POLITECNICO DI TORINO

Tesi di Laurea



Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica

Schermatura per condutture elettriche

Autore:
Marco Moraschi

Relatore:

Prof. Aldo Canova

Co-relatore:

Prof. Luca Giaccone

Il fallimento è il fondamento della riuscita. $(Lao\ Tzu)$

A Ilaria, lei sa perchè

Indice

In	ndice	II
\mathbf{El}	lenco delle Figure	\mathbf{V}
\mathbf{E} l	lenco delle Tabelle	VI
C	ostanti Fisiche	VII
Si	imboli	VII
1	Introduzione ai campi elettromagnetici 1.1 Cenni di Schermatura	1 3
2	Software 2.1 VB_Form_LUA.exe	5 6 10
3	Misure 3.1 Impianto di Prova	16 16 19 21 24 25
4	Simulazioni	33
5	Conclusioni e Sviluppi Futuri	49

Marco Moraschi	Politecnico di Torino
Ringraziamenti	52
Sitografia	54

Elenco delle figure

2.1	La maschera di inserimento dati così come si presenta in esecuzione	6
2.2	Ingrandimento dell'immagine della canalina presente nella	U
	maschera	8
2.3	Esempio in femm di una tipica canalina per uso industriale	8
2.4	Anteprima dello script in LUA su Visual Studio Code	11
2.5	Lo script in LUA in esecuzione all'interno di femm	12
2.6	La schermata in <i>femm</i> che compare al termine dell'esecuzione	
	dello script in LUA	13
3.1	La linea trifase oggetto delle prove di misura	17
3.2	Corto-circuito trifase in chiusura alla linea	18
3.3	Le canaline multistrato montate sui cavalletti di sostegno.	
	All'interno del canale è posto il pianale in legno su cui sono	
	appoggiati i cavi che costituiscono la linea trifase	18
3.4	La sonda utilizzata per le misure, fissata in posizione sopra	
	al cavalletto	19
3.5	Il cavo in fibra utilizzato per il collegamento della sonda al	
	dispositivo indicatore	20
3.6	Il dispositivo indicatore	20
3.7	L'inizio della linea, θ m, posto a valle dei trasformatori	
	elevatori monofase di corrente. I cavi sono stati legati con	
	una fascetta per ridurre l'effetto di disturbo a inizio linea .	22
3.8	Esempio di misura effettuata sotto la linea in assenza del	
	canale schermante	22
3.9	Esempio di misura effettuata a destra della linea a ridosso	
	del canale schermante	23

3.10	Esempio di misura effettuata sopra alla linea, in assenza del	
	canale schermante, e con l'ausilio di un distanziatore per	
	"fissare" meglio la distanza	23
3.11	L'indicazione dell'orientamento degli assi presente sulla faccia	
	superiore della sonda	25
3.12	Andamento del fattore di schermatura in funzione della di-	
	stanza dalla canalina lungo le 4 direzioni individuate (DX ,	
	SX , $Bottom\ e\ Top)$ nella prova effettuata a $1,5\ m$ di distanza	
	dall'inizio della linea	26
3.13	Andamento del fattore di schermatura in funzione della di-	
	stanza dalla canalina lungo le 4 direzioni individuate (DX ,	
	SX , $Bottom\ e\ Top)$ nella prova effettuata a 4,5 m di distanza	
	dall'inizio della linea	27
3.14	Andamento del fattore di schermatura in funzione della di-	
	stanza dalla canalina lungo le 4 direzioni individuate (DX ,	
	SX, Bottom e Top) nella prova effettuata a 7,5 m di distanza	
	dall'inizio della linea	27
3.15	Analisi femm su una linea trifase senza neutro in aria attra-	
	versata da una terna equilibrata di correnti di valore efficace	
	$500 A \dots \dots$	28
3.16	Andamento del fattore di schermatura in funzione della lun-	
	ghezza della linea $(9 m)$ misurato a una distanza di $10 cm$	
	dalla canalina lungo le 4 direzioni individuate (DX , SX ,	
	$Bottom\ e\ Top)$	30
3.17	Andamento del fattore di schermatura in funzione della lun-	
	ghezza della linea $(9 m)$ misurato a una distanza di $50 cm$	
	dalla canalina lungo le 4 direzioni individuate $(DX, SX,$	
	$Bottom\ e\ Top)$	30
4.1	La canalina utilizzata nel modello femm	34
4.2	Ingrandimento dell'immagine della canalina presente nella	01
1.4	maschera	35
4.3	L'immagine mostra il valore dell'induzione sulla sezione	50
1.0	considerata così come risultante dalla simulazione femm.	37

4.4	L'immagine mostra il valore dell'induzione sulla sezione con-	
	siderata in presenza della canalina, così come risultante dalla	
	simulazione $femm$	38
4.5	Andamento del fattore di schermatura nella simulazione	
	realizzata in femm su una canalina "standard"	39
4.6	Andamento del fattore di schermatura in funzione della di-	
	stanza dalla canalina lungo le 4 direzioni individuate (DX ,	
	SX , $Bottom\ e\ Top)$ nella prova effettuata a 4,5 m di distanza	
	dall'inizio della linea	40
4.7	La canalina utilizzata nel modello femm, con le modifiche	
	implementate manualmente	41
4.8	Particolare del sistema di aggancio meccanico tra il vassoio	
	e il coperchio della canalina	41
4.9	L'immagine mostra il valore dell'induzione sulla sezione con-	
	siderata in presenza della canalina nella seconda simulazione	
	femm	42
4.10	Andamento del fattore di schermatura nella seconda simula-	
	zione realizzata in $femm$	43
4.11	Andamento del fattore di schermatura nelle 3 situazioni	
	considerate sulla <i>sinistra</i> della canalina	44
4.12	Andamento del fattore di schermatura nelle 3 situazioni	
	considerate sulla destra della canalina	44
4.13	Andamento del fattore di schermatura nelle 3 situazioni	
	considerate sulla parte superiore della canalina	45
4.14	Andamento del fattore di schermatura nelle 3 situazioni	
	considerate sulla parte inferiore della canalina	45

Elenco delle tabelle

4.1	Dimensioni geometriche utilizzate per la simulazione	35
4.2	Spessori degli strati	36

Costanti Fisiche

 $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} [\text{H/m}]$ Permeabilità magnetica del vuoto $\epsilon_0 = 8,8541 * 10^{-12} [\text{F/m}]$ Costante dielettrica del vuoto

Simboli

- B_x Componente dell'induzione magnetica lungo l'asse X [T]
- B_y Componente dell'induzione magnetica lungo l'asse Y [T]
- B_Z Componente dell'induzione magnetica lungo l'asse Z [T]
- |B| Modulo dell'induzione magnetica
 - FS Fattore di Schermatura
 - H Campo magnetico [A/m]
- I_{rms} Corrente efficace [A]
 - μ Permeabilità magnetica [H/m]
 - μ_r Permeabilità magnetica relativa
 - σ Conducibilità elettrica [MS/m]
 - ϵ Costante dielettrica [F/m]
 - J Densità di corrente $[A/m^2]$
 - S Densità di potenza $[W/m^2]$
- SA Assorbimento specifico di energia [J/Kg]
- SAR Tasso di assorbimento specifico di energia [W/Kg]

Capitolo 1

Introduzione ai campi elettromagnetici

I campi elettrici e magnetici variabili nel tempo, prodotti da distribuzioni di carica (es. linee elettriche), interagiscono con la materia circostante, costituita da particelle cariche elettricamente, e anche con la materia che costituisce i sistemi biologici, come le cellule e gli organismi complessi (piante e animali). In alcune situazioni, si può quindi rivelare necessario effettuare la schermatura di alcune sorgenti di campo elettromagnetico, per evitare che queste vadano a interagire negativamente con il funzionamento di altre apparecchiature elettriche presenti nelle immediate vicinanze. Inoltre, se l'emissione di campo risulta particolarmente intensa e nella zona sono presenti operatori, la schermatura ha il compito anche di tutelare la sicurezza dei lavoratori e delle altre persone che frequentano quell'ambiente, in accordo con quanto richiesto dalle normative vigenti in materia.

Al fine di quantificare in maniera corretta l'energia assorbita da un materiale, e in particolar modo dal tessuto corporeo umano, si utilizzano alcune grandezze dosimetriche:

- Densità di corrente 'J': è il rapporto tra la corrente che attraversa una determinata sezione perpendicolare alla direzione della corrente e l'area della sezione. Si esprime in A/m^2 ;
- Densità di potenza 'S': è la potenza radiante incidente perpendicolarmente a una superficie divisa per l'area della superficie stessa. Si

esprime in W/m^2 ;

- Assorbimento specifico di energia 'SA': è l'energia assorbita per unità di massa di tessuto biologico. Si esprime in J/Kg;
- Tasso di assorbimento specifico di energia 'SAR': è il valore mediato sul corpo in oggetto, o su alcune parti di esso, dell'assorbimento di energia per unità di massa del tessuto corporeo. Si esprime in W/Kg.

Queste grandezze vengono utilizzate come riferimento per quantificare gli effetti sul corpo umano dovuti all'esposizione ai campi elettromagnetici e per definire quindi i limiti di esposizione. Al fine di valutare però l'intensità della radiazione si ricorre invece a grandezze direttamente misurabili come il campo magnetico H e l'induzione magnetica B. Sulla base di analisi condotte attraverso modelli matematici e fisici del corpo umano, si procede quindi alla definizione dei limiti in termini di B e H. Nel seguito verranno brevemente analizzate le tecniche e i materiali che possono essere utilizzati per la schermatura dei campi elettromagnetici.

