



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

FACOLTÀ DI INGEGNERIA  
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA ELETTRICA

**TESI DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTROTECNICA**  
CLASSE 10 INGEGNERIA INDUSTRIALE  
(DM 509/99)

**VALUTAZIONE DELL' ESPOSIZIONE UMANA AI CAMPI  
ELETTROMAGNETICI GENERATI DA CABINE  
ELETTRICHE**

*Relatore: Prof. Roberto Turri*

*Correlatore: Ing. Calogero Collerone*

*Laureando: SIMONE ZULIANI*

ANNO ACCADEMICO 2009 – 2010



*Ai miei genitori*



# Riassunto

Questa Tesi è il resoconto dell'attività di tirocinio svolto presso il Settore Edilizia della Provincia di Padova nel periodo Novembre 2009-Febbraio 2010. Il lavoro riguarda l'analisi dei campi magnetici prodotti da alcune cabine di trasformazione, principalmente MT/bt, situate in edifici di proprietà della Provincia di Padova. In particolare sono state analizzate due cabine all'interno di edifici scolastici superiori e la cabina di trasformazione all'interno della Terza Torre, sede degli uffici della stessa Provincia. La prima fase del tirocinio è stata l'analisi della leggi e dei decreti pertinenti al tema dei campi elettromagnetici; in particolare è stata approfondita la legge quadro 81/08 per l'identificazione delle responsabilità e degli obblighi di cui il responsabile dei lavori è soggetto. Successivamente sono stati analizzati i locali adibiti al contenimento dei componenti elettrici per la trasformazione della tensione attraverso la visione degli schemi elettrici e successivamente mediante sopralluoghi. La valutazione dell'estensione delle linee di campo è stata effettuata partendo da un software, realizzato in MatLab, creato dallo studente Casagrande in una precedente Tesi di laurea e da me ampliato per analizzare in modo completo lo spazio 3D. L'analisi degli impianti si è conclusa stilando per una relazione per ognuno di essi e consegnate successivamente all' Ing. Calogero Collerone.

Per quanto riguarda sviluppi futuri degli argomenti trattati in questo elaborato, si può concentrare l'attenzione sul software di calcolo. Infatti creandogli un'interfaccia grafica (GUI), ottimizzando il codice e infine creandogli una routine per la creazione di resoconti in formato testo, potrebbe risultare uno strumento per l'analisi preliminare dell'induzione magnetica all'interno delle cabine MT/bt.



# Indice

<b>Introduzione .....</b>	<b>1</b>
<b>Capitolo 1 Generalità sui campi elettromagnetici.....</b>	<b>3</b>
1.1.3 Campo elettromagnetico .....	5
1.2 Effetti sulla salute.....	8
1.2.1 L'origine del problema .....	8
1.2.2 “Elettrosmog” e i suoi effetti .....	8
1.2.3 La risposta dell’OMS .....	10
1.2.4 Dimensione del rischio .....	12
1.2.5 Valutazioni conclusive.....	13
1.3 Quadro legislativo .....	14
1.3.1 Generalità.....	14
1.3.2 Raccomandazione UE n.519 1999.....	14
1.3.3 International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) .....	16
1.3.4 Il DPCM 23/4/1992.....	17
1.3.5 Legge 22 febbraio 2001, n. 36 .....	18
1.3.6 Direttiva 2004/40/CE .....	22
1.3.7 D.Lgs. 81/2008.....	23
1.4 Norme e metodi per la riduzione dei campi magnetici prodotti in cabina .....	25
1.4.1 Norme applicabili e strumenti di valutazione .....	25
1.4.2 Metodi per la schermatura del campo magnetico .....	27
1.4.3 Confronto tra schermi magnetici e schermi conduttori.....	28
<b>Capitolo 2 Descrizione dell’attività di tirocinio presso il Settore Edilizia della Provincia di Padova .....</b>	<b>31</b>
2.1 Introduzione .....	31
2.2 Valutazione del rischio.....	32
2.3 Cabina MT/BT presso la Terza Torre (cabina n°1).....	39

2.4	Cabina secondaria 400/230V all'interno del laboratorio di macchine utensili dell'ITIS Marconi (cabina n°2).....	41
2.5	Cabina MT/BT presso l' istituto "Ferrari" (cabina n°3) .....	44
<b>Capitolo 3 Modifica del programma di simulazione .....</b>		<b>47</b>
3.1	Introduzione .....	47
3.2	Inserimento dati e creazione del file dati .....	48
3.3	Definizione della cabina e del suo dominio di calcolo.....	49
3.4	Trasformatori trifase.....	50
3.5	Quadri di media tensione.....	52
3.6	Quadri di bassa tensione.....	53
3.7	Conduttori.....	53
3.8	Ampliamento piani di analisi .....	55
3.9	Analisi del piano XY .....	57
3.10	Analisi su linee d'interesse .....	59
<b>Capitolo 4 Analisi dell'andamento dei campi in alcune cabine MT/BT .....</b>		<b>61</b>
4.1	Introduzione .....	61
4.2	Andamento dell'induzione magnetica all'interno della cabina MT/BT della Terza Torre della Provincia di Padova.....	62
4.2.1	Scopo.....	62
4.2.2	Riferimenti normativi.....	62
4.2.3	Descrizione dell'impianto .....	64
4.2.4	Trasformatore.....	65
4.2.5	Quadro di media tensione .....	67
4.2.6	Quadro di bassa tensione .....	68
4.2.7	Blindosbarre .....	68
4.2.8	Rappresentazione della cabina .....	72
4.2.9	Simulazioni e risultati .....	76
4.2.10	Conclusioni .....	92
4.3	Andamento dell'induzione magnetica all'interno del laboratorio dell'istituto tecnico "Marconi" .....	93
4.3.1	Scopo.....	93

4.3.2	Riferimenti normativi.....	93
4.3.3	Descrizione dell'impianto .....	94
4.3.4	Trasformatore.....	96
4.3.5	Quadro di bassa tensione .....	98
4.3.6	Blindosbarra.....	99
4.3.7	Rappresentazione della cabina.....	99
4.3.8	Simulazioni e risultati .....	102
4.3.9	Conclusioni .....	111
4.4	Andamento dell'induzione magnetica nella cabina MT/BT del nuovo liceo "G.B. Ferrari" di Este.....	112
4.4.1	Scopo.....	112
4.4.2	Riferimenti normativi.....	112
4.4.3	Descrizione dell'impianto .....	113
4.4.4	Trasformatore.....	114
4.4.5	Quadro di media tensione .....	116
4.4.6	Quadro di bassa tensione .....	117
4.4.7	Rappresentazione della cabina.....	119
4.4.8	Simulazioni e risultati .....	121
4.4.9	Conclusioni .....	125
	<b>Conclusioni .....</b>	<b>127</b>
	<b>Ringraziamenti.....</b>	<b>130</b>
	<b>Allegati .....</b>	<b>132</b>
	<b>Bibliografia .....</b>	<b>137</b>
	<b>Sitografia.....</b>	<b>138</b>



# Introduzione

Al naturale livello di fondo elettromagnetico presente sulla terra, (le cui sorgenti principali sono la terra stessa, l'atmosfera ed il sole, che emette radiazione infrarossa, luce visibile e radiazione ultravioletta) si è aggiunto, al passo con il progresso tecnologico, un contributo sostanziale dovuto alle sorgenti legate alle attività umane. L'uso crescente delle nuove tecnologie nel campo delle radiotelecomunicazioni in aree pubbliche come anche nuovi processi produttivi in ambiente industriale, ha infatti portato, negli ultimi decenni, ad un continuo aumento della presenza di sorgenti di campi elettromagnetici, rendendo la problematica dell'esposizione della popolazione e dei lavoratori a tali agenti di sempre maggiore attualità, tanto da essere introdotto il termine "elettrosmog".

Comunemente, con il termine "elettrosmog" si designa il presunto inquinamento elettromagnetico da radiazioni prodotte da emittenti radiofoniche, cavi elettrici percorsi da correnti alternate di forte intensità (come gli elettrodotti), reti per telefonia cellulare, emittitori a bassa potenza e dagli stessi telefoni cellulari. Più in generale da linee e apparati elettrici (50 Hz bassa frequenza) o da impianti di telecomunicazione (alta frequenza). La particolare attenzione nei confronti di questo tema è dovuta alle numerose campagne di sensibilizzazione promosse da parte di coloro che hanno espresso preoccupazione per la salute dei cittadini e dei lavoratori, spesso creando eccessivi, e a volte ingiustificati, allarmismi. Eccessivi ed ingiustificati poiché la valutazione dei potenziali rischi dei campi elettromagnetici è affetta da parecchie incertezze. Diversi studi epidemiologici suggeriscono l'esistenza di deboli correlazioni tra l'esposizione a campi elettromagnetici e patologie nell'uomo. In particolare, gli studi effettuati in campo medico-scientifico hanno avuto ad oggetto le possibili interazioni tra i campi elettromagnetici ed il cancro. Gli studi riguardano, in particolare, i campi EM a frequenza di rete (50 Hz in Europa, 60 Hz in America), indicati come campi ELF (Extremely Low Frequency).

Fino agli inizi degli anni '70 era impensabile che i campi ELF potessero avere qualche implicazione con lo sviluppo dei tumori. In effetti, i campi elettrici a cui si è esposti, in casa o negli ambienti di lavoro, sono molto deboli (in genere non superano qualche

decina di V/m); tuttavia, anche ipotizzando un'esposizione ad un campo elettrico molto intenso (ad esempio un elettrodotto a 380 KV, con altezza minima dal suolo pari a 16 m, produce un campo elettrico di circa 2,5 KV/m ad una distanza di 10 m), il campo elettrico indotto all'interno del corpo viene attenuato di un fattore 108. Si creano, così, campi elettrici interni al corpo che non sono più grandi del campo elettrico generato da alcune cellule. Anche i campi magnetici cui generalmente si è esposti, sono molto deboli; ad esempio il campo magnetico generato da una linea aerea ad alta tensione o da un terminale video è normalmente di pochi decimi di  $\mu\text{T}$  (circa l'1% del campo magnetico terrestre). Valori così piccoli hanno indotto gli scienziati a ritenere sicuri i campi ELF.

I successivi ripensamenti in ordine alle considerazioni appena esposte sono derivati da una serie di studi epidemiologici effettuati negli ultimi decenni. A causa dell'uso esteso dell'energia elettrica, si è soggetti all'esposizione ai campi ELF praticamente in ogni luogo (lavoro, casa, scuola, etc.), per cui la ricerca epidemiologica, invece che studiare esposizioni occasionali a campi ELF, come aveva fatto in precedenza, si è incentrata soprattutto su possibili effetti dovuti ad esposizioni prolungate.

Stante ciò, di fronte all'incertezza scientifica si è preferito adottare, a livello legislativo, un "approccio cautelativo" nella gestione dei rischi sanitari. Pertanto, nella dichiarazione firmata a Londra durante la "Terza Conferenza Ministeriale su Ambiente e Salute" nel 1999, l'Organizzazione Mondiale della Sanità è stata incoraggiata a tenere in considerazione "la necessità di applicare rigorosamente il principio di precauzione nella valutazione dei rischi e di adottare maggiori iniziative ed un approccio più preventivo nei confronti di potenziali danni alla salute". A questo scopo sono nate diverse direttive e leggi in ambito europeo in cui ogni stato membro ha potuto decidere il percorso legislativo da seguire in relazione alle direttive introdotte dall'Unione Europea.

La più importante novità introdotta dal testo normativo in oggetto è la previsione. Per la prima volta sono introdotti veri e propri obblighi a carico dei datori di lavoro, che sono considerati diretti responsabili della corretta applicazione delle regole ivi stabilite, obblighi da rispettare sia per impianti già in esercizio, sia su impianti in fase di realizzazione o progettazione. Il datore di lavoro dovrà, inoltre, prendere in considerazione anche la possibilità di rischi indiretti per la salute.

Talvolta conseguire un livello di emissioni ridotte non significa un esborso elevato di denaro perché la riduzione dei campi, soprattutto a frequenza industriale, è spesso realizzabile attraverso l'adozione di facili accorgimenti, ad esempio nella disposizione dei componenti elettrici.

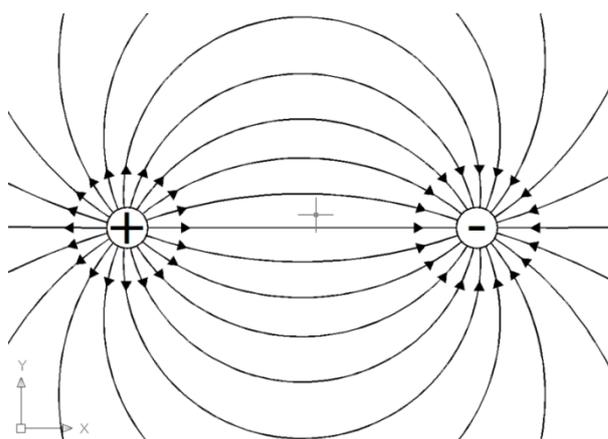
# Capitolo 1

## Generalità sui campi elettromagnetici

### 1.1 Definizioni

#### 1.1.1 Campo elettrico

Se vi sono due corpi dotati di carica elettrica non nulla nasce una forza con la quale si attraggono. Questa forza è una grandezza vettoriale, avrà quindi un modulo, una direzione



e un verso. Misurata in Culomb, tale forza ha la direzione dell'asse tra le due forze e il verso dipende dalle cariche. Se le cariche sono concordi la forza sarà di repulsione, se discordi allora sarà attrattiva. Se consideriamo due cariche, una delle quali diamo il nome di carica generatrice di campo, esercitano una

sull'altra una forza elettrica. Si genererà un campo elettrico prodotto dalla carica

generatrice, e tale campo è l'insieme dei

vettori che rappresentano la forza sull'altra carica, che chiamiamo carica di prova. Quindi anche il campo è una grandezza vettoriale con modulo pari a:

$$E = \frac{F}{q_0}$$

direzione pari all'asse passante per la carica generatrice e verso dipendente dalla polarità della carica: entrante se la carica è positiva, uscente nel rimanete caso. Il campo è rappresentato attraverso linee (ortogonali in ogni punto dello spazio alle superfici equipotenziali), che sono più fitte intorno alla carica e si diradano all'aumentare della distanza. Visto che il campo elettrico è il gradiente del potenziale:

$$E_0 = -gradV_0 = -\nabla V_0$$

il potenziale è rappresentato attraverso un campo scalare caratterizzato da linee di livello a potenziale costante (dette per questo motivo superfici equipotenziali) perpendicolari alle linee di flusso del campo elettrico per definizione.

Tenendo conto che il campo elettrico in vicinanza di oggetti conduttori (persone incluse) viene generalmente perturbato dagli oggetti stessi, per caratterizzare le condizioni di esposizione si usa il valore del “campo elettrico imperturbato” (cioè il valore del campo che esisterebbe in assenza di oggetti e persone). Dato che le perturbazioni del campo sono estremamente complesse da valutare, è possibile individuare soluzioni analitiche semplici per il calcolo del campo elettrico imperturbato. Si usa il principio delle cariche equivalenti semplificato, trascurando cioè la reale distribuzione di carica sulla superficie del conduttore e supponendo che essa sia concentrata al centro del conduttore medesimo con densità di carica costante. Per la determinazione delle cariche presenti sui diversi conduttori (ovvero della densità lineare di carica) ci si avvale del principio delle immagini, secondo il quale il piano equipotenziale (terreno o pavimento) può essere simulato con una configurazione di cariche di segno opposto a quelle che generano il campo e disposte in posizione speculare rispetto al piano stesso.

### 1.1.2 Campo magnetico

Se le cariche sono in moto nello spazio viene generato un campo magnetico. Esso è quella grandezza fisica che permette di descrivere la variazione della proprietà dello spazio causata dalla presenza di una distribuzione di corrente elettrica. Qualsiasi carica in moto immessa nel capo sentirà una perturbazione manifestata sotto forma di forza. Quando gli elettroni si muovono, ad esempio attraverso un filo conduttore, una certa quantità di carica viene trasportata da un'estremità all'altra del filo; nasce quindi una corrente elettrica la cui intensità è definita come la quantità di carica  $Q$  (misurata in Coulomb) che attraversa la sezione del conduttore nell'unità di tempo  $t$  (misurata in secondi):

$$I = \frac{Q}{t}$$

L'intensità di corrente  $I$  si misura in Ampère (A):  $1 \text{ A} = 1 \text{ coulomb/sec}$ .

Il calcolo dell'induzione magnetica risulta più semplice rispetto a quello del campo elettrico e si ricorre alla legge di Biot – Savart che esprime in un generico punto dello spazio il valore dell'induzione magnetica  $B$  generata da un conduttore rettilineo percorso da una corrente  $I$  attraverso la formula:

$$\bar{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi d} \bar{u}_i \times \bar{u}_r$$

dove  $d$  è la distanza tra il conduttore ed il punto di calcolo; i versore  $u_i$  e  $u_r$  indicano il verso della corrente e della relativa normale. È possibile conoscere il verso del campo grazie alla regola della mano destra.

È difficile invece realizzare un modello per i materiali ferromagnetici perché essi distorcono il campo e si complicherebbe ulteriormente se si utilizzassero geometrie complesse. Esistono in commercio strumenti per la misurazione del campo magnetico, costituite da sonde, con una bobina di filo elettricamente schermato, in combinazione con un voltmetro che rileva la f.e.m. indotta dalla componente di campo ortogonale alla sonda. Per risalire al valore efficace di campo servono tre misure lungo tre orientamenti ortogonali. I misuratori di campo magnetico triassiali forniscono direttamente il valore efficace del campo, e possono essere commutati o sintonizzati in modo da indicare i valori efficaci della componente a frequenza industriale e di una o più componenti armoniche del campo. Per caratterizzare le componenti armoniche del segnale nel circuito del rivelatore viene inserito uno stadio integratore (attivo o passivo) in modo da conservare la forma d'onda del campo magnetico. Per misure a lungo termine è più adatto uno strumento che registri le letture in un sistema di immagazzinamento dati a intervalli di tempo prefissati.

### *1.1.3 Campo elettromagnetico*

Una variazione di campo elettrico genera un campo magnetico. Le oscillazioni del campo elettrico, e quindi anche del campo magnetico, si propagano dall'elettrone generando le onde elettromagnetiche. Un secondo elettrone, che si trovi ad una certa distanza dal primo, comincerà ad oscillare non appena investito dall'onda elettromagnetica prodotta dal primo elettrone. Anche il campo elettrico del secondo elettrone, allora, verrà perturbato dalle sue oscillazioni e genererà a sua volta un campo magnetico, consentendo così la propagazione dell'onda stessa. Le dimensioni di un'onda, cioè l'ampiezza, danno una misura dell'intensità dell'onda elettromagnetica, ovvero dell'energia del campo elettromagnetico da essa trasportata. La radiazione è, dunque, composta da onde elettromagnetiche, consistenti, cioè, nell'oscillazione concertata di un campo elettrico e di un campo magnetico. Queste onde si propagano in direzione ortogonale a quella di oscillazione. Un'onda elettromagnetica viene emessa ogni volta che una particella carica subisce un'accelerazione a causa di una qualche forza. Poiché gli elettroni hanno una

massa minore di circa duemila volte rispetto alla massa dei protoni, vengono accelerati molto più facilmente, producendo così tale onda. Se l'elettrone si muove di moto uniforme, si "trascina" dietro il proprio campo elettrico (e quello magnetico) e non emette radiazione, ma, se subisce una brusca frenata, il campo elettromagnetico inizia ad oscillare e prosegue sotto forma di onda. La radiazione, dunque, dipende dall'accelerazione e non dalla velocità dell'elettrone. E' importante sottolineare che a differenza del suono (meglio, delle onde elastiche), le onde elettromagnetiche non hanno bisogno della necessaria presenza di alcun mezzo (cioè di un qualsiasi materiale in grado di trasmettere la radiazione elettromagnetica) per potersi propagare e, pertanto, possono viaggiare anche nel vuoto. Immaginando di "fotografare" un'onda elettromagnetica, si osserverebbe il profilo ondulatorio dei campi E e H, la loro reciproca perpendicolarità (angolo di  $90^\circ$ ) e che sono entrambi perpendicolari alla direzione di propagazione dell'onda. In altre parole le onde elettromagnetiche sono onde trasversali. Questa caratteristica accomuna tutte le onde elettromagnetiche, il cui spettro è piuttosto ampio. La luce è un particolare sottoinsieme delle onde elettromagnetiche, quelle in grado di essere elaborate dai nostri occhi, cioè viste. Il fatto che la stragrande maggioranza delle onde elettromagnetiche hanno una lunghezza d'onda ( $\lambda$ ) esterna alla fascia del visibile, non implica affatto che esse non esistano. A volte è possibile percepire (come sensazione non come luce) certe onde elettromagnetiche al di fuori dell'intervallo di visibilità, come per esempio una piccola parte delle onde elettromagnetiche nell'infrarosso (calore).

Per il resto si deve ricorrere a dispositivi appositamente costruiti per elaborare e/o funzionare con determinate porzioni dello spettro delle onde elettromagnetiche che in ogni caso i nostri occhi non sono in grado di percepire. Di norma i campi E e H, pur mantenendo sempre la reciproca perpendicolarità, presentano una direzione (sul piano perpendicolare a quello di propagazione) variabile nel tempo in modo casuale, cioè senza una regola. Tali sono per esempio le onde elettromagnetiche prodotte da una lampada ad incandescenza. Tuttavia vi possono essere particolari onde elettromagnetiche in cui è presente una regola circa l'orientazione del campo E (e quindi anche del campo H). Queste onde si dicono polarizzate e il fenomeno fisico è detto polarizzazione delle onde elettromagnetiche.

A seconda delle caratteristiche della sorgente e del tipo di frequenza alla quale questa emette, lo spazio circostante irradiato può essere suddiviso in due zone di campo, la cui distinzione si basa sull'approssimazione matematica che viene fatta nello studiare le onde che sono presenti in esse:

- la regione di campo vicino, dove l'onda viene studiata come se fosse un'onda sferica;
- la regione di campo lontano, dove l'onda viene studiata come se fosse un'onda piana.

Il confine tra zona di campo vicino e zona di campo lontano non è netto ma è convenzionalmente assunto come il valore massimo tra le quantità  $\lambda$  e  $d^2/\lambda$ , dove  $\lambda$  è la lunghezza d'onda della radiazione considerata e  $d$  è la dimensione lineare massima della sorgente. Nella regione di campo vicino, non si ha presenza di un campo elettromagnetico propriamente detto, ma c'è la presenza di un campo elettrico e un campo magnetico indipendenti e non correlati l'uno dall'altro; estremizzando potrebbe esserci la presenza di uno ma non dell'altro. La misura o la loro valutazione deve essere effettuata con strumenti o criteri di calcolo diversi. Nella regione di campo lontano, invece, si può parlare di onda elettromagnetica in quanto le due entità sono legate l'una all'altra nel senso che non si può avere propagazione di una senza che vi sia accompagnata anche l'altra; anche in fase di calcolo è sufficiente valutare una delle due grandezze per ottenere, secondo relazioni di proporzionalità, anche l'altra ( $E=377 \cdot H$ ). Uno diventa la sorgente dell'altro e non è possibile scindere la componente elettrica da quella magnetica; le direzioni spaziali di  $E$  e  $H$  sono ortogonali tra di loro, e ortogonali alla direzione di propagazione. Nel campo delle frequenze estremamente basse, nel quale ricadono le problematiche di inquinamento elettromagnetico generato da strutture dedicate alla gestione dell'energia, ci si trova sempre in regione di campo vicino. Ovvero il campo magnetico ed elettrico sono assolutamente indipendenti. Nella *Figura 1.2* vengono rappresentate le lunghezze d'onda dei campi elettromagnetici e i dispositivi correlati.

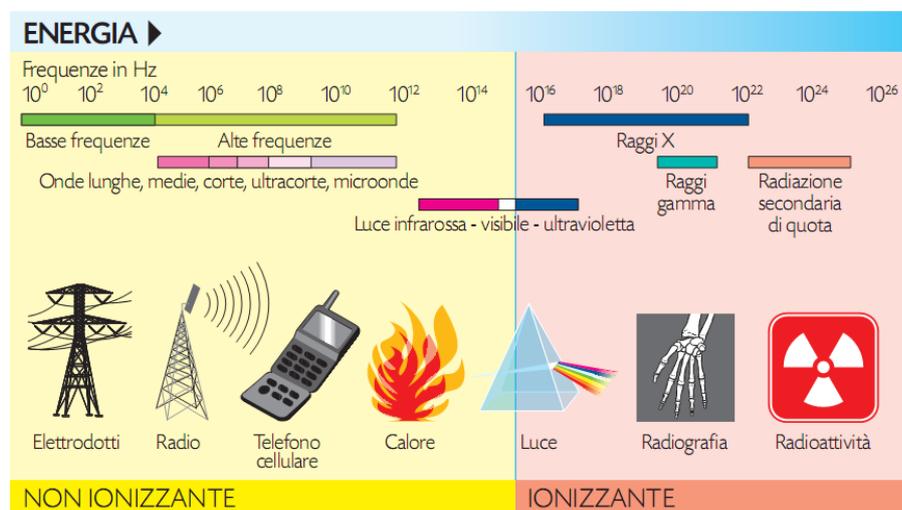


Figura 1.2: Lunghezze d'onda delle onde elettromagnetiche

## 1.2 Effetti sulla salute

### 1.2.1 L'origine del problema

Una trattazione del problema della quantificazione e della protezione dai campi elettromagnetici ha una ragione di esistere solo se dietro ad essa ci sono delle basi in cui si identifica una relazione con la salute dell'uomo, tale da mettere in atto da prima valutazioni e poi ricerche per capire a fondo il fenomeno.

Nel nostro caso tutto deriva dal fatto che nel 1979 a Denver (Colorado, USA) un'epidemiologa (N. Wertheimer) segnalò un aumento nel numero di tumori infantili (leucemie e tumori cerebrali) in bambini che vivevano vicino a sistemi elettrici. Da questa osservazione un fisico (E. Leeper) suggerì che il responsabile dell'aumento osservato fosse il campo magnetico.

### 1.2.2 "Elettrosmog" e i suoi effetti

Dall'ipotesi di una correlazione fra effetti nocivi della salute umana e i campi magnetici nacquero diversi studi, ma soprattutto vennero introdotti i termini "inquinamento elettromagnetico" ed "elettrosmog", creando così nei paesi più industrializzati una sensibilizzazione dai parte dei cittadini sugli effetti nocivi di tutte le apparecchiature elettriche, elettroniche e di comunicazione di cui erano e siamo circondati.

Ma i termini "inquinamento elettromagnetico" o "elettrosmog" non sono scientificamente corretti poiché:

- Danno una connotazione negativa a priori;
- Considerano tutti i campi alla stessa stregua.

Le onde elettromagnetiche possono produrre effetti biologici che talvolta, ma non sempre, possono portare ad effetti di danno alla salute. E' importante comprendere la differenza tra i due effetti:

Un effetto biologico si verifica quando l'esposizione provoca qualche variazione fisiologica notevole o rilevabile in un sistema biologico.

Un effetto di danno alla salute si verifica quando l'effetto biologico è al di fuori dell'intervallo in cui l'organismo può normalmente compensarlo, e ciò porta a qualche condizione di detrimento della salute.

L'effetto biologico delle onde elettromagnetiche dipende essenzialmente dalla loro intensità e dalla loro frequenza. Di conseguenza lo spettro elettromagnetico può essere suddiviso in due tipologie principali: le radiazioni ionizzanti (per esempio i raggi X e

gamma) e quelle non ionizzanti, come le onde radio e le microonde. La linea di demarcazione tra i due tipi di radiazione si colloca all'interno delle frequenze dell'ultravioletto, sicché le radiazioni infrarosse e parte dell'ultravioletto rientrano nelle radiazioni non ionizzanti, mentre la componente superiore della radiazione ultravioletta fa già parte di quelle ionizzanti. Fra i due tipi di radiazione c'è una differenza fondamentale. Esse si differenziano fra loro per la diversa capacità che hanno di interagire con gli atomi e le molecole che compongono la materia.

**Radiazioni ionizzanti:** sulla base delle loro caratteristiche di ionizzare (staccare dalla loro struttura singoli elettroni), possono rompere dei legami chimici di molecole del nostro corpo o creare in esso sostanze particolarmente reattive, che a loro volta possono causare danni rilevanti al sistema biologico, ed è infatti risaputo che anche piccole dosi di raggi ultravioletti o radiazioni ionizzanti (radioattività) possono determinare patologie anche molto gravi, come tumori e leucemie.

**Radiazioni non ionizzanti:** le radiazioni non ionizzanti, invece, anche in presenza d'intensità di campo assai elevate non sono in grado di ionizzare (staccare dalla loro struttura singoli elettroni) le molecole di cui è costituito il nostro corpo. Il principale effetto che riescono a produrre sulle molecole è quello di farle oscillare producendo attrito e di conseguenza calore (come accade ad esempio in un forno a microonde): il riscaldamento è proprio l'effetto principale delle radiazioni non ionizzanti.

Anche nell'ambito delle radiazioni non ionizzanti l'effetto biologico dipende molto dalla loro frequenza, sicché anche per questo tipo di onde si è soliti adottare un'ulteriore differenziazione in:

**Frequenza estremamente bassa (ELF):** i campi (elettrici e magnetici) a frequenza estremamente bassa, si formano prevalentemente in corrispondenza di apparecchiature o cavi elettrici in ambienti domestici o lavorativi, oppure a ridosso delle linee ad alta tensione o dei trasformatori. Per le ELF il campo elettrico ed il campo magnetico possono essere considerati separatamente. Il fattore determinante è però il campo magnetico, che a differenza del campo elettrico è assai più difficile da schermare. L'effetto biologico principale dei campi a bassa frequenza è di produrre all'interno del nostro organismo (per la cosiddetta induzione) delle correnti elettriche che si possono sovrapporre a quelle naturali, dando vita, soprattutto in presenza di elevate intensità di campo, a sovraccitazioni nervose e muscolari (azione irritativa sul sistema nervoso centrale). Si parla anche di una possibile correlazione tra i campi a bassa frequenza ed alcuni casi di leucemia infantile insorti in bambini residenti in prossimità di linee ad alta tensione.

**Radiofrequenze e microonde:** i campi a radiofrequenza e microonde (RF), vengono utilizzati soprattutto nelle telecomunicazioni, per esempio nei trasmettitori, nella telefonia mobile o anche a livello domestico nei forni a microonde. Per l'alta frequenza il campo elettrico e magnetico sono un fenomeno unico, interdipendente, denominato campo elettromagnetico. Esso è relativamente facile da schermare (per esempio coi muri degli edifici, i tetti di lamiera o le tappezzerie a conduzione elettrica). Alle alte frequenze, soprattutto in presenza di elevate intensità di campo, predominano gli effetti cosiddetti termici, ossia il riscaldamento dei tessuti corporei dovuto all'assorbimento delle radiazioni.

E' importante distinguere in che modo interagiscono questi effetti biologici sulla salute e se i campi elettromagnetici sono realmente responsabili. Nel nostro caso sono state fatte delle ricerche in ambito internazionale ed hanno portato in sintesi a questi risultati:

Effetti acuti	————→	<b>accertati</b>
Effetti a lungo termine	————→	<b>ipotizzati</b>
Effetti soggettivi	————→	<b>questionabili</b>

Se la questione sugli effetti acuti è accertata, e quindi è possibile trasferire chiaramente il problema in sede legislativo e normativo per la protezione dei cittadini e dei lavoratori, diversa invece è la questione degli effetti a lungo termine.

È stato ipotizzato infatti che l'esposizione cronica a livelli di esposizione inferiori alle soglie identificate per gli effetti acuti possa causare patologie degenerative a lungo termine, ed in particolare il cancro.

Le indicazioni positive provengono più da studi basati su indicatori indiretti (come ad esempio la distanza delle abitazioni dalla sorgente) che da studi che fanno uso di misure sperimentali del campo. Le indicazioni suggeriscono:

- Nessun effetto biologico stabilito al di sotto di 100  $\mu$ T
- Prove statistiche di aumenti al di sopra di 0.2  $\mu$ T

### *1.2.3 La risposta dell'OMS*

Nel 1996, l'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) ha avviato il Progetto internazionale Campi elettromagnetici (CEM) per analizzare i problemi sanitari associati all'esposizione a campi elettromagnetici. Nel progetto CEM sono attualmente in corso revisioni critiche dei risultati della ricerca e valutazioni dei rischi connessi all'esposizione

a campi elettrici e magnetici statici e a frequenza estremamente bassa (ELF = extremely low frequency).

Basandosi sugli studi scientifici disponibili nel 2005, l'Organizzazione mondiale della sanità (OMS) ha classificato, nel 2007, i campi magnetici a bassa frequenza come "possibili cancerogeni per l'uomo". Nella scala di valutazione dell'OMS, tale classificazione corrisponde al livello di pericolosità più basso. Di seguito sono riportate le diverse classificazioni standardizzate della IARC, l'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro che è un'istituzione specialistica dell'OMS:

- 1** L'agente è cancerogeno per l'uomo
- 2A** L'agente è probabilmente cancerogeno per l'uomo
- 2B** L'agente è possibilmente cancerogeno per l'uomo
- 3** L'agente non è classificabile per quanto riguarda la cancerogenesi nell'uomo
- 4** L'agente è probabilmente non cancerogeno per l'uomo

Dal 2005 sono stati pubblicati numerosi nuovi contributi scientifici su questo tema: studi epidemiologici su popolazioni a diverso grado di esposizione nonché risultati di esperimenti su animali e colture cellulari. Il nuovo rapporto dell'UFAM (Ufficio Federale dell'Ambiente) riassume e analizza i risultati pubblicati entro l'agosto del 2008.

Per informazione e valutazione delle sostanze e dei fenomeni facenti parte del gruppo 2B, in cui rientrano i campi elettromagnetici, rientrano sostanze come caffeina ed atrazina.

Il sospetto di un rischio di leucemia più elevato nei bambini esposti a campi magnetici all'interno dell'abitazione superiori a 0,3 - 0,4  $\mu$ T continua a sussistere. Infatti in analisi dei dati aggregati di diversi studi epidemiologici hanno fornito indicazioni che sono state cruciali nella valutazione della IARC (International Agency for Research on Cancer). Questi studi suggeriscono che, in una popolazione esposta a campi magnetici mediamente superiori a 0,3 - 0,4  $\mu$ T, si possa sviluppare un numero doppio di casi di leucemia infantile rispetto ad una popolazione con esposizione inferiore. Nonostante la gran mole di dati, rimane ancora incerto se l'aumento dell'incidenza di leucemie sia dovuto all'esposizione ai campi magnetici o a qualche altro fattore.

La leucemia è una malattia rara. Attualmente, essa viene diagnosticata ogni anno a 4 bambini su 100.000 di età compresa tra 0 e 14 anni. Anche un'esposizione media al di sopra di 0,3 - 0,4  $\mu$ T nelle abitazioni è rara. Dai risultati degli studi epidemiologici si può stimare che meno dell'1% della popolazione sia esposta a questi livelli laddove si utilizza energia elettrica a 240 V, anche se questo numero potrebbe essere più alto dove si utilizza la tensione di 120 V.

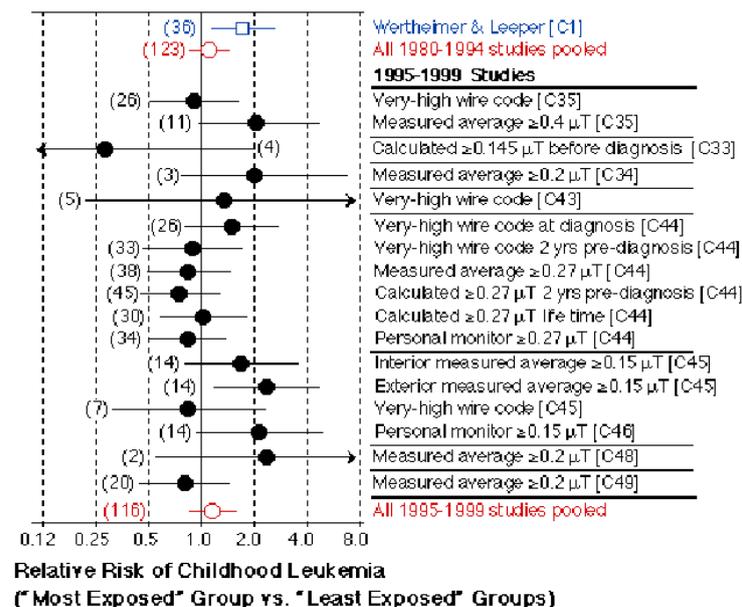


Figura 1.3: Confronto tra gruppi maggiormente esposti ai campi elettromagnetici e gruppi meno esposti.

magnetici, mentre da esperimenti su colture cellulari è emerso che i campi magnetici a bassa frequenza possono intensificare l'effetto di sostanze cancerogene note. Non è noto alcun meccanismo plausibile che possa spiegare questi risultati. Complessivamente la valutazione dell'OMS secondo la quale i campi magnetici a bassa frequenza sono "possibili cancerogeni per l'uomo" è confermata dai nuovi risultati.

I risultati di numerosi esperimenti su animali e studi di laboratorio che hanno esaminato gli effetti biologici dei campi magnetici non hanno prodotto nessuna evidenza a sostegno di un ruolo eziologico dei campi magnetici nello sviluppo della leucemia. Quattro esperimenti protratti per l'intera vita di animali non hanno fornito nessuna evidenza che i campi magnetici, anche a livelli di esposizione di 2000  $\mu\text{T}$ , siano coinvolti nello sviluppo di tumori linfopoietici. Diversi esperimenti su roditori, progettati per rilevare effetti di promozione di leucemie o linfomi da parte dei campi magnetici, sono stati anch'essi uniformemente negativi. Non c'è nessun risultato di laboratorio riproducibile che dimostri effetti biologici dei campi magnetici al di sotto di 100  $\mu\text{T}$ .

### 1.2.4 Dimensione del rischio

In assenza di particolari effetti dei campi magnetici, 2 dei 500 casi di leucemia infantile all'anno sarebbero associati ad un'esposizione di 0.4  $\mu\text{T}$  o più; se ci fosse un effetto dei campi magnetici, si potrebbero produrre 2 casi in più, e 1 caso ogni 2 anni sarebbe forse dovuto alla vicinanza ad elettrodotti. Ciò comporterebbe un aumento del rischio annuo di

Per tutti gli altri tipi di cancro nei bambini e per tutte le forme di tumore negli adulti i risultati degli studi non consentono di fare affermazioni fondate. Questo vale anche per le persone esposte a forti campi magnetici sul posto di lavoro. Negli esperimenti sugli animali non è stata finora

osservata l'insorgenza di tumori indotti dai campi

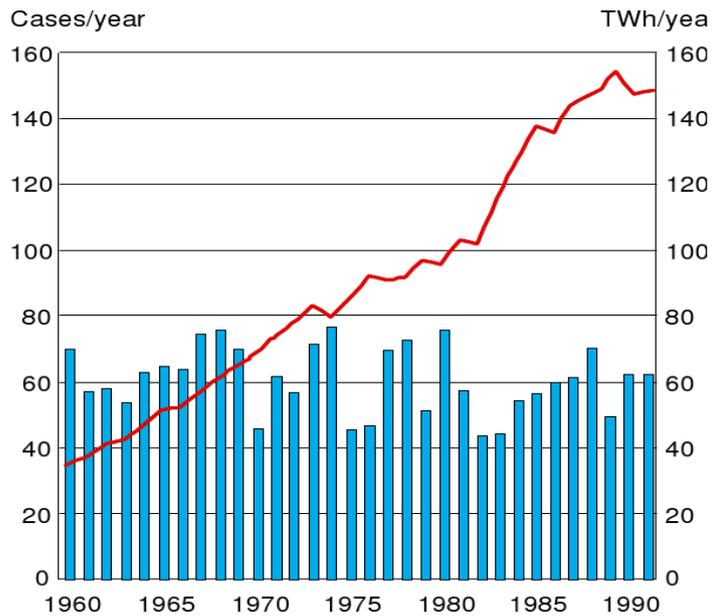


Figura 1.4: Casi di leucemia in relazione all'aumento dell'energia prodotta dalla Svezia

leucemia infantile da circa 1 caso su 20.000 ad 1 su 10.000, e corrisponderebbe a un aumento del rischio complessivo nell'età fino a 15 anni da 1 su 1.400 a 1 su 700, per lo 0.5% dei bambini molto esposti. La figura 1.4 mostra che non vi è un'apparente correlazione fra aumento dell'energia prodotta in uno Stato (in questo caso la Svezia) e il numero dei casi di leucemia.

### 1.2.5 Valutazioni conclusive

E' noto che i campi ELF interagiscono con i tessuti viventi inducendo al loro interno campi e correnti elettriche. Questo è l'unico meccanismo di azione accertato per questi campi. Comunque, l'intensità delle correnti indotte dai campi ELF ai livelli comunemente riscontrati nel nostro ambiente è di solito molto inferiore alle massime correnti che si sviluppano naturalmente nel corpo, come quelle che controllano il battito cardiaco.

A partire dal 1979, quando gli studi epidemiologici sollevarono per la prima volta il problema della relazione tra campi magnetici a frequenza industriale e tumori infantili, sono stati condotti un gran numero di studi per stabilire se l'esposizione ai campi ELF potesse influenzare lo sviluppo del cancro, ed in particolare della leucemia infantile. Non c'è nessuna evidenza convincente che l'esposizione ai campi ELF che sperimentiamo nei nostri ambienti di vita provochi un danno diretto alle molecole biologiche, compreso il DNA. Poiché non sembra verosimile che l'esposizione a campi ELF possa iniziare un processo cancerogeno, sono state condotte numerose ricerche per stabilire se non possa invece influenzare la promozione o la co-promozione del cancro. I risultati degli studi su animali condotti fino ad oggi suggeriscono che i campi ELF non siano né iniziatori né promotori del cancro. Una classificazione dei campi magnetici ELF come possibilmente

cancerogeni è stata effettuata, ma rimane la possibilità che esistano altre spiegazioni per l'associazione osservata tra campi magnetici ELF e leucemia infantile.

### **1.3 Quadro legislativo**

#### *1.3.1 Generalità*

Da quando ci si è posti il problema dei rischi derivanti dai campi magnetici ed elettrici si è attuato un complesso fenomeno di ricerca in vari settori elettrici, suddivisibili principalmente per le frequenze in gioco, che hanno portato diverse visioni del problema stesso e quindi di come affrontare il problema in ambito legislativo e normativo. Probabilmente la questione è stata innescata dalle notevoli dimensioni a cui possono arrivare gli impianti e che nell'immaginario collettivo sono sede di problematiche igienico - sanitarie. La valutazione degli effetti del campo elettromagnetico sull'uomo non è competenza del tecnico elettrico ma di chi si occupa della ricerca biologica ed epidemiologica. Questo però non esclude dal compito di valutare se gli impianti rientrano in eventuali limiti stabiliti da leggi ed eventuale studio e correzione impiantistica se questi limiti vengono superati. Solo qualche anno fa, nel nostro Paese, si è riusciti in ambito legislativo ad arrivare a un comune accordo. In precedenza le province potevano adottare linee guida differenti più o meno restrittive. Di seguito si cercherà di fare un quadro generale su come si arrivati oggi alla regolamentazione del fenomeno campi elettromagnetici partendo dalle direttive proposte a livello di comunità europea, la prima a sensibilizzare i diversi Stati membri del problema suddetto.

#### *1.3.2 Raccomandazione UE n.519 1999*

Questa raccomandazione fa capo a tutte le leggi che hanno interessato gli stati membri. Essendo solo una raccomandazione non pone nessun genere di limiti, ma cerca di dare un'idea sui valori dei campi che potrebbero alterare le condizioni fisiche dell'uomo. Invita gli Stati membri a considerare sia i rischi che i benefici nel decidere se sia necessaria o meno un'azione nell'adottare provvedimenti relativi all'esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici. Inoltre allo scopo di migliorare la comprensione dei rischi e la protezione dall'esposizione ai campi elettromagnetici, i Paesi membri devono dare appropriate informazioni alla popolazione sulle conseguenze per la salute e sui provvedimenti adottati per ovviare ad esse. Completa, inoltre, le linee guida ICNIRP (Commissione internazionale per la protezione dalle radiazioni non ionizzanti) e ne è

sostanzialmente allineata ed è rivolta solo alla protezione della popolazione tralasciando i casi dei lavoratori. Precisa sostanzialmente dove le indicazioni fornite dall'ICNIRP vanno applicate, come ad esempio dove vi sia una reale esposizione significativa del pubblico ai campi.

La raccomandazione introduce due tipi di limiti al fine di applicare delle limitazioni basate sulla valutazione dei possibili effetti sulla salute. Dal testo si esprimono:

**Limiti di base.** *Sono le limitazioni all'esposizione ai campi elettrici magnetici ed elettromagnetici variabili nel tempo, che si fondano direttamente su effetti accertati sulla salute e su considerazioni di ordine biologico;*

**Livelli di riferimento.** *Questi livelli sono indicati a fini pratici di valutazione dell'esposizione in modo da determinare se siano probabili eventuali superamenti dei limiti di base.*

I limiti di base e i livelli di riferimento per limitare l'esposizione sono stati elaborati sulla scorta di un approfondito esame di tutta la letteratura scientifica pubblicata negli anni antecedenti alla raccomandazione. I primi sono stati suddivisi a seconda della frequenza e danno dei limiti a grandezze fisiche in gioco. Dal testo:

- fra 0 e 1 Hz sono stati definiti limiti di base per l'induzione magnetica relativamente ai campi magnetici statici (0 Hz) e per l'intensità di corrente relativamente ai campi variabili nel tempo fino a 1 Hz, al fine di evitarne effetti sul sistema cardiovascolare e sul sistema nervoso centrale,

- fra 1 Hz e 10 MHz sono stati definiti limiti di base per l'intensità di corrente, in modo da evitare effetti sulle funzioni del sistema nervoso,

- fra 100 kHz e 10 GHz sono stati definiti limiti di base per il SAR (velocità di assorbimento specifico in W/kg), in modo da evitare lo stress da calore su tutto il corpo e l'eccessivo riscaldamento localizzato dei tessuti.

- fra 100 kHz e 10 MHz, i limiti di base previsti si riferiscono sia all'intensità di corrente che al SAR,

- fra 10 GHz e 300 GHz sono stati definiti limiti di base per la densità di potenza al fine di evitare il riscaldamento dei tessuti della superficie del corpo o in prossimità della stessa.

I livelli di riferimento raccomandati garantiscono il rispetto dei limiti di base. Se il valore delle grandezze misurate supera i livelli di riferimento (5kV/m per il campo elettrico e 100  $\mu$ T per l'induzione magnetica a 50 Hz), non ne consegue necessariamente che i limiti di base siano superati. I livelli di riferimento volti a limitare l'esposizione vennero ottenuti

dai limiti di base nella situazione di massimo accoppiamento fra campo e individuo esposto e perciò forniscono la massima protezione. La raccomandazione precisa inoltre che quando si verificano esposizioni simultanee a campi di frequenza diversa, si deve considerare la possibilità che i loro effetti si sommino.

