

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria dell'energia

***Relazione per la prova finale  
Analisi del circuito magnetico del  
trasformatore***

Tutor universitario: Prof. Luigi Alberti

Laureando: Luca Peruzzo

Matricola 2005209

Padova, 15/11/2024

- Studio e verifica dei metodi classici e alternativi di rappresentazione del circuito magnetico, in particolare quello del trasformatore, dunque analisi e confronto tra la modellazione induttiva che si basa sull' analogia riluttanza-resistenza e quella incentrata sul modello del giratore-capacitore, e il circuito magnetico formato da permeanze, con la dimostrazione dell' equivalenza di essi.
- Studio del comportamento delle permeanze nel ferro non lineari, dovute al fatto che a densità di flusso elevate il materiale del nucleo si satura, determinando un' impedenza dell' induttore notevolmente ridotta.

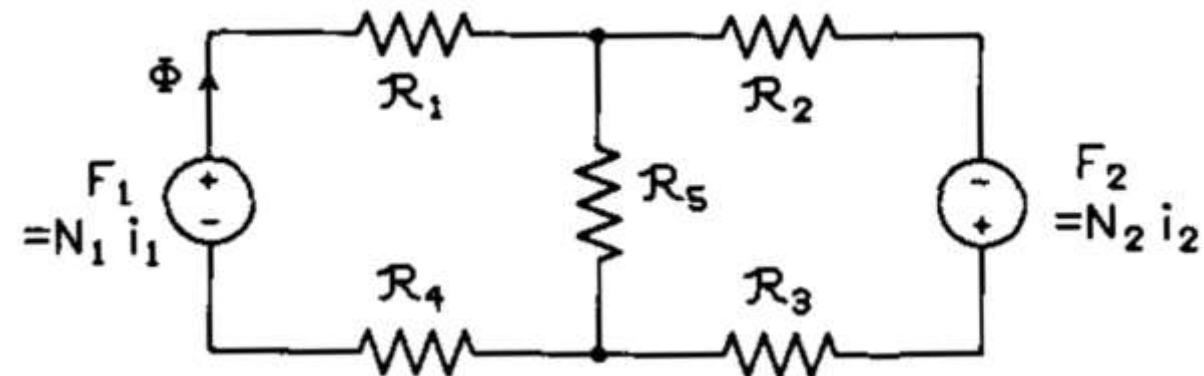
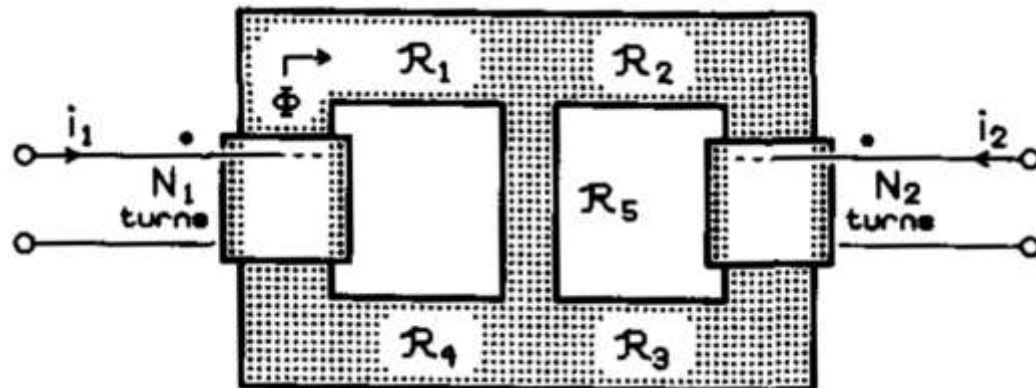
Analogie tra circuito magnetico ed elettrico			
Circuito Magnetico		Circuito Elettrico	
F <sub>mm</sub>	F {A}	Tensione	v {V}
Flusso	Φ {Wb}	Corrente	I {A}
Riluttanza	R {H <sup>-1</sup> }	Resistenza	R {Ω}
Permeabilità	μ {H/m}	Conduttività	σ {S/m}

$$R_{fe} = \frac{l}{\mu_0 * \mu_r * S}$$

$$F_{mm} = N * I$$

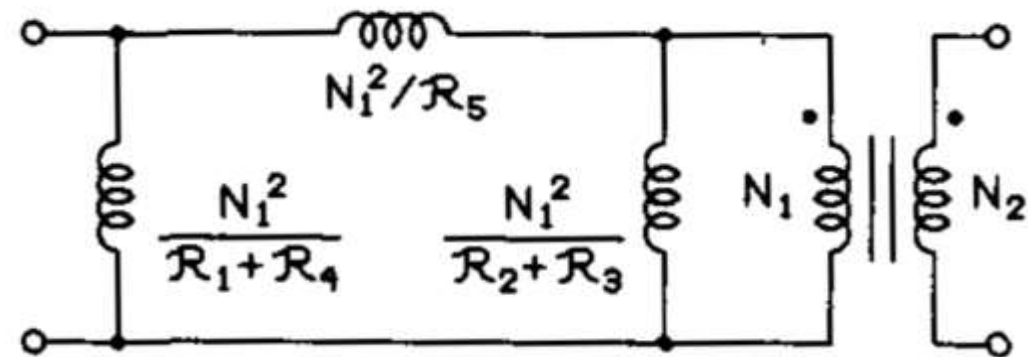
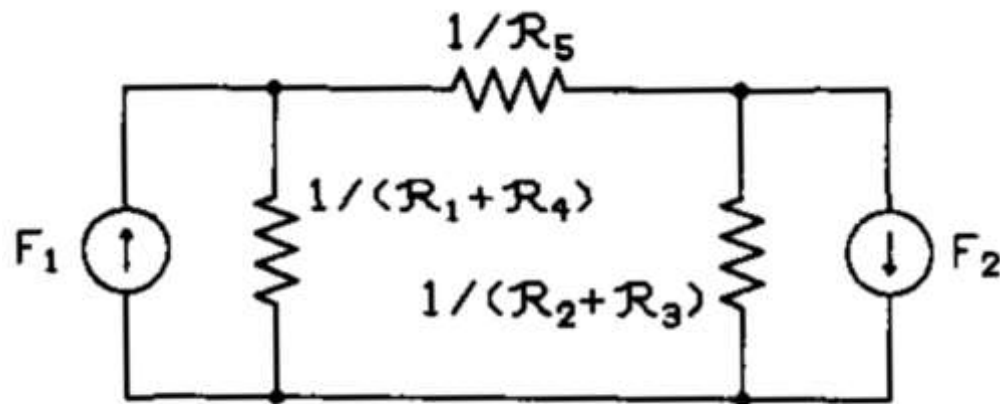
Nella tabella sopra sono riportate le varie analogie tra circuito magnetico ed elettrico. L'analogia risulta essere topologicamente simile alla struttura magnetica, e risulta essere caratterizzata dai seguenti elementi:

- Ogni avvolgimento che genera una F<sub>mm</sub> è rappresentato da un generatore di tensione
- Ogni riluttanza risulta essere rappresentata da una resistenza



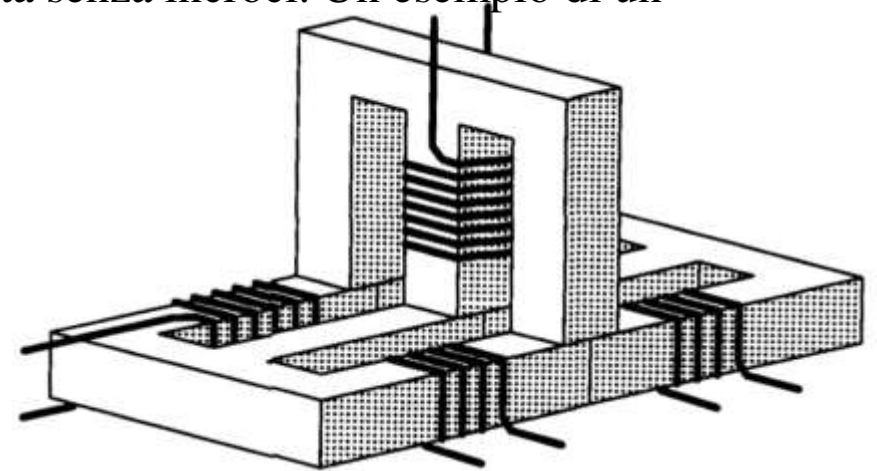
Il modello dell'induttanza viene ottenuto a partire dall'analogia della riluttanza-resistenza che viene trasformata in un circuito che risulta essere formato da un insieme di induttori e trasformatori ideali, mediante i seguenti passaggi:

1. Si applicano le leggi della dualità fra tensione e corrente, gli anelli diventano nodi, e vice versa. Ogni generatore di tensione è sostituito da un generatore di corrente, e ogni resistenza è sostituita da una conduttanza.
2. Si sceglie un avvolgimento di riferimento avente  $N_r$  spire. Il generatore di corrente associato a questo avvolgimento è sostituito da dei terminali, mentre i generatori di corrente associati agli altri avvolgimenti che hanno  $N_i$  spire sono sostituiti da trasformatori ideali aventi rapporto di trasformazione  $N_r:N_i$ . Ogni conduttanza sarà sostituita da una induttanza avente valore  $N_r^2/R$  {H}.



