



Modellazione e validazione di componenti magnetici tramite l'utilizzo di simulatori multifisici e misure di laboratorio per la prototipazione rapida

Modeling and validation of magnetic components through the use of multiphysics simulators and laboratory measurements for rapid prototyping

Relatore:
Prof. Freddi Alessandro
Correlatore:
Ing. Pirro Matteo

Laureando:
Wafa Mohammad

Dicembre 2023

Ringraziamenti

Desidero esprimere la mia profonda gratitudine a tutte le persone che hanno contribuito al completamento di questa tesi, rendendo possibile la realizzazione di questo importante traguardo nella mia formazione. Innanzitutto, desidero ringraziare il mio supervisore, il Prof. Freddi Alessandro, per la sua guida, il suo sostegno e la sua preziosa competenza che hanno illuminato il percorso di ricerca. I suoi consigli saggi e la sua pazienza infinita hanno giocato un ruolo determinante nel plasmare il mio lavoro. Vorrei inoltre ringraziare la mia famiglia per il loro costante sostegno, per aver creduto in me e per essermi stati vicini durante i momenti più impegnativi. Grazie a tutti coloro che hanno contribuito in modo significativo a questo progetto. La vostra generosità e il vostro sostegno resteranno per sempre impressi nella mia memoria.

Sommario

La tesi si propone di esplorare strumenti avanzati per la modellazione e la validazione di componenti magnetici, con un' enfasi particolare sull' utilizzo di simulatori multifisici e misure di laboratorio per la prototipazione rapida. L' obiettivo principale è migliorare la progettazione di componenti magnetici, accelerando il processo di sviluppo e riducendo i costi associati a prove sperimentali onerose.

La tesi è organizzata nei seguenti capitoli: il Capitolo 1 fornirà un' ampia introduzione all' argomento, il Capitolo 2 esaminerà l' aspetto teorico e i concetti fondamentali relativi alla modellazione magnetica, il Capitolo 3 illustrerà le misure di laboratorio per la prototipazione rapida, mentre il Capitolo 4 tratterà l' applicazione dei simulatori multifisici. Il Capitolo 5 presenterà i risultati ottenuti attraverso la modellazione e la validazione sperimentale dei vari modelli studiati, e infine il Capitolo 6 concluderà la tesi con sintesi, conclusioni e indicazioni per ricerche future.

Questa ricerca promuove l' importanza dell' innovazione nella progettazione di componenti magnetici, fondamentali per l' evoluzione delle tecnologie contemporane. Mira a contribuire all' ottimizzazione della progettazione di componenti magnetici e offre un' ampia panoramica delle possibilità e delle sfide legate all' utilizzo di simulatori multifisici e misure di laboratorio per la prototipazione rapida.

Indice

Elenco delle figure	VIII
Elenco dei listati	XI
1 Introduzione	1
1.1 Motivazione e scopo dello Studio	1
1.2 Metodologia	1
2 Aspetto teorico	3
2.1 Fisica dell'induttore	4
2.1.1 Realizzazione fisica	5
2.2 Proprietà caratteristiche dell'induttore	6
2.2.1 Induttanza (L)	6
2.2.2 Legge di Ampere	9
2.2.3 Resistenza di rame (R)	11
2.2.4 Corrente di picco	12
2.2.5 Risonanza	12
2.2.6 Dimensioni fisiche	13
2.2.7 Fattore di qualità (Q)	14
2.2.8 Coefficiente di temperatura	14
2.2.9 Tipo di nucleo	15
2.2.10 Risposta in frequenza	15
2.2.11 Effetto pelle	17
2.3 Trasformatore	18
3 Setup sperimentale	20
3.1 Introduzione	20
3.2 Realizzazione del campione e modello circuitale	20
3.3 Misure in laboratorio	25
3.3.1 Grafico dell'impedenza misurato	26
3.3.2 Risultati misurati sul matlab	29
3.4 Modello teorico	33
3.4.1 Grafico dell'impedenza calcolato	33
3.4.2 Risultati sul matlab	35
3.4.3 Pemeabilità magnetica	37

3.5	Considerazioni	37
4	Setup di simulazione	40
4.1	Introduzione	40
4.2	Nuovo modello	41
4.3	Geometria	44
4.4	Materiali	52
4.5	Campi magnetici	58
4.6	Mesh	68
4.7	Studio	69
4.8	Risultati in matlab	71
5	Confronto dei modelli	74
5.1	Campione preliminare	74
5.1.1	Risultati sperimentali	75
5.1.2	Risultati del modello teorico	76
5.1.3	Risultati del modello simulato	78
5.1.4	Confronto dei risultati	80
5.1.5	Test aggiuntivi	82
5.2	Campione principale	85
5.2.1	Risultati	85
5.2.2	Considerazioni finali	87
6	Conclusioni	92
6.1	Introduzione	92
6.2	Implementazioni future	92
6.3	Conclusione	93
	Riferimenti bibliografici	95

Elenco delle figure

2.1	Tipi di induttori.	4
2.2	Tipi di induttori	5
2.3	Forme di nucleo	5
2.4	Grafico rappresentante i valori di corrente (linea rossa) e tensione (linea blu) ai capi dell'induttanza sottoposta ad una differenza di potenziale (linea verde)	7
3.1	Campione - vista anteriore	21
3.2	Campione - vista posteriore	21
3.3	Specifiche nucleo	23
3.4	Circuito RLC	24
3.5	Schema circuito	25
3.6	Analizzatore di spettro di segnale	26
3.7	Schema circuito	27
3.8	Acquisizione segnale	28
3.9	Grafico segnale	28
3.10	Grafico del segnale misurato visualizzato sul Matlab	30
3.11	Grafico dell'impedenza misurata	32
3.12	Tester da banco	33
3.13	Modello teorico Excel	34
3.14	Modello matematico: input	34
3.15	Grafico impedenza calcolata	36
3.16	Grafico misurato e calcolato con modello teorico	39
4.1	Comsol-Multiphysics	40
4.2	Nuovo modello	41
4.3	Selezione della dimensione	41
4.4	Selezione della fisica	42
4.5	Selezione dello studio	42
4.6	Selezione dello studio	43
4.7	Impostazione geometria	44
4.8	Solidwork - modello del campione in vista frontale	45
4.9	Solidwork - modello del campione in vista posteriore	45
4.10	Importazione modello sul Comsol	46
4.11	Modellazione sfera	47
4.12	Sezioni esplicite	47

4.13	Winding	48
4.14	Core	48
4.15	Gap	49
4.16	Infinite Elements	49
4.17	Nonconducting	50
4.18	Insulating	50
4.19	Conductor Boundaries	51
4.20	Nonconducting without IE	52
4.21	Air	54
4.22	Copper	55
4.23	Ferrite	56
4.24	Kapton	57
4.25	Ampère's Law 1	58
4.26	Ampère's Law 2	59
4.27	Magnetic Insulation 1	60
4.28	Initial Values 1	60
4.29	Impedance Boundary Condition 1	61
4.30	Lumped Port 1	62
4.31	Coil 1	63
4.32	Model B-H	64
4.33	Magnetic Losses	65
4.34	Relative Permeability	66
4.35	Mesh	68
4.36	Grafico impedenza	70
4.37	Grafico impedenza scala log	70
4.38	Export data	71
4.39	Matlab: Grafico impedenza simulata	73
5.1	Campione preliminare	74
5.2	Grafico Vin/Vout del campione preliminare	75
5.3	Impedenza misurata del campione preliminare	76
5.4	Circuito RLC	76
5.5	Parametri input per modello teorico	77
5.6	Grafico Z calcolato del modello di prova campione preliminare	78
5.7	Geometria sul Comsol	79
5.8	Grafico simulato della variazione dell'impedenza	80
5.9	Grafico misurato, calcolato e simulato del campione preliminare	82
5.10	Valori Z_{max} misurata, calcolata e simulata del campione preliminare	82
5.11	Prima acquisizione	84
5.12	Seconda acquisizione	84
5.13	Segnale acquisito al primo test e segnale acquisito al secondo test	84
5.14	Grafico misurato, calcolato e simulato	87
5.15	Valori Z_{max} misurata, calcolata e simulata	87
5.16	Grafico misurato, calcolato e simulato(25Mhz/3Mhz/100Mhz)	88
5.17	Magnetic Flux Density	89
5.18	Magnetic Flux Density Norm Core	90

5.19 Surface Density Current	90
5.20 Volumetric loss density magnetic	91

Elenco dei listati

3.1	Codice Matlab:importazione grafico misurato	29
3.2	Codice Matlab: estrazione impedenza misurata	31
3.3	Codice Matlab:importazione impedenza calcolata	35
3.4	Codice Matlab: impedenza misurata e calcolata con modello teorico	38
4.1	Codice Matlab:importazione impedenza simulata	72
5.1	Codice Matlab:Impedenza misurata, calcolata e simulata	81
5.2	Codice Matlab:Impedenza misurata, calcolata e simulata	86

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Motivazione e scopo dello Studio

Nell'epoca contemporanea, l'innovazione tecnologica ha assunto un ruolo centrale nella trasformazione di settori come l'energia, l'elettronica e la comunicazione. In particolare, il design e l'ottimizzazione di componenti magnetici svolgono un ruolo fondamentale in applicazioni che vanno dall'elettronica di potenza alle macchine elettriche, promuovendo l'efficienza energetica, la riduzione delle perdite e l'incremento delle prestazioni. La crescente domanda di soluzioni sempre più avanzate e sostenibili ha reso essenziale lo sviluppo di metodologie di progettazione e validazione sempre più accurate e rapide.

La presente tesi si concentra sull'approfondimento del campo della progettazione di induttori, attraverso l'applicazione di simulazioni computazionali avanzate. In particolare, si esplorerà il ruolo cruciale svolto da COMSOL Multiphysics nella modellazione e nella validazione degli induttori. Questo strumento offre la possibilità di simulare in modo accurato e dettagliato il comportamento magnetico di tali componenti, consentendo un'ottimizzazione precisa e risparmiando tempo e risorse nell'ambito della progettazione.

Questa ricerca nasce dalla consapevolezza della necessità di affrontare le sfide legate alla progettazione di componenti magnetici in un'ottica di efficienza e sostenibilità. Una ricerca nata in vista di un'ottimizzazione dei tempi di ricerca, della sicurezza aziendale e del personale, e dei costi di spesa di un eventuale progetto.

Lo scopo principale di questa tesi, quindi, è l'esplorazione di strumenti avanzati di modellazione e validazione di componenti magnetici, con un'enfasi particolare sull'utilizzo di simulatori multifisici e misure di laboratorio per la prototipazione rapida.

Questi strumenti e tecniche offrono nuove opportunità per migliorare la progettazione di componenti magnetici, accelerando il processo di sviluppo e riducendo al minimo i costi associati a prove sperimentali dispendiose.

1.2 Metodologia

L'obiettivo principale di questa ricerca è la validazione del modello simulato dell'induttore mediante il confronto con il comportamento dell'induttore reale. Questa validazione si basa

sull'analisi dell'andamento dell'impedenza dell'induttore. Tuttavia, è importante notare che, a causa di variazioni nei fenomeni magnetici reali, non si può aspettare che l'impedenza simulata e impedenza reale siano identiche. Pertanto, sono stati utilizzati calcoli teorici per ottenere un terzo grafico come punto di riferimento.

Dopo aver completato la modellazione dell'induttore sia fisicamente che virtualmente, è stata condotta un'analisi sperimentale utilizzando un analizzatore di spettro e misurato l'andamento dell'impedenza in un determinato intervallo di frequenza sull'induttore reale. Il componente reale è stato studiato e successivamente modellato matematicamente come un circuito RLC. Attraverso calcoli matematici basati su principi teorici, è stato derivato il grafico teorico dell'andamento dell'impedenza.

Per la parte simulata, è stato utilizzato COMSOL Multiphysics, che ci ha permesso di modellare e convalidare l'induttore, prendendo in considerazione una serie di variabili di progettazione, tra cui la geometria, i materiali e le condizioni operative. Questo processo di simulazione ci ha fornito diversi insiemi di risultati, inclusi i grafici dell'impedenza simulata. Successivamente, i dati raccolti sono stati esportati in formato CSV da Excel e successivamente elaborati in Matlab. Quest'analisi ci ha consentito di confrontare i risultati sperimentali, teorici e simulati e di estrarre le conclusioni dalla comparazione tra i grafici. Nei prossimi capitoli verranno esaminate le basi teoriche della modellazione magnetica, con particolare attenzione alle leggi fondamentali che governano il comportamento magnetico dei materiali, seguite da un'analisi accurata delle principali equazioni e concetti relativi alla modellazione. Si procederà quindi con un'introduzione ai simulatori multifisici e alle loro applicazioni nella modellazione magnetica, descrivendo gli strumenti e le tecniche utilizzate per creare il modello multifisico. Sarà dedicata un'attenzione particolare alle misure di laboratorio per la prototipazione rapida, esaminando gli strumenti utilizzati per condurre analisi dei processi di prototipazione rapida. Infine, saranno presentati i risultati ottenuti attraverso la modellazione e le misure di laboratorio, con un confronto tra i dati simulati e quelli sperimentali.

Questa ricerca sottolinea l'importanza dell'innovazione nella progettazione di componenti magnetici, essenziali per l'evoluzione delle tecnologie contemporanee.

Capitolo 2

Aspetto teorico

Nel contesto dell'ingegneria elettrica e dell'elettronica, la progettazione e l'ottimizzazione di componenti magnetici, come gli induttori, rivestono un ruolo di rilevanza fondamentale. L'induttore, noto anche come bobina o avvolgimento, è un dispositivo passivo essenziale utilizzato per accumulare energia in forma di campo magnetico. La sua applicazione spazia da circuiti elettronici di potenza a sistemi di trasmissione wireless, da apparecchiature di comunicazione a motori elettrici.

Questa sezione teorica si propone di fornire una base per la comprensione dei principi fondamentali e delle teorie che sottendono il funzionamento degli induttori e la loro progettazione.

Si sottolinea come la comprensione teorica sia un elemento essenziale nel processo di modellazione e simulazione degli induttori. Questo capitolo fornisce la base concettuale necessaria per l'applicazione pratica di simulatori multifisici e lo studio dettagliato delle caratteristiche di impedenza dell'induttore.

Nel perseguire gli obiettivi di questa ricerca, l'approfondimento dei principi teorici riveste un ruolo cruciale per garantire un approccio metodologico rigoroso e informazioni preziose per la progettazione, la validazione e l'ottimizzazione degli induttori.

2.1 Fisica dell'induttore

Gli induttori sono componenti elettrici che rientrano nella vasta categoria dei dispositivi passivi, insieme a resistori e oscillatori. Questi componenti rivestono un ruolo essenziale in dispositivi come trasformatori e motori elettrici, che fanno un ampio uso degli induttori. Il principio chiave alla base del funzionamento degli induttori è la loro capacità di immagazzinare energia elettrica in un campo magnetico. Questa caratteristica li rende strumentali nell'elettronica, inclusi circuiti elettrici e strumenti di misura.

Un tratto distintivo degli induttori è la loro capacità di agire come filtri elettronici, simile a quanto fanno i condensatori. Questa caratteristica li rende preziosi nel campo delle telecomunicazioni e nella riduzione delle interferenze nell'audio.

Un induttore è un componente elettrico costituito da un filamento di materiale conduttore, spesso rame, avvolto elicoidalmente. Fisicamente, può assumere la forma di una bobina solenoide o, nel caso dell'induttore toroidale, di una struttura ad anello. La seguente figura presa dalla pagina *Componenti passivi induttori* (www.elettronicamaker) rappresenta alcuni tipi di induttori:

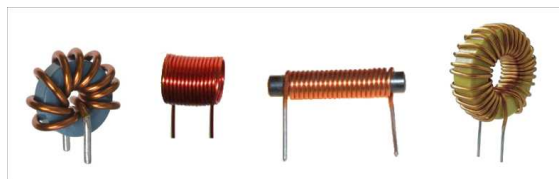


Figura 2.1: Tipi di induttori.

Il materiale conduttore viene attraversato da una corrente e genera un campo magnetico fino a raggiungere il punto di saturazione magnetica, ovvero il massimo campo magnetico che può essere prodotto dall'induttore in base alle sue caratteristiche fisiche. Queste caratteristiche fisiche dipendono da vari fattori, tra cui il numero di avvolgimenti, la distanza tra gli avvolgimenti e lo spessore del materiale conduttore.

Il termine "**induttore**" deriva dall'induttanza (L), una proprietà elettrica che si manifesta come la tendenza a opporsi alle variazioni di corrente. L'induttanza è definita come il rapporto tra la tensione (V) e la velocità di variazione della corrente (di/dt). Nel Sistema Internazionale, l'unità di misura dell'induttanza è l'Henry (H).

Sul mercato, gli induttori sono comunemente disponibili con valori espressi in micro Henry (μH) e partono da $1 \mu H$.

Gli induttori sono particolarmente utili quando è necessario attenuare le interferenze elettromagnetiche. La progettazione di diversi modelli di induttori si concentra sull'ottimizzazione del controllo del flusso magnetico e sulle capacità di gestione del magnetismo. Questi componenti sono impiegati quando è necessario gestire con precisione i picchi di corrente o rilasciare gradualmente l'energia accumulata nel circuito.

2.1.1 Realizzazione fisica

Un induttore è principalmente costituito da un avvolgimento di materiale conduttivo, in genere un filo di rame, che è rivestito da una sottile pellicola isolante. Nella pratica, è possibile rappresentare un induttore come un solenoide, ovvero una bobina di filo avvolta su un supporto. La seguente figura presa dalla pagina *Componenti passivi induttori* (www.elettronicamaker) rappresenta altri tipi di induttori:

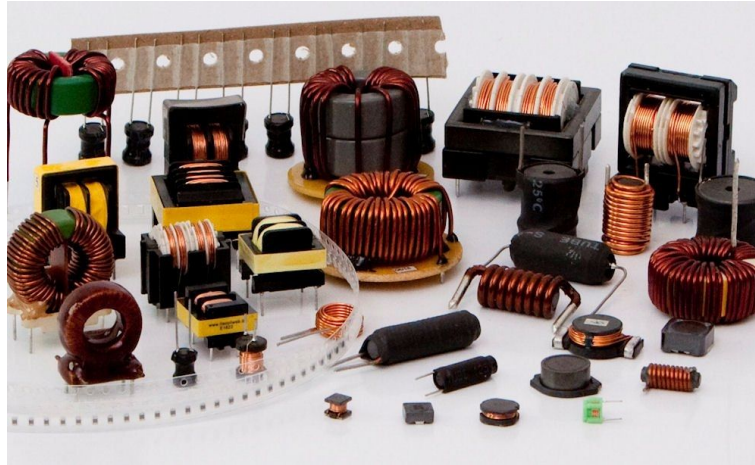


Figura 2.2: Tipi di induttori

Per aumentare la capacità di induttanza, spesso si avvolge il filo su un nucleo composto da materiale con elevata permeabilità magnetica, come ad esempio le ferriti. Questo nucleo contribuisce a migliorare l'efficienza dell'induttore nell'accumulare energia magnetica. La seguente figura ricavata dalla pagina di *Wikipedia* [8] rappresenta alcune forme di nucleo:



Figura 2.3: Forme di nucleo

Nei circuiti integrati, è possibile trovare induttori in miniatura, ma questa pratica è relativamente rara. Per ragioni pratiche, spesso si preferisce utilizzare un componente chiamato "giratore" nei circuiti integrati, il quale sfrutta un condensatore per simulare il comportamento di un induttore. In alcune situazioni, per frequenze estremamente elevate, vengono creati piccoli induttori utilizzando un semplice filo che attraversa un cilindro o una perlina (piccolo anello) di ferrite. Questi componenti consentono di ottenere gli effetti dell'induttanza anche a frequenze molto alte.

2.2 Proprietà caratteristiche dell'induttore

Gli induttori sono componenti elettrici passivi che sono progettati per accumulare energia in forma di campo magnetico quando attraversati da una corrente elettrica. Le proprietà caratteristiche degli induttori sono di seguito riportate:

2.2.1 Induttanza (L)

Una corrente elettrica i che scorre in un circuito elettrico produce un campo magnetico nello spazio circostante: se la corrente varia nel tempo, il flusso magnetico Φ_B del campo concatenato al circuito risulta variabile, determinando entro il circuito una forza elettromotrice indotta che si oppone alla variazione del flusso. Il coefficiente di autoinduzione L di un circuito, ad esempio una spira, è il rapporto tra il flusso del campo magnetico autoconcatenato, detto autoflusso, e la corrente, ed è dato da:

$$L = \frac{\Phi_B}{i} \quad (2.1)$$

Dove:

1. L è l'induttanza in henry (H).
2. Φ_B è il flusso del campo magnetico.
3. i è la corrente.

L'equazione che definisce l'induttanza può essere riscritta in questo modo:

$$\Phi_B = Li \quad (2.2)$$

Derivando entrambi i membri rispetto al tempo:

$$\frac{d\Phi_B}{dt} = L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dt} \quad (2.3)$$

In molti casi fisici l'induttanza può essere considerata costante rispetto al tempo (o tempo-invariante), per cui:

$$\frac{d\Phi_B}{dt} = L \frac{di}{dt} \quad (2.4)$$

Dalla legge di Faraday, applicata alla circuitazione del circuito che include l'induttanza, si ottiene il seguente risultato:

$$-\frac{d\Phi_B}{dt} = \mathcal{E} = V \quad (2.5)$$

dove \mathcal{E} è la forza elettromotrice (f.e.m.) e V è il potenziale indotto ai morsetti del circuito in questione. Combinando le equazioni precedenti si ha:

$$-L \frac{di(t)}{dt} = \mathcal{E} = V(t) \quad (2.6)$$

Da ciò emerge che l'induttanza (L) di un componente attraversato da una corrente variabile può essere definita operativamente come il reciproco del rapporto tra la forza elettromotrice (f.e.m.) autoindotta e generata ai morsetti del componente e la derivata rispetto al tempo della corrente $\frac{di(t)}{dt}$ che lo attraversa.

Legge di Lenz:

$$\frac{d\Phi_B}{dt} = -\mathcal{E} = V \quad (2.7)$$

L'origine del segno meno è una conseguenza della legge di Lenz che applicata a un induttore afferma in sostanza che la f.e.m. autoindotta ai capi di un componente si oppone alla variazione di corrente che lo attraversa. Per questo motivo l'induttanza è definita positiva. L'energia immagazzinata in un solenoide può essere espressa per mezzo della sua induttanza caratteristica L e della corrente i che scorre nelle sue spire.

La relazione è:

$$W = \frac{1}{2} Li^2 \quad (2.8)$$

dove W è l'energia immagazzinata.

La legge di Ohm esprime la relazione fra la tensione e una corrente stazionaria, mentre quella di Faraday il legame fra tensione e una corrente elettrica variabile.

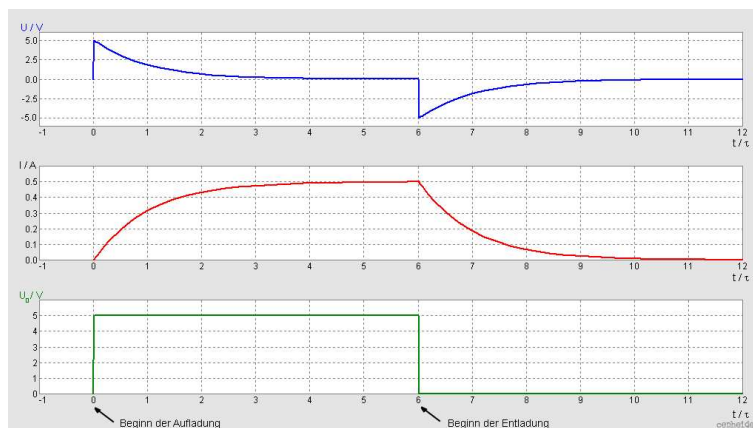


Figura 2.4: Grafico rappresentante i valori di corrente (linea rossa) e tensione (linea blu) ai capi dell'induttanza sottoposta ad una differenza di potenziale (linea verde)

In termini circuitali, l'induttore è un componente passivo in cui l'aspetto induttivo prevale su quello capacitivo e su quello resistivo. Esso è generalmente costituito dall'avvolgimento di un filo conduttore intorno ad un nucleo di materiale magnetico (ferrite). La relazione costitutiva di un induttore di induttanza L è la stessa riportata sopra. Se un'impedenza di tipo puramente induttivo viene attraversata da una corrente sinusoidale del tipo:

$$i(t) = I_M \cos(\omega t + \phi_o) \quad (2.9)$$

dove I_M è il valore di corrente massimo, ω è la pulsazione angolare della sinusoide e ϕ_o è la fase della corrente, la tensione che comparirà sul ramo dell'impedenza sarà:

$$v(t) = L \frac{di(t)}{dt} = -L\omega I_M \sin(\omega t + \phi_o) = L\omega I_M \cos(\omega t + \phi_o + \frac{\pi}{2}). \quad (2.10)$$

L'induttanza quindi rappresenta la capacità dell'induttore di accumulare energia nel suo campo magnetico quando attraversato da una corrente. Maggiore è l'induttanza, maggiore è l'energia immagazzinata. Attraverso le componenti fisiche dei materiali che compongono l'induttore è possibile calcolare l'induttanza. L'induttanza di un induttore è direttamente proporzionale al numero di avvolgimenti (n) di filo nel suo avvolgimento, all'area della sezione trasversale dell'induttore (A), e al materiale utilizzato per il nucleo magnetico (se presente). La formula matematica che lega l'induttanza a questi parametri è:

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r n^2 A}{l} \quad (2.11)$$

Dove:

1. L è l'induttanza in henry (H).
2. μ_0 è la permeabilità del vuoto, una costante fisica (circa $4\pi \times 10^{-7}$ H/m).
3. μ_r è la permeabilità relativa del materiale del nucleo (1 per l'aria, diversa da 1 per altri materiali).
4. n è il numero di avvolgimenti di filo.
5. A è l'area della sezione trasversale dell'induttore.
6. l è la lunghezza media del percorso del campo magnetico nel nucleo (se presente).

Nel caso di un'impedenza completamente induttiva, le onde sinusoidali di tensione e corrente risultano sfasate di 90 gradi, con la tensione in anticipo sulla corrente di 90 gradi. Nella notazione dei fasori, le espressioni per corrente e tensione diventano:

$$\mathbf{I} = I_M e^{j(\omega t + \phi_o)} \quad (2.12)$$

e

$$\mathbf{V} = \omega L I_M e^{j(\omega t + \phi_o)} e^{j\frac{\pi}{2}} = j\omega L I_M e^{j(\omega t + \phi_o)} \quad (2.13)$$

Dalla legge di Ohm delle impedenze:

$$\mathbf{Z} = \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{I}} \quad (2.14)$$

si ha che l'impedenza di un induttore puro è:

$$\mathbf{Z} = j\omega L \hat{i} \quad (2.15)$$

L'impedenza è una grandezza elettrica che misura l'opposizione di un elemento o di un circuito al passaggio di una corrente alternata (CA). L'impedenza è una combinazione di resistenza e reattanza e tiene conto di come un componente o un circuito reagisce a segnali alternati a diverse frequenze, ed è espressa in ohm (Ω).

Rappresentata da un numero complesso, il che significa che ha una parte reale (resistenza) e una parte immaginaria (reattanza). La parte reale rappresenta l'opposizione alla corrente causata dalla resistenza elettrica, mentre la parte immaginaria rappresenta l'opposizione dovuta alla reattanza, che può essere induttiva (X_L) o capacitiva (X_C). La reattanza è legata alla frequenza del segnale CA. La formula generale per calcolare l'impedenza (Z) in un circuito CA è:

$$Z = R + jX \quad (2.16)$$

dove:

1. Z è l'impedenza.
2. R è la resistenza.
3. X è la reattanza (X_L per reattanza induttiva e X_C per reattanza capacitiva).
4. j è l'unità immaginaria

L'impedenza è un concetto fondamentale nei circuiti CA ed è utilizzata in una varietà di applicazioni, tra cui filtri, circuiti di sintonia, trasformatori, circuiti audio e molti altri. La conoscenza dell'impedenza di un componente o di un circuito è essenziale per garantire che il circuito funzioni correttamente e che la potenza sia trasferita in modo efficiente a diverse frequenze.

2.2.2 Legge di Ampere

La legge di Ampère è una delle equazioni fondamentali dell'elettromagnetismo, che descrive il comportamento dei campi magnetici generati da correnti elettriche. È stata formulata da André-Marie Ampère, un fisico francese del XIX secolo. La legge di Ampère afferma che la circuitazione del campo magnetico lungo una curva chiusa è proporzionale alla corrente totale che attraversa la superficie racchiusa dalla curva. La legge di Ampère può essere formulata sia utilizzando il campo magnetico nel vuoto (\mathbf{B}), che è il modo più comune, sia utilizzando il campo magnetico nei materiali (\mathbf{H}), nel secondo caso, gli effetti di polarizzazione magnetica sono inclusi nella definizione di \mathbf{H} , dove \mathbf{H} è uguale a \mathbf{B} diviso per la permeabilità magnetica del vuoto (μ_0) meno la magnetizzazione (\mathbf{M}). La corrente che genera il campo magnetico è composta solo dalle correnti "libere", mentre nel primo caso è necessario considerare esplicitamente anche le correnti di polarizzazione. La legge

afferma che l'integrale lungo una linea chiusa ∂S del campo magnetico \mathbf{B} è uguale alla somma algebrica delle correnti elettriche I_i concatenate a ∂S moltiplicate per la costante di permeabilità magnetica del vuoto μ_0 .

$$\oint_{\partial S} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{r} = \mu_0 \sum_i I_i = \mu_0 I \quad (2.17)$$

In termini della corrente I' relativa a H si ha:

$$\oint_{\partial S} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{r} = I' \quad (2.18)$$

Le correnti concatenate devono essere prese col segno positivo o negativo a seconda che vedano circolare attorno a sé la linea rispettivamente in senso antiorario o orario. Se la concatenazione di una corrente è multipla, la somma dovrà considerare ogni concatenazione. Poiché la corrente netta che passa attraverso le superfici S delimitate dalla curva chiusa ∂S è il flusso di una densità di corrente elettrica \mathbf{J} , in cui $\mathbf{J} = \rho \mathbf{v}$, con \mathbf{v} che rappresenta la velocità delle cariche che compongono la corrente e ρ la loro densità volumica, la legge di Ampère può essere scritta come segue:

$$\oint_{\partial S} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{r} = \mu_0 \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = \mu_0 I \quad \oint_{\partial S} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{r} = \int_S \mathbf{J}' \cdot d\mathbf{S} = I' \quad (2.19)$$

La relazione stabilisce il legame tra le correnti elettriche e il campo magnetico da esse generato nel caso stazionario. Il fatto che questo integrale non sia nullo implica, per definizione, che il campo magnetico non è un campo conservativo, a differenza del campo elettrico statico o del campo gravitazionale. Utilizzando il teorema del rotore:

$$\oint_{\partial S} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{r} = \int_S \nabla \times \mathbf{H} \cdot d\mathbf{S} = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} \quad (2.20)$$

eguagliando gli integrandi si ottiene la forma locale della legge di Ampère:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (2.21)$$

che costituisce la quarta equazione di Maxwell nel caso stazionario.

