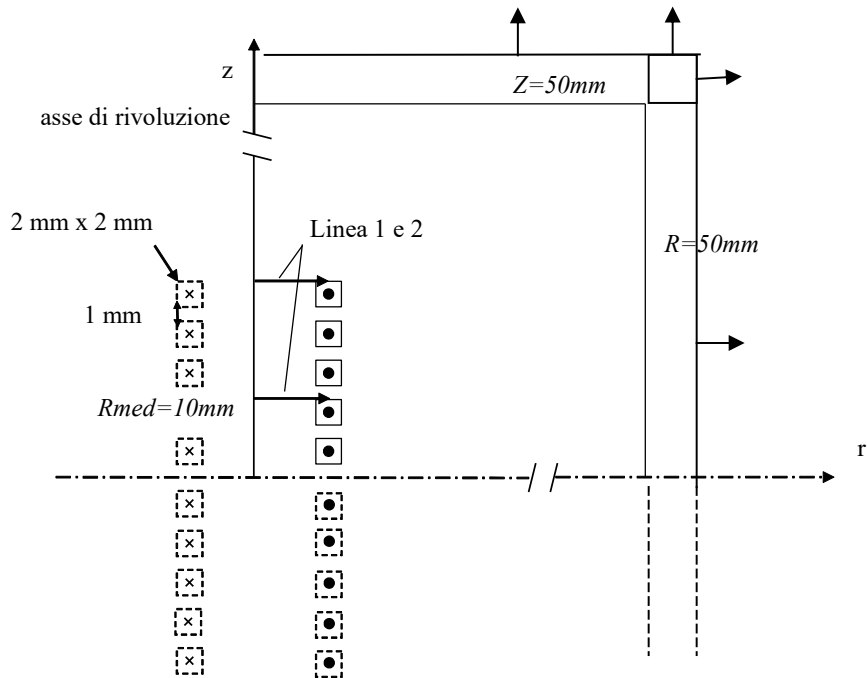


# Esercitazione 3

## Analisi 2D assialsimmetrica di un campo magnetostatico

### Esercizio 1: solenoide corto in aria



Eseguire l'analisi del campo magnetostatico del solenoide "corto" con le seguenti caratteristiche:

- **Materiali:** conduttore: rame, background: vuoto
- **Forzanti:** corrente su ciascuna spira 100A
- **Condizioni al contorno:** superfici a  $r=0$  e  $z=0$  di simmetria

<i>NAME</i>	<i>EXPRESSION</i>	<i>DESCRIPTION</i>
$R_s$	10[mm]	Raggio della spira
$b$	2[mm]	Lato del conduttore
$A$	$b^2$	Sezione del conduttore
$I_0$	100[A]	Corrente
$J_0$	$I_0/A$	Densità di corrente
$N$	10	Numero di spire

- ✓ mappare le linee equiflusso e il vettore induzione magnetica
- ✓ visualizzare valori massimi e minimi dell'induzione magnetica sull'intero dominio
- ✓ calcolare della corrente nella singola spira tramite la legge di circuitazione di ampere
- ✓ calcolare la corrente concatenata con il solenoide tramite la legge di circuitazione di ampere:
- ✓ calcolare i valori massimi e minimi del flusso concatenato con il solenoide
- ✓ calcolare l'autoinduttanza  $L$  usando il flusso concatenato
- ✓ calcolare l'energia magnetica del solenoide
- ✓ calcolare l'autoinduttanza  $L$  usando l'energia magnetica
- ✓ calcolare l'energia magnetica complessiva
- ✓ tracciare l'andamento della induzione magnetica lungo percorsi prestabiliti (riportanti in seguito)

Verificare analiticamente i valori delle grandezze riportate nella seguente tabella:

B [T]	$\Phi$ [Wb]	Wsol [Joule]	L [H] (Flusso c.)	L [H] (W. Mag.)

## IMPOSTAZIONE DEL MODEL WIZARD

### Scelta del dominio

- Scelta della dimensione della geometria: **Select Space Dimension** → **2D axisymmetric**. Il sistema di riferimento ha coordinate cilindriche, ogni punto nel piano 2D è individuato univocamente dal raggio R (distanza dall'asse Z) e dall'altezza Z (distanza dall'asse r).