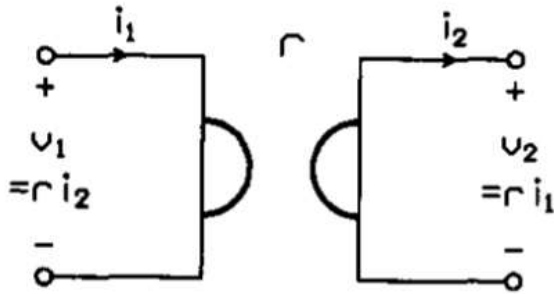
Nonostante il metodo appena visto possa risultare abbastanza semplice e meccanico, esso non risulta essere universalmente valido: se il circuito magnetico non è planare, il metodo fallisce, dato che le reti non planari non hanno dualità. Una rete non planare è tale che essa non può essere disegnata senza incroci. Un esempio di un componente magnetico non planare è raffigurato nella figura sottostante

Un ulteriore problema è dato dal fatto che in qualsiasi sistema fisico, che esso sia idraulico, elettrico o meccanico, il prodotto tra la variabile di sorgente e quella di configurazione moltiplicate tra loro danno come risultato la potenza, cosa che non succede con questa analogia che da come risultato invece della potenza, l'energia, ovvero il suo integrale.



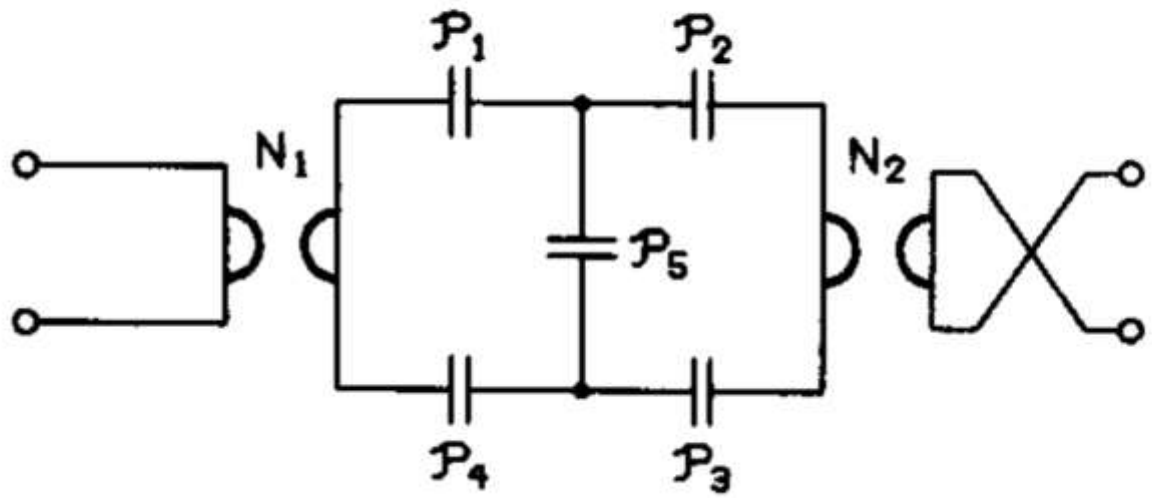
Dominio	Variabile di sorgente	Variabile di configurazione	Prodotto tra variabile di sorgente e di configurazione
Elettrico	Tensione{V}	Corrente{A}	Potenza{V*A}≡{W}
Idraulico	Pressione{N/m <sup>2</sup> }	Portata{m <sup>3</sup> /s}	Potenza{N*m/s}≡{W}
meccanica rettilinea	Forza{N}	Velocità{m/s}	Potenza{N*m/s}≡{W}
Meccanica rotazionale	Coppia{N*m}	Velocità angolare{rad/s}	Potenza{N*m/s}≡{W}
Magnetico(tradizionale)	F <sub>mm</sub> {A}	Flusso magnetico{Wb}	Energia{V*A*s}≡{J}
Magnetico(alternativo)	F <sub>mm</sub> {A}	Tasso di Flusso magnetico{Wb/s}	Potenza{V*A}≡{W}

