

La Resistenza elettrica in Alternata

AUTORE Prof. : Ing. FERDINANDO FUSCO

INTRODUZIONE

Scopo dell'unità didattica è la conoscenza degli studenti sulla dipendenza della resistenza dei conduttori al variare della frequenza delle correnti circolanti. Tale relazione tra resistenza e frequenza sarà evidenziata con un software di simulazione. Inoltre, saranno illustrati i vari passi necessari per effettuare ulteriori prove di simulazione sull'argomento trattato.

OBIETTIVI DELLA SIMULAZIONE

Calcolo della resistenza e visualizzazione grafica della distribuzione di corrente sulla sezione di un conduttore cilindrico, per fissata sezione e frequenze di prova

STRUMENTO

SOFTWARE MAXWELL SV

INDICE

1. Cenni teorici sull'effetto pelle

2. Le prove effettuate

3. Utilizzo del simulatore

CENNO TEORICO SULL'EFFETTO PELLE

- In un conduttore di sezione uniforme, attraversato da corrente continua, la densità di corrente J è uniforme.
- In alternata, invece, ogni elemento infinitesimo dS di sezione è interessato da una densità di corrente $J(r,t)$ crescente dal centro del conduttore verso la periferia.
- Ogni filo di sezione dS , con i quali si può immaginare di suddividere il conduttore, è interessato dal campo magnetico variabile prodotto dai fili corrispondenti alle sezione circostanti.

CENNO TEORICO SULL'EFFETTO PELLE

- Il campo magnetico, per la legge di Lenz, produce sui conduttori di sezione dS una forza elettromotrice che si oppone al passaggio di corrente.

$$e(t) = - \frac{d\phi}{dt}$$

- I conduttori di sezione dS più interni sono concatenati al massimo con tutto il flusso prodotto dai rimanenti conduttori.
- Le sezioni dS più periferiche risentono di meno dell'effetto perché più distanti dal centro.

CENNO TEORICO SULL'EFFETTO PELLE

- Il risultato è che l'interno del semiconduttore offre una impedenza più alta della periferia.
- Si avrà quindi un maggiore addensamento di correnti nelle zone periferiche.
- La resistenza di un conduttore di raggio r per effetto pelle dipende approssimativamente dalla frequenza secondo la:

$$R = R_0 [1 + r \sqrt{(\omega\mu\sigma)}]$$

R_0 resistenza in continua, μ permeabilità magnetica, σ conducibilità del conduttore.

CENNO TEORICO SULL'EFFETTO PELLE

SPESSORE DI PENETRAZIONE

- Si dimostra che l'effetto della variazione di resistenza in funzione della frequenza è legato al rapporto tra il raggio r del conduttore e il parametro δ “spessore di penetrazione” dipendente dal materiale:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}$$

CENNO TEORICO SULL'EFFETTO PELLE

SPESSORE DI PENETRAZIONE

Per il rame:

- $\mu = 4 \pi 10^{-7} \text{ H/m}$
- $\sigma = 5,8 10^7 \text{ S/m}$

e con $f = 50 \text{ Hz}$ risulta

$$\delta_{\text{Cu}}(50\text{Hz}) \cong 9,3 \text{ mm}$$

CENNO TEORICO SULL'EFFETTO PELLE

SPESSORE DI PENETRAZIONE

- In pratica si parla di effetto pelle quando:

$$r > (4 \div 5) \delta$$

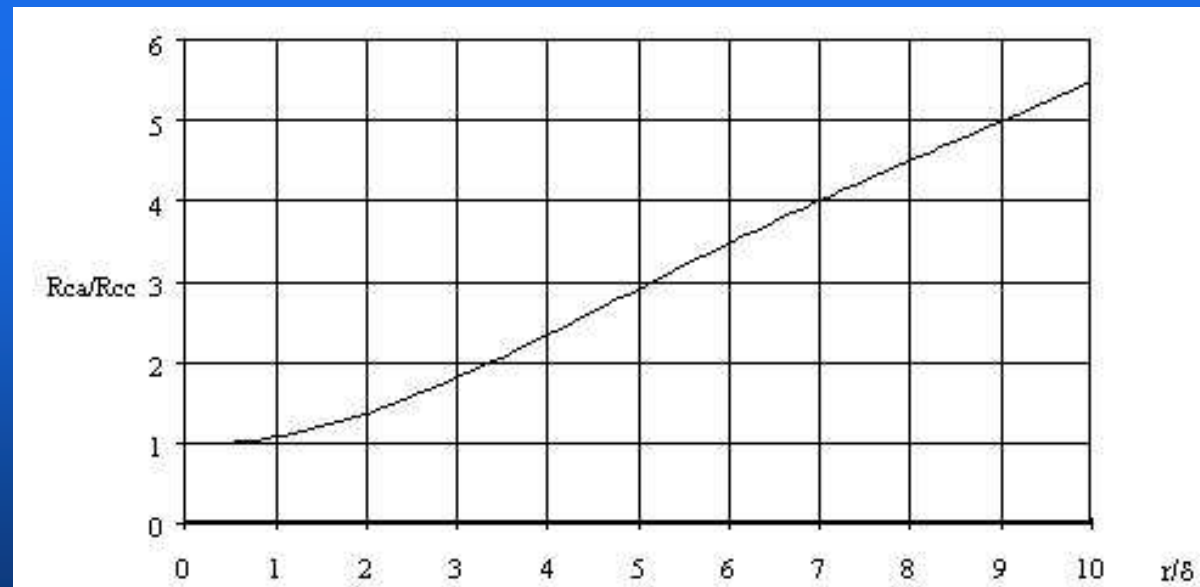
Con r raggio del conduttore.

- Con $r < \delta$ l'aumento di resistenza del conduttore, all'aumentare della frequenza, è praticamente nullo.

CENNO TEORICO SULL'EFFETTO PELLE

SPESSORE DI PENETRAZIONE

- Andamento del rapporto tra la resistenza in alternata e la resistenza in continua in funzione del rapporto r/δ .



LE PROVE EFFETTUATE

- Le simulazioni effettuate riguardano conduttori cilindrici di rame con raggio:

$$r = 4 \text{ mm}$$

$$r = 6 \text{ cm}$$

- Le frequenze considerate sono:

$$f = 0 \text{ Hz (DC)}$$

$$f = 50 \text{ Hz (frequenza industriale)}$$

$$f = 500 \text{ Hz}$$

$$f = 5000 \text{ Hz}$$

- Il valore della corrente impressa per tutte le prove:

$$I = 150 \text{ A}$$

LE PROVE EFFETTUATE

Per ogni prova effettuata:

- il programma di simulazione ha raffigurato la distribuzione della densità di corrente $J(r)$.
- Sono stati calcolati i valori delle resistenze corrispondenti ai diversi valori delle frequenze imposte.

Per il calcolo è stata adottata la relazione:

$$R = \frac{P_j}{\int_S J^2 dS} = \frac{P_j}{I^2}$$

con P_j potenza persa nel conduttore per effetto joule e I valore efficace della corrente imposta nel conduttore.

LE PROVE EFFETTUATE

CONFRONTO

- Confrontando i risultati delle due serie di prove si vuole dimostrare la veridicità della dipendenza del rapporto R_{ac}/R_{cc} dal rapporto r/δ .

- *R_{ac} resistenza in alternata*

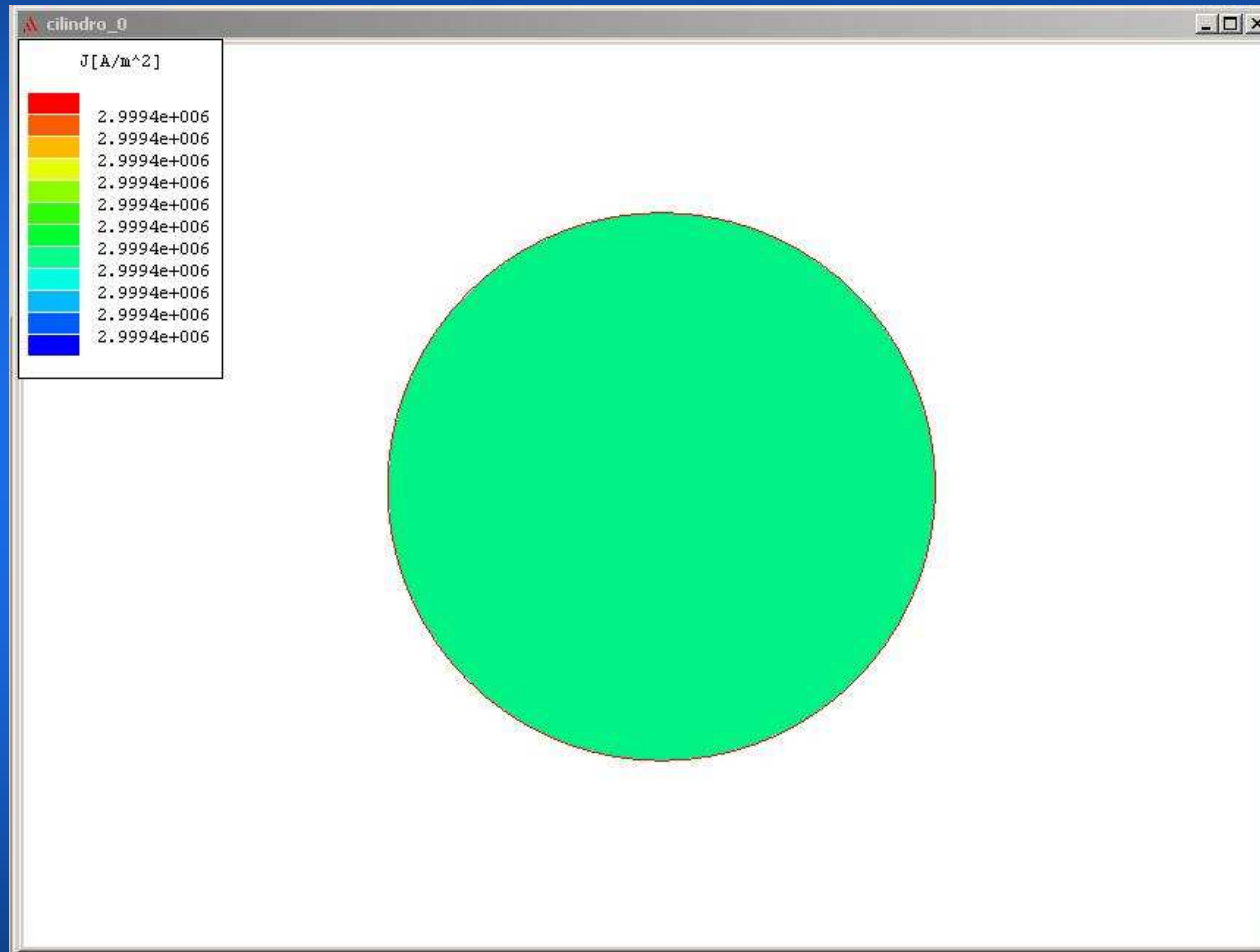
- *R_{cc} resistenza in continua*

- *r raggio del conduttore*

- *δ spessore di penetrazione*

I SERIE DI PROVE

$r = 4 \text{ mm}$ $f = 0 \text{ Hz}$



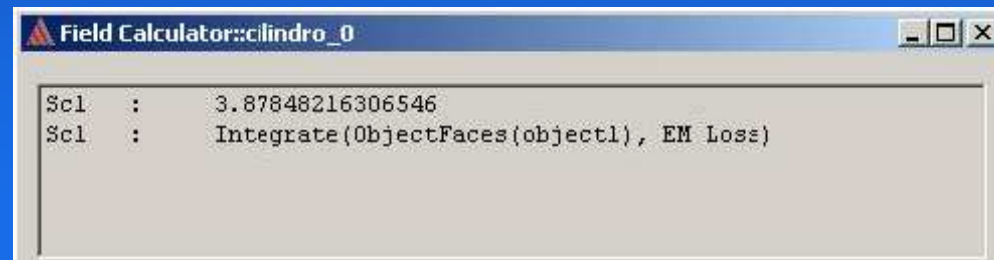
La simulazione restituisce una densità di corrente J uniforme

