

# Campo magnetico prodotto da cabine di trasformazione

Carrara, D.M.

Politecnico di Torino, C.so Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino, [davide.carrara@libero.it](mailto:davide.carrara@libero.it)

Zavatti, M.

Arpa Regione Lombardia, Via Juvarra 22, 20121 Milano, [m.zavatti@arpalombardia.it](mailto:m.zavatti@arpalombardia.it)

Cazzaniga, M.T.

Arpa Regione Lombardia, Via Juvarra 22, 20121 Milano, [m.cazzaniga@arpalombardia.it](mailto:m.cazzaniga@arpalombardia.it)

Canova, A.

Politecnico di Torino, C.so Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino, [aldo.canova@polito.it](mailto:aldo.canova@polito.it)

Gruosso, G.

Politecnico di Milano, P.zza Leonardo da Vinci 32, 20133 Milano, [gruosso@elet.polimi.it](mailto:gruosso@elet.polimi.it)

## Riassunto

Il lavoro presenta uno studio sul campo magnetico prodotto da sorgenti di campo magnetico a bassa frequenza come le cabine di trasformazione. Lo studio si basa su diverse metodologie che consentono di trattare in modo accurato sia le linee elettriche sia il trasformatore. Tali metodologie sono implementate in due differenti software di calcolo elettromagnetico: EFC-400 e CST Em Studio. Il primo è dedicato allo studio dei campi ambientali prodotti dalle sorgenti in bassa frequenza mentre il secondo è di tipo più generale e consente la soluzione di campi elettrici, magnetici e di corrente. Sono stati esaminate le situazioni espositive in corrispondenza di una cabina di trasformazione MT/bt e di un trasformatore di piccola potenza allo scopo di mettere a confronto campioni sperimentali registrati e risultati delle simulazioni. In conformità alla normativa vigente è stata condotta una serie di rilievi sperimentali in differenti condizioni di carico e successivamente si sono elaborati modelli di carico per la simulazione del comportamento elettromagnetico dei componenti costituenti oggetto di indagine.

I risultati positivi ottenuti confermano la possibilità dell'utilizzo a scopo previsionale dei programmi di calcolo utilizzati ai fini della valutazione dei possibili rischi connessi alle esposizioni in ambito urbano.

## A) INTRODUZIONE

Negli ultimi anni una sempre maggiore attenzione è stata dedicata ai livelli di esposizione generati da sistemi elettrici posti in prossimità di ambienti di vita quali linee elettriche o cabine di trasformazione.

In questo lavoro si è quindi considerato il sistema "cabina di trasformazione", in virtù della sua eventuale localizzazione in ambito urbano, valutando la possibilità di uno studio di un suo modello numerico; in letteratura, peraltro, non sono diffuse documentazioni relative a tali analisi. Le sorgenti presenti all'interno di una cabina di trasformazione sono rappresentate principalmente dai conduttori lato MT e bt e degli avvolgimenti primari e secondari del trasformatore. Mentre sui primi, attraverso la legge di Biot-Savart, è possibile ottenere un modello sufficientemente accurato, il campo magnetico prodotto dal componente trasformatore è spesso trascurato o approssimato e risulta di difficile valutazione. Il suo contributo è generalmente inferiore al contributo delle linee di distribuzione, specialmente per i trasformatori raffreddati in olio in cui il cassone metallico che contiene il trasformatore presenta un buon comportamento schermante. Nei casi in cui la cabina è costituita da un trasformatore isolato in resina ed in prossimità del trasformatore stesso, il contributo al campo magnetico prodotto dal trasformatore può diventare significativo e va tenuto in conto. Un modello accurato di tale componente non può essere semplicemente basato sull'integrazione della legge di Biot-Savart, anche tenendo conto della forma a spirale degli avvolgimenti, ma richiede un modello che tenga conto delle caratteristiche fisiche e geometriche degli avvolgimenti e del nucleo.