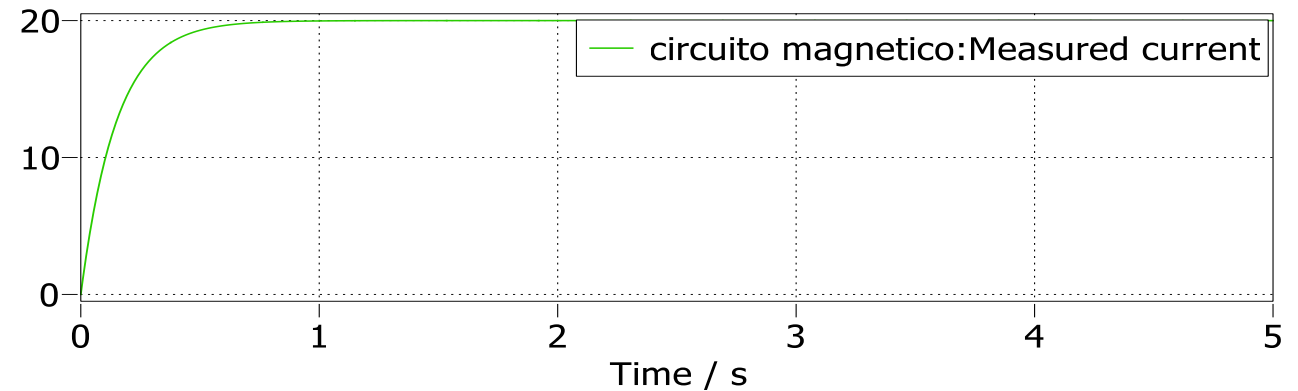
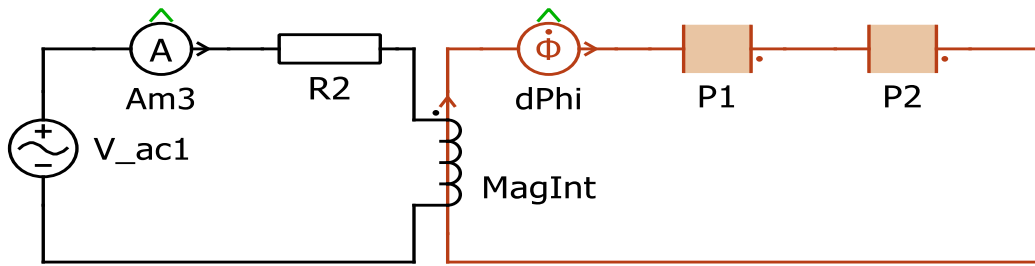
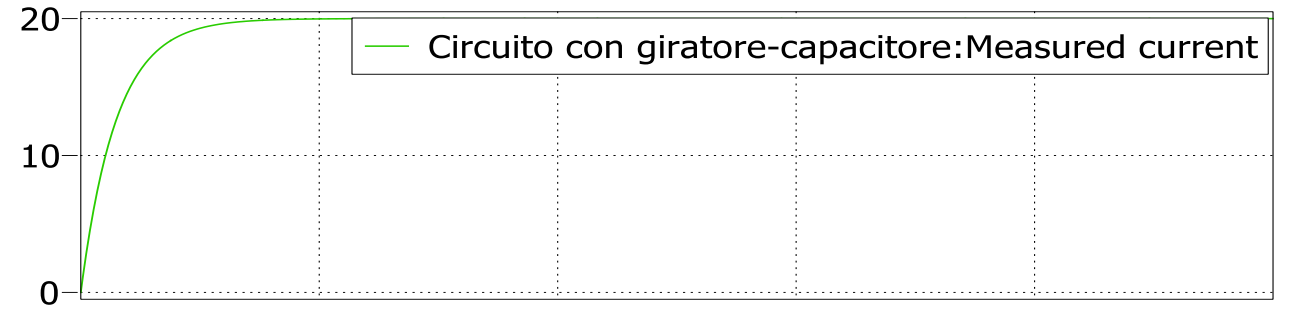
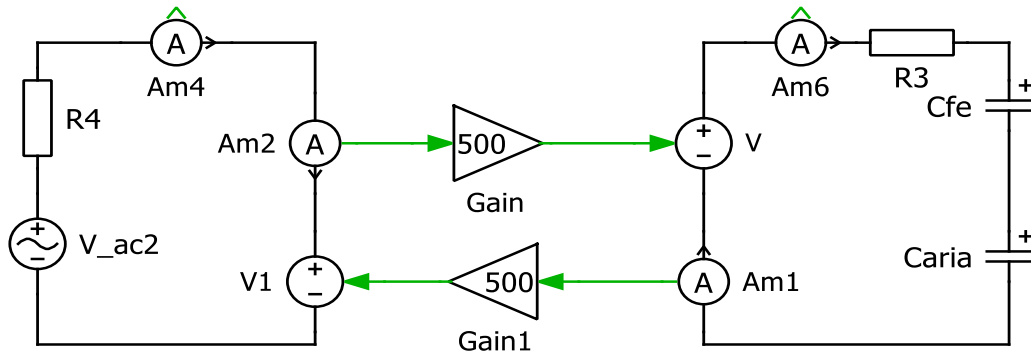
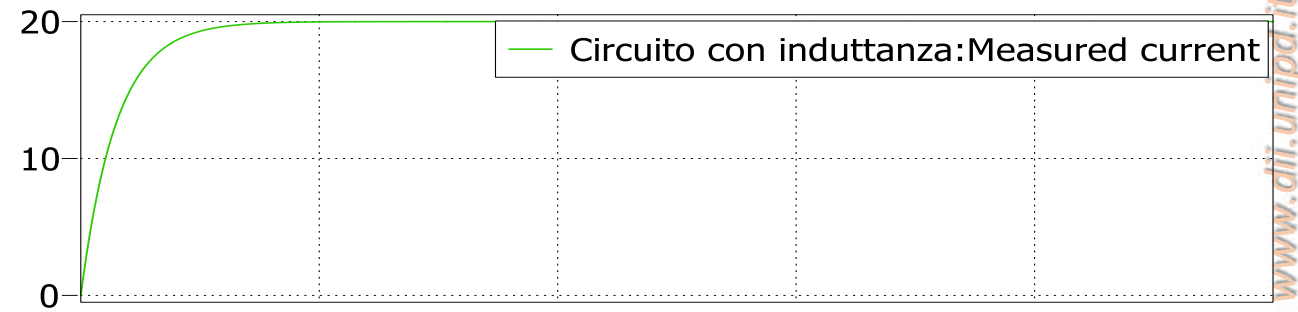
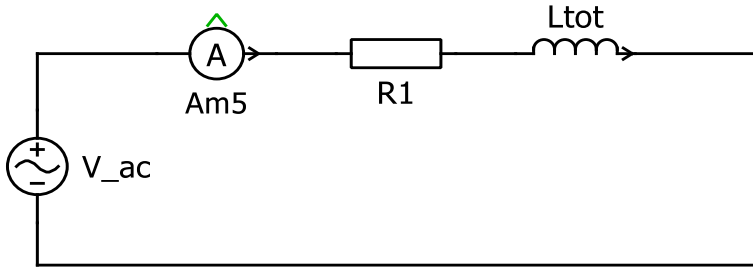
In questo modello si ha la Fmm come variabile di sorgente mentre come variabile di configurazione si ha la variazione di flusso. Con queste nuove variabili in gioco la permeanza magnetica risulta essere analoga alla capacità elettrica. Si ha dunque che le variabili di sorgente di un dominio siano proporzionali alle variabili di configurazione dell'altro dominio e viceversa. Una relazione dove le grandezze di sorgente e di configurazione sono scambiate è una caratteristica tipica del giratore. Una struttura magnetica può dunque essere rappresentata tramite un modello capacitivo topologicamente simile, dove ad ogni permeanza  $P\{H\}$  corrisponde una capacità  $C\{F\}$ .



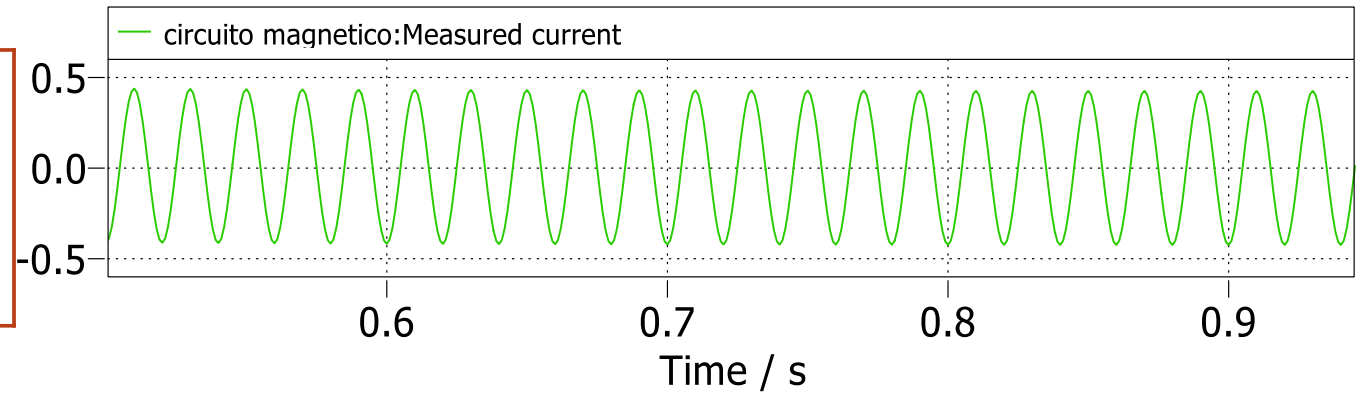
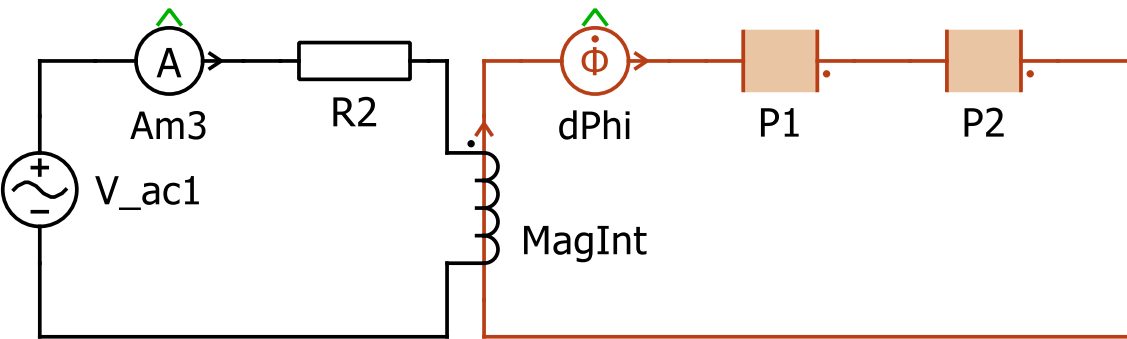
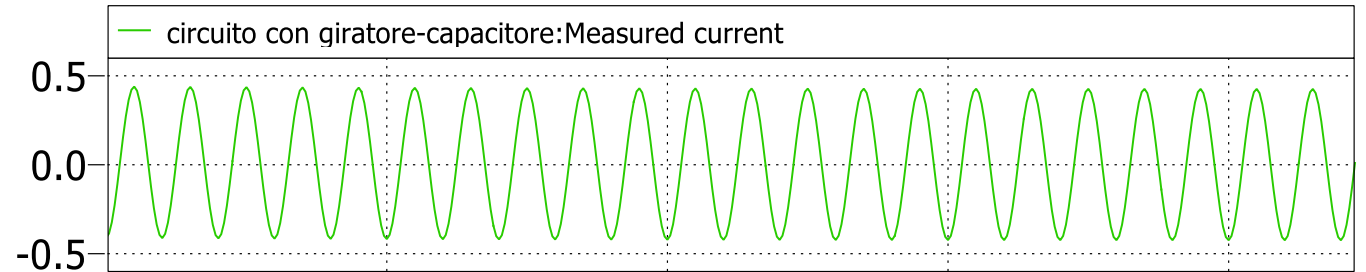
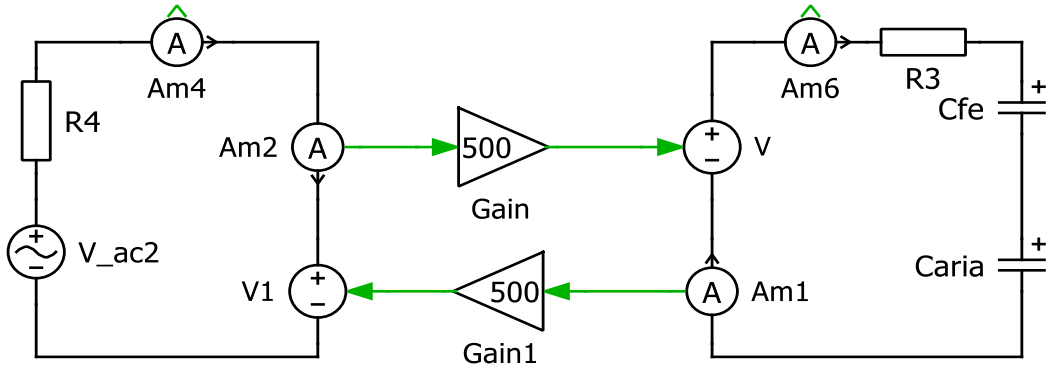
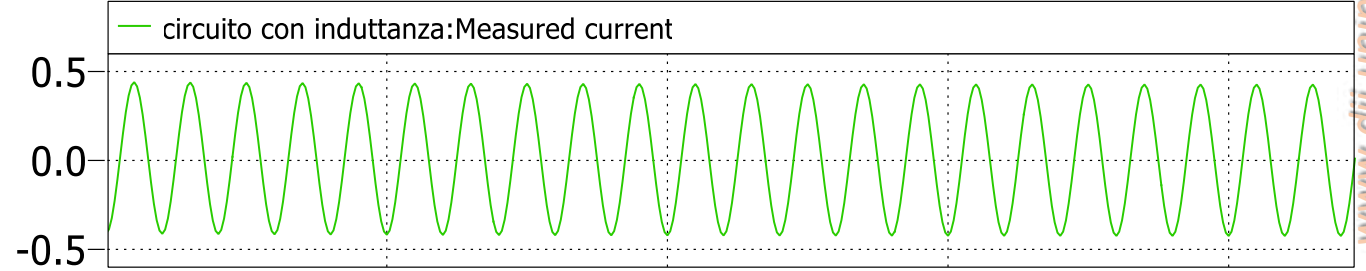
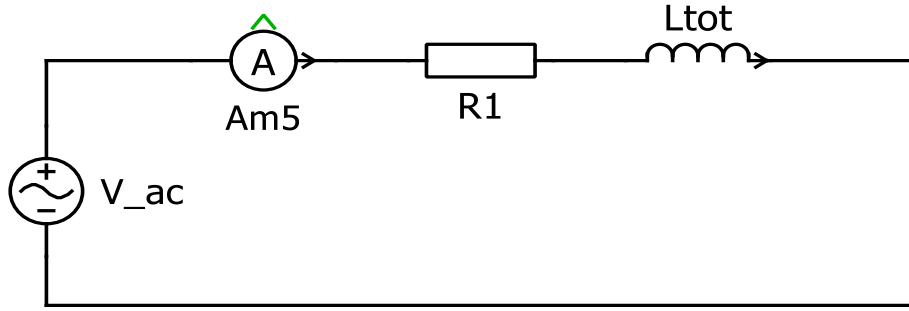
$$P = \frac{\mu * A}{l}$$