Indice

I SERIE DI PROVE

$$r = 4 \text{ mm} \quad f = 0 \text{ Hz}$$

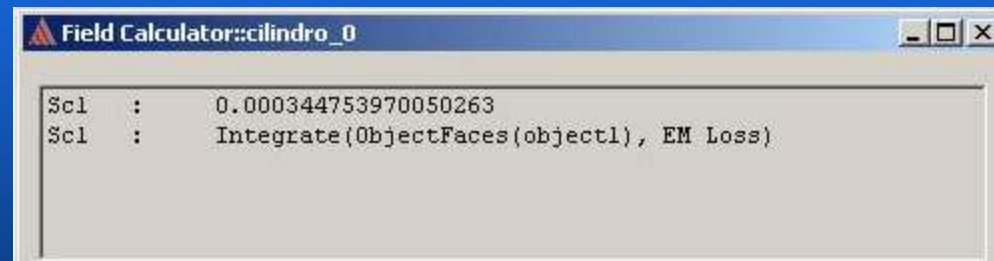
- Integrale o Perdite per effetto joule, operato dal simulatore sulla sezione del conduttore, della potenza persa per unità di superficie.



```
Field Calculator::cilindro_0
Sc1 : 3.87848216306546
Sc1 : Integrate(ObjectFaces(object1), EM Loss)
```

- Dividendo il valore dell'integrale calcolato sulla sezione del conduttore per il quadrato della corrente, avrò la resistenza R_{cc} .

$$R_{cc} = \frac{\rho \cdot l}{S}$$

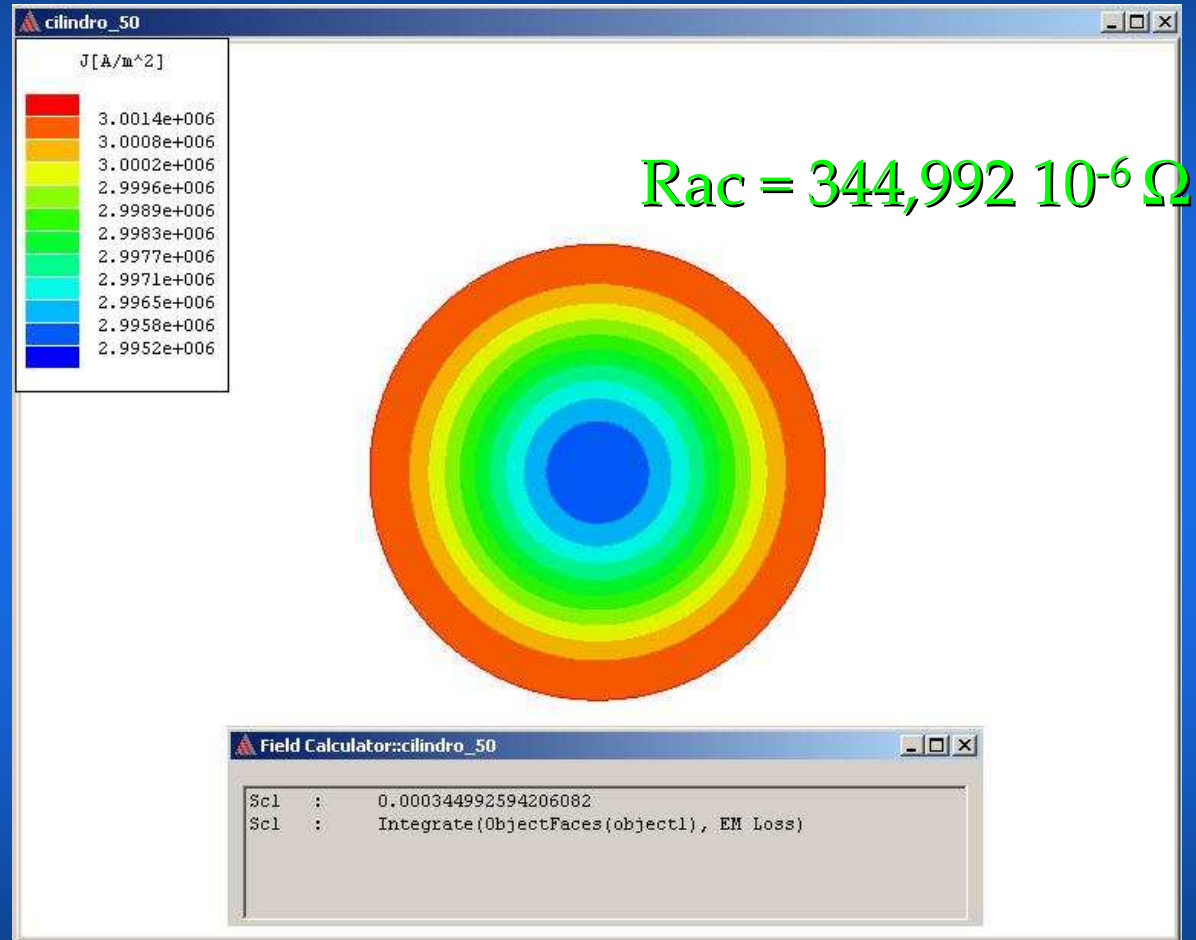


```
Field Calculator::cilindro_0
Sc1 : 0.000344753970050263
Sc1 : Integrate(ObjectFaces(object1), EM Loss)
```

$$R_{cc} = 344,753 \cdot 10^{-6} \Omega$$

I SERIE DI PROVE

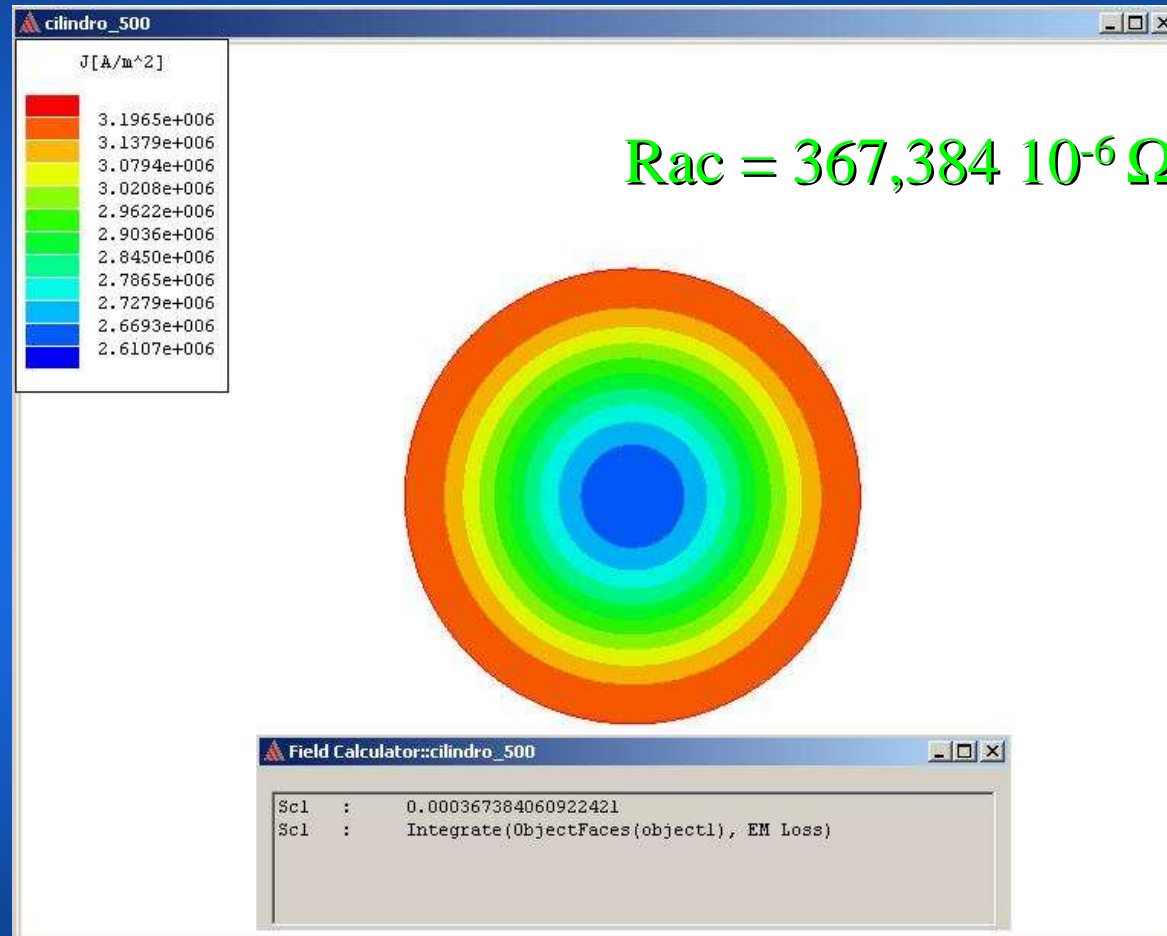
$$r = 4 \text{ mm} \quad f = 50 \text{ Hz} \quad \delta = 9,3 \text{ mm}$$