La relazione $\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}$ vale solamente nel caso stazionario, come dimostrato applicando la divergenza a entrambi i membri. Per il primo membro, si ha $\nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{B}) = 0$, il che implica che anche $\nabla \cdot \mathbf{J}$ deve essere nullo. Tuttavia, l'equazione di continuità per la corrente elettrica:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (2.22)$$

dove ρ rappresenta la densità di carica e \mathbf{J} è la densità di corrente, deve essere soddisfatta affinché la conservazione della carica sia rispettata. Questo significa che la divergenza di \mathbf{J} può non essere nulla in presenza di variazioni nel tempo della densità di carica.

L'equazione di continuità impone che $\nabla \cdot \mathbf{J}$ sia nulla solo quando $\partial \rho / \partial t = 0$, cioè solo nel caso stazionario.

Questa equazione mostra il legame tra la densità di corrente \mathbf{J} , la densità di carica ρ , e la variazione nel tempo del campo elettrico \mathbf{E} . Indica che un campo elettrico variabile nel tempo può generare un campo magnetico attraverso il termine $\partial(\rho/\epsilon_0)/\partial t$. Questo

fenomeno è uno degli aspetti cruciali dell'elettromagnetismo e dimostra come le variazioni nei campi elettrici siano associate a variazioni nei campi magnetici, come previsto dalle equazioni di Maxwell.

$$0 = \nabla \cdot \mathbf{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = \nabla \cdot (\mathbf{J} + \mathbf{J}_s) \quad (2.23)$$

dove il termine:

$$\mathbf{J}_s = \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (2.24)$$

viene chiamata densità di corrente di spostamento, e si somma alla densità di corrente nel caso non stazionario.

Inserendo la densità di corrente generalizzata così ottenuta nella legge di Ampère:

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \left(\mathbf{J} + \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right) \quad (2.25)$$

Questa equazione rappresenta la legge di Ampère generalizzata per il caso non stazionario e tiene conto delle correnti conduttive e della corrente di spostamento associata alle variazioni nel tempo del campo elettrico. È un concetto importante nella teoria dell'elettromagnetismo e mostra come le variazioni nei campi elettrici siano legate all'induzione di campi magnetici, il che è alla base di molte applicazioni e dispositivi elettrici ed elettronici.

In questo modo, è confermata anche la proprietà secondo cui la divergenza del rotore di qualsiasi campo vettoriale derivabile due volte è sempre nulla, in conformità con quanto affermato dal teorema del flusso per il campo magnetico. L'equazione di Maxwell diventa così più generale poiché tiene in considerazione non solo la corrente elettrica come sorgente del campo magnetico, rappresentata dalla densità di corrente \mathbf{J} , ma anche la variazione del campo elettrico nel tempo, rappresentata dal termine contenente la derivata del campo elettrico rispetto al tempo.

Nel caso in cui non ci si trovi più nel vuoto, la legge di Ampère-Maxwell assume una forma più generale:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.26)$$

2.2.3 Resistenza di rame (R)

La resistenza di rame è la resistenza interna di un induttore dovuta al filo di rame (o di un altro materiale conduttore) utilizzato per avvolgere il componente. Poiché il rame ha una resistività specifica, cioè una resistenza intrinseca al passaggio della corrente, questa resistenza può influenzare le prestazioni dell'induttore in diversi modi:

1. **Dissipazione di energia:** la resistenza del filo di rame fa sì che una parte dell'energia elettrica dissipata sotto forma di calore mentre attraversa l'induttore. Questa dissipazione di energia è spesso indesiderata, soprattutto in applicazioni ad alta frequenza, in cui il riscaldamento può compromettere le prestazioni del componente.
2. **Perdita di efficienza:** la resistenza di rame può causare perdite di efficienza negli induttori. In particolare, se l'induttore è utilizzato in un'applicazione in cui la dissipazione di energia è critica, come un filtro o un componente di risonanza, la resistenza può ridurre l'efficacia complessiva del circuito.

3. **Calcolo dell'impedenza:** la resistenza di rame è un componente della reattanza ohmica (resistiva) dell'impedenza totale di un induttore in un circuito CA. L'impedenza totale di un induttore in un circuito CA è data dalla radice quadrata della somma dei quadrati della reattanza induttiva (X_L) e della reattanza ohmica (R), secondo la formula $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$.
4. **Riscaldamento:** in applicazioni ad alta potenza, l'aumento di temperatura dovuto alla resistenza di rame può portare a problemi di riscaldamento e alla necessità di raffreddamento aggiuntivo.

Per ridurre l'effetto della resistenza di rame, è possibile utilizzare fili più spessi o materiali conduttori con una resistività inferiore. Inoltre, alcuni induttori possono avere una struttura avvolta a spirale per ridurre la lunghezza complessiva del filo di rame, riducendo così la resistenza.

La resistenza di rame è un aspetto importante da considerare quando si progetta un circuito che coinvolge induttori, specialmente se si mira a ottenere alte prestazioni e a minimizzare le perdite di energia.

2.2.4 Corrente di picco

La "corrente di picco" in un induttore si riferisce al valore massimo di corrente che l'induttore può sopportare senza subire la saturazione del nucleo magnetico, se presente. La saturazione si verifica quando il nucleo magnetico dell'induttore diventa completamente magnetizzato, limitando ulteriormente la capacità dell'induttore di accumulare energia sotto forma di campo magnetico. Questo fenomeno è particolarmente rilevante negli induttori che incorporano un nucleo magnetico, come induttori toroidali o bobine con nucleo ferrite. Quando la corrente di picco supera il valore massimo specificato per l'induttore, il nucleo magnetico può saturare, provocando una riduzione significativa dell'induttanza e un comportamento non lineare. Ciò può influire negativamente sulle prestazioni del circuito in cui è utilizzato l'induttore.

È importante selezionare un induttore con una corrente di picco adeguata per l'applicazione specifica. La corrente di picco deve essere scelta in modo che l'induttore possa gestire le condizioni di sovraccarico previste senza saturare il nucleo.

In alcuni circuiti, soprattutto in applicazioni di commutazione ad alta frequenza, possono verificarsi sovraccarichi temporanei durante la commutazione o il transitorio. L'induttore deve essere dimensionato per gestire questi picchi di corrente.

2.2.5 Risonanza

La "risonanza" in un induttore è una proprietà che si verifica quando la sua reattanza induttiva (X_L) è uguale in valore e opposta in fase alla reattanza capacitiva (X_C) di altri componenti del circuito, come i condensatori. La risonanza è un concetto chiave in teoria dei circuiti elettrici e può influenzare notevolmente il comportamento del circuito.

La risonanza si verifica a una frequenza specifica del segnale alternato (AC) in cui la reattanza induttiva (X_L) e la reattanza capacitiva (X_C) sono uguali in valore assoluto, ma opposte in fase. A questa frequenza, la reattanza induttiva e la reattanza capacitiva si annullano reciprocamente nell'impedenza totale del circuito, risultando in un'impedenza

totale minima.

Quando un induttore è coinvolto in un circuito risonante, la sua reattanza induttiva (X_L) può annullarsi in parte o completamente a causa della reattanza capacitiva (X_C) presente. Ciò significa che, a questa frequenza specifica di risonanza, l'induttanza può apparire come se avesse una bassa impedenza o come se offrisse una minima resistenza al flusso di corrente. La frequenza di risonanza può essere controllata variando il valore di componenti come induttori e condensatori all'interno del circuito. In questo modo, è possibile progettare circuiti risonanti per funzionare a frequenze specifiche desiderate.

2.2.6 Dimensioni fisiche

Le dimensioni fisiche di un induttore sono uno degli aspetti importanti da considerare nel suo design e nella sua applicazione. Ecco alcuni punti chiave relativi alla dimensione fisica degli induttori:

1. **Numero di avvolgimenti:** il numero di avvolgimenti di filo sul nucleo di un induttore è una delle dimensioni fisiche più influenti sulla sua induttanza. Maggiore è il numero di avvolgimenti, maggiore sarà l'induttanza dell'induttore. Tuttavia, un numero eccessivo di avvolgimenti può aumentare la resistenza interna e l'auto-induzione dell'induttore.
2. **Lunghezza del filo:** la lunghezza del filo utilizzato per avvolgere l'induttore influisce direttamente sulla sua resistenza interna e sulla dissipazione di energia sotto forma di calore. Avvolgere un filo più lungo aumenterà la resistenza e potrebbe richiedere un aumento delle dimensioni fisiche dell'induttore.
3. **Diametro dell'induttore:** il diametro dell'induttore può influenzare le dimensioni fisiche generali. Gli induttori più grandi possono gestire correnti più elevate, ma possono essere ingombranti. Gli induttori più piccoli, d'altra parte, occupano meno spazio, ma possono avere limitazioni di corrente.
4. **Spazio tra gli avvolgimenti:** lo spazio tra gli avvolgimenti dell'induttore è importante per evitare cortocircuiti tra i fili. Questo spazio è considerato nella dimensione fisica totale dell'induttore.
5. **Materiale del nucleo:** se l'induttore ha un nucleo magnetico, il tipo di materiale utilizzato per il nucleo influisce sulla dimensione fisica e sulle prestazioni dell'induttore. Materiali diversi, come ferrite, ferro dolce o aria, influiscono sull'induttanza, sulla saturazione e sulla reattanza.
6. **Fattore di forma:** il fattore di forma di un induttore, ossia la geometria e dimensione, sono un aspetto importante. Gli induttori possono essere progettati in diverse forme, come induttori toroidali, induttori a nastro, induttori cilindrici, ecc. La scelta della forma può influenzare l'efficienza, l'occupazione di spazio e le interazioni con componenti circostanti.
7. **Accuratezza delle dimensioni:** la precisione nella fabbricazione degli induttori è fondamentale per garantire che le dimensioni fisiche siano conformi alle specifiche di progettazione. Anomalie nelle dimensioni fisiche potrebbero influenzare negativamente le prestazioni dell'induttore.

La scelta delle dimensioni fisiche adeguate dipende dalle specifiche dell'applicazione e dal compromesso tra prestazioni desiderate e spazio disponibile.

2.2.7 Fattore di qualità (Q)

Il fattore di qualità, indicato con la lettera Q, è una misura della capacità di un componente o di un circuito di conservare energia in rapporto alle perdite. Nel contesto degli induttori, il fattore di qualità è un parametro che riflette l'efficienza dell'induttore nel conservare l'energia immagazzinata nel suo campo magnetico e nel ridurre le perdite di energia sotto forma di calore.

Il fattore di qualità è definito come il rapporto tra l'energia immagazzinata nell'induttore e l'energia persa sotto forma di calore nelle perdite. La formula per calcolare il fattore di qualità di un induttore è la seguente:

$$Q = \frac{2\pi fL}{R} \quad (2.27)$$

Dove:

1. Q è il fattore di qualità.
2. f è la frequenza del segnale applicato.
3. L è l'induttanza dell'induttore.
4. R è la resistenza interna dell'induttore.

Un alto valore di Q indica che l'induttore conserva efficacemente l'energia immagazzinata nel suo campo magnetico e che le perdite di energia sono basse. In altre parole, l'induttore ha una buona efficienza. Un valore basso di Q, al contrario, indica che le perdite di energia sono significative rispetto all'energia immagazzinata, e quindi l'induttore ha una bassa efficienza.

Per ottimizzare il fattore di qualità in un circuito, è necessario selezionare con cura l'induttore in base alle specifiche dell'applicazione. Ciò può comportare la scelta di induttori di alta qualità con una bassa resistenza interna e una reattanza induttiva ottimale.

2.2.8 Coefficiente di temperatura

Il coefficiente di temperatura, spesso indicato con il simbolo α (alfa), è una misura della variazione dell'induttanza di un induttore al variare della temperatura. Indica quanto l'induttanza cambia per ogni grado Celsius o Kelvin di variazione di temperatura.

Gli induttori possono subire variazioni dell'induttanza a causa della variazione della temperatura ambiente. Questo effetto è noto come "comportamento termico" dell'induttore.

Il coefficiente di temperatura può essere positivo o negativo. Un coefficiente di temperatura positivo indica che l'induttanza aumenta con l'aumento della temperatura, mentre un coefficiente di temperatura negativo indica che l'induttanza diminuisce al crescere della temperatura.

In alcune applicazioni, è importante selezionare induttori con un coefficiente di temperatura specifico per garantire che le prestazioni rimangano stabili in un determinato intervallo di temperatura. Ad esempio, in applicazioni industriali o aerospaziali, è fondamentale

che gli induttori mantengano le loro specifiche prestazioni in ambienti con variazioni di temperatura significative.

2.2.9 Tipo di nucleo

Il "tipo di nucleo" in un induttore si riferisce al materiale utilizzato per costituire il nucleo magnetico interno dell'induttore. Il tipo di nucleo può influenzare notevolmente le prestazioni e le caratteristiche dell'induttore. Ecco alcune considerazioni chiave riguardanti il tipo di nucleo negli induttori:

1. **Ferrite:** i nuclei magnetici in ferrite sono tra i più comuni nei circuiti elettronici. Questi nuclei sono realizzati con materiali ceramici a base di ferrite che presentano una elevata permeabilità magnetica a frequenze relativamente basse. Gli induttori con nuclei di ferrite sono ampiamente utilizzati in applicazioni quali trasformatori, induttori di filtro e induttori di commutazione. Possono operare a frequenze molto elevate e offrono una buona efficienza di conversione energetica.
2. **Ferro dolce (Ferro):** i nuclei magnetici in ferro dolce, spesso semplicemente chiamati "ferro", sono costituiti da materiale ferromagnetico. Questi nuclei presentano una permeabilità magnetica molto elevata, il che significa che hanno una maggiore capacità di accumulare energia magnetica rispetto ad altri materiali. Sono spesso utilizzati in applicazioni a bassa frequenza, come trasformatori di potenza.
3. **Polvere di ferro:** gli induttori con nuclei in polvere di ferro sono realizzati utilizzando materiali di ferro finemente divisi e legati. Questi nuclei possono essere utilizzati in una varietà di applicazioni e possono combinare alcune delle caratteristiche delle ferrite e del ferro dolce. Sono spesso utilizzati in applicazioni come filtri e induttori di commutazione.
4. **Nuclei a polvere:** altri tipi di nuclei magnetici possono essere realizzati utilizzando materiali ceramici a base di polvere di ferro, metallo polverizzato, o leghe magnetiche amorfe. Questi nuclei sono utilizzati in applicazioni specializzate e possono offrire prestazioni specifiche a diverse frequenze e condizioni ambientali.
5. **Nucleo d'aria:** alcuni induttori non utilizzano alcun nucleo interno e si basano semplicemente sull'avvolgimento di filo intorno a un vuoto o all'aria. Questi sono noti come "induttori ad aria" e sono utilizzati in applicazioni in cui è necessaria una reattanza induttiva precisa, ma in cui le perdite dovute al nucleo sono indesiderate.

La scelta del tipo di nucleo dipende dalle specifiche dell'applicazione. È importante selezionare un nucleo che sia adatto alla frequenza, alle condizioni ambientali e alle prestazioni richieste per l'induttore. Il tipo di nucleo può influenzare l'induttanza, la saturazione, la resistenza interna e altre caratteristiche dell'induttore, pertanto è una scelta chiave nella progettazione di circuiti elettronici.

2.2.10 Risposta in frequenza

L'induttore, componente passivo nei circuiti elettronici, accumula energia mediante la creazione di un campo magnetico quando attraversato da una corrente. La sua impedenza, che

rappresenta la resistenza alle variazioni di corrente, costituisce un parametro fondamentale la cui dinamica è influenzata dalla frequenza del segnale applicato. L'impedenza è una misura della resistenza e della reattanza (resistenza al cambiamento) di un circuito in corrente alternata. Si tratta di una grandezza complessa che tiene conto sia della resistenza (\mathbf{R}) che della reattanza induttiva (X_L) o capacitiva (X_C). L'impedenza è espressa come un numero complesso nella forma:

$$Z = R + jX \quad (2.28)$$

Dove R è la parte resistiva e X è la parte reattiva (induttiva o capacitiva) e j è l'unità immaginaria.

L'impedenza (Z) può essere calcolata in diversi modi a seconda del circuito:

- **Resistore:** per un resistore puro, l'impedenza è uguale alla resistenza e la parte reattiva (X) è zero.

$$Z = R \quad (2.29)$$

- **Induttore:** l'impedenza sarà data dalla somma della resistenza dell'induttore e della reattanza induttiva calcolata come il prodotto tra l'induttanza dell'induttore e $2\pi f$, con f la frequenza della corrente alternata.

$$Z_L = R + jX_L \quad (2.30)$$

- **Condensatore:** l'impedenza è data dalla differenza tra la resistenza del condensatore e la reattanza capacitiva, calcolata come il rapporto tra 1 ed il prodotto tra la capacità del condensatore ed $2\pi f$.

$$Z_C = R - jX_C \quad (2.31)$$

- **Circuito RLC:** l'impedenza totale è la somma vettoriale dell'impedenza del resistore (R), dell'induttore (L) e del condensatore (C)

$$Z = R + j(X_L - X_C) \quad (2.32)$$

La formula può essere semplificata nella seguente:

$$\sqrt{R^2 + (X_L^2 - X_C^2)} \quad (2.33)$$

Nel caso di un circuito RLC in serie, l'impedenza totale è la somma delle impedenze individuali dei componenti. In un circuito RLC parallelo, l'impedenza totale è l'inverso della somma degli inversi delle impedenze individuali.

L'impedenza e la frequenza sono strettamente legate nei circuiti in corrente alternata. L'impedenza di un elemento di circuito varia con la frequenza della corrente alternata che lo attraversa. Questa relazione è particolarmente evidente in componenti quali induttori e condensatori, che mostrano una reattanza variabile al cambiare della frequenza.

Nel dettaglio l'impedenza (Z) di un componente di circuito, in particolare per induttori (L) e condensatori (C), varia in funzione della frequenza della corrente alternata.

La formula generale per l'impedenza in funzione della frequenza è espressa come segue:

- **Induttore(L):**

$$Z_L = j\omega L \quad (2.34)$$

- **Condensatore(C):**

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} \quad (2.35)$$

Dove la ω rappresenta la pulsazione angolare, data da:

$$\omega = 2\pi f \quad (2.36)$$

La frequenza della corrente alternata è quindi fondamentale per determinare come l'impedenza totale varierà in risposta a diverse frequenze. Questa relazione è cruciale nella progettazione e nell'analisi dei circuiti in corrente alternata, poiché consente di comprendere come gli elementi del circuito influenzano la risposta del sistema a frequenze specifiche. In queste formule, si nota che l'impedenza di un induttore aumenta linearmente con la frequenza, mentre l'impedenza di un condensatore diminuisce inversamente con la frequenza. Questi comportamenti sono caratteristici degli induttori e dei condensatori nei circuiti in corrente alternata e sono fondamentali per comprendere il modo in cui questi componenti influenzano la risposta del circuito a diverse frequenze.

Per analizzare il comportamento dell'impedenza rispetto alla frequenza, occorre considerare i seguenti casi:

- Basse frequenze, l'induttore (X_L) prevale e l'impedenza è prevalentemente reattiva;
- alte frequenze, il condensatore (X_C) prevale e l'impedenza diventa prevalentemente reattiva in modo opposto rispetto all'induttore;
- La frequenza di risonanza, l'impedenza è principalmente resistiva, e la fase tra tensione e corrente è zero.

Comprendere la dinamica della variazione dell'impedenza totale in funzione della frequenza in un circuito RLC è fondamentale per la progettazione e l'analisi di circuiti in corrente alternata. Questa consapevolezza risulta particolarmente cruciale in contesti applicativi come la progettazione di filtri elettronici e la gestione di reti di trasmissione.

2.2.11 Effetto pelle

L'effetto pelle è un fenomeno elettrico che si verifica quando una corrente alternata attraversa un conduttore. In sostanza, a frequenze più elevate, la corrente tende a distribuirsi in modo non uniforme attraverso la sezione trasversale del conduttore, concentrandosi maggiormente sulla superficie esterna.

Ciò avviene a causa della reazione dei campi magnetici generati dalla corrente stessa. A frequenze più elevate, la variazione del campo magnetico è più rapida, generando correnti indotte che scorrono prevalentemente vicino alla superficie del materiale conduttore. Di conseguenza, lo spessore della zona in cui si concentra la corrente, nota come strato di pelle, diminuisce al crescere della frequenza.

L'effetto pelle è di particolare importanza nei conduttori ad alta frequenza, in quanto può influenzare significativamente la resistenza effettiva del materiale alla corrente e avere impatti rilevanti sulle prestazioni elettriche dei componenti e dei sistemi. La sua comprensione è fondamentale per la progettazione efficiente e affidabile di circuiti e dispositivi ad alta frequenza. L'effetto pelle è influenzato da diversi fattori, tra cui i principali fattori sono:

- **Dipendenza dalla Frequenza:** l'effetto pelle diventa più pronunciato a frequenze più elevate. A basse frequenze, la corrente si distribuisce più uniformemente attraverso il conduttore.
- **Profondità dell'Effetto Pelle:** La profondità del livello in cui si concentra la corrente, nota come profondità dell'effetto pelle, diminuisce con l'aumentare della frequenza. Questa profondità è spesso definita come lo spessore del materiale in cui la corrente scende al 63 % del suo valore massimo.
- **Influenza sulla Resistenza:** a causa dell'effetto pelle, la resistenza efficace del conduttore può essere maggiore rispetto alla resistenza a corrente continua. Questo fenomeno è particolarmente rilevante in applicazioni ad alta frequenza, dove la distribuzione non uniforme della corrente può portare a perdite di potenza significative.
- **Materiali Magnetici:** nei conduttori circondati da materiali magnetici, la permeabilità magnetica di tali materiali può influenzare ulteriormente l'effetto pelle.

Comprendere dettagliatamente l'effetto pelle è essenziale per gli ingegneri elettrici che lavorano su progetti ad alta frequenza, poiché consente di prevedere e mitigare gli impatti negativi sulla progettazione e sulle prestazioni dei circuiti.

2.3 Trasformatore

Il trasformatore è un dispositivo elettrico fondamentale che svolge un ruolo cruciale nella trasmissione efficiente di energia elettrica. Questo componente versatile è ampiamente impiegato in diverse applicazioni, dalla distribuzione di energia elettrica su vasta scala alla regolazione di tensione in apparecchiature elettroniche più piccole. La sua struttura base consiste in due avvolgimenti, noti come avvolgimento primario e avvolgimento secondario, avvolti attorno a un nucleo magnetico.

L'avvolgimento primario è connesso alla sorgente di alimentazione, e quando la corrente attraversa questo avvolgimento, genera un campo magnetico nel nucleo. Questo campo magnetico, a sua volta, induce una tensione nell'avvolgimento secondario, che può essere utilizzata per alimentare un carico. La chiave della versatilità del trasformatore risiede nella sua capacità di modificare il rapporto di avvolgimento tra i due avvolgimenti, consentendo così la trasmissione efficiente di energia con tensioni e correnti adatte alle esigenze specifiche del sistema.

Il nucleo magnetico è spesso realizzato con materiali ad alta permeabilità magnetica, come la ferrite o il silicio, per aumentare l'efficienza del trasferimento di energia. La progettazione del trasformatore può variare notevolmente a seconda dell'applicazione, dalle dimensioni ridotte dei trasformatori nei dispositivi elettronici alla grandezza significativa di quelli utilizzati nelle reti di distribuzione elettrica.

Un trasformatore e un induttore sono entrambi dispositivi elettrici basati sull'induzione elettromagnetica, ma differiscono nella loro applicazione e progettazione.

Il trasformatore è progettato per trasferire l'energia elettrica da un circuito a un altro attraverso l'induzione elettromagnetica mentre l'induttore immagazzina energia sotto forma di campo magnetico quando attraversato da corrente. Dal punto di vista di configurazione un trasformatore è composto da due avvolgimenti, ogni avvolgimento funge da induttore, poiché quando la corrente attraversa l'avvolgimento, si crea un campo magnetico, e l'interazione di questi campi magnetici nei due avvolgimenti induce una tensione nel secondo avvolgimento. Pertanto, un trasformatore può essere considerato come un dispositivo in cui entrambi gli avvolgimenti agiscono come induttori.

Capitolo 3

Setup sperimentale

3.1 Introduzione

Il setup sperimentale è stato progettato con l'obiettivo di integrare le potenzialità del simulatore multifisico, in particolare del software COMSOL Multiphysics, con le misure di laboratorio. Ciò permette la creazione di un approccio sinergico volto a una validazione accurata e affidabile delle simulazioni. La metodologia innovativa mira a superare le sfide tradizionali nell'analisi magnetica, offrendo una piattaforma completa e integrata per la prototipazione rapida e l'ottimizzazione dei componenti magnetici. Nella sezione successiva, verrà esplorato dettagliatamente il setup sperimentale, delineando le componenti chiave e illustrando il processo sotteso all'integrazione tra simulazioni numeriche e dati sperimentali. Attraverso questa sinergia, sarà fornita una panoramica chiara ed esaustiva delle metodologie utilizzate nel corso di questa ricerca, mettendo in luce l'approccio interdisciplinare che caratterizza il lavoro.

3.2 Realizzazione del campione e modello circuitale

La realizzazione del trasformatore costituito da tre materiali distinti - il nucleo, gli avvolgimenti e l'isolante - rappresenta l'intero progetto dal quale sarà possibile passare nella progettazione di componenti induttivi avanzati. Come è stato spiegato nei capitoli precedenti, un trasformatore è formato da due avvolgimenti (primario e secondario) che presi singolarmente funzionano come un induttore.

Questo modello tridimensionale non solo cattura la complessità dei fenomeni magnetici e delle interazioni tra i componenti, ma offre anche una piattaforma versatile per adattare le caratteristiche dell'induttore alle esigenze specifiche di varie applicazioni.

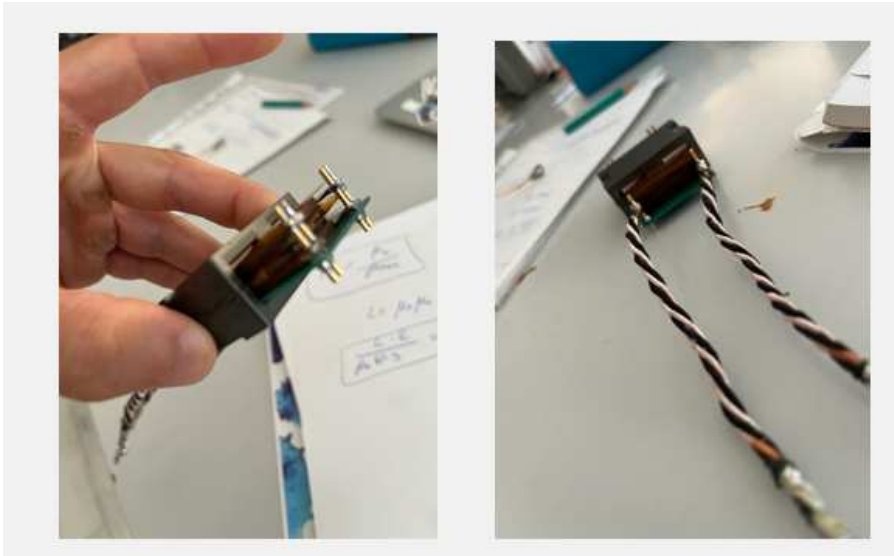


Figura 3.1: Campione - vista anteriore

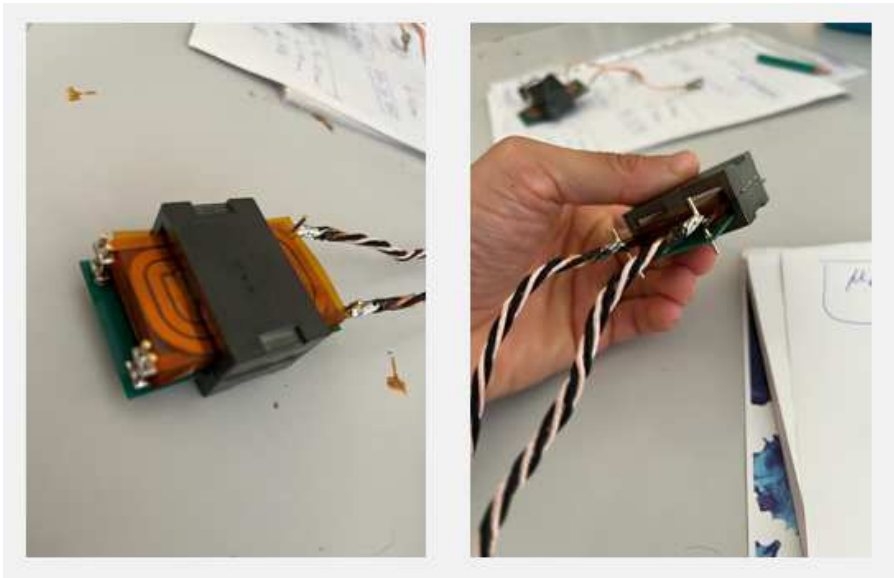


Figura 3.2: Campione - vista posteriore

Il nucleo assume un ruolo cruciale, definendo le proprietà magnetiche fondamentali dell'induttore. La scelta attenta del materiale del nucleo, insieme alla sua geometria, influenza direttamente l'efficienza e le prestazioni del componente.