## B) BASI TEORICHE

### 1) SOFTWARE EFC-400

Il software EFC-400 sviluppato da Narda è dedicato alla simulazione numerica del comportamento elettromagnetico a bassa frequenza delle apparecchiature elettriche presenti in cabina [1]. Esso si basa sulla rappresentazione del modello attraverso segmenti di conduttore rettilinei percorsi da opportune correnti ai quali viene applicata iterativamente la legge di Biot-Savart. Come noto la suddetta legge integrata su di un tratto di lunghezza finita dipende dalle coordinate degli estremi dei

segmenti che costituiscono il percorso dei conduttori e dalle correnti che li attraversano. Il software consente di suddividere i conduttori in un numero finito di segmenti, definibile dall'utente, in relazione alla precisione di calcolo desiderata. Il componente trasformatore è modellizzato da solenoidi in aria e consente di tenere conto della presenza eventuale di schermi attraverso coefficienti empirici. Una valutazione accurata del campo vicino al trasformatore risulta pertanto poco precisa. Occorre ricordare che il software nasce per lo studio del campo prodotto dalle linee elettriche (linee aeree, linee in cavo, etc.) ed attraverso una interfaccia costruita ad hoc in cui è presente un archivio dettagliato di tralicci è particolarmente adatto allo studio dell'impatto ambientale prodotto da tali componenti.

## 2) SOFTWARE CST Em studio

Il software commerciale Em Studio consente di studiare problemi elettromagnetici ed è basato sulla Tecnica dell'Integrazione Finita delle equazioni di Maxwell che descrivono il campo [2]. Tale metodologia di calcolo, introdotta da T. Weiland [3], determina la soluzione delle equazioni di campo in un dominio di calcolo finito in cui la cella elementare può essere sia esagonale sia tetraedrica. La discretizzazione spaziale delle equazioni di Maxwell viene realizzata su una griglia "primaria", mentre le grandezze di campo complementari vengono collocate su una griglia secondaria. La soluzione delle equazioni di Maxwell viene fornita direttamente in termini di grandezze di campo: densità di flusso magnetico, intensità di campo e possono essere visualizzate anche utili quantità integrali quali forze, energia immagazzinata nel campo, induttanze, ecc. Il programma è di tipo più generale e non nasce dedicato allo studio dei campi ambientali. In esso le diverse sorgenti di campo vanno costruite e risulta di più difficile applicazione rispetto a software dedicati. Per contro la generalità del metodo consente di studiare qualunque tipo di componente e di tenere conto delle caratteristiche geometriche e fisiche dei diversi materiali e delle sorgenti di campo.

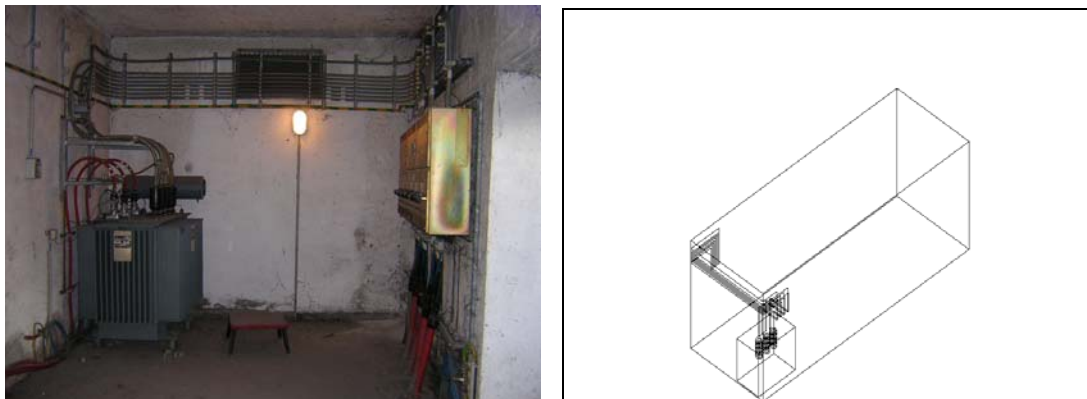
## C) ANALISI DELLE SORGENTI DI CAMPO

### 1) IL SISTEMA "CABINA DI TRASFORMAZIONE"

La cabina di trasformazione è l'impianto della rete elettrica di distribuzione destinato alla trasformazione da alta a media tensione (cabina primaria) o da media a bassa tensione (cabina secondaria). Particolare attenzione viene posta verso le cabine secondarie, poiché il più delle volte sono installate in prossimità di insediamenti residenziali o industriali. La conversione tra i due livelli di tensione avviene attraverso un "trasformatore", mentre la connessione alle reti di distribuzione avviene attraverso apparecchiature elettriche, quali quadri di media tensione all'interno dei quali sono collocati interruttori, sezionatori, interruttori di manovra e relativi accessori ed apparecchiature di bassa tensione.