A 50 Hz la densità di corrente non è più uniforme

I SERIE DI PROVE

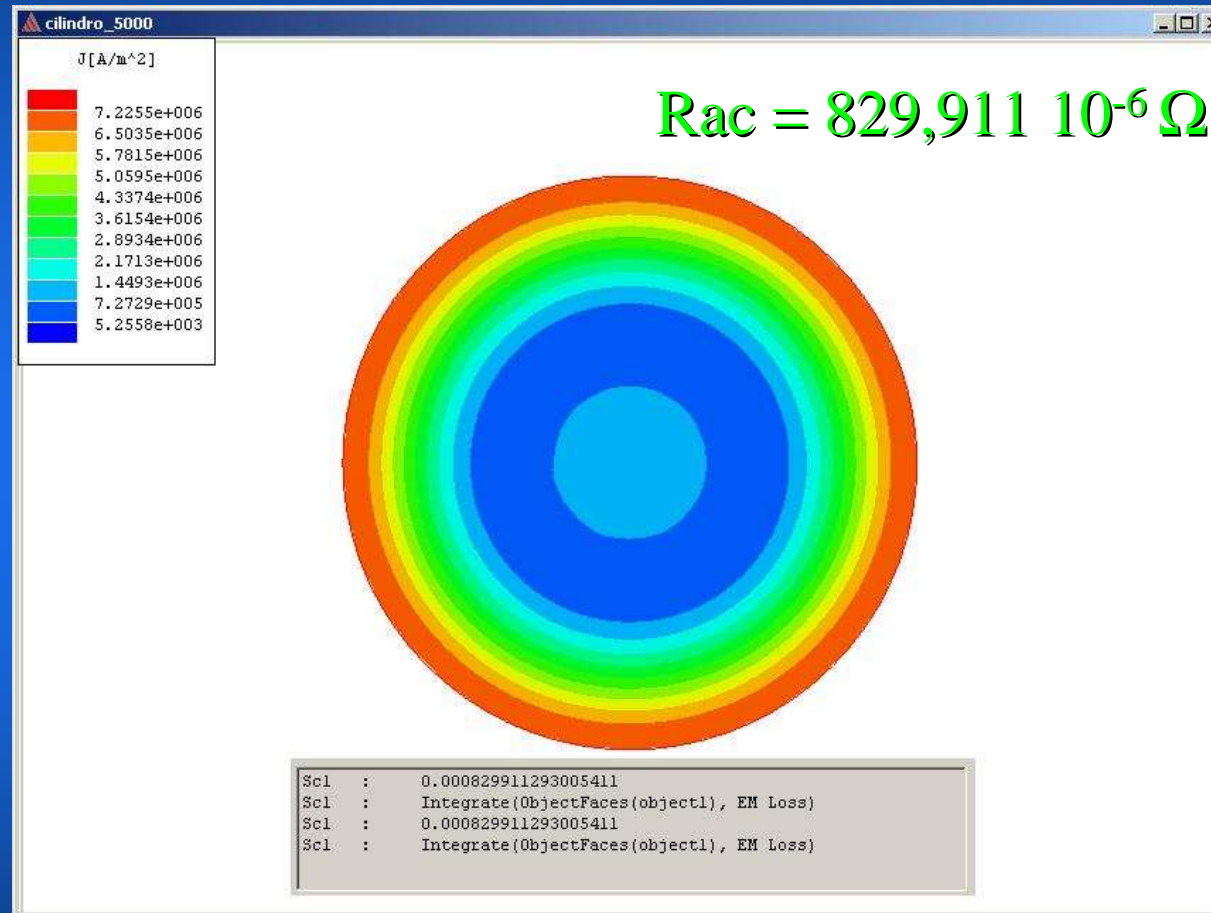
$$r = 4 \text{ mm} \quad f = 500 \text{ Hz} \quad \delta = 2,9 \text{ mm}$$



A 500 Hz la variazione di R_{ac} è nell'ordine del $2 \cdot 10^{-5}$

I SERIE DI PROVE

$r = 4 \text{ mm}$ $f = 5000 \text{ Hz}$ $\delta = 0,9 \text{ mm}$



A 5000 Hz la variazione di R_{ac} è nell'ordine del $5 \cdot 10^{-4}$. $R_{ac}/R_{cc} \cong 2.4$

I SERIE DI PROVE

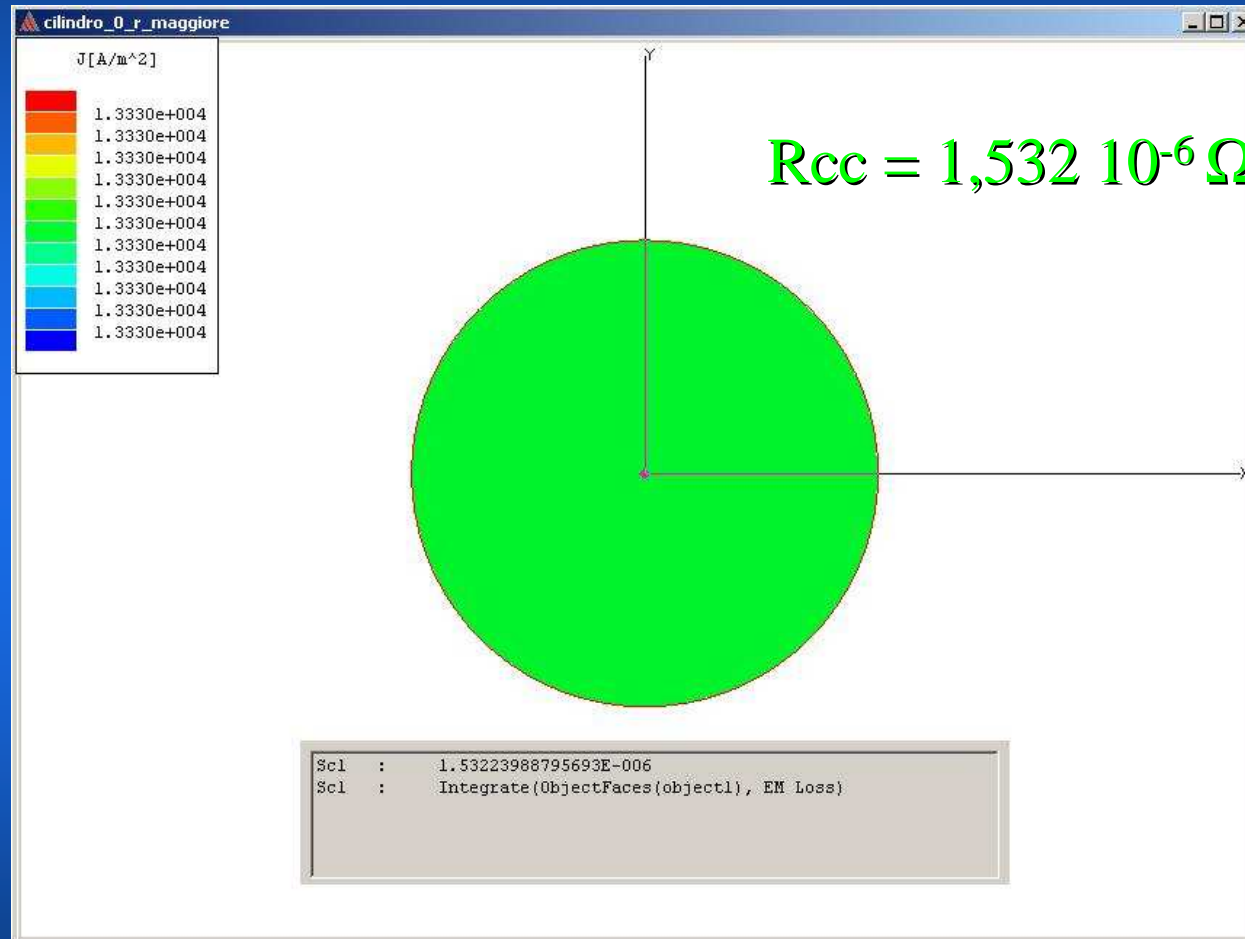
$$r = 4 \text{ mm} \quad f = 5, 50, 500, 5000 \text{ Hz}$$

CONCLUSIONI sulla prima serie di prove

- A conclusione della prima serie di prove, come già precedentemente riportato, possiamo affermare che a 5000 Hz $r > 4\delta$ e il rapporto $R_{ac}/R_{cc} > 2$.

II SERIE DI PROVE

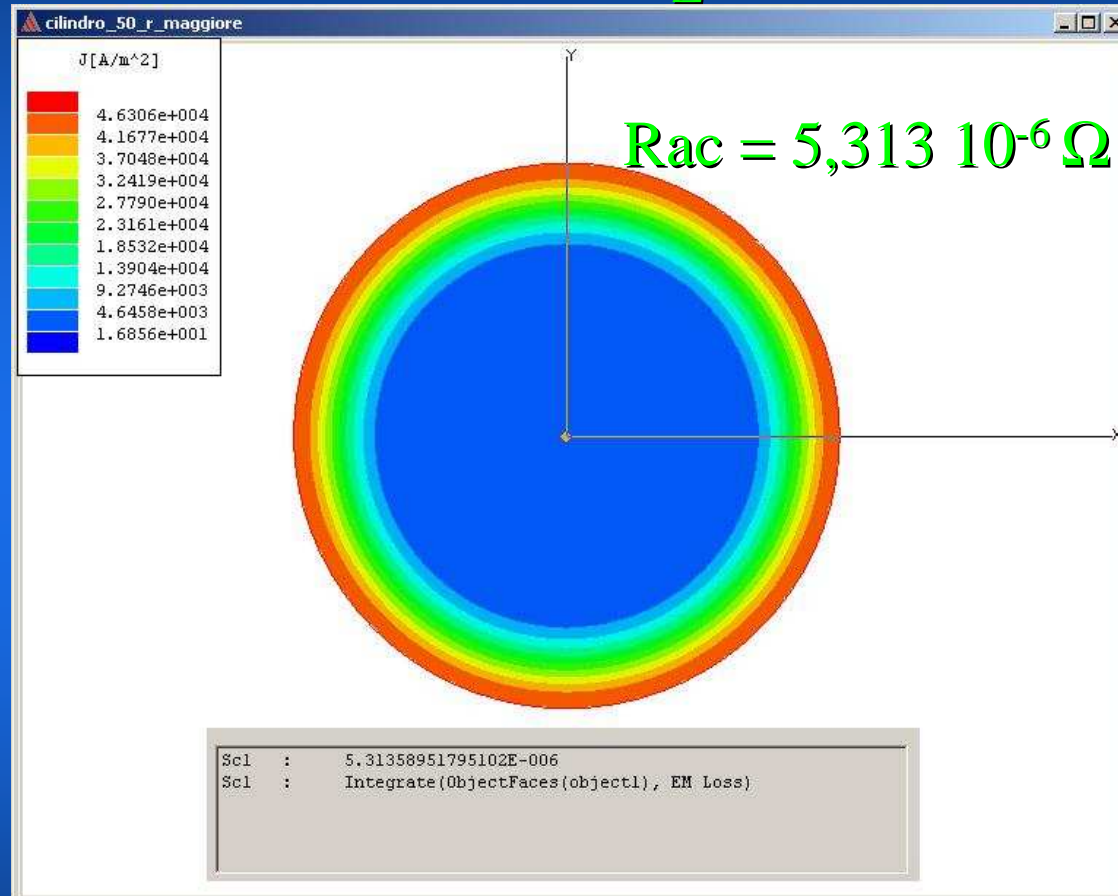
$$r = 6 \text{ cm} \quad f = 0 \text{ Hz}$$