$$C = \frac{\epsilon * A}{l}$$



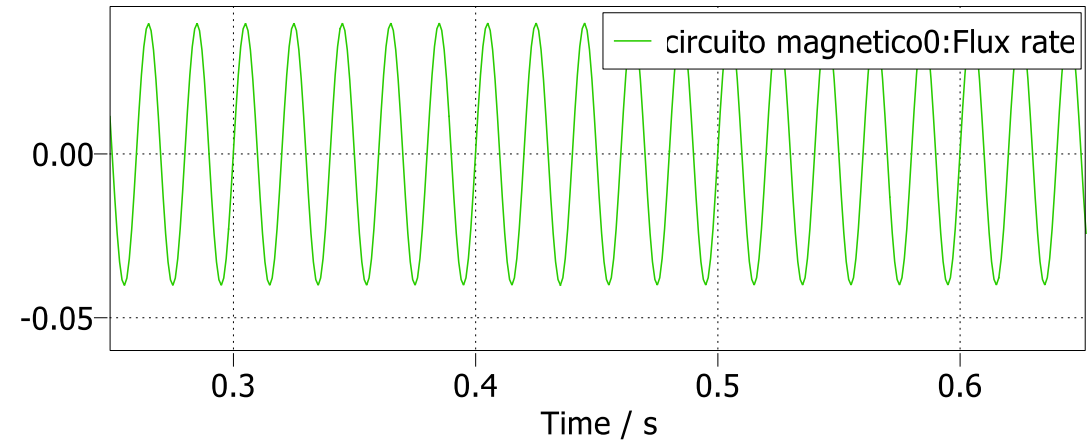
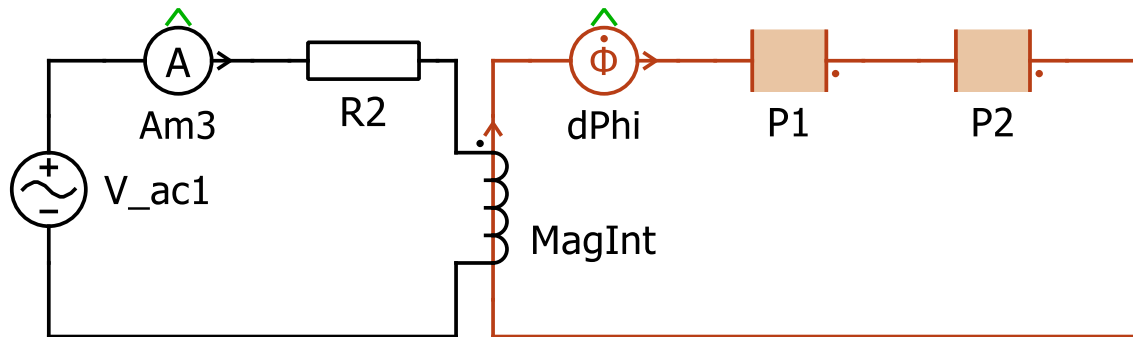
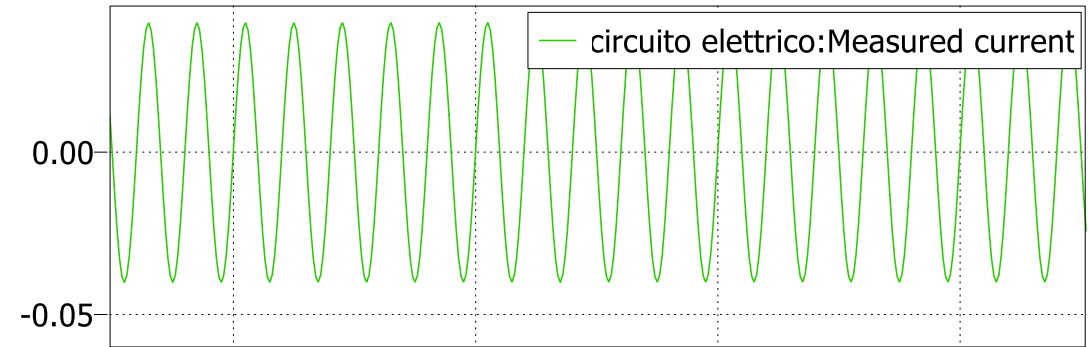
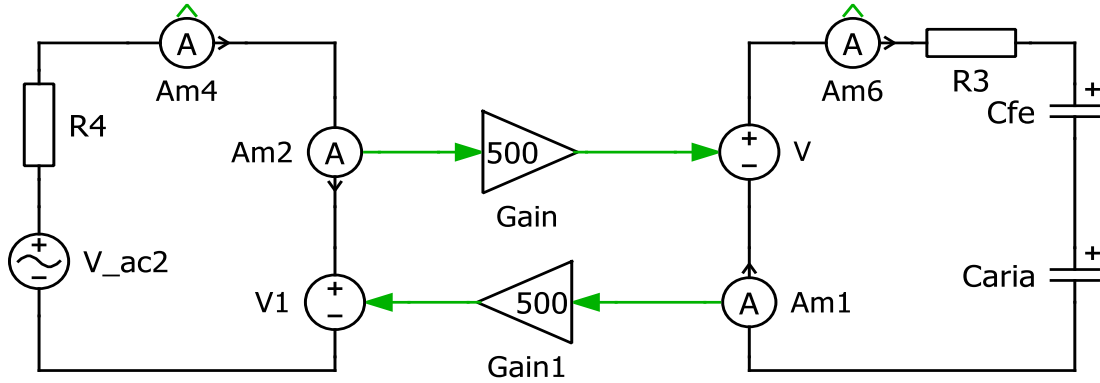