### *1.3.3 International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP)*

Nel 1990 questa organizzazione raccomandò dei limiti che vennero recepiti in tutto il mondo e anche in Italia nel 1992. Tali limiti erano di 5 kV/m per il campo elettrico e di 100  $\mu$ T per l'induzione magnetica, applicabili in tutti quei luoghi in cui si riteneva possibile una presenza di persona per una buona parte della giornata. Per tutti i restanti luoghi i limiti erano ben più alti, rispettivamente di 10 kV/m e di 1000  $\mu$ T. Nel 1998 l'ICNIRP emanò delle tabelle in cui si differenziava il caso fra l'esposizione dei lavoratori e l'esposizione della popolazione. In base alla frequenza si esprimevano i limiti per il campo elettrico, campo magnetico e densità di potenza.

Nel 2004 le linee guida ampliarono il tema riguardante i campi elettromagnetici anche ai campi statici prodotti da nuove tecnologie, come i treni a levitazione magnetica e la strumentazione ospedaliera. Intensi campi magnetici statici sono prodotti anche nelle tecnologie delle alte energie, come reattori termonucleari, sistemi magnetoidrodinamici e generatori superconduttivi. Altre attività industriali dove si verificano esposizioni a campi magnetici intensi sono quelle che coinvolgono processi elettrolitici. Dopo avere analizzato tutta la letteratura scientifica disponibile in materia, all'ICNIRP, all'atto di elaborare le linee guida si sono posti due difficili problemi:

- in primo luogo se, e in quale misura, le linee guida debbano consentire la possibilità che, in alcuni lavoratori esposti, si manifestino effetti sensoriali temporanei, senza conseguenze note a lungo termine o patologiche;
- in secondo luogo, quanto le restrizioni debbano proibire livelli di esposizione superiori a quelli a cui arrivano le esperienze sull'uomo e per i quali quindi non vi siano effetti nocivi noti, ma interrogativi dovuti alla mancanza di conoscenze.

Riguardo al primo problema l'ICNIRP ritiene che esistano situazioni professionali in cui, con adeguata informazione e addestramento, è ragionevole che i lavoratori accettino volontariamente e consapevolmente la possibilità del verificarsi di effetti sensoriali

transitori come la nausea, perché non si ritiene che questi portino a effetti sanitari a lungo termine o patologici.

Riguardo al secondo aspetto, l'ICNIRP ritiene che le esposizioni consentite dalle linee guida debbano basarsi su livelli per i quali vi sia un'evidenza apprezzabile sull'uomo e che non si dovrebbe andare oltre questi semplicemente per mancanza di evidenze di effetti nocivi. Quindi, nel caso di esposizioni professionali le linee guida fissano i seguenti limiti:

- si raccomanda che l'esposizione professionale della testa e del tronco non superi un valore di picco spaziale dell'induzione magnetica pari a 2 T;
- per attività lavorative per cui si rendano necessarie esposizioni al di sopra di 2 T, si possono consentire esposizioni fino a 8 T se l'ambiente è controllato e se vengono messe in atto adeguate procedure di lavoro che controllino gli effetti indotti dal movimento.

Gli effetti sensoriali dovuti al movimento all'interno del campo possono essere evitati rispettando le restrizioni di base fissate nelle linee guida per i campi ELF. Se limitate alle estremità, sono accettabili esposizioni massime fino a 8 T.

#### *1.3.4 Il DPCM 23/4/1992*

Il presente Decreto del Presidente del Consiglio e dei Ministri del 23 aprile 1992 "*Limiti massimi di esposizione ai campi elettrici e magnetici generati alla frequenza industriale nominale (50 Hz) negli ambienti abitativi e nell'ambiente esterno*", fissa i limiti massimi di esposizione, relativamente all'ambiente esterno ed abitativo, ai campi elettrico e magnetico generati alla frequenza industriale nominale (50Hz). Non si applica alle esposizioni professionali sul luogo di lavoro ed alle esposizioni intenzionali di pazienti sottoposti a diagnosi e cure mediche. Nel decreto vengono definiti alcuni concetti fondamentali quali:

- a) grandezze fisiche caratteristiche e relative unità di misura.
- b) valori limite di esposizione ai campi elettromagnetici.
- c) distanze di rispetto dagli elettrodotti.
- d) competenze e responsabilità dei controlli.
- e) interventi di risanamento.

La norma individua i limiti di 5kV/m per il campo elettrico e 0,1 mT per l'induzione magnetica in aree ove individui possono trascorre parte significativa della giornata, in altre aree i limiti diventano 10kV/m e 1 mT rispettivamente.

Per abitazioni o attività che comportano tempi di permanenza prolungati, vengono inoltre stabilite le fasce di rispetto dagli elettrodotti; nella *Tabella 1.1* sono esposte le distanze in funzione della tensione:

*Tabella 1.1: Distanze di rispetto degli elettrodotti in base alla tensione*

<b>Tensione elettrodotto [kV]</b>	<b>Distanza [m]</b>
380	28
220	18
150	11
132	10
120	10

Le distanze di rispetto previste dal documento erano incongruenti con i limiti del campo elettromagnetico previsti dalla medesima norma, dato che le distanze previste portano a valori del campo nettamente inferiori rispetto ai limiti imposti.

Il DPCM 28/9/1995 “*Norme tecniche procedurali di attuazione del decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri relativamente agli elettrodotti*”, enuncia che i lavori di risanamento, introdotti dal DPCM 23/4/1992, dovranno essere conformi alle leggi già esistenti in materia (in particolare alle legge del 28 giugno 1986 n.339, e il relativo regolamento di esecuzione del 21 marzo 1988 ed al decreto del Ministero dei lavori pubblici del 16 gennaio 1991) e prevede che le azioni di risanamento sia fissato al 31 dicembre 2004.

### *1.3.5 Legge 22 febbraio 2001, n. 36*

Il 23 marzo 2001 entrò in vigore la L.36 del 22 febbraio 2001, “*Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici*”, pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale del 7 marzo 2001. La sua emanazione suscitò non poche polemiche, tanto che i decreti attuativi non vennero pubblicati subito dopo come invece previsto. Il provvedimento legislativo detta i principi fondamentali per la prevenzione e protezione dai campi elettrici, magnetici e elettromagnetici, statici o variabili, ed in particolare si prefigge i seguenti scopi:

- *assicurare la tutela della salute dei lavoratori, delle lavoratrici e della popolazione dagli effetti dell'esposizione a determinati livelli di campo;*

- *promuovere la ricerca scientifica per la valutazione degli effetti a lungo termine e attivare misure di cautela da adottare in applicazione al principio di precauzione;*
- *assicurare la tutela dell'ambiente e del paesaggio e promuovere l'innovazione tecnologica e le azioni di risanamento volte a minimizzare l'intensità e gli effetti, secondo le migliori tecnologie disponibili.*

L'ambito di applicazione della norma è estremamente ampio e, con esclusione dell'esposizione intenzionale per scopi diagnostici o terapeutici, comprende:

- *tutti gli impianti e sistemi: elettrodotti ed impianti radioelettrici compresi gli impianti per telefonia mobile, i radar, radioamatori e radiodiffusione;*
- *apparecchiature per usi civili (domestico e lavorativo), militari e delle forze di polizia, che possano comportare l'esposizione dei lavoratori e della popolazione.*

Un aspetto importante della norma è quello definire compiti e funzioni degli organi centrali e periferici. Lo Stato esercita le funzioni relativamente a:

- *determinazione di: limiti di esposizione, valori di attenzione;*
- *obiettivi di qualità: si eviterà così il proliferare di valori imposti dalle regioni e che in questi anni hanno alimentato la confusione tra gli addetti e la popolazione;*
- *promozione di ricerca e di sperimentazione, coordinamento dell'attività di raccolta, di elaborazione e di diffusione dei dati;*
- *istituzione del catasto nazionale delle sorgenti fisse e mobili e delle zone interessate;*
- *determinazione dei criteri di elaborazione dei piani di risanamento;*
- *individuazione delle tecniche di misurazione e di rilevamento;*
- *definizione dei tracciati degli elettrodotti con tensione superiore a 150 kV;*
- *determinazione dei parametri per le fasce di rispetto per gli elettrodotti, dove non è consentita alcuna destinazione di edifici ad uso residenziale, scolastico, sanitario ovvero ad uso che comporti una permanenza non inferiore a quattro ore.*

Fatte salve le competenze dello Stato e di altre autorità indipendenti, alle regioni compete:

- *individuare i siti di trasmissione degli impianti per telefonia mobile, radioelettrici e quelli per la radiodiffusione;*
- *definire i tracciati degli elettrodotti con tensione non superiore a 150 kV, con le relative fasce di rispetto;*

- *stabilire le modalità per il rilascio delle autorizzazioni alla installazione degli impianti;*
- *realizzare e gestire, in coordinamento con il catasto nazionale, il catasto regionale;*
- *individuare gli strumenti e le azioni per il raggiungimento degli obiettivi di qualità;*
- *concorrere all'approfondimento delle conoscenze scientifiche;*
- *definire le competenze che spettano alle province ed ai comuni.*

Sono previsti piani di risanamento di eventuali situazioni in cui l'esposizione risulti superiore ai nuovi limiti di legge. Il piano è a carico dei titolari degli impianti e può prevedere anche la delocalizzazione degli stessi in siti idonei. Probabilmente l'aspetto più importante sia per i cittadini che per i lavoratori è che la legge introducesse tre livelli di riferimento, i cui valori vennero quantificati in appositi decreti interministeriali:

1. *limite di esposizione: valore di immissione di campo (elettrico, magnetico ed elettromagnetico), definito ai fini della tutela della salute da effetti acuti, che non deve essere superato in alcuna condizione per l'esposizione della popolazione e dei lavoratori;*
2. *valore di attenzione: valore di immissione di campo, che non deve essere superato negli ambienti abitativi, scolastici e nei luoghi adibiti a permanenze prolungate e che costituisce misura di cautela ai fini della protezione da possibili effetti a lungo termine;*
3. *obiettivi di qualità:*
  - a) *costituiscono criteri localizzativi, standard urbanistici, prescrizioni e incentivazioni per l'utilizzo delle migliori tecnologie disponibili;*
  - b) *valori di campo, definiti dallo Stato, ai fini della progressiva mitigazione dell'esposizione.*

Occorre premettere che lo spettro elettromagnetico normato dalla legge è estremamente ampio (da 0 a 300 GHz). Il decreto recitava, tra l'altro:

*“al fine di tener conto anche dei possibili effetti a lungo termine connessi con l'esposizione continua ai campi generati dalle sorgenti operanti alla frequenza industriale di rete (50 Hz), in corrispondenza di edifici adibiti a permanenze non inferiori a quattro ore giornaliere, non deve essere superato, come misura di cautela, il valore di 0,5  $\mu T$  per l'induzione magnetica, da intendersi come valore medio annuale di*

esposizione. Non deve essere superato in ogni caso il valore di  $2 \mu\text{T}$  per ogni intervallo di  $0,1 \text{ s}$ .”

Inoltre, per quanto riguarda gli obiettivi di qualità:

“nella progettazione di nuove linee ed installazioni elettriche e nella costruzione di nuovi edifici rispetto a linee ed installazioni elettriche già presenti nel territorio, ed in corrispondenza di spazi dedicati all’infanzia, quali scuole, asili nido e parchi giochi, l’obiettivo di qualità per il valore dell’induzione magnetica alla frequenza nominale di  $50 \text{ Hz}$  è fissato in  $0,2 \mu\text{T}$ , da intendersi come valore medio annuale di esposizione”.

Dato che la fissazione di limiti numerici dovevano comparire all’interno dei decreti attuati e questi furono emessi solo qualche anno dopo con il DPCM 8 Luglio 2003. L’orientamento, a suo tempo manifestato dai promotori della legge stessa, era quello di mantenere come limite di esposizione quello del DPCM 23/4/1992 e introdurre valori di attenzione e obiettivi di qualità estremamente prudenziali, ovvero:

- $100 \mu\text{T}$  come limite di esposizione
- $0.5 \mu\text{T}$  come valore di attenzione
- $0.2 \mu\text{T}$  come obiettivo di qualità

I valori di attenzione e di qualità sono a intendersi come media annuale. Invece dopo ricerche e lo studio delle legislazioni internazionali, il Consiglio dei Ministri ha deciso di innalzare alcuni valori limite. Di seguito si riportano le tabelle dei valori massimi introdotti dal DPCM 8/07/2003, mentre nella *Figura 1.5* si possono notare le differenze dei limiti fissati dalla Raccomandazione UE e da quelli fissati dal DPCM 8/7/03

*Tabella 1.2: Limiti del decreto relativi ai 50 Hz*

<b>Grandezza</b>	<b>Limiti di esposizione</b>	<b>Valori di attenzione</b>	<b>Obiettivi di qualità</b>
<b>Induzione magnetica [<math>\mu\text{T}</math>]</b>	100	10	3
<b>Campo elettrico [<math>\text{kV/m}</math>]</b>	5	-----	-----

*Tabella 1.3: Limiti di esposizione*

<b>Frequenza</b>	<b>Campo elettrico [<math>\text{V/m}</math>]</b>	<b>Campo magnetico [<math>\text{A/m}</math>]</b>	<b>Densità di potenza [<math>\text{W/m}^2</math>]</b>
<b>0,1 ÷ 3 MHz</b>	60	0.2	-----
<b>3 ÷ 3000 MHz</b>	20	0.05	1
<b>3 ÷ 300 GHz</b>	40	0.01	4

Tabella 1.4: Valori di attenzione

Frequenza	Campo elettrico [V/m]	Campo magnetico [A/m]	Densità di potenza [W/m <sup>2</sup> ]
0,1MHz ÷ 300 GHz	6	0.16	0.1

Tabella 1.5: Obiettivi di qualità

Frequenza	Campo elettrico [V/m]	Campo magnetico [A/m]	Densità di potenza [W/m <sup>2</sup> ]
0,1MHz ÷ 300 GHz	6	0.16	0.1

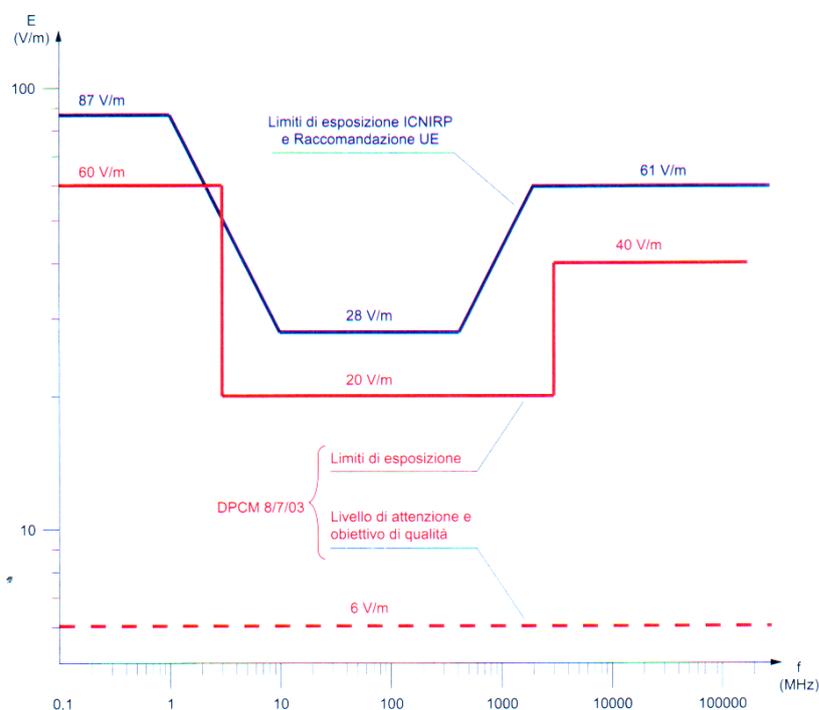


Figura 1.5: Differenza dei limiti suggeriti dalla Raccomandazione UE e da quelli fissati dal DPCM 8/7/03

### 1.3.6 Direttiva 2004/40/CE

La direttiva europea 2004/40/CE “*Prescrizioni minime di sicurezza e di salute relative all’esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti agli agenti fisici*”, emanata il 29 aprile 2004, ha indicato le prescrizioni minime di sicurezza e di salute relative all'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dagli agenti fisici (campi elettromagnetici) con particolare riferimento alle radiazioni da 0 Hz a 300 GHz. Questa direttiva è servita per la scrittura delle disposizioni relative alla protezione dai campi elettromagnetici indicate al titolo VIII, capo IV del decreto legislativo 9 aprile 2008 n.81. La direttiva riguarda i

rischi per la salute e la sicurezza dei lavoratori dovuti agli effetti derivanti dalla circolazione di correnti indotte e dall'assorbimento di energia, nonché da correnti di contatto; non riguarda invece gli effetti a lungo termine. Come nella legge quadro n.36/2001, vengono diversificati i campi in base alle precauzioni da adottare. In seguito si riportano le suddivisioni suddette:

- **valori limite di esposizione:** limitazioni basate su effetti sanitari accertati e su considerazioni biologiche. Il rispetto di questi limiti assicura che i lavoratori esposti siano protetti da tutti gli effetti nocivi noti;
- **valori di azione:** il valore di parametri direttamente misurabili a cui si devono intraprendere una o più delle misure specificate nella direttiva. Il rispetto di questi valori assicura il rispetto dei pertinenti limiti di esposizione.

Il datore di lavoro deve valutare e, se necessario, misurare e/o calcolare i livelli di campo elettromagnetico a cui i lavoratori sono esposti, e se su tale base i valori di azione risultano superati, si deve stabilire e, se necessario, calcolare se vengono superati i limiti di esposizione.

La direttiva 2004/40/CE è stata modificata dalla 2008/46/CE, che ha tra i suoi obiettivi quello di salvaguardare la possibilità di eseguire ancora esami importanti come le risonanze magnetiche. La direttiva 2008/46/CE riporta al primo articolo: “all’articolo 13, paragrafo 1, della direttiva 2004/40/CE, il primo comma è sostituito dal seguente:

*“Gli Stati membri mettono in vigore le disposizioni legislative, regolamentari e amministrative necessarie per conformarsi alla presente direttiva entro il 30 aprile 2012. Essi ne informano immediatamente la Commissione”.*

Dunque la direttiva 2008/46/CE posticipa di quattro anni l’obbligo di attivare le prescrizioni minime di sicurezza e di salute relative all’esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dagli agenti fisici (campi elettromagnetici).

### *1.3.7 D.Lgs. 81/2008*

Il D.Lgs 81/2008 “*Testo unico sulla sicurezza sul lavoro*”, sostituisce diverse leggi sulla sicurezza, tra cui il D.Lgs 626/94. All’interno vi è il capo riguardante la valutazione del rischio ai campi elettromagnetici. Il Capo IV del Titolo VIII stabilisce prescrizioni minime di sicurezza e di salute relative all’esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dalla esposizione ai campi elettromagnetici con banda di frequenza dai 0 ai 300GHz. In base a questa norma ogni datore di lavoro deve provvedere alla valutazione del rischio di esposizione dei lavoratori ai campi elettromagnetici presenti nella propria azienda. I rischi

per la salute e la sicurezza dei lavoratori contemplati dal D.Lgs sono quelli in grado di produrre effetti nocivi a breve termine nel corpo umano derivanti dalla circolazione di correnti indotte e dall'assorbimento di energia. Il decreto non riguarda gli effetti a lungo termine anche perché, come descritto precedentemente, non esistono ancora relazioni accertate fra esposizione ai campi elettromagnetici e danneggiamento alla salute umana.

In sintesi il Decreto Legislativo 9 aprile 2008, n° 81, prescrive che il datore di lavoro deve valutare e, quando necessario, calcolare i livelli dei campi elettromagnetici ai quali sono esposti i lavoratori. I campi, in particolare, devono essere monitorati i campi secondo due parametri:

- Valori di azione (il cui superamento farà scattare gli obblighi previsti dalla normativa);
- Valori limite di esposizione (che rappresentano il valore massimo di esposizione per i lavoratori)

I livelli di soglia di esposizione sono individuati a mezzo delle due grandezze “valori limite di esposizione” e “valori di azione”. Tale decreto ha confermato i parametri di 100  $\mu\text{T}$  per l'induzione magnetica e 5 kV/m per il campo elettrico quali valori da non superare in alcuna condizione di esposizione. Inoltre ha stabilito il valore del livello di attenzione nella soglia di 10  $\mu\text{T}$  (da intendersi come mediana dei valori nell'arco delle 24 ore, nelle normali condizioni di esercizio) da rispettarsi nelle aree gioco per l'infanzia, in ambienti abitativi, in ambienti scolastici e nei luoghi adibiti a permanenze non inferiori a quattro ore giornaliere. Viene stabilito anche l'obiettivo di qualità, chiarendo la sua funzione di progressiva minimizzazione delle esposizioni e fissandolo nella misura di 3  $\mu\text{T}$ , considerato nelle stesse modalità con cui è considerato il valore di attenzione. Questo vincolo si applica per la progettazione di nuovi elettrodotti in corrispondenza di aree gioco per l'infanzia, di ambienti abitativi scolastici e di luoghi adibiti a permanenze non inferiori alle quattro ore e, reciprocamente anche per la progettazione di nuovi insediamenti in prossimità di linee ed installazioni elettriche già presenti sul territorio. Al fine di determinare un'esposizione complessiva causata da differenti sorgenti a frequenze diverse, si deve procedere ad una corposa post-analisi dei dati relativi alle misurazioni svolte. Nel caso di esposizioni a frequenze diverse, si adottano metodi appropriati di valutazione, tenendo conto delle norme armonizzate europee. Il documento ICNIRP *“Linee guida per la limitazione dell'esposizione a campi elettrici e magnetici variabili nel tempo ed a campi elettromagnetici (fino a 300 GHz)”* descrive una metodologia utile

a tale scopo. Si fa presente che i limiti proposti dal decreto (che sono l'esatta replica di quelli prescritti dalla direttiva 2004/40/CE modificata dalla direttiva 2008/46/CE) sono gli stessi proposti da ICNIRP nel citato documento e pertanto risulta naturale fare riferimento a quest'ultimo anche per la valutazione dell'esposizione simultanea a frequenze diverse. E' da ricordare che alcuni decreti degli anni antecedenti avevano fissato delle distanze minime, variabili in ragione della tensione dell'impianto elettrico, tra luoghi adibiti a permanenze prolungate delle persone e conduttori dell'impianto medesimo. Tali distanze non avevano una valenza sanitaria, ma costituivano soltanto uno strumento pratico per garantire il rispetto dei limiti citati, in quanto alle distanze minime indicate corrispondono livelli di esposizione molto inferiori ai limiti previsti e, comunque, non congruenti alle condizioni imposte dal DPCM 8 luglio 2003. L'abbandono del criterio della distanza rappresenta una precisa scelta compiuta dalla legge quadro n.36/2001 la quale ha attribuito alla competenza statale la fissazione delle soglie di esposizione, indicando come unico criterio di tutela quello del rispetto dei valori-soglia successivamente definiti. In definitiva questo decreto legislativo racchiude tutte le direttive europee e le leggi sulla sicurezza e salute, tra cui gli aspetti relativi all'esposizione ai campi elettromagnetici a bassa frequenza. Nel §2.2 viene esposta in dettaglio la valutazione del rischio e le azioni a cui il datore di lavoro deve soddisfare.

## **1.4 Norme e metodi per la riduzione dei campi magnetici prodotti in cabina**

### *1.4.1 Norme applicabili e strumenti di valutazione*

Le cabine MT/BT non generano, nella maggioranza dei casi, campi magnetici di rilevante valore negli ambienti adiacenti. Tuttavia la legislazione vigente prevede di valutare tali campi e se necessario ridurne i valori. A tale scopo viene in aiuto la norma CEI 106-12 "Guida pratica ai metodi e criteri di riduzione dei campi magnetici prodotti dalle cabine elettriche MT/BT". Essa non propone un metodo per la loro quantificazione e riduzione, ma fornisce indicazioni generali per la mitigazione dei campi. La norma considera alcune configurazioni elementari, nelle quali può essere scomposto un impianto, che aiutano a definire i principali parametri elettrici e geometrici da cui dipende il campo magnetico generato da un impianto reale.

Com'è noto le cabine di distribuzione MT/BT sono principalmente costituite da trasformatori, da quadri di media e bassa tensione e dalle loro connessioni (cavi, sbarre).

Nelle cabine poste all'interno di edifici, la disposizione dei componenti elettrici varia caso per caso in quanto dipende:

- dalla forma e dalle dimensioni del locale a disposizione per ospitare la cabina;
- dai problemi connessi con le operazioni di manutenzione che richiedono, ad esempio il rispetto di certe distanze tra componenti.

Gli stessi componenti possono poi avere, a parità di potenza nominale, caratteristiche di ingombro diverse a seconda del tipo di isolamento impiegato. I livelli di induzione magnetica associabili a tali cabine risentono quindi di questi aspetti logistici oltre che dipendere, ovviamente, dal numero e dalla potenza dei trasformatori in essa installati, nonché dalle variazioni temporali del carico. Con il decreto 8 luglio 2003 sono stati introdotti dei limiti per il campo magnetico. In particolare si è stabilito che il valore di attenzione, riferendosi ad impianti già esistenti, a  $10\mu\text{T}$ . Per i nuovi impianti si deve far riferimento all'obiettivo di qualità fissato a  $3\mu\text{T}$ . Quindi si devono tenere in considerazione delle "fasce di rispetto" oltre le quali questi obiettivi sono senz'altro raggiunti. Le distanze di prima approssimazione (DPA) sono calcolabili attraverso strumenti numerici, anche non troppo complessi. Le DPA sono quindi di facile applicazione ed anche molto conservative. Talvolta, però, può essere necessario valutare la distribuzione spaziale dell'induzione magnetica con software specifici e individuare gli strumenti idonei alla mitigazione del campo. Solitamente si ricorre a una riduzione del campo se nelle vicinanze della cabina ci sono attività di lavoro o comunque dove vi è una permanenza di persone che possono essere soggette all'azione del campo medesimo.

Le possibili soluzioni impiantistiche sono sostanzialmente riducibili ai seguenti approcci:

- Agire sulla disposizione delle apparecchiature e delle loro connessioni;
- Schermare le sorgenti principali con materiali conduttori e/o ferromagnetici.

Volendo agire sulla disposizione delle apparecchiature e delle loro connessioni, è innanzitutto opportuno effettuare una dettagliata caratterizzazione del campo magnetico da mitigare. Tale caratterizzazione dovrebbe consentire sia di individuare la sorgente maggiormente responsabile del campo magnetico e concentrare quindi l'attenzione su di essa, sia di descrivere il campo nel modo più completo ed accurato possibile, visto che nella maggior parte delle situazioni di pratico interesse ci si trova di fronte a campi a polarizzazione ellittica. In dettaglio, agire sull'architettura delle sorgenti significa allontanarle dall'area ove si vuole ridurre il campo, oppure ridurre la distanza tra le fasi e

ottimizzarne la disposizione. In tale altro caso si può pensare di sdoppiare le fasi, utilizzare cavi ad elica ecc..

Con schermature particolarmente curate si può comunque ottenere una riduzione del campo di un ordine di grandezza.

Nei casi in cui non sia possibile intervenire sulla configurazione della cabina o quando anche questo intervento non porta a miglioramenti prefissati, si utilizza la schermatura. Essa può essere parziale, limitata cioè solo ai singoli componenti elettrici che generano campi sensibilmente superiori rispetto ad altre sorgenti, oppure totale, estesa cioè all'intera cabina. Per una schermatura parziale è preferibile utilizzare materiali ferromagnetici se si vuole ridurre il campo nelle vicinanze della sorgente, oppure utilizzare schermi conduttori per ottenere un beneficio anche a distanze maggiori. Nei casi più difficili si può avere una combinazione delle due tipologie, anche perché le cabine possono avere configurazioni molto diverse con campi aventi componenti significative sia verticali che orizzontali. Nel caso di cavi si può utilizzare lamiere sagomate a U di adeguato spessore. Per una schermatura totale della cabina si potrebbe utilizzare anche acciaio commerciale di spessore 3 – 5 mm, ma in commercio gli acciai sono caratterizzati da valori di permeabilità e conducibilità non definiti. Si ripercuote in efficacia schermante molto diverse caso per caso.

La soluzione non può comunque essere improvvisata ma si deve sempre essere affrontata attraverso un'accurata fase di studio con adeguati metodi di simulazione che utilizzino sofisticate tecniche numeriche. Solo così è possibile confrontare diverse soluzioni possibili, scegliere il tipo di schermatura, individuare il materiale maggiormente idoneo e ottimizzare il rapporto costo benefici sulla base degli obiettivi da raggiungere.

#### *1.4.2 Metodi per la schermatura del campo magnetico*

Le schermature si contraddistinguono in:

- Schermature attive;
- Schermature passive.

La schermatura attiva consiste nel creare attraverso circuiti controllati, un campo che si oppone a quello disturbante con lo scopo di tendere ad annullarlo. Questa schermatura si dimostra molto complessa e costosa e viene utilizzata soltanto per applicazioni molto particolari. La schermatura passiva viene invece normalmente utilizzata nelle applicazioni industriali e può essere realizzata in due modi distinti: utilizzando materiali conduttori

oppure materiali ferromagnetici. La schermatura con materiali ferromagnetici ha lo scopo di realizzare una via preferenziale per le linee di campo che saranno spinte a deviare tanto più dal loro percorso quanto più è bassa la riluttanza del percorso alternativo, ovvero quanto più è elevata la permeabilità magnetica del materiale di cui lo schermo è costituito.

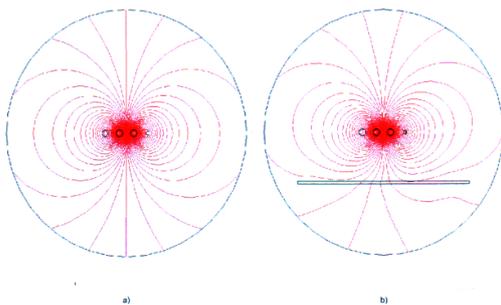
La schermatura con materiali conduttori agisce invece nel senso di creare un campo contrario a quello di disturbo. È noto, infatti, che un corpo conduttore immerso in un campo magnetico variabile diventa sede di correnti indotte (correnti parassite), le quali tendono ad annullare il campo che le ha generate. L'efficacia degli schermi conduttori è tanto più elevata quanto maggiore è la conducibilità del materiale di cui è costituito lo schermo. I materiali utilizzati sono normalmente rame ed alluminio; quest'ultimo sovente è preferito per il minor costo e peso a confronto con un'accettabile riduzione di conducibilità. A parità di valore efficace, un campo magnetico a polarizzazione prossima a quella lineare è generalmente più facile da schermare di quello a spiccata polarizzazione ellittica; è quindi utile, come primo passo e ove è possibile, intervenire sull'architettura delle sorgenti per modificarla in modo tale da "linearizzare" il campo.

### *1.4.3 Confronto tra schermi magnetici e schermi conduttori*

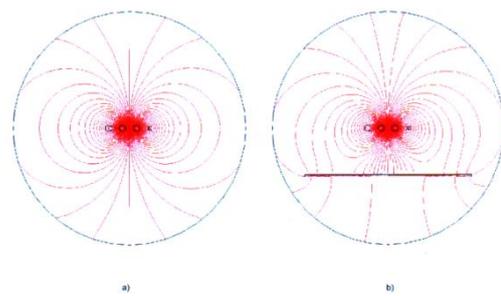
Per la schermatura di campi statici sono più adatti i materiali ferromagnetici, mentre quelli conduttori sono del tutto ininfluenti, poiché il campo statico non produce in essi alcuna corrente. Avendo una permeabilità più elevata di quella dell'aria, i materiali ferromagnetici offrono una via preferenziale al campo magnetico, in questo modo sottraggono linee di flusso dalla zona intorno alla sorgente da schermare. Gli schermi ferromagnetici si dimostrano adatti per la schermatura di singoli apparecchi e risultano particolarmente efficaci quando sia possibile racchiudere totalmente l'oggetto entro un involucro. Nella maggioranza dei casi ciò non è possibile; la schermatura viene pertanto realizzata disponendo lo schermo tra sorgente del campo e l'oggetto da schermare. In questo caso, si ha un aumento del campo nella zona prossima allo schermo dal lato della sorgente e una riduzione nella zona tra lo schermo e l'oggetto. È importante notare che l'efficacia schermante dei materiali magnetici si riduce man mano che aumenta la distanza da essi. Riassumendo questa tipologia di schermi:

- tendono ad attrarre il campo magnetico assorbendolo;
- reagiscono alla componente del campo ad essi tangenziale.

L'efficacia di uno schermo ferromagnetico è più significativa nelle immediate vicinanze dello schermo mentre diminuisce all'aumentare della distanza dello schermo stesso., sono quindi da preferire per aree di dimensioni ridotte e nel caso in cui sia importante ottenere l'effetto di mitigazione nelle zone più vicine alla sorgente. Si hanno benefici maggiori se lo schermo avvolge la sorgente e se il materiale ha alta permeabilità magnetica relativa. Lo spessore non incide molto, quindi si usano solitamente lamiere di spessore compreso fra i 5 e i 10 mm; non si utilizzano mai spessori minori di 2 mm perché altrimenti l'efficienza si riduce in modo apprezzabile. Siccome il principio su cui si basa questo tipo di schermatura è la generazione di correnti indotte, allora sarà meglio utilizzare materiali ad alta conducibilità. I materiali conduttori sono in grado di ridurre il campo, in quanto le correnti indotte in essi, creano un campo che si oppone a quello che le ha generate. Questo tipo di schermatura risulta applicabile quando si intenda schermare la sorgente e non il singolo oggetto. Agendo nel senso di ridurre il campo, essi risultano efficaci anche a notevole distanza dalla sorgente. Come già accennato, essi sono però insensibili al campo statico. Hanno la tendenza di riflettere il campo magnetico (per effetto delle correnti parassite da in essi indotte) e reagiscono alla componente del campo ad essi perpendicolare. L'efficienza aumenta linearmente con l'aumento dello spessore; quando si supera la profondità di penetrazione delle correnti parassite (pari a circa 9 mm per il rame e 12 mm per l'alluminio), l'aumento dello spessore non comporta alcun miglioramento dell'efficienza schermante. Anche l'aumento dell'estensione dello schermo migliora la schermatura e come per la tipologia vista precedentemente, l'efficienza aumenta tanto più quanto più elevata è la conducibilità. In *Figura 1.6*, l'andamento del campo generato da un sistema di conduttori trifasi in assenza di schermi è confrontato con quello risultante dopo aver applicato uno schermo conduttore. Analogamente nella *Figura 1.7* è riportato l'andamento del campo in presenza di schermo ferromagnetico. Per entrambe le figure, il campo rappresentato è quello riferito all'istante in cui la corrente nella fase sinistra passa per lo zero.

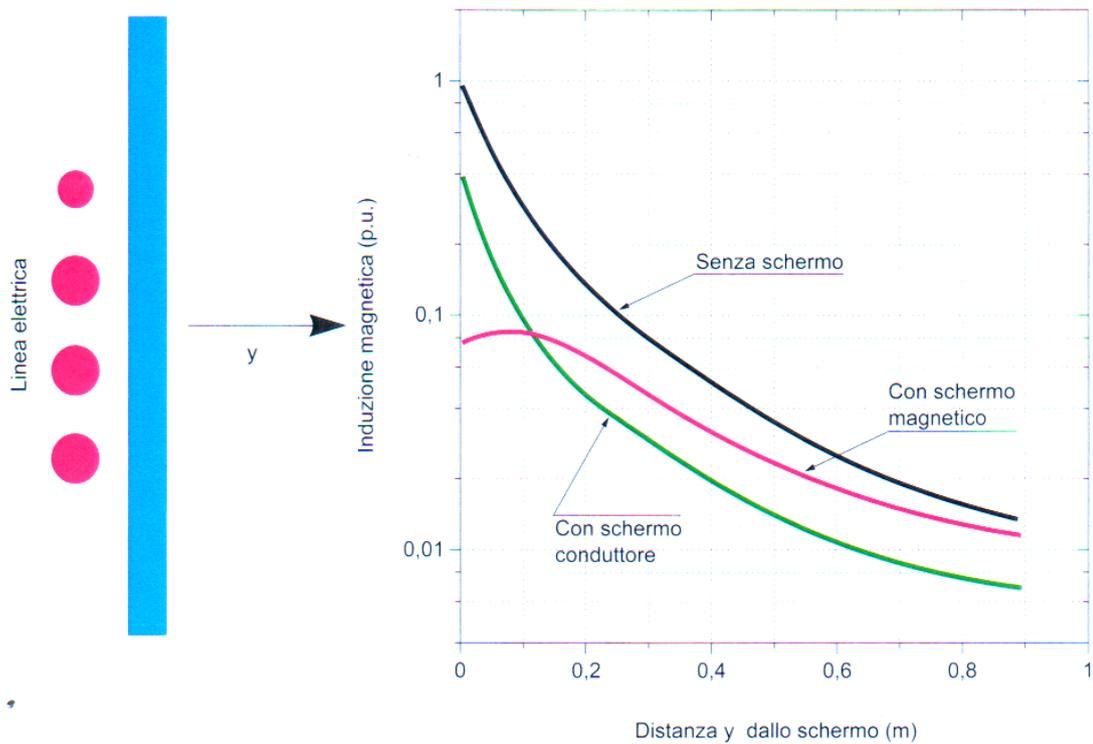


**Figura 1.6:** Modifica del campo generato da tre conduttori in presenza di uno schermo conduttore



**Figura 1.7:** Modifica del campo generato da tre conduttori in presenza di uno schermo ferromagnetico

La *Figura 1.8* mostra l'efficacia delle diverse schermature in funzione della distanza. Come già accennato la schermatura magnetica risulta maggiormente efficace in prossimità dello schermo mentre al decrescere della distanza prevale l'effetto dello schermo conduttore. praticamente si annulla mentre lo schermo conduttore mantiene la sua efficacia. Talvolta può risultare efficace la combinazione di schermi magnetici con schermi conduttori.



*Figura 1.8: Efficacia delle schermature*

# Capitolo 2

## Descrizione dell'attività di tirocinio presso il Settore Edilizia della Provincia di Padova

### 2.1 Introduzione

Il tirocinio formativo svolto presso il Settore Edilizia della Provincia di Padova aveva lo scopo di affrontare le problematiche riguardanti i campi elettromagnetici affiancando l'Ing. Collerone Calogero, che ha assunto il ruolo di Tutore Aziendale.

Il periodo di tirocinio, durato indicativamente da novembre 2009 a febbraio 2010 per una durata di circa 330 ore, è stato caratterizzato da tre fasi.

La prima è stata relativa all'introduzione e allo studio delle norme vigenti in ambito nazionale sulla sicurezza sul lavoro in relazione ai campi elettromagnetici.

La seconda fase ha riguardato l'analisi di un esistente codice software per il calcolo dell'induzione magnetica e l'implementazione di una nuova parte per completare l'analisi in tutti i piani dello spazio, semplificandone l'output.

La terza ed ultima fase ha riguardato l'analisi di due impianti esistenti e di un impianto in fase di costruzione; sono stati analizzati e valutate le diverse problematiche, modellizzati gli impianti via software e determinando l'andamento dell'induzione.

Le cabine prese in esame situate all'interno di edifici di proprietà della Provincia di Padova sono state le seguenti:

- Cabina secondaria MT/BT della potenza di 1000 kVA all'interno dell'edificio denominato Terza Torre, piazza Bardella 3 - Padova;

- Cabina di trasformazione BT/BT 400/230 Volt all'interno del laboratorio macchine utensili dell'ITIS Marconi di via Manzoni, 80 – Padova;
- Cabina secondaria MT/BT della potenza di 315 kVA in costruzione all'interno dell'Istituto "Ferrari" di viale Fiume, 55 – Este.

Alcuni dati delle cabine non sono disponibili. Le tre tipologie analizzate sono:

- Caratteristiche complete della cabina (dimensione fisiche del locale, tipologia dei componenti, percorso dei circuiti);
- Misurazione delle correnti nelle tre fasi in entrata e in uscita dal trasformatore;
- Visione delle fatture mensili in un interno anno di fornitura elettrica per la valutazione della potenza assorbita dall'impianto utilizzatore;

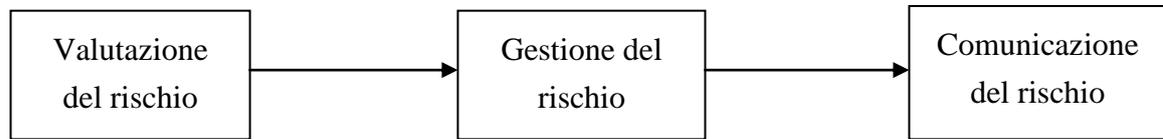
Ove non è stato possibile prelevare informazioni sul carico, sono state fatte delle ipotesi cautelative assieme al Tutore Aziendale.

## 2.2 Valutazione del rischio

Come scritto in precedenza l'approccio iniziale alla tematica riguardante i campi elettromagnetici ha riguardato lo studio delle leggi e delle norme in vigore le quali prevedono che venga effettuata una valutazione del rischio di esposizione ai campi elettromagnetici. La valutazione del rischio, inteso come probabilità che si verifichi un evento dannoso conseguente all'esposizione ad un pericolo combinata con l'entità del danno conseguente, è la sintesi delle operazioni effettuate per stimare qualsiasi esposizione ad un pericolo, in relazione con le modalità di svolgimento delle procedure lavorative. Il rischio va valutato sia dal punto di vista qualitativo che quantitativo. Il primo aspetto è facilmente individuabile perché esistono strumenti validi per diverse situazioni che sono di grande aiuto per la valutazione dei rischi lavorativi e non. Nei casi in cui non sono disponibili sufficienti dati statistici e scientifici, vale a dire in presenza di informazioni insufficienti, l'attuazione della fase decisionale può rivelarsi difficile. L'elettromagnetismo rientra in questo caso data la complessità di calcolo e di valutazioni del rischio sulla salute, talune volte ingrandite a causa del volume di alcuni impianti. La soluzione quantitativa è in genere ancora più complessa da attuare. Se viene a mancare anche questa valutazione ci si trova davanti all'impossibilità di prevedere il danno che potrebbe verificarsi.

La valutazione del rischio è il punto di partenza con cui il datore di lavoro prende delle decisioni in materia di sicurezza sul lavoro e di rischi ambientali per la collettività. Con

esso si individuano le misure di prevenzione da attuare. L'analisi del rischio nell'ambito del luogo di lavoro è in genere basata su tre fasi:



Non sempre è possibile valutare correttamente in termini quantitativi il rischio e il danno che potrebbe sorgere come conseguenza a un evento, per cui a volte diventa piuttosto complesso adottare efficaci misure di prevenzione e protezione.

Quindi prima dell'analisi degli impianti, della loro modellizzazione e della valutazione dell'induzione elettromagnetica è d'obbligo affrontare il problema legislativo e capire come muoversi nel rispetto della Legge per una corretta valutazione dei rischi e delle procedure da attuare per informare i lavoratori e gli utenti del rischio specifico.

La norma che prevede la valutazione dei rischi per la sicurezza sul lavoro è il D.Lgs 81/08 che nel mese di dicembre 2008 il documento è stato aggiornato con la pubblicazione delle indicazioni per la corretta applicazione anche del Capo IV del Titolo VIII, relativo alla "Protezione dei lavoratori dai rischi di esposizione a campi elettromagnetici". Il documento pur essendosi fondamentalmente ispirato alla legislazione previgente, ha posto in capo alle aziende obblighi di valutazione e gestione del rischio che presentano anche elementi di novità e ha puntato a risolvere i più comuni quesiti che vengono proposti ai tecnici del settore. In merito al Capo IV il Coordinamento Tecnico delle Regioni ricorda che con la pubblicazione della direttiva 2008/46/CE che rinvia al 30/04/2012 i termini di recepimento della direttiva 2004/40/CE, l'Unione Europea ha preannunciato una rivalutazione completa sull'impatto sociale ed economico di tale direttiva, finalizzata all'eventuale presentazione di una proposta di revisione. Dunque è possibile che il Capo IV verrà in futuro aggiornato alla luce delle nuove risultanze. Riguardo all'entrata in vigore del Capo IV ed alla valutazione del rischio si riportano, a titolo esemplificativo, una delle risposte contenute nel documento: con la formulazione adottata dal legislatore all'articolo 306 del Testo Unico e stante l'emanazione della direttiva 2008/46/CE, l'applicazione degli specifici principi di prevenzione e protezione previsti dal Capo IV del Titolo VIII del Decreto ha subito uno slittamento temporale di 4 anni e l'entrata in vigore è prevista per il 30/04/2012. Cosa comporta dunque in pratica lo slittamento temporale dell'entrata in vigore? Riguardo ai compiti di vigilanza, fino a tale

data non saranno richiedibili e sanzionabili le inottemperanze agli obblighi specificamente previsti dal Capo IV del Titolo VIII, ma resteranno validi, richiedibili e sanzionabili i principi generali affermati nel Titolo I e nel Capo I del Titolo VIII.

Nel Titolo VIII, Capo IV, del DLgs 81/08 riguardante la salute e sicurezza sul lavoro si fa riferimento alla “**protezione dei lavoratori dai rischi di esposizione a campi elettromagnetici**”. Determina i requisiti minimi per la protezione dei lavoratori contro i rischi per la salute e sicurezza derivanti dall’esposizione ai campi elettromagnetici (da 0Hz a 300GHz) durante il lavoro. Sono presi in considerazione solo gli **effetti nocivi a breve termine** e non riguarda la protezione e prevenzione da eventuali effetti a lungo termine e i rischi risultanti dal contatto con conduttori in tensione. Da qui deriva l’ipotesi che le valutazioni e le azioni preventive citate nel suddetto Capo, riguardano tutti i lavoratori che operano nel settore elettrico o lavoratori che hanno a che fare con macchine o impianti elettrici (esempio manutentori). L’articolo 208 del DLgs 81/08 fissa i valori limite di esposizione e i valori d’azione che il datore di lavoro deve considerare e al di sopra dei quali deve redigere la valutazione del rischio.

*“A seguito della valutazione dei livelli dei campi elettromagnetici effettuata in conformità al comma 1, qualora risulti che siano superati i valori di azione di cui l’articolo 208, il datore di lavoro valuta e, quando necessario, calcola se i valori limite di esposizione sono stati superati.”*

[...]