In DC la densità di corrente è perfettamente uniforme

II SERIE DI PROVE

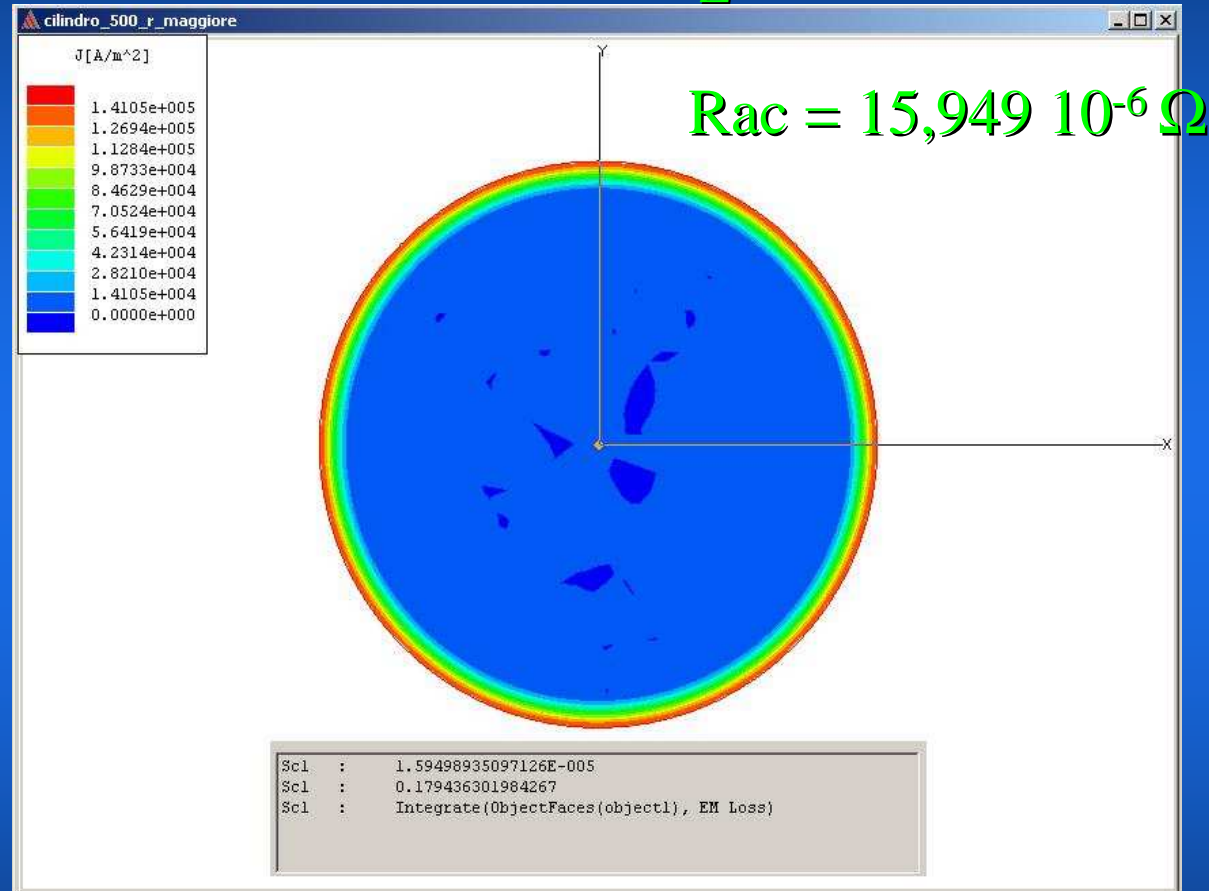
$r = 6 \text{ cm}$ $f = 50 \text{ Hz}$ $\delta = 9,3 \text{ mm}$



A 50 Hz è già molto evidente la non uniformità di J . $R_{ac}/R_{cc} \cong 5$

II SERIE DI PROVE

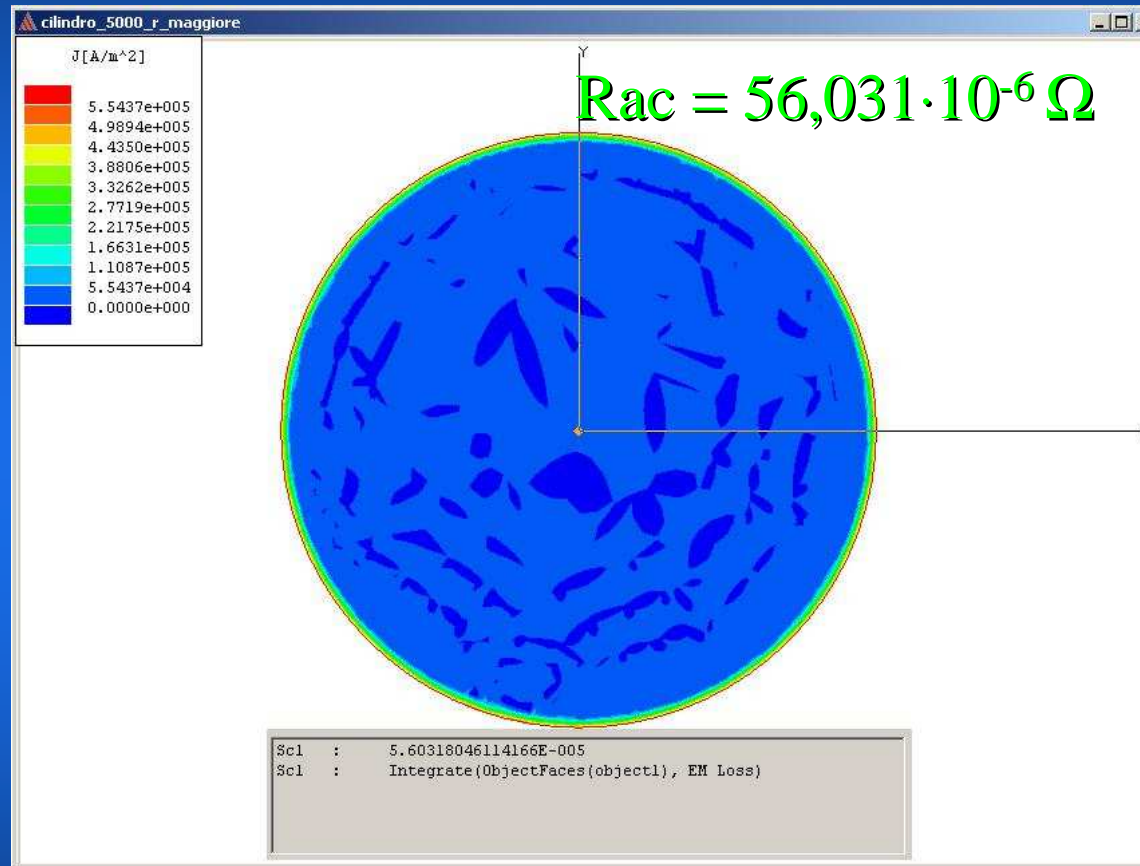
$r = 6 \text{ cm}$ $f = 500 \text{ Hz}$ $\delta = 2,9 \text{ mm}$



A 500 Hz la variazione di R è nell'ordine del $1 \cdot 10^{-5}$. $R_{ac}/R_{cc} \cong 15$

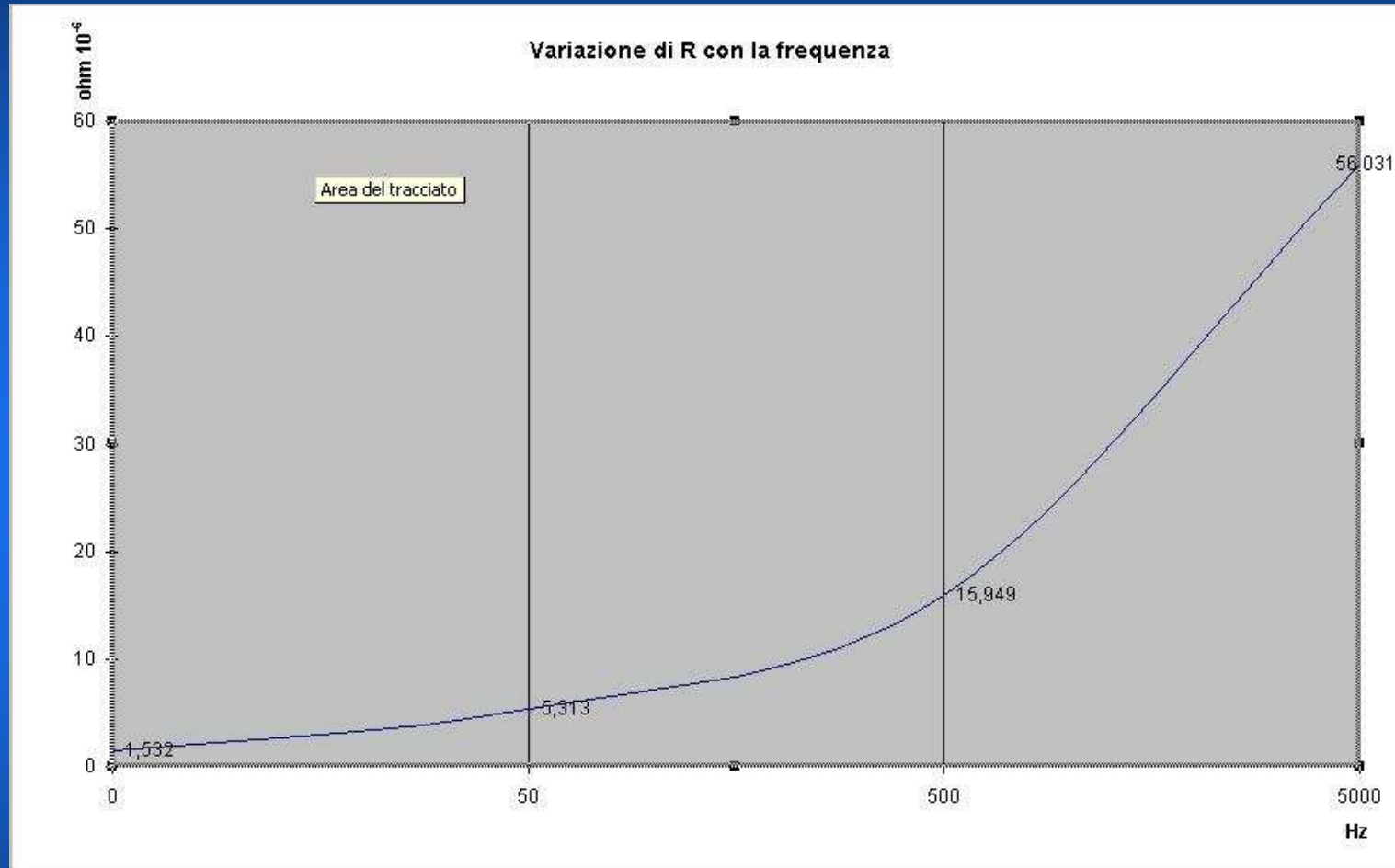
II SERIE DI PROVE

$$r = 6 \text{ cm} \quad f = 5000 \text{ Hz} \quad \delta = 0,9 \text{ mm}$$



A 5000 Hz la variazione di R è nell'ordine del $5 \cdot 10^{-5}$. $R_{ac}/R_{cc} \cong 56$.
E' evidente l'addensamento della corrente sullo strato superficiale.