Il nucleo utilizzato è una tipologia di nucleo magnetico a forma di "E". Questa forma è scelta per ottimizzare le proprietà magnetiche del materiale, fornendo una via più diretta per il flusso magnetico rispetto ad altre forme. Tale forma può contribuire a ridurre la perdita di energia e a migliorare l'efficienza del componente.

La forma ad "E" consente di avvolgere facilmente gli avvolgimenti attorno alle braccia della "E", contribuendo a creare un flusso magnetico efficiente.

Tale nucleo è stato realizzato con la ferrite, una classe di materiali ceramici magnetici che presenta buone proprietà di permeabilità magnetica e bassa conducibilità elettrica.

Nella modellazione dei componenti elettronici, come induttori e trasformatori, spesso viene utilizzata la ferrite come materiale per i seguenti motivi:

- La sua elevata permeabilità magnetica, che permette di aumentare l'efficienza nell'immagazzinamento di energia magnetica.
- I materiali a base di ferrite sono noti per le loro basse perdite magnetiche, il che contribuisce a mantenere l'efficienza del componente.
- I nuclei ad "E" in ferrite sono spesso utilizzati in alimentatori, trasformatori, induttori e altri dispositivi elettronici dove è richiesta una gestione efficiente del flusso magnetico.
- La ferrite è un materiale economico e ampiamente disponibile, il che la rende una scelta comune in molte applicazioni.

Le caratteristiche esatte del nucleo in ferrite, comprese le sue dimensioni e proprietà magnetiche, possono manifestare variazioni in base al produttore e al modello specifico. Per ottenere dettagliate informazioni sul nucleo in ferrite a forma di E utilizzato, risulta imperativo fare riferimento alle specifiche tecniche fornite dal produttore o ai documenti tecnici associati al componente. La necessità di consultare tali risorse deriva dalla complessità intrinseca delle specifiche, che possono essere influenzate da parametri come la composizione specifica del materiale ferritico impiegato, i processi di produzione adottati, e altri fattori determinanti che contribuiscono alla configurazione finale del nucleo.

Nel caso in esame, tali informazioni si possono trovare nella documentazione [4] in cui vengono specificate le dimensioni e proprietà relative al marchio di fabbrica.

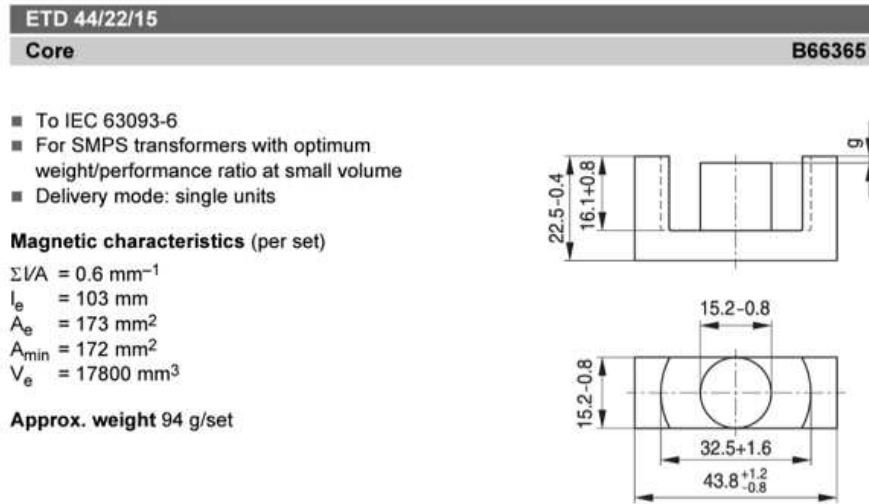


Figura 3.3: Specifiche nucleo

Gli avvolgimenti, avvolti attorno al nucleo, fungono da conduttori che trasportano la corrente e generano il campo magnetico desiderato. La selezione di materiali per gli avvolgimenti e la configurazione del loro avvolgimento rivestono importanza vitale per garantire una distribuzione uniforme del flusso magnetico.

L'utilizzo di avvolgimenti in rame, disposti in configurazioni serie e parallelo, è una pratica comune nella progettazione di induttori e trasformatori. Questo approccio consente di adattare le caratteristiche elettriche del componente alle specifiche esigenze dell'applicazione. Gli avvolgimenti in configurazione serie vengono realizzati posizionando gli avvolgimenti uno dopo l'altro. Ciò comporta che la corrente attraversa un avvolgimento prima di fluire nel successivo. Questa configurazione può essere utilizzata per aumentare la tensione complessiva. Gli avvolgimenti in configurazione parallelo vengono collegati in modo che la corrente possa fluire attraverso più avvolgimenti contemporaneamente. Questo può essere utile per aumentare la corrente complessiva che il componente può gestire. Il rame è spesso scelto come materiale per gli avvolgimenti grazie alla sua elevata conducibilità elettrica. La sua capacità di condurre bene la corrente contribuisce a minimizzare le perdite di potenza e a massimizzare l'efficienza del componente. Il rame è resistente alla corrosione, il che lo rende adatto per applicazioni in cui l'esposizione all'umidità o a condizioni ambientali avverse è un fattore. La formazione di ossido sulla superficie del rame può, in realtà, fornire una sorta di protezione contro la corrosione. Oltre ad avere una buona conducibilità termica, il rame è facilmente lavorabile e può essere plasmato in varie forme, rendendolo adatto per la produzione di avvolgimenti complessi e geometrie specifiche richieste nei trasformatori e induttori. Grazie alla sua resistenza alla corrosione e alla sua durabilità nel tempo, il rame è una scelta affidabile per applicazioni a lungo termine, come nei trasformatori installati in dispositivi elettronici.

Poichè è stato utilizzato degli avvolgimenti in serie e parallelo, è importante garantire un adeguato isolamento tra gli avvolgimenti per prevenire cortocircuiti indesiderati. L'isolamento può essere realizzato mediante l'uso di materiali isolanti o strati isolanti tra gli avvolgimenti. La sua scelta ponderata è essenziale per prevenire perdite di energia e massimizzare l'efficienza del sistema. Nel caso in esame, sono state realizzati cinque pannelli di Kapton, utilizzati per separare gli avvolgimenti. Il Kapton è un polimero termoplastico noto per la sua resistenza alle alte temperature e alla corrosione, ed è comunemente utilizzato come materiale isolante e termico in diverse applicazioni, inclusi i circuiti elettronici.

Lo studio condotto in questo contesto prende in considerazione esclusivamente l'avvolgimento primario. Poiché il comportamento di un trasformatore può essere assimilato a quello di un induttore con avvolgimenti suddivisi in parti, si può considerare un modello circuitale composto da due circuiti RLC in parallelo, ciascuno rappresentante una porzione dell'avvolgimento.

Il circuito RLC sarà formato da una capacità in parallelo con un'induttanza, con il tutto in serie con una resistenza. Il seguente schema è stato realizzato attraverso CircuitLab [1], un editing circuitale:

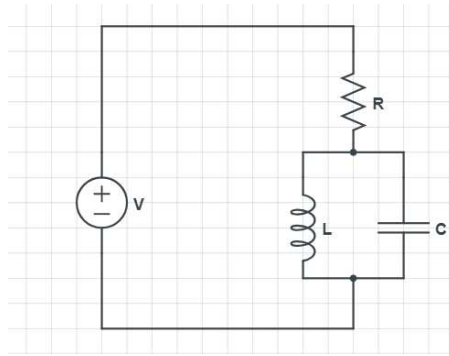


Figura 3.4: Circuito RLC

Lo schema circuitale di un trasformatore, del modello equivale ad un doppio circuito RLC in parallelo, con un numero di avvolgimenti (N) 14 da una parte e 6 dall'altra, con un totale di 20 avvolgimenti.

Il circuito sarà composto principalmente dai tre parametri fondamentali (R,L,C) nella seguente composizione: la capacità (C) in parallelo con l'induttanza(L), tutto in serie con la resistenza (R).

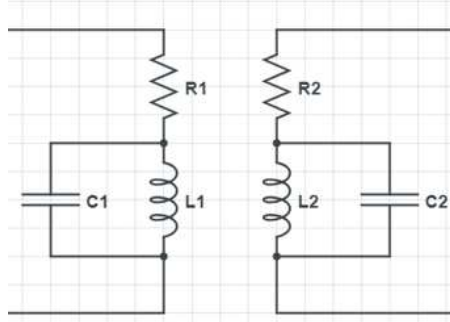


Figura 3.5: Schema circuito

Il circuito proposto servirà da guida nell'analisi dell'impedenza nei prossimi paragrafi. Questo circuito rappresenta la combinazione di capacità e induttanza in un sistema elettrico ad alta frequenza. Concentrandoci esclusivamente sull'avvolgimento primario, da ora in poi ci riferiremo a questo componente come un induttore anziché come un trasformatore. L'analisi dell'impedenza in questo contesto sarà fondamentale per comprendere il comportamento del circuito elettrico ad alta frequenza, focalizzandosi sugli effetti combinati di capacità e induttanza.

3.3 Misure in laboratorio

Dopo aver completato la costruzione del modello circuitale, si procede con le misurazioni in laboratorio del corrispondente modello reale. Questa fase del processo fornisce il valore dell'impedenza, che diventa un punto di riferimento cruciale e oggetto di studio per valutare l'accuratezza dei modelli teorici.

L'obiettivo principale è misurare e calcolare l'andamento dell'impedenza (Z) al variare della frequenza. Questo processo mira a visualizzare la curva caratteristica dell'impedenza e identificare eventuali picchi massimi. L'analisi della variazione dell'impedenza in funzione della frequenza permette di ottenere informazioni dettagliate sul comportamento del circuito nel dominio delle alte frequenze.

La presenza di picchi massimi nella curva dell'impedenza può indicare punti critici o risonanze nel sistema elettrico in esame. Questi picchi forniscono importanti informazioni sulle frequenze a cui il circuito risponde in modo particolarmente marcato, influenzando le prestazioni complessive dell'apparecchiatura.

L'utilizzo del valore misurato dell'impedenza come punto di confronto con il modello teorico consente di valutare l'accuratezza della rappresentazione teorica rispetto al comportamento reale del circuito. Questo processo di validazione sperimentale è fondamentale per garantire una corretta comprensione e previsione delle prestazioni del sistema.

3.3.1 Grafico dell'impedenza misurato

Per le prime misure è stato utilizzato l'analizzatore di spettro, strumento di misura elettronico utilizzato per analizzare la distribuzione di frequenza di un segnale. Il suo obiettivo principale è scomporre un segnale complesso nelle sue componenti frequenziali, mostrando l'intensità del segnale in funzione della frequenza. Questo strumento è ampiamente utilizzato in vari campi, tra cui elettronica, telecomunicazioni, acustica e ingegneria delle comunicazioni.

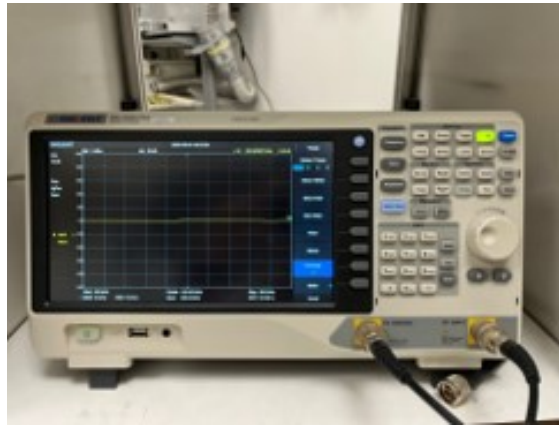


Figura 3.6: Analizzatore di spettro di segnale

Vengono riportate alcune delle configurazioni ottimali utilizzate per sulle impostazioni del dispositivo:

- **Trigger (Sincronizzazione):** l'uso del trigger consente di sincronizzare l'analizzatore di spettro con il segnale in ingresso. Ciò aiuta a ottenere una visualizzazione stabile e coerente, eliminando l'effetto di sfarfallio che potrebbe verificarsi quando il segnale non è sincronizzato con l'apparecchio di misura.
- **Normalize (Normalizzazione):** la normalizzazione viene utilizzata per confrontare i livelli di potenza relativi a diverse frequenze. Questa opzione può essere utile se si cerca di visualizzare il contributo di diverse componenti di frequenza nel tuo segnale.
- **Average (Media):** l'averaging consente di ridurre il rumore nel segnale. È utile quando il segnale presenta variazioni casuali o fluttuazioni. L'analizzatore di spettro acquisisce più acquisizioni e calcola la media, migliorando la precisione delle misurazioni.
- **Decibel (dB):** l'utilizzo della scala logaritmica in decibel può essere utile per esaminare il rapporto tra le ampiezze di diverse frequenze.
- **Resolution Bandwidth (Larghezza di banda di risoluzione):** la larghezza di banda di risoluzione determina la precisione delle misurazioni in frequenza

La configurazione ottimale può dipendere dalle specifiche del segnale e dagli obiettivi della misurazione.

Per valutare l'impedenza, si è adottata una configurazione a due porte, dove l'analizzatore di spettro applica un segnale al componente tramite una porta e misura la tensione attraverso l'altra. L'analizzatore di spettro genera un segnale in ingresso (V_{in}) collegato all'induttore in esame, fungendo da sorgente. La porta di uscita (V_{out}) è connessa ai terminali dell'induttore, e qui viene misurata la tensione. Questa configurazione impiega una resistenza di terminazione di $50\ \Omega$ sulla porta di uscita (V_{out}), integrata nell'analizzatore di spettro stesso.

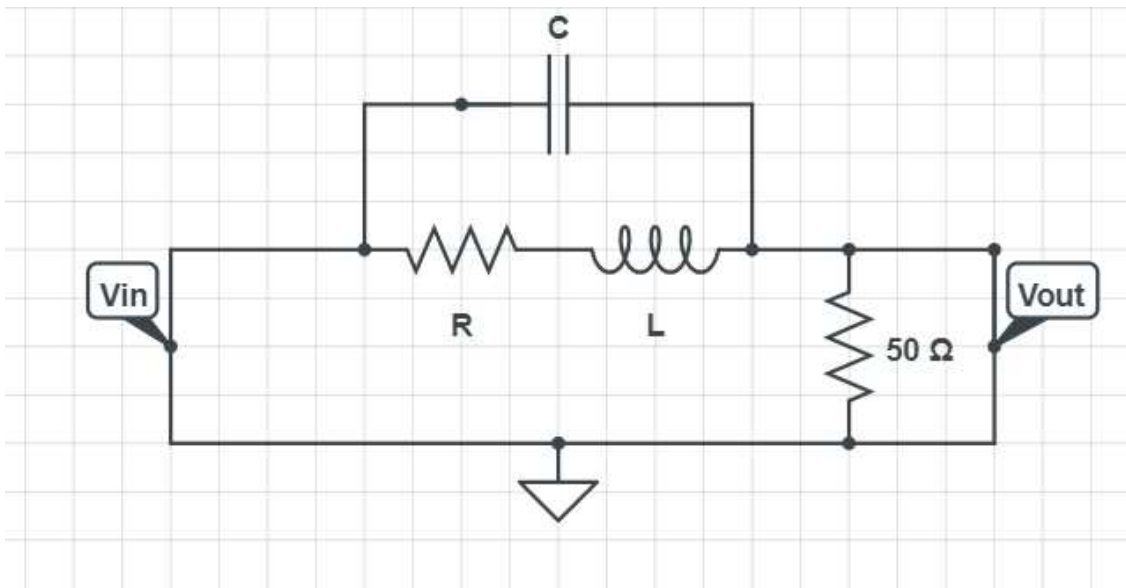


Figura 3.7: Schema circuito

Prima di iniziare le misurazioni sull'induttore, è necessario calibrare il sistema. Questo coinvolge la compensazione di eventuali effetti indesiderati causati da cavi, connessioni e componenti del sistema.

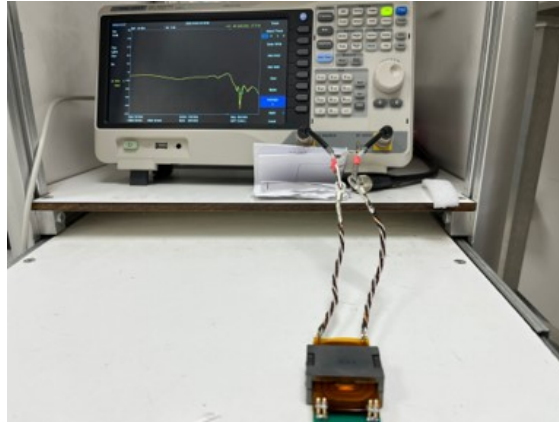


Figura 3.8: Acquisizione segnale

Il grafico ottenuto è il seguente:



Figura 3.9: Grafico segnale

Il risultato ottenuto rappresenta l'acquisizione di un segnale che va da un range di frequenza di 1 MHz fino a 100 MHz. Sull'asse orizzontale viene indicata la frequenza mentre

sull'asse verticale viene indicata il rapporto tra la tensione di uscita (V_{out}) e la tensione di ingresso (V_{in}) del modello studiato. Ricordando che l'impedenza in funzione della frequenza è data dal rapporto tra la tensione e la corrente:

$$\frac{V}{I} = z(f) \quad (3.1)$$

con la tensione V_{out} pari al prodotto tra la corrente I_2 per la resistenza R (50 Ω) per la legge di Ohm:

$$V_{out} = I_2 \cdot 50(\Omega) \quad (3.2)$$

Sostituendo le varie equazioni del modello circuitale si ottiene la seguente equazione:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{50}{|Z| + 50} \quad (3.3)$$

Dove $|Z|$ rappresenta il modulo dell'impedenza e risulta essere una combinazione di impedenza resistiva (R), impedenza induttiva (X_L) e impedenza capacitiva (X_C):

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (X_L^2 - X_C^2)} \quad (3.4)$$

Attraverso l'analisi sperimentale, si è derivato il rapporto tra le tensioni di uscita (V_{out}) e di ingresso (V_{in}). A questo punto, è sufficiente procedere con l'isolamento dell'impedenza al fine di determinarne il valore ricercato. Per poter estrapolare il grafico dell'impedenza, viene esportato il file di dati (tramite chiavetta USB) in formato CSV sul Matlab [7].

3.3.2 Risultati misurati sul matlab

Dopo aver importato il dataset del segnale misurato, attraverso il seguente codice verrà visualizzato su schermo il grafico del segnale ottenuto:

```

1      clear all; close all; clc;
2      % Carica i dati dal file CSV
3      M = readtable('RapportoTensioni.csv');
4      freq = M.MachineModule(790:1539)
5      imp = M.SSA3032XPlus(790:1539)
6      % Visualizza il grafico in scala logaritmica
7      loglog(freq, imp, 'LineWidth', 2);
8      grid on;
9      xlabel('Frequenza (Hz)');
10     ylabel('Vout/Vin');
11     % Aggiunge etichette, legenda e griglia
12     title('Grafico rapporto Vout/Vin');
13     legend('Vout/Vin');

```

Listato 3.1: Codice Matlab:importazione grafico misurato

Per comodità, è stata ridotta la quantità di dati da visualizzare, concentrandosi sul range di frequenze di maggior interesse. Questo approccio semplifica l'analisi e facilita la comprensione dei risultati.

Il grafico ottenuto sarà il seguente:

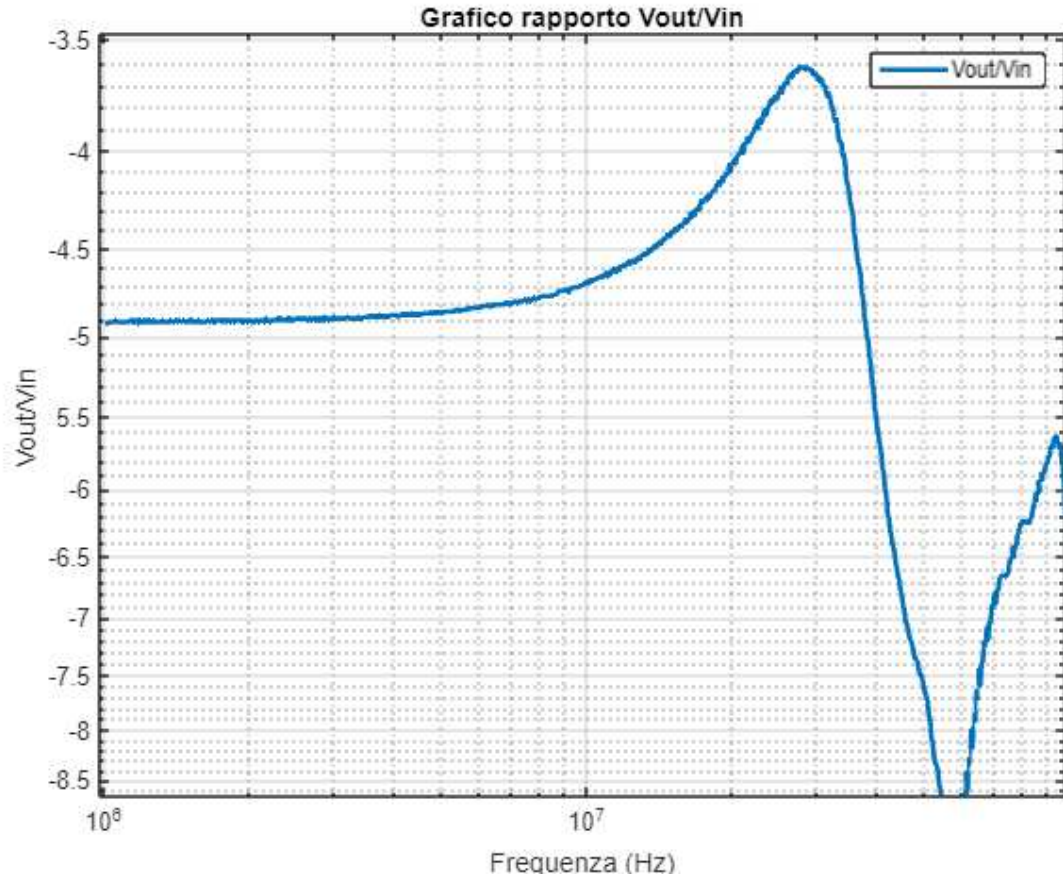


Figura 3.10: Grafico del segnale misurato visualizzato sul Matlab

Il grafico risultante, come è stato evidenziato nel paragrafo precedente, rappresenta il rapporto tra le due tensioni in funzione della variazione di frequenza.

Mediante il seguente codice, si ottiene il diagramma rappresentando l'andamento dell'impedenza in relazione alla variazione della frequenza:

```

1      clear all; close all; clc;
2      % Carica i dati dal file CSV
3      M = readtable('RapportoTensioni.csv');
4      freq = M.MachineModule(790:1539)
5      imp = M.SSA3032XPlus(790:1539)
6      %trasformare da db a numero
7      var_lineari = 10.^(imp / 10);
8      %usare la formula
9      var_formula = (50./var_lineari)./50;
10     %trasformare da numero a db
11     var_dB = 10 *log10(var_formula);
12
13     % Trova il valore massimo di impedenza
14     valoreMassimo = max(var_dB);
15
16     % Trova l'indice del valore massimo di impedenza
17     indiceMassimo = find(var_dB == valoreMassimo);
18
19     % Trova il corrispondente valore di frequenza
20     freqCorrispondente = freq(indiceMassimo);
21
22     % Visualizza il grafico in scala logaritmica
23     loglog(freq, var_dB, 'LineWidth', 2);
24     grid on;
25     xlabel('Frequenza (Hz)');
26     ylabel('Impedenza (Ohm)');
27
28     % Sovrappone un punto rosso nel punto massimo
29     hold on;
30     plot(freqCorrispondente, valoreMassimo, 'ro',
31           'MarkerSize', 10);
32
33     % Aggiunge etichette, legenda e griglia
34     title('Grafico Impedenza Misurata');
35     legend('Impedenza Misurata', 'Punto Massimo' );

```

Listato 3.2: Codice Matlab: estrazione impedenza misurata

Il grafico ottenuto è il seguente:

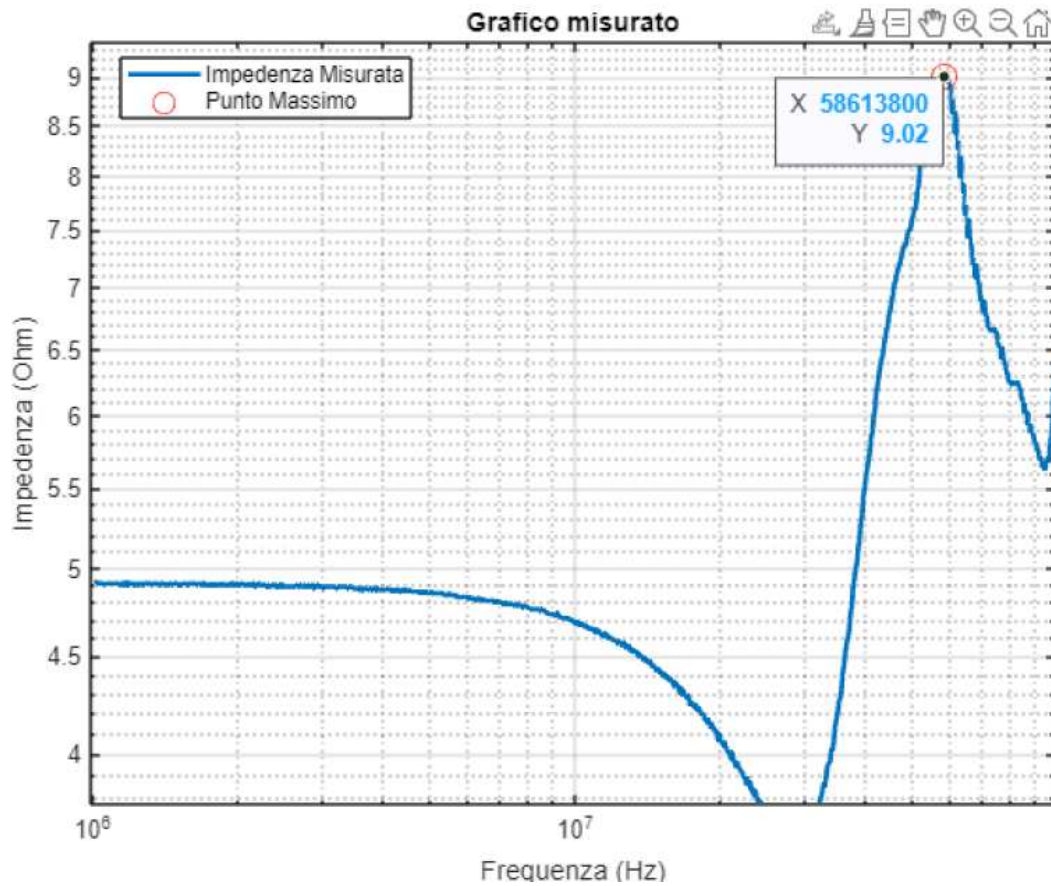


Figura 3.11: Grafico dell'impedenza misurata

Il grafico ottenuto rappresenta sull'asse delle ordinate il valore dell'impedenza in Ohm, mentre sull'asse delle ascisse sono indicati i valori della frequenza in Hertz. Oltre a mostrare l'andamento dell'impedenza in relazione alla variazione della frequenza, ci interessa particolarmente il picco di impedenza e la frequenza corrispondente. Nel presente grafico, il picco si manifesta approssimativamente a 58.61 MHz, raggiungendo un valore di 9.02 Ω . Le prossime fasi di calcolo e simulazione mirano a confermare la similitudine di questo picco con i risultati attesi.

3.4 Modello teorico

Attraverso la teoria esposta nel secondo capitolo e le considerazioni fisiche relative al modello in esame, è stato derivato teoricamente il grafico dell'impedenza e il valore della permeabilità magnetica.

3.4.1 Grafico dell'impedenza calcolato

L'approssimazione del modello a un circuito RLC ci ha consentito di determinare i tre parametri fondamentali, ovvero la resistenza, la capacità e l'induttanza. Questi parametri sono essenziali per la successiva elaborazione del grafico completo.

La resistenza (\mathbf{R}) e l'induttanza (\mathbf{L}) sono state misurate in laboratorio tramite un tester elettrico da banco.