*“Il datore di lavoro nel documento di valutazione del rischio di cui all’articolo 28 precisa le misure adottate, previste dall’articolo 210.”*

Il valore limite di esposizione, ovvero il valore che non deve essere mai superato quando un lavoratore sta operando in un impianto, dipende dalla fascia di frequenza in cui opera l’impianto stesso. E’ desumibile che in bassa frequenza, tenuto conto di eventuali armoniche, non si supera il campo di applicazione 1Hz – 10MHz. In questa fascia il limite di esposizione riguarda la **densità di corrente** che può interessare il corpo umano. La fascia seguente, 10MHz – 10GHz, non considera più la densità di corrente come limite ma deve essere valutato il tasso di assorbimento specifico di energia (SAR). Nell’Allegato XXXVI - Lettera A - Tabella 1, vengono esposti i limiti di esposizione a seconda del campo di applicazione, riportati in questa occasione nella *Tabella 2.1*:

*Tabella 2.1: Limiti di esposizione*

Frequenza	Densità di corrente J [mA/m <sup>2</sup> ] (rms)	SAR mediato sul corpo intero [W/kg]	SAR localizzato [W/kg]	SAR localizzato (arti) [W/kg]	Densità di potenza [W/m <sup>2</sup> ]
Fino a 1Hz	40	-----	-----	-----	-----
1 ÷ 4 Hz	40/f	-----	-----	-----	-----
4 ÷ 1000 Hz	10	-----	-----	-----	-----
1 ÷ 100 kHz	f/100	-----	-----	-----	-----
1 ÷ 10 MHz	f/100	0.4	10	20	-----
10 MHz ÷ 10 GHz	-----	0.4	10	20	-----
10 ÷ 300 GHz	-----	-----	-----	-----	50

Nel caso di bassa frequenza da noi considerata, in particolare i 50Hz, il limite della densità di corrente è pari a 10 [mA/m<sup>2</sup>] (rms). Questo valore fa riferimento ad effetti a breve termine. Diversamente, nell'Allegato XXXVI – Lettera B – Tabella 2, vengono riportati i valori limite di Azione, ovvero i valori di campo elettrico, campo magnetico e induzione magnetica oltre i quali il datore di lavoro deve redigere la valutazione del rischio da campi elettromagnetici. Si riportano tali limiti nella *Tabella 2.2*.

*Tabella 2.2: Limiti di azione*

Frequenza	Intensità del campo elettrico [V/m]	Intensità del campo magnetico [A/m]	Induzione magnetica [μT]	Densità di potenza di onda piana [W/m <sup>2</sup> ]	Corrente di contatto [mA]	Corente indotta attraverso gli arti [mA]
0 ÷ 1 Hz	-----	1.63*10 <sup>5</sup>	2*10 <sup>5</sup>	-----	1	-----
0 ÷ 8 Hz	20000	1.63*10 <sup>5</sup> /f <sup>2</sup>	2*10 <sup>5</sup> /f <sup>2</sup>	-----	1	-----
8 ÷ 25 Hz	20000	2*10 <sup>4</sup> /f	2.5*10 <sup>4</sup> /f	-----	1	-----
0.025 ÷ 0.82 kHz	500/f	20/f	25/f	-----	1	-----
0.82 ÷ 2.5 kHz	610	24.4	30.7	-----	1	-----
2.5 ÷ 65 kHz	610	24.4	30.7	-----	0.4f	-----
65 ÷ 100 kHz	610	1600/f	2000/f	-----	0.4f	-----
0.1 ÷ 1 MHz	610	1.6/f	2/f	-----	40	-----
1 ÷ 10 MHz	610/f	1.6/f	2/f	-----	40	-----
10 ÷ 110 MHz	61	0.16	0.2	10	40	100
0.11 ÷ 0.4 GHz	61	0.16	0.2	10	-----	-----
0.4 ÷ 2 GHz	3f <sup>1/2</sup>	0.008f <sup>1/2</sup>	0.01/f <sup>1/2</sup>	f/40	-----	-----
2 ÷ 300 GHz	137	0.3	0.45	50	-----	-----

La bassa frequenza rientra nella fascia 0,025 – 0,82 kHz, quindi i valori limiti del campo elettrico, campo magnetico e induzione magnetica, sono rispettivamente di:

<b>Campo elettrico [kV/m]</b>	<b>10</b>
<b>Campo magnetico [A/m]</b>	<b>400</b>
<b>Induzione magnetica [<math>\mu</math>T]</b>	<b>500</b>

La frequenza, per il calcolo dei limiti, è espressa in kHz come riporta la nota dell'Allegato XXXVI – Lettera B – Tabella 2.

*“f è la frequenza espressa nelle unità indicate nella colonna relativa all'intervallo di frequenza.”*

Superati questi limiti di azione, il datore di lavoro deve adottare misure di prevenzione e protezione per i lavoratori. Secondo l'Articolo 209 il datore di lavoro valuta e se necessario misura i livelli del campo elettromagnetico e devono essere rispettate le restrizioni previste dalla raccomandazione 1999/512/CE che però fa riferimento ai limiti di esposizione per la popolazione. E' plausibile che i valori di induzione realmente da rispettare siano quelli definiti nella Legge Quadro 36/01, in cui sono presenti tra l'altro valori più restrittivi rispetto alla raccomandazione dell'unione europea. La valutazione dei campi elettromagnetici si effettua secondo le norme CENELEC o CEI per i casi già valutati nelle normative, per il resto si devono adottare le specifiche “buona prassi” emanate dalla commissione consultiva permanente per la prevenzione degli infortuni e l'igiene del lavoro. Lo stesso articolo suggerisce a cosa deve fare attenzione il datore di lavoro, di cui si riportano in seguito i punti:

*“Nell'ambito della valutazione del rischio di cui all'articolo 181, il datore di lavoro presta particolare attenzione ai seguenti elementi:*

*a) il livello, lo spettro di frequenza, la durata e il tipo dell'esposizione;*

*b) i valori limite di esposizione e i valori di azione di cui all'articolo 208;*

*c) tutti gli effetti sulla salute e sulla sicurezza dei lavoratori particolarmente sensibili al rischio;*

*d) qualsiasi effetto indiretto quale:*

*1) interferenza con attrezzature e dispositivi medici elettronici (compresi stimolatori cardiaci e altri dispositivi impiantati);*

- 2) *rischio propulsivo di oggetti ferromagnetici in campi magnetici statici con induzione magnetica superiore a 3 mT;*
- 3) *innesco di dispositivi elettro-esplosivi (detonatori);*
- 4) *incendi ed esplosioni dovuti all'accensione di materiali infiammabili provocata da scintille prodotte da campi indotti, correnti di contatto o scariche elettriche;*
- e) *l'esistenza di attrezzature di lavoro alternative progettate per ridurre i livelli di esposizione ai campi elettromagnetici;*
- f) *la disponibilità di azioni di risanamento volte a minimizzare i livelli di esposizione ai campi elettromagnetici;*
- g) *per quanto possibile, informazioni adeguate raccolte nel corso della sorveglianza sanitaria, comprese le informazioni reperibili in pubblicazioni scientifiche;*
- h) *sorgenti multiple di esposizione;*
- i) *esposizione simultanea a campi di frequenze diverse.”*

Da qui devono essere presi diversi provvedimenti riguardanti non solo la prevenzione e la protezione dell'operatore, ma anche le eventuali protezioni e prevenzioni della struttura in esame. In particolare l'Articolo 210 suggerisce:

- “a) di altri metodi di lavoro che implicano una minore esposizione ai campi elettromagnetici;*
- b) della scelta di attrezzature che emettano campi elettromagnetici di intensità inferiore, tenuto conto del lavoro da svolgere;*
- c) delle misure tecniche per ridurre l'emissione dei campi elettromagnetici, incluso se necessario l'uso di dispositivi di sicurezza, schermature o di analoghi meccanismi di protezione della salute;*
- d) degli appropriati programmi di manutenzione delle attrezzature di lavoro, dei luoghi e delle postazioni di lavoro;*
- e) della progettazione e della struttura dei luoghi e delle postazioni di lavoro;*
- f) della limitazione della durata e dell'intensità dell'esposizione;*
- g) della disponibilità di adeguati dispositivi di protezione individuale.”*

*“I luoghi di lavoro dove i lavoratori possono essere esposti a campi elettromagnetici che superano i valori di azione devono essere indicati con un'apposita segnaletica. Tale obbligo non sussiste nel caso che dalla valutazione effettuata a norma dell'articolo 209,*

*comma 2, il datore di lavoro dimostri che i valori limite di esposizione non sono superati e che possono essere esclusi rischi relativi alla sicurezza. Dette aree sono inoltre identificate e l'accesso alle stesse è limitato laddove ciò sia tecnicamente possibile e sussista il rischio di un superamento dei valori limite di esposizione.”*

**In nessun caso i lavoratori devono essere esposti a valori superiori ai limiti di esposizione.** Se vengono superati, il datore di lavoro deve adottare misure immediate per riportare l'esposizione sotto ai valori limite. Coloro che operano in situazioni in cui l'esposizione ai campi elettromagnetici è superiore ai valori di azione, devono essere sottoposti al controllo medico per valutare eventuali problematiche derivanti dall'esposizione, come citato dall'Articolo 211.

*“Fermo restando il rispetto di quanto stabilito dall'articolo 182, sono tempestivamente sottoposti a controllo medico i lavoratori per i quali è stata rilevata un'esposizione superiore ai valori di azione di cui all'articolo 208, comma 2 “a meno che la valutazione effettuata a norma dell'articolo 209, comma 2, dimostri che i valori limite di esposizione non sono superati e che possono essere esclusi rischi relativi alla sicurezza”.”*

Tenuto conto di quello che riporta il Capo IV ne deriva che l'inserimento delle informazioni riguardanti il pericolo di iterazione con i campi elettromagnetici nel testo della valutazione dei rischi è obbligatorio nel caso in cui il datore si aspetta che i valori di campo elettrico, campo magnetico ed induzione siano tali da superare i valori di azione. Se non si effettuano questo tipo di valutazioni si può rischiare di comporre una inadeguata valutazione dei rischi e quindi incorrere in un'ammenda a carico del datore di lavoro. A titolo di esempio si ricorda la sentenza della Corte Suprema di Cassazione n°4063 del 2008.

### 2.3 Cabina MT/BT presso la Terza Torre (cabina n°1)

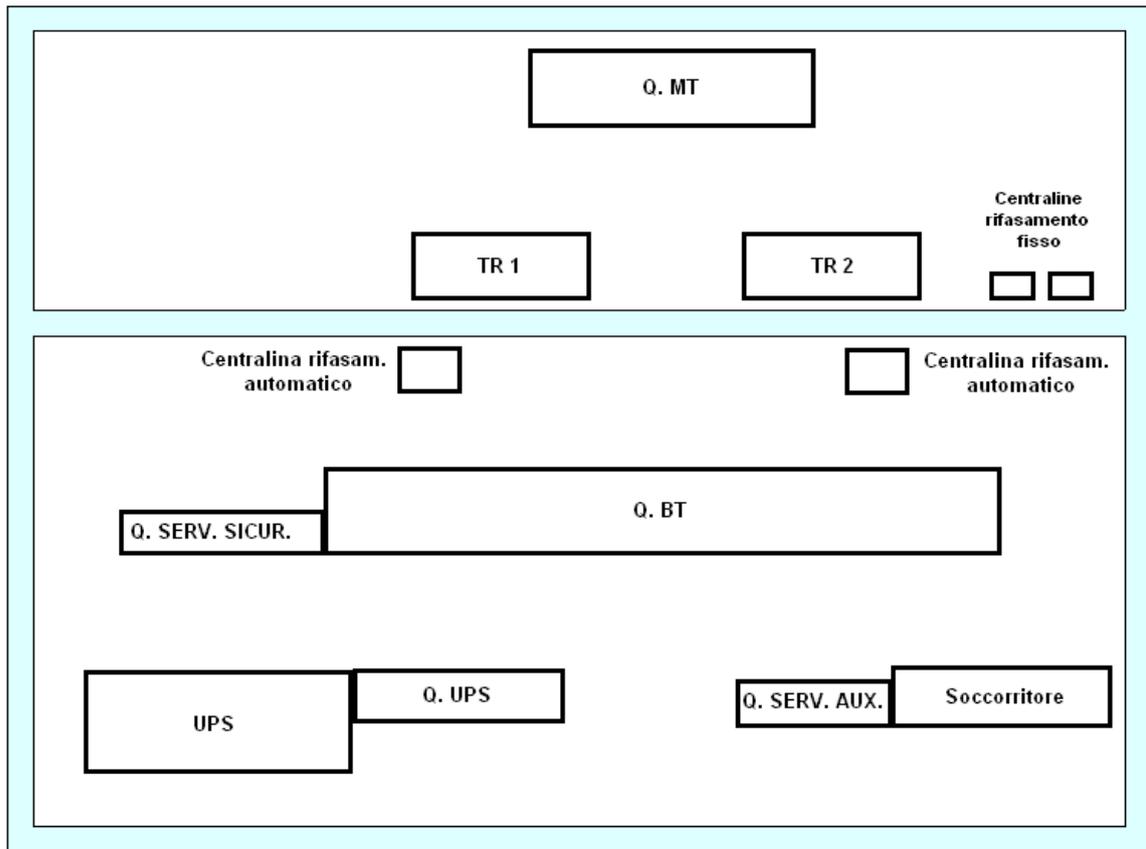


Figura 2.1: Layout della cabina MT/BT della Terza Torre.

La prima cabina di trasformazione MT/BT analizzata si trova al secondo piano interrato dell'edificio denominato Terza Torre. Si nota dal layout che è suddivisa in due locali, uno con i dispositivi MT e trasformatori, l'altro con tutte le apparecchiature BT. Nella Figura 2.1 è possibile notare uno schema planimetrico semplificato. Il pavimento è composto da una griglia, e a circa 30cm al di sotto della quale passano i cavi. Oltre ad una moltitudine di collegamenti fra i diversi quadri e poi vi è una serie di montanti che dalla parete del locale BT sale ai piani superiori. I montanti sono composti da cavi raggruppati in base alla loro funzione. Dal piano superiore, i cavi sono collegati a blindo sbarre che si sviluppano fino al tredicesimo piano. Ad ogni piano vi è un "locale quadri" a cui fanno capo i cavi necessari ad alimentare i quadri dei piani.

Data la complessità della cabina in questione, si è scelto assieme al Tutore di trascurare alcuni quadri semplificandone così la modellizzazione. Ovviamente sono stati trascurati quelli il cui contributo quantitativo al campo elettromagnetico è minoritario e che non

incidono su un'analisi qualitativa del campo medio (ad esempio i quadri che intervengono solo in caso di anomalie). In definitiva si è tenuto conto di:

- ✓ Trasformatori
- ✓ Quadro MT
- ✓ Quadro BT
- ✓ Quadro UPS
- ✓ Blindo sbarre
- ✓ Cavi di collegamento e montanti

La disposizione e il volume dei componenti elettrici sono stati ripresi dai disegni tecnici forniti dalla stessa Provincia di Padova. Nella *Tabella 2.3* si riportano tali valori:

*Tabella 2.3: Dimensioni di alcuni oggetti all'interno della cabina della Terza Torre*

<b>Quadro MT</b>	1500 X 730 X h2000 [mm]
<b>Box trasformatore</b>	1640 X 1120 X h2195 [mm]
<b>Quadro generale bt</b>	4800 X 1100 X h2100 [mm]
<b>UPS</b>	2000 X 1100 X h1600 [mm]

Nella *Figura 2.2* si possono osservare alcuni componenti all'interno della cabina, in particolare dei montanti, delle blindo sbarre, dei quadri di bassa tensione e la griglia che costituisce il pavimento.

*Figura 2.2: Alcune foto dell'interno della cabina*





Per questa cabina è stato prima studiato il layout, sono stati scelti i componenti da inserire nell'analisi e successivamente si è riprodotta la configurazione in 3D attraverso MatLab, con cui sono state effettuate tre diverse simulazioni, in accordo con il Tutore:

- Una prima al 100% della potenza nominale del trasformatore
- Dalle fatture mensili dell'anno 2008 si è diviso il periodo annuale in due parti con una differenza di potenza assorbita ben distinguibile: quella invernale e quella estiva, procedendo a una simulazione per ciascuna di esse.

Nel §capitolo 4 vengono esposti i dati tecnici dei componenti e le modalità di calcolo utilizzate per la simulazione attraverso MatLab.

## **2.4 Cabina secondaria 400/230V all'interno del laboratorio di macchine utensili dell'ITIS Marconi (cabina n°2)**

Nel laboratorio di macchine utensili dell'istituto "Marconi" di Padova, in cui studenti e docenti lavorano alcune ore del giorno, vi è un trasformatore bt/bt e il relativo quadro elettrico. Il trasformatore è stato recuperato e riutilizzato durante il lavoro di messa a norma dell'impianto elettrico da parte della Provincia. Infatti si era deciso di innalzare la tensione dell'impianto al valore standard 400/230V, ma le macchine utensili del laboratorio in questione e di un altro laboratorio vicino, sono costruite per una tensione minore e la loro conversione richiederebbe uno sforzo economico considerevole. Siccome tale trasformatore è collocato in un box posto in prossimità di una parete, si è voluto

accertare quale livello di induzione magnetica ci fosse attorno e verificare se fosse necessario utilizzare qualche soluzione per abbatterne l'intensità. Si è estesa l'osservazione anche alla blindo sbarra posta ad un'altezza di circa quattro metri entro lo stesso gruppo di locali. Quindi l'analisi ha riguardato:

- ✓ Trasformatore
- ✓ Blindo sbarra
- ✓ Quadro elettrico
- ✓ Cavi di collegamento

Il box trasformatore e il quadro generale hanno le dimensioni riportate nella *Tabella 2.4*:

*Tabella 2.4: Dimensioni di alcuni oggetti all'interno della cabina del laboratorio*

<b>Box trasformatore</b>	2000 X 2000 X h2000 [mm]
<b>Quadro elettrico</b>	1000 X 1000 X h2000 [mm]

Nella *Figura 2.3* sono raffigurate le pensiline metalliche in cui sono alloggiati i cavi che entrano ed escono dai quadri e dal trasformatore, le macchine utensili del laboratorio, la targa del trasformatore ed infine le blindosbarra.

*Figura 2.3: Alcune immagini del laboratorio di macchine utensili dell'istituto "Marconi"*



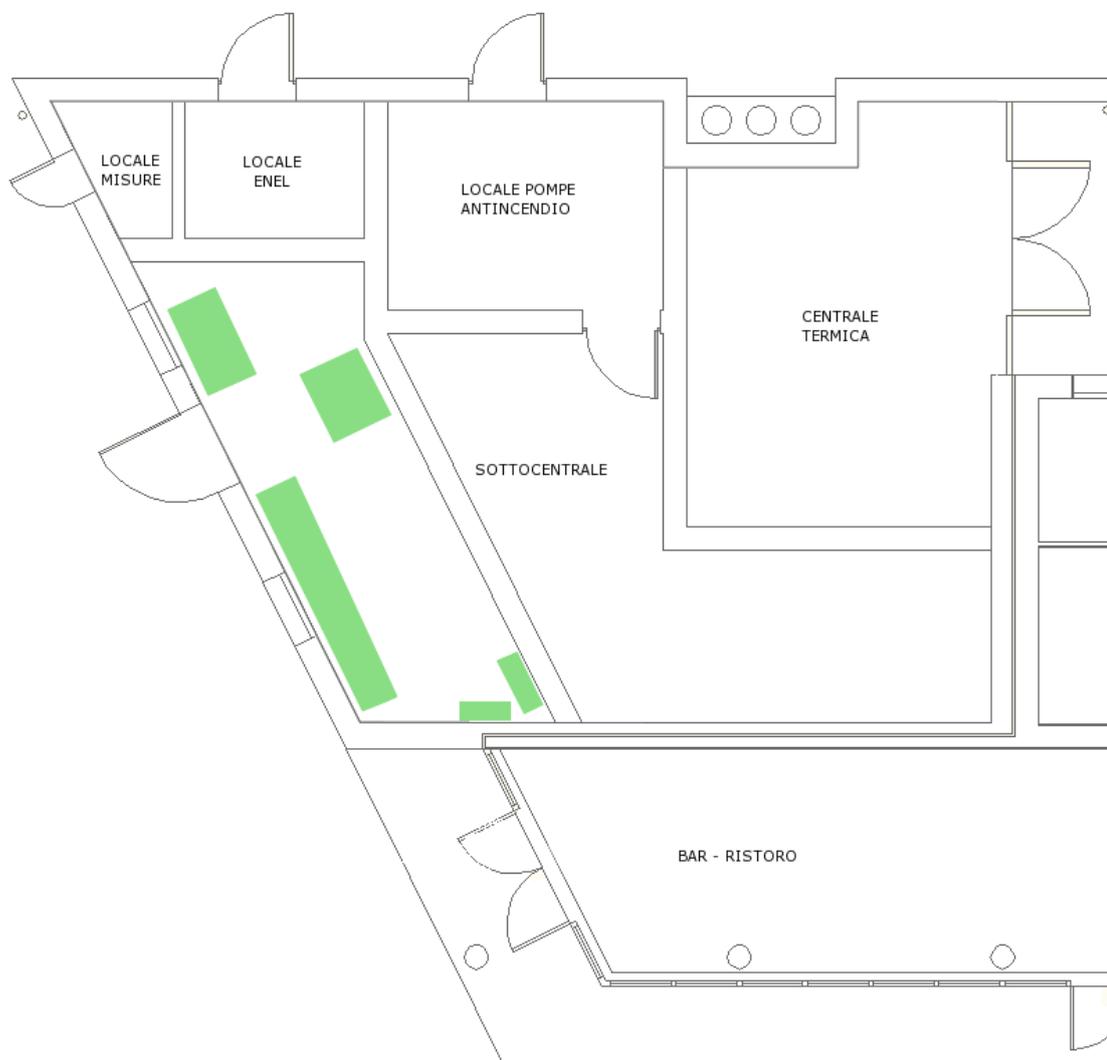


Per questo impianto si è operato con il seguente metodo:

- Sopralluogo per prendere visione della topografia dell'impianto
- Misurazione, con pinza amperometrica, delle correnti nelle tre fasi in entrata e in uscita dal trasformatore
- Stima della potenza assorbita dai carichi
- Modellizzazione e simulazione

Per la descrizione dettagliata si rimanda al quarto capitolo.

### 2.5 Cabina MT/BT presso l' istituto "Ferrari" (cabina n°3)



*Figura 2.4: Pianta del locale cabina e in evidenza gli oggetti elettrici considerati nella simulazione*

La cabina dell'istituto "Ferrari" di Este, la cui pianta è riportata in *Figura 2.4*, è stata analizzata in base alle indicazioni ed ai dati di progetto (il progettista è lo stesso Tutore).

In esso sono rappresentati gli elementi della cabina, la loro disposizione e le loro caratteristiche elettriche. Il carico, non avendo nessun dato reale misurato in loco, è stato ipotizzato assieme al Tutore ed è stato scelto pari alla potenza nominale del trasformatore. Attraverso tale scelta ci si è riportati al caso di maggiore interesse rispetto alla sicurezza degli utenti e dei studenti della medesima scuola. Oltre all'analisi della distribuzione delle linee di campo prodotte dalla cabina, è stato preso in esame il comportamento dei cavi uscenti dal locale, dato che, essendo percorsi da correnti considerevoli, attraversano un locale adibito alla ristorazione.

Anche in questa occasione la cabina non è costituita dai soliti componenti essenziali riassumibili in trasformatore – quadro MT – quadro BT, ma si trovano altri quadri per la sicurezza e per la gestione separata di alcune parti della scuola. Questo è stato motivo di un'analisi dei quadri e la scelta dei soli da inserire nella simulazione che potrebbero dare un contributo significativo alla generazione dell'induzione elettromagnetica trascurando quelli attivabili solo in alcune situazioni di avaria.

Il volume dei componenti è stato ripreso dai dati forniti dai disegni progettuali per far sì che la disposizione e l'ingombro fossero il più possibili simili alla reale configurazione. È stato necessario fare un'eccezione per quanto riguarda la geometria del locale. Infatti dalla figura si possono notare che essa ha pareti inclinate e purtroppo non riproducibili attraverso il software creato. Siccome tali pareti non influenzano il calcolo dell'induzione magnetica, allora si è semplificato tale locale come se fosse rettangolare e maggiorando alcuni lati per far sì che la disposizione interna fosse come quella reale. Dopo l'analisi matematica, sono state prelevate le linee isovalore dell'induzione magnetica e sono state riportate sul disegno di progetto del locale.



# Capitolo 3

## Modifica del programma di simulazione

### 3.1 Introduzione

Come descritto nel §2.1, le cabine MT/BT hanno in comune alcuni componenti elettrici, quindi una loro modellizzazione sarebbe sufficiente per poter poi simulare ed analizzare diverse tipologie di cabine, anche non standardizzate. È vero però che alcune cabine di trasformazione vengono realizzate in base all'esigenza del committente, un esempio è la cabina allocata nel seminterrato della terza torre della Provincia di Padova. Essa, come vedremo nel capitolo successivo, non ha solo una particolare costruzione e allocazione dei quadri, ma presenta al suo interno diversi componenti per la protezione e per la continuità dell'esercizio anche in condizioni anomale. Tali componenti sono comunque interessati da correnti minori rispetto a quelle richiamate dal quadro di bassa tensione, oppure si attivano solo in condizione di anomalia dell'impianto. Per questo motivo sono state tralasciate e sono stati presi in considerazione gli elementi principali come il quadro di bassa, di media, il trasformatore e i collegamenti tra questi oggetti.

Basandosi sulle routine elaborate dallo studente Casagrande, sono state aggiunte l'analisi dei piani mancanti, così è possibile analizzare sezioni verticali oltre a quella parallela al piano del pavimento. Tale analisi porta a una semplificazione per quanto riguarda l'osservazione dei campi generati da cavidotti o da blindo sbarre presenti nella cabina. Ampliando l'analisi su tutti i piani dello spazio si è reso necessario anche un raggruppamento intelligente e chiaro degli output della simulazione.

La valutazione dell'efficacia delle routine è stata effettuata e descritta nella tesi dell'Ing. Casagrande. I risultati delle routine sono affetti da errori dovuti, in particolare, alla posizione non perfettamente corrispondente al layout della cabina reale. Infatti il percorso dei cavi e la loro distanza sono alcune volte non del tutto visibili. Lo stesso vale per la curvatura che ovviamente è stata trascurata per la complessità della sua rappresentazione.

L'effetto degli errori si fa sentire maggiormente nelle regioni in cui il gradiente di campo è particolarmente elevato (solitamente nelle immediate vicinanze della sorgente, entro poche decine di centimetri in cui il gradiente può raggiungere anche  $30 \mu\text{T/m}$ ), perché una piccola imprecisione può portare ad errori anche del 50 – 100%. Siccome l'obiettivo dell'analisi è focalizzato a osservare il valore dell'induzione al di fuori della cabina e definire una “distanza di rispetto” della stessa, si ricadrà nella valutazione dell'induzione magnetica in punti all'esterno del locale cabina, caratterizzati da gradienti non particolarmente elevati (che possono raggiungere al massimo valori di  $3 - 4 \mu\text{T/m}$ ) minimizzando gli errori di valutazione.

### 3.2 Inserimento dati e creazione del file dati

Per ricostruire il locale cabina e posizionare gli oggetti al suo interno è necessario conoscere la loro reale posizione spaziale e il loro ingombro ed inserire le coordinate spaziali nella prima pagina del foglio elettronico con estensione “.xls”. E' necessario inserire le grandezze elettriche che descrivano l'oggetto e serviranno poi al programma per calcolare l'induzione magnetica da loro generata. Nella seconda pagina del foglio elettronico vi saranno tutte le informazioni precedentemente inserite ma automaticamente riscritte per essere copiate nel file input utilizzate da Matlab, file di estensione “.m”.

Brevemente le routine consentono di:

- Inserire le dimensioni di visualizzazione e il dominio di calcolo;
- Inserire i trasformatori (al massimo due con caratteristiche indipendenti);
- Inserire uno o più collegamenti trifasi con la loro relativa distanza tra le fasi, con neutro o senza e l'intensità di corrente che vi circola (anche il loro squilibrio);
- Inserire uno o più quadri di media tensione in base alla tipologia e alle correnti assorbite;
- Inserire i quadri di bassa o altri quadri definendo solo il loro posizionamento.

Il calcolo dell'induzione magnetica avviene:

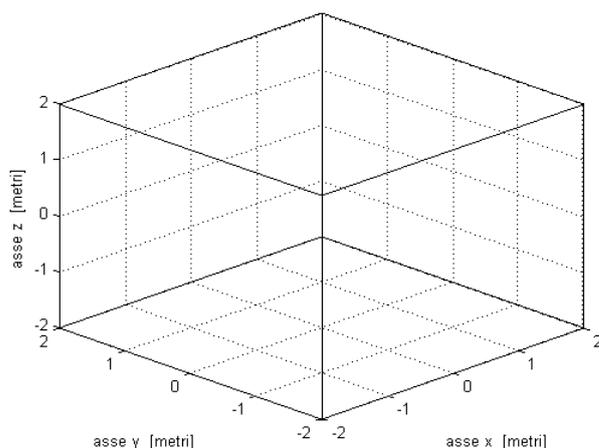
- Su tutti i piani dello spazio, ovvero sui piani XY, YZ e XZ definiti dal dominio di calcolo ed è rappresentata da linee isolivello;
- Su punti che giacciono su una o più direttrici parallela agli assi cartesiani.

Nell'allegato A è possibile osservare come si presenta il file “Dati.xls” una volta aperto.

### 3.3 Definizione della cabina e del suo dominio di calcolo

I dati relativi alla cabina devono essere inseriti all'interno di un foglio elettronico inserendo gli elementi nei campi contrassegnati in colore verde. In primis devono essere inseriti i dati inerenti alle dimensioni del volume di visualizzazione, ricordando che ogni grandezza è riferita al baricentro dello spazio costituito dagli assi cartesiani. Ad esempio se si sceglie come centro del volume l'origine degli assi e come lunghezza, altezza e profondità del volume di 4 metri, allora otterremmo una lunghezza di 2 metri prima e

dopo l'origine degli assi. Di seguito viene riportato l'esempio.



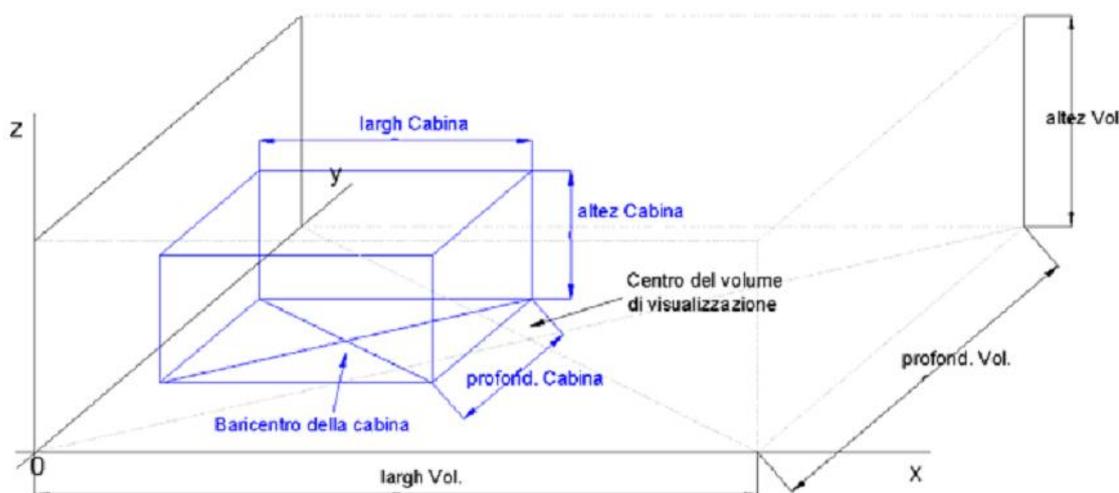
**Centro della base del volume di visualizzazione**

X	Y	Z
0	0	0

**Dimensioni del volume di visualizzazione:**

Larghezza	4
Profondità	4
Altezza	4

Lo stesso principio vale al momento dell'inserimento del volume della cabina elettrica e nella *Figura 3.1* sono riassunte graficamente le coordinate e le grandezze da inserire.



*Figura 3.1: Dati e coordinate in ingresso, per il programma di simulazione, dello spazio della cabina*

A questo punto viene chiesto d'inserire le caratteristiche delle superfici piane in cui si vuole effettuare il calcolo dell'induzione magnetica; sono superfici parallele ai piani XY, YZ ed XZ i cui baricentri sono individuati dalle coordinate  $x, y, z$ , mentre la loro estensione fa riferimento alla lunghezza attribuita a ogni lato del poligono. Il calcolo sarà effettuato su una griglia costituita da punti, che giace su tale superficie, la cui densità è pari a quella attribuita al numero di divisioni con cui si discretizza i lati di tale area; ovviamente più è fitta la griglia di calcolo più sarà lento il calcolo.

Possono essere inserite anche delle direttrici (parallele a uno degli assi dell'area di calcolo) lungo le quali si vuole effettuare il calcolo dell'induzione magnetica; anche qui deve essere precisata la densità dei punti di calcolo. Questo è utile se si vuole osservare il profilo dell'induzione generata da un componente elettrico. La prima riga della tabella si riferisce alla coordinata  $x$  del punto in cui inizia la direttrice ( $x_i$ ) e il punto in cui termina ( $x_f$ ). Analogamente per le altre righe riferite alle coordinate  $y$  e  $z$ . Come detto precedentemente si devono inserire le coordinate del baricentro della base della cabina e si prosegue con le dimensioni del locale, infine s'inserisce lo spessore delle pareti.

### 3.4 Trasformatori trifase

Completata questa prima parte si passa a tutto ciò che riguarda l'inserimento e la descrizione dei componenti elettrici. Inizialmente devono essere specificati i livelli di tensione a cui opera la cabina, ovvero il lato di alta e di bassa tensione del trasformatore. Successivamente si devono inserire i dati del trasformatore o dei trasformatori alloggiati in essa:

- nel campo "Inserisci il trasformatore nel calcolo" si digita "1" se si vuole inserire il contributo del trasformatore, mentre si digita "0" se lo si vuole escludere;
- la potenza nominale deve essere un valore normalizzato tra i seguenti: 100, 160, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2500 kVA;
- nella casella relativa alla tipologia di trasformatore, si digita "1" per il trasformatore in olio, mentre si digita "2" per il trasformatore in resina.
- Nel riquadro inerente lo squilibrio delle correnti s'inseriscono in percentuale lo squilibrio nelle tre fasi

A questo punto le correnti erogate dal trasformatore vengono calcolate in automatico dal software di simulazione; lo stesso vale per il lato MT. Di seguito viene riportata la *Tabella 3.1* con i dati da inserire per ogni tipologia di trasformatore

Tabella 3.1: Tipologie di trasformatori presenti all'interno del software di simulazione

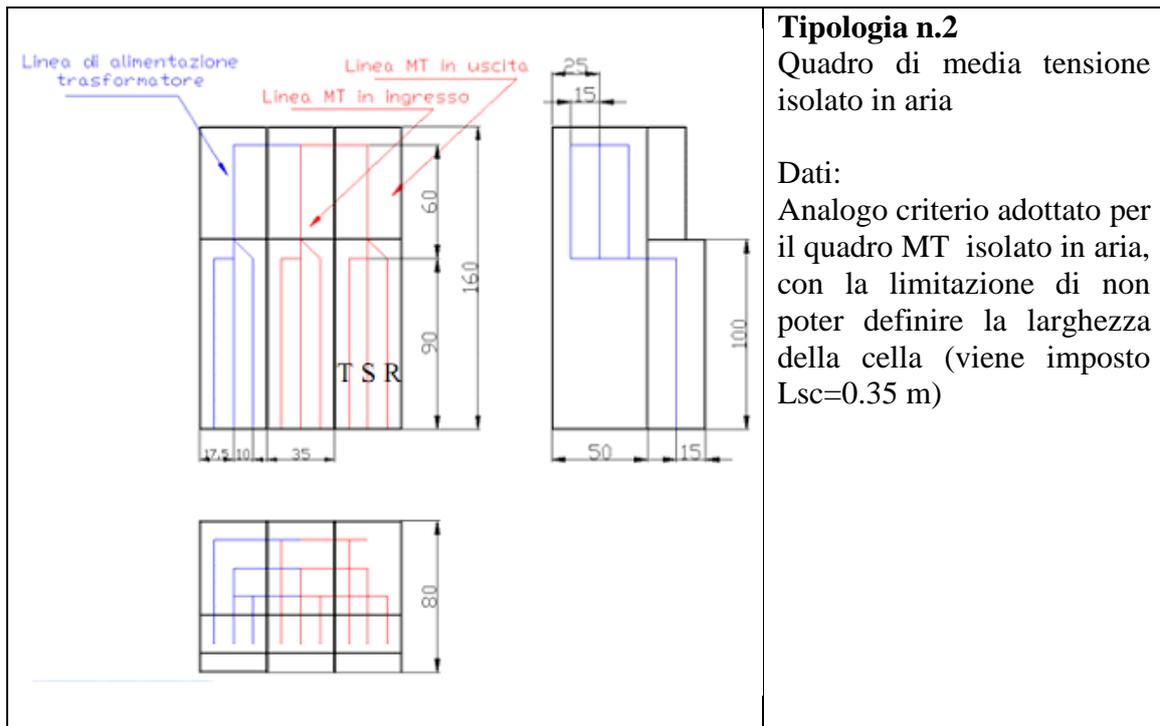
	<p><b>Tipologia n.1</b>          Trasformatore isolato in olio (100÷2500 kVA)          Dati:          -Potenza nominale;          -Posizione dell'asse del trasformatore (x,y,z);          -Inclinazione in senso antiorario del lato maggiore del trasformatore rispetto all'asse x.          -Grado di carico del trasformatore inteso come:</p> $\frac{S}{S_N} = \frac{\sqrt{3}V_N I}{\sqrt{3}V_N I_N}$ <p>- Squilibrio, tra le correnti erogate dalle fasi, espresso in percentuale rispetto al valore di corrente utilizzato per valutare il grado di carico.          - Sequenza degli angoli di fase delle varie bobine (ad esempio 0 120 e 240 rispettivamente per la fase U V e W)</p>
	<p><b>Tipologia n.2</b>          Trasformatore isolato in resina (100÷2500 kVA)          Dati:          Analogo criterio adottato per il trasformatore in olio</p>

### 3.5 Quadri di media tensione

Ora si possono inserire i dati relativi ai quadri di media tensione, ai quadri di bassa e ai collegamenti. Dato che nelle cabine di trasformazione MT/BT il numero dei quadri di media è limitato, allora l'inserimento del numero dei quadri MT è limitato ad un massimo di quattro unità. Nella prima colonna, "Inserisci nel calcolo", si digita "1" se sì, mentre "0" se non si vuole includere il contributo del quadro; i restanti parametri si riferiscono alla posizione del quadro. La distinzione di questi quadri viene effettuata in base alla tipologia dell'isolamento (SF6 o in aria). La diversità dell'inserimento dei dati riguardante questi quadri sono espone nella *Tabella 3.2*.

*Tabella 3.2: Tipologie di quadri MT presenti all'interno del software di simulazione*

<p>The diagram illustrates the layout of a medium voltage cabinet (MT) in three views:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><b>Top View:</b> Shows the cabinet's footprint with dimensions 180 and 200. It features a red rectangle for the 'Linea MT in ingresso' (input line) and another red rectangle for the 'Linea MT in uscita' (output line). A blue vertical line indicates the 'Linea di alimentazione trasformatore' (transformer supply line). Horizontal dimensions are labeled as <math>L_{sc}</math> and <math>L_{sc}/2</math>.</li> <li><b>Side View:</b> Shows the cabinet's profile with a height of 180 and a width of 100. It contains two vertical red bars representing busbars, with a 50-unit gap between them.</li> <li><b>Front View:</b> Shows the busbar arrangement with three phases labeled T, S, and R. The busbars are colored red and blue, corresponding to the input and output lines.</li> </ul>	<p><b>Tipologia n.1</b>          Quadro di media tensione isolato in aria</p> <p>Dati:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Posizione dell'asse del quadro (x,y,z);</li> <li>-Inclinazione del lato maggiore del quadro rispetto all'asse x;</li> <li>-Larghezza della cella che costituisce ciascun comparto (<math>L_{sc}</math>);</li> <li>-Corrente di MT in ingresso;</li> <li>-Corrente di MT assorbita dal trasformatore;</li> <li>-Sequenza degli angoli di fase delle sbarre (ad esempio 0,120 e 240 rispettivamente per la sbarra R, S e T)</li> </ul>
---	---



### 3.6 Quadri di bassa tensione

E' presente anche una tabella relativa ai quadri di bassa tensione ma, inserendo i dati con lo stesso principio relativo ai quadri di MT, non s'introduce nessuna sorgente di campo ulteriore. Si ottiene solo la rappresentazione grafica dell'ingombro del quadro, mentre le sbarre al suo interno possono essere rappresentate da un semplice prolungamento dei terminali dei cavi che vanno a collegarsi al quadro stesso. Attraverso tale inserimento dei quadri risulta semplice inserire una notevole varietà di dispositivi che possono essere presenti nelle cabine non standardizzate. Ovviamente si deve conoscere o perlomeno avere un'idea della disposizione dei cavi all'interno di tali oggetti.

### 3.7 Conduttori

L'ultima sezione da compilare riguarda il collegamento dei cavi; a tale scopo si utilizza una tabella in cui si devono inserire i parametri secondo un certo schema:

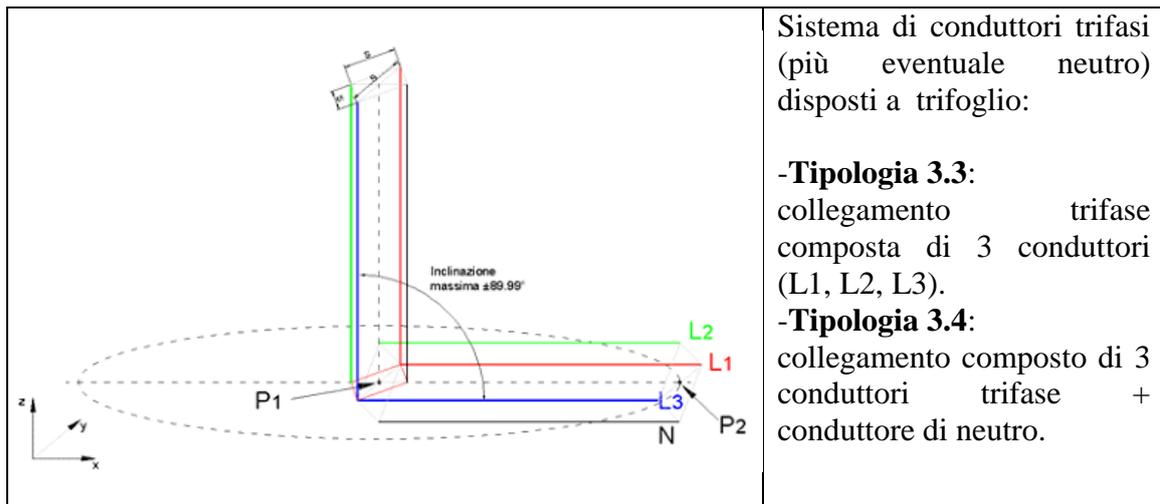
- nella casella "Numero del collegamento" va inserito un numero progressivo e consecutivo, a partire dal numero 1, per tutte le righe che riguardano quello specifico tratto;
- nella casella "Tipo di collegamento" s'inserisce il numero relativo alla tipologia di linea trifase desiderata;

- La “distanza tra le fasi” (tra due fasi adiacenti) si esprime in metri (es. 0.05);
- “Corrente” è il valore efficace della corrente che trasporta la linea trifase;
- le tre caselle “L1 L2 L3” vanno compilate con la sequenza di fase in gradi (ad es. 120 0 240);
- “Carico fase \* ” è il valore percentuale della corrente che circola nella fase \*, rispetto alla corrente precedentemente impostata (valido quando si hanno cariche squilibrate).
- “X1 Y1 Z1” sono le coordinate spaziali del primo estremo del collegamento; di conseguenza gli altri punti toccati dal collegamento avranno altre coordinate spaziali che devono essere riportate in seguito. Tra due punti consecutivi si crea un tratto rettilineo di linea trifase della tipologia scelta. Il verso della corrente va da P1→P2→Pi.

Non si devono lasciare linee vuote altrimenti si riscontreranno malfunzionamenti nella rappresentazione dei collegamenti durante le simulazioni. Nella *Tabella 3.3* vengono riassunte in forma tabellare e grafica le istruzioni elencate in questo paragrafo:

*Tabella 3.3: Tipologie del posizionamento dei cavi presenti all'interno del software di simulazione*

	<p>Sistema di conduttori trifasi (più eventuale neutro) disposti in un piano orizzontale:</p> <p>-<b>Tipologia 1.3:</b> collegamento trifase composta di 3 conduttori (L1, L2, L3).</p> <p>-<b>Tipologia 1.4:</b> collegamento composto di 3 conduttori trifase + conduttore di neutro</p>
	<p>Sistema di conduttori trifasi (più eventuale neutro) disposti in un piano verticale:</p> <p>-<b>Tipologia 2.3:</b> collegamento trifase composta di 3 conduttori (L1, L2, L3).</p> <p>-<b>Tipologia 2.4:</b> collegamento composto di 3 conduttori trifase + conduttore di neutro.</p>



Una volta compilato il primo foglio, del foglio elettronico d'inserimento dati, ci si porta sul secondo foglio di lavoro dove sono state automaticamente trasferiti i parametri impostati precedentemente, in un formato che le routine di MatLab possono riconoscerlo. Si "Seleziona Tutto" il foglio di lavoro, lo si "Copia", lo si "Incolla" come file di testo nell'editor di MatLab e lo si salva con un nome a piacere in formato \*.m nella directory dove sono contenute le routine. A questo punto ci si porta nel Command Windows di MatLab, ci si porta nella directory in cui sono state salvate le routine, e digitando "CABINA", appare la richiesta di inserire il nome del file dati; inserire il nome del file precedentemente salvato (non è necessaria l'estensione) e premendo invio si comincia la procedura di calcolo, durante la quale passo passo viene elencata la progressione delle operazioni con descrizione di alcuni parametri che caratterizzano ciascun componente inserito nella cabina.