II SERIE DI PROVE



Andamento della $R_{ac}(f)$ al variare di f tra $0 \div 5000$ Hz per conduttore cilindrico di rame con raggio $r = 6$ cm.

CONCLUSIONI

- Confrontando la seconda serie di prove con i risultati ottenuti dalla prima, si può osservare che per $r = 6$ cm, già a 50 Hz il rapporto $r/\delta > 6$ e $R_{ac}/R_{cc} > 5$.
- Resta quindi valido quanto precedentemente detto a proposito del rapporto esistente tra r/δ e R_{ac}/R_{cc} .
- In definitiva, per una data frequenza, quanto più grande è il rapporto r/δ tanto maggiore sarà l'effetto pelle e quindi tanto più inutilizzata la parte centrale del conduttore.

LA SIMULAZIONE CON IL SOFTWARE

MAXWELL SV

Autore: ing. Fusco Ferdinando

Indice

1. COME EFFETTUARE LE SIMULAZIONI CON MAXWELL SV

Per effettuare le simulazioni sull'argomento della lezione sono necessari i seguenti passi:

1. *Apertura del software e nome progetto*



2. *Apertura progetto e scelta dei comandi esecutivi:
SOLVER -*



3. *Definizione del modello (DRAW MODEL)*



4. *Disegno della sezione del conduttore cilindrico*



5. *Scelta del materiale – COPPER -*



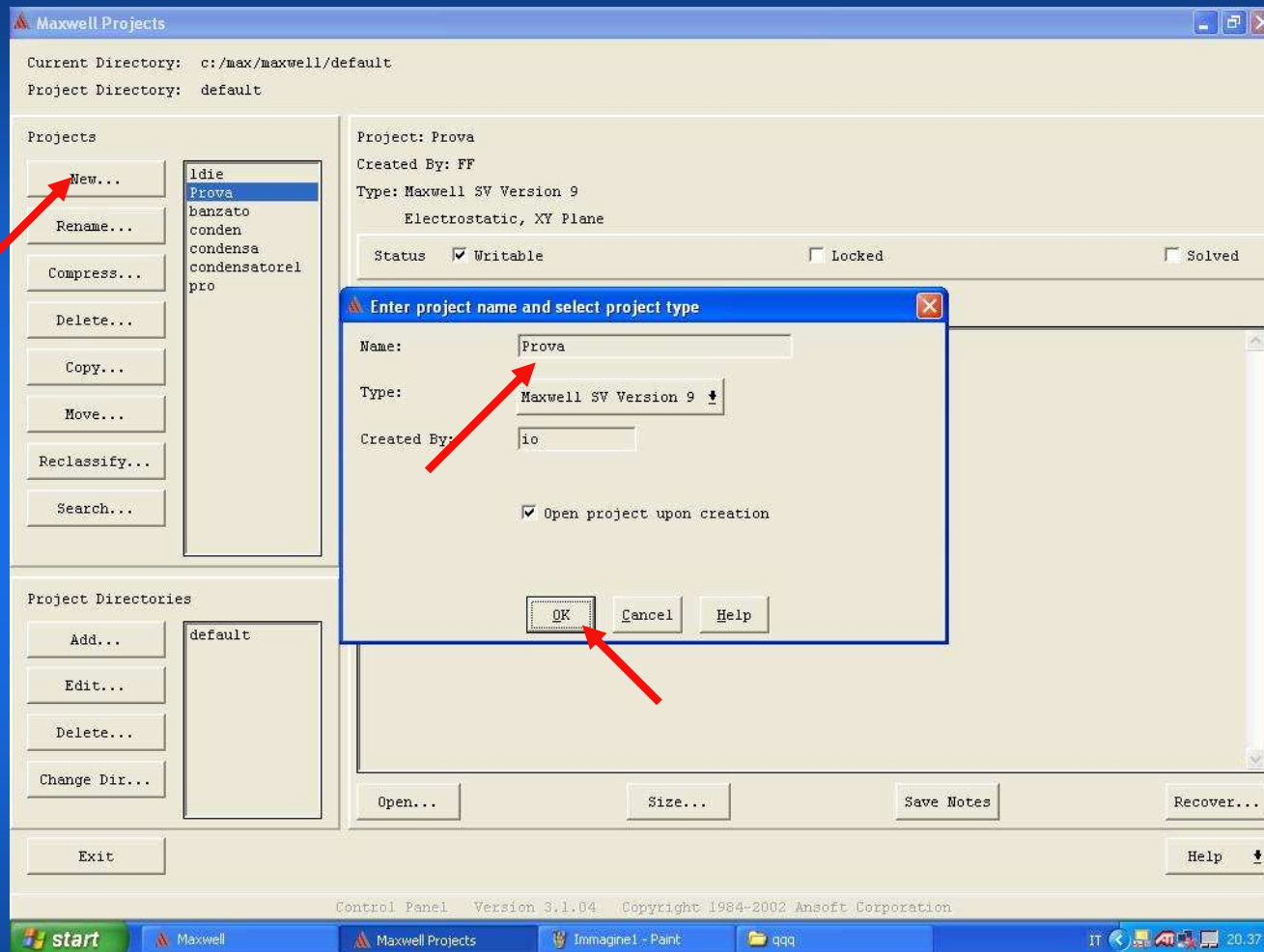
2. COME EFFETTUARE LE SIMULAZIONI CON MAXWELL SV