### Scelta del modello fisico

- Scelta del modello fisico: **Add Physics** → **AC/DC** → **Magnetic Fields(mf)**  
L'interfaccia di **Magnetic Fields** (mf) ha le equazioni, condizioni al contorno, e sorgenti (le correnti esterne) per la modellazione di campi magnetici, che determinano il potenziale vettore magnetico come variabile dipendente. La caratteristica principale è di legge di Ampère, che aggiunge l'equazione per il potenziale vettore magnetico e fornisce un'interfaccia per la definizione della relazione costitutiva e le sue proprietà associate quali la permeabilità relativa.

### Scelta del tipo di analisi

- *Tipo di studio*: **Select Study Type** → **Preset Studies** → **Stationary**

## PREPROCESSING

### disegno della geometria

Andare su **Geometry** per modellare la geometria della bobina nella finestra grafica:

- Impostare l'unità di misura delle lunghezze in mm
- disegnare un rettangolo più esterno alla regione di studio del campo, in size: larghezza = 50mm e altezza = 100mm; posizione dell'angolo in basso a sinistra in (0,0)
- disegnare la sezione del conduttore di una spira, per comodità iniziare dalla prima spira sopra dell'asse di simmetria per Z=0; nella finestra di setting impostare:
  - le dimensioni → **lato (2mm)**,
  - il punto base relativo al centro della figura o dello spigolo → **Position** → **Centro: r=10, z=1.5**
  - la rotazione dell'elemento rispetto al punto di base → **Rotation angle = 0**
- tasto destro sulla spira appena creata → **duplicate** per creare i restanti 4 quadrati della bobina (per Z>0) copiare quella appena creata cambiando la quota Z.

Per creare le altre 5 spire, possiamo continuare duplicare quelle già esistenti oppure è possibile riportare l'immagine riflessa rispetto all'asse z=0 (in 2D), abbiamo 2 opzioni

- Cliccare su "Geometry" e selezionare **Transforms->Mirror**. Quindi definire le proprietà dello specchio da attivare usando le seguenti istruzioni:

Elettromagnetismo Applicato all'Ingegneria Elettrica ed Energetica

- selezionare le gli oggetti geometrici che si vogliono riflettere nella Graphics window. Gli oggetti appaiono nell'input object
- selezionare **Keep input objects** nel check box per usare gli oggetti geometrici selezionati per ulteriori operazioni geometriche.
- **Point on Plane/Line of Reflection (3D/2D)**, Specificare il punto che rimane fisso durante la riflessione digitando le coordinate secondo il sistema di riferimento scelto. Nel caso in esame la  $\mathbf{r}=\mathbf{0}$  e la  $\mathbf{z}=\mathbf{0}$ .
- **Normal Vector to Plane/Line of Reflection (3D/2D)**. Specificare un vettore nella direzione di riflessione digitando le coordinate del vettore posizione. Nel caso in esame la  $\mathbf{r}=\mathbf{0}$  e la  $\mathbf{z}=\mathbf{1}$ .
- **Build all**

➤ **Form union**

### Assegnazione dei materiali

➤ Assegnare i materiali: rame al conduttore aria al dominio.

### Physics setting

Andare su **Magnetic Fields** per assegnare le condizioni al contorno e le sorgenti.

*Di default*

- **Magnetic Insulation**, assegna questa condizione ai bordi del dominio esterno. Questo implica che  $\vec{B}$  sia tangente a tutto il bordo esterno,  $\vec{B}$  viene completamente riflesso dal contorno del boundary.
- **Simmetria assiale**, l'abbiamo imposta quando abbiamo scelto il tipo di modello.
- **Legge di Ampere**, è sempre valida la legge di ampere e quindi la componente tangente di  $\vec{H}$  è discontinua tra 2 mezzi a permeabilità diversa se c'è una densità superficiale di corrente

*Assegnare le sorgenti*

- **External current density**, selezionare tutte le spire, assegnare il valore della densità di corrente che circola in esse  $J_0 = 100/(4e-6)$  [A/m<sup>2</sup>].