Al termine, come risultato, si ottiene:

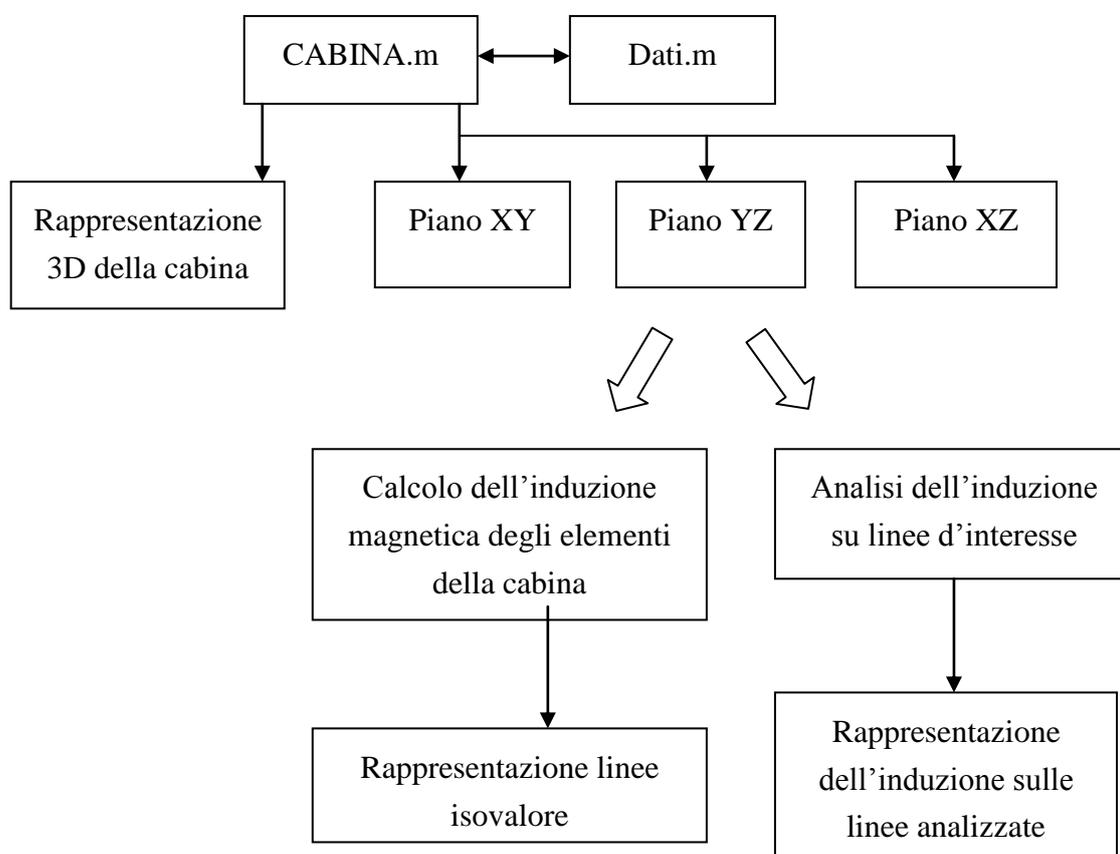
- Figura n.1: Rappresentazione tridimensionale della cabina;
- Figura n.2: Rappresentazione in pianta della cabina con tracciatura delle linee equicampo di induzione magnetica B;

Figura n.3: Tracciatura su sistema di assi cartesiani dell'induzione magnetica calcolata lungo la direttrice 1, 2...;

### 3.8 Ampliamento piani di analisi

L'analisi del solo piano orizzontale è parsa restrittiva per la conoscenza dell'andamento dell'induzione magnetica dei componenti all'interno della cabina. Sono nate delle necessità, durante l'attività di analisi delle cabine presso la Provincia, per la valutazione

dell'andamento dell'induzione in piani ortogonali rispetto alla percorrenza dei cavi. Ad esempio ci si è trovati di fronte all'analisi del campo generato da cavi alloggiati su una passerella che percorreva tutta la lunghezza di un locale adibito alla ristorazione all'interno di una scuola. Per un avanzamento delle capacità del software e per la facilitazione in analisi future, sono state implementate routine per l'analisi dei piani XZ e YZ (con XY il piano parallelo al pavimento). Prendiamo come riferimento una cabina di cui si voglia conoscere l'andamento dell'induzione magnetica sul piano XZ. Per capire come vengono elaborati i dati dalle routine ci può aiutare uno schema riassuntivo delle chiamate dei sottoprogrammi.



Lo schema semplifica molto le chiamate alle subroutine, infatti il programma completo è costituito da 35 sottoprogrammi ai quali si devono aggiungere il file dati e la routine madre. Sarebbe comunque facilmente possibile in futuro raggruppare alcune subroutine e limitarne notevolmente il numero. Questa operazione non è stata fatta per ottenere un software di elaborazione modulare tale da rendere facile l'individuazione di bug per poterli poi correggere. Nei paragrafi successivi verrà presa in considerazione l'analisi di un piano e verranno illustrate le modalità di analisi e di calcolo.

### 3.9 Analisi del piano XY

Prendiamo un qualsiasi piano su cui si voglia visualizzare l'andamento dell'induzione magnetica, in questo caso il piano XY, e vediamo come si opera su tale piano riportando degli spezzoni di routine. Partiamo con la chiamata dalla routine madre (CABINA.m):

```
if piano_di_calcolo(1,2)==1
    pianoXY;
end
```

nella matrice contenete i dati dei piani da analizzare viene letto il valore degli elementi, ogni elemento rappresenta quale piano analizzare e se vi è un 1 allora si continua nella porzione della routine in cui si fa riferimento a quel piano. Ora il piano viene analizzato come se fosse una griglia dividendolo con un certo numero di righe e un certo numero di colonne su cui vi saranno dei punti di analisi pari a quelli stabiliti dal file dati.

```
if piano_di_calcolo(1,1)==1
    xc=linspace(XYSezOriz(1,1),XYSezOriz(1,2),divx);
    yc=linspace(XYSezOriz(2,2),XYSezOriz(2,1),divy);
    zc=Hcalc*ones(divy,divx);
    [Xc,Yc]=meshgrid(xc,yc);
    divrig=divy;
    divcol=divx;
    [...]
```

Hcalc è l'altezza in cui si trova il piano, ovvero l'altezza di calcolo. Se xc e yc sono i vettori che contengono i punti di analisi del piano, zc invece, è la matrice in cui verranno inseriti tutti i valori dell'induzione e ogni posizione nella matrice, corrisponde a un punto della griglia. Successivamente avvengono le chiamate alle subroutine per il calcolo dell'induzione di ogni elemento. La trattazione della modellizzazione dei componenti elettrici è già stata affrontata nella tesi di Casagran Paolo, ci limitiamo ad analizzare come operano le subroutine per il calcolo vero e proprio dell'induzione magnetica. Prendiamo la chiamata per il calcolo dell'induzione dei trasformatori:

```
CALCOLOBTRASFORMATORI
```

Essa contiene una serie d'istruzioni per chiamare altre subroutine per il calcolo sugli avvolgimenti e sui morsetti ed infine ne fa la somma. Riportiamo la parte di questa chiamata:

```

if includiT1NelCalcolo==1;
    BXYZTRA=zeros(divrig,3*divcol);
    Trasformatore=1;
    CARICADATITRAFO

    if includiAvvolg==1
        calcBavvolg2
    end
    BavvolgTRA1=BXYZTRA;
    if UsciteBT==1
        BXYZMorsBT=zeros(divrig,3*divcol);
        fprintf(['\n          Calcolo dell induzione magnetica generata
dalla morsettiera BT\n']);
        calcBmorsetti
        BXYZMorsBT1=BXYZMorsBT;
    else
        BXYZMorsBT1=zeros(divrig,3*divcol);
    end
    BXYZTRA1=BavvolgTRA1+BXYZMorsBT1;
else
    fprintf(['\n*****\n']);
    fprintf(['\nTrasformatore n.1 non incluso nel calcolo\n']);
    BXYZTRA1=zeros(divrig,3*divcol);
end
end

```

nella seconda riga (`BXYZTRA=zeros(divrig,3*divcol)`) viene creata una matrice di zeri con un numero di righe pari a `divrig` mentre le colonne vengono moltiplicate per tre poiché l'analisi viene svolta nello spazio, quindi con tre coordinate per ogni elemento. Se ora analizziamo la routine `calcBavvolg2` (calcolo dell'induzione magnetica nell'avvolgimento BT) si può vedere dove l'analisi dei piani si differenziano.

```

R=zeros(divrig,divcol);
Rxy=zeros(divrig,divcol);
Bs=zeros(divrig,divcol);
CosThe=zeros(divrig,divcol);
SenThe=zeros(divrig,divcol);
Bsr=zeros(divrig,divcol);
Bsth=zeros(divrig,divcol);
BsZ=zeros(divrig,divcol);
Bsxy=zeros(divrig,divcol);
BsX=zeros(divrig,divcol);
BsY=zeros(divrig,divcol);
%calcolo del momento magnetico del dipolo
mdipolo=(I12*pi*Raggio(1)^2)-(Isec*pi*Raggio(2)^2);
BXYZzavv=zeros(divrig,3*divcol);
for fase=1:3
    fprintf(['          Calcolo dell induzione prodotta dalla fase
',num2str(fase),' del trasformatore ',num2str(Ntrafo),'\n']);
    BXYZzfase=zeros(divrig,3*divcol);
    %calcolo del valore complesso della corrente di fase
    mcomplex=(squilRST(fase)/100)*mdipolo*(cos(fasi(fase)*pi/180)+j*si
n(fasi(fase)*pi/180));
    for sp=1:Nspire
        for c=1:divcol
            for r=1:divrig

```

```

if SezioneOriz==1
    PdB=[ xc(c) yc(r) zc(r,c) ];
    %punto in cui si calcola l'induzione
end
if calcoloLinea==1
    PdB=[ xc(c) yc(c) zc(c) ];
end
%distanza centro spira punto di calcolo
R(r,c)=sqrt((PdB(1)-asBob(fase,1))^2+(PdB(2)-
asBob(fase,2))^2+(PdB(3)-Hspire(sp))^2);
[...]
```

Dato che il piano analizzato si trova ad una certa altezza la “variabile indipendente” è proprio la coordinata z, quindi essa dovrà rappresentare una matrice che avrà un certo valore per ogni punto della griglia. Se volessimo analizzare il piano YZ o XZ, tale riga si modificherebbe rispettivamente come segue:

```

if piano_di_calcolo(1,3)==1
    PdB=[ xc(r,c) yc(c) zc(r) ];
end

if piano_di_calcolo(1,3)==1
    PdB=[ xc(c) yc(r,c) zc(r) ];
end
```

Tutte le routine per il calcolo dell’induzione vengono modificate in questo modo, mentre il calcolo vero e proprio viene effettuato traducendo nel linguaggio MatLab la teoria esposta nel §Capitolo 1.

### 3.10 Analisi su linee d’interesse

Il calcolo e la rappresentazione del magnetismo non si limita all’analisi di un piano dello spazio, ma può esserci l’esigenza di osservare solo il profilo a ridosso di un solo o più elementi elettrici dell’impianto. Per questo motivo è possibile analizzare anche solo una linea nello spazio e tracciare il profilo in un diagramma. Le routine in questione richiamano le stesse subroutine per il calcolo dell’induzione viste in precedenza, ma elimina tutti i valori della griglia tranne quelli che si riferiscono alla serie di punti che si vogliono analizzare.

```

BXYZSULinea=BXYZTRAFI+BXYZQUAMTtot+BXYZlinee;
BxL=BXYZSULinea(1,1:divLineaXY);
ByL=BXYZSULinea(1,divLineaXY+1:2*divLineaXY);
BzL=BXYZSULinea(1,2*divLineaXY+1:3*divLineaXY);
for punto=1:divLineaXY
```

```

BeffLinea(punto)=sqrt(((abs(BxL(punto)))^2)+((abs(ByL(punto)))^2)+
((abs(BzL(punto)))^2));
end

```

La parte di codice sopra descritta, riassume quello detto in precedenza. Dopo aver calcolato per ogni componente elettrico i valori di campo generati nel piano, vengono eliminati tutti i risultati tranne quelli sulla linea definita nel file dati

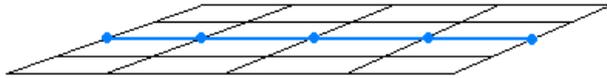


Figura 3.2: Punti non cancellati per l'analisi dell'induzione su una linea

(Figura 3.2). Rimasti solo gli elementi d'interesse viene calcolato

il valore efficace dell'induzione magnetica di ogni punto costituente la retta.

Siccome nel file dati possono essere espresse le coordinate di sette rette per ogni piano, sarebbe poco pratico avere una figura per ogni profilo calcolato. Si è scelto quindi di conglobare tutti i grafici in un'unica figura utilizzando la funzione subplot e modificando la grandezza della figura in base al numero dei grafici. Tale operazione è stata realizzata inserendo il seguente codice:

```

for indice=1:size(IncludiLineaXY,1)
    conta=conta+IncludiLineaXY(indice,1);
end
if conta==3
    num_rig_tot=num_rig_tot+1;
else if conta==5
    num_rig_tot=num_rig_tot+2;
    else if conta==7
        num_rig_tot=num_rig_tot+3;
    end
end
end

subplot(num_rig_tot,num_rig_tot,Calclin);

```

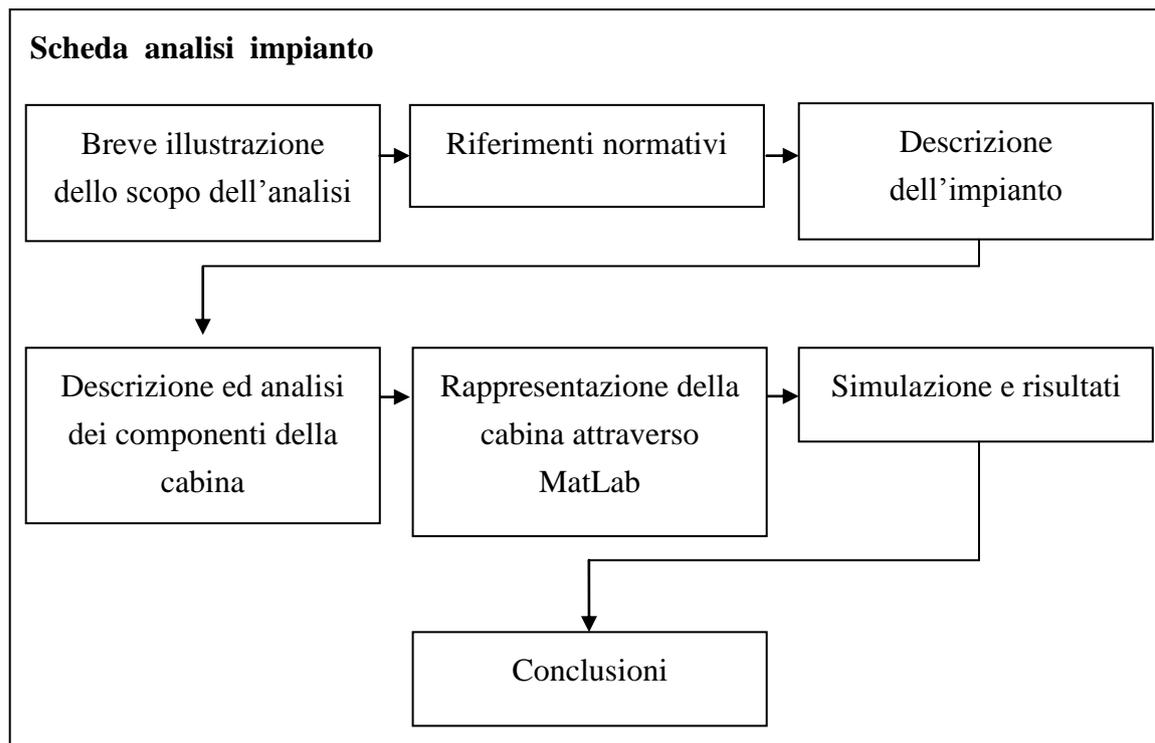
Con questa metodologia la figura risultante ha sempre e solo due colonne in cui vengono plottati i grafici, mentre il numero di righe aumenta in base al numero delle linee analizzate.

# Capitolo 4

## Analisi dell'andamento dei campi in alcune cabine MT/BT

### 4.1 Introduzione

Nei capitoli precedenti è stato illustrato l'approccio allo studio delle cabine. Come già accennato nel §Capitolo 2, nei seguenti paragrafi verranno analizzati in dettaglio i tre impianti presi in esame nel corso del tirocinio presso la Provincia di Padova. Visto che non poteva esserci un sistema comune per ottenere le informazioni desiderate per le tre cabine, si è operato in maniera differente caso per caso, ricercando quello che fosse possibile ottenere o inserendo delle ipotesi qualora non fosse possibile fare altro. Tali ipotesi sono state concordate assieme al tutore aziendale, avvalendosi delle competenze derivate dagli anni di studio e di lavoro nell'ambito elettrico dell'ing. Calogero Collerone .Si può, invece, trovare uno schema comune nella stesura dei paragrafi relativi all'analisi dell'induzione magnetica degli impianti. L'obbiettivo è stato quello di creare una "scheda" che descrivesse in dettaglio ogni cabina, presentando non solo l'analisi vera e propria rispetto all'induzione generata, ma anche descrivendo ogni componente, i luoghi interessati e le norme che ne regolamentano la sicurezza. Lo schema seguito sarà quindi il seguente:



## 4.2 Andamento dell'induzione magnetica all'interno della cabina MT/BT della Terza Torre della Provincia di Padova

### 4.2.1 Scopo

L'obiettivo di quest'analisi è misurare i campi magnetici generati all'interno della cabina elettrica MT/BT posta nel seminterrato della terza torre, in zona Stanga, di proprietà della Provincia di Padova. La cabina è situata in un locale di altezza inferiore al piano della strada; al piano superiore del locale adibito per la cabina vi è l'archivio; lateralmente vi è il parcheggio e il locale per il gruppo elettrogeno.

### 4.2.2 Riferimenti normativi

**Norma CEI 106-12: "Guida pratica ai metodi e criteri di riduzione dei campi elettromagnetici prodotti dalle cabine elettriche MT/BT"**. La Guida si propone di fornire i criteri progettuali generali e di indicare le soluzioni tecniche realizzative per contenere i campi magnetici a 50 Hz prodotti dalle cabine secondarie MT/BT.

**Guida CENELEC CLC/TR50453: "Evaluation of electromagnetic fields around power transformers"**. Propone una guida per la valutazione dei campi elettromagnetici

attorno ai trasformatori di Potenza. Si applica ai trasformatori idonei alla EN 60076 e che appartengono al range di Potenza  $5 \text{ kVA} \leq P \leq 1000 \text{ MVA}$ .

**D.Lgs. 81/2008.** In sintesi il Decreto Legislativo 9 aprile 2008, n° 81, prescrive che il datore di lavoro deve valutare e, quando necessario, calcolare i livelli dei campi elettromagnetici ai quali sono esposti i lavoratori, in particolare devono essere monitorati i campi secondo due parametri:

- Valori di azione (che farà scattare gli obblighi previsti dalla normativa);
- Valori limite di esposizione (che rappresenta il valore massimo di esposizione per il lavoratore)

Nell'Allegato XXXVI – Lettera B – Tabella 2, vengono riportati i valori limite di Azione, ovvero i valori di campo elettrico, campo magnetico e induzione magnetica oltre i quali il datore di lavoro deve redigere la valutazione del rischio da campi elettromagnetici. Nella fascia di frequenza in cui rientrano gli impianti a 50 Hz, i valori limiti del campo elettrico, campo magnetico e induzione magnetica sono rispettivamente:

*Tabella 4.1: Limiti di azione*

<b>Campo elettrico [kV/m]</b>	<b>10</b>
<b>Campo magnetico [A/m]</b>	<b>400</b>
<b>Induzione magnetica [<math>\mu\text{T}</math>]</b>	<b>500</b>

**DPCM 8 Luglio 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 elettrodotti”.**

Non si applica ai lavoratori esposti per ragioni professionali, ma solo per gli abitanti, per i quali prevede i seguenti limiti:

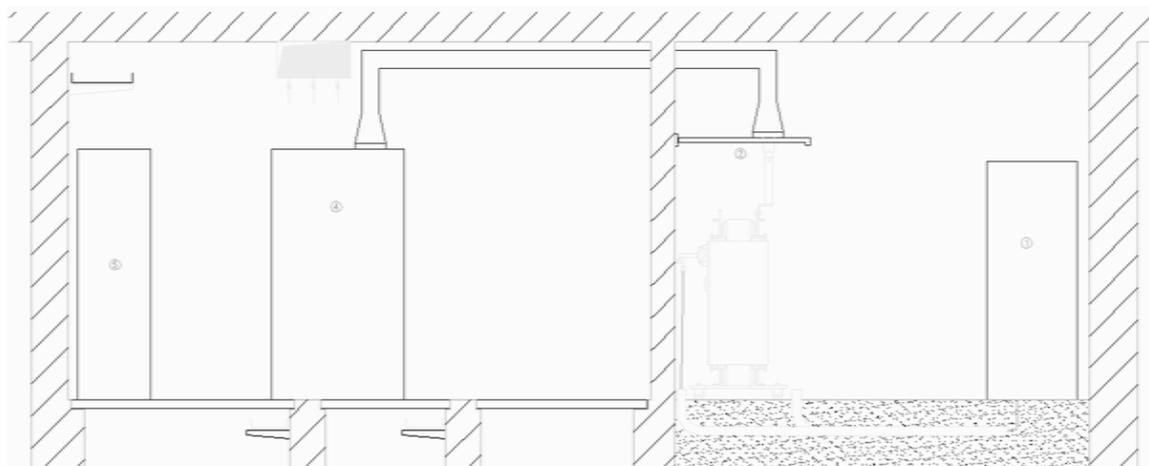
Frequenza 50 Hz	<b>Intensità del campo elettrico E (kV/m)</b>	<b>Induzione magnetica B (<math>\mu\text{T}</math>)</b>
<b>Limite di esposizione *</b>	5	100
<b>Valore di attenzione **</b>	-	10
<b>Obiettivo di qualità **</b>	-	3

\* Valori efficaci

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

### 4.2.3 Descrizione dell'impianto

La cabina è composta da 2 locali. Non ha una configurazione tipica delle cabine MT/BT perché essendo situata all'interno di un palazzo, la sua struttura è stata studiata appositamente per i locali dedicati ad essa. Nel primo troviamo i due trasformatori di potenza in resina con le loro centraline di rifasamento, frontalmente è posto il quadro di media tensione la cui alimentazione proviene da cavi che scendono dal soffitto del locale. Ognuno dei due trasformatori è alloggiato all'interno di un box costituito da una recinzione protettiva in acciaio per la protezione contro i contatti diretti. Il collegamento tra il quadro di media e i trasformatori è posto al di sotto del pavimento ad una profondità di circa 30cm. Dal secondario dei trasformatori partono due sbarre che si elevano e passano attraverso la parete per terminare nel locale adiacente dove si trovano i quadri di bassa tensione. In questo secondo locale, sono presenti due aree: la prima detta area di bassa tensione dove oltre ai quadri BT sono presenti i quadri di servizio ausiliari; nella seconda area, detta area di sicurezza, troviamo un soccorritore da 20kVA, i quadri dei servizi di sicurezza e un gruppo di continuità con il relativo quadro. I cavi poggiano su una passerella a 30cm al di sotto del pavimento ed è possibile intervenire su di essi in caso di necessità in modo semplice grazie alla pavimentazione grigliata di tipo "orsogrill". Tutta questa complessità deriva dal fatto che il locale adibito per la cabina di trasformazione è stato studiato appositamente per riunire in un unico locale i quadri elettrici principali della palazzo. In ogni piano vi è una stanza in cui sono presenti il quadro di piano, i dispositivi di controllo dell'aria e le passerelle in cui alloggianno i cavi che si dirigono verso i piani superiori. Nella *Figura 4.2* si può osservare la pianta dall'alto dei due locali con i componenti elettrici citati precedentemente, mentre nella *Figura 4.1* si può osservare la stessa cabina lateralmente.



*Figura 4.1:* Vista dal fianco dei due locali che costituiscono la cabina



Figura 4.2: Planimetria della cabina

Siccome lo scopo è quello di osservare l'andamento dell'induzione magnetica all'interno della cabina e verificare che all'esterno siano presenti valori contenuti di tale induzione (come prescritto dalla normativa), è essenziale sapere se i locali affianco e sopra a tale cabina siano interessati dalla presenza di personale e per quanto tempo possono essere soggetti a tali campi. A fianco della cabina non sono presenti locali particolarmente frequentati (in un lato vi è un locale in cui è alloggiato di un gruppo elettrogeno ionizzato da 250kVA, mentre negli altri vi è un parcheggio e un corridoio). Nel piano superiore vi è un locale tecnico riguardante l'impianto termico, comunque non presieduto da persone per più di quattro ore.

#### 4.2.4 Trasformatore

Entrambi i trasformatori sono marcati TESAR modello TRC 1000, anno 2003. La potenza apparente è di 1000kVA e la frequenza di lavoro è ovviamente 50Hz. Dalla targa è possibile inoltre leggere:

- Raffreddamento è di tipo AN IP00.
- Il primario può essere alimentato a 2 tensioni:
  - 10±3×2.5% kV con corrente nominale di 57,7 A
  - 20±3×2.5% kV con corrente nominale di 28,9 A

- La tensione lato BT è di 400 V con una corrente erogata di 1443,4 A.
- La classificazione di temperatura è F 100°C
- I trasformatori sono del gruppo Dyn11.

Nel file “Dati.m” è stato costruito per più volte per simulare tre gradi di carico. Uno di

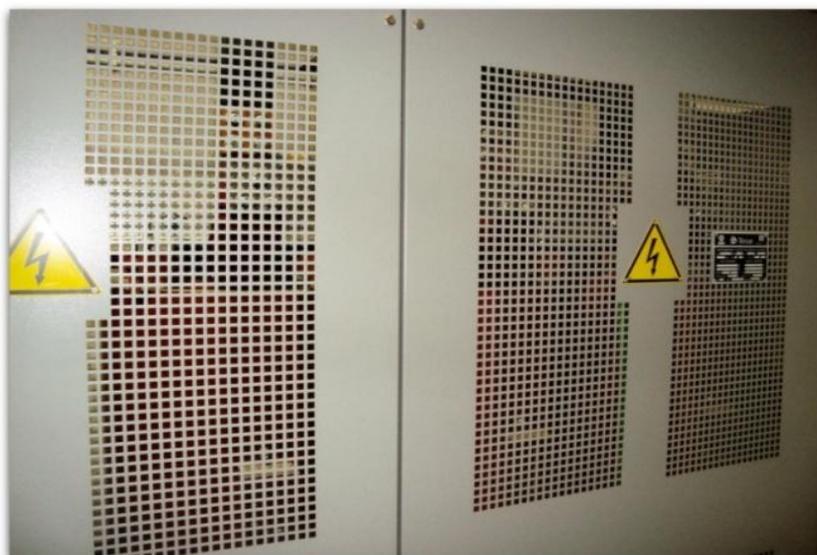
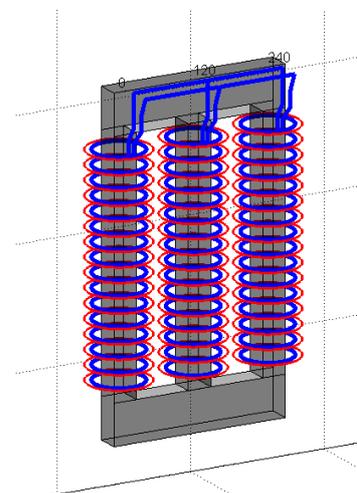


Figura 4.3: Foto dei box in cui alloggiano i trasformatori

questi prevede l’uso del trasformatore al 100% della sua potenza nominale, mentre gli altri due sono stati studiati in base a una serie di bollette che riguardavano l’intero anno 2008. Due casi si riferiscono all’utilizzo invernale a quello estivo dato che in quest’ultimo periodo l’impianto di condizionamento assorbe una notevole potenza. Riepilogando i tre casi analizzati prevedono un grado di carico della macchina del:

- 32.8%
- 58.98%
- 100%

Con questi carichi sono state calcolate le correnti in ingresso ed in uscita dal trasformatore mediante le relazioni sottostanti e utilizzando come tensione primaria e secondaria rispettivamente di 10kV e 400V.

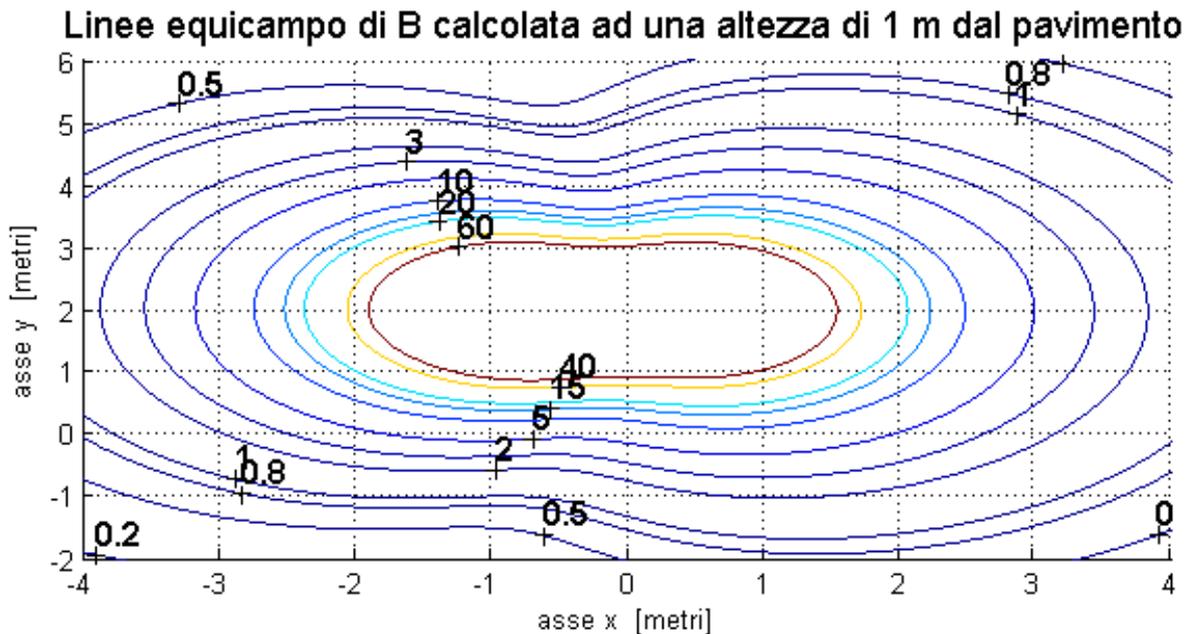


$$I_1 = \frac{S}{\sqrt{3} * V_1}$$

$$I_2 = I_1 * m$$

Carico [%]	I <sub>1</sub> [A]	I <sub>2</sub> [A]
32.8	18.93	473.42
58.98	34.05	851.3
100	57.73	1443.37

Nella *Figura 4.4* è riportato l'andamento dell'induzione magnetica generata dal trasformatore alla sua potenza nominale. Si nota che anche con una corrente elevata si ottiene una fascia di rispetto dall'asse della macchina di poco più di 2 metri, oltre la quale abbiamo valori minori di  $3\mu\text{T}$ . Questo succede grazie alla concentricità delle spire. Infatti un cavo rettilineo con correnti così elevate avrebbe prodotto un'estensione della fascia doppia rispetto a quella generata dal trasformatore. È stato tenuto in funzione solo la macchina operativa che tra l'altro è anche quella più vicina al corridoio.



*Figura 4.4:* Linee equicampo generate dal trasformatore

#### 4.2.5 Quadro di media tensione

Il quadro è protetto in aria a tenuta d'arco interno con apparecchiature isolate in SF6.

- Livello di isolamento nominale: 24kV
- Tensione nominale di esercizio: 20kV
- Frequenza: 50Hz
- Corrente nominale: 630A
- Ith1: 16 kA
- Grado di protezione: IP3X
- Verniciatura: Polveri epossidiche

La corrente in entrata ed in uscita è pari a quelle assorbite dall'avvolgimento primario del trasformatore.

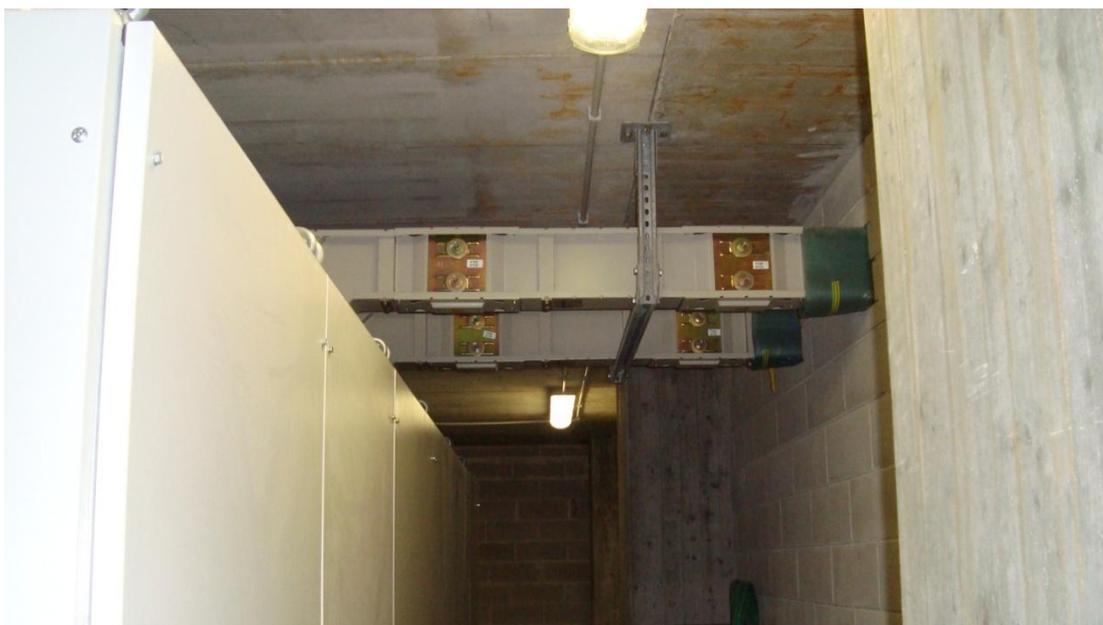
### 4.2.6 *Quadro di bassa tensione*

Il quadro di bassa tensione è diviso in due zone, una comanda e protegge i carichi privilegiati (in parallelo anche con un generatore) mentre l'altra quelli non privilegiati. La sezione privilegiata riguarda una blindo sbarra, il soccorritore, alcuni quadri tecnici e il rifasamento automatico. Di seguito vengono riportate le caratteristiche tecniche del quadro:

- Tensione nominale: 230/400 V
- Correnti e potenze massime contemporanee lato A:  $I_n = 374$  A  $P = 259$  kVA
- Correnti e potenze massime contemporanee lato B:  $I_n = 622$  A  $P = 431$  kVA
- Potere d'interruzione nominale limite minimo interruttori derivati:  $I_{cu} = 35$  kA
- Interruttore di manovra-sezionatore generale 1: 2000A
- Interruttore di manovra-sezionatore generale 2: 2000A
- Grado di protezione minimo: IP30

I collegamenti interni e le correnti circolanti sono stati realizzati in base agli schemi elettrici forniti dalla Provincia, ma saranno comunque soggetti da errori dato che la reale posizione dei collegamenti interni sono sconosciuti. I valori delle correnti utilizzate si riferiscono al progetto elettrico fornito direttamente dalla Provincia e sono state raccolte e sommate per essere poi associate ai cavi all'interno della sagoma del quadro.

### 4.2.7 *Blindosbarre*



*Figura 4.5: Foto delle blindosbarre che provengono dal locale MT*

Le blindo sbarre sono un condotto a sbarre definito dalla norma CEI EN 60439-2 come “apparecchiatura costruita in serie costituita da un insieme di conduttori comprendenti una o più sbarre distanziate e sostenute da materiali isolanti e contenute in un condotto o

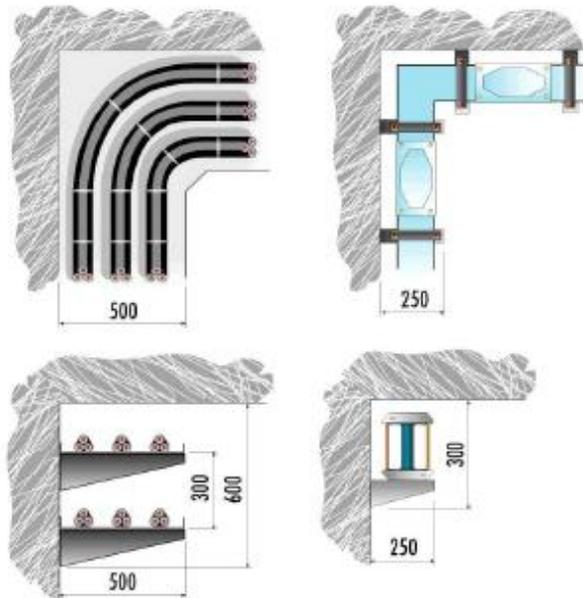


Figura 4.6: Cavi e blindo sbarre a confronto

in un analogo involucro. Oltre alle ragioni prettamente economiche che fanno scegliere sempre più spesso la soluzione prefabbricata a quella da cablare, ci sono dei motivi tecnici che portano ulteriormente vantaggio ai condotti sbarre. La corrente nominale che un cavo può portare si riferisce alla temperatura media giornaliera di  $+30^{\circ}\text{C}$  mentre i condotti sbarre sono dimensionati (secondo le Norme CEI 60439/2) per lavorare alla temperatura media ambiente di  $+35^{\circ}\text{C}$  con punte di  $40^{\circ}\text{C}$ . Un altro vantaggio è dovuto al fatto che i cavi, generalmente, sono installati a fasci e di sezione tale che non possono essere curvati con raggi molto ridotti; i condotti sbarre invece hanno struttura molto compatta e con essi si possono fare comunemente angoli di  $90^{\circ}$  (Figura 4.6).

Siccome le blindosbarre racchiudono in se i conduttori e li isolano dall'esterno, si deve cercare un modello compatibile rispetto ai campi magnetici da esso prodotto. Prendendo il caso del collegamento fra trasformatore e quadro di bassa, si ha un collegamento trifase con neutro, semplificabile in tre conduttori di fase con relativo neutro. Ora analizziamo tali conduttori disponendoli su un piano verticale dello spazio, come rappresentato nella figura

in un analogo involucro. Oltre alle ragioni prettamente economiche che fanno scegliere sempre più spesso la soluzione prefabbricata a quella da cablare, ci sono dei motivi tecnici che portano ulteriormente vantaggio ai condotti sbarre. La corrente nominale che un cavo può portare si riferisce alla temperatura media giornaliera di  $+30^{\circ}\text{C}$  mentre i condotti sbarre sono dimensionati (secondo le Norme CEI 60439/2) per

Linee equicampo di B calcolata sul piano XY

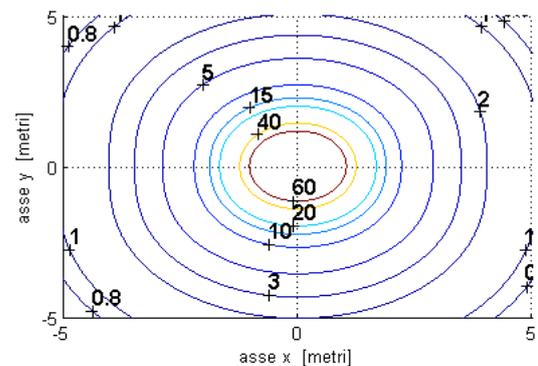
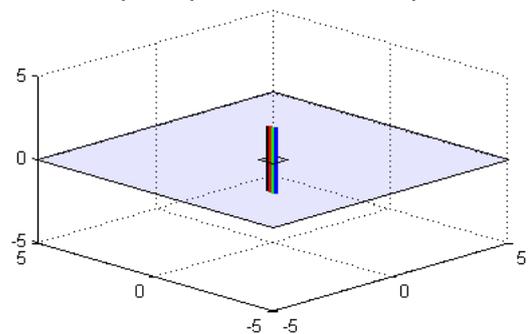
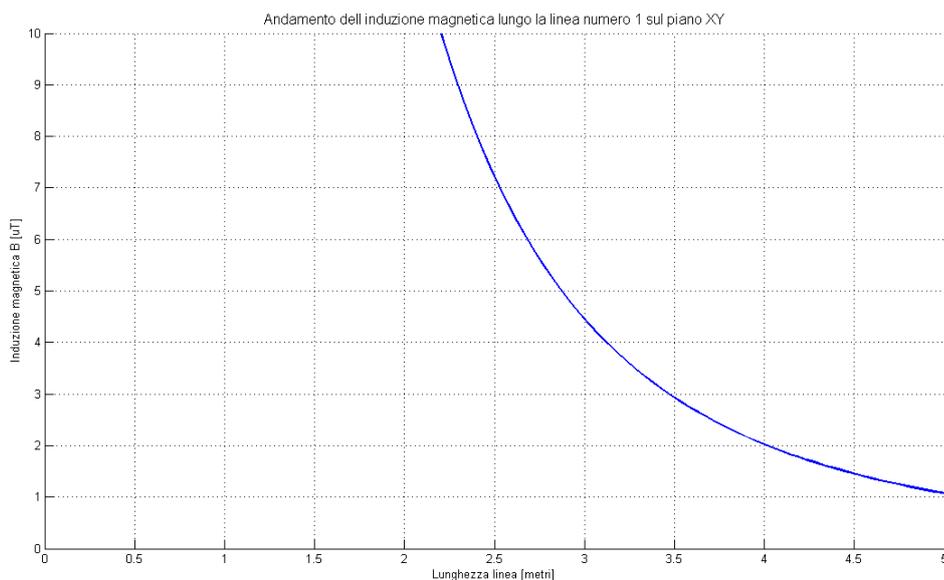


Figura 4.7: Linee isoinduzione generata da tre cavi

sottostante, distanziati tra loro in modo uniforme. Se prendiamo il piano evidenziato in

*Figura 4.7* e calcoliamo il valore dell'induzione magnetica con la legge di Biot - Savart avremmo un andamento radiale del campo che diminuisce man mano che ci si allontana dall'asse dei conduttori.

Se prendiamo solo una linea del piano e riportiamo i valori dell'induzione si vede chiaramente tale andamento (*Figura 4.8*).

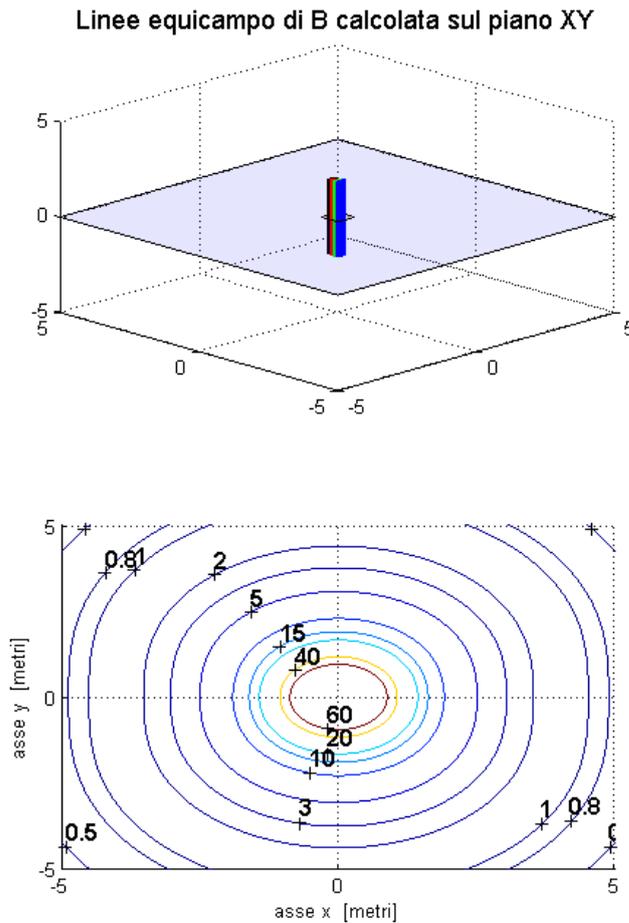


*Figura 4.8:* Andamento dell'induzione magnetica di tre conduttori di fase affiancati

Il grafico mostra l'induzione a partire da un massimo di 10 μT e come si può notare il campo scende pressoché come  $1/d^2$ . È possibile anche vedere la differenza di estensione delle linee dell'induzione magnetica rispetto al trasformatore in cui circolano le stesse correnti. Ma la sbarra non ha un solo conduttore all'interno, ha delle lastre in rame per ogni fase. Si può quindi provare ad immaginare che ogni lastra sia come una serie di conduttori affiancati. Se ora pensiamo di mettere più cavi in parallelo suddividendo la corrente in modo che:

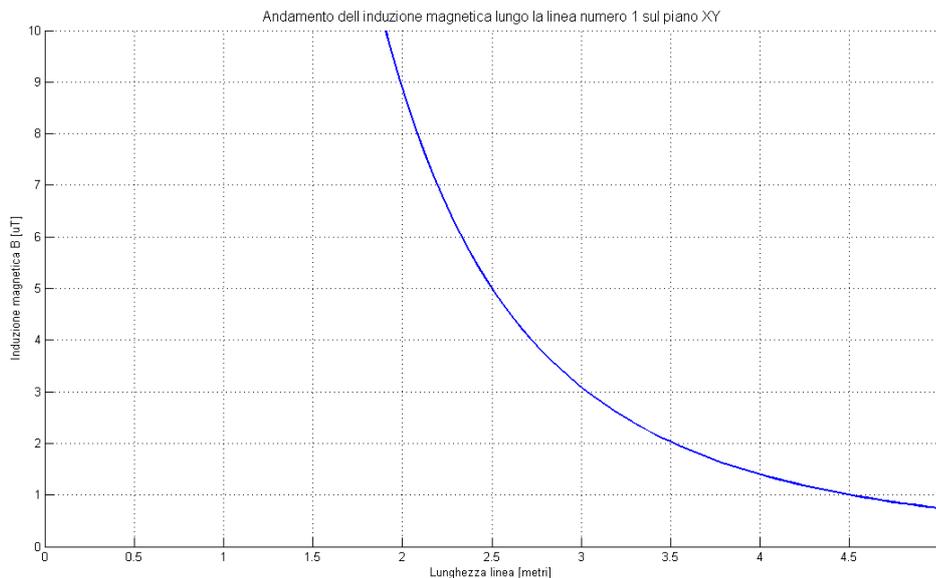
$$I_n = \frac{I}{n}$$

dove n è il numero dei conduttori in parallelo, possiamo ricalcolare l'andamento dell'induzione nel piano tangente a tali conduttori e vedere la differenza dal caso precedente.



Come si può notare dalla *Figura 4.9* si ha una riduzione della fascia dei  $3\mu\text{T}$  di circa 1.5m, e man mano che ci si allontana dalla sorgente il campo si avvicina ai valori del caso precedente. Per avere un confronto migliore dei due casi si prenda in esame una retta con origine sull'asse dei conduttori e che si estende fino alla lunghezza del piano preso in considerazione. In questo modo si ha il profilo del campo all'aumentare della distanza. Nella *Figura 4.10* si distingue chiaramente la differenza con la *Figura 4.8*, ovvero tra simulare le blindo attraverso semplici conduttori o attraverso una serie di conduttori in parallelo.