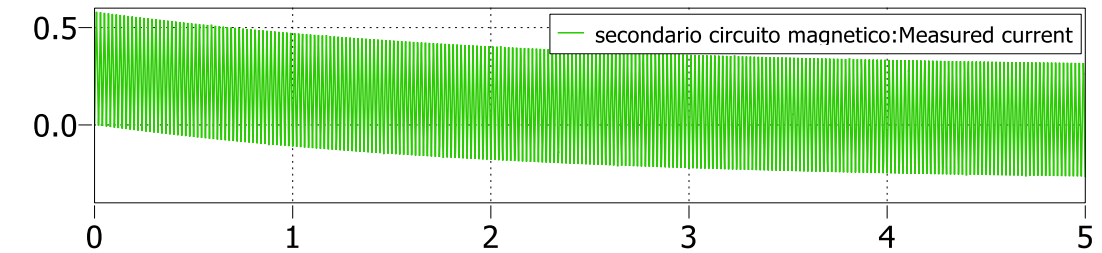
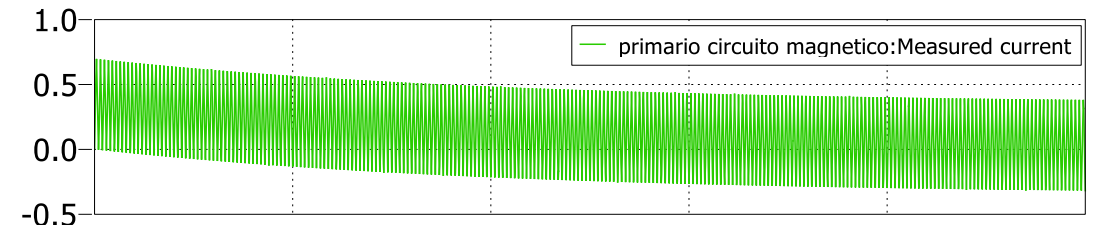
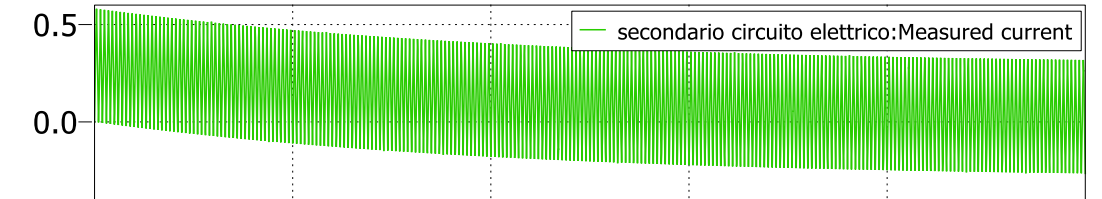
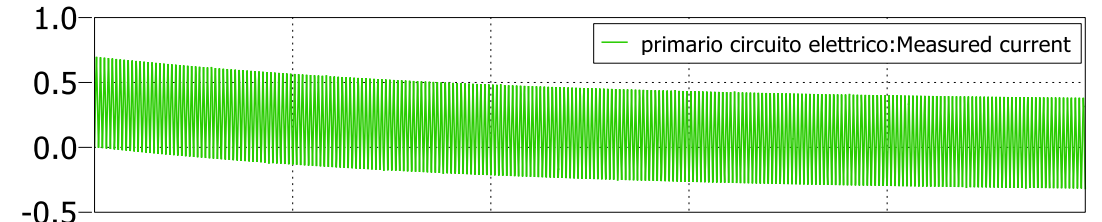
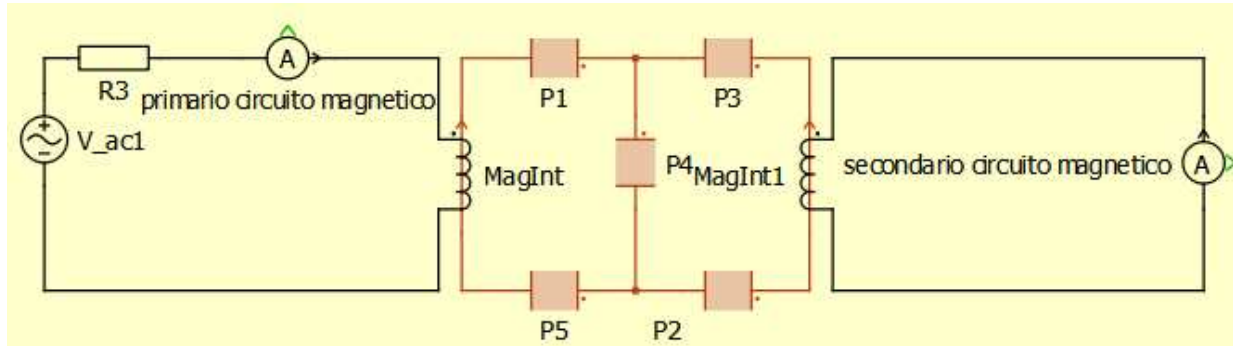
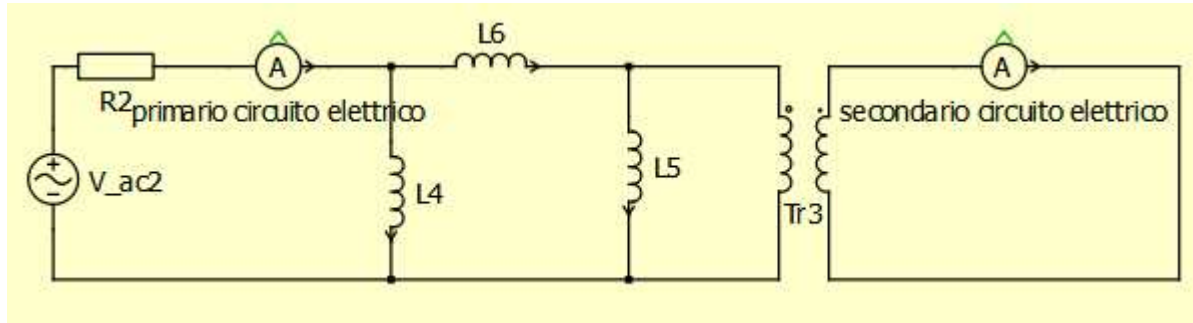
www.dii.unipa.it