Con *Magnetic Insulation* impostato su tutto il bordo del dominio stiamo assegnando il valore alla componente normale di  $\vec{B}$ , quindi stiamo assegnando delle condizioni sulla derivata di  $\vec{A}$  ( $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$ ). Il problema è affrontato come un problema di *Neumann*.

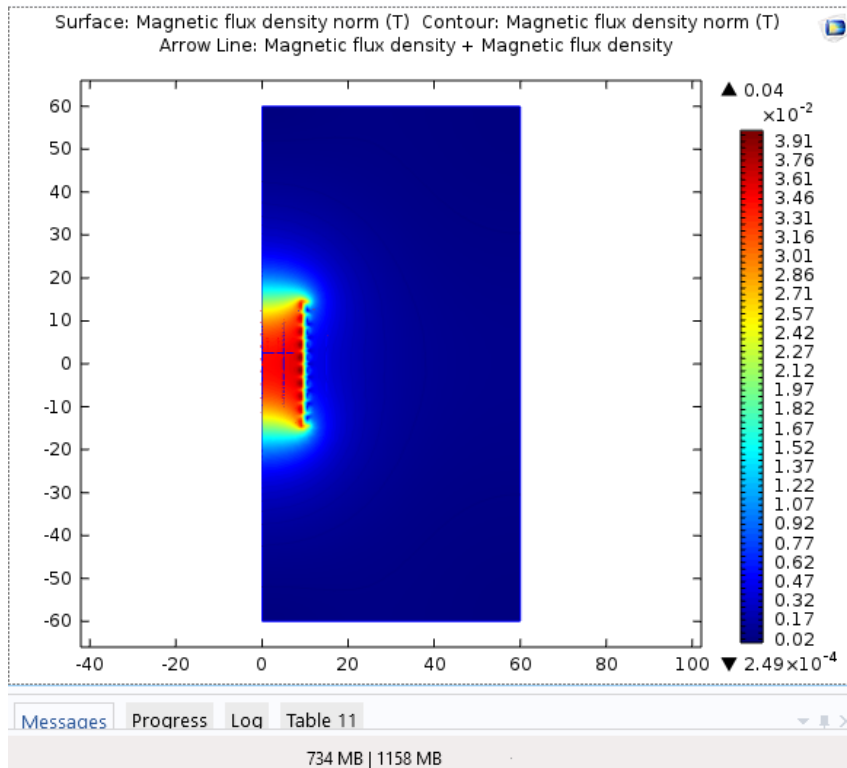
### generazione della mesh

➤ Assegnare una mesh guidata dalla fisica

## SOLVE

➤ Mandare in esecuzione la simulazione

## POSTPROCESSING



- MAPPARE LE LINEE EQUIFLUSSO E IL VETTORE INDUZIONE MAGNETICA (scegliere come posizionamento: controllata dal modulo, e densità almeno 50)
- VISUALIZZARE I VALORI MASSIMI E MINIMI DELL'INDUZIONE MAGNETICA SULL'INTERO DOMINIO
  - “Derived value” → “maximum” → “surface maximum” selezionare l'intero dominio; ripetere la stessa procedura per il minimo
- CALCOLARE DELLA CORRENTE NELLA SINGOLA SPIRA TRAMITE LA LEGGE DI CIRCUITAZIONE DI AMPERE