Figura 3.12: Tester da banco

I valori delle misurazioni sono i seguenti:

$$R = 16.83 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (3.5)$$

$$L = 235 \cdot 10^{-6} H \quad (3.6)$$

Le misure dell'impedenza di picco (\mathbf{Z}) e delle relative frequenze (\mathbf{f}) sono state estratte dal grafico precedentemente acquisito nel sottocapitolo precedente:

$$Z = 9.02 \Omega \quad (3.7)$$

$$f = 58.61 Mhz \quad (3.8)$$

L'ultimo parametro di interesse, la capacità (\mathbf{C}), è stato determinato mediante il calcolo inverso utilizzando la seguente formula dell'impedenza:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_l - X_c)^2} \quad (3.9)$$

Nel dettaglio, si avrà:

$$Z = \sqrt{R^2 + (2\pi f \cdot L - \frac{1}{2\pi f \cdot C})^2} \quad (3.10)$$

Isolando la capacità si ottiene la seguente formula:

$$C = \frac{1}{2\pi f \cdot (2\pi f \cdot L - \sqrt{(Z^2 - R^2)})} \quad (3.11)$$

Inserendo i valori, si ottiene:

$$C = \frac{1}{(2\pi \cdot 58.61 \cdot 10^6) \cdot [(2\pi(58.61 \cdot 10^6) \cdot (235 \cdot 10^{-6}) - \sqrt{((9.02)^2 - (16.83 \cdot 10^{-3})^2)})]} = 3.0968 \cdot 10^{-14} \text{ F} \quad (3.12)$$

Una volta acquisiti i parametri distintivi del modello, è stato implementato in Microsoft Excel un "Analizzatore di Spettro Teorico". Questo strumento è capace di generare e restituire in uscita il grafico del picco dell'impedenza basandosi sui parametri forniti.

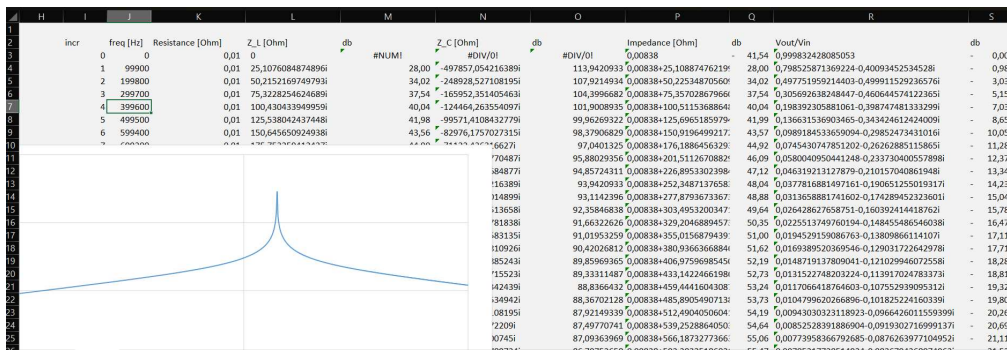


Figura 3.13: Modello teorico Excel

L'input di questo modello includerà i parametri precedentemente identificati: l'induttanza (L), la resistenza (R), la capacità (C), e il range di frequenza specificato.

Rdc	16,86E-03 Ohm
L	235,00E-06 H
C	30,90E-15 F
Fstart	20,00E+06 Hz
Fstop	300,00E+06 Hz
Fstep	1000
Fres	59,06E+06 Hz

Figura 3.14: Modello matematico: input

Il dataset è stato generato utilizzando le competenze teoriche acquisite nel calcolo del modello.

3.4.2 Risultati sul matlab

Il dataset è stato formattato e adattato, organizzandolo in un file CSV per consentirne l'importazione agevole su MATLAB.

Attraverso il seguente codice, è stato generato il grafico:

```

1
2
3   clear all; close all; clc;
4
5   % Carica i dati dal file CSV
6   G = readtable('ImpedenzaCalcolata.xlsx');
7   freq =G.Var9(10:599)
8   imp = -G.Var18(10:599)
9
10  % Trova il valore massimo di impedenza
11  valoreMassimo = max(imp);
12
13  % Trova l'indice del valore massimo di impedenza
14  indiceMassimo = find(imp == valoreMassimo);
15
16  % Trova il corrispondente valore di frequenza
17  freqCorrispondente = freq(indiceMassimo);
18
19  % Visualizza il grafico in scala logaritmica
20  loglog(freq, imp, 'LineWidth', 2);
21  grid on;
22  xlabel('Frequenza (Hz)');
23  ylabel('Impedenza (Ohm)');
24
25  % Sovrappone un punto rosso nel punto massimo
26  hold on;
27  plot(freqCorrispondente, valoreMassimo, 'ro',
28       'MarkerSize', 10);
29
30  % Aggiunge etichette, legenda e griglia
31  title('Grafico dell''Impedenza Calcolata in Scala
32       Logaritmica con Punto Massimo');
33  legend('Impedenza', 'Punto Massimo');

```

Listato 3.3: Codice Matlab:importazione impedenza calcolata

Il prossimo grafico rappresenterà l'impedenza calcolata dall' "Analizzatore di spettro teorico":

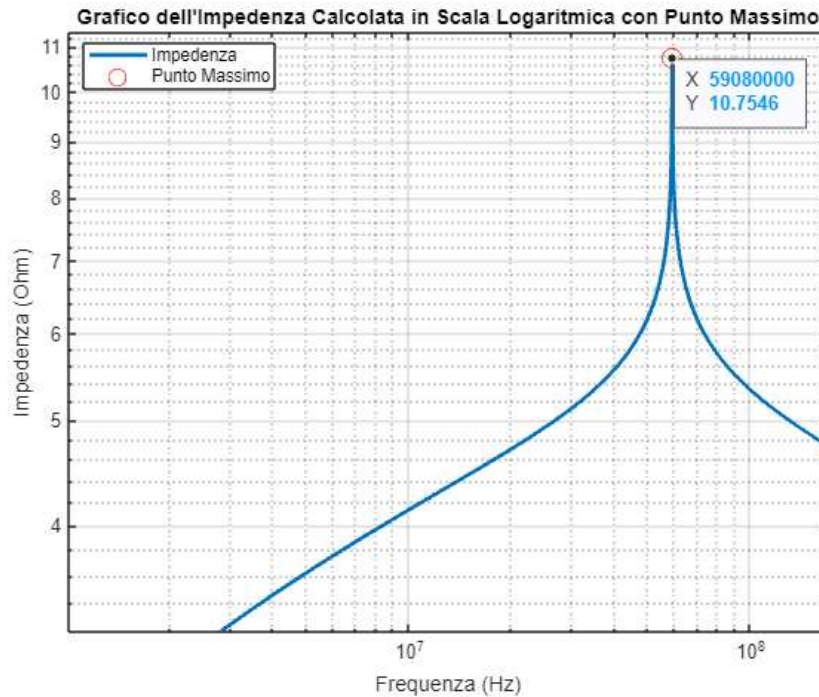


Figura 3.15: Grafico impedenza calcolata

Sul grafico dell'impedenza, l'asse delle ordinate rappresenta i valori dell'impedenza in ohm, mentre sull'asse delle ascisse viene indicata la frequenza in hertz. È importante sottolineare che il grafico è realizzato utilizzando una scala logaritmica, fornendo una rappresentazione dettagliata delle variazioni dell'impedenza in funzione della frequenza. Il picco dell'impedenza, raggiungendo un valore di 10.7546 ohm, è osservato in corrispondenza di una frequenza di 59.9 megahertz (MHz).

3.4.3 Permeabilità magnetica

La permeabilità magnetica del nucleo è stata determinata manualmente. Tale valore sarà successivamente incorporato nel processo di modellazione mediante Comsol.

Partendo dalla formula dell'induttanza L :

$$L = \frac{\Phi}{I} \quad (3.13)$$

Ricordando la formula del flusso magnetico Φ :

$$\Phi = \mu \cdot \frac{N^2 \cdot S}{\ell} \quad (3.14)$$

Sostituendo le due equazioni si ottiene:

$$L = \mu \cdot \frac{N^2 \cdot S}{\ell} \quad (3.15)$$

Andando a ricavarci la μ_r ricordando che $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$ si ottiene:

$$\mu_r = \frac{L \cdot \ell}{N^2 \cdot A \cdot \mu_0} \quad (3.16)$$

I parametri relativi alle caratteristiche fisiche del modello (numero di avvolgimenti, superficie e lunghezza) si possono trovare nel datasheet TDK (marchio di produzione) mentre l'induttanza è il valore misurato in laboratorio.

Sostituendo l'equazione con i valori reali, si ottiene:

$$\mu_r = \frac{235 \cdot 10^{-6} \cdot 103 \cdot 10^{-3}}{20^2 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 173 \cdot 10^{-6}} \quad (3.17)$$

Il valore ottenuto della permeabilità magnetica del nucleo risulta essere pari a 278,3487 (H/m).

3.5 Considerazioni

Attraverso formule matematiche e parametri del modello precedentemente calcolati in laboratorio, è stata determinata manualmente la permeabilità magnetica del nucleo. Tale valore sarà successivamente incorporato nel processo di modellazione mediante Comsol. È stato ottenuto il grafico dell'impedenza attraverso misurazioni in laboratorio e calcoli basati sui modelli matematici del modello in esame. L'obiettivo è che i picchi di impedenza nei due grafici siano approssimativamente uguali e che l'andamento generale sia simile. Tuttavia, è importante notare che a causa degli effetti delle perdite, non considerate nel modello teorico, i due grafici non saranno identici. Il codice Matlab seguente ci consentirà di confrontare i due grafici ottenuti dalle misurazioni in laboratorio e dal modello teorico, tenendo conto degli effetti delle perdite non considerate nel modello:


```
1
2     clear all; close all; clc;
3
4     % Carica i dati dal file CSV
5     G = readtable('ImpedenzaCalcolata.xlsx');
6     freq = G.Var9(10:599)
7     imp = -G.Var18(10:599)
8
9     % Trova il valore massimo di impedenza
10    valoreMassimo = max(imp);
11    % Trova l'indice del valore massimo di impedenza
12    indiceMassimo = find(imp == valoreMassimo);
13    freqCorrispondente = freq(indiceMassimo);
14
15    % Visualizza il grafico in scala logaritmica
16    loglog(freq, imp, 'LineWidth', 2);
17
18    % Sovrappone un punto rosso nel punto massimo
19    hold on;
20    plot(freqCorrispondente, valoreMassimo, 'ro',
21         'MarkerSize', 10);
22
23    % Carica i dati dal file CSV
24    M = readtable('ImpedenzaMisurata.csv');
25    freq = M.MachineModule(790:1539)
26    imp = M.SSA3032XPlus(790:1539)
27
28    % Trova il valore massimo di impedenza
29    valoreMassimo = max(var_dB);
30    indiceMassimo = find(var_dB == valoreMassimo);
31    freqCorrispondente = freq(indiceMassimo);
32
33    % Visualizza il grafico in scala logaritmica
34    loglog(freq, var_dB, 'LineWidth', 2);
35    grid on;
36    xlabel('Frequenza (Hz)');
37    ylabel('Impedenza (Ohm)');
38
39    % Sovrappone un punto rosso nel punto massimo
40    hold on;
41    plot(freqCorrispondente, valoreMassimo, 'ro',
42         'MarkerSize', 10);
43
44    legend('Impedenza Calcolata', 'Punto Massimo', 'Impedenza
45          Misurata');
```

Listato 3.4: Codice Matlab: impedenza misurata e calcolata con modello teorico

Sullo schermo verrà visualizzato il seguente grafico:

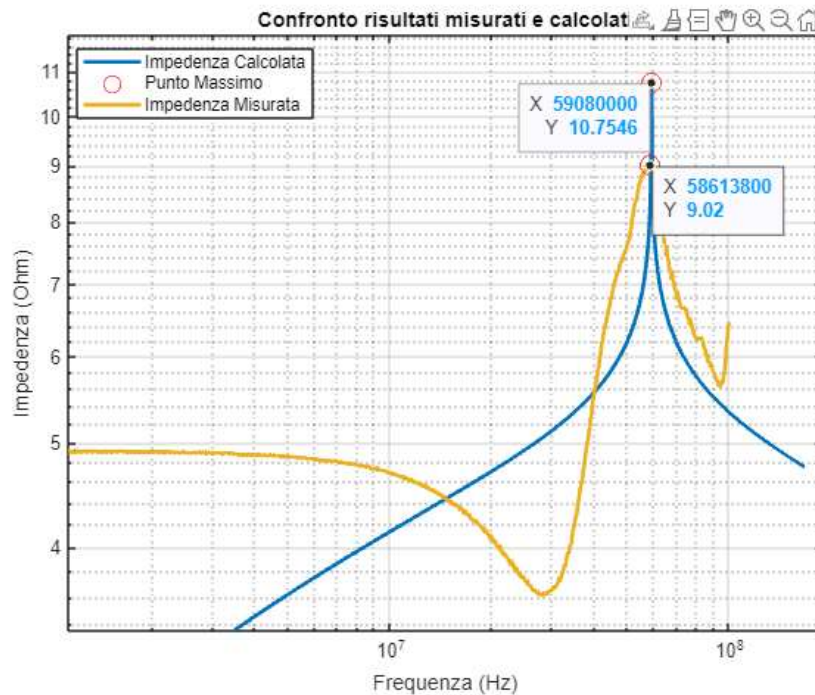


Figura 3.16: Grafico misurato e calcolato con modello teorico

Risulta interessante notare che il picco dell'impedenza si trova approssimativamente sulla stessa frequenza, con una variazione di circa 0.4 MHz. La differenza di modulo di circa 1.6Ω potrebbe essere attribuita a diversi fattori, come errori sperimentali, approssimazioni nei modelli matematici utilizzati o altre variabili non considerate nel modello teorico. È comprensibile che i due grafici non siano identici, e la differenza osservata potrebbe essere attribuita all'effetto delle perdite, che spesso non sono completamente considerate nei modelli matematici teorici. Questa discrepanza è comune in situazioni reali e sottolinea l'importanza di tenere conto di tutti i fattori che possono influenzare i risultati sperimentali.

Si procede con la simulazione del modello tramite Comsol, aspettandosi che l'andamento dell'impedenza simulato sarà simile a quello misurato in laboratorio.

Capitolo 4

Setup di simulazione

4.1 Introduzione

Il COMSOL Multiphysics [2] è un software di simulazione avanzato e versatile progettato per analizzare e risolvere problemi complessi di ingegneria e fisica. Si distingue per la sua capacità di gestire simulazioni multiphysics, ovvero il collegamento e la risoluzione simultanea di più fenomeni fisici. Questo è essenziale per studiare sistemi del mondo reale in cui interagiscono diverse discipline, come meccanica, fluidodinamica, elettromagnetismo e trasferimento di calore.

Il software offre un'interfaccia utente intuitiva che facilita la creazione di modelli complessi, offrendo una ricca documentazione presente sul sito ufficiale [3]. Gli utenti possono definire geometrie, impostare condizioni al contorno, assegnare proprietà dei materiali e definire le equazioni del problema attraverso un ambiente grafico interattivo.

COMSOL consente di modellare geometrie complesse in 2D e 3D, incorporando strumenti di progettazione e modifica direttamente nell'interfaccia utente.



Figura 4.1: Comsol-Multiphysics

Nel corso di questo progetto, si è impiegata la versione 5.6 di Comsol (per Windows) per la modellazione e la simulazione del modello oggetto di studio. Nei paragrafi successivi, verrà esaminato dettagliatamente ciascun processo all'interno di Comsol.

4.2 Nuovo modello

Una volta avviato COMSOL, verrà visualizzata la schermata iniziale. Da qui, si seleziona il tipo di modello che si desidera creare.

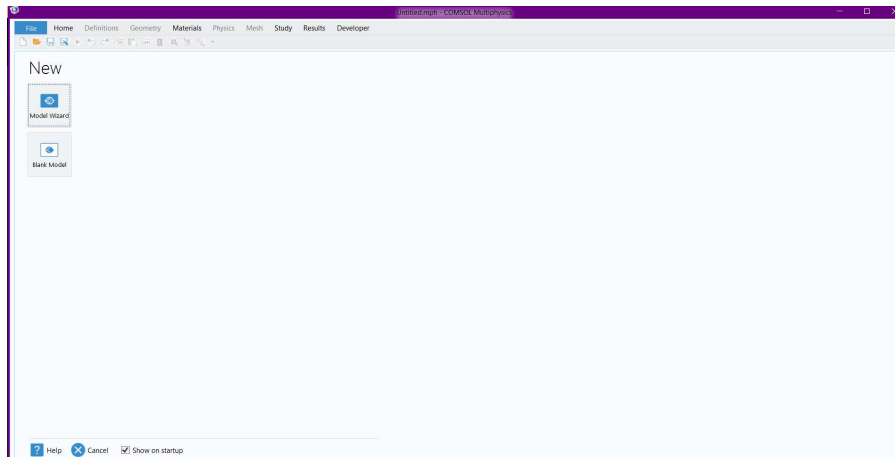


Figura 4.2: Nuovo modello

Il Model Wizard è un approccio guidato che semplifica la creazione di modelli per utenti meno esperti o per simulazioni comuni, mentre il Blank Model offre maggiore flessibilità e controllo per gli utenti più esperti o per simulazioni che richiedono una configurazione più dettagliata e personalizzata.

Nel caso analizzato in questo progetto, si andrà a selezionare Model Wizard per poi poter scegliere in quale dimensione andare a modellare.



Figura 4.3: Selezione della dimensione

Dopo aver optato per la terza dimensione (3D), si procede selezionando "Magnetic Fields" al fine di incorporare la fisica dei campi magnetici oggetto del studio.

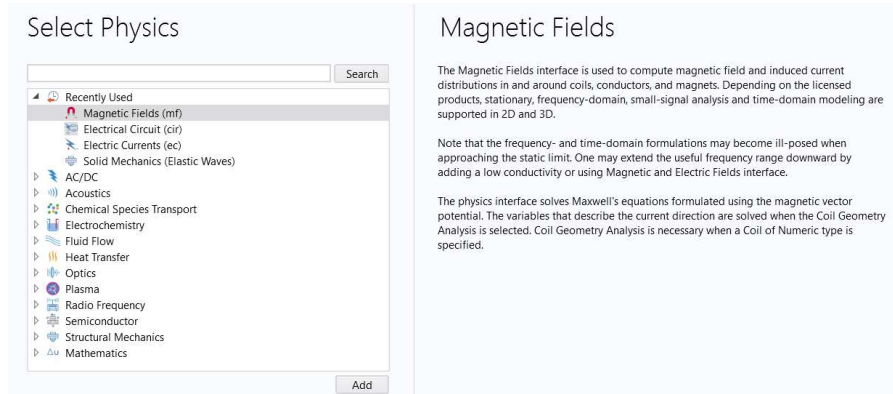


Figura 4.4: Selezione della fisica

L'ultimo passaggio consisterà nel selezionare il tipo di studio, suddiviso principalmente nei tre tipi principali: stazionario, tempo-dipendente e dominio delle frequenze. Nel caso in esame, si è proceduto direttamente al passaggio nel dominio delle frequenze.

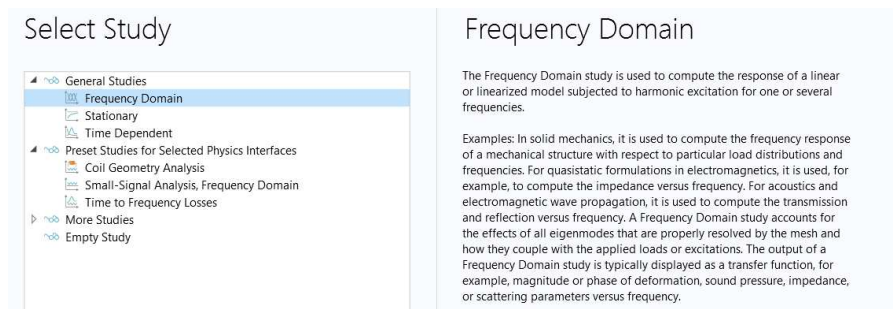


Figura 4.5: Selezione dello studio

Dopo aver selezionato la tipologia di studio, si accederà alla schermata iniziale suddivisa principalmente nelle seguenti sezioni:

- Barra del Menu: in alto, si trova la barra del menu che contiene opzioni per aprire, salvare, stampare, eseguire simulazioni e accedere a molte altre funzionalità.
- Barra degli Strumenti: sotto la barra del menu, c'è la barra degli strumenti che fornisce scorciatoie per le azioni frequenti, come la creazione di nuovi modelli, la gestione della geometria e altro ancora.
- Model Builder (Costruttore del Modello): il Model Builder è il cuore dell'interfaccia di COMSOL. È la parte centrale della schermata e contiene un elenco strutturato di tutti gli elementi del tuo modello. Si può navigare tra le varie categorie, come

Geometry (Geometria), Materials (Materiali), Physics (Fisica), Mesh (Mesh), Study (Studio) e Results (Risultati), per modificare e personalizzare il modello.

- **Settings (Impostazioni):** la sezione Settings si trova di solito nella parte destra della schermata e offre opzioni di configurazione specifiche per il componente del modello selezionato nel Model Builder. Qui si può regolare le impostazioni dettagliate del modello, come le condizioni al contorno, i parametri del solutore, e altre opzioni specifiche della fisica.
- **Graphics (Grafica):** la sezione Graphics, di solito posizionata nella parte destra o inferiore della schermata, gestisce la visualizzazione grafica del modello. Si può controllare l'aspetto della geometria, la rappresentazione dei risultati e altri aspetti visivi del modello. Questa sezione è particolarmente utile per la visualizzazione e l'analisi dei risultati della simulazione.

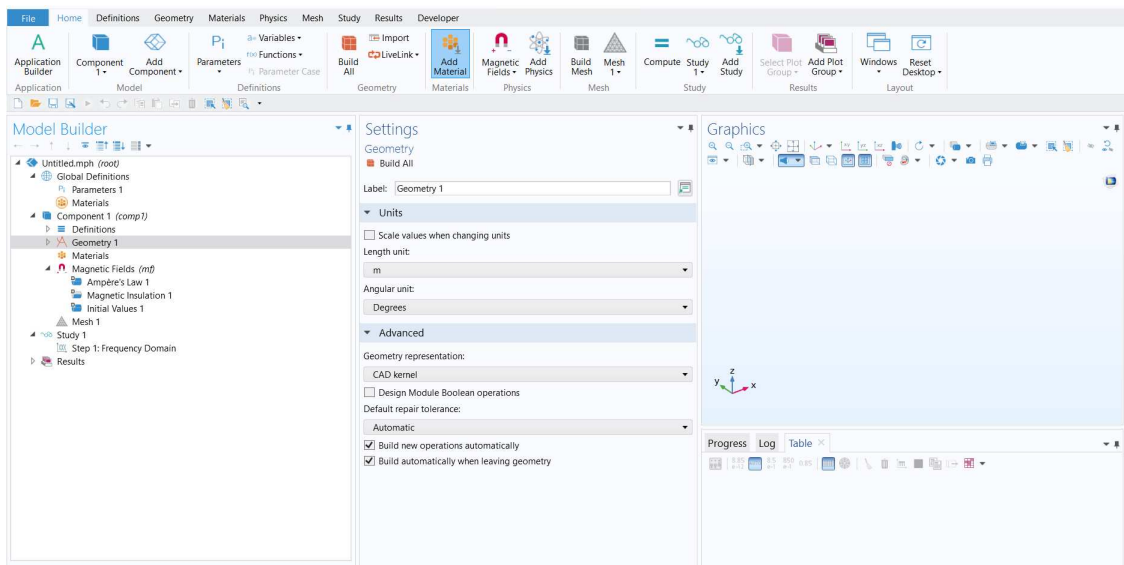


Figura 4.6: Selezione dello studio

4.3 Geometria

La geometria definisce la forma e le dimensioni del dominio di studio, cioè la regione fisica in cui si svolge il problema. Questo può essere un solido tridimensionale, una superficie bidimensionale o una linea unidimensionale, a seconda della natura del problema. La geometria è essenziale per stabilire le condizioni al contorno del problema e per la generazione delle mesh, cioè la suddivisione della regione fisica in elementi finiti.

Il primo passo che si andrà a fare è quello di decidere l'unità di misura della lunghezza e dell'angolo del modello:

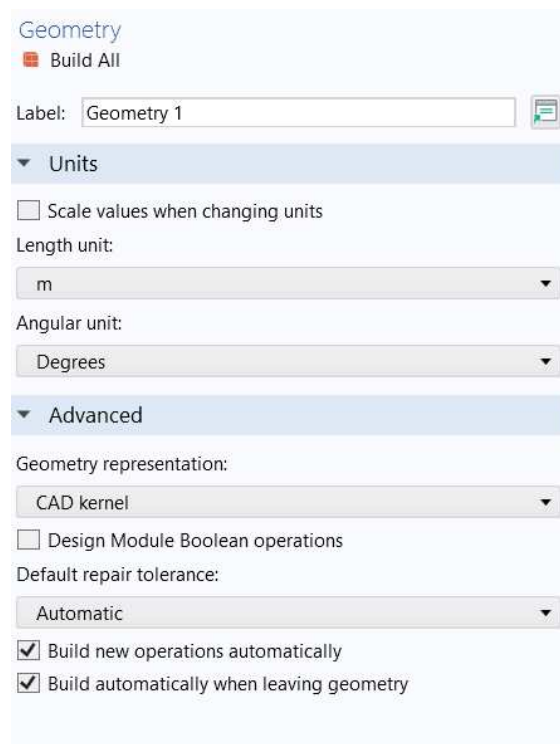


Figura 4.7: Impostazione geometria

Per comodità, l'intero modello viene modellato geometricamente attraverso il software esterno SolidWork, un software di progettazione assistita dal computer (CAD) sviluppato dalla società Dassault Systèmes [5]. È ampiamente utilizzato in ingegneria meccanica e design industriale per creare modelli tridimensionali di componenti e assemblaggi.

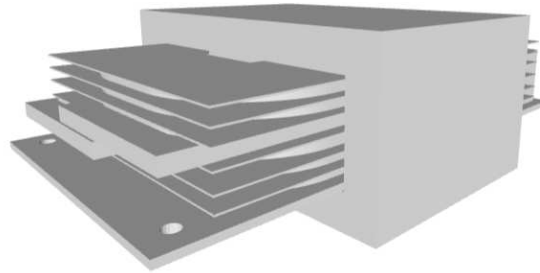


Figura 4.8: Solidwork - modello del campione in vista frontale

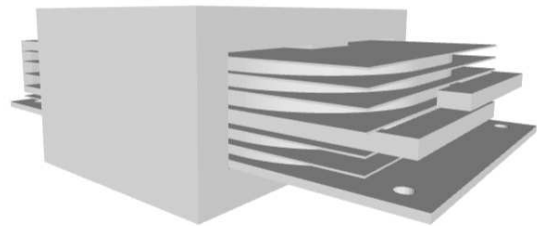


Figura 4.9: Solidwork - modello del campione in vista posteriore

Dopo aver completato la creazione del modello geometrico, è stato salvato in formato STEP, un formato ampiamente utilizzato per la modellazione e la stampa 3D ed è uno standard riconosciuto dall'ISO. Ciò ha consentito l'esportazione del modello su COMSOL.

Utilizzando l'opzione "Import" nelle impostazioni della geometria di COMSOL, si è proceduto con l'importazione del modello. Per importare il modello da un software di modellazione diverso, è stata selezionata la voce "CAD KERNEL" sotto la rappresentazione della geometria in COMSOL.

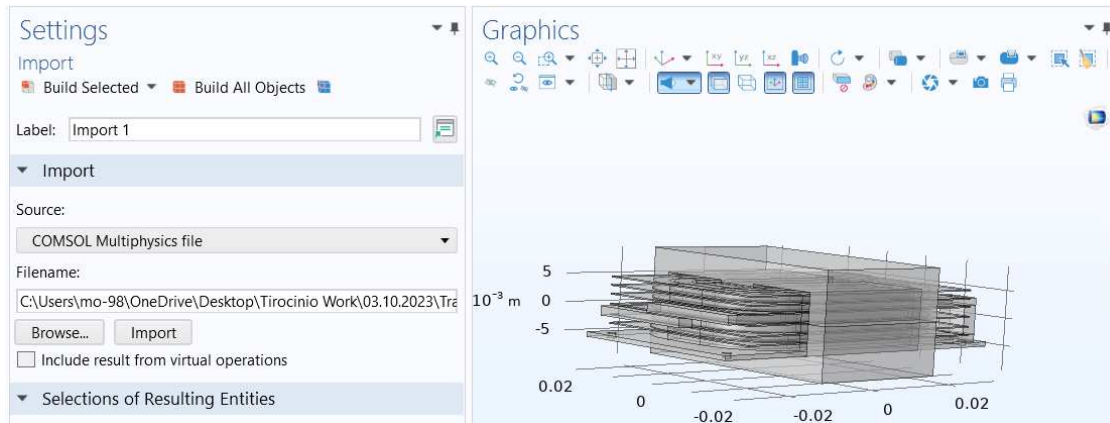


Figura 4.10: Importazione modello sul Comsol

Quando si crea un modello in COMSOL, è necessario definire la geometria del sistema che si sta studiando. Questo coinvolge la modellazione degli oggetti, delle superfici e dei volumi nello spazio tridimensionale.

È stato creato un modello di una sfera concentrica con un raggio di 0,08 metri, progettata per contenere il modello all'interno. L'uso di due sfere concentriche risulta essere una pratica comune per garantire che le condizioni al contorno siano ben definite e che il modello sia accurato. L'utilizzo di una sfera doppia o di una superficie chiusa può aiutare a definire chiaramente il dominio di simulazione e a separare il modello dell'induttore dal resto dell'ambiente circostante. In alcuni casi, potrebbe essere necessario evitare l'utilizzo di elementi infiniti in determinate regioni della simulazione per motivi computazionali o di precisione.

Questo potrebbe essere utile se, ad esempio, si vuole modellare il comportamento di un materiale non conduttivo senza la necessità di catturare dettagli molto lontani dal dominio di interesse principale del modello.