6. *Selezione e scelta della corrente elettrica applicata* 

7. *Avvio della simulazione* 

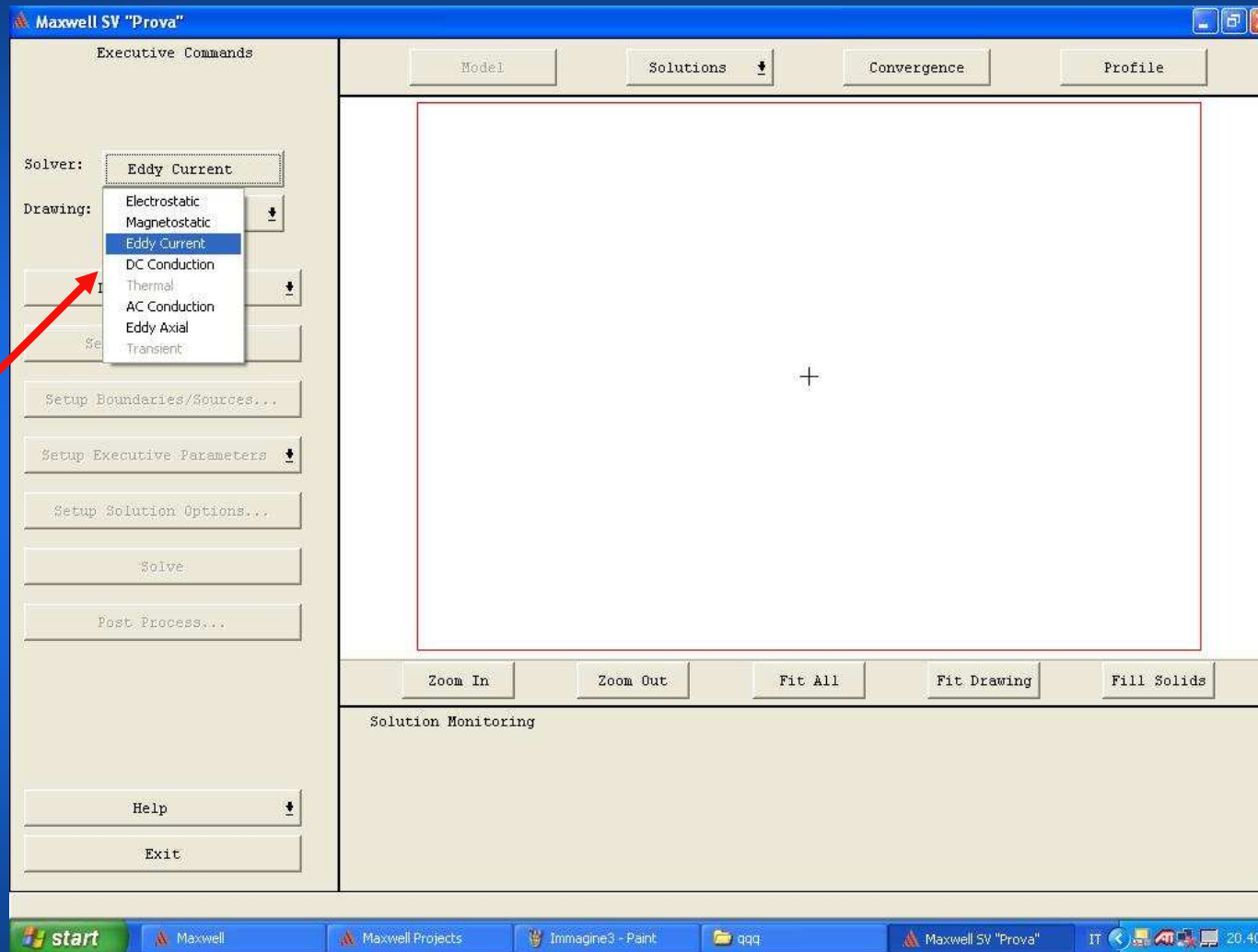
8. *Risultati della simulazione* 

APERTURA DEL SW E NOME PROGETTO



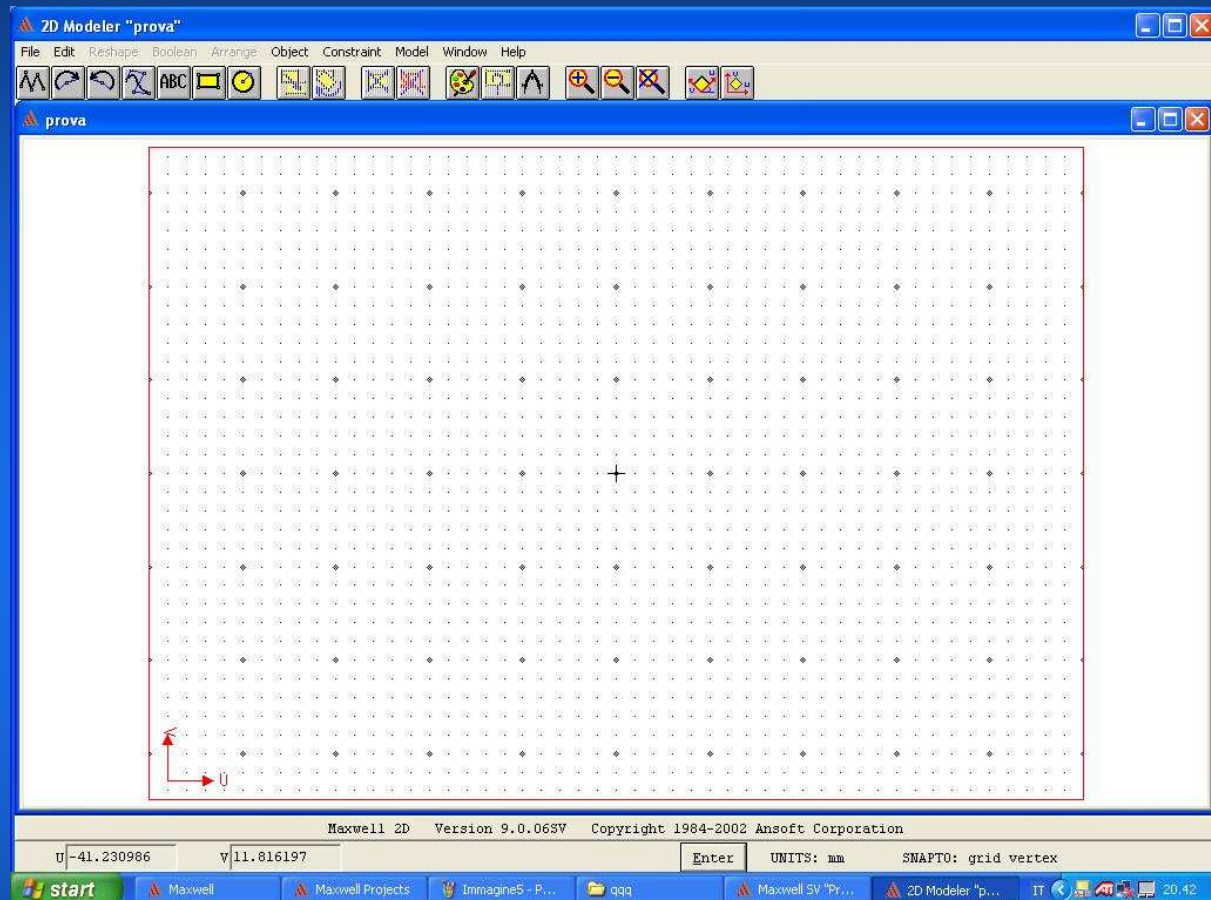
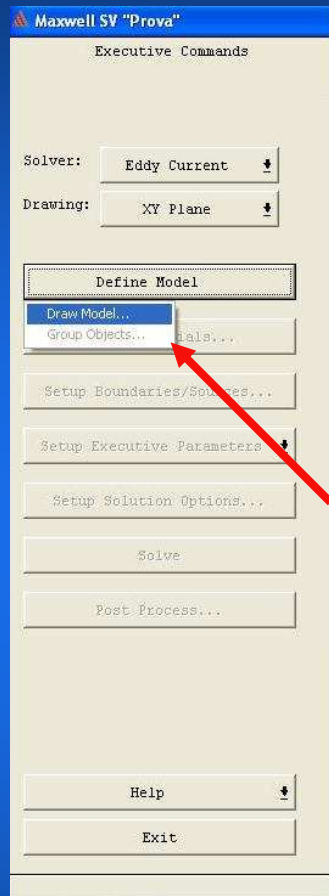
L'apertura del programma, l'ingresso alla sezione PROJECTS, il clic sul tasto NEW permettono di dare un nome al progetto, ad esempio PROVA.

APERTURA PROGETTO E SCELTA DEI COMANDI ESECUTIVI



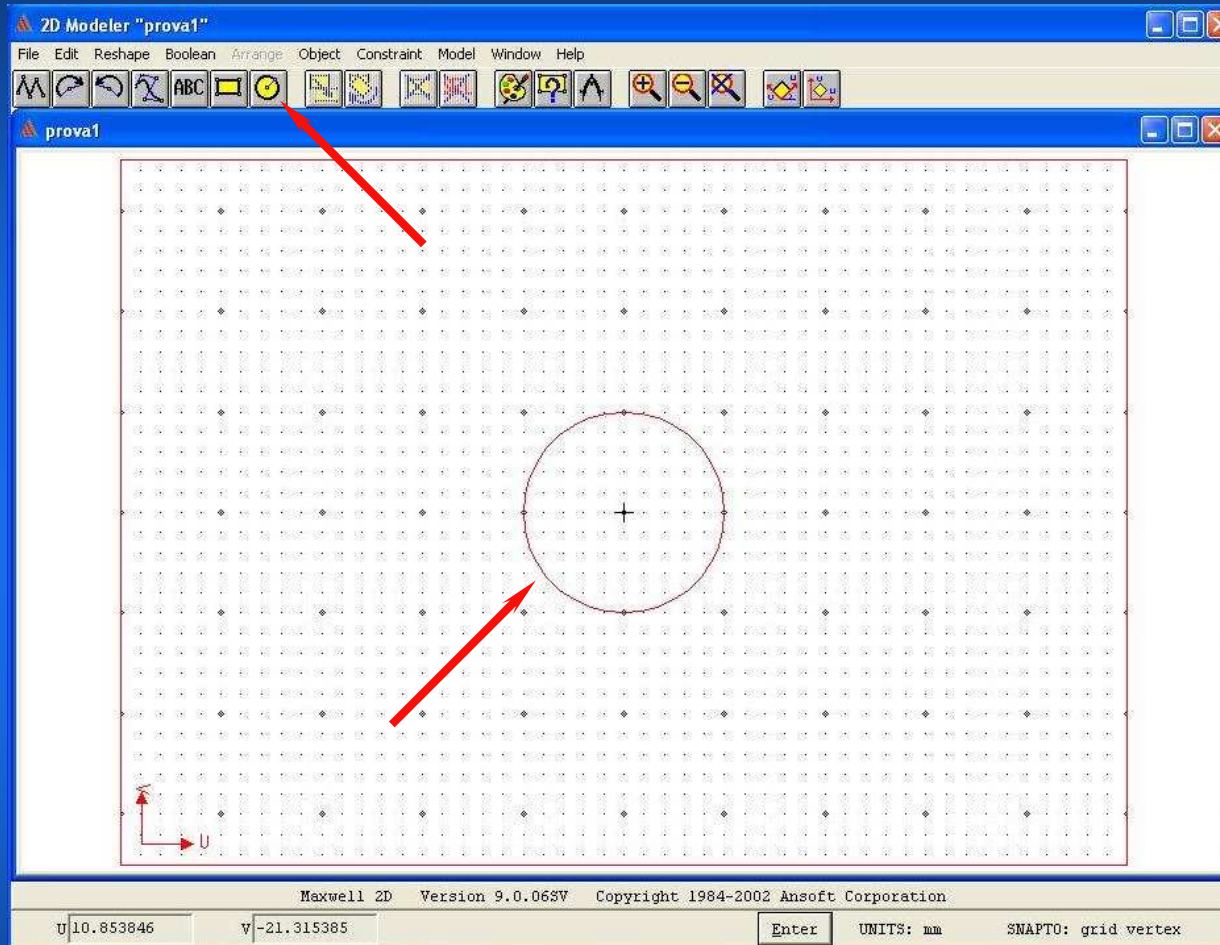
Aperto il progetto, nella sezione SOLVER scegliere la funzione **EDDY CURRENT**

DEFINIZIONE DEL MODELLO



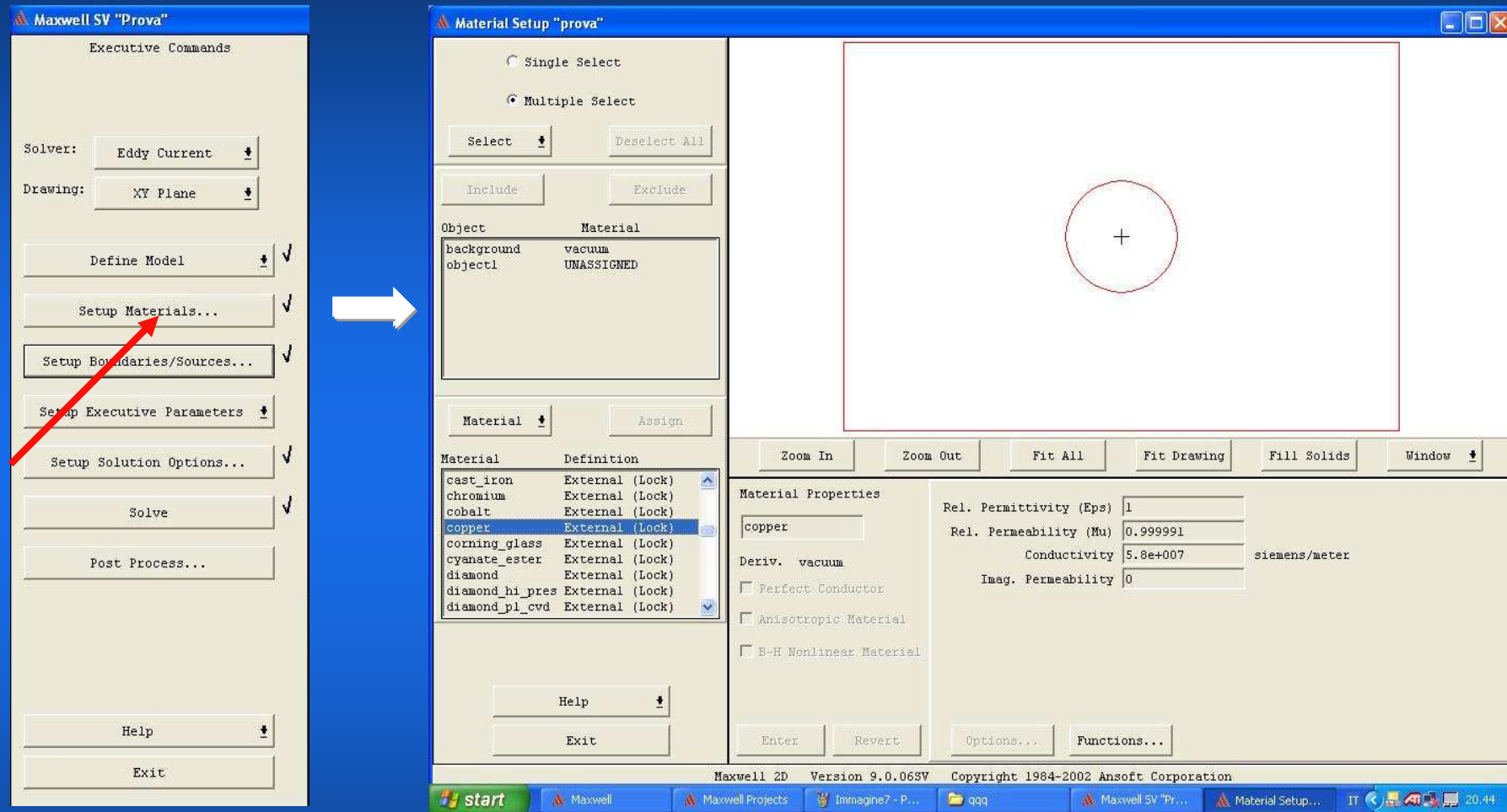
Aperta la sezione DEFINE MODEL scegliere il modello DRAW. Si aprirà la schermata "2d Modeler" nella quale effettuare il disegno in sezione del CONDUTTORE.