Il campo elettrico E è il più semplice da schermare. Alle basse frequenze utilizzate in ambito industriale e domestico (50-60 Hz) il corpo umano riesce ad attenuare il campo elettrico all'aumentare della frequenza, poichè aumenta la costante dielettrica ϵ del tessuto rispetto a quella dell'aria ϵ_a ; in tal modo il campo elettrico viene efficacemente schermato.

Per quanto riguarda la schermatura dell'induzione magnetica, i tessuti che costituiscono il corpo umano non possiedono proprietà magnetiche, di conseguenza la loro permeabilità magnetica μ risulta all'incirca uguale a quella dell'aria $\mu_{\rm a}$. Il corpo umano non è quindi in grado di attenuare il campo magnetico; si rendono quindi necessarie delle misure esterne per la schermatura. Per le ragioni sopra esposte, il campo magnetico viene considerato come l'agente inquinante prevalente ai fini della valutazione degli effetti biologici sul corpo umano che si possono manifestare alle basse frequenze. Le normative, i materiali e le varie tecniche di schermatura hanno quindi l'obiettivo di andare a ridurre il modulo dell'induzione magnetica B.

1.1 Cenni di Schermatura

Nel caso di condutture elettriche industriali, come quelle analizzate nel presente lavoro di tesi, l'attenuazione del modulo dell'induzione magnetica viene ottenuta mediante l'accoppiamento di materiali diversi: materiali ad alta permeabilità magnetica μ e materiali a elevata conducibilità elettrica σ . Tali materiali vengono disposti in apposite canaline che hanno la duplice funzione di sostenere meccanicamente la linea elettrica e di schermare il campo elettromagnetico prodotto dalla stessa.

Lo strato di materiale ad alta permeabilità magnetica consente di abbattere l'induzione magnetica grazie all'assorbimento del campo magnetico presente. Un materiale tipicamente utilizzato è costituito da lamierini di ferro a grani orientati (FeGO). Il suo comportamento schermante tende però a decadere allontanandosi dallo schermo stesso.

Nel materiale a elevata conducibilità elettrica, in presenza di un campo magnetico variabile nel tempo, vengono indotte delle correnti di circolazione (parassite) che generano a loro volta un campo magnetico di reazione che, per la legge di Lenz, si oppone a quello che le ha generate. In tal modo si ottiene un ulteriore abbattimento del campo magnetico e quindi dell'induzione. Un buon materiale a questo scopo risulta essere l'alluminio (Al). A differenza del materiale ferromagnetico, consente di ridurre l'induzione magnetica anche nelle zone non direttamente adiacenti allo schermo.

Il presente lavoro di tesi analizzerà quindi il potere schermante di alcune canaline attraverso l'utilizzo di software agli elementi finiti già disponibili in rete o tramite l'utilizzo di script e altri programmi appositamente sviluppati per l'analisi. I risultati delle simulazioni verranno quindi confrontati con i dati misurati in campo su canaline industriali prodotte dalla *Sati Shielding*.

Capitolo 2

Software

La prima parte del lavoro di tesi ha avuto come obiettivo la realizzazione di un'interfaccia grafica e di uno script che potessero semplificare l'analisi agli elementi finiti di una generica canalina per applicazioni industriali. Scopo finale è stato quindi quello di ottenere un applicativo Windows che consentisse a un generico utente di inserire i dati di una canalina industriale e generare in automatico un file *.fem* da utilizzare per l'analisi agli elementi finiti grazie a un ulteriore script.

I file che sono stati generati per tale scopo sono stati posti all'interno di una cartella principale chiamata $CableTray_Shielding$. Tale cartella contiene, alla prima apertura, 2 cartelle (DATA e RESULTS) e 2 file ($VB_Form_LUA.exe$ e $Design_CableTray.lua$). La cartella DATA, come intuibile, ha al suo interno i file di input, ovvero i dati e i valori che dovranno essere utilizzati in fase di analisi agli elementi finiti. Allo stesso modo, la cartella RESULTS contiene invece i file di output, ovvero i risultati delle analisi effettuate.

Il file $VB_Form_LUA.exe$, eseguibile su Windows, avvia l'interfaccia grafica per l'inserimento dei dati da parte dell'utente.

Design_CableTray.lua è invece lo script che automatizza il design e l'analisi in femm della canalina desiderata.

Nel seguito viene analizzato meglio ciascun file.

2.1 VB_Form_LUA.exe

La maschera di inserimento dati è stata realizzata programmando in Visual Basic per .NET Framework su IDE Visual Studio 2019 Community in Windows 10, al fine di realizzare un programma avviabile su Universal Windows Platform (UWP), ovvero un file eseguibile con estensione .exe. Lo scopo di tale maschera è quello di semplificare all'utente le fasi di design su software femm di una canalina industriale, in quanto grazie ai box presenti nella maschera stessa è possibile "indicare" a femm tutte le caratteristiche geometriche e circuitali della canalina. La Fig. 2.1 mostra la maschera così come si presenta all'utente.

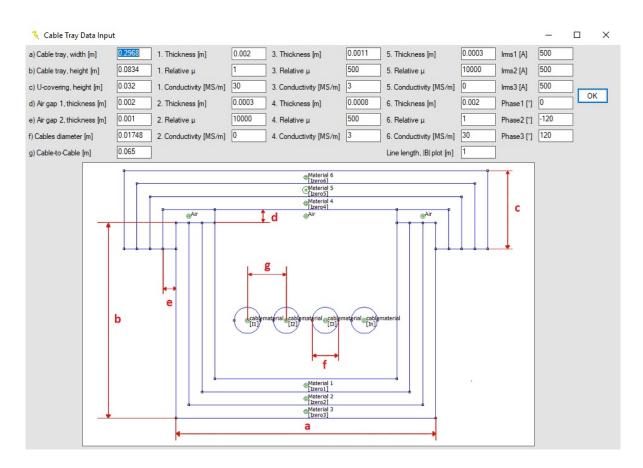


Figura 2.1: La maschera di inserimento dati così come si presenta in esecuzione

Le grandezze geometriche che l'utente può specificare sono le seguenti:

- Larghezza del vassoio (a)
- Altezza del vassoio (b)
- Altezza del coperchio (c)
- Spessore dello strato di aria tra la parte superiore del vassoio e il coperchio (d)
- Spessore dello strato di aria lateralmente al vassoio (e)
- Diametro dei cavi (f)
- Interasse tra i cavi (g)
- Spessore dei singoli strati (identificati da un numero)

I parametri e le grandezze circuitali che l'utente può specificare sono invece i seguenti:

- Permeabilità magnetica relativa μ del materiale componente lo strato (assumendo che il materiale sia *isotropo*, ovvero $\mu_x = \mu_y$)
- \bullet Conducibilità elettrica σ (MS/m) del materiale componente lo strato
- Valore rms (efficace) della corrente su ogni fase
- Angolo della corrente per ogni fase

Come possibile notare dalla maschera si può inserire un ulteriore valore, ovvero quello della lunghezza della linea su cui diagrammare l'andamento dell'induzione. Tale linea è la stessa su cui sono state prese le misurazioni indicate nel capitolo 3. Per i dettagli sulla linea di induzione si rimanda quindi a tale capitolo.

La Fig. 2.2 mostra un ingrandimento dell'immagine presente nella maschera con le dimensioni quotate. La canalina in figura è distorta rispetto a una reale canalina per uso industriale; ciò è però utile per comprendere meglio quali sono i valori settabili dall'utente. Un esempio di canalina più simile a una reale è mostrato in Fig. 2.3.

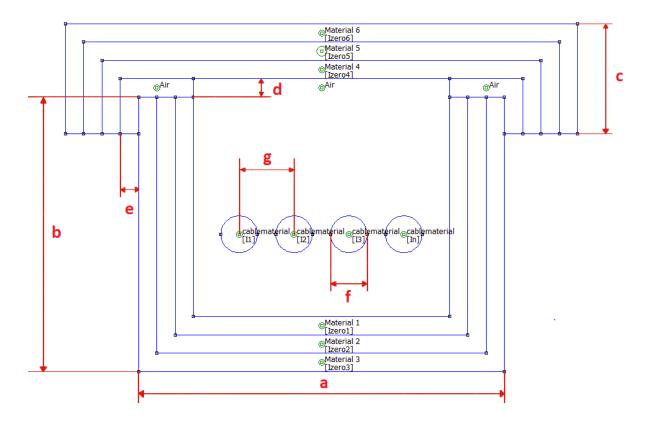


Figura 2.2: Ingrandimento dell'immagine della canalina presente nella maschera

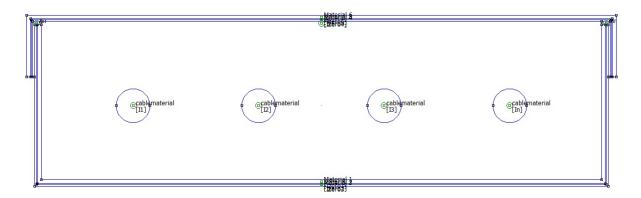


Figura 2.3: Esempio in femm di una tipica canalina per uso industriale

La maschera di inserimento dati consente di inserire alcune grandezze geometriche e circuitali, ma non permette di modificare la geometria della canalina o il circuito elettrico considerato. La situazione "standard" presa in considerazione si basa quindi su alcune assunzioni:

- La canalina è composta da un vassoio e da un coperchio
- Gli strati considerati sono 6 in totale, ovvero 3 per il coperchio e 3 per il vassoio. Modificando i valori all'interno dei box è possibile comunque scegliere l'ordine in cui questi strati sono disposti
- I cavi sono 4: in 3 di essi scorre una terna di correnti (equilibrata oppure no, a seconda dei valori inseriti dall'utente), il quarto è invece il conduttore di neutro. La corrente circolante nel conduttore di neutro è data dalla somma algebrica delle correnti sulle tre fasi. Nel caso di una terna equilibrata, dunque, nel neutro circola una corrente nulla.
- Il materiale di cui sono composti i cavi non è selezionabile dall'utente, ma è preimpostato come rame (permeabilità magnetica relativa $\mu_{\rm r} \cong 1$, conducibilità elettrica $\sigma = 55~MS/m$). In ogni caso, per i calcoli di interesse, il materiale dei conduttori non dovrebbe influire eccessivamente

Nel caso si necessiti di effettuare simulazioni su canaline con una diversa geometria, il file *.fem* generato da questo applicativo può essere liberamente preso come base di partenza, esportato, e quindi modificato manualmente. In effetti, per parte delle simulazioni svolte nel capitolo 4 è stato fatto proprio così, dal momento che la geometria della canalina disponibile in azienda era differente dal modello "standard" considerato.