*Figura 4.9: Linee isoinduzione con più conduttori per fase*



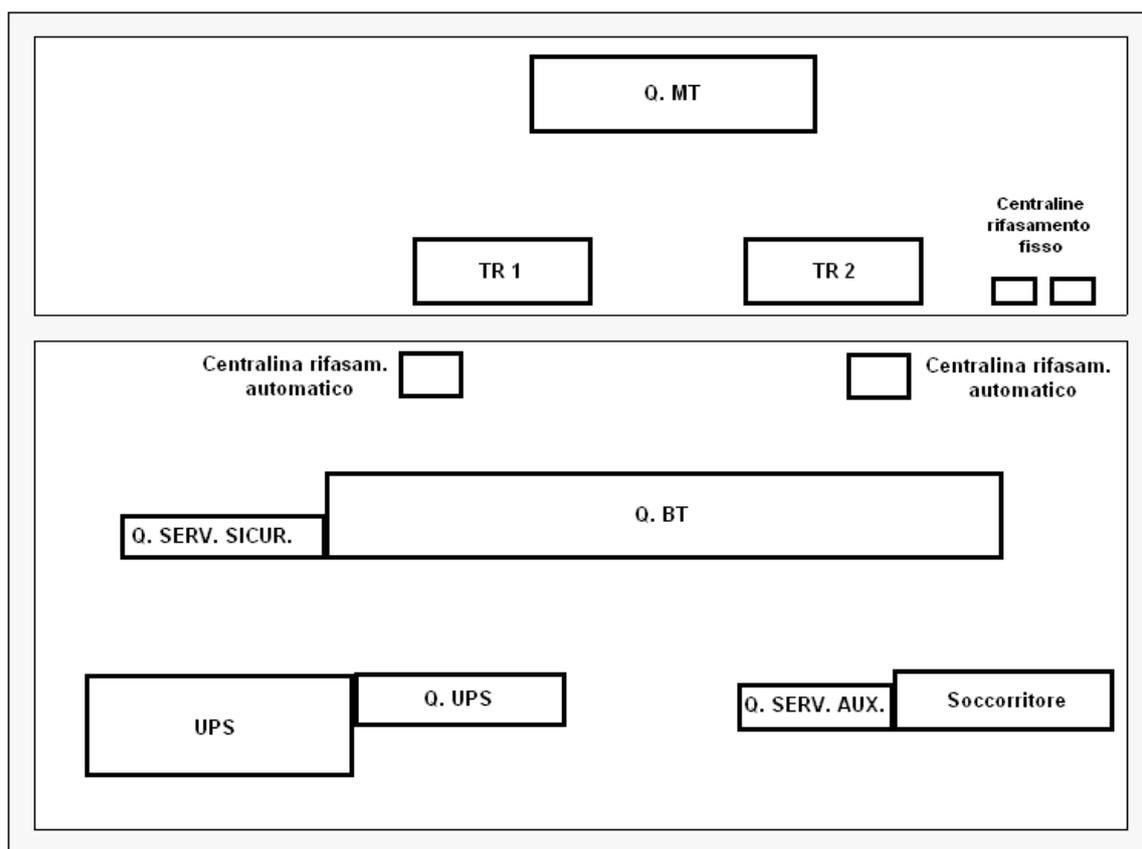
*Figura 4.10: Andamento dell'induzione magnetica con tre fasi composte da più conduttori per fase*

È da ricordare che il grado di squilibrio delle fasi incide aumentando il campo prodotto, ed incide anche la corrente che interessa il conduttore di neutro.

Queste sbarre hanno, a ogni lunghezza prefissata, dei “pin” dove si possono derivare cavi o altre sbarre. Da questi “pin” si nota la presenza di un quarto conduttore che in questa trattazione non è stato preso in considerazione. Infatti un quarto cavo viene utilizzato per trasportare un segnale di controllo o un eventuale cavo di terra, comunque utilizzato per breve tempo o con correnti molto inferiori rispetto a quella passante per gli altri conduttori.

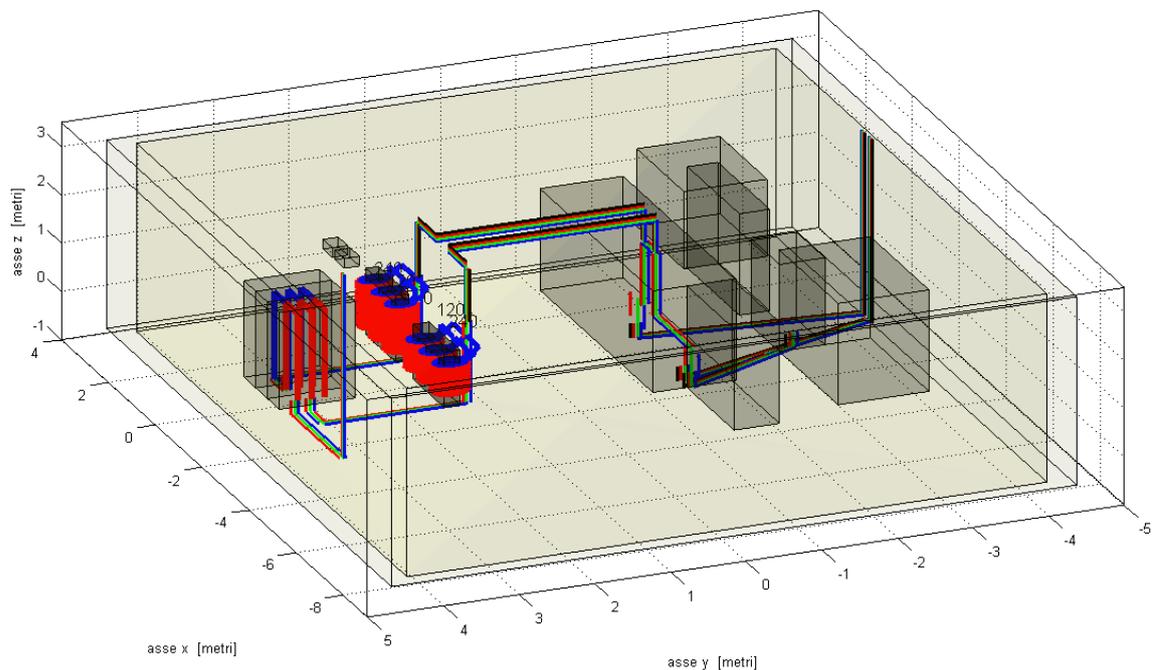
#### 4.2.8 Rappresentazione della cabina

Siccome il programma per la simulazione dei campi è uno strumento nato per simulare cabine aventi uno certo standard, si adatta difficilmente a strutture con complessità strutturale come quella descritta qui. Per questo motivo è necessario semplificare la topologia della cabina in modo tale da poterla poi rappresentare all’interno del software, cercando di mantenere invariata la posizione dei quadri e dei trasformatori. La *Figura 4.11* mostra il layout semplificato che poi verrà realizzato in Matlab:



*Figura 4.11: Layout di riferimento per la ricostruzione della cabina*

Ora si devono fare delle considerazioni rispetto ai componenti, perché alcuni non intervengono nel normale funzionamento dell'impianto e si attivano solo se vi sono delle anomalie ed altri mettono in gioco correnti basse da poter essere trascurate in questa valutazione qualitativa. Ad esempio i soccorritori forniscono corrente in uscita indipendentemente dalla presenza della rete. Queste caratteristiche li rendono particolarmente adatti per tutte quelle applicazioni dove non siano permesse interruzioni di alcun genere: impianti di segnalazione circuiti ausiliari di cabine elettriche, ecc. Quindi nel funzionamento normale è in condizione di "standby" ed è possibile perciò trascurarlo nella simulazione. Il Quadro dei servizi di sicurezza e quadro dei servizi ausiliari sicuramente sono sorgenti di campi magnetici, ma le correnti che mettono in gioco in questa cabina sono decisamente inferiori a quelle presenti nel quadro di bassa. Si parla di correnti di decine di Ampère rispetto a quelle centinaia in arrivo dalle blindo sbarre e in entrata nel quadro BT. Solo attraverso delle misurazioni con una sonda si può capire quanto incidano nella generazione dei campi. Nella *Figura 4.12* viene proposto il layout descritto in precedenza ma realizzato in Matlab con le rispettive connessioni fra i componenti elettrici presi in esame.



*Figura 4.12: Layout realizzato attraverso MatLab*

Il posizionamento dei cavi rispetta il più possibile la reale disposizione degli stessi, ma vi sono alcune particolarità che non sono potute essere riprodotte. Un esempio sono le curve dei cavi all'uscita del quadro di bassa tensione e il loro numero esatto vista la complessità

dell'impianto. Di seguito si riportano i valori inseriti nel file "Dati.m" per la rappresentazione della cabina.

<b>Coordinate del centro della base del volume di visualizzazione:</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
	0	0	0
<b>Dimensioni del volume di visualizzazione:</b>	<b>Lunghezza</b>	<b>Profondità</b>	<b>Altezza</b>
	13	14	7
<b>Discretizzazione del dominio di calcolo</b>	<b>Lungo X</b>	<b>Lungo Y</b>	
	100	100	
<b>Centro della base della cabina nell'area di visualizzata</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
	0	0	0
<b>DIMENSIONI DELLA CABINA</b>	<b>Lunghezza</b>	<b>Profondità</b>	<b>Altezza</b>
	11,5	8,45	3,2
<b>Spessore pareti</b>	0,3		
<b>Tensione nominale del lato Media Tensione [Volt]</b>	10000		
<b>Tensione nominale del lato Bassa Tensione [Volt]</b>	400		
<b>DATI DEL TRASFORMATORE</b>			
<b>Potenza nominale [kVA]</b>	1000		
<b>Tipologia</b>	2		
<b>Posizione del trasformatore [m]</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
	-0,2	2	0
<b>Angolo di rotazione rispetto all'asse X [°]</b>	0		
<b>Grado di carico del trasformatore [%]</b>	100		
<b>Disposizione delle fasi lato BT da destra a sinistra</b>	<b>U</b>	<b>V</b>	<b>W</b>
	0	120	240
<b>Squilibrio delle correnti assorbite nelle fasi BT [%]</b>	<b>U</b>	<b>V</b>	<b>W</b>
	100	100	100
<b>QUADRI DI MEDIA TENSIONE</b>			
<b>Posizione del quadro</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
	-1,3	3,5	0
<b>Angolo di rotazione [°]</b>	0		
<b>Larghezza della cella</b>	0,5		
<b>Sequenza delle fasi</b>	<b>R</b>	<b>S</b>	<b>T</b>
	0	120	240
<b>Corrente in ingresso al quadro [A]</b>	57.73		
<b>Corrente assorbita dal Trasformatore [A]</b>	57.73		
<b>Tipologia di quadro</b>	1		

COLLEGAMENTI IN CAVO							
1	1,3	0,1	57.73	8	100	100	100
1	0	120	240	8	-3	-1,15	0,5
1	100	100	100	8	-3	-1,15	0
1	-0,75	3,5	0	9	2,3	0,3	991,6
1	-0,75	3,5	-0,3	9	0	120	240
1	-0,2	3,5	-0,3	9	100	100	100
1	-0,2	1,6	-0,3	9	-0,7	-1,15	0,5
1	-0,2	1,6	1,4	9	-0,7	-1,15	0
2	1,3	0,1	0	10	1,4	0,05	105
2	0	120	240	10	0	120	240
2	100	100	100	10	100	100	100
2	-1,75	3,5	0	10	-3	-1,15	0
2	-1,75	3,5	-0,3	10	-3	-1,15	-0,3
2	-2,3	3,5	-0,3	10	-2	-2,8	-0,3
2	-2,3	1,6	-0,3	10	-2	-2,8	0
2	-2,3	1,6	1,4	11	1,4	0,05	602,8
3	2,4	0,05	1443,3	11	0	120	240
3	0	120	240	11	100	100	100
3	100	100	100	11	-2,7	-1,15	0
3	-0,2	1,6	1,4	11	-2,7	-1,15	-0,3
3	-0,2	1,6	2,5	11	-1,4	-4	-0,3
3	-1	1,6	2,5	12	1,4	0,05	991,6
3	-1	-1,15	2,5	12	0	120	240
3	-1	-1,15	1,8	12	100	100	100
4	2,4	0,05	0	12	-0,7	-1,15	0
4	0	120	240	12	-0,7	-1,15	-0,3
4	100	100	100	12	-1,1	-4	-0,3
4	-2,3	1,6	1,4	13	2,4	0,05	731,6
4	-2,3	1,6	2,5	13	0	120	240
4	-1,5	1,6	2,5	13	100	100	100
4	-1,5	-1,15	2,5	13	-1,1	-4	-0,3
4	-1,5	-1,15	1,8	13	-1,1	-4	3,5
5	1,3	0,05	1443,3	14	2,4	0,05	277,2
5	0	120	240	14	0	120	240
5	100	100	100	14	100	100	100
5	-1	-1,15	1,8	14	-1,4	-4	-0,3
5	-1,5	-1,15	1,8	14	-1,4	-4	3,5
6	1,3	0,05	991,6	15	2,3	0,1	57.73
6	0	120	240	15	0	120	240
6	100	100	100	15	100	100	100
6	-1	-1,15	1,8	15	-3,8	3,7	3,5
6	-1,5	-1,15	0,5	15	-3,8	3,7	-0,3

7	1,3	0,05	602,8	16	1,3	0,1	57,73
7	0	120	240	16	0	120	240
7	100	100	100	16	100	100	100
7	-1,5	-1,15	1,8	16	-3,8	3,7	-0,3
7	-1,5	-1,15	0,5	16	-1,75	3,7	-0,3
7	-3	-1,15	0,5	17	1,3	0,1	57,73
8	2,3	0,3	602,8	17	0	120	240
8	0	120	240	17	100	100	100
				17	-1,75	3,7	-0,3
				17	-1,75	3,7	0

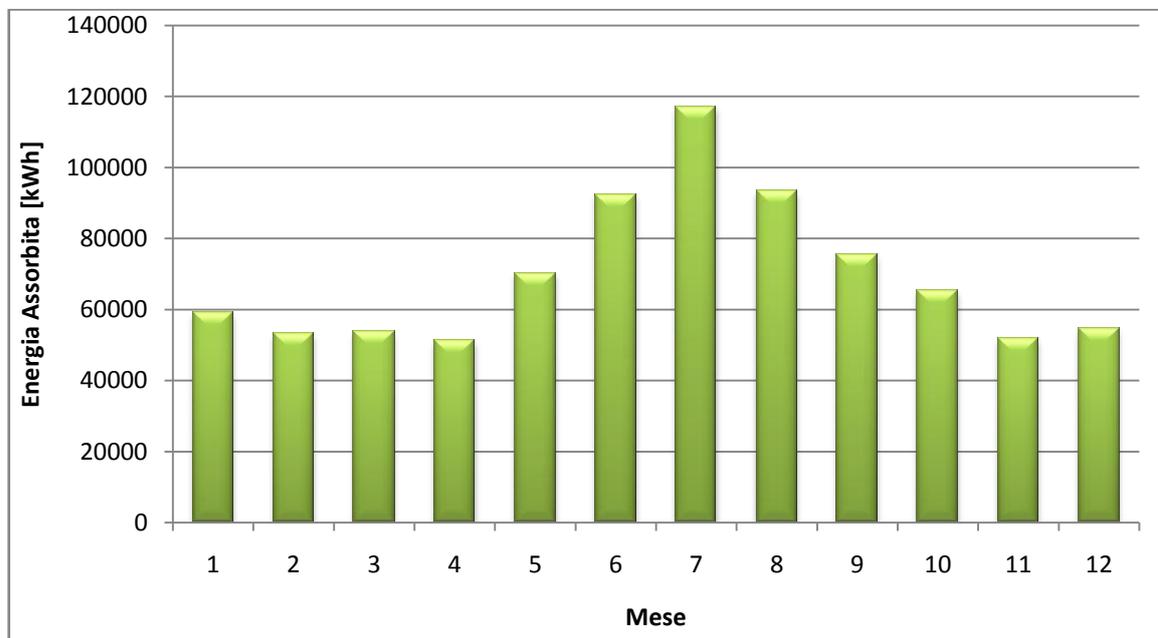
#### 4.2.9 Simulazioni e risultati

Per avere un'idea dell'andamento del campo magnetico generato nella cabina di trasformazione si è dovuto ovviamente ricostruire la planimetria di questa con i componenti che creano un campo magnetico tale da poter essere osservato e che potrebbero aumentare il valore del campo totale in modo rilevante. Data la complessità della cabina e del numero dei componenti presenti, non solo all'interno ma anche nei locali adiacenti, le iterazioni tra i campi generati dai vari componenti possono essere molteplici. In oltre tra il locale di media tensione e il locale di bassa vi è un muro. I trasformatori sono alloggiati in box di acciaio per cui sicuramente è come se i trasformatori si trovassero schermati e quindi con una riduzione del campo diffuso verso l'esterno.

La riproduzione della cabina attraverso Matlab è stata semplificata come se tutti gli oggetti fossero nello stesso locale e la causa di questa scelta sta nel fatto che il programma di simulazione è stato studiato per essere eseguito con delle configurazione delle cabine standard, quindi certamente non per cabine fatte con particolari accorgimenti. Per riprodurre una disposizione più simile e precisa possibile dei quadri e dei trasformatori, sono stati utilizzate le piante di locali fornite dalla Provincia. Il collegamenti del quadro BT sono stati riprodotti avendo lo schema interno, anche questo allegato ai file autocad forniti dalla stessa Provincia. Come scritto nei capitoli precedenti tutti dati e tutte le coordinate di ciascun oggetto sono state inserite nel file dati in formato “\*.xls”.

Per avere una stima delle correnti assorbite ed erogate dal trasformatore si è fatto riferimento alle bollette ENEL dell'anno 2008. Per ogni mese sono stati calcolati i giorni lavorativi escludendo ovviamente le diverse festività presenti nell'arco di tempo e

considerando in media un orario lavorativo di otto ore giornaliere. L'orario di lavoro è preso come media perché in Provincia vi sono diverse tipologie di lavoratori con corrispettivi contratti orari. Alcuni dipendenti lavorano solamente la mattina (in media dalle ore 8:00 alle ore 13:30) ed altri hanno anche un rientro pomeridiano. Le ore giornaliere possono variare di giorno in giorno e lo stesso vale per la potenza attiva assorbita. Questo significa che si può avere solo un'idea della media delle correnti che interessano la cabina MT/BT e non si può distinguere in quali ore del giorno si possono avere valori maggiori di corrente e quindi di campo magnetico. Sicuramente le ore mattutine sono quelle che risentono del maggiori potenze assorbite e quindi con campi più elevati e che possono interessare i lavoratori. Dalla *Figura 4.13* si possono notare energie assorbite maggiori nei mesi estivi.



*Figura 4.13: Andamento dell'energia assorbita nella Terza Torre nell'anno 2008*

Tale differenza è dovuta al funzionamento dell'impianto di raffrescamento che nei mesi estivi è in funzione dalle ore 4:00 alle ore 19:00. Nel trasformare l'energia mensile di questi mesi in potenza, sono state aumentate le ore lavorative per tenere in considerazione il funzionamento del condizionamento. Non sono state considerate le 15 ore perché il servizio non è continuativo ma è facile pensare che nelle ore notturne tale impianto non sia funzionante; se lo è, lo sarebbe solo per brevi intervalli. Si può pensare di dividere il grafico in due settori, il primo che riguarda la potenza normalmente usata per l'attività lavorativa (luci ascensori ecc..) mentre la seconda che riguarda la potenza utilizzata dall'impianto di condizionamento. Tale suddivisione è necessaria perché le potenze, e quindi le correnti, sono molto diverse. Guardando il grafico si nota immediatamente che il

nel mese di luglio si utilizza una energia di 117268 kWh, poco più del doppio rispetto a quella del mese di Aprile (51369 kWh). Quindi è necessario fare una valutazione generale per i mesi invernali e una seconda per i mesi estivi. Di seguito è mostrato in dettaglio mese per mese le potenze assorbite presunte:

Mese	gen-08
N° giorni del mese	31
N° giorni lavorativi	22
Stima ore lavorative giornaliera	8
Totale ore lavorative (mensili)	176
Energia assorbita [kWh]	59191
Potenza attiva assorbita [kW]	336,3125
Corrente erogata al secondario del trasformatore [A]	485,425281
Corrente assorbita al primario del trasformatore [A]	19,41701124
Grado di carico [%]	33,63068318
Mese	feb-08
N° giorni del mese	29
N° giorni lavorativi	21
Stima ore lavorative giornaliera	8
Totale ore lavorative (mensili)	168
Energia assorbita [kWh]	53378
Potenza attiva assorbita [kW]	317,7261905
Corrente erogata al secondario del trasformatore [A]	458,598254
Corrente assorbita al primario del trasformatore [A]	18,34393016
Grado di carico [%]	31,77208355
Mese	mar-08
N° giorni del mese	31
N° giorni lavorativi	20
Stima ore lavorative giornaliera	8
Totale ore lavorative (mensili)	160
Energia assorbita [kWh]	53908
Potenza attiva assorbita [kW]	336,925
Corrente erogata al secondario del trasformatore [A]	486,3093486
Corrente assorbita al primario del trasformatore [A]	19,45237394
Grado di carico [%]	33,69193215

Mese	apr-08
N° giorni del mese	30
N° giorni lavorativi	21
Stima ore lavorative giornaliere	8
Totale ore lavorative (mensili)	168
Energia assorbita [kWh]	51369
Potenza attiva assorbita [kW]	305,7678571
Corrente erogata al secondario del trasformatore [A]	441,3378866
Corrente assorbita al primario del trasformatore [A]	17,65351546
Grado di carico [%]	30,57627037

Mese	mag-08
N° giorni del mese	31
N° giorni lavorativi	21
Stima ore lavorative giornaliere	8
Totale ore lavorative (mensili)	168
Energia assorbita [kWh]	70223
Potenza attiva assorbita [kW]	417,9940476
Corrente erogata al secondario del trasformatore [A]	603,3224398
Corrente assorbita al primario del trasformatore [A]	24,13289759
Grado di carico [%]	41,79870028

Mese	giu-08
N° giorni del mese	30
N° giorni lavorativi	20
Stima ore lavorative giornaliere	10
Totale ore lavorative (mensili)	200
Energia assorbita [kWh]	92420
Potenza attiva assorbita [kW]	462,1
Corrente erogata al secondario del trasformatore [A]	666,9838985
Corrente assorbita al primario del trasformatore [A]	26,67935594
Grado di carico [%]	46,20922118

Mese	lug-08
------	--------

<b>N° giorni del mese</b>	31
<b>N° giorni lavorativi</b>	23
<b>Stima ore lavorative giornaliere</b>	10
<b>Totale ore lavorative (mensili)</b>	230
<b>Energia assorbita [kWh]</b>	117268
<b>Potenza attiva assorbita [kW]</b>	509,8608696
<b>Corrente erogata al secondario del trasformatore [A]</b>	735,9207757
<b>Corrente assorbita al primario del trasformatore [A]</b>	29,43683103
<b>Grado di carico [%]</b>	50,98522764

<b>Mese</b>	<b>ago-08</b>
<b>N° giorni del mese</b>	31
<b>N° giorni lavorativi</b>	20
<b>Stima ore lavorative giornaliere</b>	10
<b>Totale ore lavorative (mensili)</b>	200
<b>Energia assorbita [kWh]</b>	93404
<b>Potenza attiva assorbita [kW]</b>	467,02
<b>Corrente erogata al secondario del trasformatore [A]</b>	674,0853068
<b>Corrente assorbita al primario del trasformatore [A]</b>	26,96341227
<b>Grado di carico [%]</b>	46,70121289

<b>Mese</b>	<b>set-08</b>
<b>N° giorni del mese</b>	30
<b>N° giorni lavorativi</b>	22
<b>Stima ore lavorative giornaliere</b>	9
<b>Totale ore lavorative (mensili)</b>	198
<b>Energia assorbita [kWh]</b>	75341
<b>Potenza attiva assorbita [kW]</b>	380,510101
<b>Corrente erogata al secondario del trasformatore [A]</b>	549,2190231
<b>Corrente assorbita al primario del trasformatore [A]</b>	21,96876092
<b>Grado di carico [%]</b>	38,05036879

<b>Mese</b>	<b>ott-08</b>
-------------	---------------

<b>N° giorni del mese</b>	31
<b>N° giorni lavorativi</b>	23
<b>Stima ore lavorative giornaliere</b>	8
<b>Totale ore lavorative (mensili)</b>	184
<b>Energia assorbita [kWh]</b>	65424
<b>Potenza attiva assorbita [kW]</b>	355,5652174
<b>Corrente erogata al secondario del trasformatore [A]</b>	513,2141849
<b>Corrente assorbita al primario del trasformatore [A]</b>	20,5285674
<b>Grado di carico [%]</b>	35,55592247

<b>Mese</b>	nov-08
<b>N° giorni del mese</b>	30
<b>N° giorni lavorativi</b>	20
<b>Stima ore lavorative giornaliere</b>	8
<b>Totale ore lavorative (mensili)</b>	160
<b>Energia assorbita [kWh]</b>	51911
<b>Potenza attiva assorbita [kW]</b>	324,44375
<b>Corrente erogata al secondario del trasformatore [A]</b>	468,294216
<b>Corrente assorbita al primario del trasformatore [A]</b>	18,73176864
<b>Grado di carico [%]</b>	32,44382818

<b>Mese</b>	dic-08
<b>N° giorni del mese</b>	31
<b>N° giorni lavorativi</b>	21
<b>Stima ore lavorative giornaliere</b>	8
<b>Totale ore lavorative (mensili)</b>	168
<b>Energia assorbita [kWh]</b>	54606
<b>Potenza attiva assorbita [kW]</b>	325,0357143
<b>Corrente erogata al secondario del trasformatore [A]</b>	469,1486428
<b>Corrente assorbita al primario del trasformatore [A]</b>	18,76594571
<b>Grado di carico [%]</b>	32,50302361

Solo alcuni cavi in uscita dal quadro di bassa saranno interessati dalla corrente di alimentazione dell'impianto di condizionamento, quindi è interessante vedere come verrà

modificato il campo all'interno della cabina e nell'immediato spazio circostante. Come mostrato dal grafico vi è una grande differenza fra energia assorbita nel periodo invernale e quella assorbita nel periodo estivo. Si è quindi voluto analizzare i due casi separatamente a fronte di una forte differenza delle correnti in gioco nei due periodi. Per il periodo invernale sono stati presi in esame i mesi di Gennaio, Febbraio, Marzo, Aprile, Ottobre, Novembre e Dicembre per il loro profilo pressoché simile. È stata calcolata la media delle potenze assorbite e delle correnti. Nella *Tabella 4.2* sono racchiuse le grandezze medie del periodo invernale:

*Tabella 4.2: Potenza e correnti assorbite medie nel periodo invernale*

<b>P [kW]</b>	<b>328.825</b>
<b>Grado di carico [%]</b>	<b>32.8</b>
<b>I<sub>1</sub> [A]</b>	<b>18.98</b>
<b>I<sub>2</sub> [A]</b>	<b>474.61</b>

Per il periodo estivo è stato preso in considerazione il solo mese di Luglio dato che presenta la maggior potenza assorbita, quindi un suo eventuale rispetto dei limiti si protrae anche per tutti gli altri mesi. Nella *Tabella 4.3* si racchiudono i valori principali per la simulazione:

*Tabella 4.3: Potenza e correnti assorbite medie nel periodo estivo*

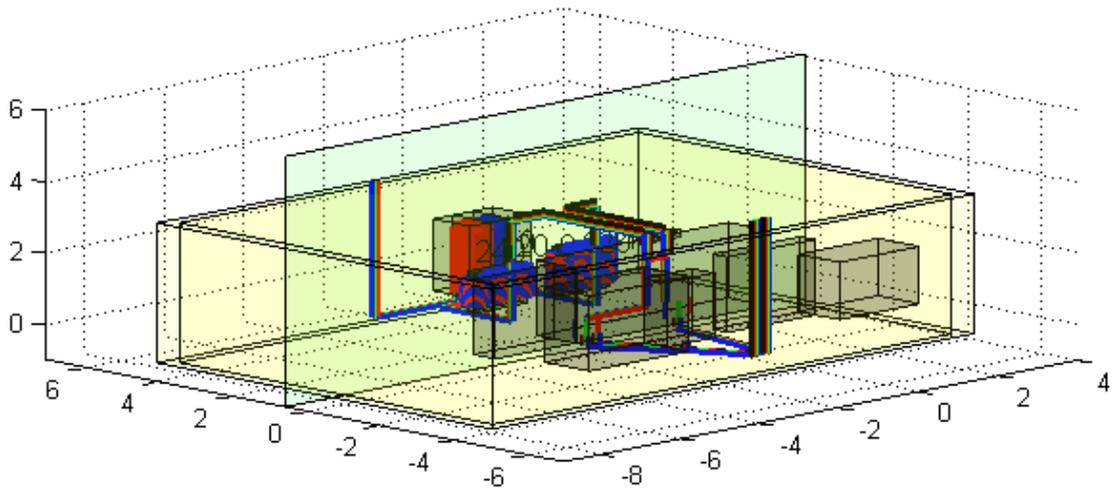
<b>P [kW]</b>	<b>509.86</b>
<b>Grado di carico [%]</b>	<b>50.986</b>
<b>I<sub>1</sub> [A]</b>	<b>29.43</b>
<b>I<sub>2</sub> [A]</b>	<b>735.92</b>

I montanti che poggiano sulla parete e salgono verso al soffitto della cabina sono raccolti in fasce. Non si conosce bene la suddivisione dei cavi, ma leggendo la sezione dei cavi sulle piante dell'impianto elettrico si è osservato che probabilmente il raggruppamento è riferito a conduttori aventi una simile utenza da alimentare. Nel nostro caso tale informazione è essenziale per conoscere il posizionamento dei cavi che servono ad alimentare l'impianto di raffrescamento, perché questi saranno in funzione solo nel periodo estivo. È da ricordare che i montanti percorrono, da un lato, un tragitto a fianco delle scale che portano ad ogni piano (poco frequentate per l'utilizzo più frequente degli ascensori), mentre dall'altro vi è una stanza dedicata al quadro del piano. Una sorgente

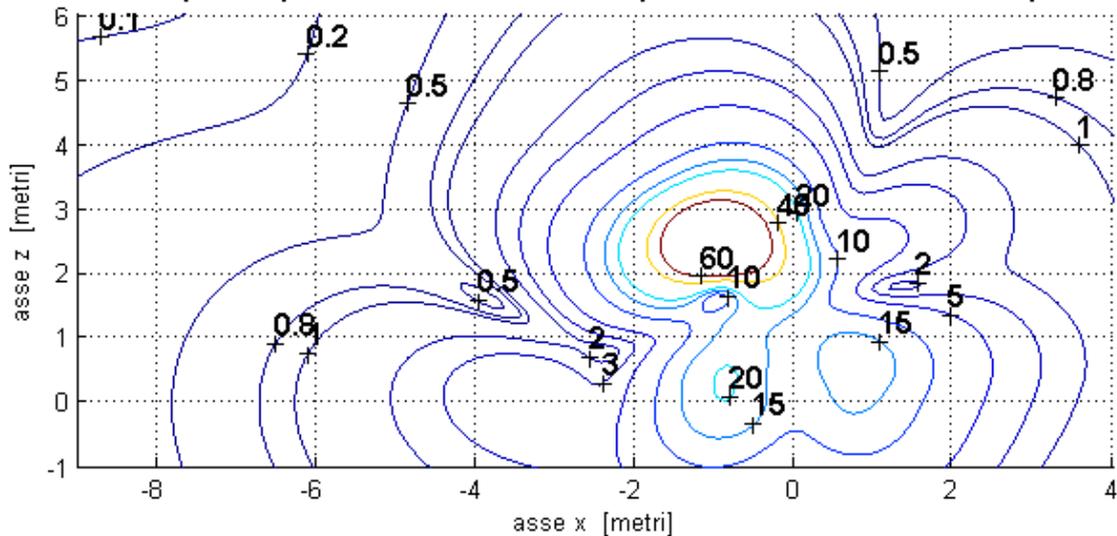
d'incertezza sulla simulazione è il percorso esatto dei cavi. Sotto la griglia di fronte al quadro di bassa si estendono cavi con una curvatura non riproducibile dal programma. Anche la quantità dei cavi è maggiore di quella presa in considerazione dalla simulazione. Siccome suddividere la corrente in più conduttori in parallelo non comporta una grande differenza rispetto all'uso di un conduttore percorso dalla somma delle correnti, si è cercato di raggruppare il più possibile i cavi.

Partiamo con l'analizzare il caso in cui venga utilizzata la massima potenza che può erogare il trasformatore ed analizziamo tre piani: uno parallelo al terreno a un'altezza di 1m, un piano tangente le blindo sbarre e uno tangente i montanti. In questo modo è possibile analizzare che fasce di rispetto al di fuori della cabina ci si può attendere.

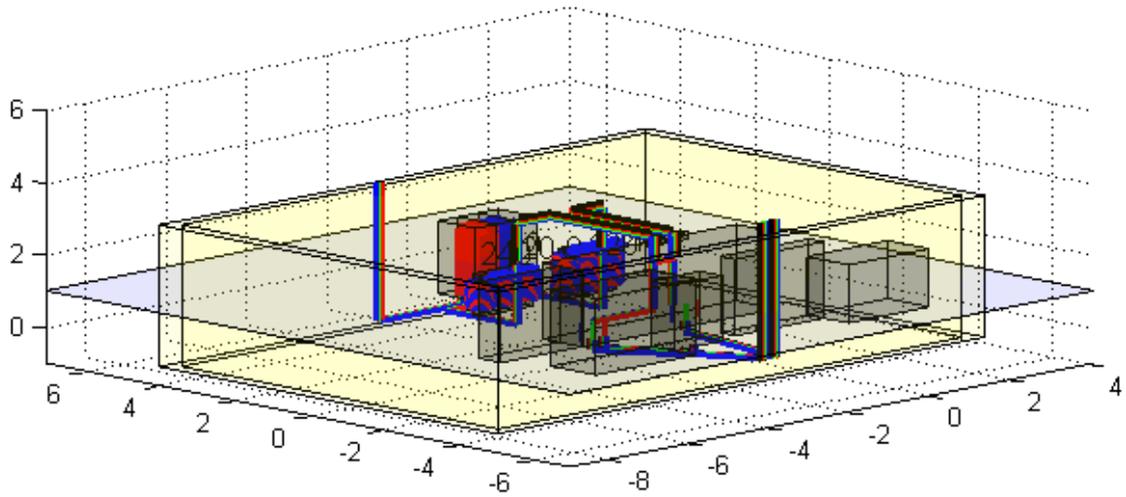
**Linee equicampo di B calcolata sul piano XZ**



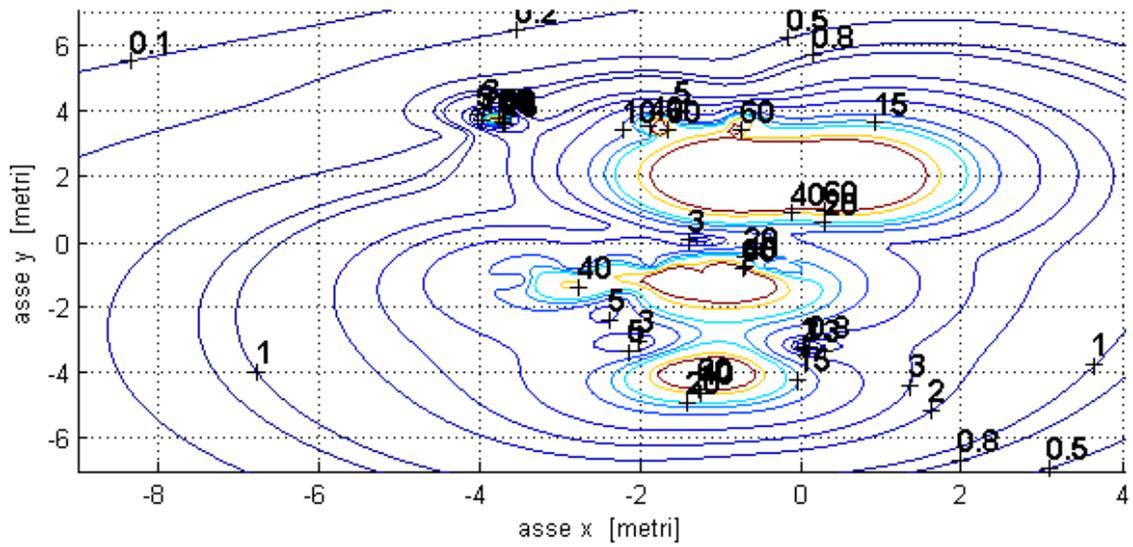
**Linee equicampo di B calcolata a una profondità di 0.5 m dalla parete**



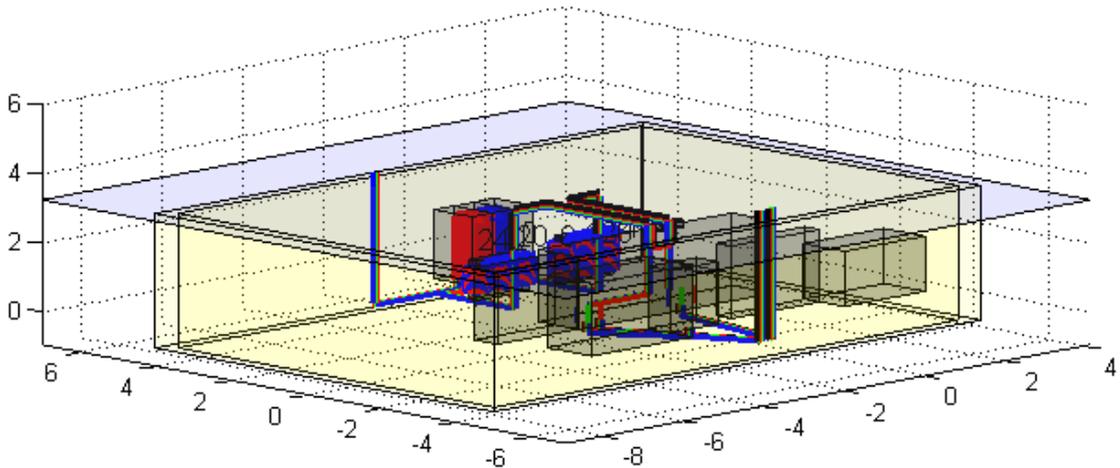
Linee equicampo di B calcolata sul piano XY



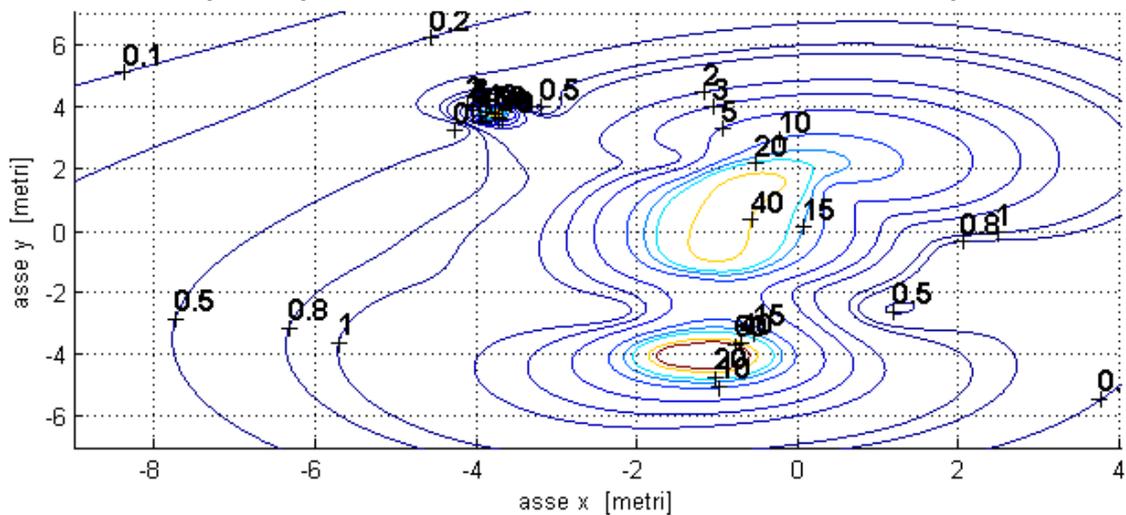
Linee equicampo di B calcolata ad una altezza di 1 m dal pavimento



Linee equicampo di B calcolata sul piano XY



Linee equicampo di B calcolata ad una altezza di 3.2 m dal pavimento

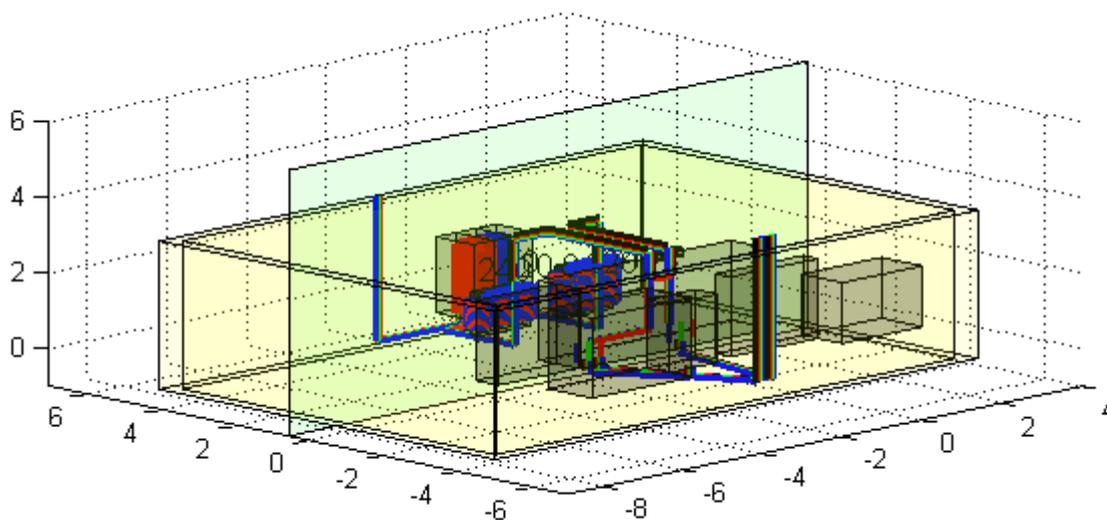


Con l'ausilio della figura precedente si può osservare che l'induzione magnetica raggiunge il piano superiore a circa 2.5m al di sopra delle blindo sbarre (con la curva isovalore di  $3\mu\text{T}$ ), mentre il montante genera un campo il quale rispetta gli obiettivi di

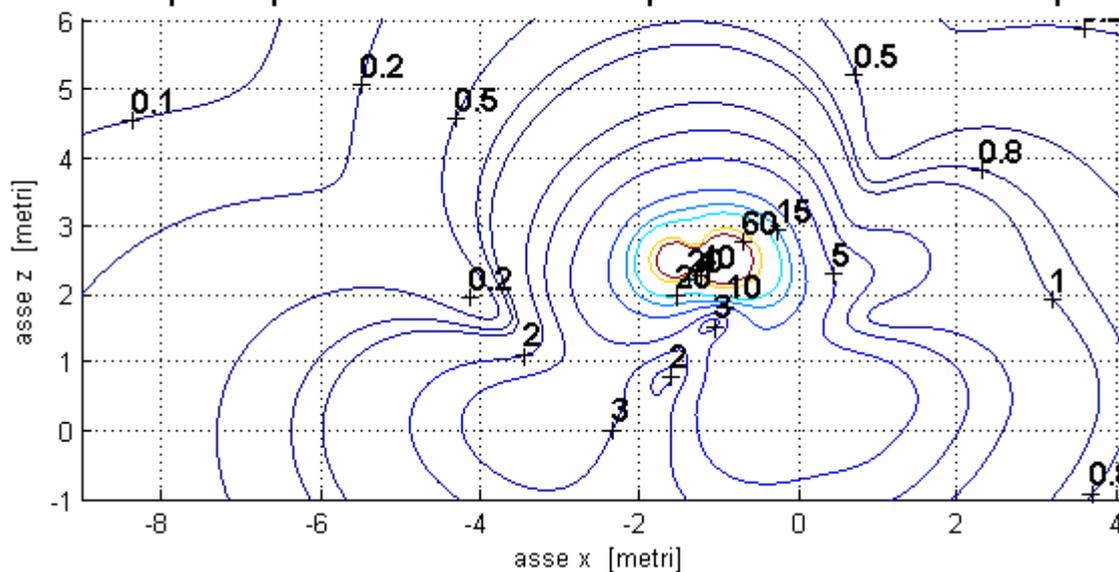
qualità a due metri al di fuori della cabina in direzione del parcheggio. È da tenere presente che ai piani superiori il montante passa attraverso dei piccoli locali in cui risiedono i quadri del piano. Lateralmente al locale cabina non vi sono particolari allarmi, grazie anche al fatto che gli elementi principali per la generazione del campo sono alloggiati verso la parte centrale del locale.

Ora analizziamo il periodo invernale ponendoci negli stessi piani esaminati nel caso precedente.