DISEGNO DELLA SEZIONE DEL CONDUTTORE



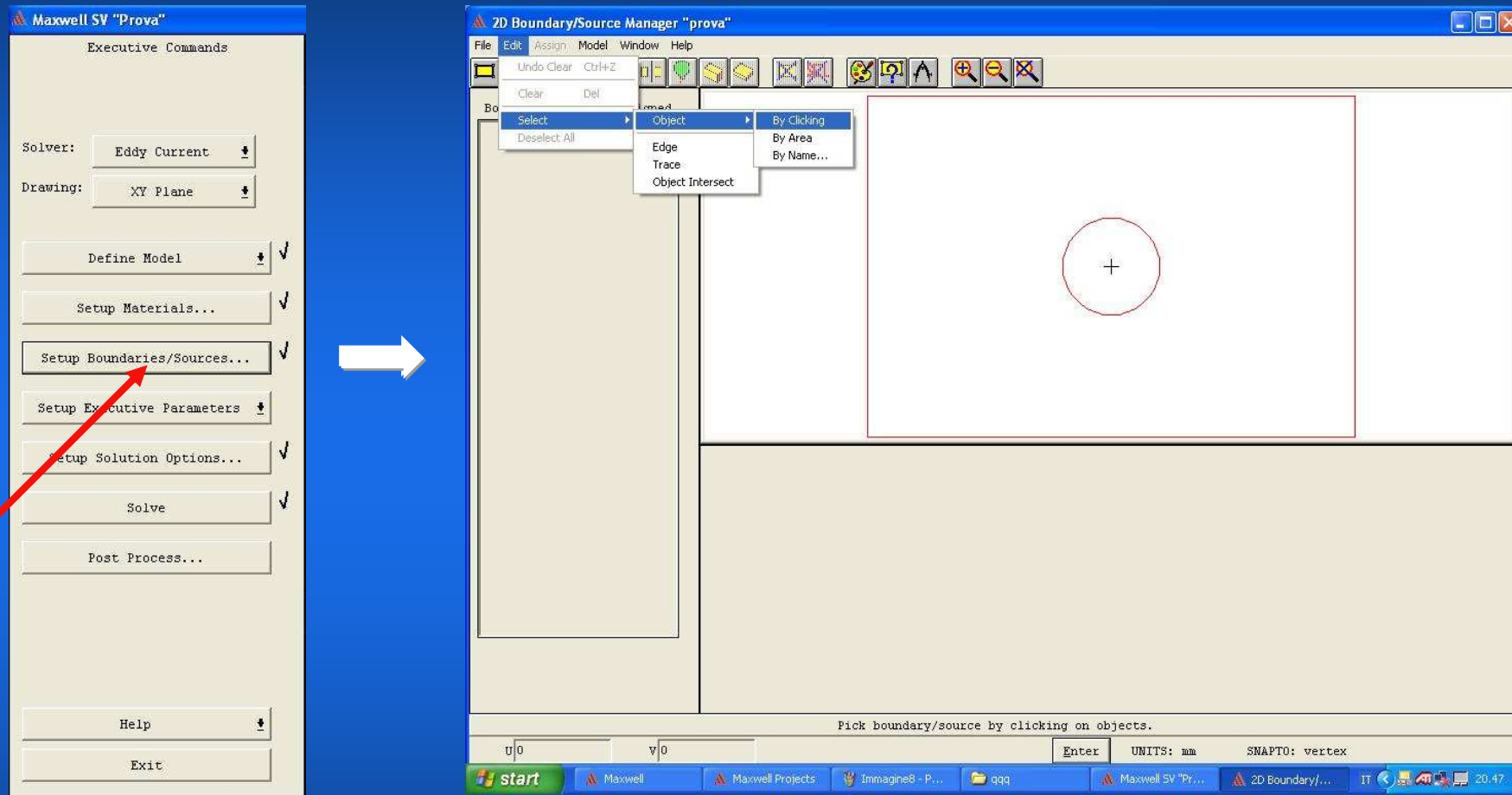
1. Cliccando sull'icona gialla del cerchio, è possibile disegnare un cerchio rappresentativo della sezione del CONDUTTORE.
2. Salvo e chiudo la finestra.

SCELTA DEL MATERIALE



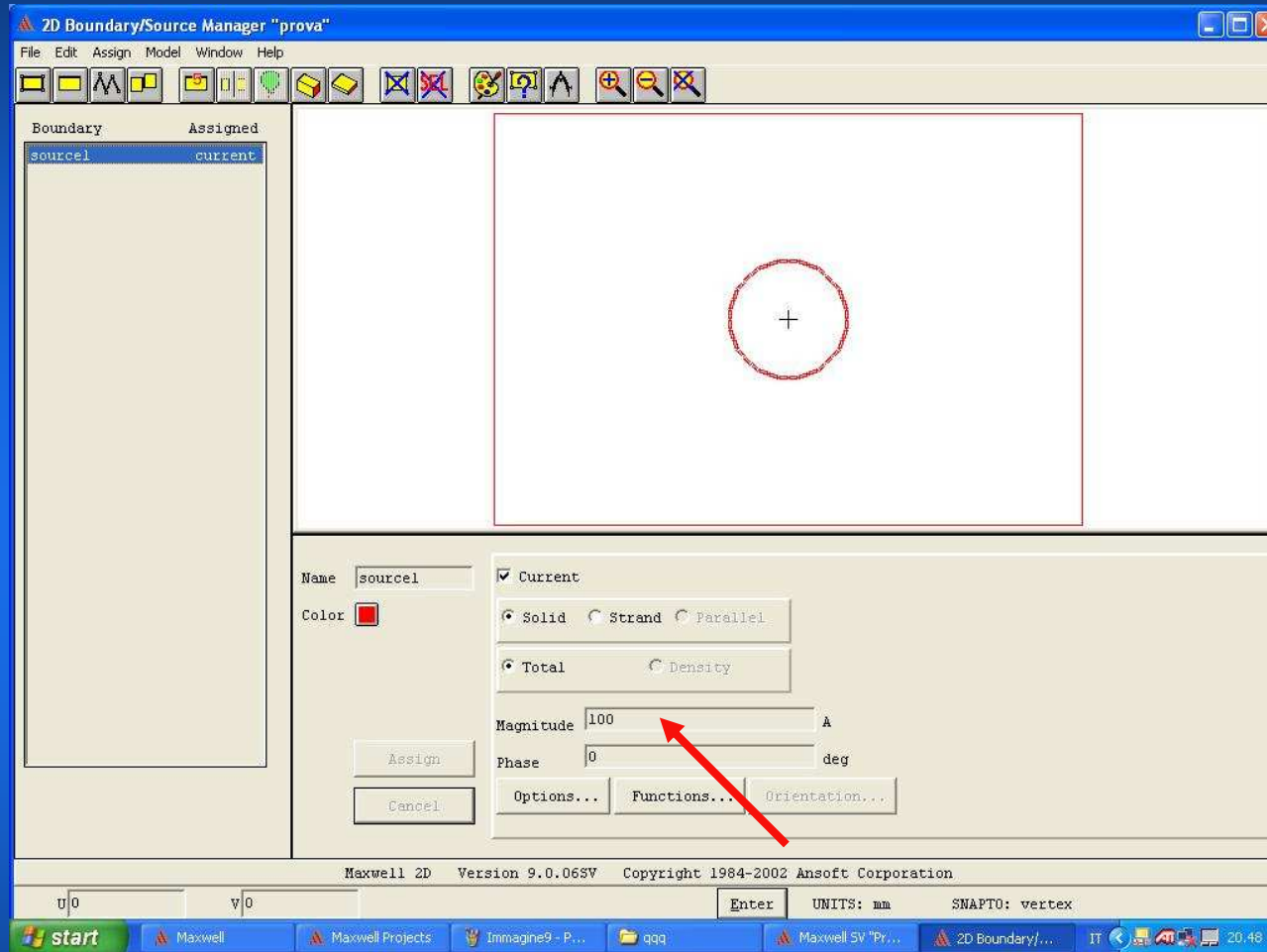
Cliccando sul tasto SETUP MATERIALS è possibile scegliere il materiale del CONDUTTORE, in questo caso il rame (copper).