All'apertura della maschera, all'interno dei box, si trovano già dei valori predefiniti per ciascun parametro, in maniera tale da semplificare le operazioni di inserimento da parte dell'utente. In particolare, i valori pre-impostati definiscono una canalina composta dai seguenti strati:

- $\bullet\,$ Gli strati 1 e 6 sono composti di alluminio, Al $(\mu_{\rm r}\cong 1,\,\sigma=30~{\it MS/m})$
- Gli strati 2 e 5 sono composti di lamierino in ferro a grani orientati, FeGO ($\mu_{\rm r} = 10000$, $\sigma = 0~MS/m$)

• Gli strati 3 e 4 sono composti di ferro, Fe ($\mu_r = 500$, $\sigma = 3 \, MS/m$)

Dopo la descrizione dell'interfaccia, passiamo ora al funzionamento di questa maschera di inserimento dati. Dopo che l'utente inserisce i valori desiderati all'interno dei box, cliccando su "OK" è possibile eseguire in automatico uno script che trascrive i dati della maschera in un file di testo (Input_Data.txt), presente all'interno della cartella DATA. Terminata tale operazione, lo script procede all'avvio automatico del programma femm, che dev'essere stato precedentemente installato dall'utente, dal momento che è il programma che si occupa di svolgere nello specifico l'analisi agli elementi finiti. femm è scaricabile gratuitamente al link: http://www.femm.info/wiki/Download.

femm viene avviato in automatico solamente nel caso in cui venga installato nella posizione $C:\backslash femm42$, che è la posizione predefinita di installazione. Diversamente, la scrittura dei dati su file di testo avverrà comunque, ma l'utente dovrà provvedere a "lanciare" manualmente femm.

2.2 Design_CableTray.lua

femm, nominato più volte all'interno della sezione precedente, è un programma per Windows (ma è disponibile anche il supporto per sistemi GNU/Linux tramite ambiente Wine) molto utilizzato per analisi agli elementi finiti in ambito principalmente magnetico ed elettrostatico (ma è possibile anche studiare i flussi termici). Esso può essere utilizzato tramite la sua interfaccia grafica, oppure tramite script in LUA. LUA è un linguaggio di scripting generico nato nel 1993 e può essere utilizzato in femm per automatizzare e parametrizzare processi e operazioni. La versione di LUA attualmente supportata da femm e che è quindi stata utilizzata è la 4.0. All'indirizzo http://www.femm.info/wiki/Documentation/ è disponibile un manuale di LUA 4.0 con le funzioni supportate da femm.

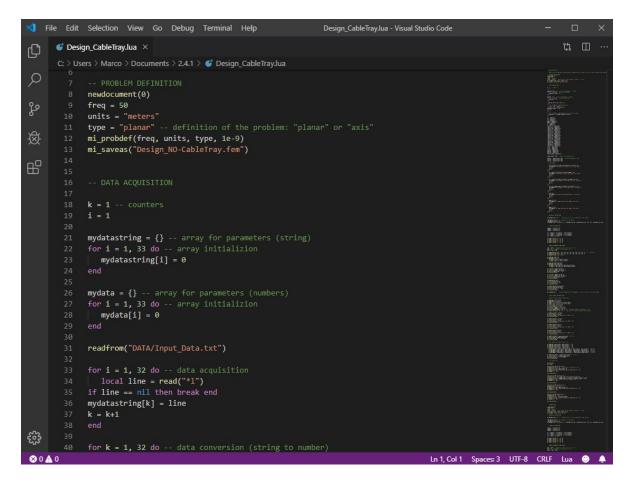


Figura 2.4: Anteprima dello script in LUA su Visual Studio Code

Lo script in LUA è stato realizzato programmando su *Visual Studio Code*, un editor di codice sorgente realizzato dalla Microsoft, in Windows 10. La Fig. 2.4 mostra un'anteprima dello script in LUA aperto su Visual Studio Code.

Una volta quindi che femm si apre in automatico oppure viene lanciato manualmente, occorre, tramite l'interfaccia grafica di femm, andare a cliccare dal menu "File" l'opzione "Open Lua Script", selezionando quindi lo script $Design_CableTray.lua$ presente nella cartella principale. Tale script, composto da poco più di 600 linee di codice, apre in lettura il file di testo su cui sono presenti i valori inseriti dall'utente per la canalina, e li utilizza per generare due file: $Design_NO-CableTray.fem$ e $Design_CableTray.fem$. Tali file vengono memorizzati nella cartella principale. Il primo di questi è utile per eseguire l'analisi agli elementi finiti in assenza della canalina,

con solamente i cavi all'interno dei quali scorrono le correnti impostate dall'utente. Il secondo permette invece di eseguire l'analisi agli elementi finiti dello stesso sistema, ma con la presenza della canalina di schermatura. La Fig. 2.5 mostra lo script in esecuzione in femm.

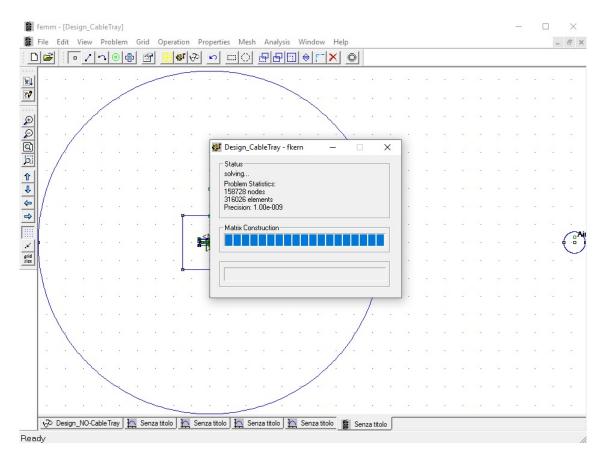


Figura 2.5: Lo script in LUA in esecuzione all'interno di femm

L'analisi agli elementi finiti viene avviata in automatico e il software mostra quindi al termine 8 grafici contenenti l'andamento dell'induzione magnetica lungo le 4 direzioni descritte nelle prove del capitolo 3. I grafici sono 8 in quanto si riferiscono a entrambi i casi: 4 grafici per l'analisi in assenza di canalina e 4 in presenza di canalina di schermatura. In Fig. 2.6 è mostrata la finestra visibile al termine dell'esecuzione dello script. Si notano i vari tab con tutti i grafici generati su cui è diagrammato l'andamento dell'induzione.

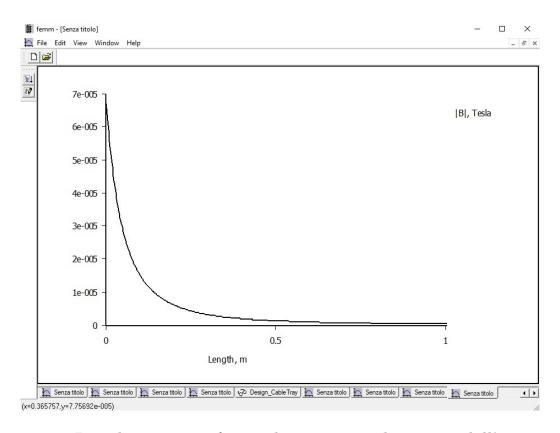


Figura 2.6: La schermata in *femm* che compare al termine dell'esecuzione dello script in LUA

Contestualmente alla creazione dei due file *.fem* menzionati, vengono generati i due file *Design_NO-CableTray.ans* e *Design-CableTray.ans*, contenenti i risultati dell'analisi in un formato leggibile da femm.

Lo script non si limita a mostrare su schermo i grafici con l'andamento dell'induzione, ma genera dei file di testo all'interno della cartella RESULTS, in modo tale da rendere disponibili i dati anche all'esterno di femm per successive analisi e comparazioni. In particolare, i file generati sono 8, tanti quanti i grafici: CableTray_BPlotBT.txt, CableTray_BPlotDX.txt, Cable-Tray_BPlotSX.txt, CableTray_BPlotTOP.txt, NO-CableTray_BPlotBT.txt, NO-CableTray_BPlotDX.txt, NO-CableTray_BPlotSX.txt, NO-CableTray_BPlotTOP.txt. Le sigle SX, DX, BT e TOP utilizzate per i nomi dei file sono ovviamente delle abbreviazioni per sinistra, destra, parte inferiore e parte superiore e fanno riferimento alla direzione della linea su cui viene diagrammato l'andamento dell'induzione magnetica. Tali file possono essere interpretati da

programmi tipo EXCEL come file .csv (comma-separated value) e importati all'interno di un foglio elettronico.