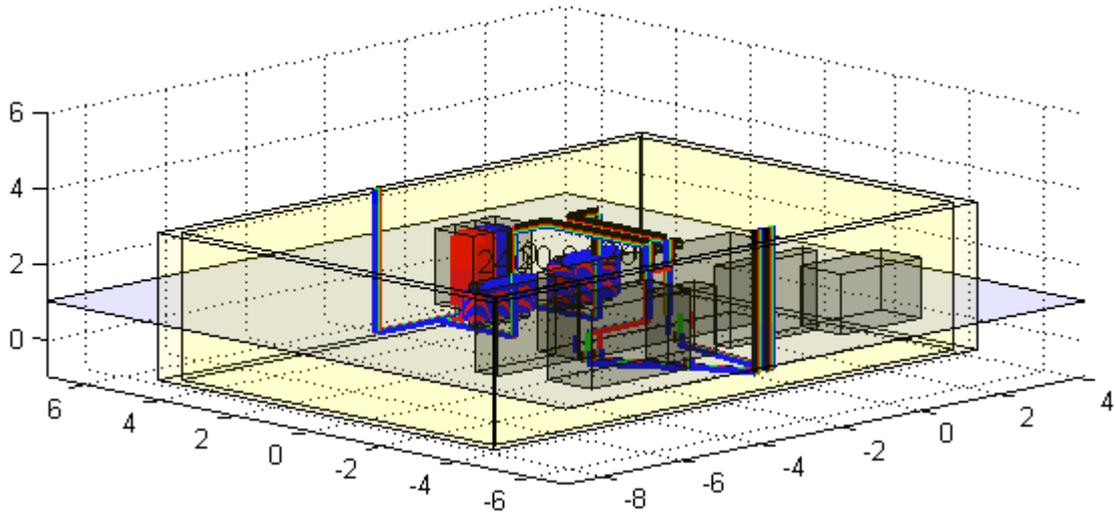
**Linee equicampo di B calcolata sul piano XZ**



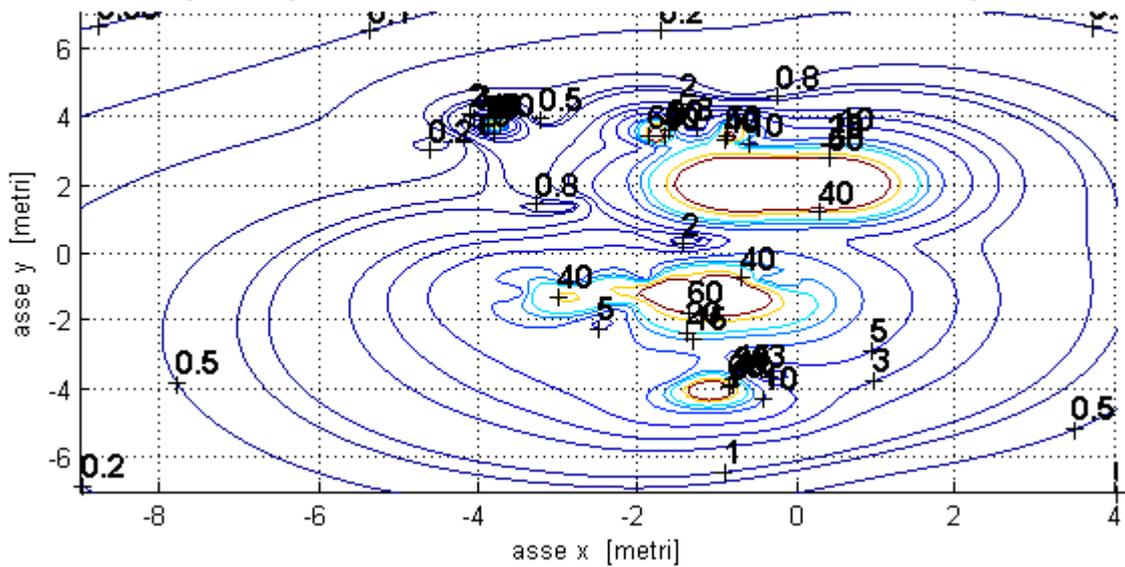
**Linee equicampo di B calcolata a una profondità di 0.5 m dalla parete**



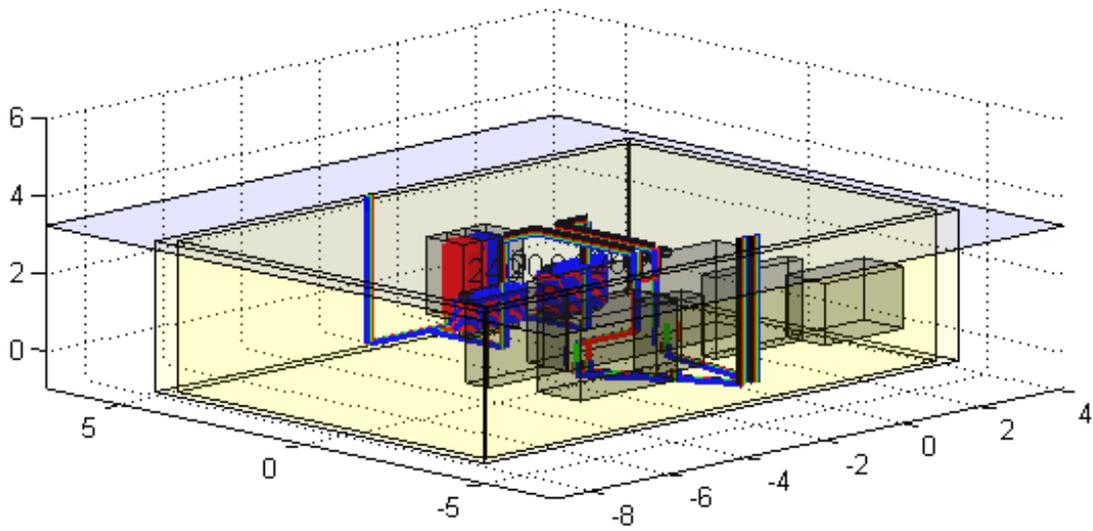
Linee equicampo di B calcolata sul piano XY



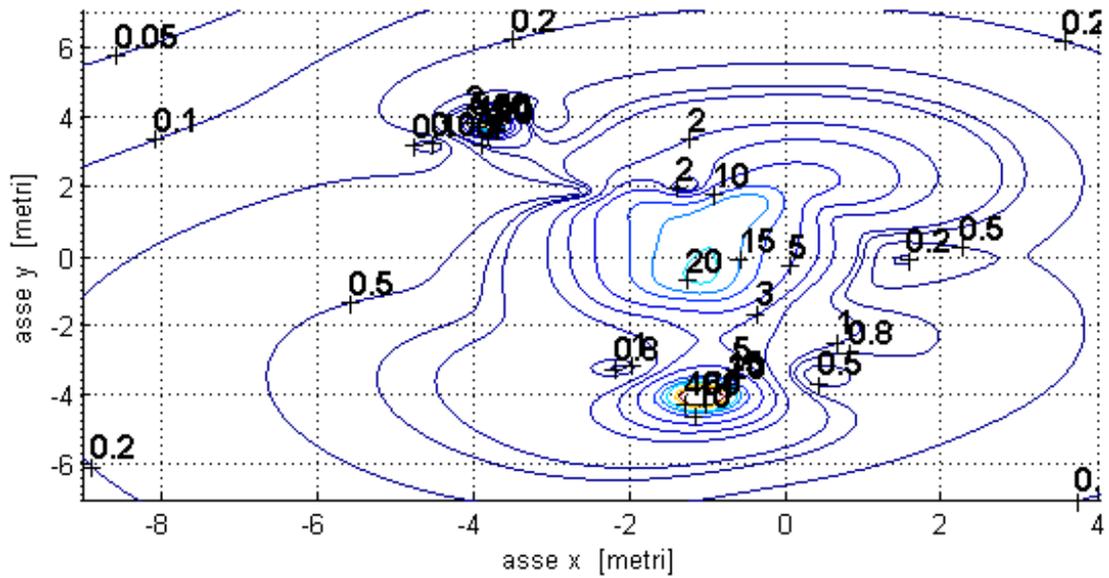
Linee equicampo di B calcolata ad una altezza di 1 m dal pavimento



Linee equicampo di B calcolata sul piano XY



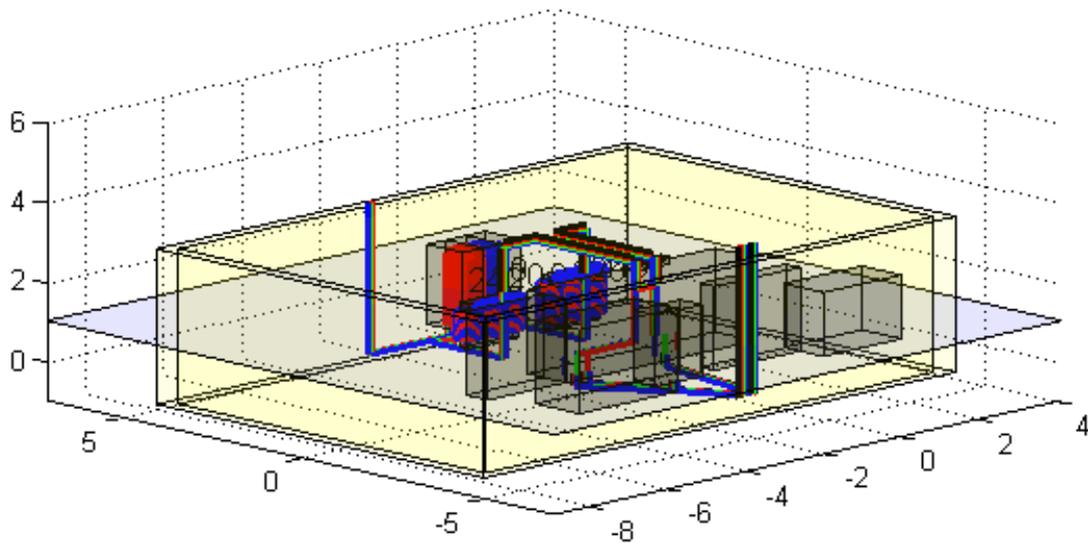
Linee equicampo di B calcolata ad una altezza di 3.2 m dal pavimento



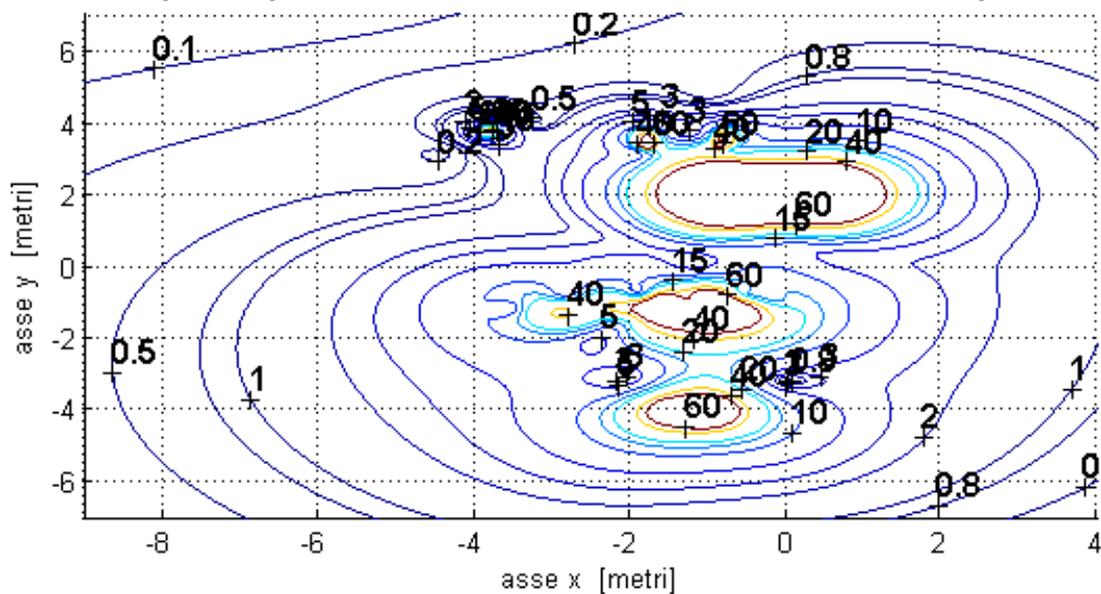
Si nota immediatamente la grande differenza rispetto al caso precedente. Le correnti assumono un valore tale che l'induzione generata non portano ad avere problemi in nessun spazio nell'intorno della cabina. Nemmeno le blindosbarre, che prima avevano un ruolo fondamentale nella generazione del campo, rappresentano una problematica.

Con tali simulazione si ha un'idea dei campi all'interno della cabina e quelli subito all'esterno. Ora prendiamo in esame la stessa ma con un il carico che si presenta nel mese di Luglio:

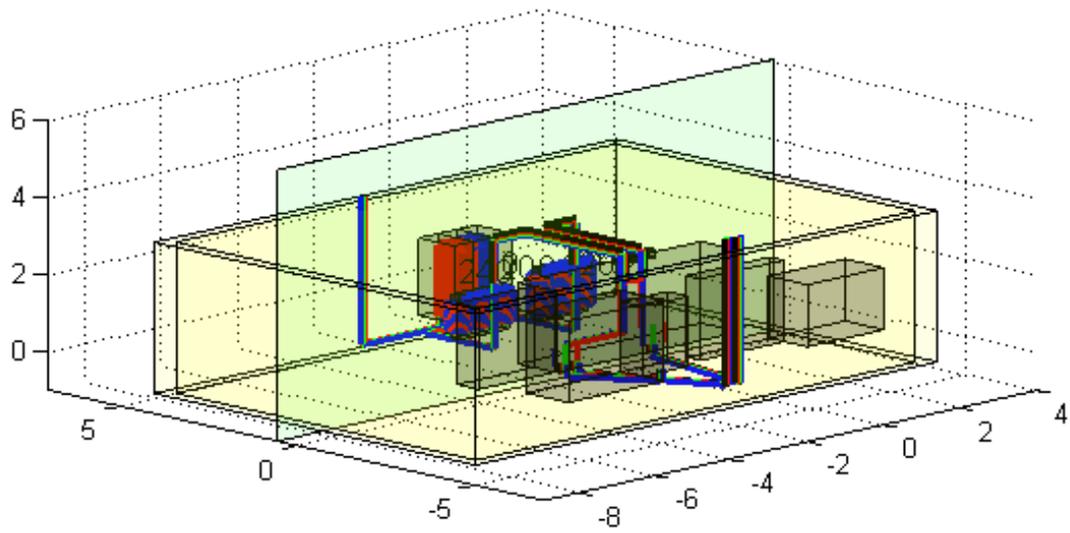
**Linee equicampo di B calcolata sul piano XY**



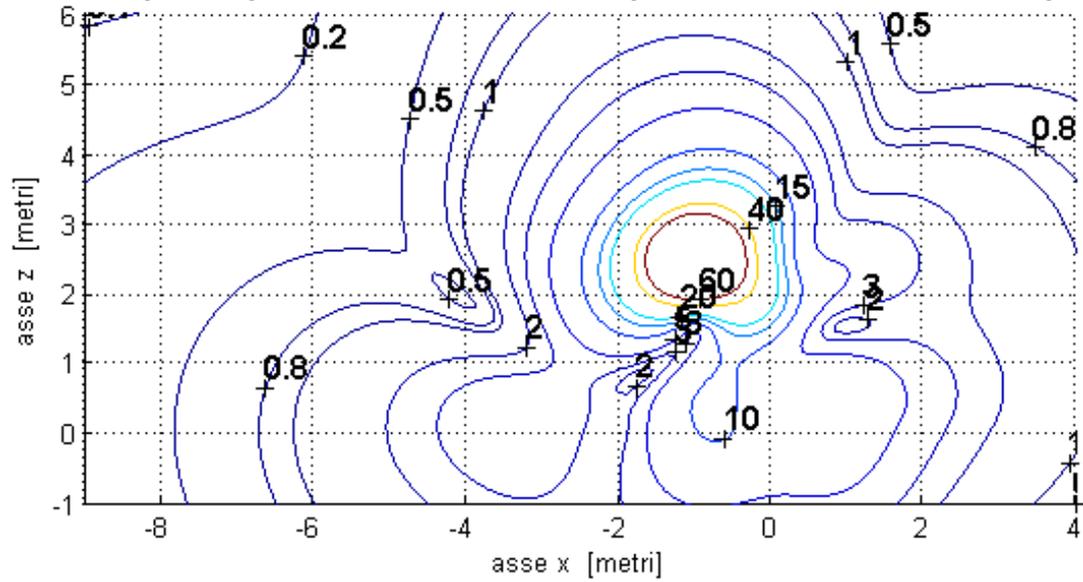
**Linee equicampo di B calcolata ad una altezza di 1 m dal pavimento**



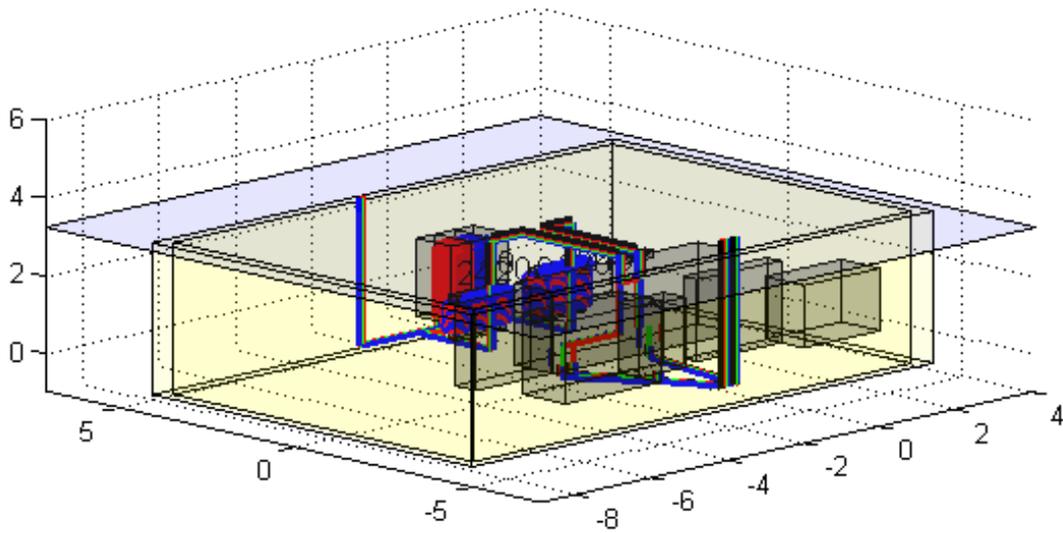
Linee equicampo di B calcolata sul piano XZ



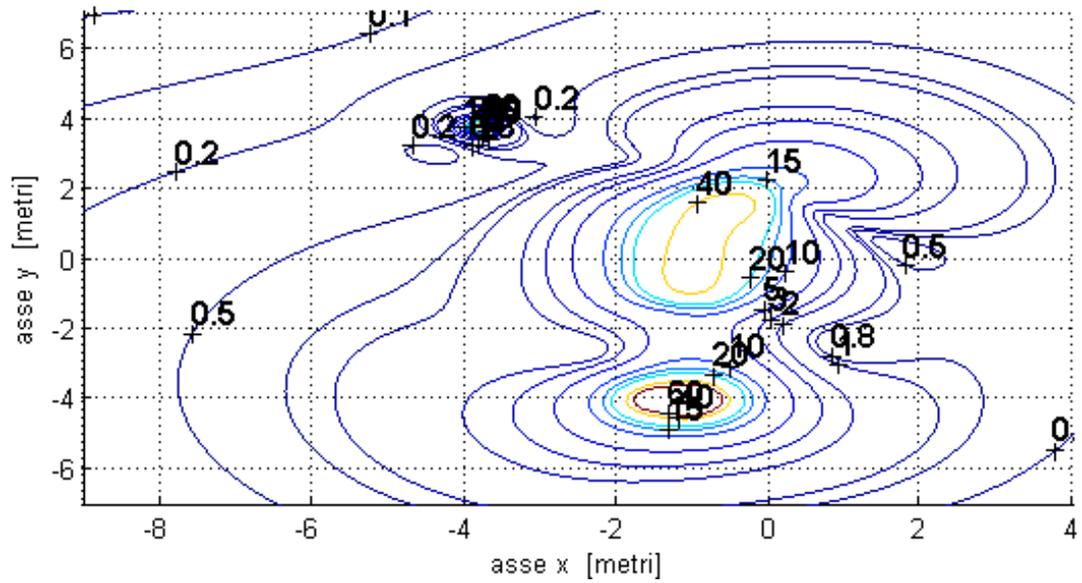
Linee equicampo di B calcolata a una profondità di 0.5 m dalla parete



Linee equicampo di B calcolata sul piano XY



Linee equicampo di B calcolata ad una altezza di 3.2 m dal pavimento



Come ci si aspettava si nota un sensibile aumento dell'estensione dei campi nel periodo estivo. Le zone di maggior interesse per eventuali campi esterni, sono quelle in prossimità dei montanti e delle blindo sbarre. Sarebbe comunque opportuno, attraverso una sonda, creare un reticolo di misurazione attorno alla cabina, con estensione di circa 2 metri, per vedere se vi è un maggior o un minor afflusso di campo rispetto al risultato della simulazione.

### *4.2.10 Conclusioni*

Come si può notare dalle simulazioni, vi sono molte interazioni tra i campi. Sicuramente se si tenessero in considerazione anche tutti gli altri quadri si otterrebbe localmente un aumento del campo. Data la posizione dei montanti, sarebbe preferibile analizzare con degli strumenti il campo non solo al di fuori della cabina, ma anche attorno al locale in cui passano i montanti che salgono tra i piani. La zona superiore alla cabina è interessata tra i 5  $\mu\text{T}$  e i 3  $\mu\text{T}$  nel periodo estivo; la stessa situazione si presenta nel periodo invernale ma con estensione inferiore. Tuttavia l'archivio non frequentato da persone per un arco di tempo superiore a quattro ore. Quindi si può indicativamente dire che i valori presenti nel decreto 81/08 sono rispettati.

Diverso è invece il caso più critico, ovvero quando il trasformatore è caricato alla potenza nominale. Anche se pur non utilizzando nel normale funzionamento l'intera potenza fornita, ci si deve chiedere e verificare se effettivamente la potenza richiesta nel periodo estivo è quella utilizzata in base a ipotesi o se risulta maggiore. Comunque sia, dato che al piano superiore vi è un locale tecnico, non si presenta il problema di affrontare un risanamento dell'impianto.

## **4.3 Andamento dell'induzione magnetica all'interno del laboratorio dell'istituto tecnico "Marconi"**

### *4.3.1 Scopo*

All'interno del laboratorio dell'istituto Marconi di proprietà della Provincia di Padova è presente un trasformatore, con relativo quadro di bassa per l'alimentazione di tutte le macchine presenti nello stesso laboratorio. Le macchine in questione sono per lo più torni e alcune fresatrici. Tale disposizione particolare del trasformatore richiede una valutazione dell'induzione magnetica generata data la frequente presenza degli studenti nel locale.

### *4.3.2 Riferimenti normativi*

**Norma CEI 106-12: "Guida pratica ai metodi e criteri di riduzione dei campi elettromagnetici prodotti dalle cabine elettriche MT/BT"**. La Guida si propone di fornire i criteri progettuali generali e di indicare le soluzioni tecniche realizzative per contenere i campi magnetici a 50 Hz prodotti dalle cabine secondarie MT/BT.

**Guida CENELEC CLC/TR50453: "Evaluation of electromagnetic fields around power transformers"**. Propone una guida per la valutazione dei campi elettromagnetici attorno ai trasformatori di Potenza. Si applica ai trasformatori idonei alla EN 60076 e che appartengono al range di Potenza  $5 \text{ kVA} \leq P \leq 1000 \text{ MVA}$ .

**D.Lgs. 81/2008**. In sintesi il Decreto Legislativo 9 aprile 2008, n° 81, prescrive che il datore di lavoro deve valutare e, quando necessario, calcolare i livelli dei campi elettromagnetici ai quali sono esposti i lavoratori, in particolare devono essere monitorati i campi secondo due parametri:

- Valori di azione (che farà scattare gli obblighi previsti dalla normativa);
- Valori limite di esposizione (che rappresenta il valore massimo di esposizione per il lavoratore)

Nell'Allegato XXXVI – Lettera B – Tabella 2, vengono riportati i valori limite di Azione, ovvero i valori di campo elettrico, campo magnetico e induzione magnetica oltre i quali il datore di lavoro deve redigere la valutazione del rischio da campi elettromagnetici. Nella fascia di frequenza in cui rientrano gli impianti a 50 Hz, i valori limiti del campo elettrico, campo magnetico e induzione magnetica sono rispettivamente:

<b>Campo elettrico [kV/m]</b>	<b>10</b>
<b>Campo magnetico [A/m]</b>	<b>400</b>
<b>Induzione magnetica [<math>\mu</math>T]</b>	<b>500</b>

**DPCM 8 Luglio 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 elettrodotti”.**

Non si applica ai lavoratori esposti per ragioni professionali, ma solo per gli abitanti, per i quali prevede i seguenti limiti:

Freuenza 50 Hz	<b>Intensità del campo elettrico E</b> (kV/m)	<b>Induzione magnetica B</b> ( $\mu$ T)
<b>Limite di esposizione *</b>	5	100
<b>Valore di attenzione **</b>	-	10
<b>Obiettivo di qualità **</b>	-	3

\* Valori efficaci

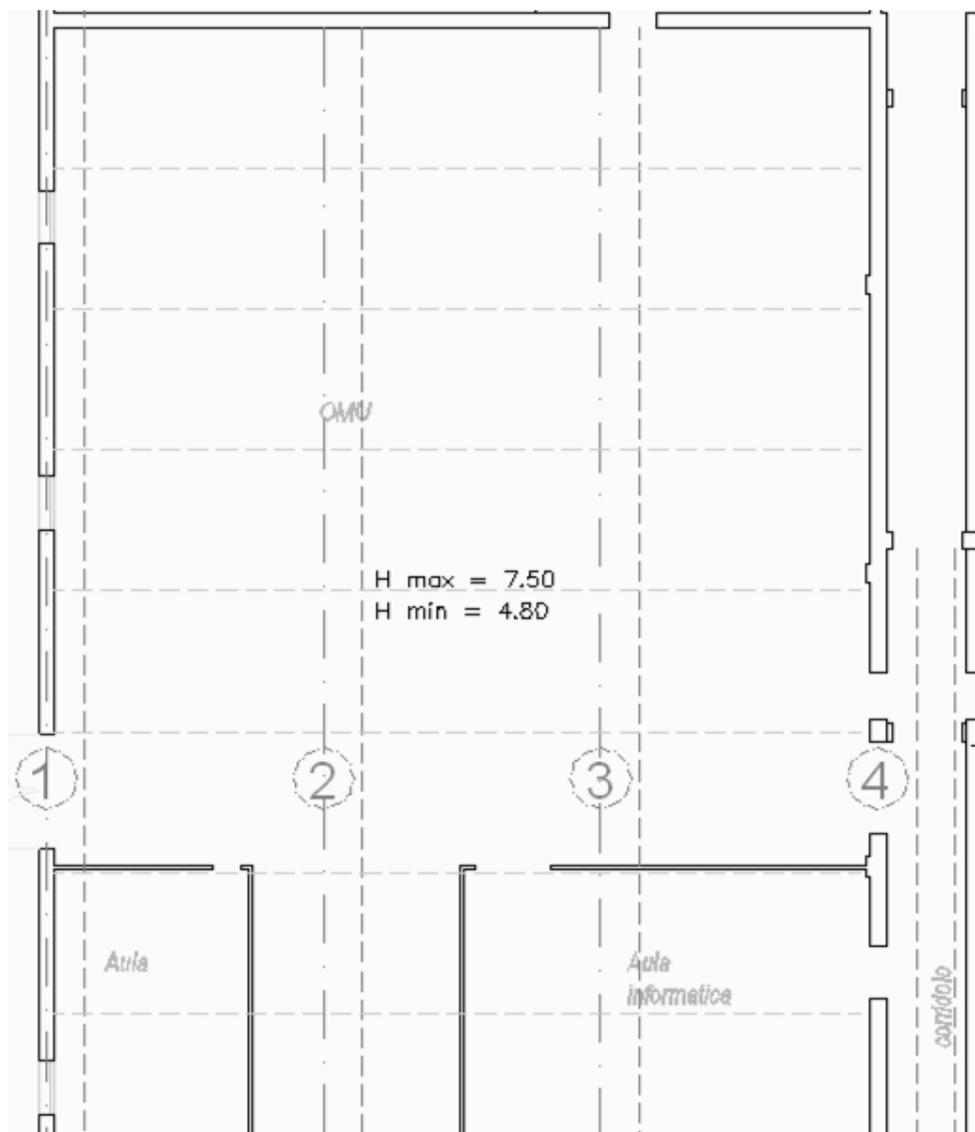
\*\* Mediana dei valori nell'arco delle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio

### 4.3.3 *Descrizione dell'impianto*

Qualche anno addietro sono stati effettuati dei lavori da parte della Provincia per standardizzare la tensione all'interno dell'istituto “Marconi”. Tale lavoro ha prodotto un innalzamento della tensione e una riorganizzazione dei cavidotti e delle blindosbarre. La nuova tensione era però incompatibile con quella richiesta dalle macchine presenti nel laboratorio analizzato in questo capitolo. Tale problema venne risolto inserendo nello stesso laboratorio un trasformatore con relativo quadro. Dalla parte inferiore del sezionatore escono i cavi che si estendono in tutta l'aula per alimentare le macchine; solo un paio di esse sono alimentate con diversa tensione prelevata direttamente dalla sbarra che passa a circa 5 metri al di sopra del pavimento. Il trasformatore è racchiuso in un box costituito da una recinzione protettiva per la protezione conto i contatti diretti. Dalla parte superiore del box escono i cavi, poggiati e fissati su una passerella metallica, che si collegano con quadro di bassa tensione. A fianco a quest'ultimo è presente il quadro relativo alla forza luce. Il quadro generale collegato sia al trasformatore che alle macchine era già presente anche prima della ristrutturazione dell'impianto, non è stato sostituito

perché la tensione delle macchine, rimanendo invariata, non richiedeva la sua sostituzione.

Il complesso dei dispositivi elettrici che verranno analizzati si trovano allocati in prossimità della parete, oltre ad essa vi è un corridoio. Nella *figura 4.14* è possibile vedere la planimetria del laboratorio. Come è possibile notare, l'aula informatica è separata dal laboratorio con una parete metallica ed è facile ritenere che i campi elettromagnetici in prossimità di quest'aula siano di basso livello. Sarà comunque possibile vedere tramite le simulazioni a quanti metri si estende la fascia di rispetto.



*Figura 4.14: Topografia dell'aula di laboratorio*

Vediamo di seguito i componenti presi in considerazione per la valutazione dei campi magnetici. Come detto in precedenza gli elementi che possono portare a un contributo non trascurabile del campo sono:

- trasformatore
- quadro di bassa tensione
- blindosbarra
- cavi di collegamento fra gli elementi elettrici

Per una trattazione completa sarebbe stato utile conoscere la disposizione dei cavi passanti al di sotto del pavimento per il collegamento del quadro alle utenze, ma in questa trattazione sono state tralasciate per focalizzare l'attenzione sugli elementi aventi anche un maggior impatto visivo e quindi soggetti a maggiore attenzione da parte degli utenti sulle problematiche dei campi a bassa frequenza.

### 4.3.4 *Trasformatore*

Il trasformatore è alloggiato all'interno di un box, necessario per evitare eventuali contatti diretti vista la presenza degli studenti a pochi metri da esso. Aprendo le porte del box con le particolari chiavi, si nota il trasformatore posto a terra e con i cavi disposti frontalmente. I dati sono ben visibili sulla targa della macchina posta superiormente ad essa.



*Figura 4.15: Foto del trasformatore all'interno del laboratorio*

Nella *Tabella 4.4* vengono riportati i dati di targa della macchina. Il trasformatore non alimenta in realtà solo le macchine del laboratorio in cui è alloggiato, ma anche altre macchine di un laboratorio vicino. Come si vedrà in seguito tale potenza viene considerata aumentando il grado di carico percentuale a cui il trasformatore è sottoposto. Infatti verranno eseguite due prove, una con le correnti misurate durante il giorno del sopralluogo, e una aumentando il carico per tenere in considerazione per l'appunto l'eventuale utilizzazione del laboratorio vicino. Se ora prendiamo il trasformatore come

Tabella 4.4: Grandezze nominali del trasformatore

<b>POTENZA NOMINALE [kVA]</b>	<b>200</b>
<b>V<sub>1</sub> NOMINALE [V]</b>	<b>380</b>
<b>V<sub>2</sub> NOMINALE [V]</b>	<b>220</b>
<b>I<sub>1</sub> NOMINALE [A]</b>	<b>304</b>
<b>I<sub>2</sub> NOMINALE [A]</b>	<b>5.25</b>
<b>V<sub>cc</sub>%</b>	<b>4.16</b>
<b>FREQUENZA [Hz]</b>	<b>50</b>

unica sorgente dell'induzione magnetica ed analizziamo il suo comportamento con un grado di utilizzazione circa del 30% (questa valutazione si basa sulla prova effettuata in laboratorio), si nota che al massimo a 1,5m dall'asse del trasformatore si raggiunga l'obiettivo di qualità (Figura 4.16). La fascia di rispetto

aumenta se tenessimo in considerazione anche i cavi in entrata e in uscita dal trasformatore.

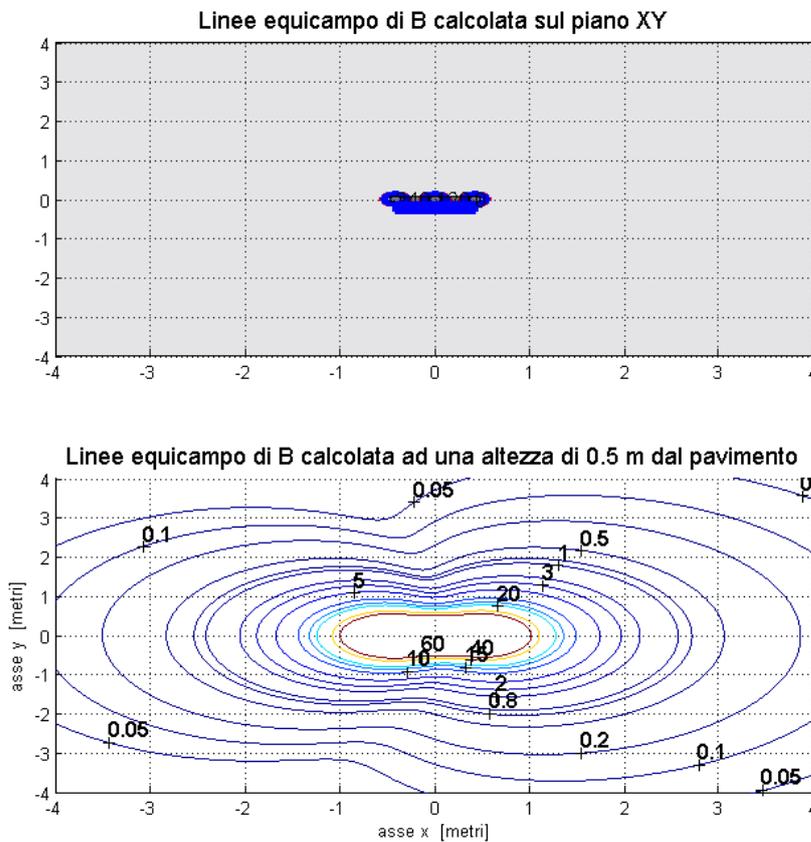


Figura 4.16: Linee isoinduzione del trasformatore

### 4.3.5 Quadro di bassa tensione

Come in una qualsiasi cabina elettrica, il quadro che racchiude l'interruttore generale genera un contributo, nella generazione dei campi, affatto trascurabile. Nella sua modellizzazione è stato semplificato come un involucro in cui all'interno è percorso da cavi in cui circola la stessa corrente in uscita dal secondario del trasformatore. Dalla sua estremità inferiore iniziano i percorsi che portano all'alimentazione dei torni e delle fresatrici. Tali cavi sono stati tralasciati in questa trattazione. Sulla parte superiore del quadro sono posti degli amperometri, di cui solo uno funzionante. Il quadro è stato modellizzato come un volume al cui interno si



Figura 4.17: Foto del quadro di bassa tensione del laboratorio di macchine utensili

introduce un cavo trifase con la stessa corrente all'uscita del trasformatore. Siccome la distanza delle fasi non è nota, si è supposto che vi sia un distacco tra di esse di 5cm. In realtà aumentare tale valore risulta quasi indifferente, infatti a qualche decina di centimetri al di fuori dell'involucro del quadro si avranno valori dell'induzione magnetica molto bassi. Anche se volessimo valutare una situazione peggiore aumentando la distanza delle fasi si avrebbe una variazione delle linee di campo di qualche centimetro.

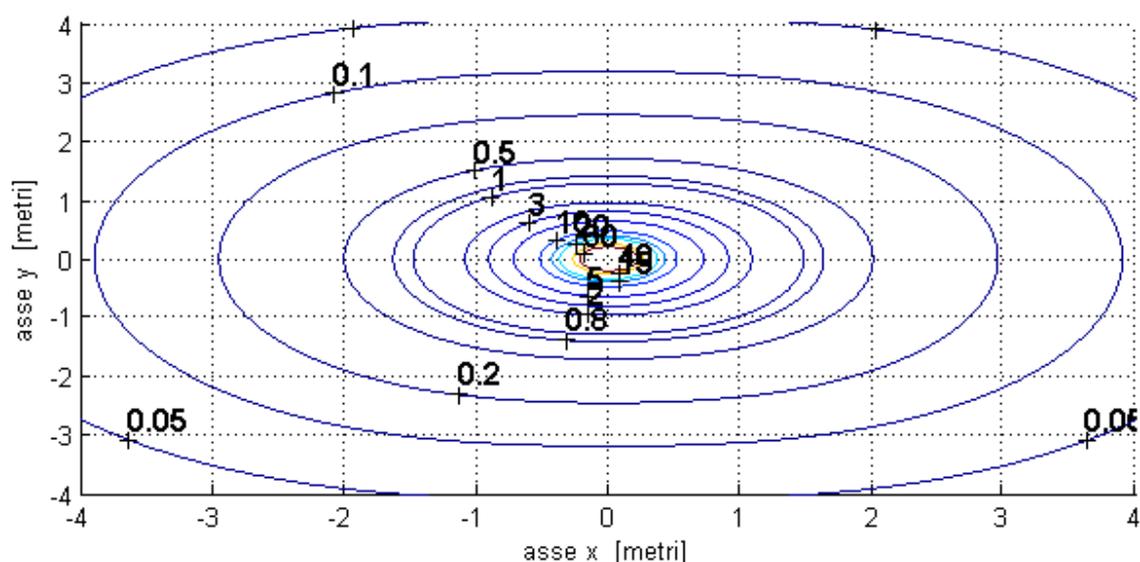


Figura 4.18: Linee isoinduzione prodotte dal quadro di bassa tensione

#### 4.3.6 *Blindosbarra*

È fissata a circa cinque metri da terra attraversa tutta la lunghezza del laboratorio. Non si conosce precisamente le correnti che circolano in essa ma si è fatta una stima che, oltre alle correnti richieste dal trasformatore, fluiscono anche le correnti per l'illuminazione ed altro per un totale di 20 kW. Dalla relazione:

$$P = \sqrt{3} E I$$

si ottiene una stima delle correnti da aggiungere a quelle richiamate dall'utilizzazione del trasformatore.

#### 4.3.7 *Rappresentazione della cabina*

Nei paragrafi precedenti sono state illustrate le caratteristiche dei componenti all'interno della cabina, ora partendo dalla topografia del locale cabina si posizionano tali oggetti e si definisce un dominio di calcolo. Siccome lo scopo è quello di valutare il valore dell'induzione nell'intorno della zona di trasformazione, il dominio di calcolo è rappresentato dal laboratorio stesso e da circa 3 metri alle spalle del trasformatore. Infatti alle spalle del trasformatore e del sezionatore vi è il corridoio.

L'ingombro e la posizione del quadro di bassa, e del trasformatore sono quelle realmente esistenti. Per quanto riguarda i collegamenti tra i vari oggetti si è cercato di rispettare fedelmente la loro posizione e la loro guida, un certo margine di errore sarà dovuto però alla distanza tra le fasi. I cavi, infatti, sono fissati e protetti da guide metalliche, quindi non sono visibili. I collegamenti col trasformatore e la semplificazione della struttura

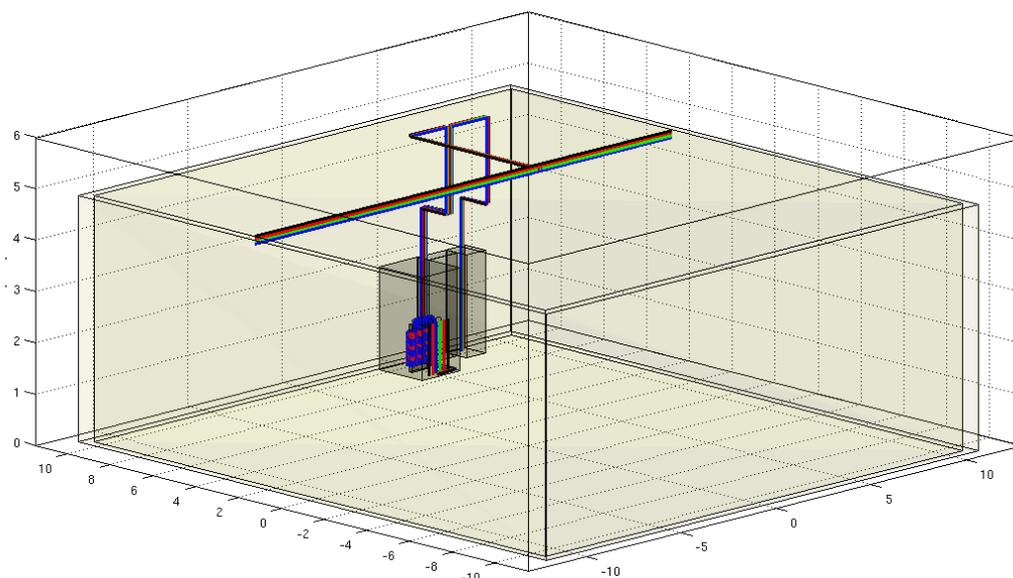


Figura 4.19: Layout del laboratorio ricostruito in MatLab

elettrica del sezionatore possono dare un margine d'errore ma comunque sia il loro contributo al campo magnetico rimane simile a quello reale. Il Layout in 3D è rappresentato nella *Figura 4.17*. Per semplicità viene riportato la porzione del file "Dati.xls" in cui vengono inseriti tutti i dati riguardanti le coordinate degli elementi e dei cavi e tutte le informazioni che descrivono il comportamento rispetto all'induzione magnetica. Si ricorda che la distanza fra le fasi è stata ipotizzata seguendo quello che potrebbe essere la reale lontananza tra di essi.

<b>Coordinate del centro della base del volume di visualizzazione:</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>Dimensioni del volume di visualizzazione:</b>	<b>Lunghezza</b>	<b>Profondità</b>	<b>Altezza</b>
	<b>26</b>	<b>23</b>	<b>6</b>
<b>Discretizzazione del dominio di calcolo</b>	<b>Lungo X</b>	<b>Lungo Y</b>	
	<b>100</b>	<b>100</b>	
<b>Centro della base della cabina nell'area di visualizzata</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>DIMENSIONI DELLA CABINA</b>	<b>Lunghezza</b>	<b>Profondità</b>	<b>Altezza</b>
	<b>22</b>	<b>21</b>	<b>4,8</b>
<b>Spessore pareti</b>	<b>0,4</b>		
<b>Tensione nominale del lato Media Tensione [Volt]</b>	<b>380</b>		
<b>Tensione nominale del lato Bassa Tensione [Volt]</b>	<b>220</b>		
<b>DATI DEL TRASFORMATORE</b>			
<b>Potenza nominale [kVA]</b>	<b>200</b>		
<b>Tipologia</b>	<b>2</b>		
<b>Posizione del trasformatore [m]</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
	<b>5</b>	<b>9,5</b>	<b>0</b>
<b>Angolo di rotazione rispetto all'asse X [°]</b>	<b>0</b>		
<b>Grado di carico del trasformatore [%]</b>	<b>29,2</b>		
<b>Disposizione delle fasi lato BT da destra a sinistra</b>	<b>U</b>	<b>V</b>	<b>W</b>
	<b>0</b>	<b>120</b>	<b>240</b>
<b>Squilibrio delle correnti assorbite nelle fasi BT [%]</b>	<b>U</b>	<b>V</b>	<b>W</b>
	<b>101,74</b>	<b>99,78</b>	<b>98,48</b>

COLLEGAMENTI IN CAVO							
1	2,4	0,05	178,1	9	1,4	0,05	153,33
1	0	120	240	9	0	120	240
1	100	100	100	9	101,74	99,78	98,48
1	-11	3	4,7	9	5,3	8,8	0
1	11	3	4,7	9	6,1	8,8	0
2	1,4	0,05	91,1	9	6,1	10,2	0
2	0	120	240	10	2,4	0,05	153,33
2	102,6	101,1	96,6	10	0	120	240
2	4	3	4,7	10	101,74	99,78	98,48
2	4	9	4,7	10	6,1	10,2	0
2	5,9	9	4,7	10	6,1	10,2	3
3	2,4	0,05	91,1	11	1,4	0,05	153,33
3	0	120	240	11	0	120	240
3	102,6	101,1	96,6	11	101,74	99,78	98,48
3	5	9	4,7	11	6,1	10,2	3
3	5,9	9	3	11	6,1	9	3
4	1,4	0,05	91,1	12	2,4	0,05	153,33
4	0	120	240	12	0	120	240
4	102,6	101,1	96,6	12	101,74	99,78	98,48
4	5,9	9	3	12	6,1	9	3
4	5,9	10,2	3	12	6,1	9	4,7
5	2,4	0,05	91,1	13	1,4	0,05	153,33
5	0	120	240	13	0	120	240
5	102,6	101,1	96,6	13	101,74	99,78	98,48
5	5,9	10,2	3	13	6,1	9	4,7
5	5,9	10,2	0	13	8	9	4,7
6	1,4	0,05	91,1	14	2,4	0,05	153,33
6	0	120	240	14	0	120	240
6	102,6	101,1	96,6	14	101,74	99,78	98,48
6	5,9	10,2	0	14	8	9	4,7
6	5,9	8,8	0	14	8	9	3
6	5	8,8	0	15	1,4	0,05	153,33
7	2,4	0,05	91,1	15	0	120	240
7	0	120	240	15	101,74	99,78	98,48
7	102,6	101,1	96,6	15	8	9	3
7	5,1	8,8	0	15	8	10,2	3
7	5,1	8,8	1	16	2,4	0,05	153,33
8	2,4	0,2	153,33	16	0	120	240
8	0	120	240	16	101,74	99,78	98,48
8	101,74	99,78	98,48	16	8	10,2	3
8	5,3	8,8	1	16	8	10,2	0
8	5,3	8,8	0				

### 4.3.8 Simulazioni e risultati

Gli elementi che potrebbero fornire un valore di induzione tale da poter avvicinarsi o superare i livelli di attenzione forniti dalla legislazione sono il trasformatore, il quadro di bassa e la blindo sbarra che percorre dall'alto l'intero laboratorio. E' logico ritenere che la distanza tra la sbarra e il gruppo trasformatore – quadro è tale da non portare a combinare i campi magnetici prodotti singolarmente aumentandone in modo significativo il valore. Si analizza quindi in un primo momento il campo generato dal trasformatore e dal quadro di bassa tensione osservando il piano XY (il piano parallelo al pavimento) e in seconda analisi quello prodotto dalla solo sbarra.