1. SCELTA DELLA CORRENTE APPLICATA



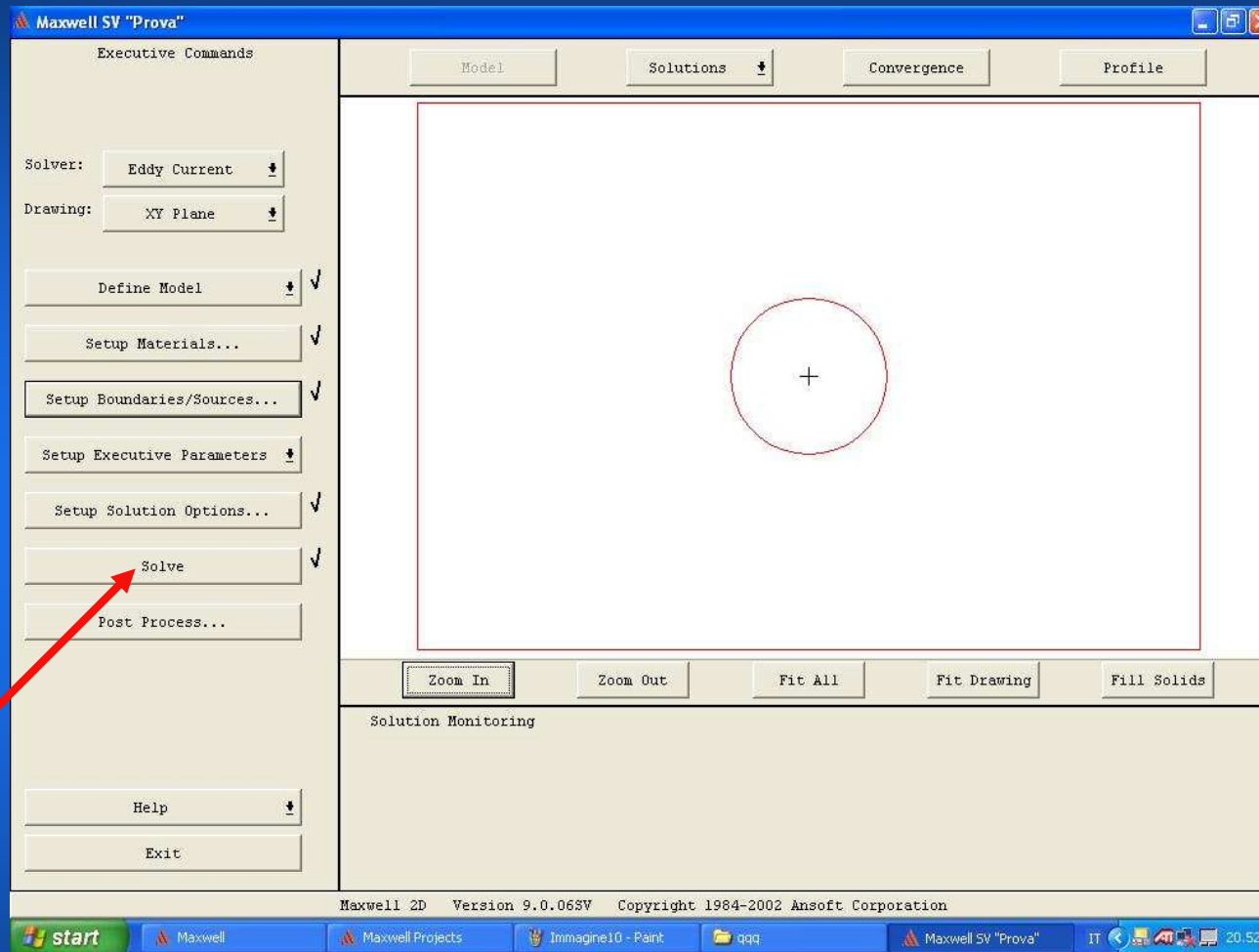
Cliccando sul tasto SETUP BOUNDARIES/SOURCES è possibile selezionare l'oggetto CONDUTTORE e la corrente da applicarvi.

2. SCELTA DELLA CORRENTE APPLICATA



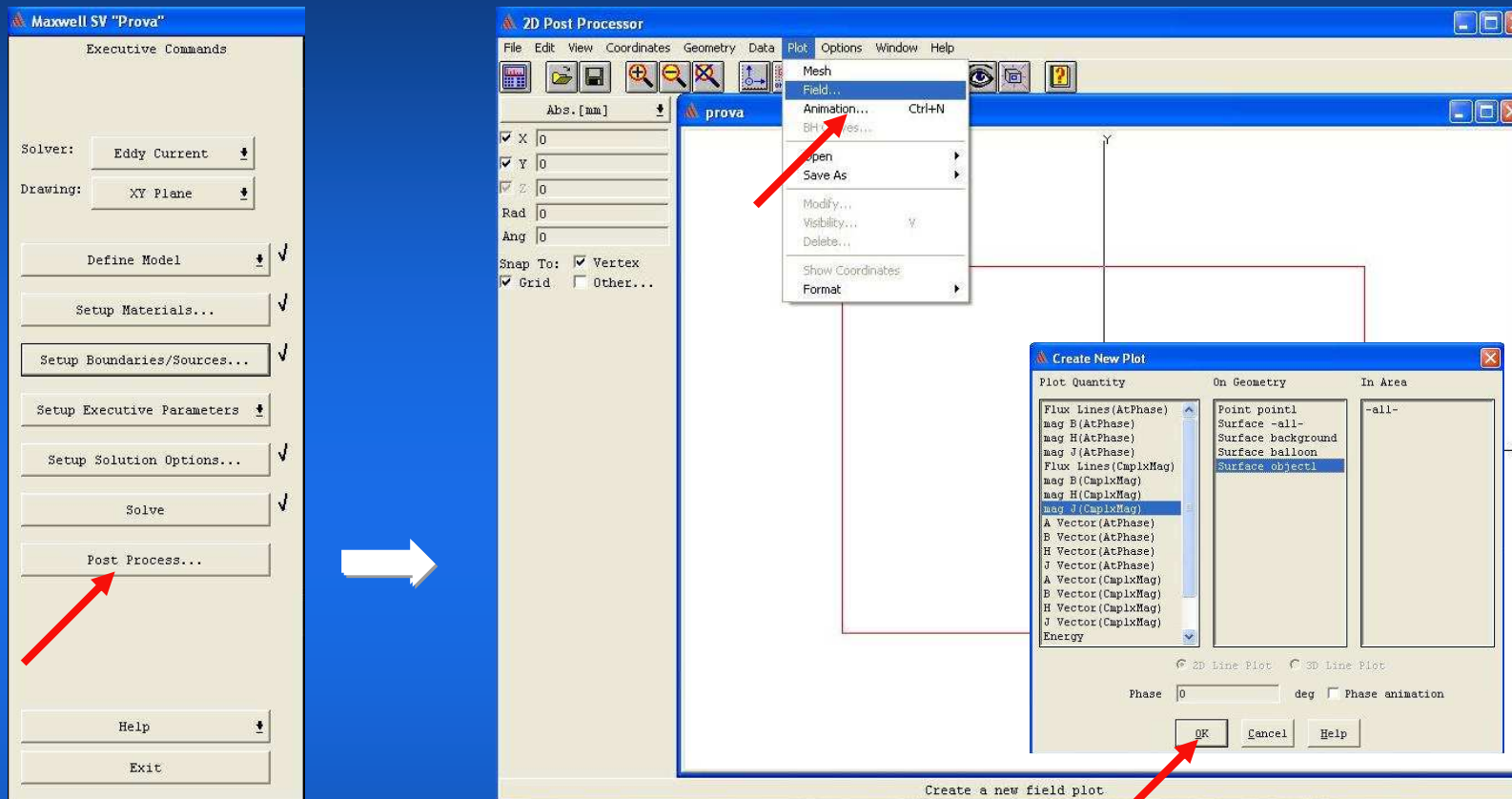
Inserisco il valore di AMPIEZZA della corrente elettrica.

LANCIO DELLA SIMULAZIONE



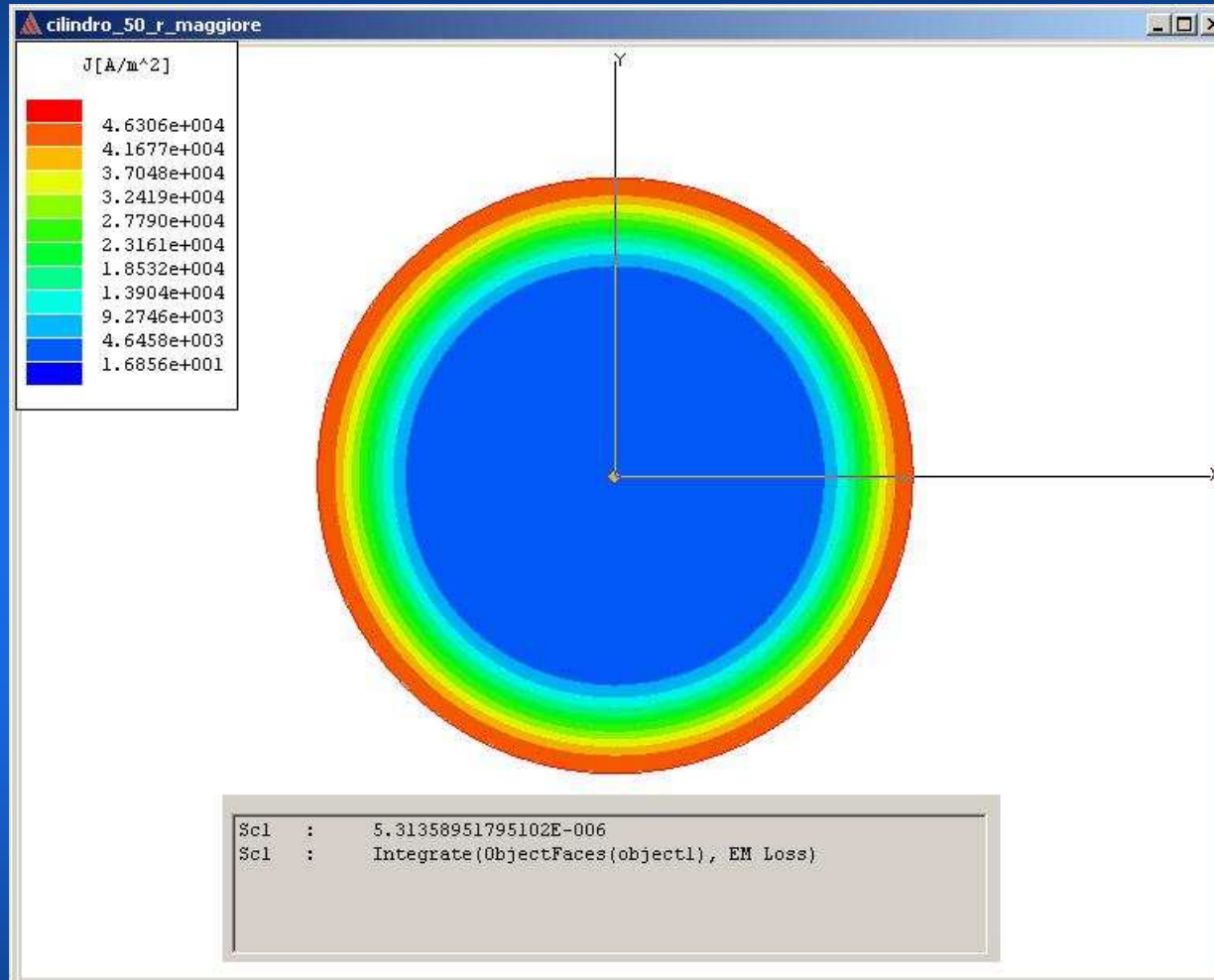
Cliccando sul tasto SOLVE si avvia la simulazione

1. RISULTATI DELLA SIMULAZIONE



1. Cliccare sul tasto POST PROCESSOR.
2. Nella nuova finestra scegliere PLOT/FIELD dal menu.
3. Nella finestra CREATE NEW PLOT scegliere di visualizzare “mag J” sul “surface object1” e con OK verrà visualizzata la densità di corrente sulla sezione del conduttore.

2. RISULTATI DELLA SIMULAZIONE



Visualizzazione della DENSITA' DI CORRENTE sulla sezione RETTA del conduttore

Fine Presentazione