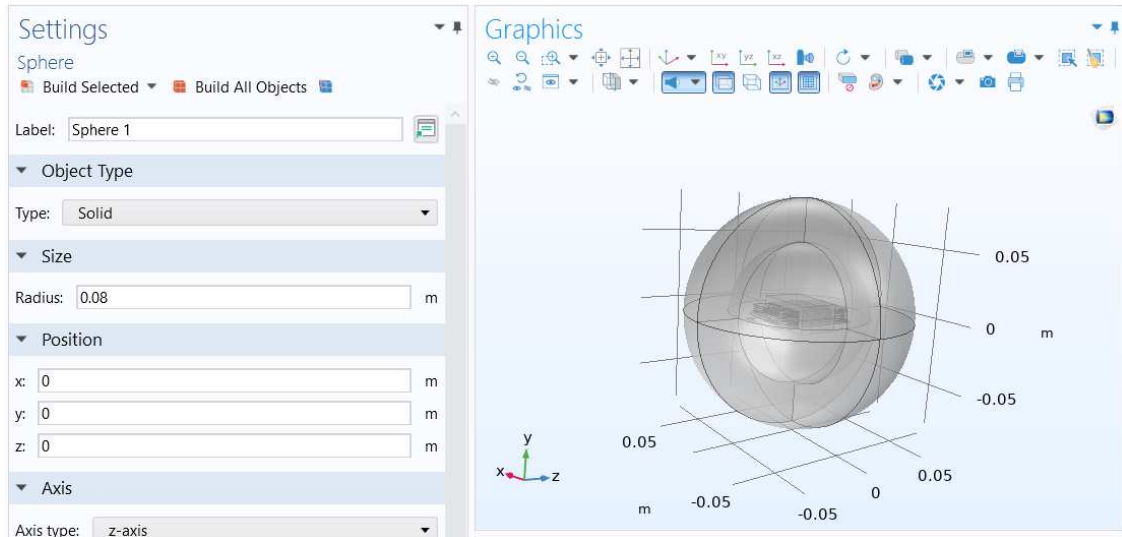


Figura 4.11: Modellazione sfera

Mediante l'utilizzo di FromUnion, è possibile consolidare il modello geometrico precedentemente creato in un'unica entità integrata.

Dopo aver creato il modello geometrico, il passo successivo è definire le sezioni fisiche del modello che sono rilevanti per lo studio successivo.

Nella sezione "Definitions", la parola "explicit" si riferisce all'impostazione della formulazione esplicita per la soluzione delle equazioni differenziali parziali (PDE) nel contesto di un solutore specifico, utilizzate in seguito nella sezione dei materiali e dei campi magnetici.

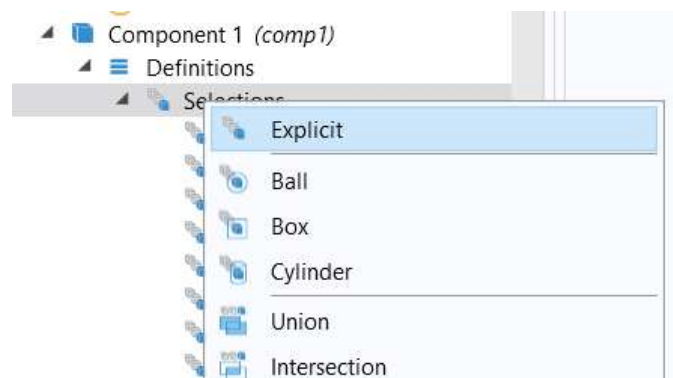


Figura 4.12: Sezioni esplicite

Le sezioni fisiche principali create includono:

- **Winding:** l'avvolgimento formato da una serie di spire di un conduttore (solitamente filo) intorno a un nucleo.

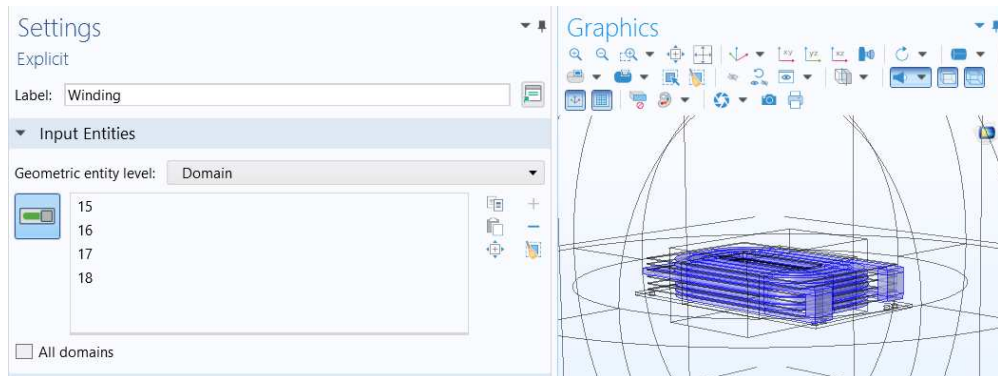


Figura 4.13: Winding

- **Core:** nucleo magnetico del componente. Selezionato il nucleo.

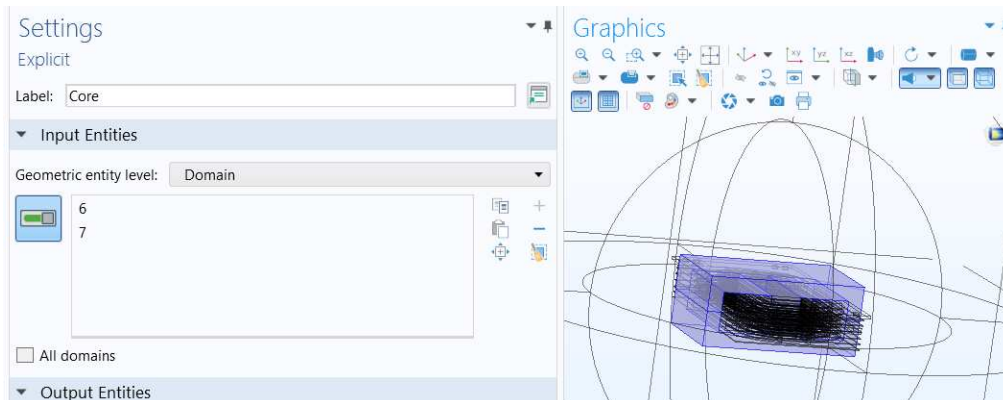


Figura 4.14: Core

- **Gap:** spazio di separazione utilizzato per l'alimentazione.

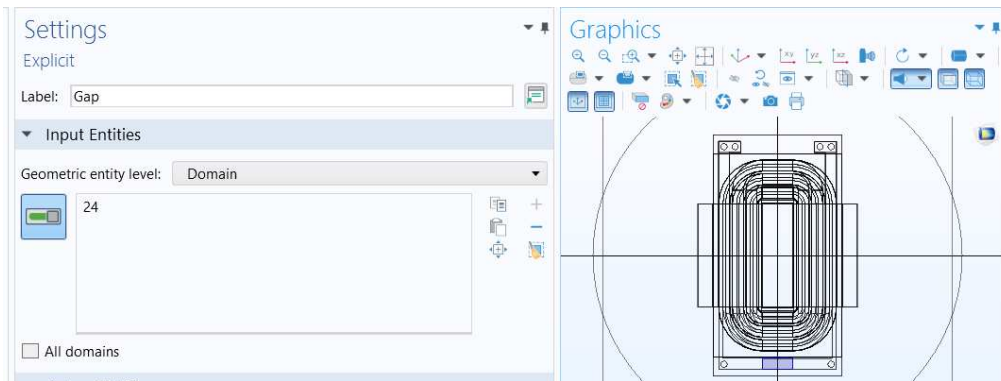


Figura 4.15: Gap

- **Infinite elements:** spazio che delimita il modello. Selezionato la sfera che racchiude il modello.

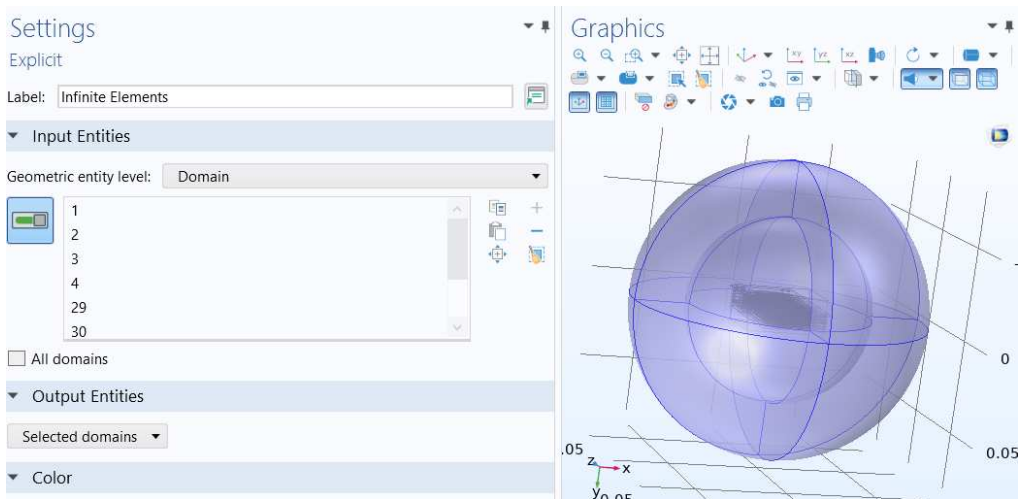


Figura 4.16: Infinite Elements

- **Nonconducting:** materiali non conduttivi o isolanti elettrici sono quelli che hanno una bassa conducibilità elettrica. Selezionato la sfera, il nucleo e lo spazio di separazione (gap).

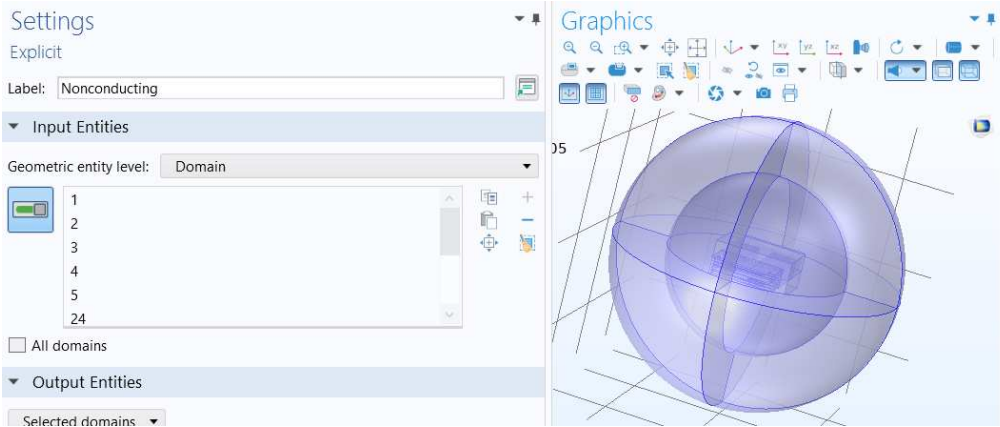


Figura 4.17: Nonconducting

- **Insulating:** isolante. Selezionati i pannelli isolanti tra le spire.

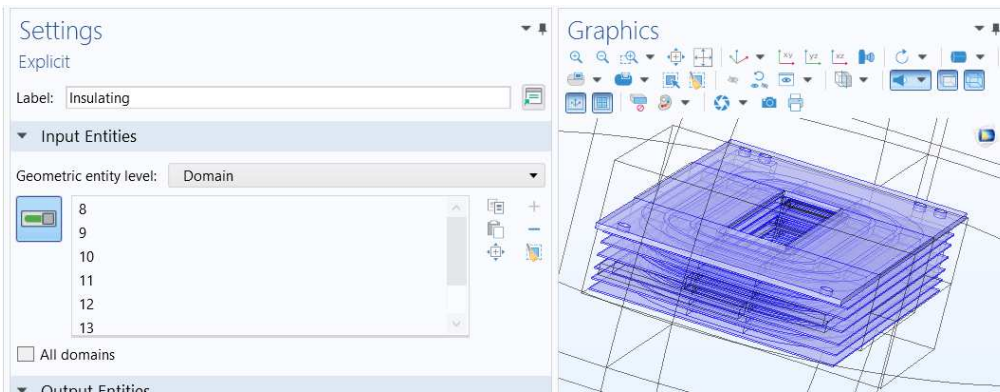


Figura 4.18: Insulating

- **Conductor Boundaries:** bordi conduttori. Nel processo di modellazione dell'induttore all'interno di COMSOL Multiphysics, è imperativo individuare con precisione le regioni all'interno della geometria che agiscono come conduttori. Questa fase di identificazione riveste particolare importanza poiché le proprietà conduttive dell'avvolgimento delle spire e del nucleo esercitano un'immediata influenza sul flusso di corrente elettromagnetica. L'opzione "Conductor Boundaries" è stata impiegata per attribuire a specifici bordi della geometria la proprietà di comportarsi come conduttori. In termini più precisi, tale scelta ha indicato al software le parti dell'induttore che permettono il libero passaggio della corrente.

Successivamente, è stato effettuato un riconoscimento specifico dei bordi delle spire tramite la voce "Exterior Boundaries". Questa selezione ha chiaramente definito le spire dell'avvolgimento come componenti esterne rispetto al nucleo. In pratica, si è comunicato al software che questi bordi delle spire rappresentano la superficie attraverso la quale la corrente entra o esce dall'induttore.

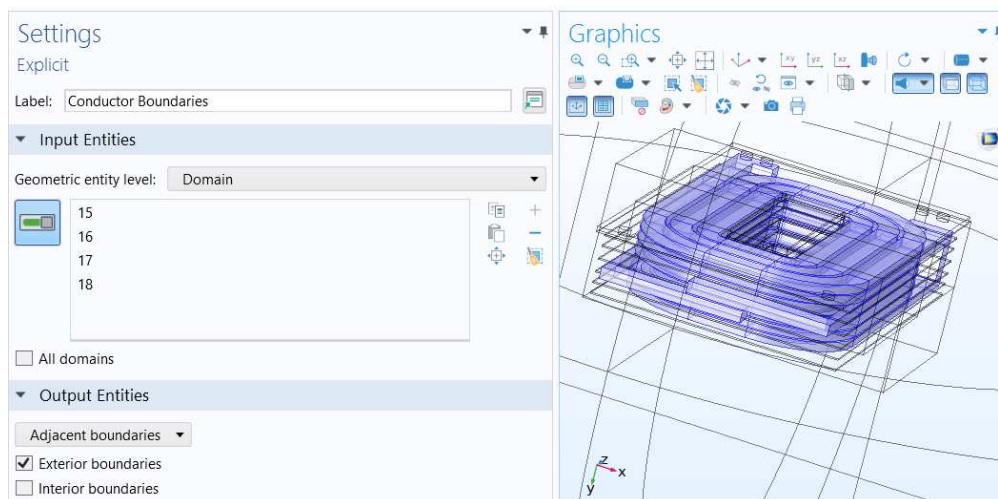


Figura 4.19: Conductor Boundaries

La scelta di designare "Exterior Boundaries" per l'avvolgimento di un induttore in COMSOL Multiphysics è guidata dalla considerazione della direzione del flusso di corrente elettromagnetica, nonché dalla definizione del percorso attraverso il quale la corrente entra o esce dall'avvolgimento. All'interno del contesto dell'avvolgimento di un induttore, è una prassi comune concepire l'avvolgimento stesso come una superficie esterna, attraverso la quale la corrente penetra o si disperde. Ciò riflette spesso la realtà operativa degli induttori, dove la corrente può essere introdotta in modo specifico attraverso un punto particolare dell'avvolgimento, seguendo poi un percorso continuo tra le spire. Analogamente, la corrente può fuoriuscire attraverso un punto diverso lungo l'avvolgimento.

- **Nonconducting without IE:** nonostante il materiale sia non conduttivo, la simulazione non utilizzerà elementi infiniti. Sono stati selezionati come non conduttivi i seguenti elementi, ovvero la sfera interna, il nucleo e i pannelli isolanti.

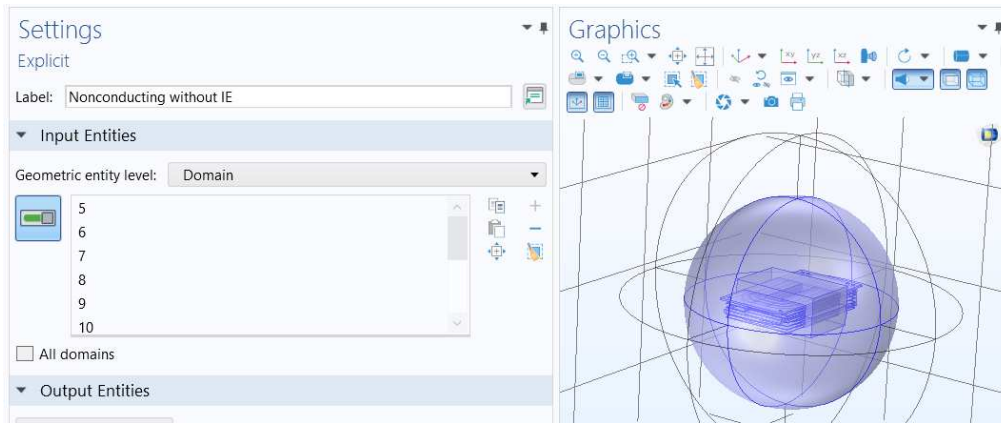


Figura 4.20: Nonconducting without IE

4.4 Materiali

La sezione "Material" in COMSOL Multiphysics è fondamentale per definire le proprietà dei materiali utilizzati nel modello di simulazione. Attraverso questa sezione, sono state specificate le caratteristiche fisiche e termiche dei materiali presenti nel dominio di analisi. Le principali funzioni e informazioni che si può ottenere nella sezione "Material" sono le seguenti:

- **Proprietà del Materiale:** vengono specificate varie proprietà del materiale, tra cui la densità, la conducibilità termica, la capacità termica, la permeabilità magnetica, la conduttività elettrica, la costante dielettrica, ecc. Queste proprietà sono essenziali per modellare il comportamento termico, elettrico e magnetico del materiale nel sistema.
- **Dipendenza dalla Temperatura:** implementando una dipendenza delle proprietà del materiale dalla temperatura nel modello, si consente una modellazione più precisa e dettagliata dei fenomeni che coinvolgono variazioni termiche. Questa approfondita considerazione della variazione delle proprietà materiali in funzione della temperatura contribuisce a una rappresentazione più accurata e realistica dei comportamenti termici nel contesto dell'analisi.
- **Comportamento Non Lineare:** modellare materiali con comportamento non lineare, come ad esempio per la conducibilità elettrica, potrebbe essere cruciale in situazioni in cui le proprietà del materiale variano in modo significativo con il campo applicato o altri parametri.
- **Dipendenza dalla Frequenza:** possibilità di impostare la dipendenza delle proprietà dei materiali dalla frequenza in modelli che coinvolgono materiali dielettrici o

magnetici. Questo è particolarmente importante quando si affrontano fenomeni elettromagnetici che variano con la frequenza, come nel caso di onde elettromagnetiche, polarizzazione dielettrica, o perdite dielettriche.

- **Proprietà Anisotrope:** nel caso in cui il materiale sia anisotropo, è possibile specificare la sua anisotropia attraverso la definizione di una matrice delle proprietà che riflette le variazioni direzionali. Questo approccio consente di catturare accuratamente le differenze nelle proprietà del materiale lungo diverse direzioni, fornendo una rappresentazione dettagliata e orientata nella simulazione del comportamento del materiale in contesti reali e complessi.
- **Parametri Personalizzati:** Comsol Multiphysics offre un alto grado di flessibilità nella modellazione attraverso la possibilità di definire parametri personalizzati. Questa caratteristica consente agli utenti di adattare il modello in modo preciso alle caratteristiche specifiche del materiale o alle condizioni di simulazione, migliorando la capacità di rispondere a esigenze particolari e di condurre analisi dettagliate e personalizzate.
- **Proprietà Magnetiche Avanzate:** Per materiali magnetici, si potrebbe approfondire la specificazione delle proprietà magnetiche, come la permeabilità magnetica in funzione della magnetizzazione.
- **Librerie di Materiali:** Comsol Multiphysics semplifica il processo di modellazione fornendo librerie di materiali predefinite che contengono le proprietà di numerosi materiali comuni. Gli utenti hanno la flessibilità di scegliere un materiale direttamente dalla libreria o di personalizzare le proprietà del materiale per soddisfare le esigenze specifiche del loro modello. Questa versatilità consente una modellazione precisa e adattabile a una vasta gamma di scenari di simulazione.

Per la modellazione di materiali dielettrici o magnetici, la capacità di definire la dipendenza delle proprietà, come la permittività dielettrica o la permeabilità magnetica, in funzione della frequenza consente di catturare in modo accurato il comportamento del materiale in risposta a variazioni di frequenza. Questa funzionalità è cruciale per simulazioni dettagliate di fenomeni elettromagnetici, garantendo una rappresentazione più completa e realistica dei comportamenti del materiale in diverse condizioni di frequenza.

Si procede ora con la dettagliata delineazione dei materiali che si andrà ad impiegare nel contesto del modello di studio:

- **Air:** il materiale in questione è rappresentato dall'aria, la quale presenta peculiarità sia dal punto di vista fisico che chimico. Il suo utilizzo è finalizzato a occupare e delimitare lo spazio all'interno della sfera concentrica, contribuendo così alle dinamiche e alle interazioni nell'ambito del modello. Viene selezionata quindi la doppia sfera concentrica.

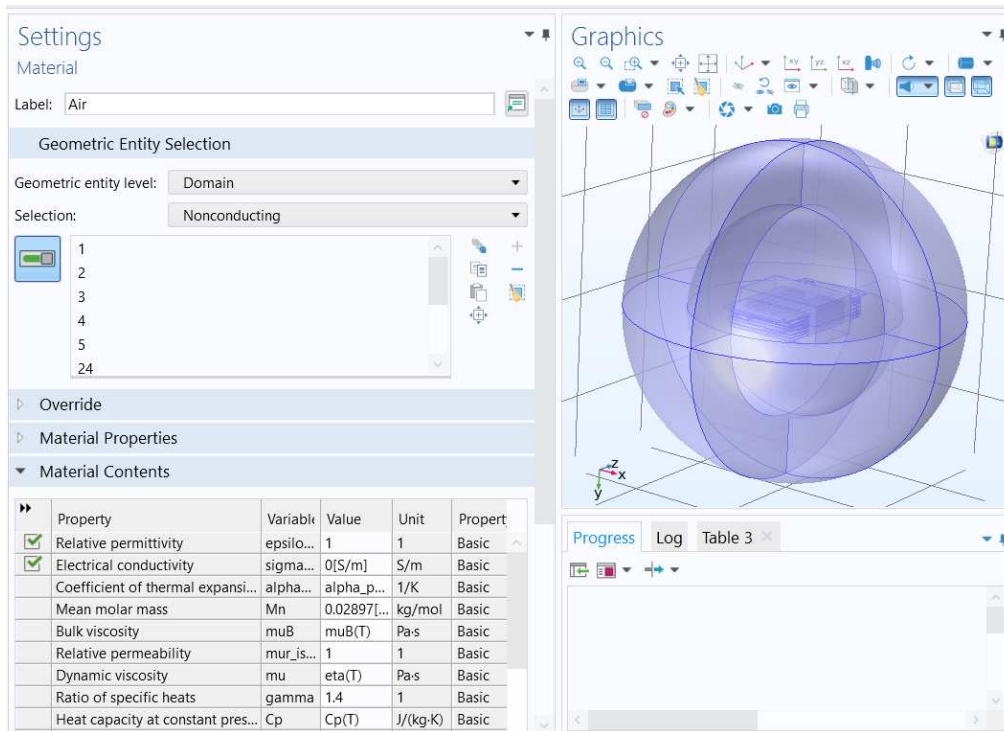


Figura 4.21: Air

- **Copper:** Il materiale adottato per costituire le spire del modello è il rame, una scelta ponderata basata su ragioni precedentemente approfondite nei capitoli precedenti della tesi. Selezionato tutto l'avvolgimento del modello introno al nucleo.

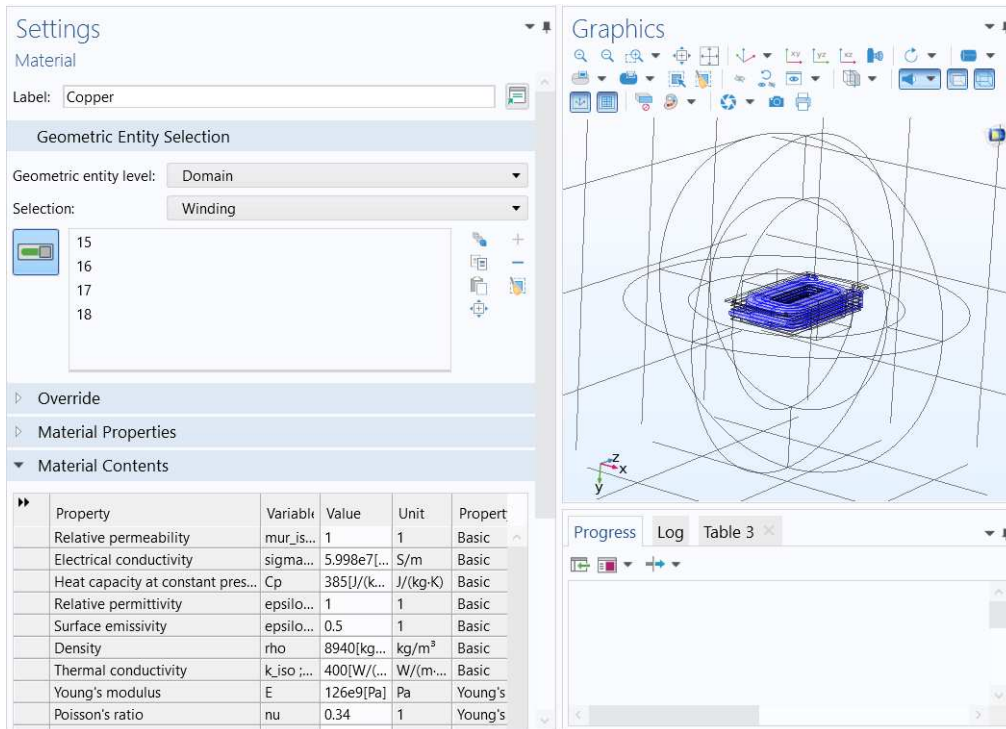


Figura 4.22: Copper

- **Ferrite:** un tipo di materiale ceramico magnetico composto principalmente da ossido di ferro (Fe_2O_3) con altri elementi come nichel, zinco o manganese. Questi materiali magnetici sono noti per le loro proprietà di ritenzione del campo magnetico e vengono spesso utilizzati in applicazioni come i nuclei di trasformatori, induttori, e dispositivi di memoria magnetica. Le ferriti presentano una bassa conduttività elettrica, il che le rende adatte per applicazioni in cui è desiderabile minimizzare le correnti parassite. Nel modello è stata utilizzata come materiale del nucleo.

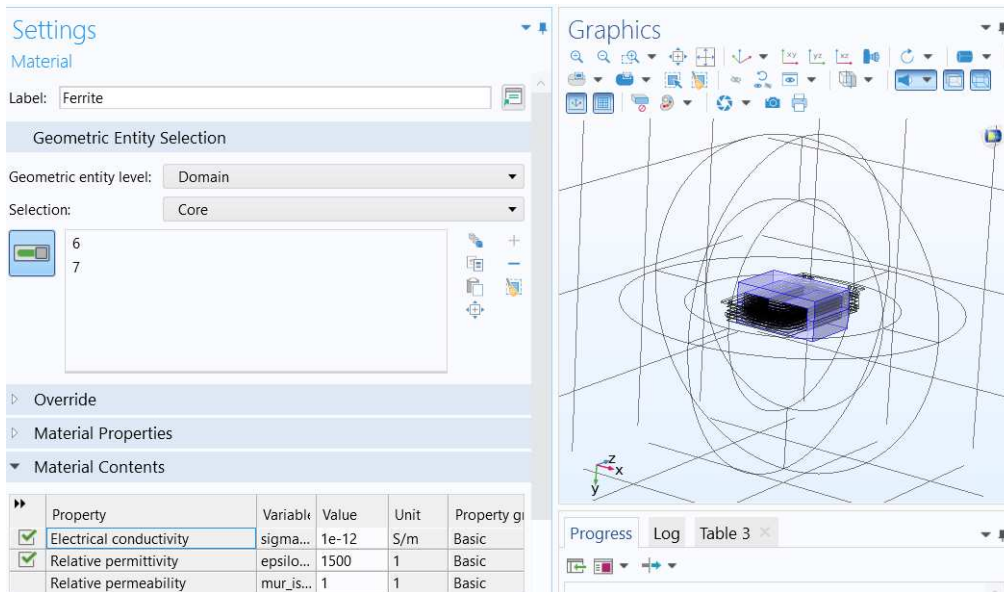


Figura 4.23: Ferrite

- **Kapton:** materiale polimero noto per le sue eccellenti proprietà termiche, chimiche e elettriche. Utilizzato nel modello per i pannelli isolanti immersi tra gli avvolgimenti delle spire.

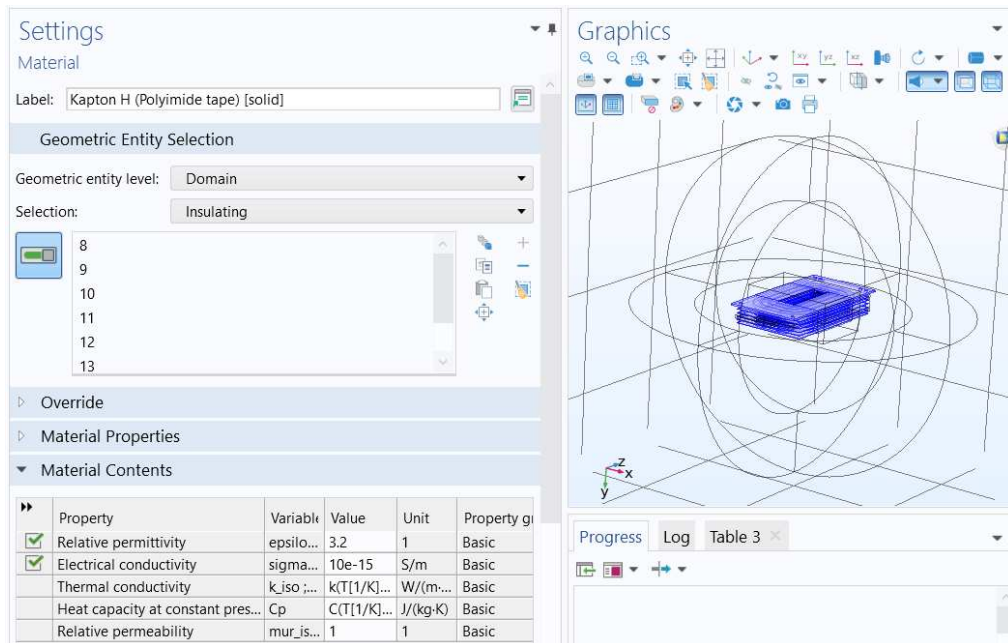


Figura 4.24: Kapton

Selezionando la voce del materiale interessato è possibile aprire una seconda finestra in cui vengono illustrati tutti i valori delle caratteristiche e delle proprietà magnetiche ed elettriche dei singoli materiali. Tali caratteristiche possono essere modificate dall'utente in base alle sue esigenze.