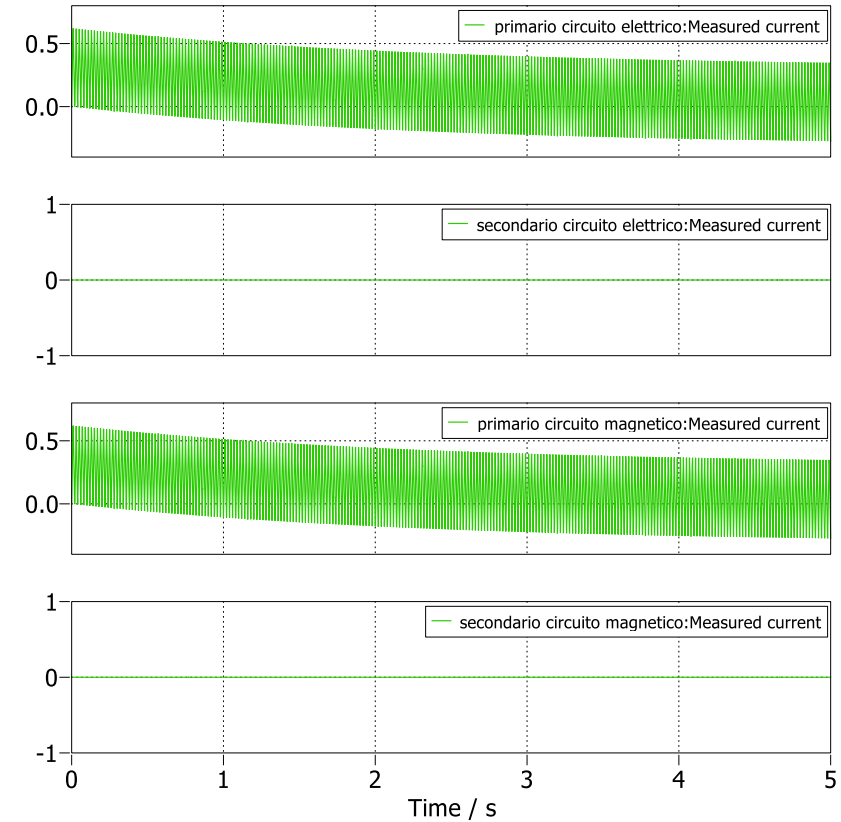
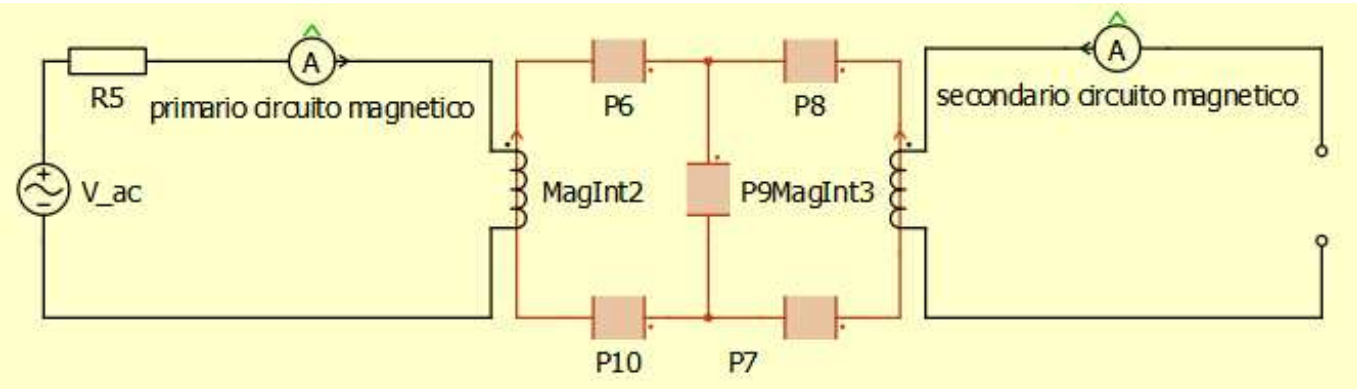
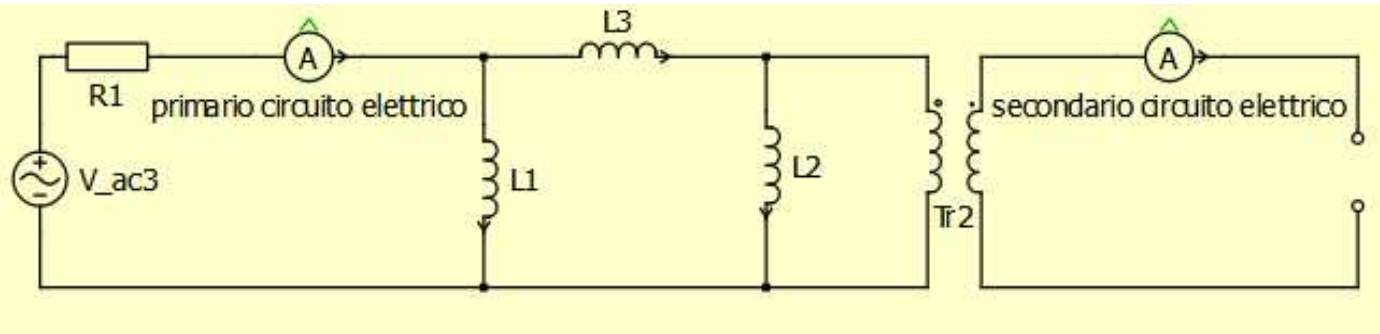
www.dii.unipd.it







Time / s



I materiali ferromagnetici risultano avere una caratteristica di magnetizzazione non lineare a causa dell'effetto di saturazione del materiale stesso.

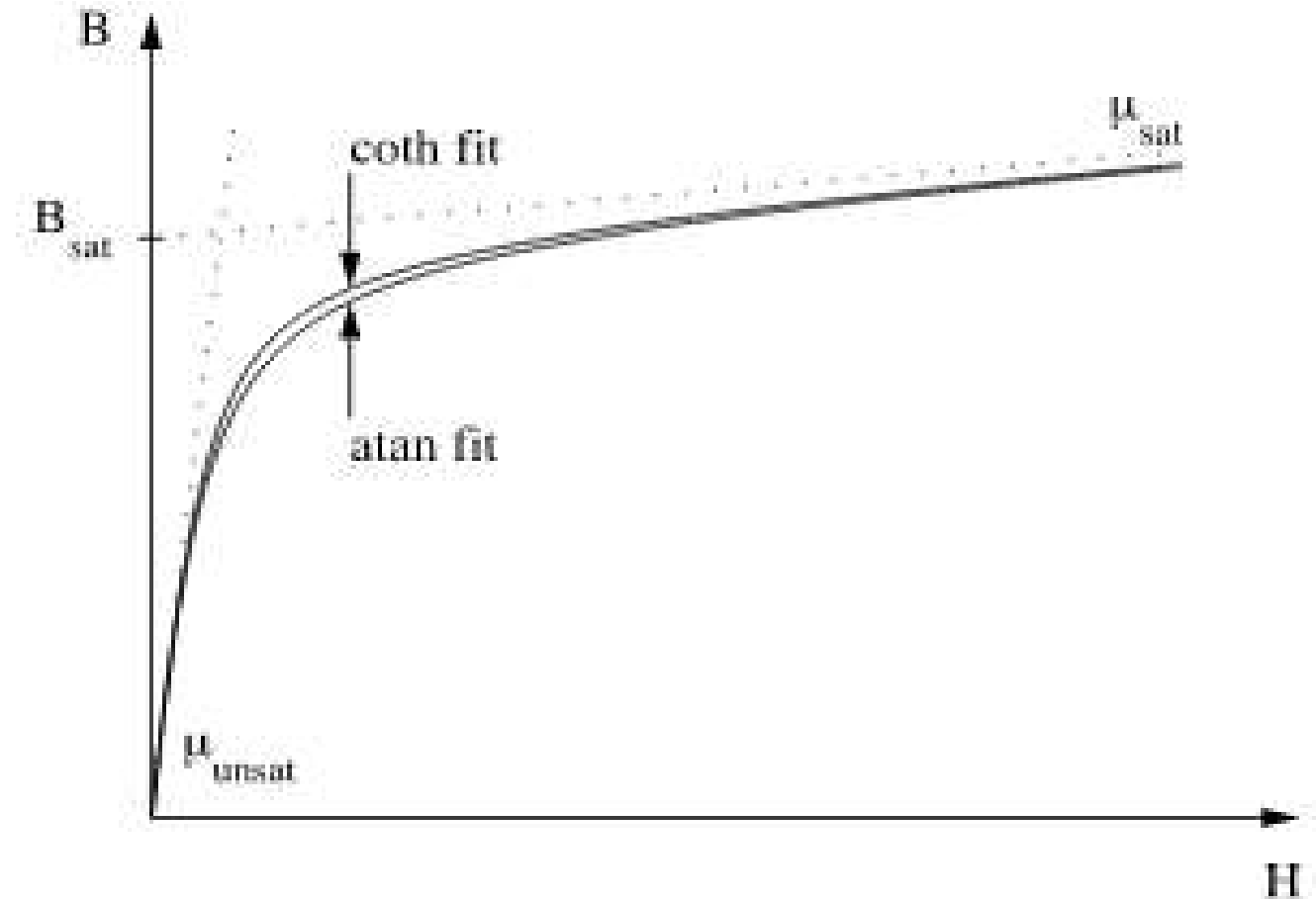
Caratteristiche del materiale ferromagnetico utilizzato:

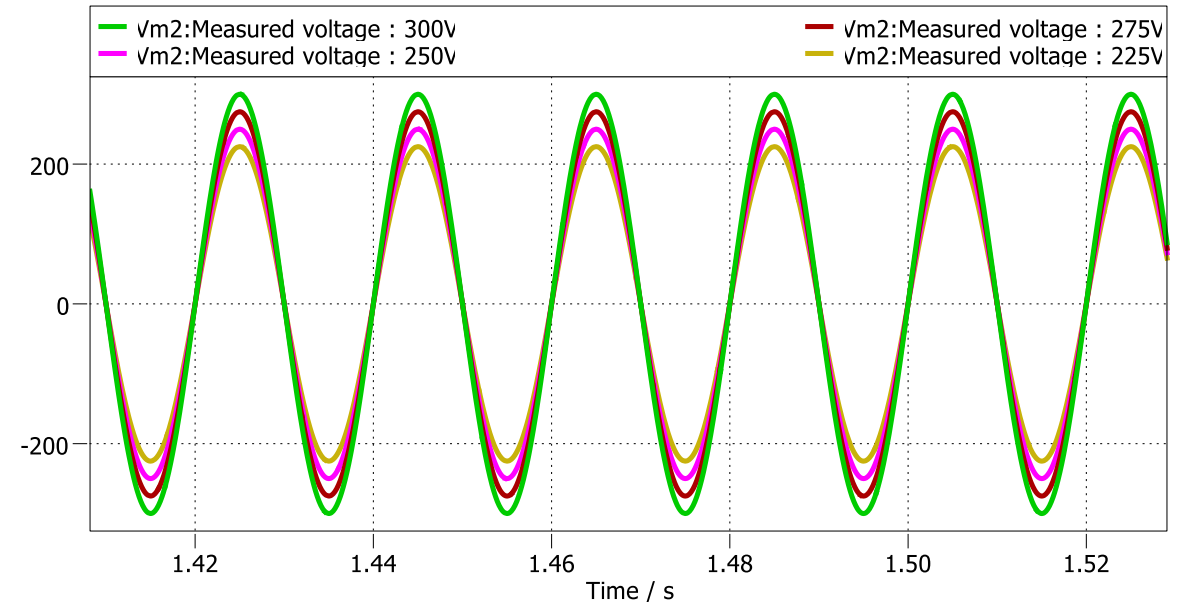
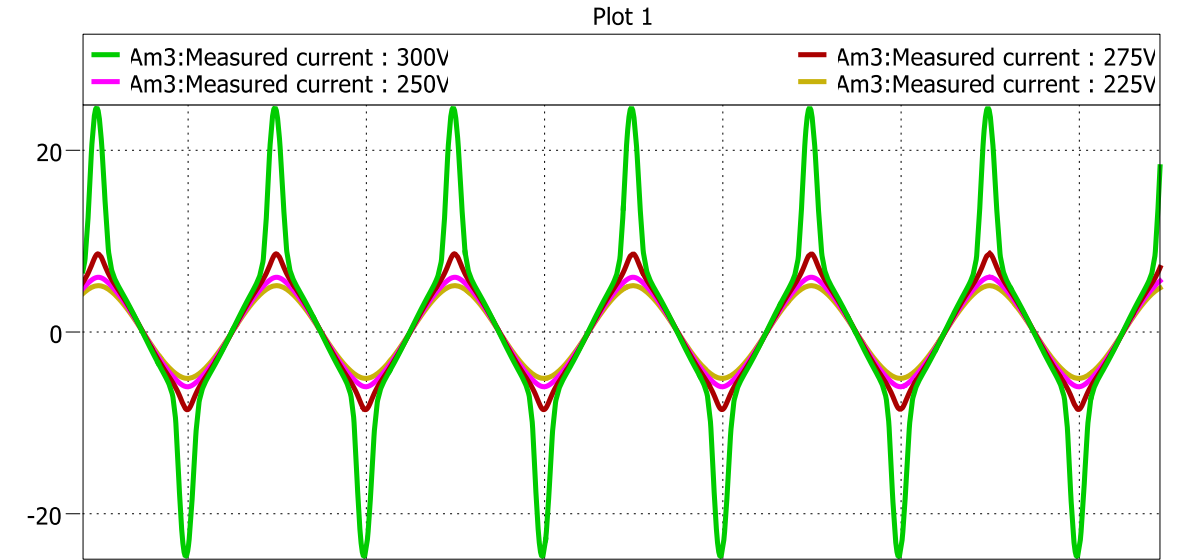
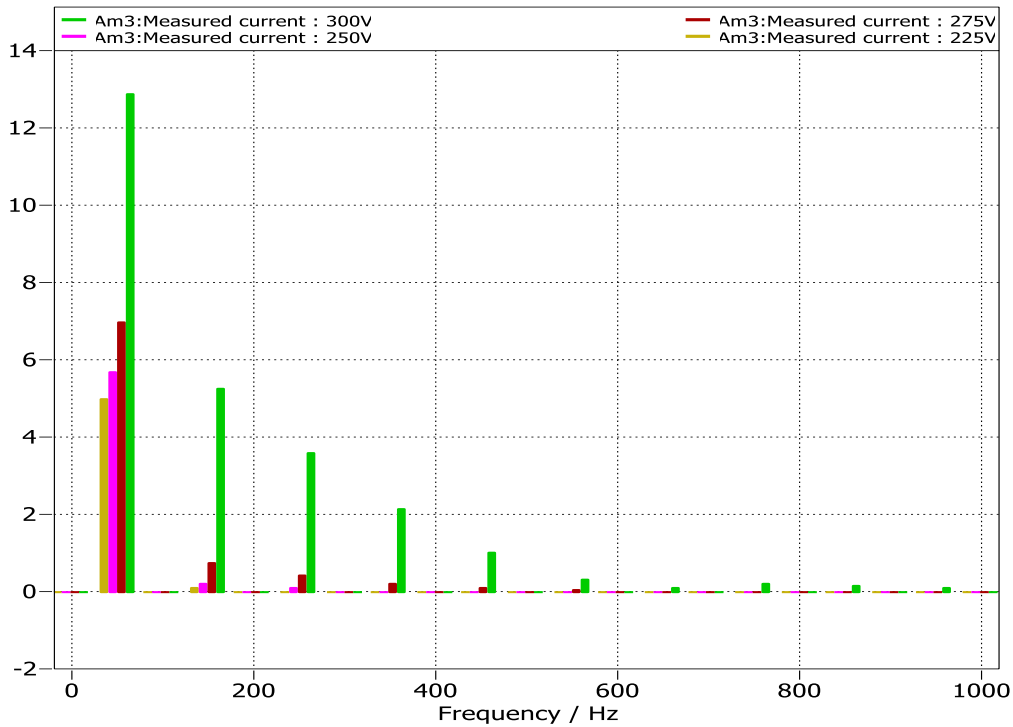
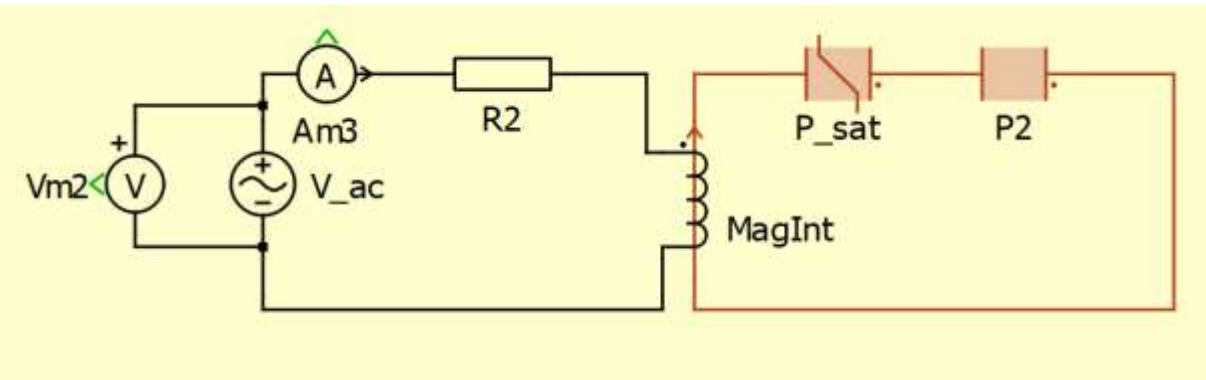
- $\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$
- Induzione magnetica di saturazione  $B_{\text{sat}} = 1,8$
- Permeabilità magnetica relativa da non saturo  $\mu_r = 2000$
- Permeabilità magnetica relativa da saturo  $\mu_r = 2$