Il trasformatore è l'elemento principale della cabina di trasformazione all'origine di campi magnetici dovuti alle correnti che vi circolano, in parte schermati dall'involucro metallico che provvede al rivestimento delle parti attive. Completano il lay-out di cabina i collegamenti in cavo verso l'alimentazione in Media Tensione (MT) e quelli verso le utenze in Bassa Tensione (bt). I trasformatori più frequentemente impiegati per la distribuzione MT-bt sono macchine trifasi con potenze che possono variare da centinaia di kVA fino a 800 kVA per le grandi utenze civili [4], [5].

Figura 1 – Lay-out della cabina in esame



In fig. 1) è rappresentato il lay out della cabina in esame, posta in corrispondenza del locale interrato al di sotto dell'unità abitativa presso la quale sono state effettuate le misure di campo. La cabina alimentata in media tensione (23 kV) è costituita da un unico trasformatore di potenza pari a 630 kVA, che alimenta le utenze collegate in bassa tensione.

## 2) TRASFORMATORE

Il trasformatore utilizzato nel corso della sessione sperimentale è un trasformatore trifase di potenza nominale di 5 kVA, realizzato per scopi didattici, e quindi senza involucro esterno. Si tratta di un trasformatore caratterizzato da un rapporto di trasformazione unitario con tensione nominale di 220 V. Il nucleo trifase del tipo a giunti intrecciati, presenta altezza pari a 30 cm e profondità del pacco pari a 6 cm. Gli avvolgimenti in rame ricotto, sono del tipo concentrico avvolto ad elica con la bassa tensione interna rispetto al nucleo. In forma tabulare vengono riportati i dati costruttivi. La postazione di misura è stata realizzata a distanza significativa dall'alimentazione in modo di limitarne l'influenza in termini di disturbo elettromagnetico, ponendo il trasformatore ad altezza di circa 1 m dal pavimento per evitare l'influenza di eventuali armature in metallo presenti nella struttura.

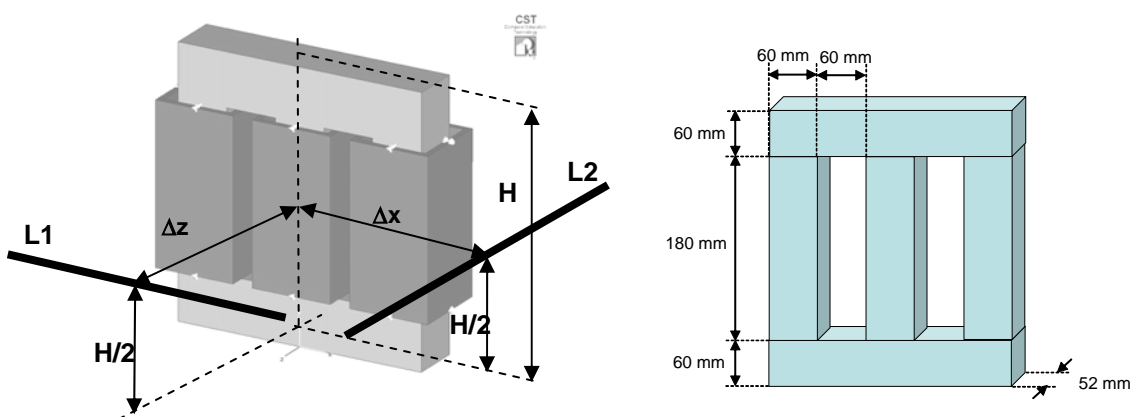
Figura 2 - Particolare del modello del trasformatore utilizzato e sue caratteristiche tecniche



Numero delle fasi	3
Numero spire primarie	135
Numero spire secondarie	135
Tensione nominale primaria [V]	220
Tensione nominale secondaria	220
Potenza apparente nominale [kVA]	5
Resistenza dell'avvolgimento primario	0.17
Resistenza dell'avvolgimento secondario	0.23

Sono quindi state esaminate differenti condizioni di alimentazione e le componenti spaziali del campo magnetico a bassa frequenza prodotte dal trasformatore sono state misurate attraverso il sensore PMM-EPH50 [5]. La massima incertezza di misura è dovuta alle dimensioni della sonda, che introducono un errore nella determinazione del punto esatto della misura. Seguono in forma tabulare i dati tecnici relativi al trasformatore in oggetto.