Capitolo 3

Misure

3.1 Impianto di Prova

Le prove sperimentali di misura sono state svolte presso il laboratorio di misura della Sati Shielding, azienda del Gruppo Carpaneto Sati, nella sede di Cascine Vica (TO).

L'impianto di prova era costituito da:

- 1 autotrasformatore (VARIAC) trifase, connesso alla rete tramite il quadro elettrico più vicino nello stabilimento e in grado di generare una terna equilibrata di correnti. Tale VARIAC presenta tre display che indicano il valore di corrente di ciascuna fase della linea principale (la linea secondaria non è stata utilizzata)
- 3 trasformatori monofase elevatori di corrente in grado di moltiplicare il valore delle correnti in uscita dal VARIAC di un fattore 100. Il funzionamento è in bassissima tensione
- Una linea trifase senza neutro (Fig. 3.1), costituita da tre cavi in rame di sezione 240 mm², chiusa con un cortocircuito trifase (Fig. 3.2). I cavi, di lunghezza 11 metri ciascuno, sono stati disposti su un pianale in legno e fissati con delle viti per bloccarne la posizione reciproca. La disposizione utilizzata è quella piana con interasse di 7 cm tra due fasi adiacenti

• 3 canaline multistrato (Fig. 3.3) di lunghezza 3 m ciascuna. Ogni canalina è composta da un vassoio e da un coperchio, ciascuno formato da tre strati di materiale schermante, ovvero ferro (Fe), lamierino a grani orientati (FeGO) e alluminio (Al). Gli spessori dei tre strati non possono essere rivelati per ragioni di segretezza. Le 3 canaline sono state bloccate fra loro mediante dadi e bulloni per evitare scorrimenti.



Figura 3.1: La linea trifase oggetto delle prove di misura



Figura 3.2: Corto-circuito trifase in chiusura alla linea

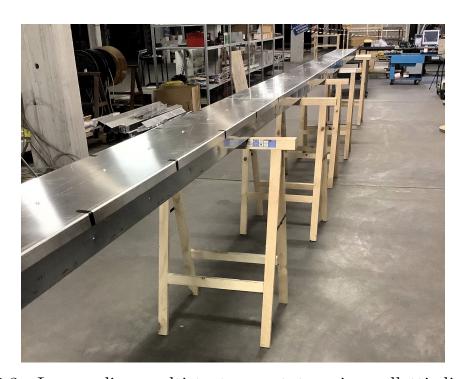


Figura 3.3: Le canaline multistrato montate sui cavalletti di sostegno. All'interno del canale è posto il pianale in legno su cui sono appoggiati i cavi che costituiscono la linea trifase

3.2 Strumenti

La sonda utilizzata per la misura dell'induzione magnetica è una sonda triassiale prodotta dalla NARDA (Fig. 3.4). Tale sonda è in grado di misurare le componenti dell'induzione magnetica (alternate, non continue) sugli assi X, Y, e Z e di fornirne il modulo. Il fondo scala è stato settato a 200 Hz. La sonda è stata posta nelle varie posizioni necessarie alle misure grazie all'utilizzo di un cavalletto a tre gambe. Essa è quindi stata collegata al dispositivo indicatore (Fig. 3.6) tramite un cavo in fibra ottica (Fig. 3.5).



Figura 3.4: La sonda utilizzata per le misure, fissata in posizione sopra al cavalletto



Figura 3.5: Il cavo in fibra utilizzato per il collegamento della sonda al dispositivo indicatore



Figura 3.6: Il dispositivo indicatore

3.3 Misure Effettuate

Le misure che sono state effettuate sul canale così costituito, con gli strumenti sopra indicati, sono le seguenti:

- Misura delle componenti (B_x, B_y, B_z) e del modulo |B| dell'induzione magnetica nell'intorno della linea trifase, sia con che senza canale di schermatura. La misura è stata effettuata lungo 3 sezioni diverse, poste rispettivamente a 1.5, 4.5 e 7.5 metri dall'inizio della linea. Tali distanze sono state scelte per minimizzare gli effetti di disturbo provocati dalle giunzioni tra i tratti di canalina e dalla presenza della sorgente da un lato (inizio linea) e del corto-circuito dall'altro (fine linea). Per ogni sezione è stato misurato l'andamento dell'induzione magnetica mano a mano che ci si allontana dalla canalina lungo 4 linee diverse, poste sopra (top), sotto (bottom), a destra (dx) e a sinistra (sx) della linea. La prima misura è stata effettuata in prossimità del bordo della canalina, spostandosi per gli step successivi di 5 o 10 cm. La distanza massima considerata per la misura è stata di 1 m dal bordo laterale della canalina per le prove dx e sx e di 40 cm per le prove top e bottom.
- Caratterizzazione della linea in tutta la sua lunghezza, tramite la misura delle componenti (B_x, B_y, B_z) e del modulo |B| dell'induzione magnetica lungo sezioni distanti fra loro 50 cm, a partire dall'inizio della linea (0 m) fino ad arrivare al corto circuito (9 m). Per ogni sezione le misure sono state prese lungo le stesse linee indicate nella misurazione precedente, ma solamente alle distanze di 10 e 50 cm dalla canalina, anzichè da 0 a 1 m di distanza con step di 5/10 cm.

Le foto seguenti mostrano alcuni dettagli utili a comprendere meglio come sono state effettuate le misure.



Figura 3.7: L'inizio della linea, θ m, posto a valle dei trasformatori elevatori monofase di corrente. I cavi sono stati legati con una fascetta per ridurre l'effetto di disturbo a inizio linea



Figura 3.8: Esempio di misura effettuata sotto la linea in assenza del canale schermante



Figura 3.9: Esempio di misura effettuata a destra della linea a ridosso del canale schermante



Figura 3.10: Esempio di misura effettuata sopra alla linea, in assenza del canale schermante, e con l'ausilio di un distanziatore per "fissare" meglio la distanza

3.4 Problemi e Approssimazioni

Il VARIAC utilizzato nelle prove consente di generare una terna equilibrata di correnti. Tuttavia, a causa della presenza delle mutue e auto-induttanze tra i cavi, la terna reale di correnti non risultava essere equilibrata. A causa inoltre del riscaldamento termico dei cavi dovuto alle perdite, le correnti non sono rimaste costanti per tutta la durata delle prove. Di conseguenza, all'inizio e alla fine di ogni serie di prove dello stesso tipo, sono stati letti i valori di corrente dal VARIAC, moltiplicati per 100 (fattore di elevazione dei trasformatori monofase) e si è trovata la corrente media a cui quella prova è stata effettuata. I valori di campo misurati con la sonda sono stati quindi linearizzati a una corrente di riferimento $(500\ A)$ in modo tale da ottenere dati confrontabili tra le varie prove.

Non essendo la sonda puntiforme, ci si è posti il problema di come effettuare le misurazioni per evitare discrepanze ed errori dovuti alla diversa disposizione della sonda durante le misure. Sono stati quindi adottati alcuni accorgimenti, nei limiti del possibile con gli strumenti a disposizione, per l'orientamento delle facce (e quindi degli assi X, Y, Z) e dell'altezza da terra della sonda. Nelle prove effettuate lateralmente alla canalina (dx e dx) l'asse Y è sempre stato orientato in direzione dei cavi. Nelle prove bottom l'asse Y è stato rivolto verso la destra del canale (avendo alle spalle la sorgente, ovvero il VARIAC e i trasformatori elevatori). Nelle prove top l'asse Y è stato rivolto verso l'alto e l'asse X verso la fine della linea (corto-circuito). La Fig. 3.11 mostra l'orientamento degli assi su cui vengono misurate le componenti dell'induzione magnetica, così come indicato dal costruttore.



Figura 3.11: L'indicazione dell'orientamento degli assi presente sulla faccia superiore della sonda

Per le misure è sempre stato utilizzato un metro a nastro per controllare non solo la distanza dalla linea, ma anche l'altezza da terra della sonda. L'uso dei distanziatori ha permesso di semplificare la misura delle distanze nelle prove di caratterizzazione in lunghezza della canalina. I distanziatori utilizzati sono 4, ovvero 2 per le prove in assenza del canale schermante e 2 per le prove in presenza del canale schermante. Ovviamente, i distanziatori erano costituiti da materiali non ferromagnetici, ma con una permeabilità magnetica simile a quella dell'aria, in modo da non alterare i valori di campo. La distanza di riferimento per le prove è quella misurata dalla canalina. Per le prove schermate i distanziatori utilizzati misuravano rispettivamente 10 e 50 cm. Nelle prove non schermate sono stati utilizzati distanziatori più lunghi per compensare l'assenza della canalina e poter quindi riferire la misura alla stessa distanza.