Per avere un'idea del carico che il trasformatore deve alimentare, sono state avviate delle macchine all'interno del laboratorio. Trenta torni e cinque fresatrici sono state fatte lavorare a vuoto e sistematicamente si sono misurate le correnti del trasformatore, sia al primario che al secondario. La misura è stata eseguita con una pinza amperometrica. Nella *Tabella 4.5* vengono riportate le correnti misurate al primario al secondario del trasformatore:

<b>R<sub>1</sub></b> [A]	93.5
<b>S<sub>1</sub></b> [A]	92.1
<b>T<sub>1</sub></b> [A]	87.7
<b>R<sub>2</sub></b> [A]	156
<b>S<sub>2</sub></b> [A]	153
<b>T<sub>2</sub></b> [A]	151
<b>N</b> [A]	10.4

**Tabella 4.5:** Correnti misurate al primario e al secondario del trasformatore

La mancanza di equilibrio fra le fasi provoca un aumento del livello dell'induzione, quindi si dovrà specificare il grado di squilibrio di ogni fase dei conduttori all'interno del software di simulazione. Se per ora prendiamo in considerazione le correnti al primario, fatto cento la media delle correnti delle tre fasi, si ha che rispetto alla media:

<b>R<sub>1</sub></b>	102.6%
<b>S<sub>1</sub></b>	101.1%
<b>T<sub>1</sub></b>	96.26%
<b>I<sub>media</sub></b> [A]	91.1

**Tabella 4.6:** Grado di squilibrio delle correnti nell'avvolgimento primario del trasformatore

Per il secondario si procede col medesimo sistema, quindi calcolando la corrente media al secondario le fasi risultano squilibrate di:

<b>R<sub>2</sub></b>	101.74%
<b>S<sub>2</sub></b>	99.78%
<b>T<sub>2</sub></b>	98.48%
<b>I<sub>media</sub> [A]</b>	153.3

**Tabella 4.7:** Grado di squilibrio delle correnti nell'avvolgimento secondario del trasformatore

Con queste correnti il trasformatore lavora al 29.2%. Una simulazione dell'andamento dei campi è quindi stata fatta utilizzando questo carico. La stessa macchina alimenta anche un altro laboratorio, ma tenendo conto che non tutte le macchine operano continuamente ed allo stesso momento, si è deciso di fare una prova aumentando il grado di carico del trasformatore di venti punti percentuali, quindi al 49.2%. Quindi una prova aggiuntiva la si è dovuta eseguire per sapere se un carico maggiore potrebbe produrre, nel laboratorio, campi di valore superiore a quelli stabiliti dalle norme. Con tale prova il valore delle correnti in entrata e in uscita del trasformatore sono rispettivamente di:

<b>R<sub>1</sub> [A]</b>	153.38
<b>S<sub>1</sub> [A]</b>	151.14
<b>T<sub>1</sub> [A]</b>	143.9
<b>R<sub>2</sub> [A]</b>	262.72
<b>S<sub>2</sub> [A]</b>	257.66
<b>T<sub>2</sub> [A]</b>	254.30

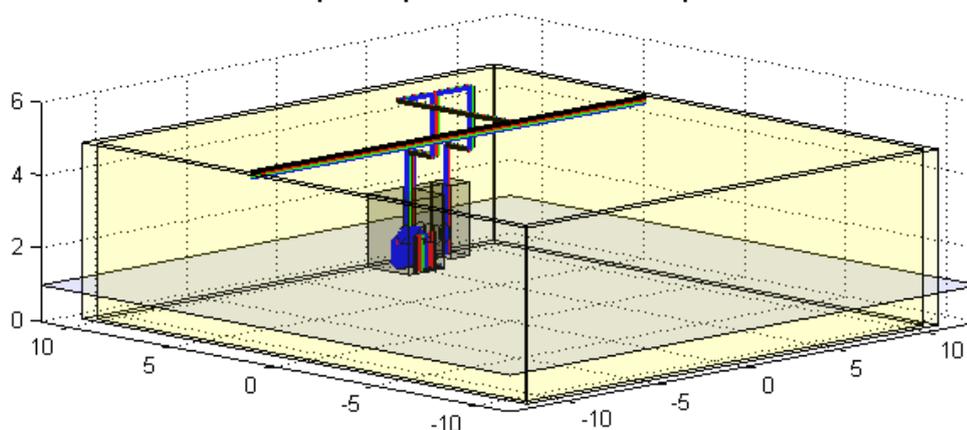
**Tabella 4.8:** Correnti assorbite al primario e al secondario con trasformatore

Cercando di mantenere invariato il posizionamento dei cavi, del trasformatore e del quadro, si è riprodotto attraverso Matlab l'insieme di questi componenti all'interno di un locale. Come visto precedentemente, la blindo sbarra è stata modellizzata come una serie di cavi rappresentanti le fasi e il neutro. In realtà all'interno della blindo è presente un quarto cavo in cui passa un segnale di controllo. Tale cavo non è in questo caso abilitato, ma anche se lo fosse, per uno studio di massima, comporterebbe una minima alterazione dell'andamento del campo attorno alla stessa blindo. Oltre a trasportare le correnti richieste dal trasformatore, si è tenuto conto di un ulteriore trasporto di corrente dovuto alla richiesta del carico luci. Una potenza complessiva per questo carico di 20 kW. Come detto in precedenza la blindo sbarra si trova all'altezza di 4,7 metri e da essa vengono derivati i cavi per il collegamento con il trasformatore. Essi sono sorretti da passerelle, e

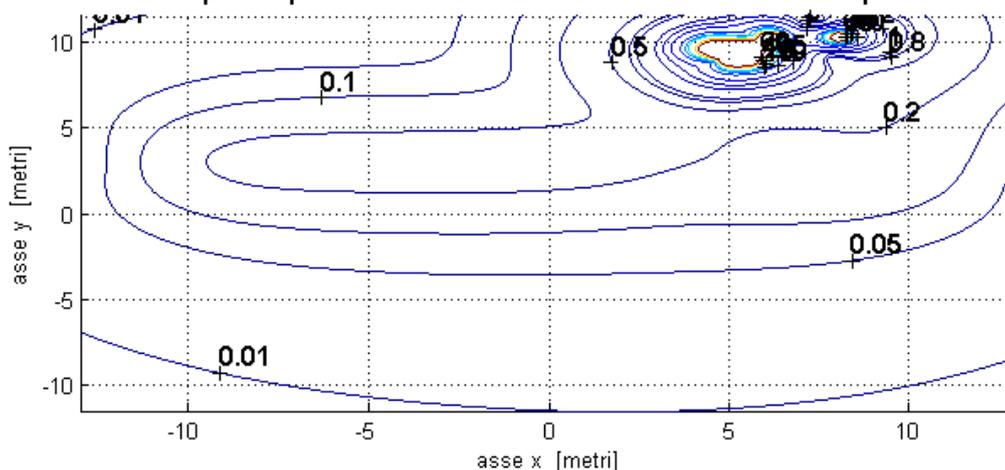
quando questi scendono attraverso la parete per collegarsi ai terminali del trasformatore e del quadro di bassa sono racchiusi dallo stesso involucro usato per le passerelle. Quindi sia per un fatto estetico che per ragioni di sicurezza, tali cavi sono ben protetti contro eventuali contatti diretti. In realtà dalla blindo vengono derivati altri due cavi che vanno ad alimentare altrettante macchine, dato che la tensione di alimentazione di queste sono diverse da quella che si ha all'uscita del trasformatore. Comunque si è potuto tralasciare la valutazione dell'impatto di questi dato che, oltre a correnti modeste, un'eventuale produzione di campi di valore interessante sarebbe stata circoscritta in un'area molto vicina al conduttore stesso. Un'eventuale superamento dei  $10 \mu\text{T}$  sarebbe comunque rientrato nella normativa dato che la presenza di un utente vicino alla macchina non supera le quattro ore previste dalla stessa normativa.

Valutiamo ora il caso di un carico sul trasformatore del 29.2%. analizziamo l'andamento dell'induzione su due piani, uno sulla sezione frontale della blindo sbarra e uno orizzontalmente al terreno.

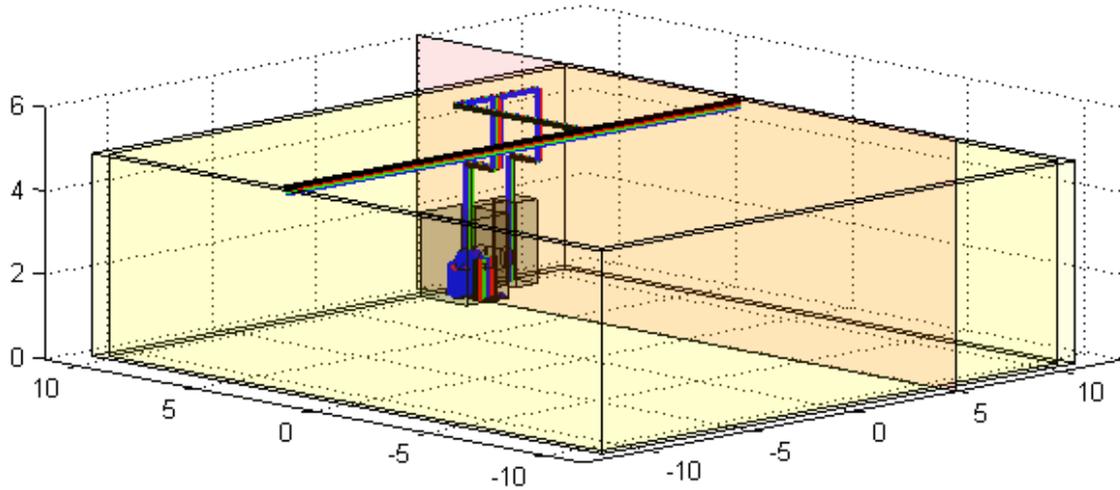
Linee equicampo di B calcolata sul piano XY



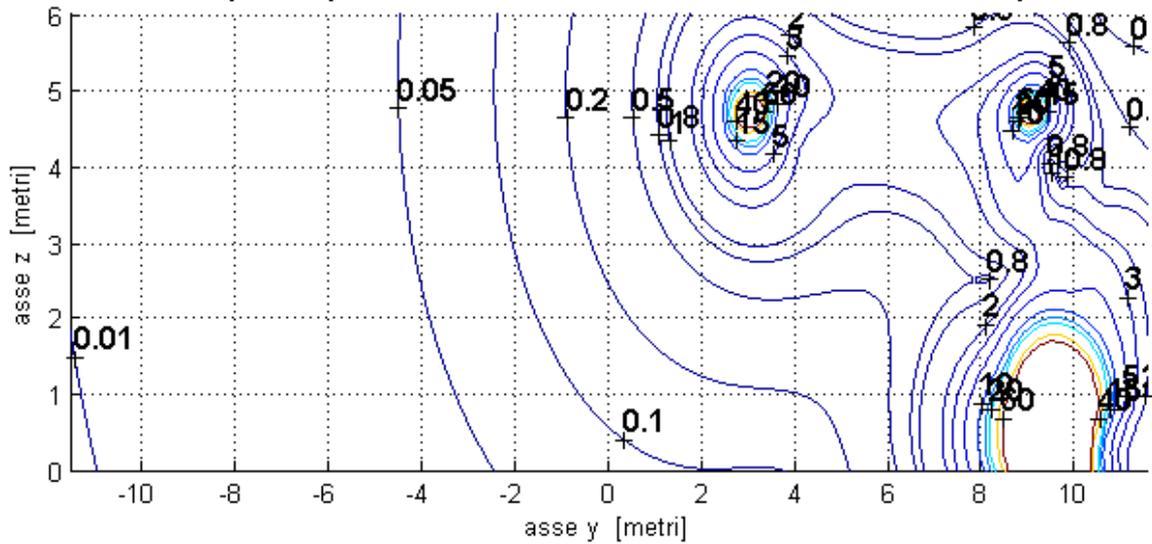
Linee equicampo di B calcolata ad una altezza di 1 m dal pavimento



Linee equicampo di B calcolata sul piano YZ

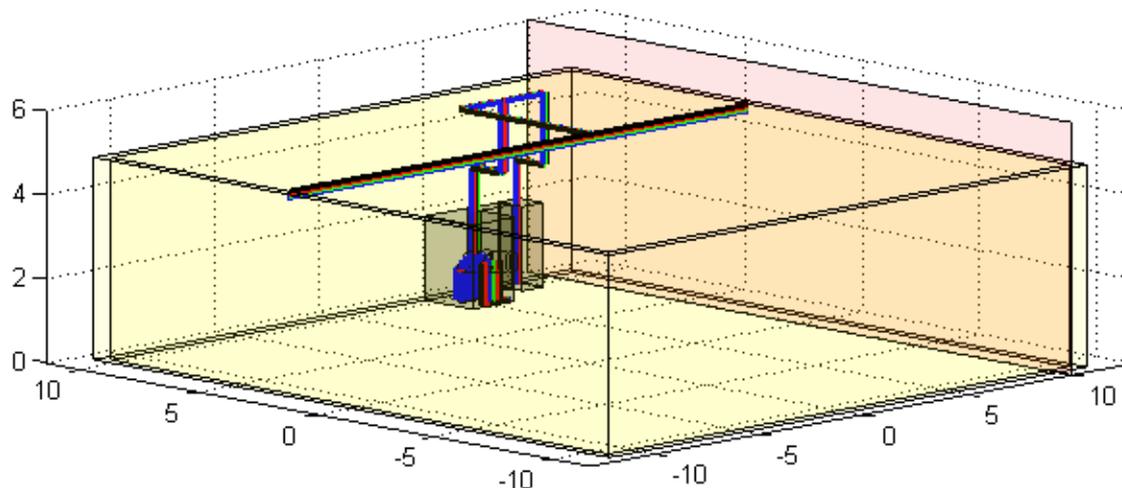


Linee equicampo di B calcolata a una distanza di 5 m dalla parete

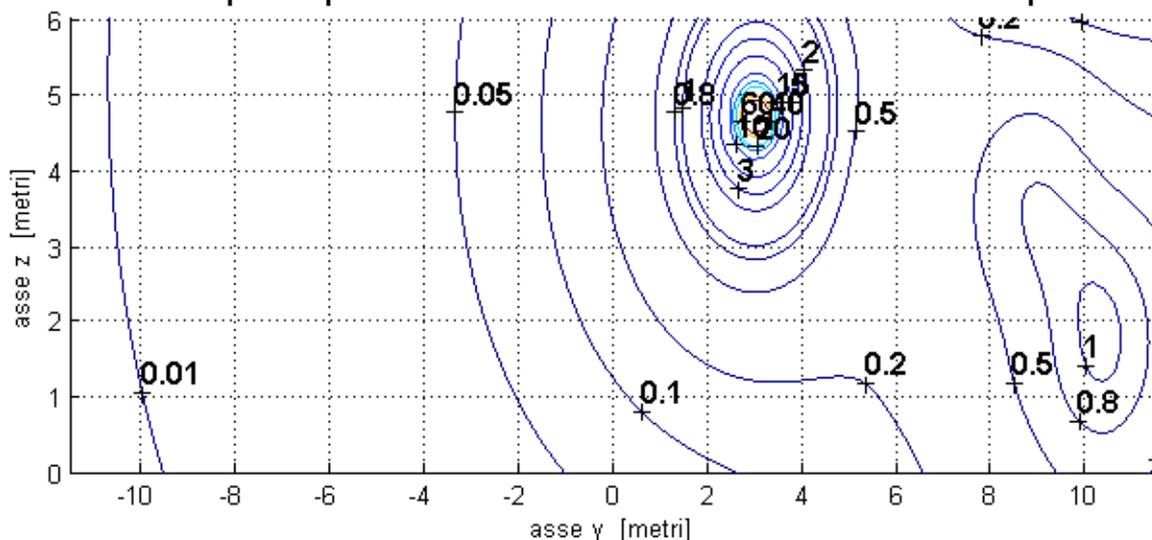


Se ora ci muove di qualche metro, si può osservare l'andamento del campo pressochè prodotto solamente dalla blindo:

**Linee equicampo di B calcolata sul piano YZ**



**Linee equicampo di B calcolata a una distanza di 10 m dalla parete**

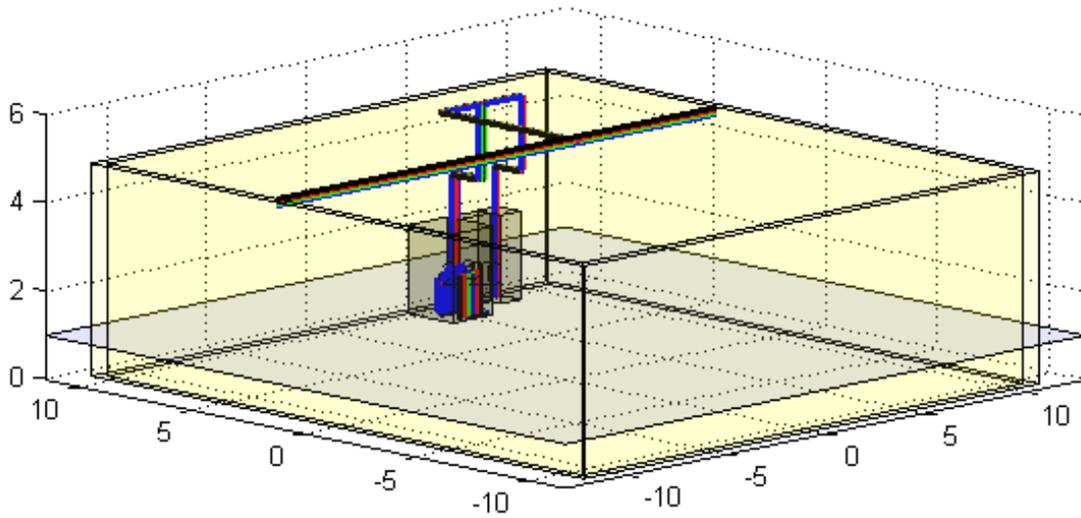


I risultati mostrano che a un paio di metri dall'asse del trasformatore si è raggiunge il livello di  $3 \mu\text{T}$ , a lo stesso valore lo si trova a poco meno di quattro metri di altezza dal terreno se ci si posizione al di sotto della blindosbarra.

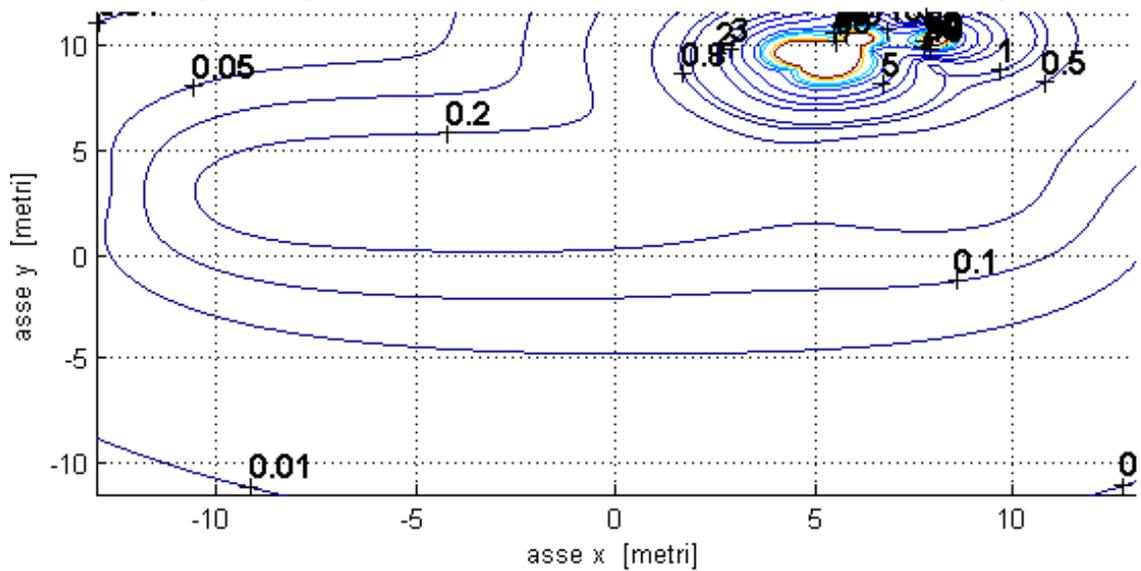
Precisando che la maggior parte delle macchine sono a una distanza molto maggiore di 2 metri rispetto al trasformatore, si può affermare che gli utenti interagiscono con livelli d'induzione molto al di sotto di quelli menzionati dalla normativa. Se ora analizziamo il secondo caso, cioè se aumentassimo il carico del 20% (quindi il trasformatore

lavorerebbe con un grado di carico del 49.2%) otteniamo, sugli atessi piani analizzati in precedenza, le seguenti linee isoinduzione:

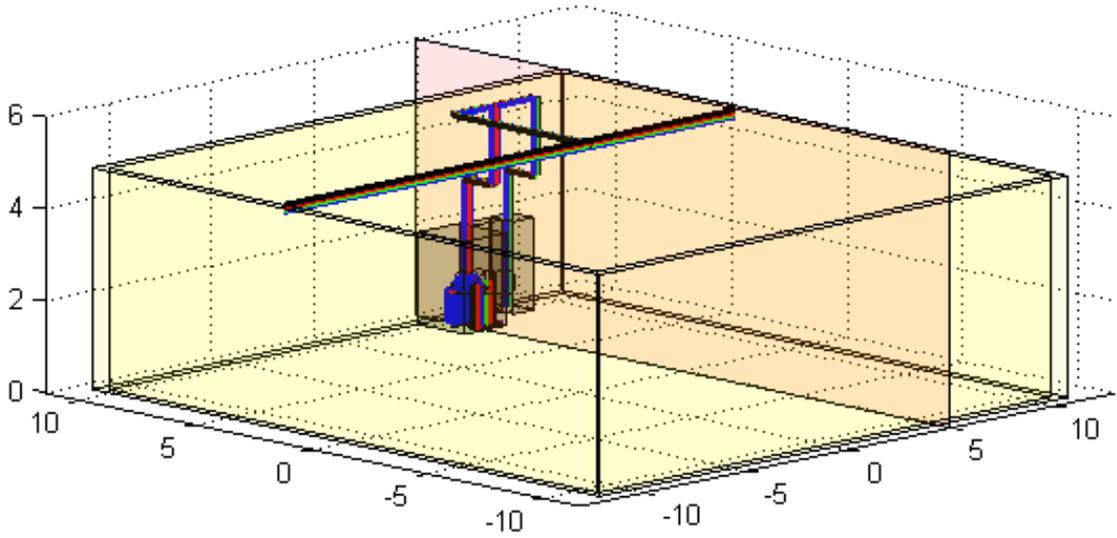
**Linee equicampo di B calcolata sul piano XY**



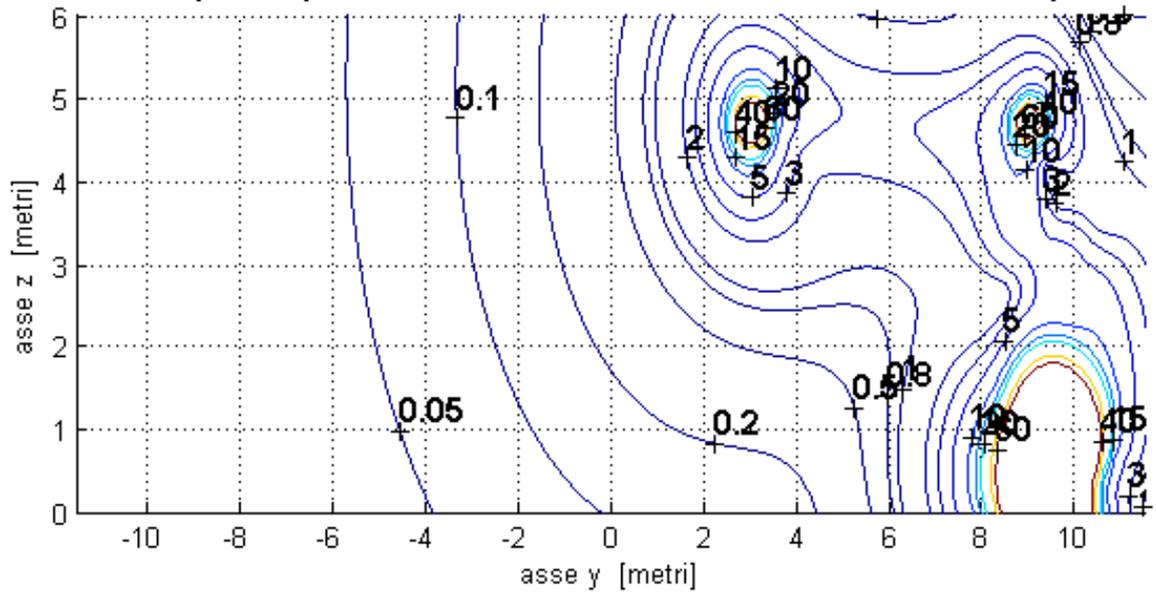
**Linee equicampo di B calcolata ad una altezza di 1 m dal pavimento**



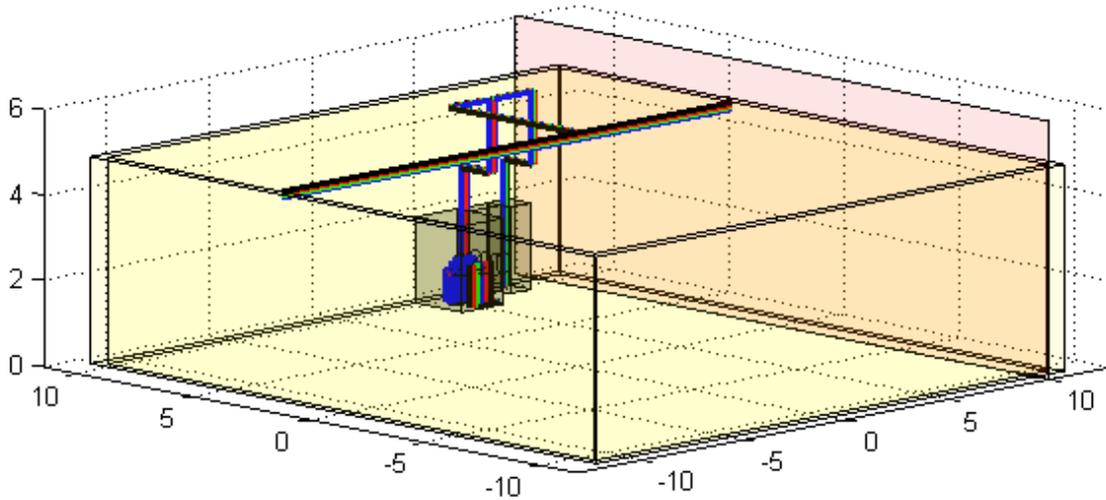
Linee equicampo di B calcolata sul piano YZ



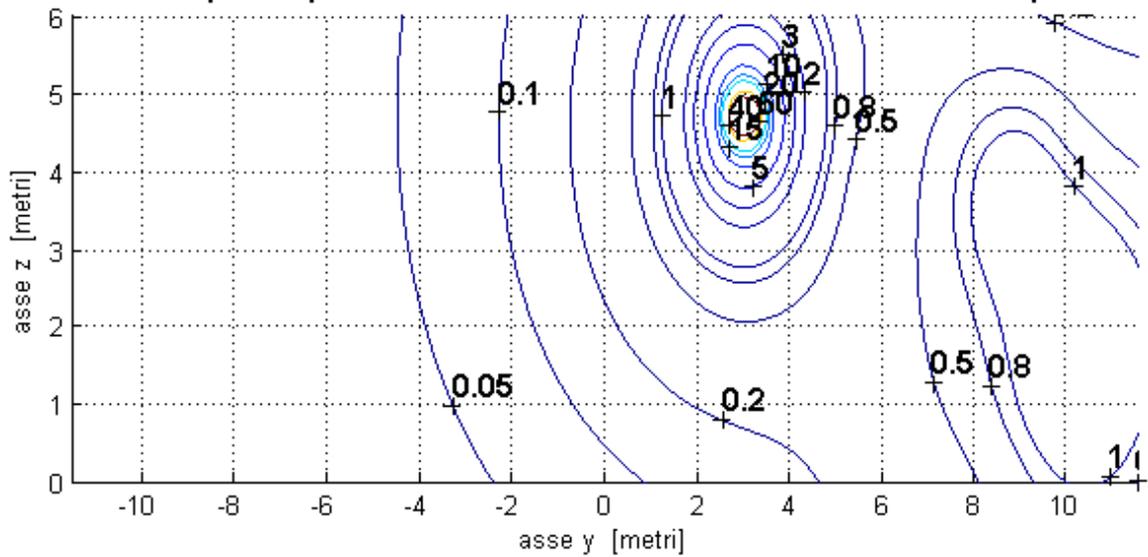
Linee equicampo di B calcolata a una distanza di 5 m dalla parete



Linee equicampo di B calcolata sul piano YZ



Linee equicampo di B calcolata a una distanza di 10 m dalla parete

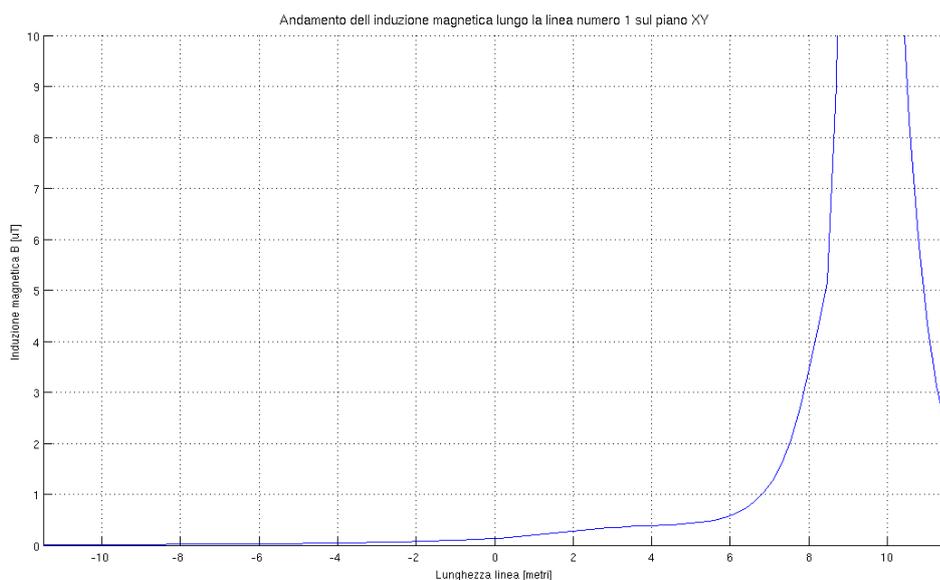


Aumentando la potenza richiesta dal trasformatore, aumentano anche le correnti da esso richiamate. Tali correnti sono state mantenute con lo stesso squilibrio e assumono i valori di:

<b>R<sub>2</sub> [A]</b>	262.72
<b>S<sub>2</sub> [A]</b>	257.66
<b>T<sub>2</sub> [A]</b>	254.30
<b>I<sub>media</sub> [A]</b>	258.23

**Tabella 4.9:** Correnti al secondario del trasformatore

La differenza rispetto al caso precedente è minima, quindi le considerazioni citate sopra valgono anche in questo caso. Per avere una maggiore chiarezza dell'andamento del campo poniamoci sul piano XY a un metro di altezza rispetto al pavimento, tracciamo una linea frontale al trasformatore (dove abbiamo il maggior contributo) e preleviamo tutto i valori dell'induzione. Si ottiene il profilo rappresentato nella *Figura 4.20*:



**Figura 4.20:** Variazione dell'induzione magnetica del trasformatore sul piano XY

A due metri dalla parete siamo già a 3 µT. Si nota come il campo scenda rapidamente con l'aumentare della distanza dalla sorgente. Questa è da intendere come valutazione approssimata, perché le geometrie dei cavi influenzano per quanto è possibile l'andamento del campo, quindi una curvatura dei conduttori comporta un aumento del campo all'interno della curva, mentre all'esterno diminuisce. Il software non tiene conto di questi contributi che comunque rimangono minimi. Lo stesso vale per l'involucro del

trasformatore. Sicuramente avrà un effetto schermante in tutte le direzioni, ma in questo studio è impossibile valutare il suo contributo.

Probabilmente sarebbe interessante valutare i campi prodotti dai conduttori che escono dal quadro di bassa e che si allacciano alle macchine, ma siccome non si conosce il loro percorso e come si diramano sotto al pavimento, si è tralasciato questo studio. Se guardiamo i risultati ottenuti sopra, è plausibile arrivare alla conclusione che già a qualche centimetro dall'involucro del cavo si avrebbero livelli accettabili di campo.

#### *4.3.9 Conclusioni*

Premettendo che il laboratorio in cui è situato il trasformatore e il quadro non è frequentato per un tempo maggiore di quattro ore al giorno dagli utenti, non persiste il limite dei 10  $\mu\text{T}$  e nemmeno dei 3  $\mu\text{T}$  attribuibile ai nuovi impianti. Tuttavia gli elementi elettrici che generano campi elettromagnetici producono nella zona dei macchinari valori estremamente modesti di induzione. A una distanza di due metri dalla parete e in direzione frontale al trasformatore siamo al limite di 3  $\mu\text{T}$ , e tale distanza coincide con l'area occupata dall'involucro del trasformatore. Pertanto non sussistono inosservanze del Decreto 81/08. Lo stesso lo possiamo dire per il quadro di bassa tensione posto a qualche metro dal trasformatore. Il campo da esso prodotto è circoscritto a qualche centimetro dallo stesso. Sarebbe opportuno comunque valutare attraverso una sonda i valori dell'induzione in un'area subito attorno a questi elementi per avere la certezza, oltre che a un riscontro reale e non solo simulato, che non vi siano dei punti in cui l'iterazione fra campi provocano un superamento dei livelli stabiliti dalla normativa.

## 4.4 Andamento dell'induzione magnetica nella cabina MT/BT del nuovo liceo "G.B. Ferrari" di Este

### 4.4.1 Scopo

Il liceo "B.G. Ferrari" di Este ha una cabina di trasformazione MT/BT situata a fianco della mensa e dei locali adibiti al lavaggio delle stoviglie e alla raccolta delle immondizie. Tale impianto è stato analizzato in base agli schemi elettrici forniti dal settore edilizia della Provincia di Padova.

### 4.4.2 Riferimenti normativi

**Norma CEI 106-12: "Guida pratica ei metodi e criteri di riduzione dei campi elettromagnetici prodotti dalle cabine elettriche MT/BT"**. La Guida si propone di fornire i criteri progettuali generali e di indicare le soluzioni tecniche realizzative per contenere i campi magnetici a 50 Hz prodotti dalle cabine secondarie MT/BT.

**Guida CENELEC CLC/TR50453: "Evaluation of electromagnetic fields around power transformers"**. Propone una guida per la valutazione dei campi elettromagnetici attorno ai trasformatori di Potenza. Si applica ai trasformatori idonei alla EN 60076 e che appartengono al range di Potenza  $5 \text{ kVA} \leq P \leq 1000 \text{ MVA}$ .

**D.Lgs. 81/2008.** In sintesi il Decreto Legislativo 9 aprile 2008, n° 81, prescrive che il datore di lavoro deve valutare e, quando necessario, calcolare i livelli dei campi elettromagnetici ai quali sono esposti i lavoratori, in particolare devono essere monitorati i campi secondo due parametri:

- Valori di azione (che farà scattare gli obblighi previsti dalla normativa);
- Valori limite di esposizione (che rappresenta il valore massimo di esposizione per il lavoratore)

Nell'Allegato XXXVI – Lettera B – Tabella 2, vengono riportati i valori limite di Azione, ovvero i valori di campo elettrico, campo magnetico e induzione magnetica oltre i quali il datore di lavoro deve redigere la valutazione del rischio da campi elettromagnetici. Nella fascia di frequenza in cui rientrano gli impianti a 50 Hz, i valori limiti del campo elettrico, campo magnetico e induzione magnetica sono rispettivamente:

<b>Campo elettrico [kV/m]</b>	<b>10</b>
<b>Campo magnetico [A/m]</b>	<b>400</b>
<b>Induzione magnetica [<math>\mu\text{T}</math>]</b>	<b>500</b>

**DPCM 8 Luglio 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 elettrodotti”.**

Non si applica ai lavoratori esposti per ragioni professionali, ma solo per gli abitanti, per i quali prevede i seguenti limiti:

<b>Frequenza 50 Hz</b>	<b>Intensità del campo elettrico E (kV/m)</b>	<b>Induzione magnetica B (<math>\mu</math>T)</b>
<b>Limite di esposizione *</b>	5	100
<b>Valore di attenzione **</b>	-	10
<b>Obiettivo di qualità **</b>	-	3

\* Valori efficaci

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

#### 4.4.3 *Descrizione dell'impianto*

Il locale adibito a cabina di trasformazione contiene al suo interno il trasformatore, il quadro di media, il quadro di bassa e una serie di dispositivi di sicurezza come l'UPS il soccorritore e il rifasamento automatico. La cabina è posizionata nella parte più esterna del liceo, quindi un suo lato confina con il cortile della scuola. Gli altri lati confinano rispettivamente con un locale ENEL, con la parte terminale di un locale adibito alla mensa e nel rimanente lato confina sia con il locale per il lavaggio delle stoviglie sia con un locale per la raccolta dei rifiuti. Siccome i cavi all'uscita del quadro di bassa interessano il locale bar e di ristorazione, si dovrà verificare quanto influiscono tali cavi nella generazione dell'induzione magnetica. Per la modellizzazione dell'impianto non sono stati presi in considerazione i dispositivi di sicurezza, ma solo gli elementi principali caratterizzanti le cabine di trasformazione, quindi i quadri di media e di bassa, il trasformatore e le rispettive connessioni. Non sono stati trascurati il quadro generale preferenziale e il quadro del soccorritore dato sono posti vicino alla parete del locale mensa.

I cavi sono alloggiati ad una profondità di 40cm dal pavimento, mentre i cavi che escono dal quadro di bassa tensione poggiano su canali sopraelevati e seguono la parete a una distanza di circa 30cm e con un'altezza di 2.86m rispetto al suolo. L'alimentazione proviene dal locale ENEL posto su un fianco della stessa cabina. Per la loro posizione si è fatto

riferimento alle tavole progettuali, mentre per il distanziamento tra le fasi non vi sono dati e si è fissata una distanza di 5cm.

#### 4.4.4 Trasformatore

È alloggiato all'interno di un box metallico per la protezione contro i contatti diretti. Le caratteristiche della macchina sono riportate nella *Tabella 4.10*:

*Tabella 4.10: Caratteristiche del trasformatore della cabina mt/bt del liceo "Ferrari" di Este*

<b>Tipo di isolamento</b>	Resina
<b>Potenza nominale [kVA]</b>	250
<b>V<sub>1n</sub> [V]</b>	20000 ± 2x2.5%
<b>V<sub>2n</sub> [V]</b>	400/230
<b>Frequenza [Hz]</b>	50
<b>Vcc [%]</b>	6%
<b>Tipo di collegamento</b>	Dyn11

Nel file "Dati.m" utilizzato come input dal programma di simulazione, è stata inserita come potenza nominale quella di targa, per quanto riguarda le tensioni al primario e al secondario sono state inserite le tensioni di lavoro:

$$V_1 = 20000 \text{ V}$$

$$V_2 = 400 \text{ V}$$

Dal rapporto delle tensioni ricaviamo il rapporto di trasformazione  $m$  che è pari a:

$$m = \frac{V_1}{V_2} = 50$$

Allora le correnti assorbite al primario ed erogate al secondario saranno rispettivamente:

$$I_1 = \frac{S}{\sqrt{3} * V_1} = 7.21 \text{ A}$$

$$I_2 = I_1 * m = 360.84 \text{ A}$$

Siccome non vi sono misurazioni riguardanti l'entità dello squilibrio delle correnti nelle fasi, si è scelto di omettere un eventuale squilibrio. È da ricordare che maggiore è lo squilibrio, maggiore è l'entità dell'induzione magnetica a causa di una riduzione del compenso tra le fasi. Il grado di carico è stato settato al 100% per ricondurci al caso più gravoso. Ora attraverso questi dati possiamo vedere le linee isocampo dell'induzione magnetica da esso generato (*Figura 4.21*):

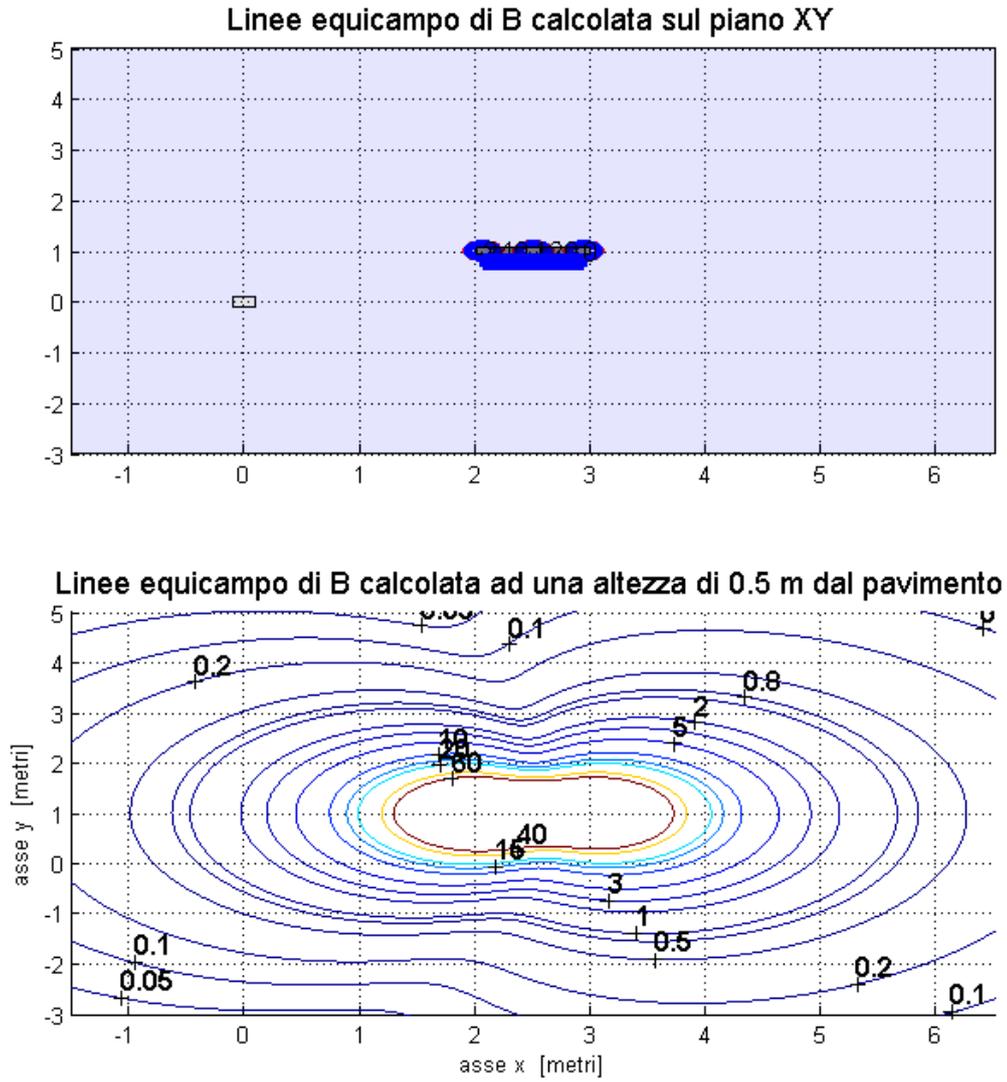


Figura 4.21: Linee isoinduzione generate dal trasformatore

### 4.3.5 Quadro di media tensione

Come per il trasformatore i dati del quadro di media tensione sono stati prelevati dal progetto e vengono riportati nella *tabella 4.11*:

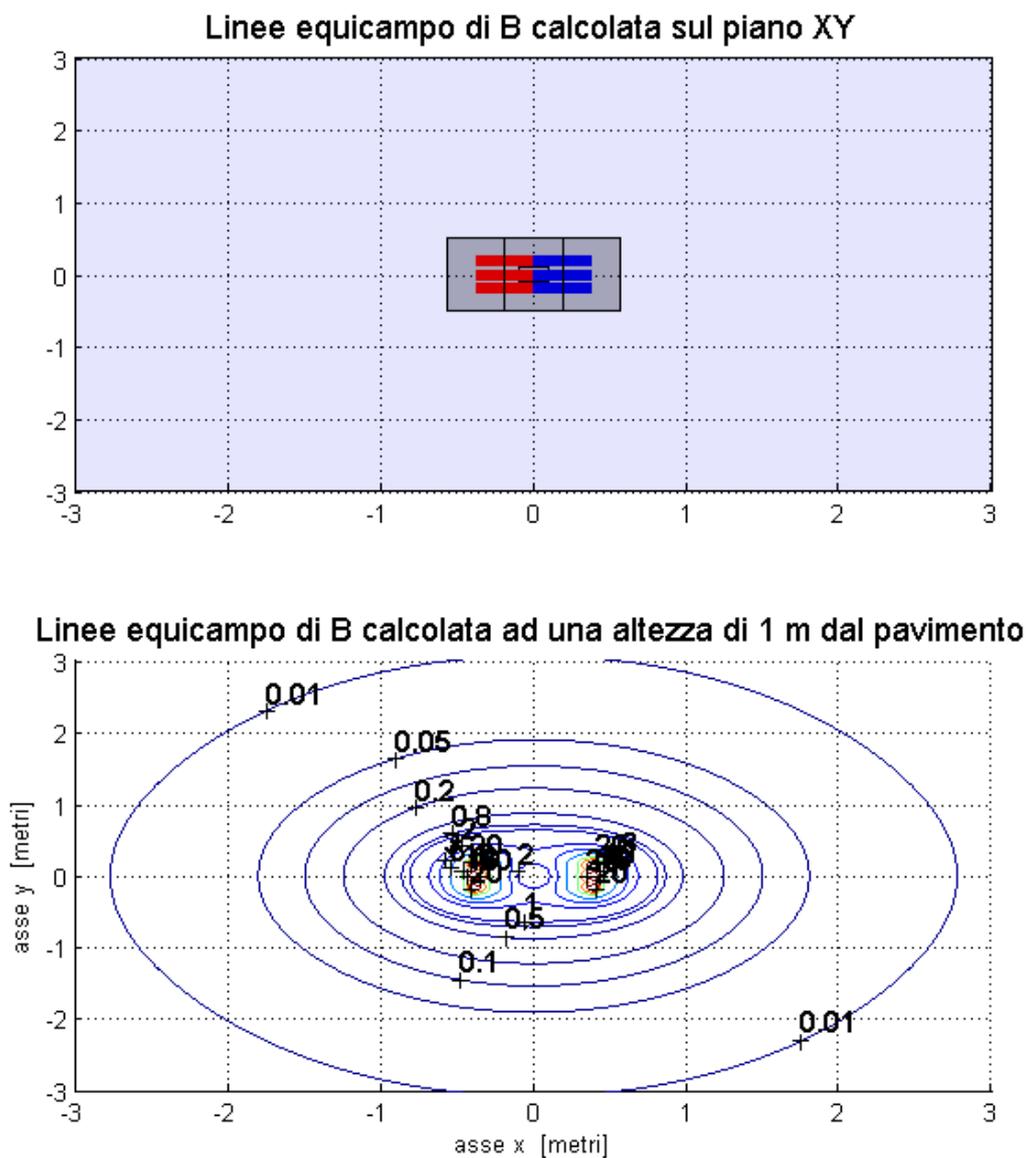
*Tabella 4.11: Dati nominali del quadro di media tensione*

$V_n$ [V]	<b>20000</b>
$I_n$ [A]	<b>630</b>
$I_{cc}$ [kA]	<b>12.5</b>

Le tipologie dei quadri di media sono state modellizzate e sono disponibili all'interno del software di simulazione. E' stato utilizzato per questo impianto un quadro MT isolato in aria con corrente in ingresso ed in

uscita pari alla corrente assorbita dal primario del trasformatore, pari cioè a 7.21 A.

