definita “doppia linea” [7]. La determinazione del valore di induzione magnetica in un punto non dipende dai soli valori delle correnti di linea, ma anche dallo sfasamento tra di esse.

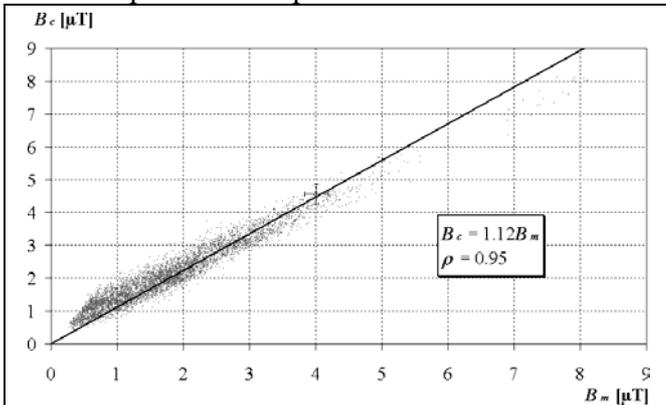


Figura 12 – Confronto tra dati sperimentali e risultato di Phidel.

I dati, linearmente correlati con una regressione pari a 0.95, vengono sottoposti ad un test del  $\tilde{\chi}^2$ , che non rigetta l’ipotesi di validità del software ( $\tilde{\chi}_{5182}^2 = 0.6$ ).

## 4. CONCLUSIONI

Presso ARPA FVG è stato sviluppato un protocollo destinato alla verifica della validità dei software destinati al calcolo di campi emessi da sorgenti ELF, ma per la sua generalità (validazione teorica prima e sperimentale in seguito) può essere applicato a qualunque tipo di programma di calcolo, qualora siano soddisfatti alcuni requisiti essenziali: possibilità di effettuare calcoli in situazioni esattamente conoscibili e quindi immediatamente testabili, disponibilità (eventuale) del codice sorgente per verificare l’andamento delle variabili in funzione di opportuni parametri, possibilità infine di eseguire un confronto tra output del programma e misure effettuate in situazioni in cui siano note le condizioni che portano al fenomeno fisico studiato.

La procedura così sviluppata è stata applicata con successo al programma Phidel, che ha riprodotto esattamente i risultati previsti dalla teoria nei casi esaminati, ed ha soddisfatto il confronto con i dati sperimentali fornendo nei test del chi quadro ridotto risultati che non hanno mai permesso il rigetto dell’ipotesi di validità.

Un calcolo del campo è pertanto possibile solo nel caso in cui sia possibile determinare tale sfasamento, dai valori di potenza attiva e reattiva:

$$\varphi = \arctan \frac{Q}{P} \quad 4$$

Dai dati relativi alle linee si può ricavare, utilizzando la nuova versione del software, l’evoluzione nel tempo del campo di induzione magnetica nel punto in cui è stata posta una centralina di tipo PMM 8055S per le misure in continuo.

In Figura 12 sono confrontati i valori misurati ( $B_m$ ) e quelli calcolati ( $B_c$ ) [10].

## 5. BIBLIOGRAFIA

- [1]. Roberto Turri, Maurizio Albano, “Calcolo previsionale dei campi elettromagnetici generati da elettrodotti”, Associazione Elettrotecnica ed Elettronica Italiana, Padova 2000
- [2]. Elena Gambato, Maria Rosa, “Studio dei modelli per il calcolo dei campi elettromagnetici generati da elettrodotti”, Direzione Tecnico Scientifica ARPAV, Venezia 2000
- [3]. D. Manco, L. Bruzzi, A. Soloni, D. Valbonetti, S. Fabbri, S. Violanti, “Electric and magnetic fields generated by AC power lines: an application of advanced modelling tools in order to predict exposure levels”, *Radiation Protection Dosimetry*, 97(4), pp 359-362 (2001)
- [4]. G. Licitra, M. Magnoni, G. D’Amore, A. Poggi, S. Adda, M.C. Losana, A. Jacoponi, T. Gabrieli, “Rassegna dei modelli per il rumore, i campi elettromagnetici e la radioattività ambientale”, ANPA, RTI CTN\_AGF 1/2001
- [5]. Silvia Violanti, “Cem nelle aree urbane, a Bologna uno studio per valutare i campi a basse frequenze”, ARPA Rivista N. 1, ARPA Emilia-Romagna, Gennaio-Febrero 2003
- [6]. Norma Italiana CEI 211-4, luglio 1996, Prima Edizione, Fascicolo 2840, “Guida ai metodi di calcolo dei campi elettrici e magnetici generati da linee elettriche”
- [7]. Moreno Comelli, Luciano Bertocchi, Renato Villalta, Massimiliano Benes, “Analisi, modelli previsionali e Valutazione di Impatto Ambientale di campi di induzione magnetica generati da linee elettriche ad altissima tensione” Università degli Studi di Trieste, 2004
- [8]. Duane E. Roller, Ronald Blum, “Fisica – Volume secondo: Eletticità, magnetismo, ottica”, Zanichelli, Bologna 1985.
- [9]. Benes M., Comelli M., Drigo A., Giovani C., Montanari F., Villalta R., “Strumenti per una mappatura degli elettrodotti: database, software di simulazione e monitoraggio”, Comunicazione orale, pag. 21, Atti del Convegno Nazionale – Dal monitoraggio degli agenti fisici sul territorio alla valutazione dell’esposizione ambientale, 29-31 ottobre 2003, Villa Gualino, Torino.
- [10]. Moreno Comelli, “Phidel 2.2 – Manuale di riferimento”, <http://www.phidel.it>