3.5 Dati

Come accennato nel paragrafo 3.4, le misure di campo rilevate sono state linearizzate a un unico valore di corrente di riferimento, fissato a 500

A (il valore di corrente più vicino alla media delle correnti a cui si sono svolte le prove). I valori di induzione magnetica, misurati sia in presenza sia in assenza del canale schermante, sono stati utilizzati per calcolare il fattore di schermatura della canalina su tutti i lati e a varie distanze dalla stessa. Il fattore di schermatura è stato definito come segue:

$$FS = \frac{\mid B_{\text{no-cable-tray}} \mid}{\mid B_{\text{with-cable-tray}} \mid}$$
(3.1)

Il fattore di schermatura è cioè definito come il rapporto tra l'induzione magnetica misurata in assenza della canalina al numeratore e in presenza della stessa al denominatore. Dal momento che il modulo dell'induzione magnetica è, ovviamente, maggiore nel caso non schermato, dall'equazione 3.1 consegue che il fattore di schermatura è un numero > 1.

Nel seguito si riportano i grafici contenenti l'andamento del fattore di schermatura in funzione della distanza dalla canalina, così come spiegato nel paragrafo 3.3. Le tre immagini riportano rispettivamente i valori ottenuti dalla prova a $1.5\ m$ (Fig. 3.12), a $4.5\ m$ (Fig. 3.13) e a $7.5\ m$ (Fig. 3.14) dall'inizio della linea.

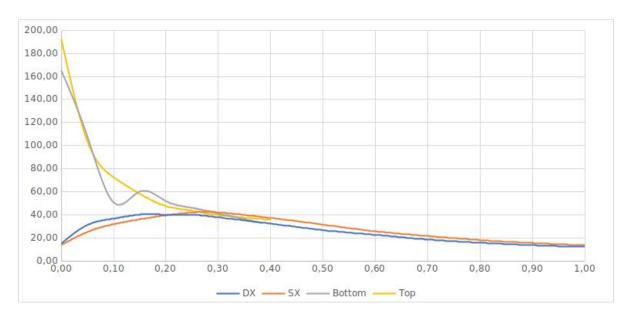


Figura 3.12: Andamento del fattore di schermatura in funzione della distanza dalla canalina lungo le 4 direzioni individuate $(DX, SX, Bottom \ e Top)$ nella prova effettuata a $1,5\ m$ di distanza dall'inizio della linea

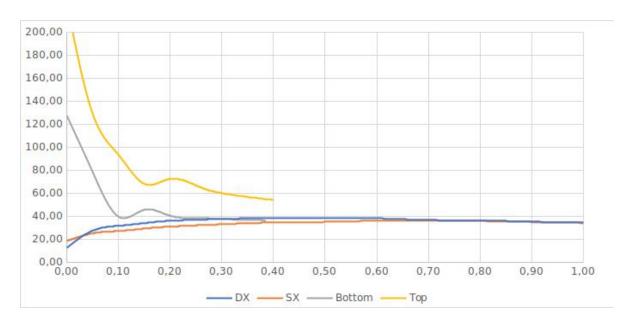


Figura 3.13: Andamento del fattore di schermatura in funzione della distanza dalla canalina lungo le 4 direzioni individuate $(DX, SX, Bottom \ e Top)$ nella prova effettuata a $4.5 \ m$ di distanza dall'inizio della linea

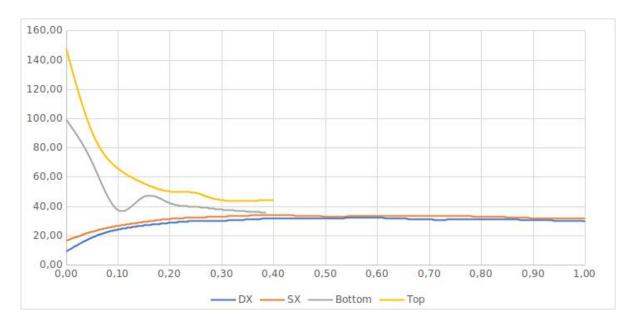


Figura 3.14: Andamento del fattore di schermatura in funzione della distanza dalla canalina lungo le 4 direzioni individuate $(DX, SX, Bottom \ e Top)$ nella prova effettuata a $7.5 \ m$ di distanza dall'inizio della linea

Come si può notare dai grafici precedenti, il fattore di schermatura misurato nelle varie prove a sinistra e a destra del canale schermante risulta avere andamenti e valori simili con buona approssimazione, così come quello misurato sopra e sotto la linea. Le differenze nell'andamento delle curve si è ipotizzato essere dovute ad alcuni fattori di seguito elencati:

• La terna di tensioni e correnti utilizzata nella prova genera, come noto, un campo magnetico rotante che porta, anche in condizioni di perfetta simmetria delle tensioni e equilibrio delle correnti (oltre che a perfetta omogeneità e uniformità del canale schermante) a possibili dissimmetrie nei campi e, di conseguenza, ai fattori di schermatura misurati tra la parte destra e sinistra del canale. A titolo di esempio, l'immagine 3.15 mostra un'analisi femm di una linea trifase senza neutro, in aria e senza canale schermante. Come visibile, si notano delle differenze (seppur lievi) tra la destra e la sinistra anche in questa condizione di perfetta simmetria.

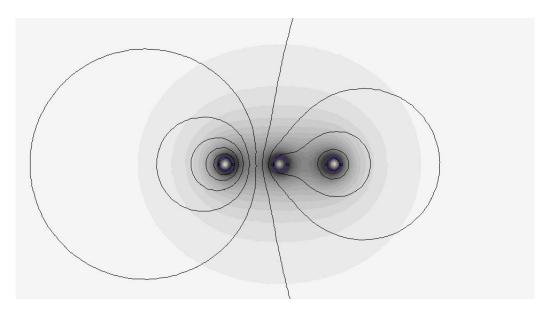


Figura 3.15: Analisi femm su una linea trifase senza neutro in aria attraversata da una terna equilibrata di correnti di valore efficace 500 A

• I materiali di cui la canalina di prova è composta potrebbero presentare alcune disomogeneità dovute alla lavorazione, che andrebbero quindi a

inficiare sui fattori di schermatura, mostrando andamenti non uniformi su tutte le sezioni. In particolare, la piegatura dei lamierini magnetici a grani orientati risulta essere un'operazione abbastanza delicata. A tal proposito la canalina è stata sagomata in modo da evitare angoli di curvatura troppo stretti per il lamierino a grani orientati, ma ciò non è per natura fisica sufficiente e rimuovere tutte le imperfezioni.

- Eventuali "giochi" meccanici e accoppiamenti magnetici tra il coperchio e il vassoio della canalina potrebbero portare alla circolazione di piccole correnti parassite e/o alla presenza di flussi magnetici non simmetrici tra i vari lati del canale. In particolare, la presenza di un'oscillazione nell'andamento del fattore di schermatura sopra e sotto la canalina è probabilmente dovuta all'effetto ai bordi.
- Ai punti precedenti si vanno a sommare, come anticipato nel primo punto, il fatto che la terna di corrente circolante nei cavi durante la prova non era perfettamente equilibrata e che all'inizio e alla fine della linea erano presenti inevitabili fonti di disturbo, ovvero la sorgente e il corto-circuito.

Non sono state effettuate trasposizioni dei cavi (che avrebbero potuto portare a un miglioramento nella distribuzione delle correnti tra i tre cavi) per evitare di andare a introdurre ulteriori sezioni critiche nella misura.

Per meglio interpretare i dati ottenuti nella prima serie di prove, come spiegato al paragrafo 3.3, si è deciso di procedere a una caratterizzazione della canalina in tutta la sua lunghezza. Lungo le 4 direzioni già individuate in precedenza sono quindi state effettuate prove di misura solamente in due punti, ovvero a 10~cm e a 50~cm di distanza dalla canalina. Tali misure sono state ripetute per tutte le sezioni distanti 50~cm comprese tra l'inizio e la fine della linea, lunga 9~m. Le immagini seguenti mostrano l'andamento del fattore di schermatura rispettivamente nella misura a 10~cm (Fig. 3.16) e in quella a 50~cm (Fig. 3.17).

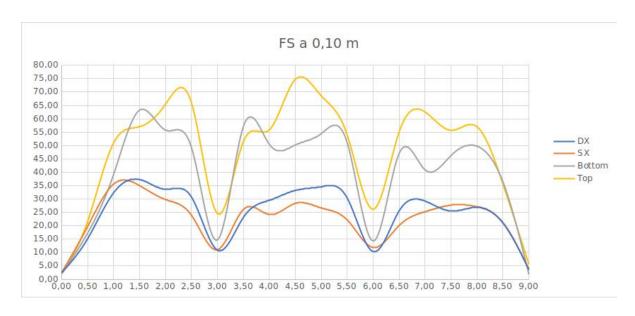


Figura 3.16: Andamento del fattore di schermatura in funzione della lunghezza della linea (9 m) misurato a una distanza di 10 cm dalla canalina lungo le 4 direzioni individuate $(DX, SX, Bottom \ e \ Top)$

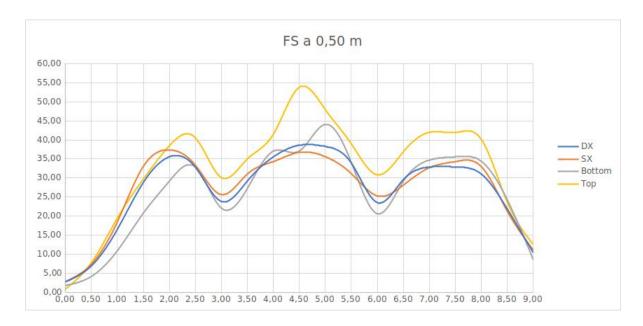


Figura 3.17: Andamento del fattore di schermatura in funzione della lunghezza della linea (9 m) misurato a una distanza di 50 cm dalla canalina lungo le 4 direzioni individuate $(DX, SX, Bottom \ e \ Top)$

Anche per questa prova valgono le considerazioni fatte in precedenza sulla dissimetria tra le curve. Vale comunque la pena di mettere in evidenza tre aspetti principali:

- In corrispondenza dell'inizio e della fine della linea i fattori di schermatura convergono. Tale effetto è dovuto proprio alla vicinanza della sorgente prima e del corto-circuito poi, e del fatto che l'impianto di prova era costituito da 9 m di canale schermante (mentre i cavi erano più lunghi).
- In corrispondenza dei 3 m e dei 6 m di distanza dall'inizio della linea si notano dei "crolli" nei fattori di schermatura dovuti alla giunzione di due tratti di canalina (ogni tratto è lungo 3 m).
- Mano a mano che ci si allontana dalla canalina (prova a 50 cm) i fattori di schermatura lungo le varie direzioni tendono a uniformarsi attestandosi su valori generalmente più elevati rispetto a quelli della prova a 10 cm. L'effetto ai bordi (dovuto al contatto tra il coperchio e il vassoio) sparisce infatti a una distanza di circa 30 cm dalla canalina lungo le 4 direzioni.