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = I \quad [A]$$

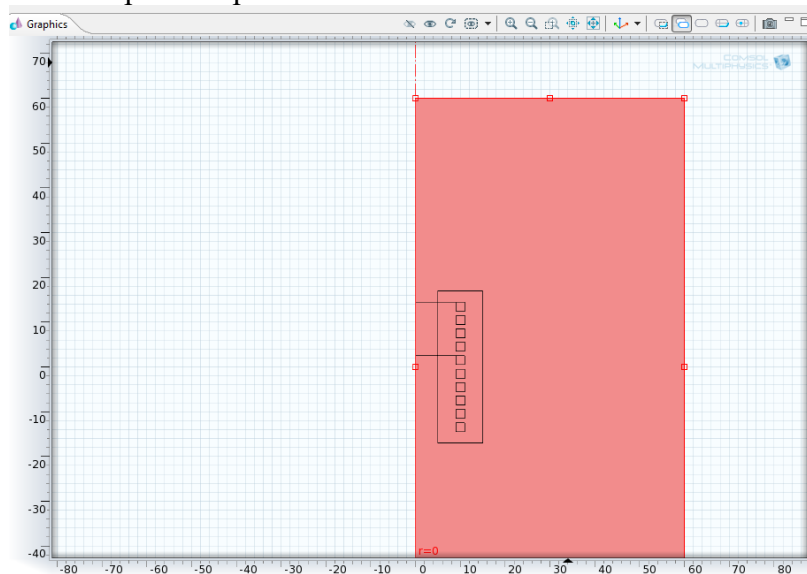
- **Derived value** → **Integration** → **Line Integration**, selezionare il bordo di una spira: **Magnetic field** → **magnetic** → **Tangenzial magnetic vector potential** → **Magnetic field norm (mf.normH)**
- CALCOLARE LA CORRENTE CONCATENATA CON IL SOLENOIDE TRAMITE LA LEGGE DI CIRCUITAZIONE DI AMPERE
    - Definire un percorso chiuso Cliccando su **geometry** → **polygon** → “**type**→**closed**” in data source selezionare **table** e inserire le coordinate (R,Z) dei punti che definiscono i vertici del poligono:
      - P1(5,17)
      - P2(15,17)
      - P3(15, -17)
      - P4 (5,-17)
 Potrebbe essere necessario rifare lo studio, o definire il poligono (**definitions** → **selection** → **explicit**), per riuscire a selezionarlo come percorso su cui fare l'integrale
    - Calcolare la circuitazione di  $\vec{H}$  lungo il nuovo percorso come nel punto precedente

e) CALCOLARE I VALORI MASSIMI E MINIMI DEL FLUSSO CONCATENATO CON IL SOLENOIDE:  $\int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \Phi$

Per determinare il flusso è necessario definire la superficie di taglio attraverso cui calcolarlo. In questo caso vogliamo definire una superficie perpendicolare all'asse Z, una interna al solenoide e l'altra che poggia sul bordo del solenoide.

In un modello assialsimmetrico è possibile definire una superficie di rivoluzione intorno all'asse z delineata da una linea di taglio nel piano xz:

- In **Results** → **Data sets** → **Cut Line 2D** definire 2 percorsi  
*Percorso 1*: di raggio r= 10mm ad altezza z= 2.5 mm  
*Percorso 2*: di raggio r= 10mm ad altezza z= 14.5 mm
- In **Results** → **Data sets** → **revolution 1D** → in data set selezionale il *Percorso 1*, in revolution layers settare start angle: 0, revolution angle: 360 → **plot**. Ripetere i passaggi per creare una seconda superficie di rivoluzione basata sul *percorso 2*.
- Per calcolare il flusso al centro del solenoide, effettuare l'integrale di superficie sulla superficie di rivoluzione generata sul *percorso 1* da **Derived value** → **Integration** → **surface Integration**, selezionare la superficie di rivoluzione, selezionare la grandezza fisica che si deve integrare da **Expression** → **Magnetic field** → **Magnetic** → **Magnetic flux density normal (mf.normB [Wb])**.
- Ripetere il punto precedente per la superficie di rivoluzione 2.



f) CALCOLO DELLA AUTOINDUTANZA L ATTRAVERSO IL VALORE FLUSSO CONCATENATO

$$L = \frac{\Phi_c}{I} = \frac{N\Phi_{med}}{I}$$

- Calcolare il valor medio dei flussi trovati al punto e)

g) ENERGIA MAGNETICA  $W_m = \int_V w_m dv = \int_V \frac{\mathbf{B} \cdot \mathbf{H}}{2} dv$