Figura 3 - Modello del trasformatore rappresentato

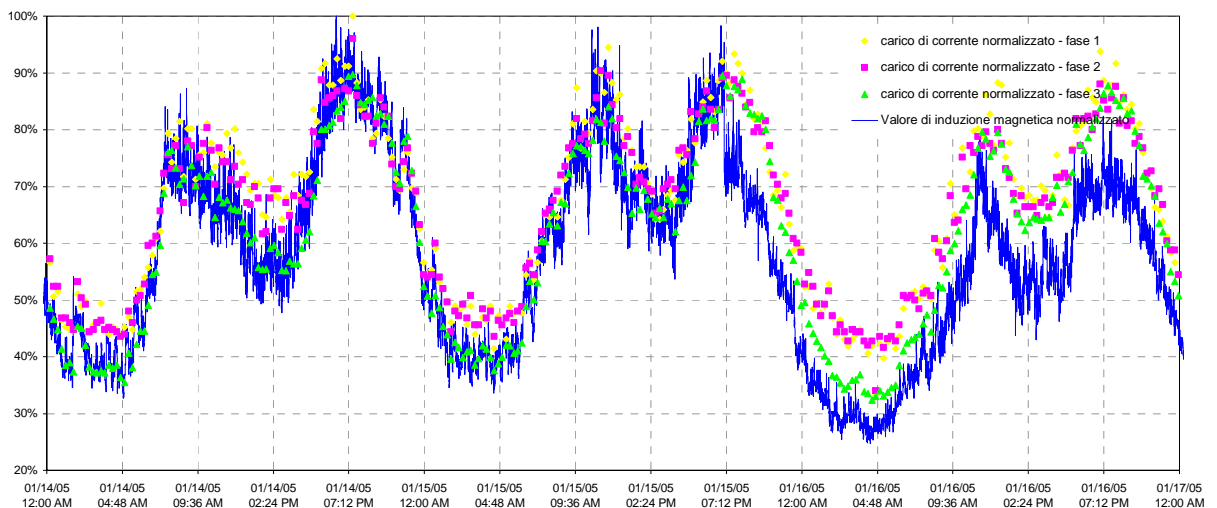


## D) MODALITA' DI MISURA

Gli strumenti utilizzati durante le acquisizioni dei rilievi sperimentali sono costituiti da misuratori di campo portatili e programmabili, in grado di rilevare il valore efficace del campo a frequenza industriale. In particolare sono stati utilizzati l'Emdex lite per le misure puntuali, l'Emdex mate per le rilevazioni in continuo e il sistema di misura PMM 8053 A con l'analizzatore EHP-50C.

I valori di campo di induzione magnetica sono stati acquisiti all'interno dell'ambiente abitativo limitrofo al locale cabina, in corrispondenza dei nodi di una griglia di misura, per quanto possibile regolare, e sono state ripetute per differenti quote in altezza. La distribuzione del campo sui diversi piani consente di individuare eventuali zone critiche e di apprezzare contestualmente la progressiva riduzione dei valori di campo conseguente all'allontanamento dalla sorgente, posta al di sotto del piano. Inoltre in conformità alla Norma CEI 211-16 [6] si sono eseguite misure in continuo del campo di induzione al fine di caratterizzare anche la variazione temporale, oltre a quella spaziale. In fig. 4) sono rappresentati gli andamenti del carico in ciascuna delle tre fasi e il corrispondente valore di campo registrato.

Figura 4 – Andamento delle correnti e dei corrispondenti valori di carico durante il periodo di monitoraggio