Infine, nonostante le dissimmetrie dovute alla realtà fisica degli oggetti in prova, occorre mettere in evidenza che la canalina ha sempre mostrato di avere i requisiti di schermatura richiesti e indicati a catalogo dal costruttore.

Capitolo 4

Simulazioni

Al fine di verificare gli script e l'insieme di applicativi utilizzati per semplificare il processo di analisi agli elementi finiti di una canalina, dalla creazione del modello al suo studio, sono state realizzate delle simulazioni su femm che sono poi state confrontate con le misure effettuate e discusse nel capitolo 3. A causa delle limitazioni imposte da femm, ovvero una modellizzazione bidimensionale e non tridimensionale, non tutte le prove effettuate possono essere confrontate con una loro simulazione al PC; di conseguenza occorre andare a escludere quelle prove che possono essere influenzate dalla presenza di altri oggetti nello spazio tridimensionale, i quali non possono essere inclusi nel modello femm. Nello specifico:

- Le prove effettuate per analizzare l'andamento del fattore di schermatura a 10 cm e 50 cm di distanza dalla canalina lungo tutta la lunghezza del canale schermato non possono essere confrontate con un loro modello su femm. Ciò è dovuto al fatto che non è possibile simulare la distanza spaziale della sezione analizzata dall'inizio e dal fine linea, dove si trovano rispettivamente la sorgente (il VARIAC e i 3 trasformatori monofase elevatori di corrente) e il corto-circuito.
- Per la stessa ragione al punto precedente, si incontrano dei limiti nelle simulazioni anche per le prove che hanno analizzato il fattore di schermatura lungo le 4 direzioni individuate per 3 sezioni poste a distanze differenti dall'inizio della linea.

Visti i punti precedenti, al fine di effettuare un confronto tra un caso reale e una simulazione in situazioni analoghe, la prova che può essere confrontata con una simulazione è quella effettuata lungo le 4 direzioni su una sezione posta a 4,5 metri di distanza dall'inizio della linea. Su tale sezione, infatti, si risente meno dell'effetto dovuto alla vicinanza della sorgente o del cortocircuito (che come detto non è possibile modellizzare in femm vista la sua natura 2D). Inoltre, dal momento che tale sezione non solo si trova a metà dell'intera lunghezza della linea, ma anche a metà di una canalina lunga 3 metri (l'intero canale schermato è lungo 9 metri, ovvero è formato da 3 canaline da 3 metri di lunghezza) si sente meno anche l'effetto dovuto alle giunzioni tra le canaline. L'andamento del fattore di schermatura lungo le 4 direzioni di questa sezione può essere quindi considerato come un caso generale analogo a quello che è possibile simulare.

Nel modello femm si è inizialmente utilizzata una canalina "standard", ovvero quella le cui caratteristiche sono quelle predefinite all'interno della maschera di inserimento dati. Tali valori predefiniti sono stati scelti proprio sulla base della canalina utilizzata nelle prove. Poichè, per questioni di segretezza, non è stato possibile ottenere le dimensioni effettive dei vari strati di schermatura della canalina, i dati che sono stati inseriti nella maschera sono valori misurati con un metro o con un calibro, che dovrebbero quindi essere sufficientemente vicini alla realtà. La canalina della simulazione si presenta come in Fig. 4.1. Eccezion fatta per alcune piccole differenze, che verranno discusse nel seguito, la canalina utilizzata nelle prove e quella del modello femm sono quindi pressochè identiche.

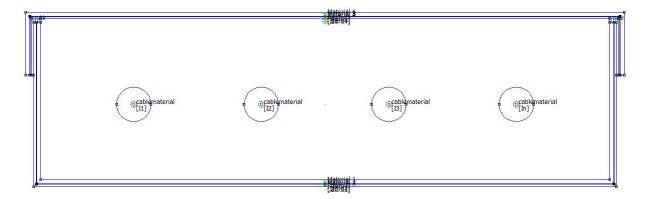


Figura 4.1: La canalina utilizzata nel modello femm

I valori utilizzati per la simulazione sono quelli indicati nella tabella 4.1, in cui le lettere tra parentesi si riferiscono alle dimensioni quotate nell'immagine presente nella maschera di inserimento dati, che si riporta qui di seguito (Fig. 4.2) per agevolarne la consultazione. Si veda la sezione 2.1 per maggiori dettagli.

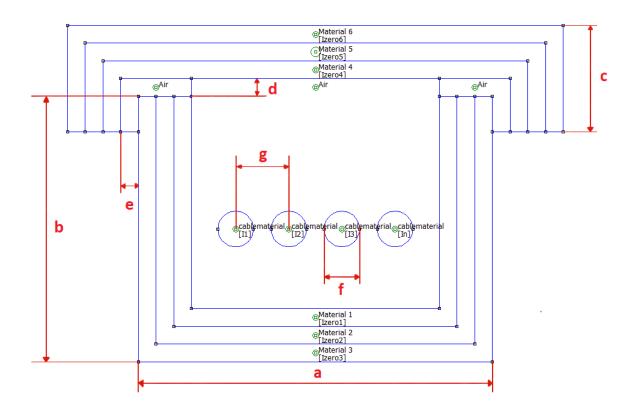


Figura 4.2: Ingrandimento dell'immagine della canalina presente nella maschera

(a) [m] 0.2968 (b) [m] 0.0834 (c) [m] 0.032 (d) [m] 0.002 (e) [m] 0.001 (f) [m] 0.01748 (g) [m] 0.065

Tabella 4.1: Dimensioni geometriche utilizzate per la simulazione

Gli strati utilizzati sono alluminio (1 e 6, $\mu_{\rm r} \cong 1$, $\sigma = 30~MS/m$), lamierino in ferro a grani orientati (2 e 5, $\mu_{\rm r} = 10000$, $\sigma = 0~MS/m$) e ferro (3 e 4, $\mu_{\rm r} = 500$, $\sigma = 3~MS/m$). Gli spessori sono invece quelli indicati in Tab. 4.2.

- (1) [m] 0.002
- (2) [m] 0.0003
- (3) [m] 0.0011
- (4) [m] 0.0008
- (5) [m] 0.0003
- (6) [m] 0.002

Tabella 4.2: Spessori degli strati

La linea su cui diagrammare l'andamento dell'induzione è stata considerata di lunghezza $1\ m$. Infine, nella simulazione è stata utilizzata una terna equilibrata di correnti con valore efficace della corrente di fase pari a $500\ A$, ovvero lo stesso valore di corrente a cui erano stati linearizzati i campi misurati nelle prove.

Il primo caso considerato è quello del sistema in assenza di canale di schermatura. La Fig. 4.3 mostra un grafico, ottenuto in femm, con i valori dell'induzione (misurata in T) nella sezione considerata.

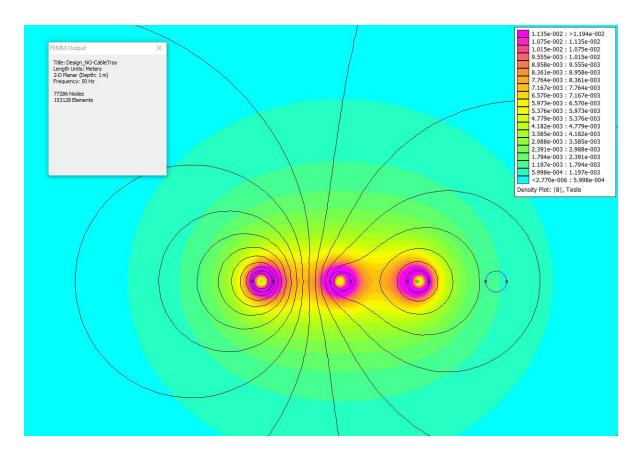


Figura 4.3: L'immagine mostra il valore dell'induzione sulla sezione considerata così come risultante dalla simulazione femm

Il secondo caso è quello invece del sistema in presenza del canale di schermatura. La Fig. 4.4 mostra un grafico con i valori dell'induzione (misurata in T) nella sezione considerata.