- **Derived value** → **gobal evaluation** → da **Expression** → **Magnetic field** → **Energy and Power** → **total Magnetic energy (mf.int Wm [JJ])**

h) CALCOLO DELLA AUTOINDUTANZA L ATTRAVERSO IL CALCOLO DELL'ENERGIA MAGNETICA

$$L = \frac{2W_m}{I^2}$$

i) TRACCIARE L'ANDAMENTO DELLA DENSITÀ DI FLUSSO MAGNETICO B

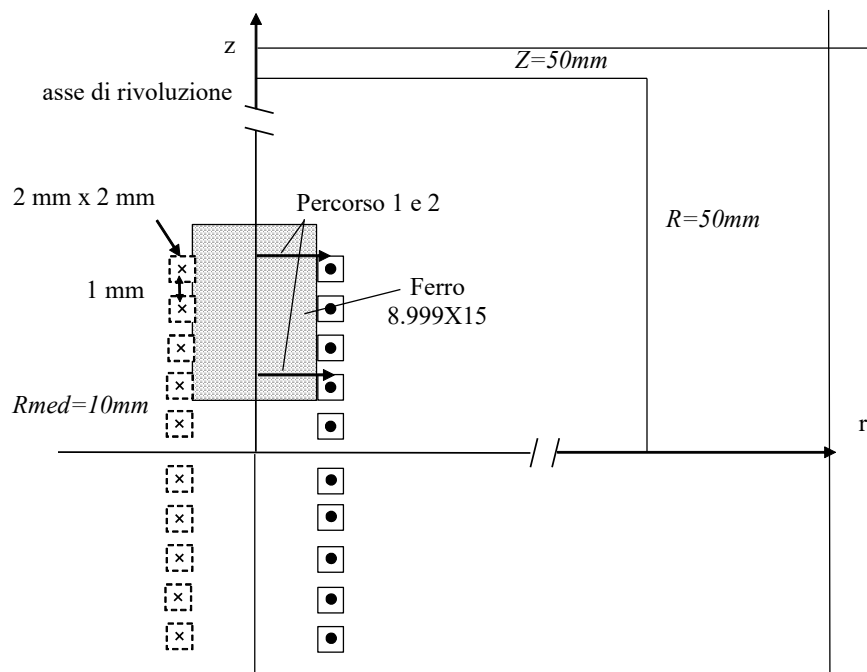
- i. lungo 34mm, a partire dal punto (r=5; z=-17), sino al punto (r=5; z=17)
- ii. lungo 120 mm, a partire dal punto (r=0; z=-60), sino al punto (r=0; z=60)
- iii. lungo 10 mm, a partire dal punto (r=0; z=14.5), sino al punto (r=10; z=14.5)
- iv. lungo 10 mm, a partire dal punto (r=0; z=0.5), sino al punto (r=10; z=0.5)

Dal menu **Results** → **1D plot group** → **Line Graph**, i segmenti sono già stati definiti tutti in precedenza.

## Esercizio 2: solenoide “corto” con nucleo in ferro parzialmente inserito

Eseguire l'analisi magnetostatica come specificato nell'esercitazione 3 aggiungendo il nucleo cilindrico di ferro. Modificare la geometria dell'esercizio precedente inserendo un nucleo di ferro come riportato in figura con le seguenti caratteristiche:

- Materiale  $r=4000$
- Altezza 14.5 (con il corner in  $r=0\text{mm}$   $z=2.5\text{mm}$ )



- ✓ mappare le linee equiflusso e il vettore induzione magnetica
- ✓ visualizzare valori massimi e minimi dell'induzione magnetica sull'intero dominio
- ✓ calcolare l'autoinduttanza  $L$  usando il flusso concatenato
- ✓ calcolare l'energia magnetica del solenoide
- ✓ calcolare l'autoinduttanza  $L$  usando l'energia magnetica
- ✓ calcolare la forza che agisce sul nucleo ferromagnetico

B [T]	$\Phi$ [Wb]	W [Joule]	L [H] (Flusso c.)	L [H] (E. Mag.)	F (ferro) [N]

## **PREPROCESSING**

### **Physics setting**

Impostare nello il calcolo della forza:

- Cliccare su *Magnetic field (mf)* → *Force Calculation* → *selezionare il nucleo in ferro*

## **SOLVER**

- Eseguire lo studio

## **POSTPROCESSING**

Per visualizzare i valori della forza che a:

- *Results* → *Derived values* → *Global evaluation* → *Expression* → *Mechanical*, selezionare *Electromagnetic force, z component* → *evaluate*