Le proprietà fondamentali utilizzate nel modello sono le seguenti:

- **Relative Permeability (Permeabilità Relativa):** la permeabilità relativa rappresenta una misura della capacità di un materiale nel sostenere o respingere campi magnetici. Un valore di permeabilità relativa superiore a 1 indica che il materiale amplifica il campo magnetico, mentre un valore inferiore a 1 indica un materiale che lo attenua. Nel caso del vuoto o dell'aria, la permeabilità relativa è pari a 1.
- **Electrical Conductivity (Conducibilità Elettrica):** La conducibilità elettrica è una grandezza che riflette la capacità di un materiale di condurre corrente elettrica. I materiali conduttori, come i metalli, presentano una elevata conducibilità elettrica, mentre i materiali isolanti ne manifestano una bassa. Comunemente espressa in ohm per metro, la conducibilità elettrica è un parametro cruciale per valutare le proprietà elettriche di un dato materiale.
- **Relative Permittivity (Permittività Relativa o Costante Dielettrica):** La permittività relativa costituisce una misura della capacità di un materiale di reagire a un campo

elettrico applicato, indicando la sua suscettibilità alla polarizzazione sotto l'influenza di un campo elettrico esterno. Un materiale con permittività relativa superiore a 1 viene denominato dielettrico, in grado di immagazzinare carica elettrica. Al contrario, un materiale con permittività relativa pari a 1 corrisponde al vuoto (aria). La permittività relativa è comunemente rappresentata con il simbolo ϵ_r .

4.5 Campi magnetici

La sezione "Campi Magnetici" in Comsol Multiphysics è dedicata alla modellazione e all'analisi di problematiche legate ai campi magnetici. Questa sezione mette a disposizione gli strumenti essenziali per risolvere questioni relative alla magnetostatica e alla dinamica magnetica all'interno dell'ambiente di simulazione offerto da Comsol.

Nel contesto del modello in esame, si adopera la seguente relazione matematica:

- **Ampère's Law 1:** in questa sezione vengono impostate le condizioni di Ampère's Law per modellare il comportamento magnetico dell'induttore. Ciò include la definizione delle correnti e delle geometrie coinvolte e l'applicazione della legge di Ampère per calcolare il campo magnetico.

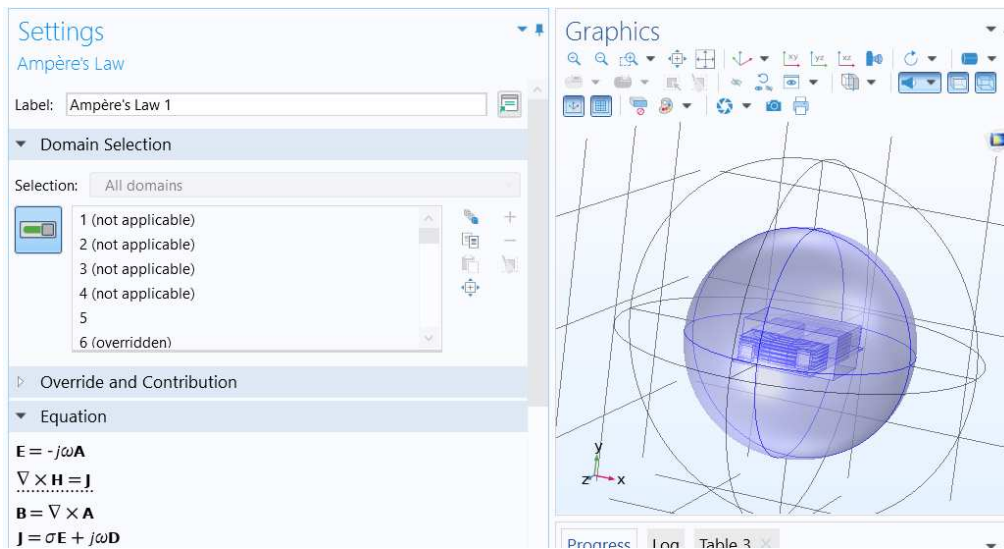


Figura 4.25: Ampère's Law 1

- **Ampère's Law 2:** anche in questa sezione vengono applicate la legge di Ampère a una regione specifica del modello, la regione specifica è il nucleo magnetico.

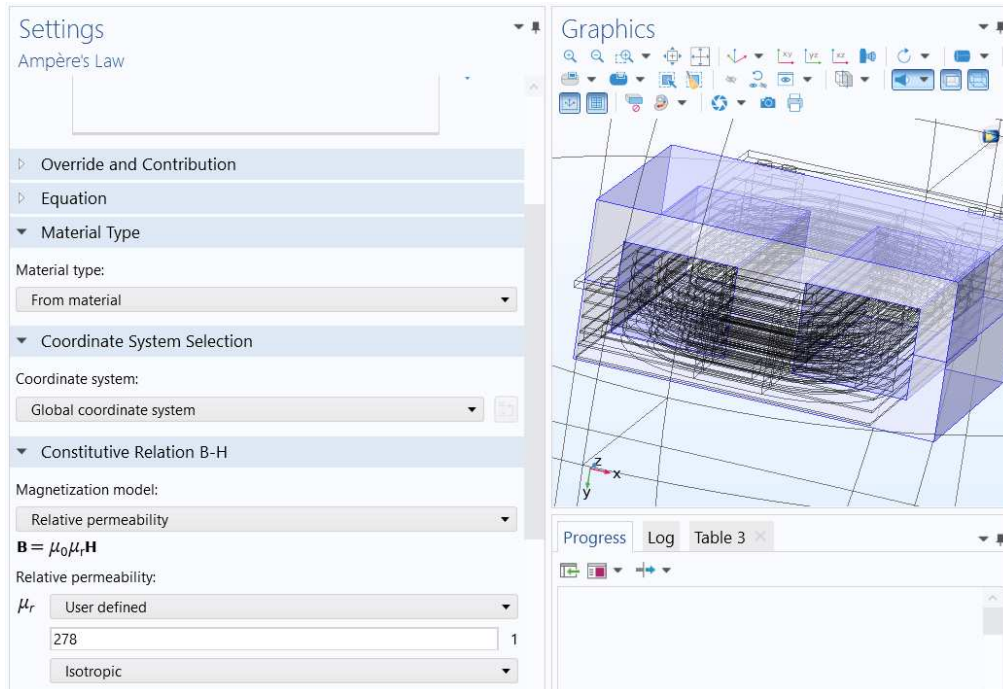


Figura 4.26: Ampère's Law 2

Nella sezione dedicata all'applicazione delle leggi di Ampère nel modello su COMSOL Multiphysics, è stata implementata una suddivisione in due parti, denominata Ampère's Law 1 e Ampère's Law 2, al fine di riflettere con precisione differenti aspetti del comportamento magnetico dell'induttore. La distinzione tra Ampère's Law 1 e Ampère's Law 2 nel contesto del modello su COMSOL è legata alla suddivisione delle regioni in cui la legge di Ampère viene applicata, alle geometrie coinvolte, come verrà spiegato nel paragrafo seguente.

- **Magnetic Insulation 1:** la "Magnetic Insulation" si riferisce alla capacità di isolare il campo magnetico in determinate regioni del modello. Può essere impiegata per rappresentare regioni in cui il flusso magnetico è completamente isolato

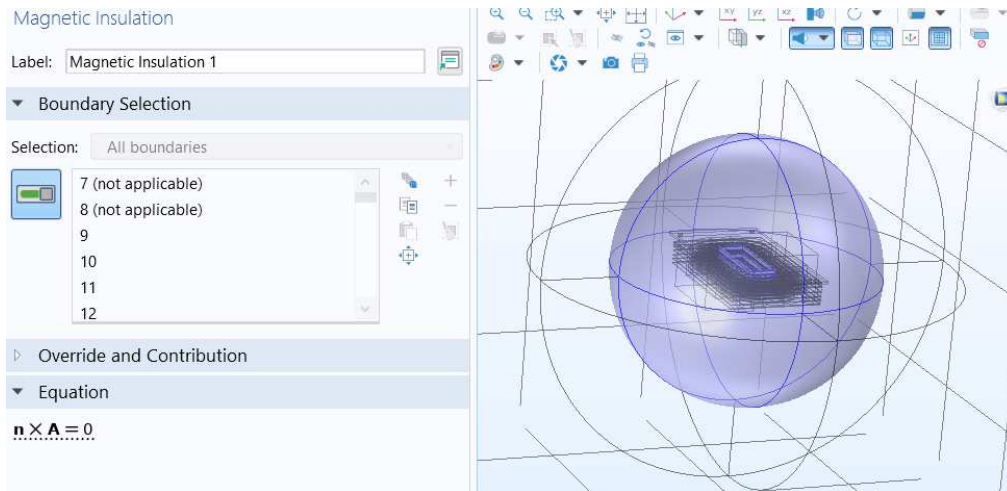


Figura 4.27: Magnetic Insulation 1

- **Initial Values 1:** questa sezione è utilizzata per specificare i valori iniziali delle variabili all'interno del modello. Se si sta affrontando un problema dinamico, è possibile specificare le condizioni iniziali per il campo magnetico o altre grandezze rilevanti. Questa sezione è particolarmente rilevante quando si sta simulando un processo transitorio o quando le condizioni iniziali del sistema sono cruciali per la simulazione.

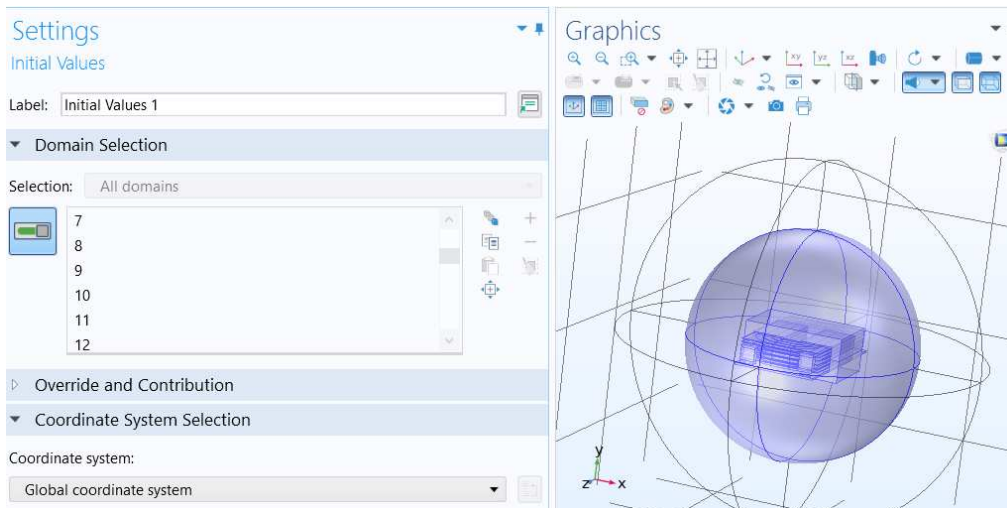


Figura 4.28: Initial Values 1

- **Impedance Boundary Condition 1:** la condizione di bordo di impedenza (Impedance Boundary Condition) è una condizione che si può utilizzare in COMSOL per modellare l'interazione tra un dominio e un ambiente circostante. Questa condizione di bordo è spesso utilizzata per rappresentare il comportamento di una superficie in cui le onde elettromagnetiche o acustiche si riflettono. In questo studio, è stata utilizzata la condizione di bordo relativa agli avvolgimenti della spira di rame intorno al nucleo.

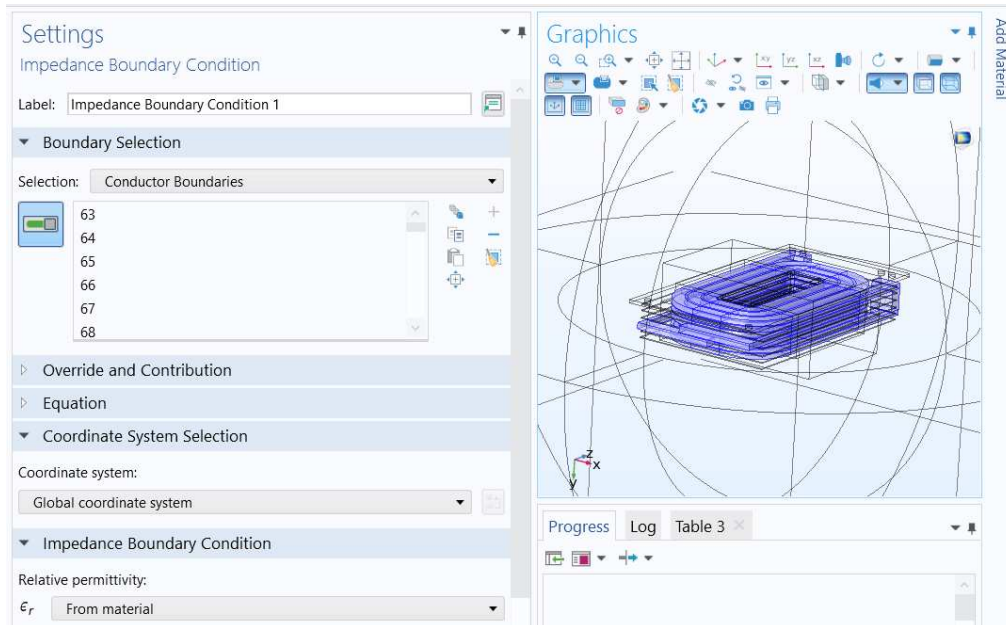


Figura 4.29: Impedance Boundary Condition 1

- **Lumped Port 1:** la "Lumped Port" rappresenta una funzionalità in COMSOL Multiphysics che facilita la modellazione e l'analisi dei comportamenti di trasmissione e riflessione delle onde elettromagnetiche o acustiche tramite connessioni di tipo porto. Nel contesto di COMSOL Multiphysics, un "porto" è una sorta di interfaccia attraverso la quale avviene l'interazione con un sistema esterno o un'altra parte del modello. Una "connessione di tipo porto" si riferisce alla configurazione di un punto specifico nel modello come un'entità di interfaccia, spesso associata a condizioni di contorno o specifiche di impedenza. Nel contesto di COMSOL Multiphysics, un "porto" è una sorta di interfaccia attraverso la quale avviene l'interazione con un sistema esterno o un'altra parte del modello. Una "connessione di tipo porto" si riferisce alla configurazione di un punto specifico nel modello come un'entità di interfaccia, spesso associata a condizioni di contorno o specifiche di impedenza. In questo modello, questa sezione indica la presenza di un porto concentrato in una specifica regione del dominio. Quando il segnale attraversa questa "lumped port", il software utilizza l'impedenza specificata per calcolare il comportamento del segnale in quella parte del modello.

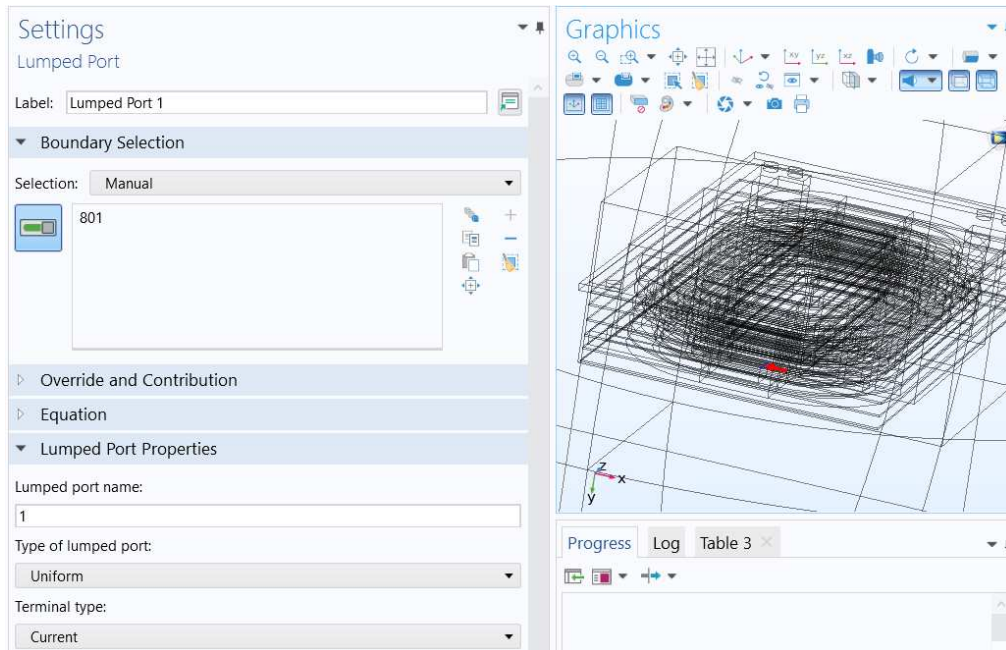


Figura 4.30: Lumped Port 1

- **Coil 1:** questa sezione è stata utilizzata all'inizio per un test di prova con uno studio stazionario, cercando di modellare una bobina. Le bobine sono spesso utilizzate per generare campi magnetici o indurre correnti in applicazioni che vanno dalla progettazione di trasformatori alla simulazione di sensori elettromagnetici.

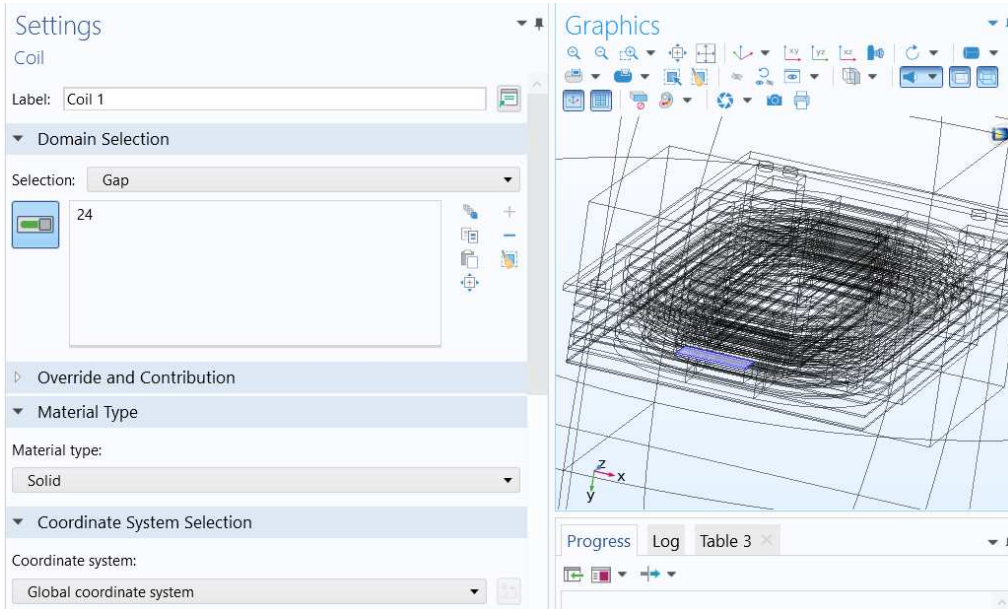


Figura 4.31: Coil 1

Nella schermata delle impostazioni della **Ampère's Law** la voce **Constitutive Relation B-H** indica la relazione magnetica, descrive il comportamento magnetico di un materiale in risposta a un campo magnetico. Essa collega il campo magnetico \mathbf{H} (l'intensità del campo magnetico) e il flusso magnetico \mathbf{B} (la densità di flusso magnetico).

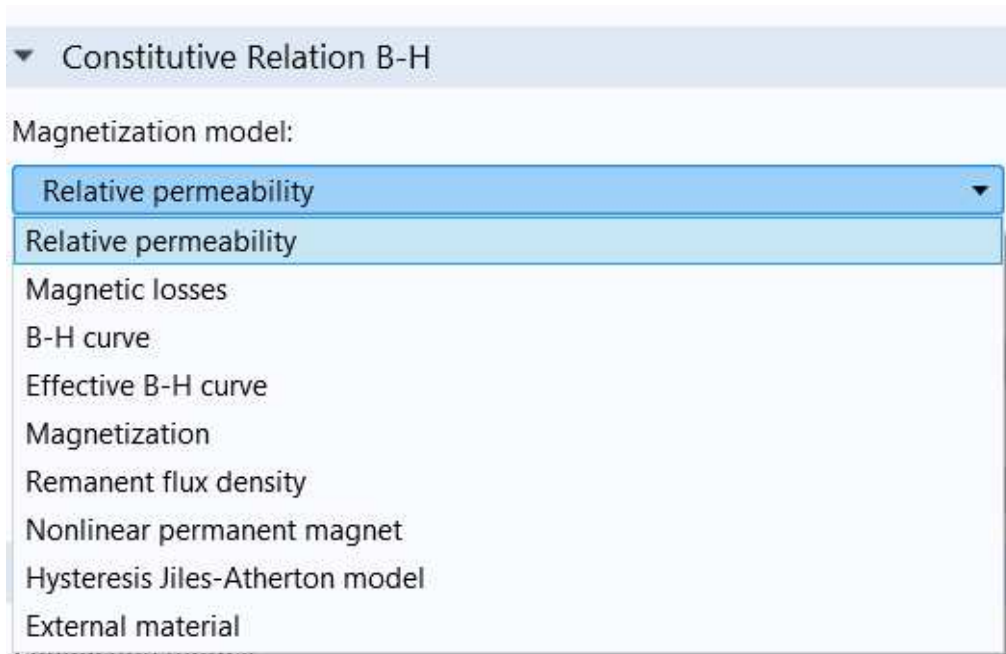


Figura 4.32: Model B-H

Per "Ampère's Law 1", è stato configurato il modello considerando l'effetto delle perdite magnetiche attraverso l'inserimento della permeabilità magnetica con perdite. Tale scelta di modellazione tiene conto di fenomeni come l'isteresi magnetica e le correnti parassite, generando calore a causa delle resistenze intrinseche del materiale magnetico. Il modello magnetico associato a questa legge considera parametri come la perdita specifica, rendendo così possibile una rappresentazione accurata delle caratteristiche di perdita magnetiche del materiale.

Per "Ampère's Law 2", è stata focalizzata l'applicazione della legge di Ampère su una regione specifica del modello, ovvero il nucleo magnetico. In questa sezione, è stata inserita la permeabilità relativa nel modello magnetico per riflettere la capacità del materiale del nucleo di aumentare la permeabilità magnetica rispetto al vuoto. Tale scelta di modello mira a considerare come il materiale del nucleo modifica la risposta magnetica, concentrandosi sulla sua capacità di amplificare il campo magnetico. Questa distinzione è stata adottata al fine di catturare dettagli specifici del comportamento magnetico in diverse regioni dell'induttore, garantendo così una rappresentazione accurata delle caratteristiche magnetiche globali e locali.

Selezionando il menu a tendina sarà possibile scegliere il modello di tale relazione nei seguenti prototipi di modellazione della curva magnetica B-H:

- **Magnetic Losses (Perdite Magnetiche):** rappresentano l'energia dissipata sotto forma di calore durante il ciclo magnetico. Queste perdite possono derivare da effetti isteretici nei materiali magnetici, correnti parassite o altri meccanismi di dissipazione di energia. Nel modello questa sezione è stata utilizzata nell'equazione *Ampere Law 1*, selezionando l'intero modello escludendo lo spazio intorno (l'aria).

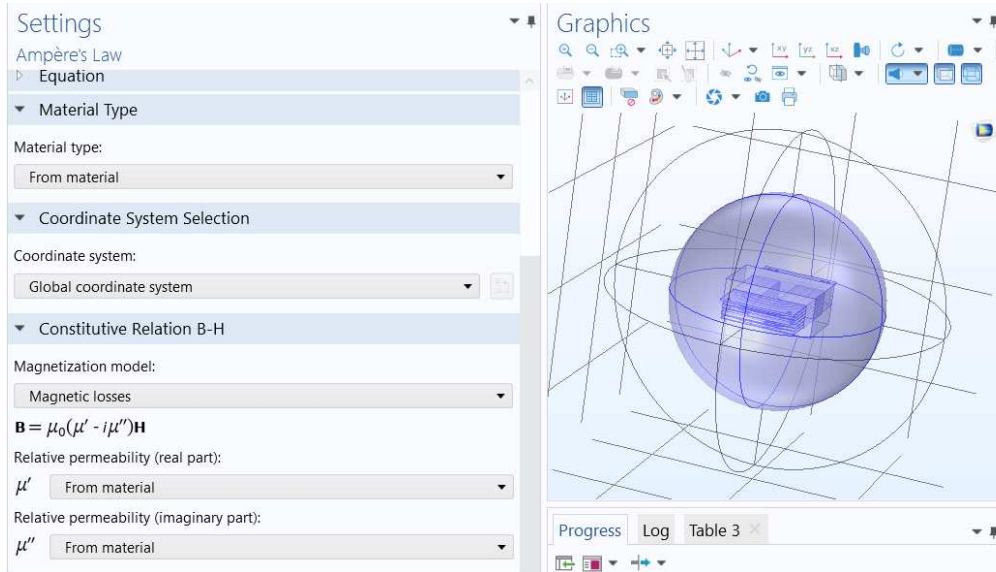


Figura 4.33: Magnetic Losses

- **Relative Permeability (Permeabilità Relativa):** indica quanto un materiale può essere permeato dal campo magnetico rispetto al vuoto (spazio libero). È un fattore che caratterizza la risposta magnetica del materiale, come è stato spiegato nei capitoli precedenti. Nel modello studiato, questa sezione è stata utilizzata nell'equazione *Ampere Law 2*, selezionando soltanto il nucleo ed inserendo a mano la permeabilità relativa ricavata nei test in laboratorio.

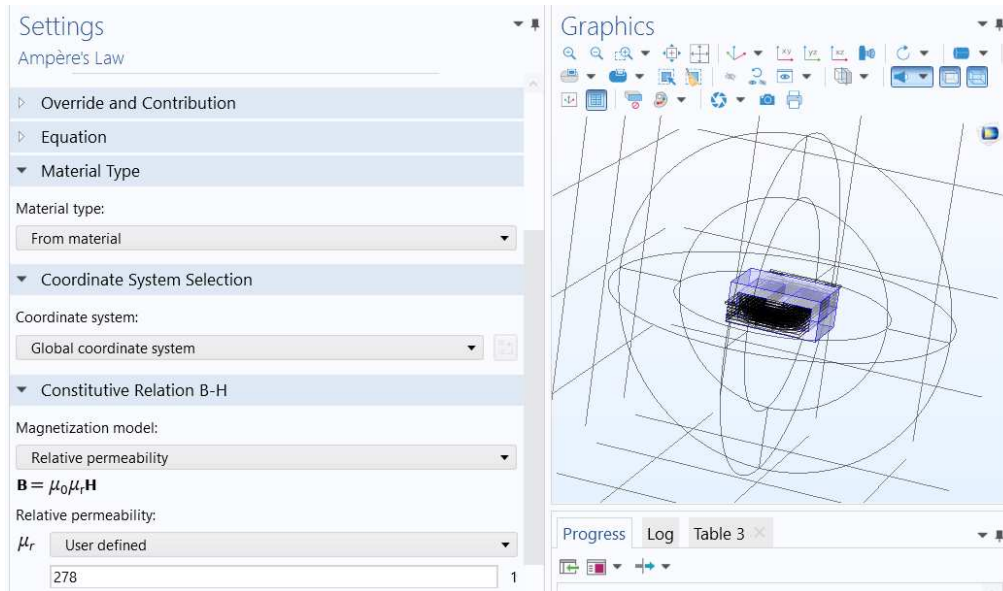


Figura 4.34: Relative Permeability

- **B-H Curve (Curva B-H):** rappresenta la relazione tra il campo magnetico (B) e l'intensità di campo magnetico (H) in un materiale. È una caratteristica fondamentale che descrive come il materiale risponde a un campo magnetico esterno. L'aspetto della curva B-H può variare a seconda del materiale.
- **Effective B-H (B-H Efficace):** è la curva B-H risultante dalla combinazione di più materiali magnetici presenti nel sistema. Ad esempio, se l'induttore è costituito da diversi strati di materiali magnetici con diverse proprietà, l'effettiva curva B-H è la combinazione di queste curve.
- **Magnetization (Magnetizzazione):** rappresenta la magnetizzazione del materiale, ovvero la densità di momento magnetico. È spesso legato al campo magnetico attraverso la relazione $\mathbf{M} = \chi \mathbf{H}$, dove M è la magnetizzazione, χ è la suscettibilità magnetica e H è l'intensità del campo magnetico.
- **Remanent Flux Density (Densità di Flusso Residuo):** indica il flusso magnetico rimanente in un materiale magnetico dopo che il campo magnetico esterno è stato annullato. In altre parole, è la magnetizzazione residua del materiale quando l'intensità del campo magnetico torna a zero.