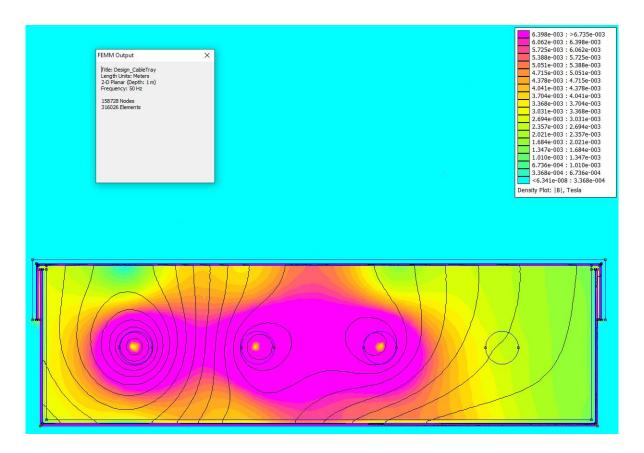


Figura 4.4: L'immagine mostra il valore dell'induzione sulla sezione considerata in presenza della canalina, così come risultante dalla simulazione femm

Dal momento che l'attenzione è stata posta sulla caratterizzazione della canalina in riferimento al suo potere schermante, nel seguito non vengono considerati i valori di induzione raggiunti nei due casi, ma solamente il loro rapporto, in modo tale da considerare il fattore di schermatura, così come già definito nella sezione 3.5, ovvero:

$$FS = \frac{\mid B_{\text{no-cable-tray}} \mid}{\mid B_{\text{with-cable-tray}} \mid} \tag{4.1}$$

Sono quindi stati presi i file generati dallo script in LUA, contenenti i risultati della simulazione, ed esportati come *file a valori separati da virgola* all'interno di un foglio elettronico, in modo tale da poter calcolare il rapporto punto a punto tra i valori di induzione nei due casi.

La Fig. 4.5 mostra l'andamento dei fattori di schermatura nella simulazione

effettuata. Per confronto, si riportano in Fig. 4.6 gli andamenti del fattore di schermatura che erano stati ottenuti dalle prove sperimentali.

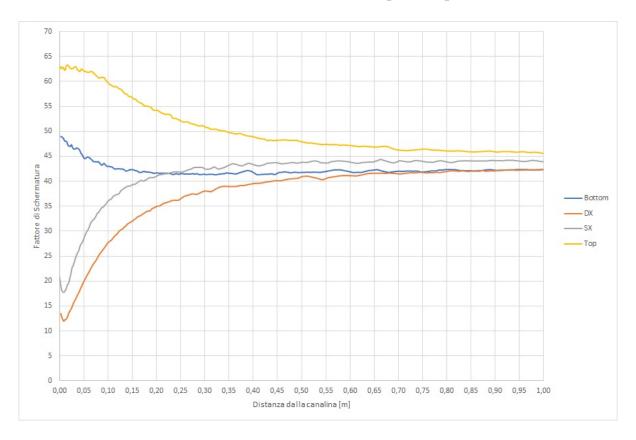


Figura 4.5: Andamento del fattore di schermatura nella simulazione realizzata in femm su una canalina "standard"

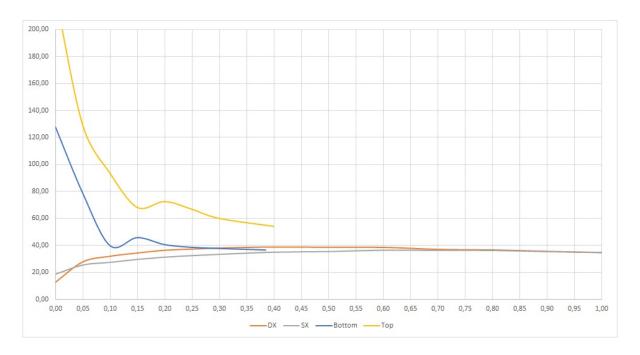


Figura 4.6: Andamento del fattore di schermatura in funzione della distanza dalla canalina lungo le 4 direzioni individuate $(DX, SX, Bottom\ e\ Top)$ nella prova effettuata a $4.5\ m$ di distanza dall'inizio della linea

Per ragioni di spazio e strumentazione, nelle prove sperimentali effettuate per trovare l'andamento del fattore di schermatura sopra e sotto la canalina ci si è fermati a $40\ cm$ di distanza; nella simulazione si è potuto, ovviamente, proseguire invece fino a $1\ m$ di distanza.

Dai grafici precedenti è possibile notare che mentre i fattori di schermatura ottenuti dalla simulazione e quelli misurati a destra e sinistra della canalina hanno andamenti simili, si riscontrano differenze evidenti nei fattori di schermatura sopra e sotto la canalina. Per tentare di migliorare i risultati della simulazione si è quindi deciso di modificare manualmente il modello femm generato in automatico dallo script in LUA, al fine di rendere tale modello più simile alla canalina in prova. Come detto, infatti, sebbene la canalina "standard" considerata e quella in prova fossero pressochè identiche nella composizione degli strati (spessore, materiali e caratteristiche circuitali), la canalina in prova presentava una maggiore complessità geometrica, dovuta a un sistema di aggancio tra il vassoio e il coperchio. Tale sistema è composto da un "ricciolo", ovvero una piegatura meccanica del materiale più interno al vassoio che si incastra con un'analoga struttura presente sul coperchio.

La Fig. 4.7 mostra il modello femm di tale canalina, mentre la Fig. 4.8 si concentra sul particolare del "ricciolo".

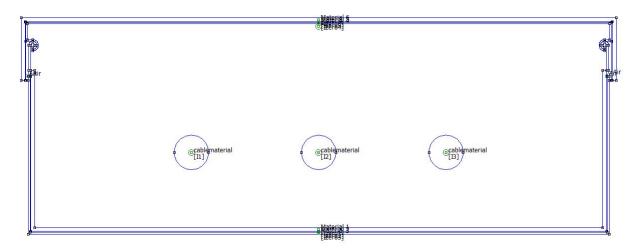


Figura 4.7: La canalina utilizzata nel modello femm, con le modifiche implementate manualmente

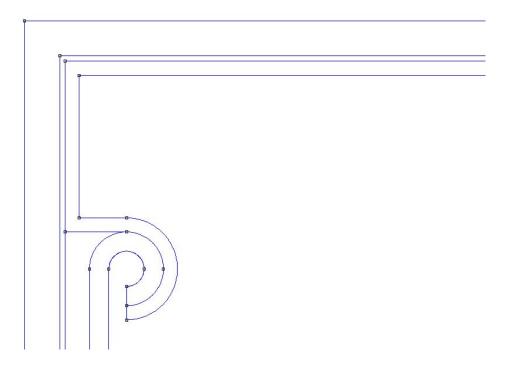


Figura 4.8: Particolare del sistema di aggancio meccanico tra il vassoio e il coperchio della canalina

Utilizzando questo modello modificato, si è quindi avviata una nuova simulazione. La Fig. 4.9 mostra i valori di induzione magnetica (in T) ottenuti da questa seconda simulazione. Naturalmente, dal momento che le modifiche effettuate riguardano solo la geometria della canalina, non si riportano i valori di induzione nel caso in assenza del canale di schermatura, in quanto sono gli stessi del caso precedente (Fig. 4.3).

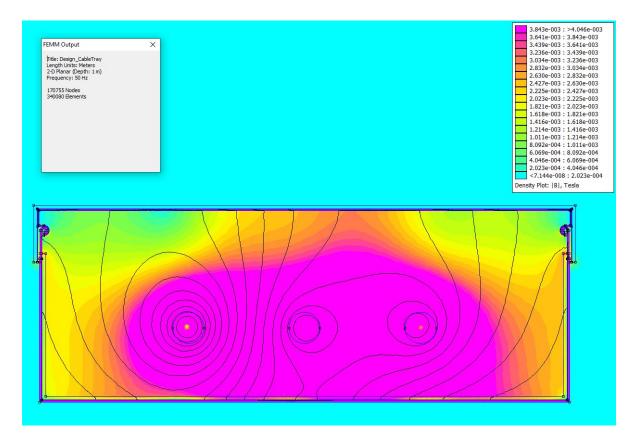


Figura 4.9: L'immagine mostra il valore dell'induzione sulla sezione considerata in presenza della canalina nella seconda simulazione femm

Con il modello *femm* modificato, i valori del fattore di schermatura subiscono alcune variazioni, come mostrato in Fig. 4.10.

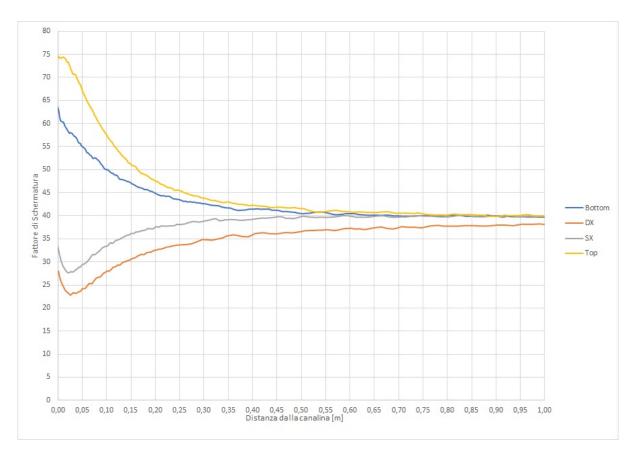


Figura 4.10: Andamento del fattore di schermatura nella seconda simulazione realizzata in femm

Per meglio apprezzare l'andamento del fattore di schermatura nei tre casi (primo modello femm, secondo modello femm, prove sperimentali) si riportano nelle immagini seguenti gli andamenti dei fattori di schermatura sullo stesso grafico per le 4 direzioni individuate.