## E) PRESENTAZIONE DEI RISULTATI OTTENUTI

### 1) DETERMINAZIONE DEL MODELLO DEL TRASFORMATORE IN CABINA

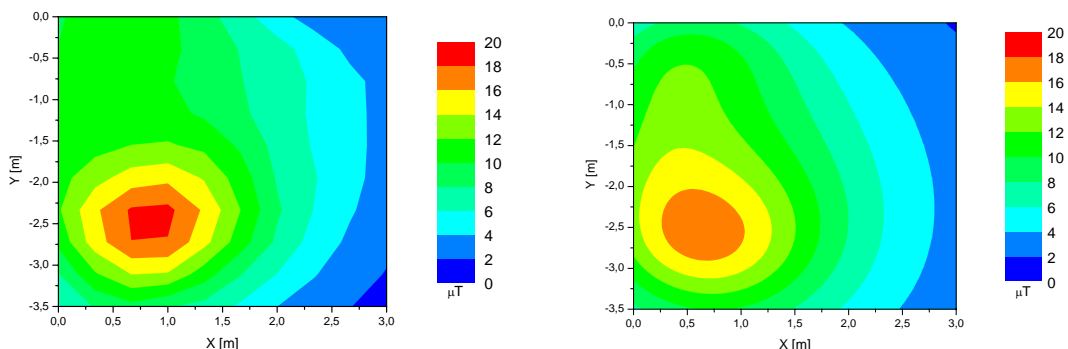
Il modello della cabina è stato costruito a partire dal lay-out di cabina sopra citato. Sono quindi state rappresentate le sorgenti di campo e sono state simulate le condizioni di carico a partire dai valori di corrente monitorati. E' possibile notare dalla fig. 1) che i cavi di bassa tensione, sono disposti secondo una configurazione che prevede due conduttori per fase, i collegamenti si svolgono lungo la parete laterale a circa 30 cm dal soffitto del locale, secondo una disposizione successiva delle fasi R S T + N, R S T + N. A partire dalla configurazione rappresentata in fig. 1) si è quindi determinato un modello equivalente della cabina e, attraverso i rilievi di carico registrati è stato possibile simulare le differenti condizioni di funzionamento in corrispondenza del monitoraggio del campo misurato a livello del piano di calpestio soprastante.

In particolare sono stati individuati i seguenti step:

- divisione logica della cabina in sottogruppi;
- costruzione dei sottogruppi;
- posizionamento sulla planimetria dei sottogruppi così ottenuti;
- verifica della geometria;
- calcolo dell'intensità di campo.

I dati in ingresso al programma necessari per il calcolo consistono nella planimetria del locale in esame, nella disposizione delle sorgenti di campo individuate, nei dati di targa del trasformatore (potenza, tensioni, correnti nominali e tensione di corto circuito percentuale) e dai valori delle correnti registrati in corrispondenza delle misure di campo. La disposizione dei conduttori di bassa e media tensione è stata realizzata nelle tre dimensioni dello spazio e il modello del trasformatore è stato sviluppato a partire dalla rappresentazione delle tre bobine in bassa tensione percorse da un'opportuna corrente tale da simulare la presenza della schermatura costruita dal cassone. I risultati ottenuti possono essere riassunti in fig. 5) in cui si mettono a confronto i campioni sperimentali registrati e i risultati della simulazione effettuata attraverso il software EFC-400.

Figura 5 – Confronto tra misure sperimentali e simulazione



Misure a livello del piano di calpestio

Simulazioni realizzate con il software EFC-400

Come si evince dalle rappresentazioni precedenti, i valori massimi del campo di induzione magnetica al livello del piano di calpestio sono localizzati in presenza del trasformatore di potenza e lungo il percorso dei conduttori di bassa tensione. Si può dunque affermare che le simulazioni effettuate permettono, con un soddisfacente grado di approssimazione, di identificare la posizione delle sorgenti e il loro contributo.

## 2) DETERMINAZIONE DEL MODELLO DEL TRASFORMATORE ANALIZZATO

Le prove condotte sul trasformatore di piccola potenza sono state effettuate suddividendo il processo di analisi in due parti principali:

- un solo avvolgimento alimentato;
- tre avvolgimenti alimentati (trasformatore alimentato a vuoto).

Le misure condotte sul trasformatore in funzionamento a carico hanno dimostrato che il campo elettromagnetico disperso all'esterno è spesso paragonabile a quello prodotto in condizioni di funzionamento a vuoto; ciò ha quindi permesso di effettuare la caratterizzazione del comportamento elettromagnetico del trasformatore in condizioni di prova a vuoto.

Le linee lungo le quali sono stati effettuati i confronti tra i campioni sperimentali e i risultati delle simulazioni numeriche, L1 ed L2, sono state indicate nella precedente figura 3.

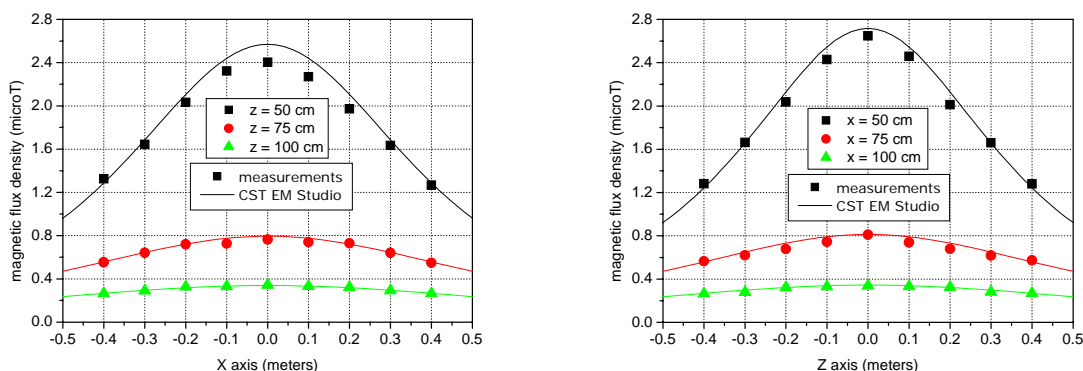
### a) *Un solo avvolgimento alimentato*