- **Nonlinear Permeant Magnetic (Magnetico Permeante Non Lineare):** si riferisce a materiali magnetici il cui comportamento non può essere descritto in modo lineare dalla legge di Ampère. Molti materiali magnetici mostrano un comportamento non lineare, specialmente a intensità di campo magnetico elevate.
- **Hysteresis Jiles-Atherton Model (Modello di Isteresi Jiles-Atherton):** è un modello matematico che descrive il fenomeno dell'isteresi magnetica in materiali ferromagnetici. Questo modello è basato sull'equazione di Landau-Lifshitz-Gilbert e tiene conto di diversi parametri per rappresentare le caratteristiche dell'isteresi magnetica, come il ritardo di magnetizzazione e la perdita di energia.
- **External Material (Materiale Esterno):** si riferisce a materiali che circondano o interagiscono con la regione di interesse. Ad esempio, se si sta modellando un induttore, il "materiale esterno" potrebbe essere l'aria o un altro materiale circostante che può influenzare il campo magnetico nell'induttore.

4.6 Mesh

In COMSOL Multiphysics, la sezione "Mesh" è dedicata alla definizione e alla configurazione della griglia di mesh, che è fondamentale per la precisione e l'efficienza delle simulazioni. La griglia di mesh suddivide il dominio del modello in elementi più piccoli per consentire la soluzione numerica delle equazioni che descrivono il comportamento del sistema.

La sezione "*Mesh*" comprende diverse opzioni per controllare la generazione e la gestione della mesh nel modello.

Tra queste:

- **Physics-Controlled Mesh:** in questa opzione, COMSOL cerca automaticamente di generare una mesh ottimale in base alle specifiche della fisica del modello. Le regole di meshing vengono determinate in base alle caratteristiche fisiche del problema, e il software si impegna a generare una mesh coerente con queste regole. Questo è spesso il modo più semplice per gestire la mesh, poiché la responsabilità della definizione della mesh è affidata al software in base alla fisica del problema. Nel modello è stata scelta questa opzione, selezionando l'opzione "*Fine*" per la dimensione degli elementi, aumentando il tempo di calcolo computazionale in proporzione all'aumento della precisione e dell'accuratezza del modello.

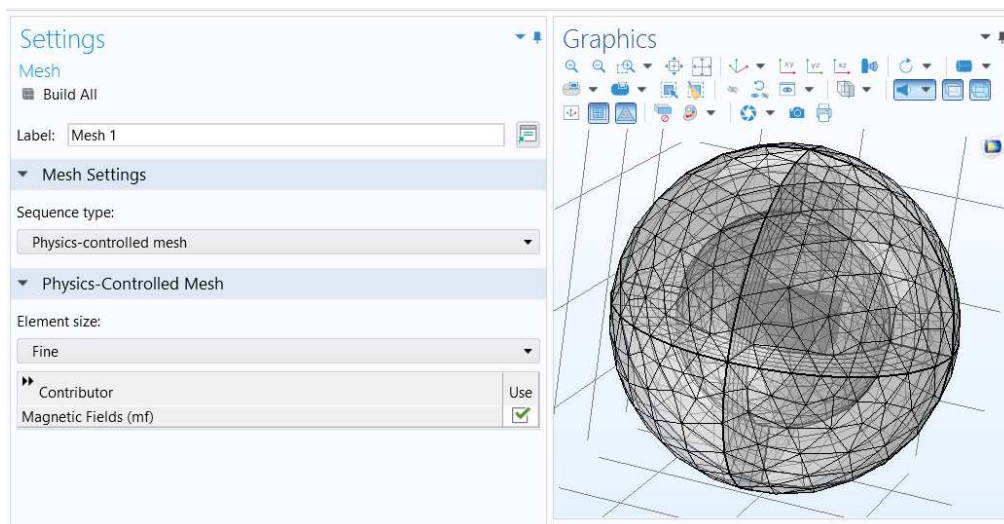


Figura 4.35: Mesh

- **User-Controlled Mesh:** in questa opzione, l'utente ha maggiore controllo sulla definizione della mesh. Può specificare manualmente i parametri di meshing, come la dimensione degli elementi, il raffinamento locale e altre opzioni di meshing. Questo dà all'utente un controllo più diretto sulla qualità e la precisione della mesh, ma richiede anche una maggiore comprensione della fisica del problema e della meshing.

Il modello risulta essere completo; ora si può procedere con la scelta del tipo di analisi da adottare per lo studio condotto.

4.7 Studio

La scelta del tipo di studio dipende dalla natura del problema che si sta affrontando e dalla dinamica temporale o frequenziale delle condizioni nel sistema. La sezione "*Tipo di Studio*" fornisce la flessibilità necessaria per adattare la simulazione alle specifiche esigenze dell'applicazione. Questa sezione offre opzioni diverse, ciascuna progettata per soddisfare esigenze specifiche di simulazione.

Principalmente, si hanno tre tipi principali di studio:

- **Stazionario (Stationary):** questo tipo di studio assume che le condizioni nel sistema siano costanti nel tempo e che non ci siano variazioni significative. È utile per analizzare il comportamento in condizioni di equilibrio. Inizialmente è utilizzato questo tipo di studio per verificare che non ci siano errori nel modello. Lo studio è stato fatto attraverso la voce *Coil analysis* riferendosi a un tipo di simulazione che è specificamente progettato per analizzare il comportamento di bobine e avvolgimenti di filo soggetti a correnti elettriche.
- **Transienti (Time Dependent):** questo tipo di studio tiene conto delle variazioni nel tempo delle condizioni nel sistema. È utile per esaminare come il sistema evolve nel tempo.
- **Frequenza Singola (Frequency Domain):** Questo tipo di studio è utilizzato per analizzare il comportamento di un sistema in risposta a un campo periodico, come l'analisi in frequenza di circuiti elettronici. Questo tipo di studio è quello interessato ed usato da noi.

Dopo aver definito le specifiche dello studio, inclusi i parametri come il range di frequenza e gli intervalli di passo, la simulazione è stata avviata. Il modello si è rivelato notevolmente ampio e complesso dal punto di vista computazionale, richiedendo almeno 16 ore di calcolo.

Dopo il completamento della simulazione, vengono estratti i risultati dalla sezione *Results* e il grafico dell'impedenza.

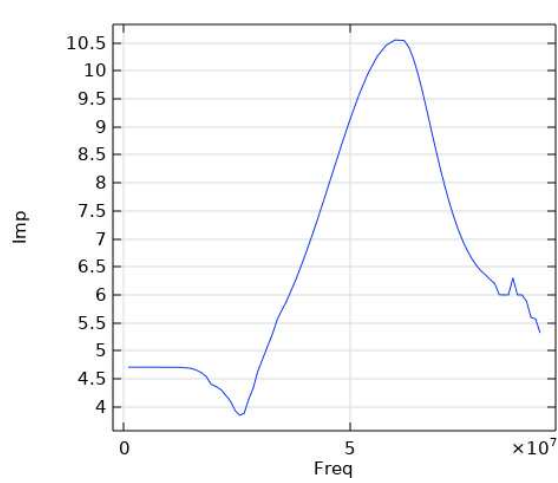


Figura 4.36: Grafico impedenza

Sull'asse dell'ordinata viene riportata la frequenza con la propria unità di misura Hertz, mentre sull'asse dell'ascissa viene riportata l'impedenza con la propria unità di misura Ohm. Attraverso le impostazioni del consol, viene riprodotto il grafico in scala logaritmica.

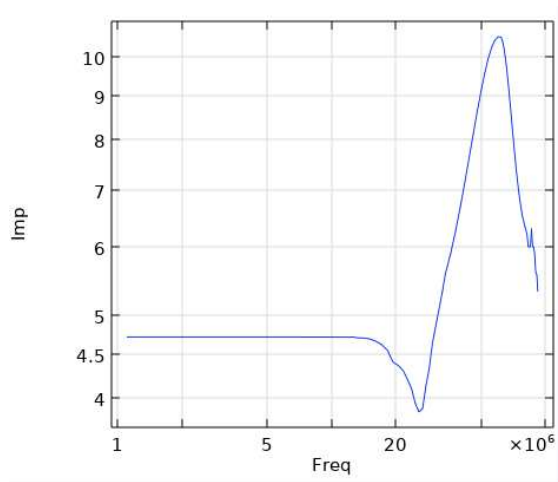


Figura 4.37: Grafico impedenza scala log

4.8 Risultati in matlab

Per facilitare il confronto tra i diversi grafici, è necessario esportare il grafico su MATLAB. Attraverso l'opzione "Export" e la selezione di "Plot", sarà possibile esportare i dati del grafico in formato CSV.

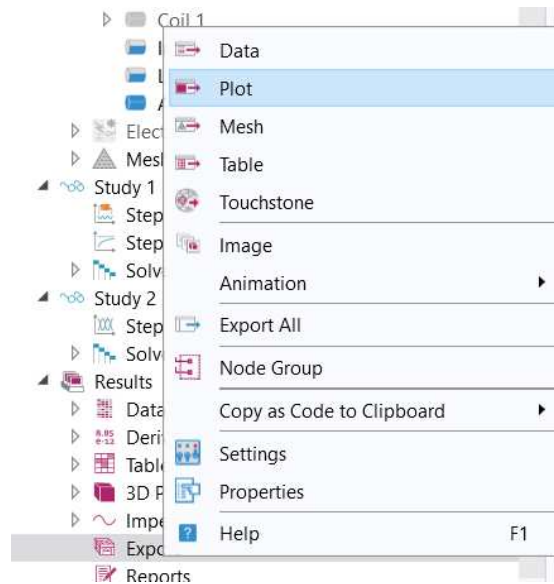


Figura 4.38: Export data

Successivamente, sarà possibile aprire il file con il software Excel per formattare e adattare i dati, rendendoli compatibili con MATLAB.

Trascinando il file CSV nella workspace di MATLAB, si importa con successo i dati contenuti nel file.

Utilizzando il codice seguente, verrà mostrato il grafico dell'impedenza simulata direttamente sullo schermo:

```
1 clear all; close all; clc;
2
3 % Carica i dati dal file CSV
4 M = readtable('dataComsol.csv');
5 freq = M.Var1;
6 imp = M.Var2;
7
8 % Trova il valore massimo di impedenza
9 valoreMassimo = max(imp);
10
11 % Trova l'indice del valore massimo di impedenza
12 indiceMassimo = find(imp == valoreMassimo);
13
14 % Trova il corrispondente valore di frequenza
15 freqCorrispondente = freq(indiceMassimo);
16
17 % Visualizza il grafico in scala logaritmica
18 loglog(freq, imp, 'LineWidth', 2);
19 grid on;
20 xlabel('Frequenza (Hz)');
21 ylabel('Impedenza (Ohm)');
22
23 % Sovrappone un punto rosso nel punto massimo
24 hold on;
25 plot(freqCorrispondente, valoreMassimo, 'ro', 'MarkerSize',
26     10);
27
28 % Aggiunge etichette, legenda e griglia
29 title('Grafico dell''Impedenza in Scala Logaritmica con Punto
30     Massimo');
31 legend('Impedenza', 'PuntoMassimo');
```

Listato 4.1: Codice Matlab:importazione impedenza simulata

Il grafico seguente sarà visualizzato a schermo:

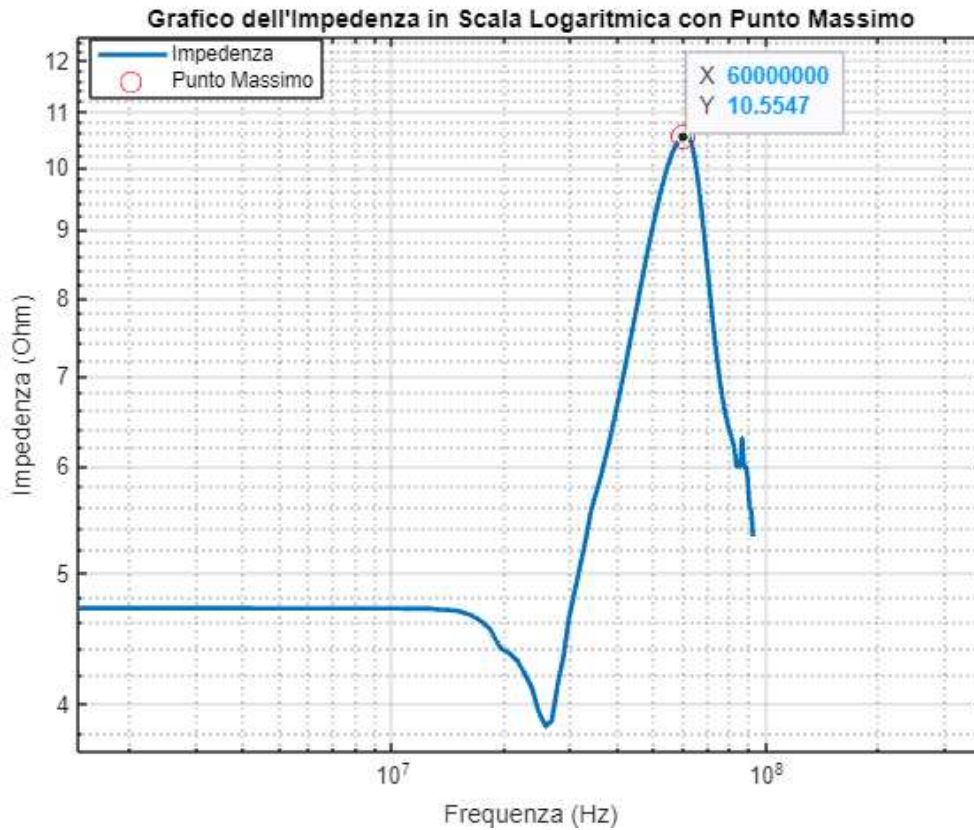


Figura 4.39: Matlab: Grafico impedenza simulata

Il valore massimo dell'impedenza è registrato a 10.54 Ohm, corrispondente alla frequenza di 60 MHz. Nel capitolo successivo, si esaminerà attentamente i risultati derivanti dalla variazione dell'impedenza in relazione alla frequenza. Si analizzerà le differenze tra le simulazioni effettuate, le misurazioni sperimentali condotte e i calcoli teorici eseguiti, al fine di fornire una comprensione approfondita del comportamento dell'impedenza in diverse condizioni.

Capitolo 5

Confronto dei modelli

In questo capitolo, vengono presentati i vari risultati derivanti dall'analisi dei modelli, teorico, simulato e sperimentale, accompagnati dalle relative comparazioni. Inizialmente, è stato esaminato un campione preliminare: un modesto induttore composto da una singola spira di rame con tre avvolgimenti. Tale campione preliminare è stato utilizzato come prova, seguendo gli stessi procedimenti adottati per il campione principale, senza approfondire eccessivamente nei dettagli.

5.1 Campione preliminare

La spira, costituita da rame, è caratterizzata da tre avvolgimenti che circondano il nucleo di tipo "E", realizzato in materiale ferrite.

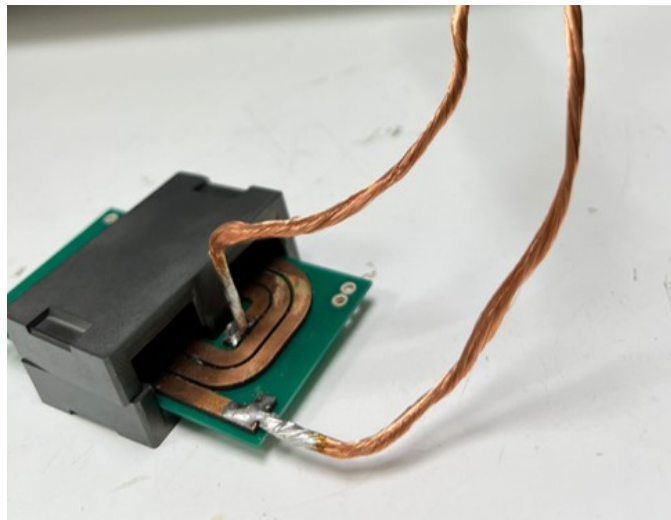


Figura 5.1: Campione preliminare

La procedura seguita è stata identica a quella utilizzata per il campione principale. Utilizzando l'impedenza come parametro di riferimento per le variazioni di frequenza, sono state effettuate misurazioni tramite tester da laboratorio, i valori sono stati calcolati mediante i modelli matematici e il comportamento è stato simulato con software multifisici di simulazione. I codici impiegati per la visualizzazione del grafico correlato su Matlab saranno identici a quelli utilizzati nel capitolo precedente, con l'unica variazione rappresentata dal dataset importato.

Infine, sono stati confrontati i risultati ottenuti tramite le diverse metodologie.

5.1.1 Risultati sperimentali

Attraverso l'utilizzo dell'analizzatore di spettro, è stato generato un grafico che illustra l'andamento del rapporto della tensione (V_{out}/V_{in}) in relazione alla variazione della frequenza, da cui sarà possibile dedurre l'andamento dell'impedenza al variare della frequenza (come descritto nel capitolo 3).

Il procedimento di calibrazione dello strumento impiegato per misurare il campione preliminare è analogo a quanto descritto in precedenza, utilizzando un canale a due porte con un range di frequenza che inizia da 100KHz fino a 50MHz. Il grafico ottenuto sarà il seguente:



Figura 5.2: Grafico V_{in}/V_{out} del campione preliminare

Il dataset ottenuto sarà esportato in formato CSV su un dispositivo di archiviazione locale, come una chiavetta USB, e successivamente importato in Matlab per estrarre l'impedenza misurata. Il codice fornito ha lo scopo di importare il dataset, estrarre i dati, elaborare il grafico dell'impedenza misurata mediante i calcoli precedentemente discussi e visualizzare tale grafico a schermo. Il codice implementato in questa sezione conserva la stessa struttura di quello presentato nel capitolo precedente, differenziandosi unicamente per il dataset importato. L'obiettivo principale rimane invariato: analizzare e elaborare i dati raccolti attraverso una nuova serie di esperimenti o simulazioni.

Il codice utilizzato sul Matlab risulta essere lo stesso visto in precedenza per l'estrazione dell'impedenza misurata [3.2], l'unica differenza è il dataset inserito. Il grafico seguente è il risultato ottenuto:

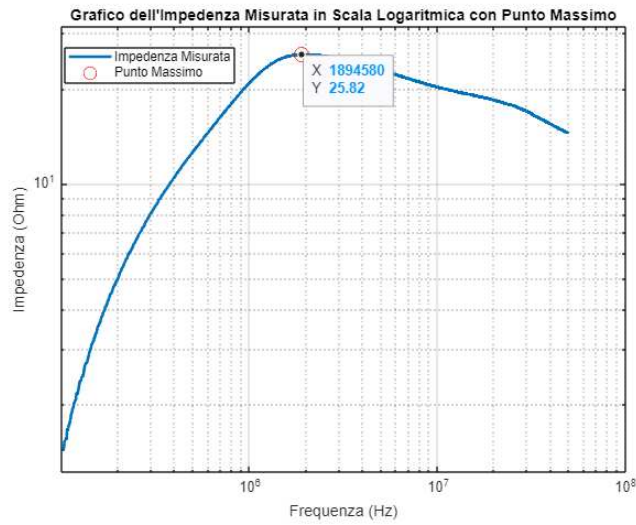


Figura 5.3: Impedenza misurata del campione preliminare

L'andamento della curva di impedenza mostra un picco massimo di 25.82 Ω a una frequenza di 1.89 MHz.

5.1.2 Risultati del modello teorico

Il modello matematico di questo sistema si configura come un circuito RLC, dove l'induttanza e la resistenza sono collocate in parallelo alla capacità.

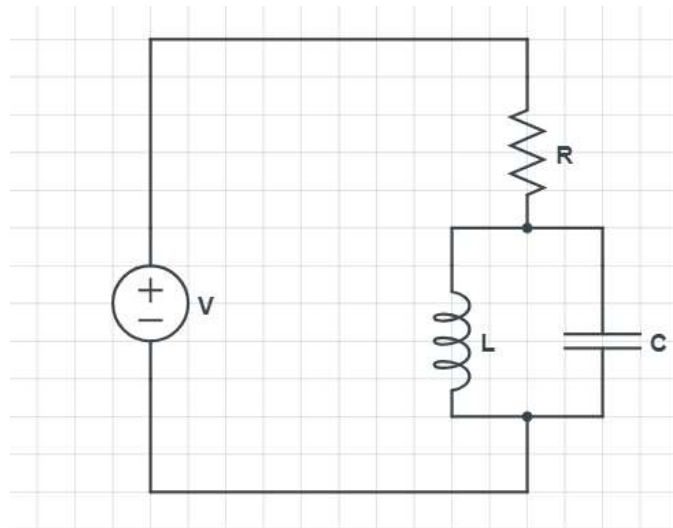


Figura 5.4: Circuito RLC

Attraverso l'utilizzo del tester da banco, è stato possibile effettuare la misurazione dell'induttanza (**L**) e la resistenza (**R**) con i seguenti valori:

$$R = 0.6 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (5.1)$$

$$L = 64.5 \cdot 10^{-6} H \quad (5.2)$$

I test per misurare i parametri sono stati eseguiti in modo iterativo, integrando l'impiego di molle per stabilizzare il nucleo, costituito da due nuclei di tipo "E". Questa procedura è stata attuata al fine di prevenire la circolazione dell'aria e assicurare risultati coerenti. Il risultato ottenuto è essenzialmente identico, con una variazione minima e trascurabile.

Mentre l'impedenza (**Z**) con la frequenza relativa (**f**) sono state misurate attraverso l'analizzatore di spettro nel paragrafo precedente. I valori ottenuti sono i seguenti:

$$Z = 25.82 \Omega \quad (5.3)$$

$$f = 1.89 Mhz \quad (5.4)$$

Ottenuti l'impedenza (**Z**), la resistenza (**R**), la frequenza (**f**) e l'induttanza (**L**), si è in grado di ricavare la capacità (**C**) attraverso la seguente formula:

$$Z = \sqrt{R^2 + (2\pi f \cdot L - \frac{1}{2\pi f \cdot C})^2} \quad (5.5)$$

Isolando la capacità si ottiene la seguente formula:

$$C = \frac{1}{2\pi f \cdot (2\pi f \cdot L - \sqrt{(Z^2 - R^2)})} \quad (5.6)$$

Inserendo i valori si ottiene:

$$C = \frac{1}{(2\pi \cdot 1.89 \cdot 10^6) \cdot [(2\pi \cdot (1.89 \cdot 10^6) \cdot (64.5 \cdot 10^{-6}) - \sqrt{((25.82)^2 - (0.6 \cdot 10^{-3})^2)})]} = 212.00 \cdot 10^{-12} F \quad (5.7)$$

Ricavati i tre parametri fondamentali del modello matematico, inserendoli nel modello "Analizzatore di spettro teorico" modellato sull'Excel, si ottiene come risultato il dataset che compone l'andamento del grafico impedenza sulle rispettive variazioni di frequenza.

Rdc	600,00E-06 Ohm
L	64,50E-06 H
C	212,00E-12 F

Figura 5.5: Parametri input per modello teorico

Una volta ottenuto il dataset in formato CSV, si procede con l'importazione del file e la visualizzazione dei risultati su Matlab.

Il codice utilizzato risulta essere lo stesso descritto nel capitolo precedente, utilizzato per l'impedenza calcolata [3.3].

Sullo schermo verrà visualizzato il seguente grafico:

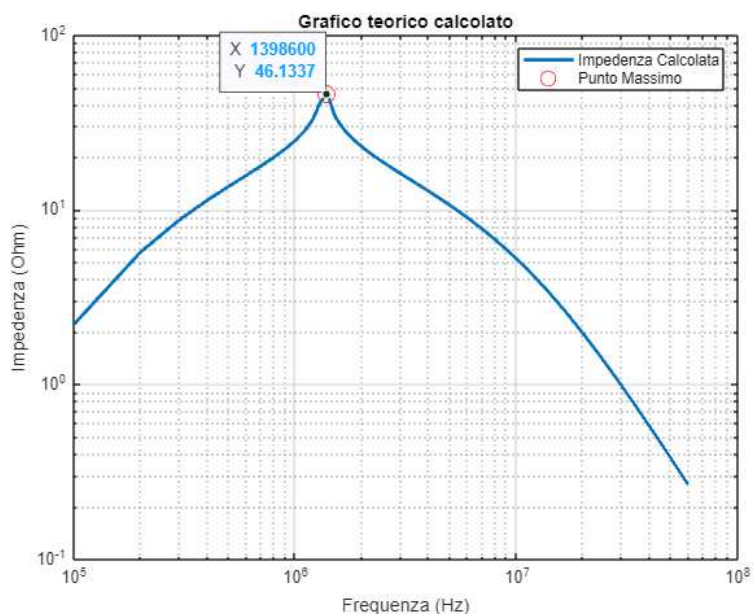


Figura 5.6: Grafico Z calcolato del modello di prova campione preliminare

L'andamento della curva dell'impedenza calcolata mostra un picco massimo di 46.13Ω a una frequenza di 1.39 MHz .

5.1.3 Risultati del modello simulato

Una volta acquisiti i risultati sperimentali in laboratorio e confrontati con quelli calcolati tramite il modello teorico, si procede ora all'ottenimento dei risultati del modello simulato. La procedura segue il medesimo approccio delineato nei paragrafi precedenti, focalizzandosi principalmente sui seguenti passaggi:

- **Creazione del modello simulato:** attraverso l'utilizzo del software SolidWorks, è stato sviluppato un modello dell'induttore, includendo sia il nucleo che la spira che lo avvolge. Successivamente, il modello è stato salvato come file STEP e importato su COMSOL per condurre le simulazioni.
- **Definizione della Geometria:** sfruttando gli strumenti di modellazione forniti da COMSOL, è stata definita la geometria del modello. Dopo l'importazione del modello, sono state successivamente create una coppia di sfere concentriche per delimitare lo spazio di lavoro.

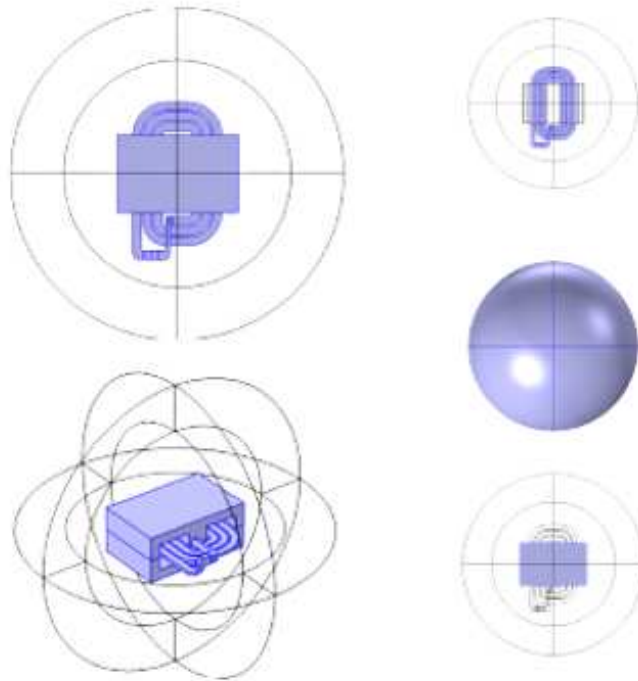


Figura 5.7: Geometria sul Comsol

- **Definizione dei Materiali:** sono stati assegnati i materiali al modello, con la specifica della ferrite per il nucleo, il rame per l'avvolgimento e l'aria per lo spazio circostante. Inoltre, sono state inserite le proprietà magnetiche dei materiali, come la permeabilità magnetica, con particolare attenzione al nucleo.
- **Definizione delle Equazioni:** definendo le equazioni del modello, con particolare attenzione alle condizioni al contorno dell'avvolgimento, alla legge di Ampère e all'equazione relativa alla Lumped Port (porta di eccitazione).
- **Meshing:** considerata la relativa semplicità del modello, è stata utilizzata una mesh con dimensioni degli elementi normali (Normal) per la simulazione, a differenza della mesh del modello del campione principale (finale) impiegato in questa tesi, che presenta caratteristiche diverse.
- **Risoluzione:** la metodologia di studio selezionata è quella del dominio in frequenza, implementata attraverso COMSOL, con un intervallo di frequenza che spazia da 200 KHz a 300 MHz, suddiviso in incrementi di 100 KHz.
- **Esportazione dei Risultati:** dopo aver ottenuto il risultato grafico, il dataset è stato esportato e salvato in formato CSV, successivamente importato in Matlab per ulteriori analisi.

Il codice utilizzato è lo stesso descritto in precedenza [4.1] ottenendo il seguente grafico:

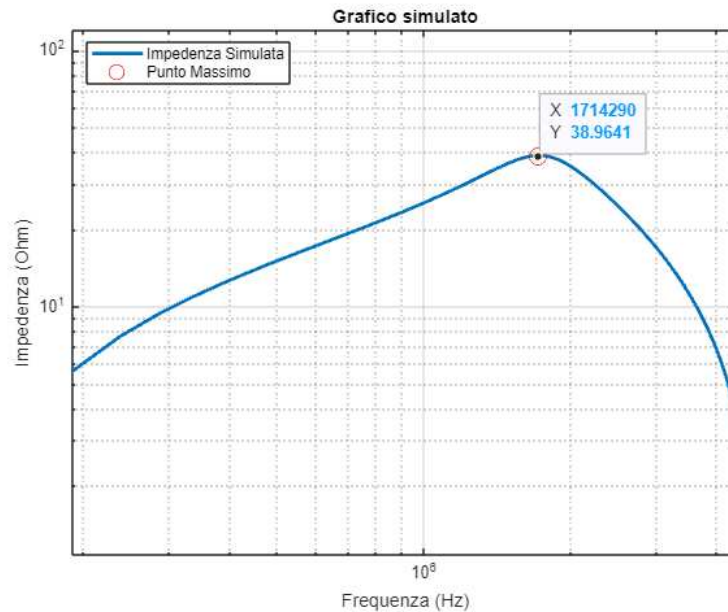


Figura 5.8: Grafico simulato della variazione dell'impedenza

La curva dell'impedenza simulata risulta avere un picco con un modulo d'impedenza pari a 38.96 Ω con la relativa frequenza pari a 1.714 Mhz.