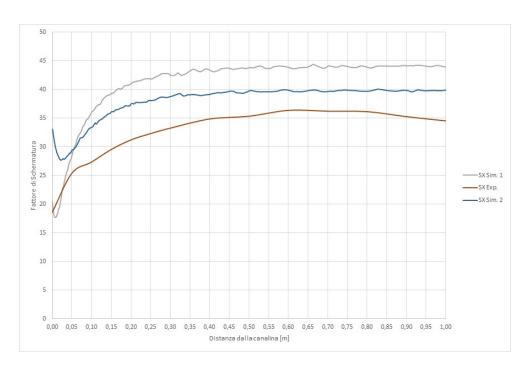


Figura 4.11: Andamento del fattore di schermatura nelle 3 situazioni considerate sulla *sinistra* della canalina

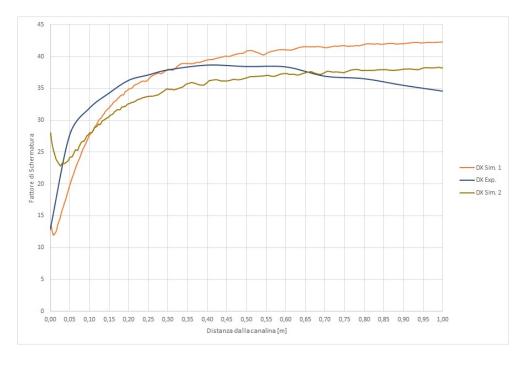


Figura 4.12: Andamento del fattore di schermatura nelle 3 situazioni considerate sulla destra della canalina

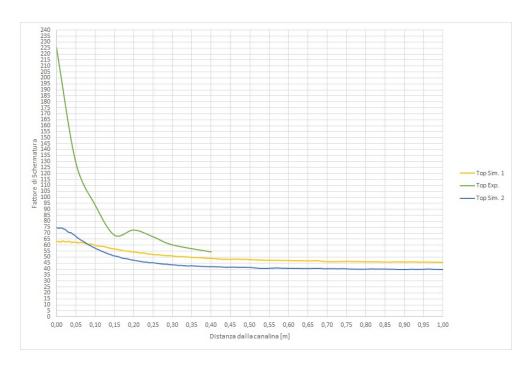


Figura 4.13: Andamento del fattore di schermatura nelle 3 situazioni considerate sulla parte superiore della canalina

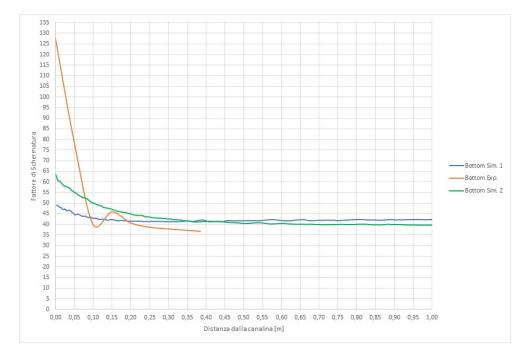


Figura 4.14: Andamento del fattore di schermatura nelle 3 situazioni considerate sulla parte inferiore della canalina

Tra le due simulazioni effettuate si riscontrato alcune differenze nei valori di schermatura ottenuti, anche se non negli andamenti. In generale, si può affermare con buona approssimazione che la modifica effettuata per riportarsi dalla situazione "standard" a un caso più simile a quello reale non è stata così rilevante, segno che la canalina "standard" costituisce già un buon modello.

I fattori di schermatura misurati e simulati sulla destra e sulla sinistra della canalina mostrano gli stessi andamenti, seppur con valori non sovrapponibili, ma dello stesso ordine di grandezza. Le differenze maggiori si sono invece riscontrate nei fattori di schermatura simulati e misurati sulla parte superiore e sulla parte inferiore della canalina. I dati sperimentali mostrano infatti valori che sono quasi più del doppio nei primi 10-15 cm, rispetto a quelli simulati. Gli andamenti ottenuti dalle prove sperimentali mostrano inoltre un'oscillazione, probabilmente dovuta all'effetto ai bordi della canalina, riscontrabile sempre tra i 10 e 15 cm.

Dalle prove sperimentali si evince quindi che, sebbene esistano delle differenze tra i fattori di schermatura ottenuti dalla simulazione e quelli effettivamente misurati, il modello *femm* risulta essere abbastanza valido. Nella maggior parte dei casi non dovrebbe inoltre essere necessario procedere a una modifica manuale della geometria della canalina "standard", una volta che siano stati inseriti i materiali e gli spessori corretti.

Le differenze riscontrate con le prove sperimentali sono dovute, molto probabilmente, alla non idealità dei materiali che, in fase di lavorazione (per esempio di *piegatura* del lamierino magnetico) possono subire delle modifiche alla loro struttura (come la rottura di alcuni *grani*). Inoltre, occorre considerare che su un canale lungo 9 metri è pressoché impossibile garantire completa uniformità su tutte le sezioni; ciò comporta la presenza, se non di spessori variabili dei materiali (che possono essere tenuti sotto controllo in fase di fabbricazione), sicuramente di traferri e accoppiamenti variabili tra i vari strati della canalina, oltre che tra il vassoio e il coperchio e nelle giunzioni tra più tratti.

Tutte queste differenze, come è possibile notare dai grafici, sono in larga parte concentrate nei primi 20-25 cm di distanza dalla canalina, dove sono quindi più marcati gli effetti locali e le non idealità dei materiali. Oltre tale distanza si ritrovano invece valori e andamenti molto più vicini al caso sperimentale, il che avvalora la validità del nostro modello, tanto

più che in ambito industriale, generalmente, interessa schermare i campi elettromagnetici proprio oltre i 20-25 cm di distanza dalla canalina. Infine, si ricorda che le differenze riscontrate nei fattori di schermatura tra le simulazioni e le prove sperimentali possono anche essere dovuti a una non completa conoscenza della canalina in prova in quanto, come detto, per ragioni di segretezza, non sono stati forniti i valori effettivi degli spessori e delle caratteristiche magnetiche dei materiali costituenti gli strati.

Capitolo 5

Conclusioni e Sviluppi Futuri

Il lavoro di tesi ha messo in evidenza che permangono delle differenze tra le analisi agli elementi finiti che possono essere svolte via software, per quanto accurate, e la realtà fisica, sempre più complicata di qualsiasi modello. Tuttavia, fatte le opportune considerazioni, è possibile ottenere un modello femm che approssimi abbastanza bene l'andamento reale dei campi generato da una linea trifase racchiusa da un canale schermante, per lo meno in situazioni specifiche. Le simulazioni effettuate al PC, anche con l'ausilio del software appositamente creato, hanno mostrato infatti sufficiente accuratezza rispetto alle misure prese nelle varie configurazioni di prova.

Le dissimmetrie che sono emerse nei fattori di schermatura durante le prove effettuate potrebbero in parte essere risolte con maggiore accuratezza co-struttiva della canalina, ma ciò porterebbe inevitabilmente a un incremento del costo di produzione che non sarebbe giustificato nella maggior parte dei casi.

In futuro si potrebbero svolgere delle misure che prendano in considerazione l'andamento dei fattori di schermatura in funzione del livello di riempimento della canalina o del valore di corrente complessiva circolante all'interno dei cavi. Inoltre, si potrebbe condurre un'analisi che studi come si modificano le perdite della linea con l'aggiunta di un canale di schermatura.

Per quanto riguarda il software, uno sviluppo futuro potrebbe integrare la

maschera di inserimento dati, lo script in LUA e l'analisi in femm in un unico software installabile.

Lo script in LUA potrebbe inoltre essere ampliato per prendere in considerazione una maggiore casistica.

Ringraziamenti

Ringrazio di cuore il Prof. Aldo Canova, relatore di questo progetto di tesi, oltreché volto amico all'interno del Politecnico. Grazie per l'entusiasmo e la passione che ha saputo trasmettermi in questi anni di studio, è stato un supporto prezioso.

Grazie al Prof. Luca Giaccone, co-relatore, per il tempo speso a insegnarmi a programmare in linguaggi di cui avevo scarsa conoscenza.

Grazie a Sergio Buriano e Sergio Grasso del Gruppo Carpaneto Sati per l'aiuto e la disponibilità che mi hanno fornito durante le prove in azienda. Un grazie sincero alla mia famiglia, ai miei amici e a Ilaria. Non c'è bisogno che vi spieghi il motivo; questa laurea è in parte anche vostra.

Last but not least, un grazie sincero ai miei compagni di corso e amici più stretti di questi anni "elettrici". In rappresentanza cito (in ordine alfabetico): Marco Cascino, Giacomo Del Bianco, Gaetano Dilevrano, Omar El Moghazy, Andrea Griffone, Andrea Nicastro, Matteo Notarnicola, Luca Roggio e Lorenzo Solida. Se tornassi indietro, rifarei Ingegneria Elettrica per conoscervi di nuovo.

Sitografia

 $\label{lem:energy} Effetti \ dei \ campi \ elettromagnetici: \ http://www.satishielding.it/schermatura-elettromagnetica/effetti-dei-campi-elettromagnetici-sugli-esseri-umani/$

 $\label{lem:matura:http://www.satishielding.it/schermatura-elettromagnetica/i-materiali/} \\ Materiali per la schermatura: http://www.satishielding.it/schermatura-elettromagnetica/i-materiali/$

Questa tesi è stata scritta in LATEX utilizzando l'editor TeXstudio e il gestore di pacchetti MiKTeX su sistema $GNU/Linux\ Ubuntu\ 18.04\ LTS$