In questo caso si è provveduto ad alimentare il solo avvolgimento centrale con una corrente pari a 0.315 A, pari alla corrente magnetizzante del trasformatore in oggetto.

Nelle figure successive, fig. 6 [a] e [b], sono riportati gli andamenti del campo magnetico lungo le linee L1 ed L2 per differenti step  $\Delta x$  e  $\Delta z$ . Il confronto tra i due grafici permette di stabilire la possibilità di utilizzo del software di simulazione elettromagnetica nella valutazione preventiva del campo prodotto nell'ambiente ad esterno a scopo previsionale.

Figura 6 -

[a, sinistra] Distribuzione del campo di induzione lungo la linea L1 con  $\Delta z=0.5$  m,  $\Delta z=0.75$  m,  $\Delta z=1.00$  m;  
 [b, destra] Distribuzione del campo di induzione lungo la linea L2 con  $\Delta x=0.5$  m,  $\Delta x=0.75$  m,  $\Delta x=1.00$  m



### b) Tre avvolgimenti alimentati

La determinazione del campo di induzione magnetica prodotto in queste condizioni di alimentazione non consente la corretta identificazione con i rilievi sperimentali, in quanto la misura delle correnti di fase non permette la conoscenza delle fasi delle correnti che deve invece essere determinata a partire dalle tensioni di alimentazione degli avvolgimenti e dai parametri circuitali del trasformatore in oggetto. L'approccio al problema richiede la determinazione della matrice delle induttanze, che viene valutata attraverso una simulazione di campo.

## F) CONCLUSIONI

L'analisi presentata in questo documento ha consentito la determinazione di un modello del trasformatore di potenza ai fini della caratterizzazione del suo comportamento elettromagnetico per la previsione dell'inquinamento prodotto nell'ambiente esterno. Il componente trasformatore è stato modellizzato attraverso la FIT e i risultati ottenuti sono stati presentati attraverso il confronto con i dati sperimentali.

Sebbene il modello proposto sia stato applicato ad un prototipo di trasformatore di piccola potenza le considerazioni effettuate possono essere estese a trasformatori di ogni taglia analizzati nelle stesse condizioni di funzionamento.

Lo studio affrontato ha quindi permesso di conseguire il duplice obiettivo che ci si era prefissati: da un lato, infatti è stata effettuata una caratterizzazione sperimentale dei livelli di campo prodotti dalle cabine di trasformazione e dall'altro si è reso possibile effettuare una validazione dei programmi di calcolo impiegati sulla base dei casi pratici esaminati. La successiva integrazione con i sistemi di sbarre, con le apparecchiature elettriche ed i loro relativi schermi magnetici potrà inoltre essere effettuata attraverso la stessa procedura e questo rappresenta lo sviluppo e l'attuale impegno della ricerca del settore.

## G) BIBLIOGRAFIA

- [1] Narda Safety Test Solutions, EFC-400 Sistema di calcolo del campo elettrico e magnetico, Telecomunicazioni, linee e centrali elettriche, Manuale utente, Berlin 2003, [www.narda.com](http://www.narda.com)
- [2] CST EM Studio, CST Computer Simulation Technology, "Static and low frequency design and analysis, Advanced Topics", 2002-2003, [www.cst-world.com](http://www.cst-world.com)
- [3] T.A.Weiland, "A discretization method for the solution of Maxwell's equation for six components fields", Electronics and Communication (AEU), Vol. 31, pp.116-120, 1977
- [4] Norma CEI 11-35, "Guida all'esecuzione delle cabine elettriche d'utente", 1996
- [5] R. Bellocchio, "Il Manuale degli Impianti Elettrici, vol. 1, Tecniche Nuove Editrice, 1999
- [6] [www.pmm.it](http://www.pmm.it)
- [7] 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", 2001