5.1.4 Confronto dei risultati

Dopo aver ottenuto il grafico dell'impedenza, misurato, calcolato e simulato, vengono esaminate le similitudini attraverso il confronto delle tre curve. Per comodità, i dataset ottenuti sono stati esportati in formato CSV, ciascuno contrassegnato con i seguenti nomi:"

- **DatiMisuratiProva:** dati ottenuti attraverso le misure fatte in laboratorio ed i calcoli fatti in Matlab.
- **DatiCalcolatiProva:** dati ottenuti attraverso il modello teorico.
- **DatiSimulatiProva:** dati ottenuti dalla simulazione Comsol.

Attraverso il seguente codice sarà possibile visualizzare sullo schermo le tre curve prese in esame:

```
1 clear all; close all; clc;
2
3     % Grafico teorico
4     G = readtable('DatiCalcolat0iProva.xlsx');
5     frequenza = G.Var1;
6     Impedenza = -G.Var2;
7     loglog(frequenza, Impedenza);
8     grid on;
9
10    % Grafico misurato
11    hold on;
12    M = readtable('DatiMisuratiProva.csv');
13    freq = M.Var1;
14    imp = M.Var2;
15    loglog(freq, imp);
16    grid on;
17
18    % Grafico COMSOL
19    hold on;
20    M = readtable('DatiComsolProva.csv');
21    freq = M.Var1;
22    imp = M.Var2;
23    loglog(freq, imp);
24    grid on;
25
26    xlabel('Frequency (Hz)');
27    ylabel('Impedance (Ohm)');
28    title('MODELLO DI PROVA: Impedenza misurata, calcolata e
29          simulata');
29    legend('Impedenza simulata', 'Z simulata', 'Impedenza calcolata',
          'Z calcolata', 'Impedenza simulata', 'Z simulata');
```

Listato 5.1: Codice Matlab: Impedenza misurata, calcolata e simulata

Il grafico ottenuto è il seguente:

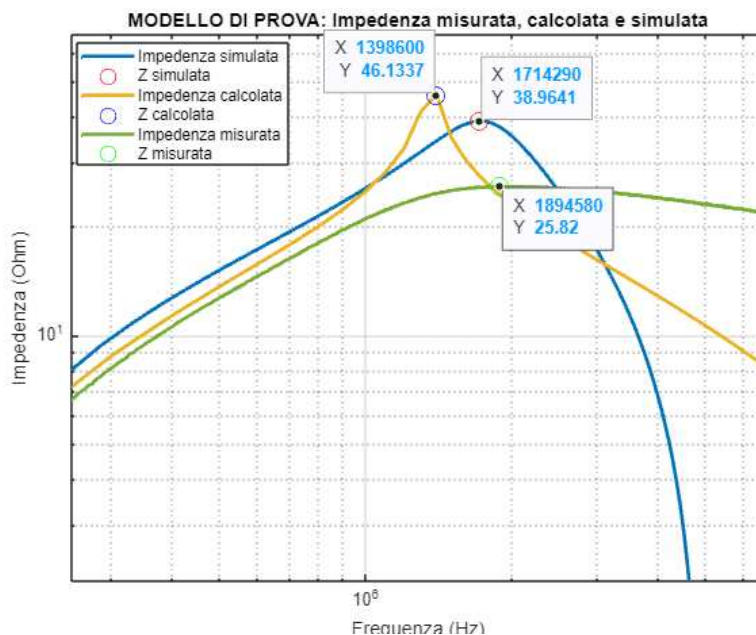


Figura 5.9: Grafico misurato, calcolato e simulato del campione preliminare

Nella figura seguente sono riportati i valori interessanti:

Impedenza	Z_{max} (Ohm)	f(Mhz)
Misurata	25,82	1,90
Calcolata	46,13	1,40
Simulata	38,96	1,71

Figura 5.10: Valori Z_{max} misurata, calcolata e simulata del campione preliminare

Questo modello, costituito da un semplice induttore composto da una singola spira, è stato impiegato come test iniziale per verificare la capacità di ottenere il risultato previsto. Utilizzando l'impedenza come parametro di riferimento, è stato interessante notare, dal grafico ottenuto, la somiglianza tra l'andamento della curva misurata e quella simulata. In particolare, il picco dell'impedenza si è rivelato prossimo al picco della curva calcolata teoricamente. Il successo nel conseguire risultati positivi in un test preliminare ha fornito la base per sviluppare ulteriormente il progetto, introducendo complicazioni nel modello, inclusa l'implementazione dell'avvolgimento primario di un trasformatore.

5.1.5 Test aggiuntivi

L'intero modello sperimentale è stato impiegato come banco di prova per valutare vari parametri, sia attraverso l'analisi di misure e calcoli condotti in laboratorio, che mediante la simulazione in Comsol. Tale approccio ha evidenziato diverse sfide, considerando che si

trattava della prima esperienza nell'utilizzo di questo specifico software. Nel contesto di questa sezione, vengono delineate le principali sfide affrontate durante il processo, accompagnate da una dettagliata esposizione dei test supplementari condotti per affinare ulteriormente la comprensione e validare l'integrità del modello.

Vengono riportati i diversi test fatti con le proprie considerazioni:

- **Calcolo permeabilità magnetica:** Attraverso le misurazioni effettuate in laboratorio, è stata determinata la permeabilità magnetica del nucleo. È importante notare che il nucleo in questione condivide lo stesso materiale e le stesse dimensioni del nucleo del trasformatore esaminato nel capitolo precedente. Tuttavia, emerge un dato interessante: la permeabilità magnetica varia. Questa variazione è direttamente correlata all'induttanza del sistema e al numero degli avvolgimenti della spira.

Ricordando che:

$$\mu_r = \frac{L \cdot \ell}{N^2 \cdot A \cdot \mu_0} \quad (5.8)$$

Sostituendo l'equazione con i valori reali, si ottiene:

$$\mu_r = \frac{64.5 \cdot 10^{-6} \cdot 103 \cdot 10^{-3}}{3^2 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 173 \cdot 10^{-6}} = 3395,458781(H/m) \quad (5.9)$$

Il valore misurato della permeabilità magnetica del nucleo risulta essere approssimativamente pari a 3395,459 (H/m).

Il test del calcolo della permeabilità è stato rifatto aggiungendo al nucleo un filo di rame con un avvolgimento totale pari a 10. L'induttanza è stata rimisurata dal tester da banco ottenendo come risultato pari a:

$$L = 800 \cdot 10^{-6} H \quad (5.10)$$

Sostituendo i nuovi valori ottenuti, la permeabilità magnetica risulta essere pari a:

$$\mu_r = \frac{800 \cdot 10^{-6} \cdot 103 \cdot 10^{-3}}{3^2 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 173 \cdot 10^{-6}} = 3790,271(H/m) \quad (5.11)$$

Questo test è stato eseguito per valutare come varia la permeabilità magnetica del nucleo al variare del numero degli avvolgimenti della spira e, di conseguenza, dell'induttanza del sistema. Nel caso in cui il nucleo faccia parte di un trasformatore o di un induttore, il test potrebbe essere stato eseguito per studiare come la variabilità del numero degli avvolgimenti influisce sulle prestazioni dell'apparecchio.

- **Acquisizione dati:** Dopo aver registrato il segnale proveniente dall'induttore utilizzando l'analizzatore di spettro, è stato ripetuto il test riducendo il range di studio per concentrarsi sul punto di interesse. Questo è stato ottenuto raffinando il segnale attraverso la calibrazione dello strumento e aumentando la media durante la fase di acquisizione del segnale.

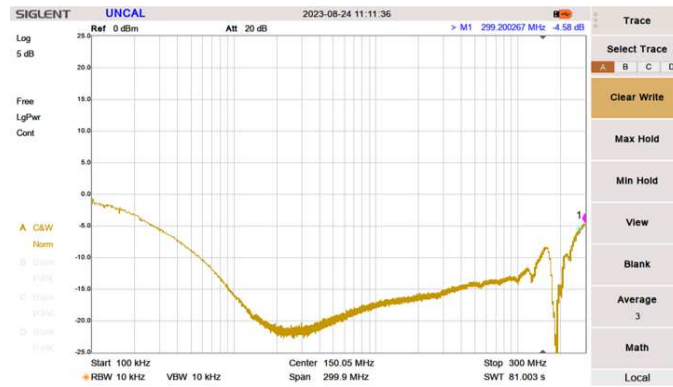


Figura 5.11: Prima acquisizione



Figura 5.12: Seconda acquisizione

La seguente figura mostra come è variata l'impedenza di picco con la relativa frequenza:

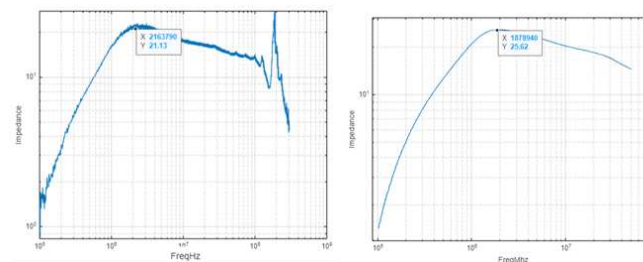


Figura 5.13: Segnale acquisito al primo test e segnale acquisito al secondo test

Il miglioramento della pulizia del segnale contribuisce ad aumentare la precisione dei risultati acquisiti.

5.2 Campione principale

5.2.1 Risultati

Alla luce dei grafici sull'impedenza ottenuti da diverse fonti, inclusi quelli derivanti dalla misurazione diretta, dai calcoli teorici e dalla simulazione, si apre uno spazio di riflessione profonda. La convergenza di queste diverse modalità di valutazione offre una panoramica esaustiva delle dinamiche sottostanti al fenomeno analizzato. Attraverso un'attenta analisi comparativa delle tre curve, emergono interessanti affinità e discrepanze che contribuiscono a consolidare la robustezza delle conclusioni ottenute. Nel capitolo precedente, i risultati ottenuti sono stati dettagliatamente descritti e i dataset corrispondenti sono stati esportati in formato CSV, ciascuno identificato con i seguenti nomi:

- **DatiMisurati:** dati ottenuti attraverso le misure fatti in laboratorio ed i calcoli fatti in Matlab.
- **DatiCalcolati:** dati ottenuti attraverso i calcoli fatti in laboratorio.
- **DatiSimulati:** dati ottenuti dalla simulazione Comsol.

La disponibilità di dati dettagliati consente una verifica accurata e una comparazione diretta tra i risultati sperimentali, teorici e simulati. L'analisi comparativa delle curve d'impedenza fornisce una comprensione più approfondita della coerenza tra le varie metodologie di valutazione. Le affinità evidenziano la validità e l'accuratezza delle simulazioni e dei calcoli teorici, mentre le eventuali discrepanze possono aprire la strada a ulteriori indagini e raffinamenti nel modello o nella procedura sperimentale. Questo approccio integrato alla valutazione dei risultati offre una visione completa del fenomeno in esame, contribuendo a consolidare le conclusioni e a fornire una base solida per ulteriori sviluppi o applicazioni pratiche nel contesto del tuo studio.

Il seguente codice consente di confrontare le tre curve in MATLAB:

```
1 clear all; close all; clc;
2
3     % Grafico teorico
4     G = readtable('DatiCalcolati.xlsx');
5     frequenza = G.Var1;
6     Impedenza = -.Var2;
7     loglog(frequenza, Impedenza);
8     grid on;
9
10    % Grafico misurato
11    hold on;
12    M = readtable('DatiMisurati.csv');
13    freq = M.Var1;
14    imp = M.Var2;
15    loglog(freq, imp);
16    grid on;
17
18    % Grafico COMSOL
19    hold on;
20    M = readtable('DatiComsol.csv');
21    freq = M.Var1;
22    imp = M.Var2;
23    loglog(freq, imp);
24    grid on;
25
26 xlabel('Frequency (Hz)');
27 ylabel('Impedance (Ohm)');
28 title('Impedenza misurata, calcolata e simulata')
29 legend('Impedenza calcolata', 'Z calcolata', 'Impedenza misurata',
        'Z misurata', 'Impedenza simulata', 'Z simulata');
```

Listato 5.2: Codice Matlab: Impedenza misurata, calcolata e simulata

Il grafico ottenuto è il seguente:

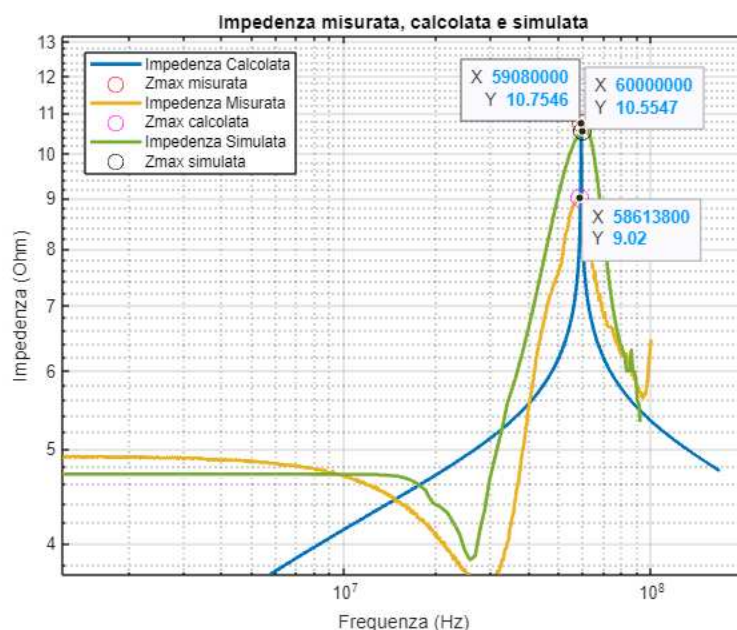


Figura 5.14: Grafico misurato, calcolato e simulato

Nella fase iniziale dell'osservazione, emerge una convergenza tra i tre grafici, evidenziando in modo significativo la somiglianza tra il grafico dell'impedenza misurata e quello simulato, come inizialmente previsto. Si riportano nella seguente figura i valori di picco:

Impedenza (Z)	Z_{max} (Ohm)	f (Mhz)
Misurata	9,02	58,61
Calcolata	10,75	59,08
Simulata	10,55	60,00

Figura 5.15: Valori Z_{max} misurata, calcolata e simulata

Come previsto, il picco massimo dell'impedenza simulata e calcolata si approssimano, evidenziando una notevole somiglianza. Tuttavia, le divergenze nell'andamento delle curve sono attribuibili agli effetti delle perdite. Il risultato ottenuto presenta una differenza di circa 0.15 ohm, probabilmente riconducibile ad approssimazioni nei calcoli effettuati.

5.2.2 Considerazioni finali

La modifica del range di frequenza e dell'intervallo di step nella simulazione dell'impedenza dell'induttore ha comportato variazioni nel grafico per diverse ragioni. La regolazione del range di frequenza e dell'intervallo di step nell'esecuzione della simulazione dell'impedenza

dell'induttore ha determinato variazioni nel risultato grafico, influenzate da diverse considerazioni. Mediante l'espansione dell'intervallo di frequenza e la riduzione del numero di passi, si è ottenuta una migliorata risoluzione frequenziale, consentendo un'analisi più approfondita della risposta dell'induttore. L'ampliamento del range di frequenza ha inoltre contemplato la possibile inclusione di frequenze più elevate, svelando fenomeni quali risonanze o antirisonanze e inducendo modifiche nella configurazione del grafico. Questi adattamenti hanno concorso significativamente a una maggiore chiarezza nella comprensione del comportamento dell'induttore in relazione alla variazione della frequenza.

Riportati in seguito una prima acquisizione con un intervallo di frequenza che va da 25Mhz fino a 100Mhz con un passo pari 3Mhz.

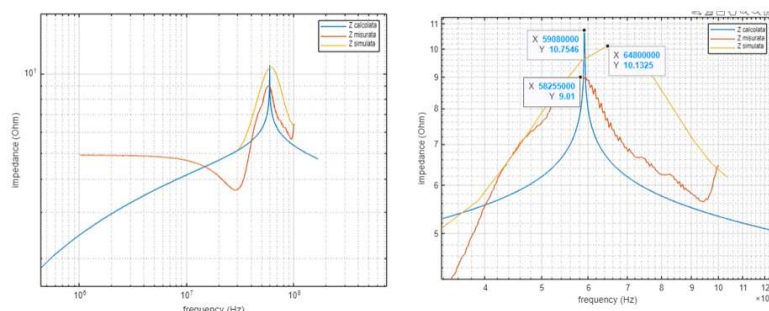


Figura 5.16: Grafico misurato, calcolato e simulato(25Mhz/3Mhz/100Mhz)

Riducendo il passo a 0.5 Mhz con un intervallo di frequenza che inizia da 5Mhz il risultato varia e si ottiene il grafico già visto in precedenza (Figura 5.14). L'affinamento della risoluzione frequenziale mediante la riduzione dell'intervallo di frequenza e l'aumento del numero di passi è efficace per ottenere una maggiore precisione e accuratezza nel modello. Tuttavia, è importante notare che tale miglioria nella precisione può comportare un aumento significativo del tempo di calcolo. Questo è dovuto al fatto che la simulazione deve ora considerare un numero maggiore di frequenze e, di conseguenza, richiede più risorse computazionali. La scelta tra una risoluzione frequenziale più elevata e il tempo di calcolo è spesso una questione di compromesso. È necessario bilanciare la necessità di ottenere risultati più accurati con la disponibilità di risorse computazionali. La scelta tra una risoluzione frequenziale più elevata e il tempo di calcolo è spesso una questione di compromesso. È necessario bilanciare la necessità di ottenere risultati più accurati con la disponibilità di risorse computazionali.

Attraverso il modello, è possibile estrarre ulteriori risultati che potrebbero essere oggetto di un futuro approfondimento di studio.

- **Magnetic Flux Density:** Rappresenta la distribuzione del campo magnetico all'interno dell'induttore. Questo parametro è cruciale per valutare come il flusso magnetico si distribuisca attraverso i materiali presenti nella struttura, riflettendo la risposta magnetica del sistema. La visualizzazione di questa grandezza fornisce dettagli sulla forza e l'orientamento del campo magnetico in varie regioni dell'induttore.

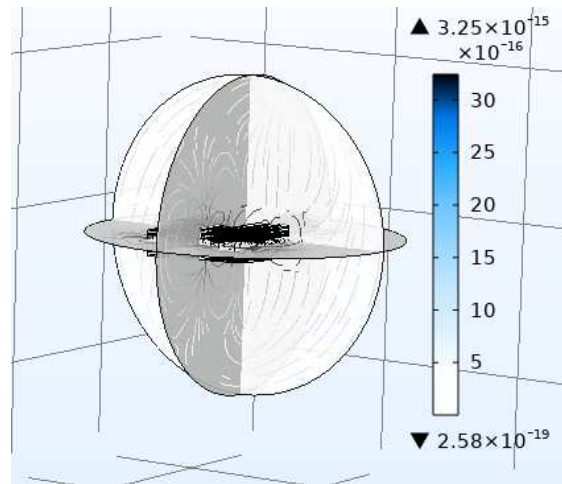


Figura 5.17: Magnetic Flux Density

- **Magnetic Flux Density Norm Core:** si riferisce alla norma della densità di flusso magnetico all'interno del nucleo. Questo parametro quantifica la magnitudine del campo magnetico all'interno del materiale del nucleo. La valutazione di questa grandezza è fondamentale per comprendere l'intensità e l'orientamento del flusso magnetico nel nucleo, aspetti chiave nella progettazione e nell'analisi di dispositivi elettronici come trasformatori o induttori.

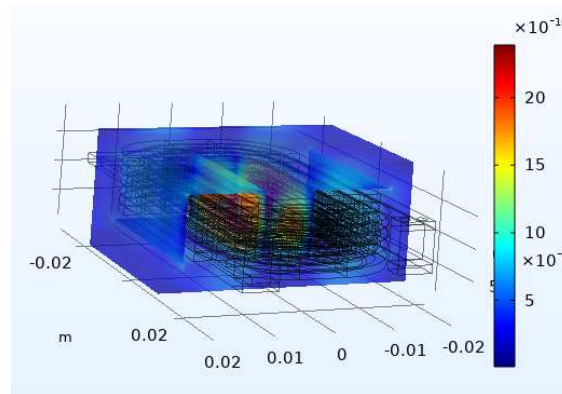


Figura 5.18: Magnetic Flux Density Norm Core

- **Surface Density Current:** rappresenta la densità di corrente sulla superficie dell'induttore. Questo parametro è di particolare importanza per comprendere il flusso di corrente elettrica attraverso il dispositivo. Esso riflette la distribuzione delle correnti sulla superficie, evidenziando eventuali zone di concentrazione o comportamenti rilevanti.

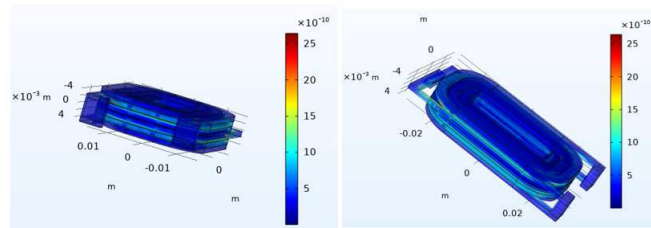


Figura 5.19: Surface Density Current

- **Volumetric loss density magnetic:** rappresenta la densità di perdite magnetiche all'interno del volume di un sistema. Questo parametro è essenziale per comprendere come l'energia magnetica viene dissipata sotto forma di calore durante il funzionamento del dispositivo. La sua valutazione fornisce informazioni critiche sulla perdita di energia magnetica all'interno del materiale dell'induttore o del sistema studiato.

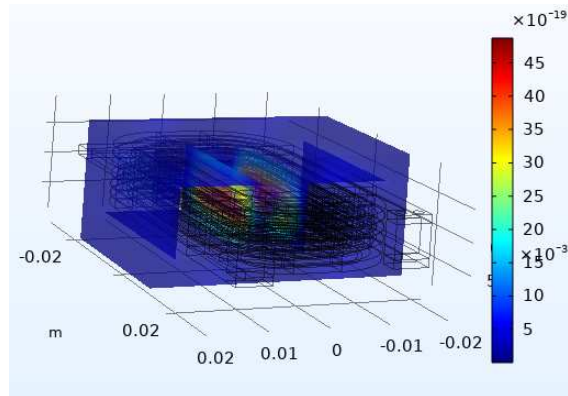


Figura 5.20: Volumetric loss density magnetic

L'analisi di questi risultati consente di ottenere una visione approfondita delle prestazioni dell'induttore. Questi dati sono fondamentali per ottimizzare il design dell'induttore, comprenderne il comportamento in diverse condizioni operative e garantire il corretto funzionamento in applicazioni specifiche.

Capitolo 6

Conclusioni

6.1 Introduzione

Il presente lavoro di tesi ha fornito un approfondimento dettagliato sulla modellazione e validazione di componenti magnetici, con un'attenzione particolare all'induttore. L'utilizzo di simulatori multifisici, in particolare il software COMSOL, ha consentito l'integrazione di calcoli teorici, misurazioni di laboratorio e simulazioni numeriche, offrendo una visione completa delle dinamiche dell'impedenza del componente. Tuttavia, il campo della progettazione di componenti magnetici è in continua evoluzione, e il presente studio ha aperto la porta a una serie di progetti futuri intriganti. Questi progetti mirano a esplorare ulteriormente le potenzialità del software COMSOL nel contesto specifico dell'ottimizzazione dell'induttore.

6.2 Implementazioni future

Ogni progetto proposto è progettato per esplorare specifici aspetti legati alle prestazioni dell'induttore e all'applicabilità pratica del modello. Attraverso l'impiego continuo del software COMSOL, tali progetti mirano a contribuire in modo significativo alla progettazione avanzata di componenti magnetici:

- **Ottimizzazione delle Perdite Core:** investigare le perdite nel nucleo magnetico e sviluppare strategie per minimizzarle. Questo potrebbe coinvolgere l'analisi delle caratteristiche magnetiche dei materiali del nucleo, la loro distribuzione spaziale e l'ottimizzazione della geometria del nucleo stesso [6].
- **Effetto Pelle e Frequenze Elevate:** approfondire lo studio dell'effetto pelle, concentrandoti su come influisce sulle perdite di potenza, specialmente a frequenze più elevate. Esplorare materiali e geometrie che mitigano o sfruttano a vantaggio questo fenomeno a seconda delle esigenze del tuo sistema.
- **Ottimizzazione delle Proprietà Magnetiche del Materiale:** attualmente, il modello si basa su determinate proprietà magnetiche del materiale. Un progetto futuro

potrebbe concentrarsi sull'ottimizzazione di queste proprietà per migliorare ulteriormente le prestazioni dell'induttore. L'utilizzo di materiali magnetici avanzati potrebbe essere esplorato per ottenere un'impedenza desiderata.

- **Analisi Termica Accurata:** incorporare un'analisi termica più dettagliata potrebbe essere cruciale per comprendere appieno il comportamento dell'induttore in condizioni operative reali. Questo progetto potrebbe coinvolgere la simulazione degli effetti termici durante l'operazione e l'ottimizzazione del design per una migliore gestione del calore.
- **Esplorazione di Configurazioni Alternative:** investigare configurazioni alternative per l'induttore potrebbe essere un progetto intrigante. Progettare e simulare diverse forme geometriche e arrangiamenti degli avvolgimenti potrebbe portare a scoperte significative nell'ottimizzazione delle prestazioni.
- **Studio delle Variazioni Parametriche:** condurre uno studio dettagliato delle variazioni parametriche potrebbe essere utile per comprendere come diversi fattori influenzano l'impedenza. Esplorare variazioni nella geometria, nei materiali e nelle condizioni operative potrebbe fornire indicazioni preziose per la progettazione di induttori personalizzati.
- **Integrazione di Componenti Elettronici Aggiuntivi:** considerare l'integrazione di componenti elettronici aggiuntivi nell'induttore potrebbe aprire nuove possibilità di applicazione. Simulare l'interazione tra l'induttore e altri elementi del circuito può essere un passo significativo per progetti più complessi.
- **Studio dell'interazione tra più induttori:** nel caso in cui il sistema richieda più induttori operanti contemporaneamente, un progetto potrebbe focalizzarsi sull'analisi dell'interazione tra di essi. Questo potrebbe includere la modellizzazione degli effetti di interferenza magnetica e la progettazione di soluzioni ottimali per minimizzare gli effetti indesiderati.

Questi progetti non solo mirano a perfezionare le prestazioni dell'induttore stesso ma anche a esplorare nuove frontiere nella progettazione di componenti magnetici attraverso l'integrazione sinergica di simulazioni avanzate e approcci sperimentali.

6.3 Conclusione

In conclusione, la presente ricerca si è dedicata con precisione alla modellazione e convalida di componenti magnetici, concentrandosi in modo specifico sull'analisi dell'induttore. L'integrazione sinergica di simulatori multifisici, modelli teorici e dati provenienti da misurazioni di laboratorio ha condotto a una rappresentazione completa e dettagliata dell'andamento dell'impedenza di questo fondamentale componente. L'analisi congiunta dei risultati derivanti da calcoli analitici, misurazioni sperimentali e simulazioni numeriche ha rivelato una coerenza notevole, sottolineando l'efficacia dell'approccio metodologico adottato. Eventuali discordanze, circoscritte a circa 0.15 ohm, possono essere attribuite a necessarie approssimazioni nei calcoli; tuttavia, è importante sottolineare che queste discrepanze non

arrecano un impatto significativo sull'affidabilità complessiva dei risultati ottenuti. Il lavoro svolto rappresenta un contributo di rilievo nel vasto panorama della modellazione di componenti magnetici, evidenziando la complementarità e l'affidabilità di diverse metodologie di analisi. I risultati consolidati di questa ricerca non solo ampliano la comprensione del comportamento dell'induttore, ma anche promuovono l'applicabilità pratica in contesti di prototipazione rapida.

L'importanza dell'integrazione tra simulazioni numeriche e misurazioni sperimentali emerge come un elemento fondamentale nel processo di progettazione ottimale dei componenti magnetici. Questa sinergia tra teoria e pratica offre un approccio completo e robusto, ponendo le basi per ulteriori sviluppi e applicazioni innovative nel campo della progettazione e dell'ingegneria dei componenti magnetici.

Bibliografia

- [1] CircuitLab. *Editing*. URL: <https://www.circuitlab.com/editor/#?id=7pq5wm&from=homepage>.
- [2] COMSOL. *INTRODUCTION TO COMSOL Multiphysics*. 1–274.
- [3] Comsol. *Documentation*. 2023. 2023. URL: <https://www.comsol.it/books>.
- [4] ETD 44/22/15 Core e accessories. «Ferrites and accessories». In: (2022), pp. 1–13. URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.tdk-electronics.tdk.com/inf/80/db/fer/etd_44_22_15.pdf.
- [5] DSY. *Dassault Systemes*. 2023. 2019. URL: <https://investor.3ds.com/fr/news-releases/news-release-details/dassault-systemes-sp-global-ratings-attribue-dassault-systemes>.
- [6] Y. Lefevre L. Havez E. Sarraute. «Ferrites and accessories». In: *LAPLACE Laboratory/INPT-ENSEEIH, Electrical and Automation Engineering* (2013), pp. 1–5. URL: https://www.comsol.it/paper/download/182083/havez_paper.pdf.
- [7] Matlab. *Documentation*. 2019-2023. 2019. URL: <https://it.mathworks.com/help/matlab/ref/fplot.html>.
- [8] Wikipedia. *Induttori*. 2019-2023. 2023. URL: <https://it.wikipedia.org/wiki/Induttore>.