Vediamo che induzione magnetica genera su un piano tangente ad esso:



*Tabella 4.22: Linee isoinduzione generate dal quadro di media tensione*

E' evidente che il quadro di media tensione è una fonte del campo magnetico piccola rispetto a al trasformatore. Già alle pareti dell'involucro del quadro si presentano campi trascurabili ( $0.5 \mu\text{T}$ ), quindi non desta preoccupazione nei locali ad esso adiacenti.

#### 4.3.6 Quadro di bassa tensione

Non ci sono tavole che specificano la tipologia del quadro di bassa, ma dalle tavole dell'impianto elettrico reperite è ben visibile che i cavi in uscita dal trasformatore

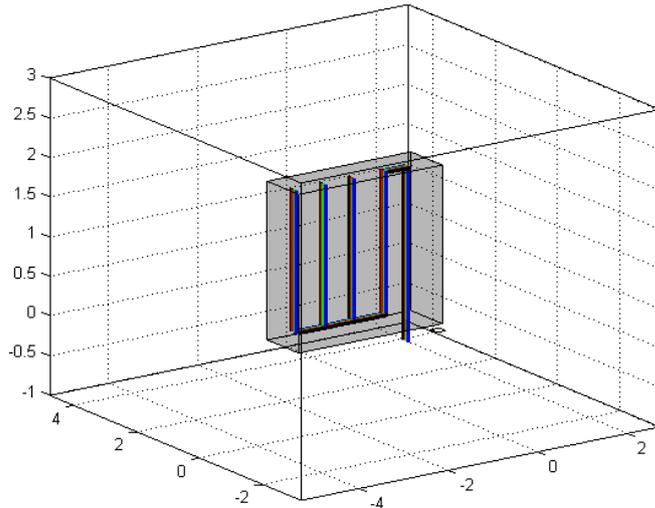
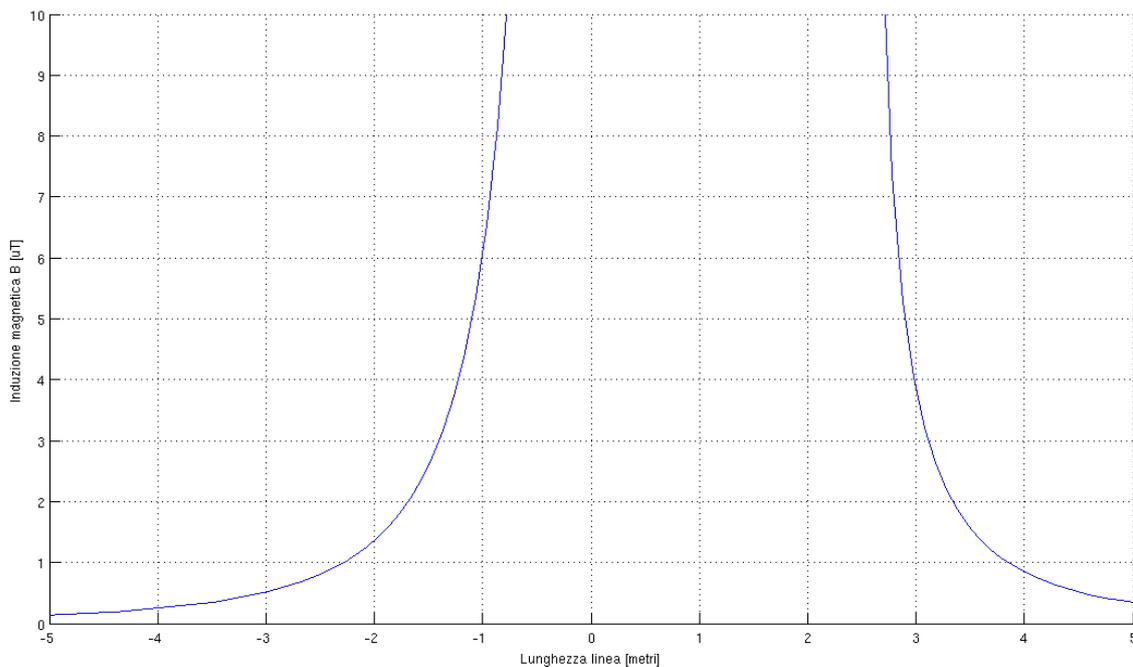
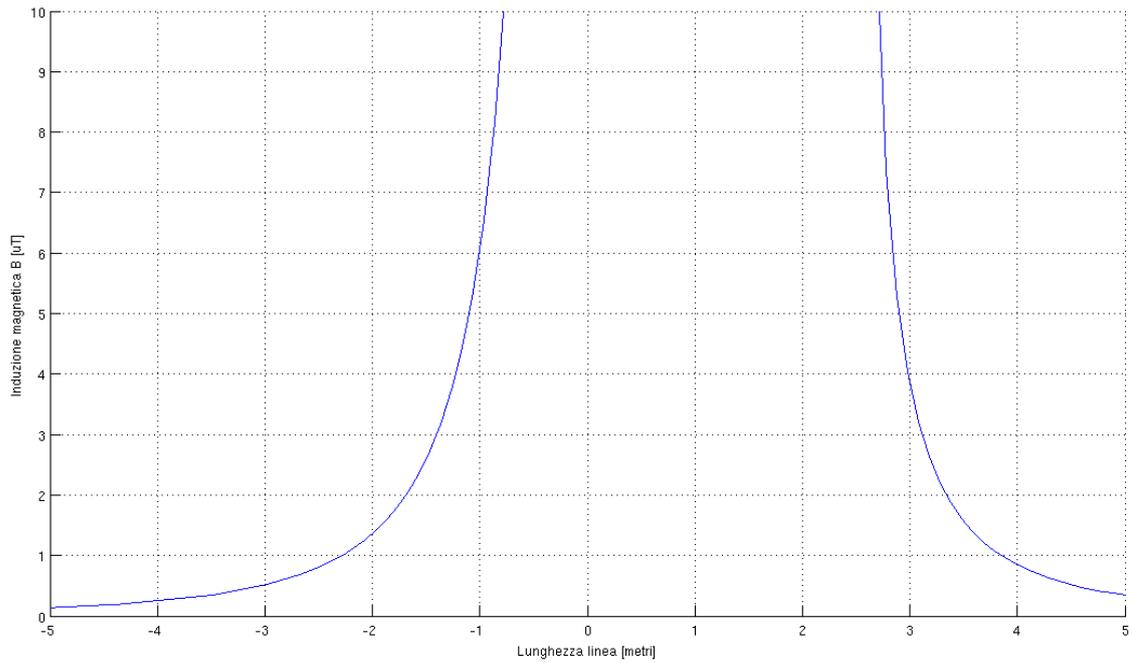


Tabella 4.23: Rappresentazione 3D del quadro di bassa tensione

raggiungono il quadro da un fianco ed entrano dal basso. All'uscita i cavi si elevano verso una passerella che attraverserà tutto il bar della scuola. Il quadro di bassa (Figura 4.23) è costituito al suo interno da più rami e ognuno di questi alimenta un quadro o una porzione dell'impianto. Raggruppare tali rami è indifferente per l'analisi dell'induzione e tale indifferenza è

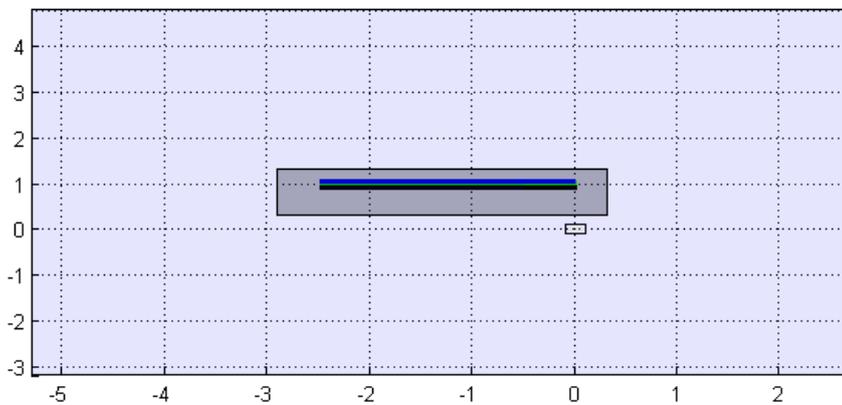
possibile notarla anche dall'andamento spaziale rappresentato nei grafici sottostanti:





Sicuramente la misura dell'induzione nella parte in cui vi è un gradiente elevato del campo è affetta da errori abbastanza elevati dovuto alla semplificazione del percorso dei cavi all'interno del quadro. Tali errori si riducono man mano che il gradiente diminuisce.

Linee equicampo di B calcolata sul piano XY



Linee equicampo di B calcolata ad una altezza di 1 m dal pavimento

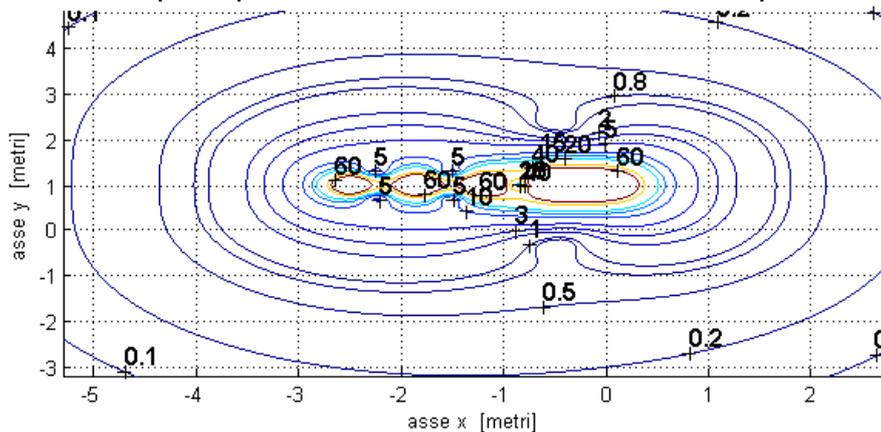


Figura 4.24: Linee isoinduzione generate dal quadro BT

A quasi un metro dal quadro si ha un'induzione di  $5 \mu\text{T}$ , quindi si può ritenere che dopo questa distanza gli errori siano abbastanza contenuti, mentre all'interno saranno alquanto imprecisi. La distanza tra le fasi all'interno del quadro è stata fissata pari a 5cm. La corrente in ingresso al quadro, se ci mettiamo nel caso peggiore, è pari alla corrente in uscita dal trasformatore ed è pari a 360.84A, mentre per stabilire le correnti dei rami interni ci si è basati sullo schema elettrico del quadro fornito dalla Provincia. La somma di queste correnti è superiore alla corrente in entrata, ma è stato comunque mantenuta tale anomalia perché non si conosce come vengono distribuite nel tempo le correnti. Nei tre rami sono state quindi fissate le seguenti correnti:

$$I_{R1} = 190.51 \text{ A}$$

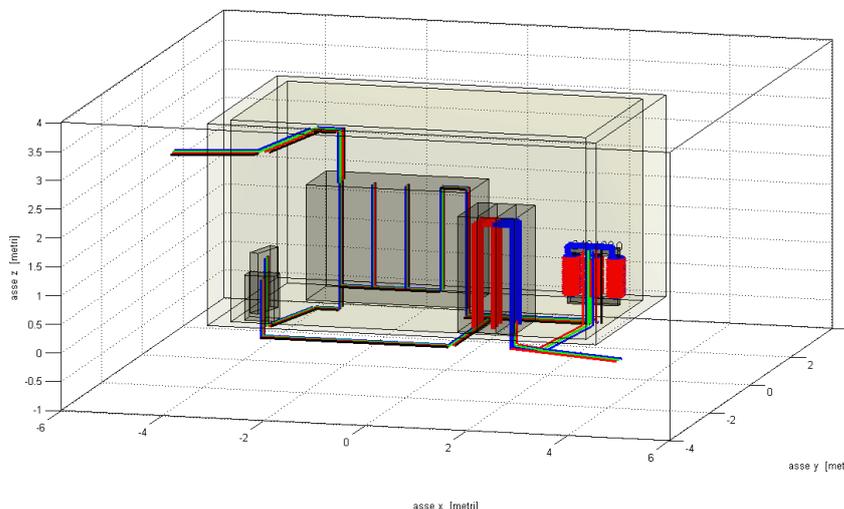
$$I_{R2} = 172.37 \text{ A}$$

$$I_{R3} = 115.9 \text{ A}$$

#### 4.3.7 Rappresentazione della cabina

Nei paragrafi precedenti sono state illustrate le caratteristiche dei componenti all'interno della cabina, ora partendo dalla topografia del locale cabina si posizionano tali oggetti e si definisce un dominio di calcolo. Siccome lo scopo è quello di valutare il valore dell'induzione nell'intorno della cabina stessa si è scelto un dominio che si estendesse di circa due metri dalle pareti del locale.

L'ingombro e la posizione del quadro di bassa, del quadro del circuito preferenziale e del soccorritore sono quelle reali, mentre i collegamenti al loro interno sono stati realizzati seguendo una certa logica che riprendesse la reale configurazione. Anche se comunque questi collegamenti sono stati semplificati, il loro contributo al campo magnetico rimane simile a quello reale. Nella *Figura 4.25* si riporta la ricostruzione in 3D della cabina.



**Figura 4.25:** Rappresentazione della cabina del liceo "Ferrari" attraverso MatLab

Per semplicità viene riportato la porzione del file “Dati.xls” in cui vengono inseriti tutti i dati riguardanti le coordinate degli elementi e dei cavi e tutte le informazioni che descrivono il comportamento rispetto all’induzione magnetica. Si ricorda che la distanza fra le fasi è stata ipotizzata seguendo quello che potrebbe essere la reale lontananza tra di essi. L’ubicazione, invece, segue il più possibile fedelmente quello ripreso dai progetti.

<b>Coordinate del centro della base del volume di visualizzazione:</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
	0	0	0
<b>Dimensioni del volume di visualizzazione:</b>	<b>Lunghezza</b>	<b>Profondità</b>	<b>Altezza</b>
	12	8	5
<b>Discretizzazione del dominio di calcolo</b>	<b>Lungo X</b>	<b>Lungo Y</b>	
	100	100	
<b>Centro della base della cabina nell'area di visualizzata</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
	0	0	0
<b>DIMENSIONI DELLA CABINA</b>	<b>Lunghezza</b>	<b>Profondità</b>	<b>Altezza</b>
	7	2,76	3,5
<b>Spessore pareti</b>	0,33		
<b>Tensione nominale del lato Media Tensione [Volt]</b>	20000		
<b>Tensione nominale del lato Bassa Tensione [Volt]</b>	400		
<b>DATI DEL TRASFORMATORE</b>			
<b>Potenza nominale [kVA]</b>	250		
<b>Tipologia</b>	2		
<b>Posizione del trasformatore [m]</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
	2,5	1	0
<b>Angolo di rotazione rispetto all'asse X [°]</b>	0		
<b>Grado di carico del trasformatore [%]</b>	100		
<b>Disposizione delle fasi lato BT da destra a sinistra</b>	<b>U</b>	<b>V</b>	<b>W</b>
	0	120	240
<b>Squilibrio delle correnti assorbite nelle fasi BT [%]</b>	<b>U</b>	<b>V</b>	<b>W</b>
	100	100	100
<b>QUADRI DI MEDIA TENSIONE</b>			
<b>Posizione del quadro</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
	1,3	0,8	0
<b>Angolo di rotazione [°]</b>	0		
<b>Larghezza della cella</b>	0,375		
<b>Sequenza delle fasi</b>	<b>R</b>	<b>S</b>	<b>T</b>
	0	120	240
<b>Corrente in ingresso al quadro [A]</b>	7,21		
<b>Corrente assorbita dal Trasformatore [A]</b>	7,21		
<b>Tipologia di quadro</b>	1		

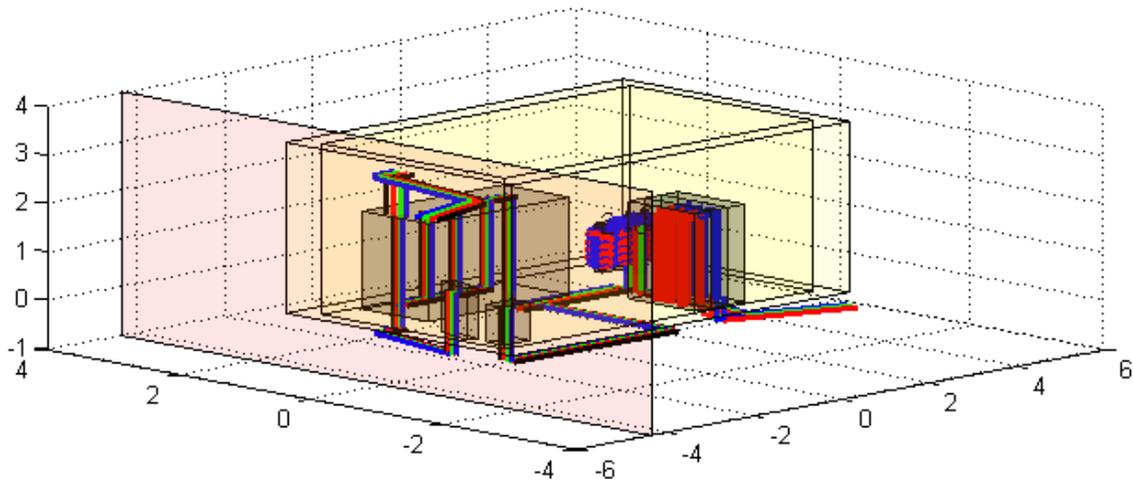
COLLEGAMENTI IN CAVO							
1	1,3	0,1	7,21	8	1,4	0,05	190,51
1	0	120	240	8	0	120	240
1	100	100	100	8	100	100	100
1	4	-1,5	-0,4	8	-1,2	1	0,1
1	1,7	-1	-0,4	8	-1,2	1	1,9
1	1,7	-1	0,1	9	1,4	0,05	172,37
2	1,3	0,1	7,21	9	0	120	240
2	0	120	240	9	100	100	100
2	100	100	100	9	-1,85	1	0,1
2	1,7	-0,9	0,1	9	-1,85	1	1,9
2	1,7	-0,9	-0,4	10	1,4	0,05	115,9
2	2,3	-1,1	-0,4	10	0	120	240
2	2,5	0,7	-0,4	10	100	100	100
3	2,3	0,1	7,21	10	-2,5	1	0,1
3	0	120	240	10	-2,5	1	1,9
3	100	100	100	11	1,4	0,05	33,34
3	2,5	0,7	-0,4	11	0	120	240
3	2,5	0,7	1	11	100	100	100
4	2,4	0,1	360,84	11	-2,5	1	0,1
4	0	120	240	11	-2,5	1	-0,4
4	100	100	100	11	3	1	-0,4
4	2,5	0,85	1	11	-3,4	-0,4	-0,4
4	2,5	0,85	-0,4	12	1,4	0,05	33,34
5	1,4	0,1	360,84	12	0	120	240
5	0	120	240	12	100	100	100
5	100	100	100	12	-3,4	-0,4	-0,4
5	2,5	0,85	-0,4	12	-3,4	-0,4	0,9
5	2,5	1	-0,4	13	1,4	0,05	12,9
5	0	1	-0,4	13	0	120	240
6	1,4	0,05	335	13	100	100	100
6	0	120	240	13	0,5	1	-0,4
6	100	100	100	13	0,5	-1,1	-0,4
6	0	1	-0,4	13	-3,2	-1,1	-0,4
6	0	1	1,9	13	-3,2	-1,1	0,7
6	-0,5	1	1,9	14	1,4	0,1	360,84
6	-0,5	1	0,1	14	0	120	240
7	1,4	0,05	115	14	100	100	100
7	0	120	240	14	-2,5	1	1,9
7	100	100	100	14	-2,5	1	2,8
7	-0,5	1	0,1	14	-3	1	2,8
7	-2,5	1	0,1	14	-3,4	-0,7	2,8
				14	-5	-1	2,8

#### 4.4.8 Simulazioni e risultati

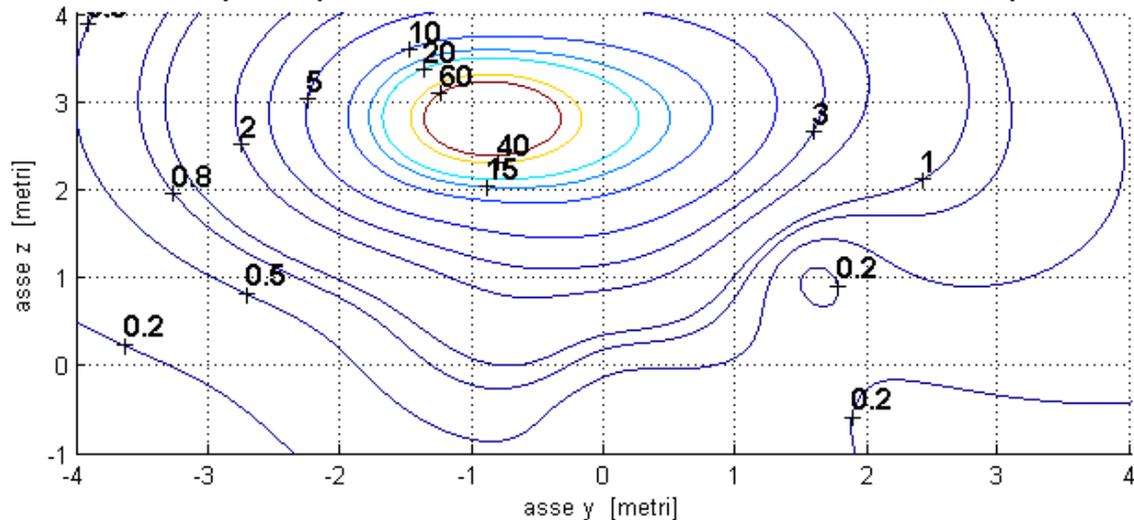
Dopo la realizzazione in 3D della cabina si è valutato quale piano descrivesse in modo esauriente l'andamento dell'induzione magnetica nello spazio circostante alla cabina. Per capire fino a quale distanza dalle pareti esterne della stessa si estendessero le linee di



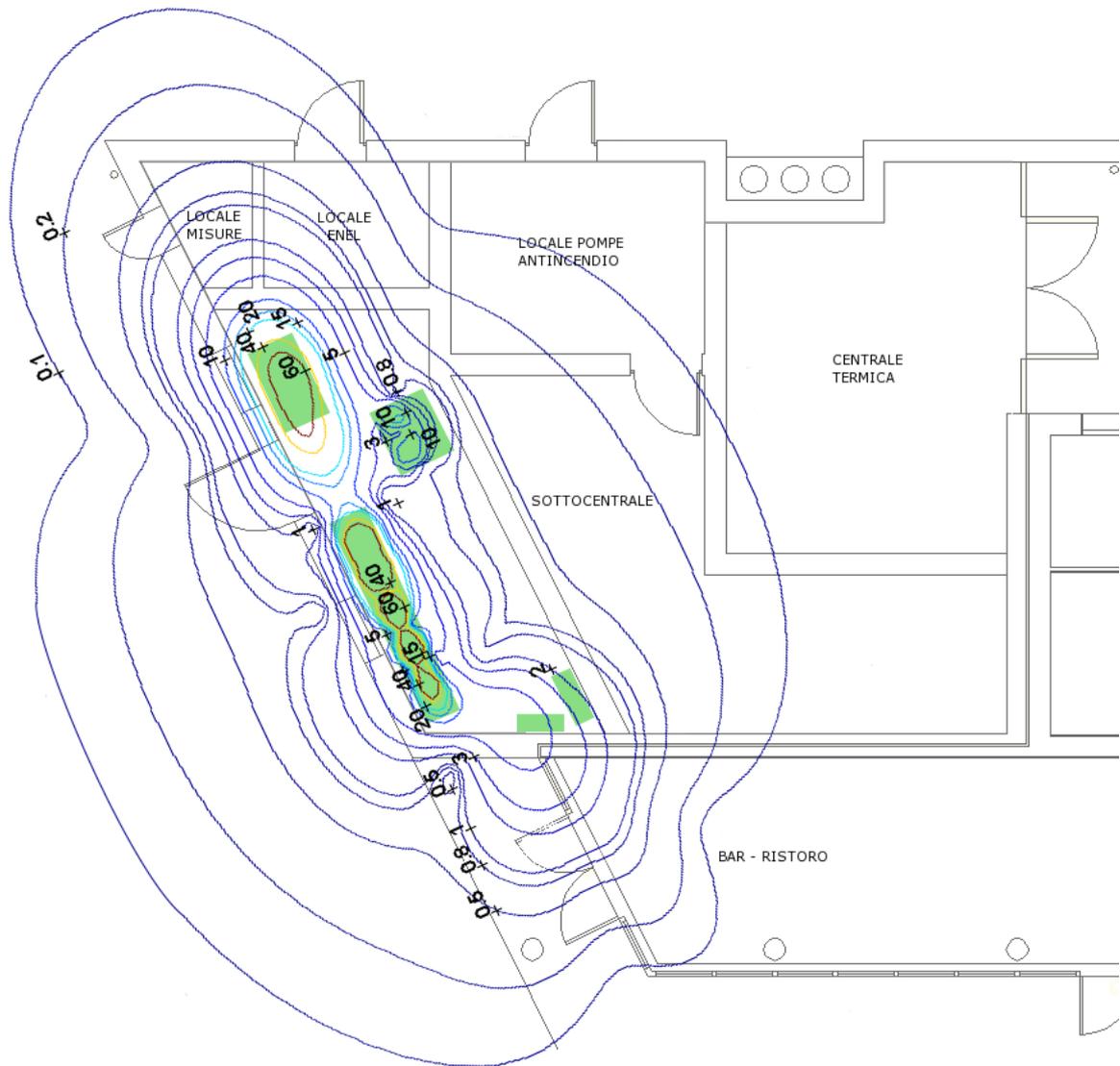
## Linee equicampo di B calcolata sul piano YZ



## Linee equicampo di B calcolata a una distanza di -4.3 m dalla parete



L'analisi del cavidotto che interessa il locale bar è stata effettuata attraverso l'analisi del piano intersecante la linea stessa. Nella ricostruzione attraverso MatLab tale piano è il piano YZ e ci si è posti a una distanza tale da avere la minima influenza dovuta agli altri dispositivi elettrici. Tutte le linee e gli oggetti della simulazioni sono interessati dalle correnti massime, quindi nel normale esercizio della cabina l'estensione dell'induzione si modifica riducendosi. Come detto in precedenza, non è stato possibile ricostruire nel software il giusto posizionamento delle pareti. Se fosse possibile inserire le linee di campo all'interno del disegno progettuale sarebbe immediato avere un'idea dell'estensione dell'induzione. In realtà è possibile operando con software di fotoritocco. Ad esempio prendendo come base il disegno in AutoCAD e come aggiungendo nel livello superiore le linee isovalore otteniamo il risultato illustrato dalla *Figura 4.26*:



*Tabella 4.26: Andamento delle linee isoinduzione a 1,5m dal suolo prodotte dalla cabina di trasformazione*

Avere la costruzione automatica di tale rappresentazione consentirebbe una valutazione immediata e chiara da parte di tutti quegli organi amministrativi che richiedono la valutazione dei campi elettromagnetici. Purtroppo l'utilizzazione di formati chiusi, come AutoCAD nei casi presi in considerazione, rende impossibile tale elaborazione dell'immagine e la conseguente rappresentazione.

#### 4.4.9 Conclusioni

Come ci si poteva aspettare, anche qui si ha una fascia di rispetto che si estende di circa un metro e mezzo al di fuori della cabina nelle zone in cui sono allocati il trasformatore e il quadro di bassa tensione. Quest'ultimo è infatti la sorgente maggiore dell'induzione, ma a 2 m di distanza da esso si rientra nella fascia dei  $3 \mu\text{T}$ . Tenuto conto del posizionamento della cabina rispetto alle aule e agli altri luoghi di comune frequentazione da parte degli studenti e dei professori non pervengono situazioni critiche. I campi maggiori invadono il lato in cui sono presenti i locali ENEL, ma ovviamente sono accessibili solo dal personale addetto. Per quanto riguarda la linea che attraversa il locale bar viene rispettato l'obiettivo di qualità fino ad un'altezza di 1 m dal pavimento. Siccome i  $3 \mu\text{T}$  sono intesi come media nell'arco delle 24 ore e nella simulazione si è utilizzato il caso peggiore, è desumibile che non vi siano le condizioni per la violazione di tale limite. Se si volesse comunque ridurre il campo nel caso peggiore nella zona ristorazione si dovrebbe prendere in considerazione che una disposizione delle fasi su un triangolo porta una riduzione dell'induzione magnetica. Nella *Figura 4.27* viene riportato l'output con tale configurazione, disponendo le fasi a una distanza media di 10 cm.

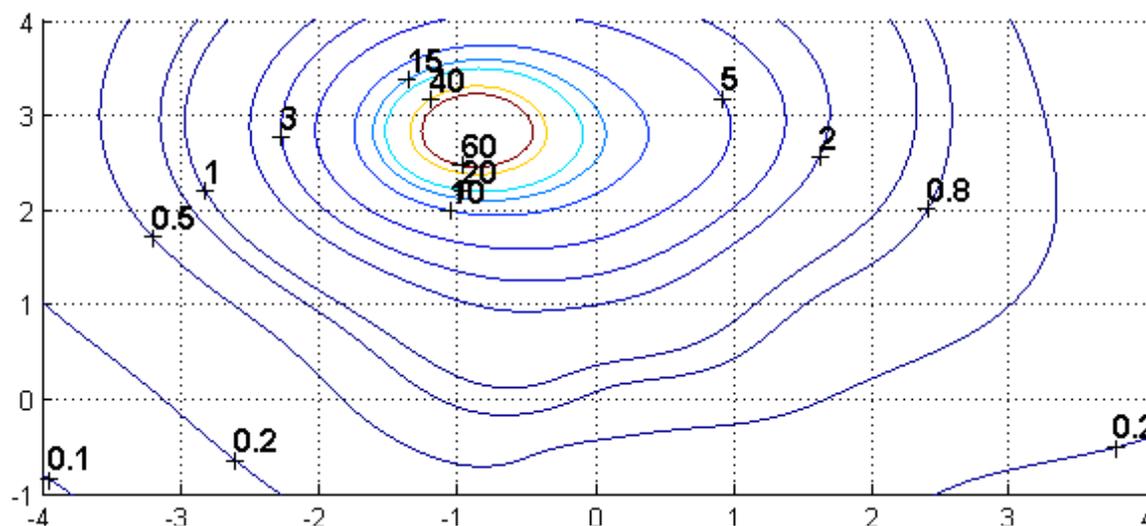


Figura 4.27: Linee isoinduzione prodotte dai cavi che attraversano il bar della scuola

Come si può notare la riduzione è di circa 30cm, mentre se si procede anche alla riduzione la distanza delle fasi a 5cm, allora la fascia dei  $3 \mu\text{T}$  si innalza a circa 1.7m dal pavimento. Una configurazione non presente nel software di simulazione ma che riduce sensibilmente l'estensione del campo, in valore maggiore rispetto a quella precedente, è quella di tipo elicoidale. Aumentando l'altezza dei cavi e variando la loro posizione con una di quelle sopracitate dovrebbe essere sufficiente a risolvere il problema.

Se si volesse diminuire drasticamente il valore dell'induzione magnetica, sarebbe consigliata una schermatura. Lo schermo ferromagnetico tende ad attirare il campo assorbendolo. Occorre realizzare strutture che circondino il più possibile la sorgente stessa (o il volume entro il quale si vuole ridurre il campo) per ottenere un'efficienza schermate elevata. Se invece si volessero utilizzare materiali conduttori conviene realizzare schermi aperti, al fine di aumentarne l'efficacia schermante soprattutto ad una certa distanza dalla sorgente. Comunque sia la scelta fra le diverse soluzioni deve essere fatta in base a un'analisi di fattibilità tecnico - economica.

# Conclusioni

Come dimostrano i casi analizzati, non si hanno cabine elettriche secondarie con una disposizione standard dei componenti al loro interno. Varia quindi di caso in caso a seconda dell'utenza da alimentare, ovvero in base alla potenza e alle linee in entrata e che devono essere smistate. Anche gli stessi componenti possono avere, a parità di potenza nominale, ingombri diversi a seconda del tipo d'isolamento. Un certo livello di standardizzazione è invece per cabine poste all'esterno, vedendo tra l'altro l'uso di cabine prefabbricate.

I livelli d'induzione magnetica dipendono dalla disposizione degli elementi elettrici dato che i campi interagiscono e si sommano, oltre che a dipendere ovviamente anche dal numero e dalla potenza delle linee e dei trasformatori presenti. Per questo motivo in fase progettuale si dovrebbe tenere presente come i campi possono interagire tra di loro e studiare un layout della cabina in modo oculato per minimizzare l'effetto dell'induzione magnetica.

Il modello utilizzato nel software di simulazione impiegato in questa tesi per analizzare le cabine ha un certo grado di errore. Infatti si basa su risultati di misurazioni, influenzato quindi sia da errori in fase di misura (incertezza strumentali, non esatta localizzazione spaziale della sonda) sia da imprecisioni commesse nel riportare i componenti reali nel modello di calcolo (valori di corrente imposti nella simulazione non coincidenti con l'effettiva corrente misurate nell'istante della misura, errori nel posizionamento, errori nel riproporre la sequenza delle fasi,...). Lo strumento di calcolo che in questo caso è finalizzato alla ricerca dei punti di maggiore criticità rispetto all'induzione magnetica si presta anche a testare l'efficacia delle diverse combinazioni di layout dei componenti; inoltre la completa conoscenza del campo magnetico, ed eventualmente le caratteristiche di polarizzazione dello stesso, sono alla base di una corretta ed efficace progettazione di schermi, sia conduttori sia ferromagnetici. Purtroppo lo studio e l'analisi matematica di un eventuale inserimento di uno schermo è molto complesso e richiede un'analisi approfondita del fenomeno. Infatti entrano in gioco gli effetti ai bordi e il diverso grado di attenuazione differenziato rispetto alle componenti spaziali del campo. Più semplice

potrebbe essere uno studio del codice finalizzato all'ottimizzazione delle routine e quindi all'incremento della velocità di calcolo oltre che a una riduzione delle chiamate alle routine conglobando parti di codice in uno stesso sottoprogramma. Una conoscenza del linguaggio di programmazione orientato agli oggetti potrebbe essere utile alla creazione di un'interfaccia grafica; infatti lo stesso MatLab mette a disposizione tutto il necessario per la creazione di tale GUI. Successivamente si dovrebbe predisporre una routine per la creazione di un resoconto in formato testo inserendo all'interno di esso una descrizione della cabina, le immagini della simulazione e le norme vigenti. Ovvero allineare il software a quelli esistenti in commercio per la progettazione o la verifica delle normative. L'analisi degli impianti effettuata in questo tirocinio si è basata esclusivamente in una loro simulazione con un codice che presenta degli errori elevati a poca distanza della sorgente ma che a qualche decina di centimetri risulta sufficientemente accurato. Avere delle misure effettuate con sonde nelle zone interessate maggiormente dall'induzione magnetica avrebbe dato probabilmente la conferma di quello già trovato, ma sicuramente avrebbe comunque indotto maggior sicurezza. Tuttavia non si sono presentati nei tre casi situazioni di anomalità, se non alcuni campi accentuati ma solamente nelle condizioni più gravose dell'utilizzazione dell'impianto. Dato che la normativa impone che il limite non sia superato per persone interessate da tali valore d'induzione per più di quattro ore al giorno, si è nel nostro caso esclusi perché i campi maggiori interessano le zone interne delle cabine e alcuni punti di passaggio delle persone. Corridoi o locali tecnici sono interessati solo da tempi di permanenza limitata.

Per quello che concerne l'analisi futura rispetto ai campi elettromagnetici degli impianti di proprietà della Provincia di Padova, dovrà essere valutata la possibilità di adottare uno strumento software o l'acquisto di sonde. Esistono collaudati modelli e relativi software di calcolo per il calcolo di campi magnetici generati da cabine elettriche; alcuni sono commercialmente disponibili, altri invece sono stati sviluppati per proprio uso da istituti e società di ricerca, come ad esempio il CESI, che operano in questo settore. Tali mezzi di valutazione sono indispensabili per prevedere, nelle fasi di pianificazione e progetto, i livelli di campo associabili a nuovi impianti. L'esperienza insegna inoltre che il ricorso a modelli di calcolo è spesso necessario anche per completare ed interpretare al meglio le caratterizzazioni sperimentali di impianti esistenti. Ad esempio, quando le intensità di corrente di funzionamento di una data sorgente non sono costanti nel tempo, il solo approccio sperimentale può diventare molto oneroso in quanto l'effettuazione di semplici misure puntuali non è in genere sufficiente e si dovrebbe passare ad un monitoraggio

prolungato nel tempo per ciascun punto di misura. Spesso le cabine ubicate nelle strutture di proprietà della Provincia di Padova sono costruite e gestite dall'ENEL, quindi la competenza della riduzione dei campi elettromagnetici spetterebbe ad essa. Per tutelarsi da ogni possibile problema, la Provincia potrebbe impostare una campagna di valutazione e misurazione dei campi elettromagnetici dei vecchi impianti e dare origine a una valutazione del rischio come descritto nel Titolo VIII, Capo IV, del DLgs 81/08.



# Ringraziamenti

Un sincero ringraziamento va a tutti coloro che, in momenti diversi e in vari modi, mi hanno prestato il loro aiuto e la loro assistenza nella realizzazione di questo lavoro.

Desidero ringraziare il prof. Roberto Turri, relatore di questa tesi, per la grande disponibilità e cortesia dimostratami, e per tutto l'aiuto fornito durante la stesura di questa tesi.

Un sentito ringraziamento anche all'Ing. Calogero Collerone che mi ha seguito, non solo durante tutta l'attività di tirocinio presso la Provincia di Padova, ma anche durante la stesura e la correzione della tesi.

Merita un ringraziamento speciale Barbara che ha reso piacevoli le giornate di tirocinio, offrendomi caffè e soprattutto un grande aiuto per le mie ricerche. Devo inoltre ringraziare tutti coloro che nella Provincia mi hanno aiutato a risolvere e capire alcune situazioni presenti all'interno di questa tesi.

Un grande ringraziamento ai miei genitori, che, con il loro incrollabile sostegno morale ed economico, mi hanno permesso di raggiungere questo traguardo.

Infine ringrazio tutti gli amici che mi hanno seguito, da vicino e da lontano, durante l'intero corso di studi. Meritano un ricordo particolare Andrea, Giulia, Faby, Matteo, Alessandra, Tano, Giampietro, Fabio, Alessia, Benny, Bola, Alessandra, Alberto per avermi fatto divertire spensieratamente nei weekend a Verona. Non posso dimenticare Cyrille, il mio grande coinquilino, che mi ha insegnato molto e senza di lui sarebbe stato tutto troppo "noioso". Ringrazio Marianna, Fabrizia, Giuliana, Gjergji, Martina, Marco, Cristina, Miro, Gianni per le serate passate in loro compagnia divertendomi come un pazzo a Padova. Concludo ringraziando una ragazza speciale, Cindy, perché senza di lei gli ultimi due anni non sarebbero stati così fantastici.



# Allegati

## ALLEGATO A

### AREA DI VIUSUALIZZAZIONE E DOMINIO DI CALCOLO

Coordinate del centro della base del volume di visualizzazione:

X	Y	Z

Dimensioni del volume di visualizzazione:

Larghezza	
Profondità	
Altezza	

Coordinate del centro della superficie di calcolo:

X	Y	Z

Dimensioni della superficie orizzontale di calcolo:

Larghezza	
Profondità	
Altezza	

Discretizzazione del dominio di calcolo:

Divisioni lungo l'asse X	
Divisioni lungo l'asse Y	
Divisioni lungo l'asse Z	

Calcolo di B lungo direttrici sul piano XY  
(solo direttrici parallele all'asse X, Y o Z)  
massimo 7 direttrici:

Divisioni linea	

	$x_i$	$x_f$	$y_i$	$y_f$	$z_i$	$z_f$

Calcolo di B lungo direttrici sul piano YZ  
(solo direttrici parallele all'asse X, Y o Z)  
massimo 7 direttrici:

Divisioni linea	

	$x_i$	$x_f$	$y_i$	$y_f$	$z_i$	$z_f$

Calcolo di B lungo direttrici sul piano XZ  
(solo direttrici parallele all'asse X, Y o Z)

massimo 7 direttrici:

Divisioni linea	

	$x_i$	$x_f$	$y_i$	$y_f$	$z_i$	$z_f$

Centro della base della cabina nell'area di visualizzata

X	Y	Z

DIMENSIONI DELLA CABINA

Larghezza		
Profondità		
Altezza		
Spessore delle pareti		

Tensione nominale del lato Media Tensione [Volt]

Tensione nominale del lato Bassa Tensione [Volt]

V1n	
V2n	

Piano su cui eseguire il calcolo del campo:

XY	YZ	XZ

### INSERIMENTO DATI DEI COMPONENTI DELLA CABINA

**TRASFORMATORI** (max 2 trasformatori)

TRASFORMATORE N.1

Inserisci il trasformatore nel calcolo

Potenza nominale [kVA]

Tipologia

Posizione del trasformatore [m]

Angolo di rotazione rispetto all'asse X [°]

Grado di carico del trasformatore [%]

Disposizione delle fasi lato BT da destra a sinistra

Squilibrio delle correnti assorbite nelle fasi BT [%]

Corrente erogate da trasformatore dai morsetti BT [A]

Corrente assorbita dal trasformatore [A]

U	V	W

**TRASFORMATORE N.2**

Inserisci il trasformatore nel calcolo

Potenza nominale [ kVA]

Tipologia

Posizione del trasformatore [m]

Angolo di rotazione rispetto all'asse X [°]

Grado di carico del trasformatore [%]

Disposizione delle fasi lato BT da destra a sinistra

Squilibrio delle correnti assorbite nelle fasi BT [%]

Corrente erogate da trasformatore dai morsetti BT [A]

Corrente assorbita dal trasfor148matore

[A]

U	V	W

**QUADRI DI MEDIA TENSIONE**

Inserisci nel calcolo	Posizione del Quadro			Angolo di rotazione	Larghezza cella	Sequenza delle fasi	
	X	Y	Z				

Corrente in ingresso al quadro	Corrente assorbita dal trasformatore	Tipologia di quadro

**QUADRI DI BASSA TENSIONE**

Inserisci nel calcolo	X	Posizione del Quadro		Dimensioni			Angolo di rotazione
		Y	Z	Larghezza	Profondità	Altezza	

Inserire i dati sei collegamenti secondo il seguente schema:

Numero del collegamento	Tipo di collegam.	Distanza tra due fasi adiacenti	Corrente
Numero del collegamento	L1	L2	L3
Numero del collegamento	Carico Fase L1 [%]	Carico Fase L2 [%]	Carico Fase L3 [%]
Numero del collegamento	X1	Y1	Z1
Numero del collegamento	X2	Y2	Z2
	:	:	:
Numero del collegamento	$X_i$	$Y_i$	$Z_i$

# Bibliografia

- ROBERTO TURRI - *Appunti e dispense del corso “Sistemi elettrici industriali”*, Facoltà di Ingegneria Elettrotecnica – Padova;
- *Dispensa del seminario “Aspetti tecnici e autorizzativi per l’installazione della cabine secondarie MT/BT nel rispetto dei limiti normativi di esposizione a campi elettromagnetici”*- Padova;
- SCIPIONE BOBBIO, EMILIO GATTI – *Elementi di elettromagnetismo*, Boringhieri;
- *“Documento unico di valutazione dei rischi interferenziali”* – Provincia di Padova, Settore Edilizia, 2009;
- *“La riduzione del rischio in BT per CEM a 50 Hz”* – Rivista L’IMPIANTO ELETTRICO, Febbraio 2009;
- *“Protezione dei lavoratori dai campi elettromagnetici”* – Rivista TUTTO NORMEL, Luglio 2004;
- GIUSEPPE CIABURRO - *Manuale MatLab* – [www.ciaburro.it](http://www.ciaburro.it);
- Legislatura e Norme:
  - Norma It. CEI EN 50413 - Class. CEI 106-20 - CT 106 - Fascicolo 9697 E - Anno 2009 - Edizione Prima - *Norma di base sulle procedure di misura e di calcolo per l’esposizione umana ai campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici (0 Hz-300 GHz)*;
  - Norma It. CEI EN 62226-3-1 - Class. CEI 106-18 - CT 106 - Fascicolo 9475 - Anno 2008 - Edizione Prima - *Esposizione ai campi elettrici e magnetici nell’intervallo delle frequenze basse e intermedie - Metodi di calcolo della densità di corrente e del campo elettrico interno indotti nel corpo umano*;
  - Norma It. CEI 106-12 - Class. CEI 106-12 - CT 106 - Fascicolo 8289 - Anno 2006 - Edizione Prima - *Guida pratica ai metodi e criteri di riduzione dei campi magnetici prodotti dalle cabine elettriche MT/BT*;
  - IEEE Std C95.6™ - 2002 - *IEEE Standard for safety levels with respect to human exposure to electromagnetic fields, 0 – 3kHz*;

- CLC/TR 50453 - *Evaluation of electromagnetic fields around power transformers*;
- Norma It. CEI 211-4 - Class. CEI 211-4 - CT 106 - Fascicolo 9482 - Anno 2008 - Edizione Seconda - *Guida ai metodi di calcolo dei campi elettrici e magnetici generati da linee e da stazioni elettriche*;
- Legge n.36 del 22 febbraio 2001 - *Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici*;
- Decreto Legislativo 81 Anno 2008 – *Salute e sicurezza sul lavoro*;
- Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 8 luglio 2003;
- Decreti attuativi della legge 36 Anno 2003;
- Decreto Legislativo 163 Anno 2006 - *Codice dei contratti pubblici*;

## Sitografia

[www.icnirp.de](http://www.icnirp.de)

[www.arpa.veneto.it](http://www.arpa.veneto.it)

[www.arpa.gov.it](http://www.arpa.gov.it)