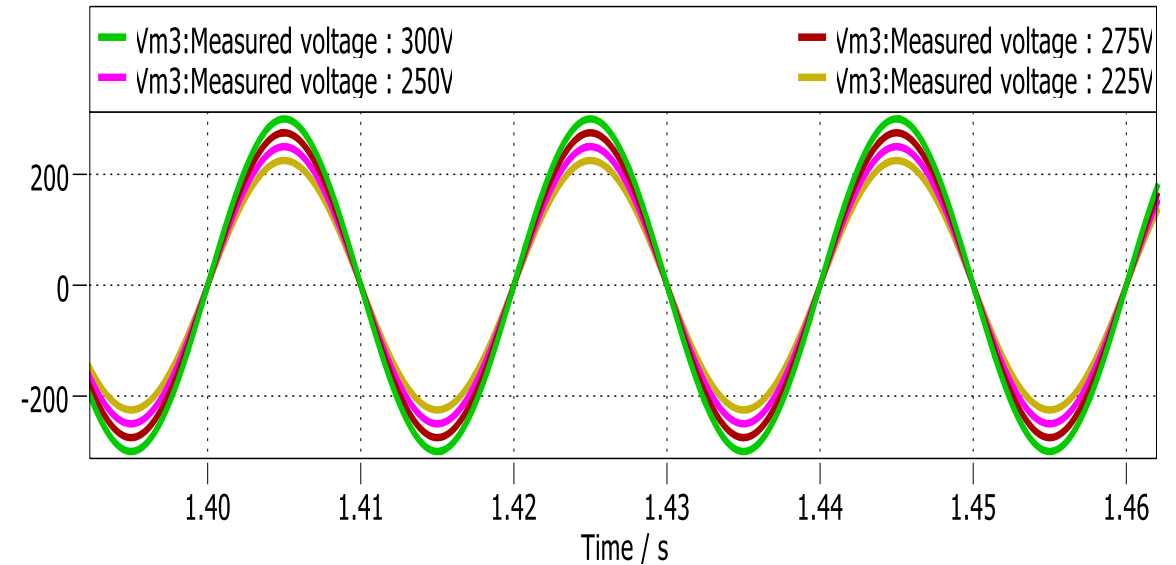
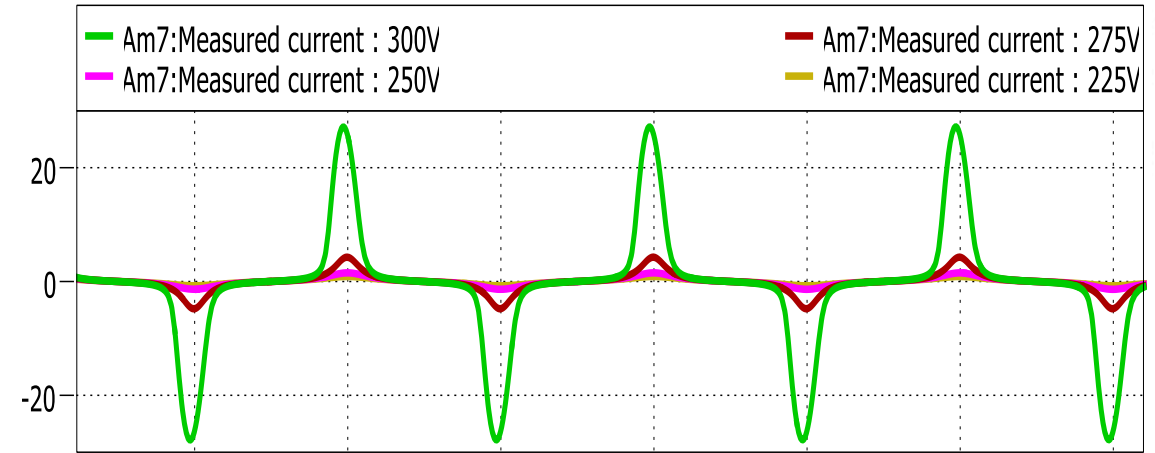
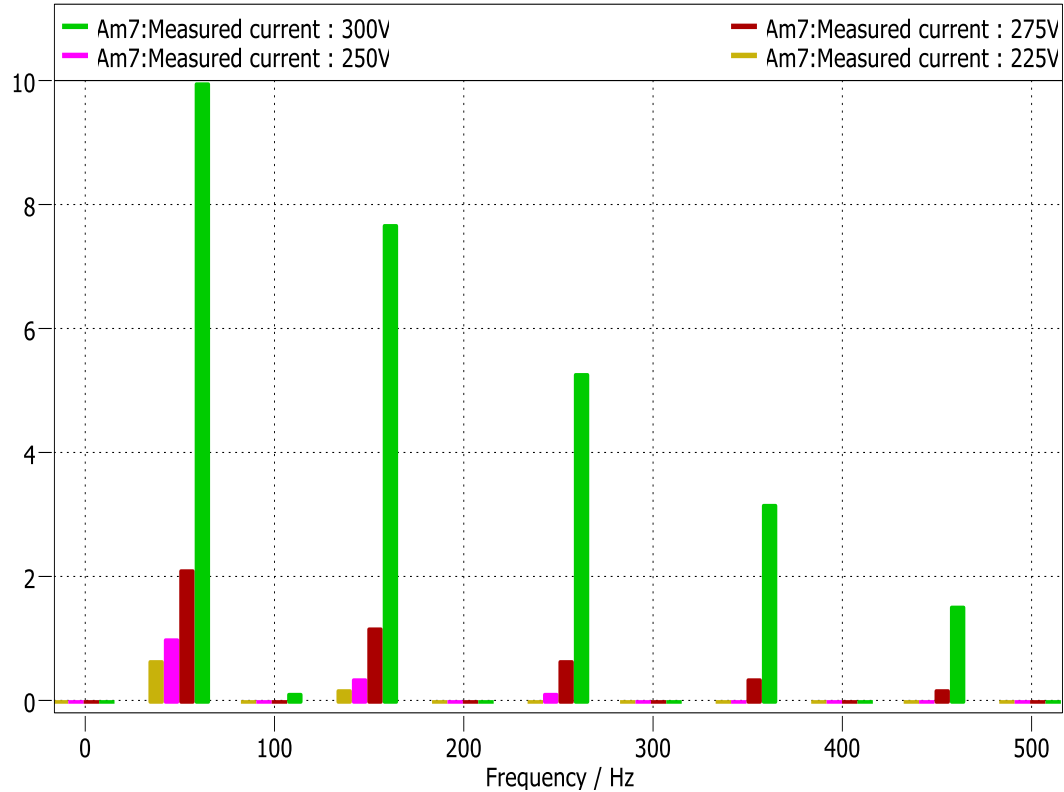
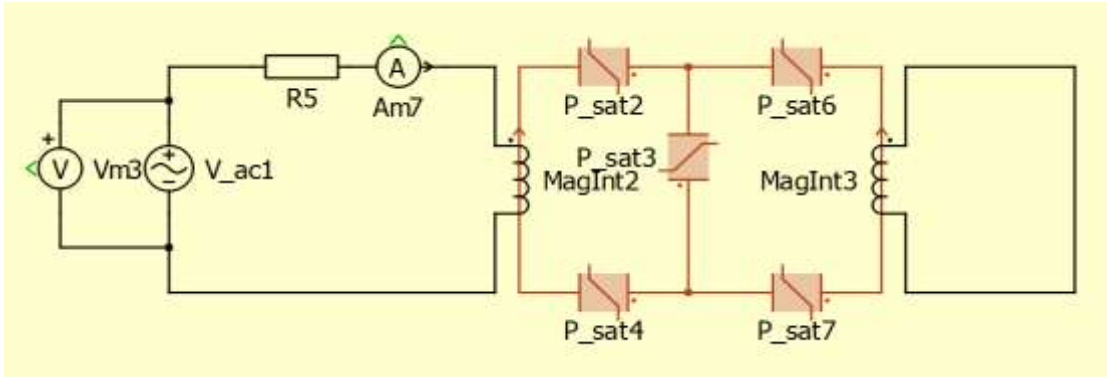
$$B = \frac{2}{\pi} * B_{\text{sat}} * \tan^{-1} \left( \frac{\pi * H}{2a} \right) + \mu_{\text{sat}} * H$$

$$B = B_{\text{sat}} * \left( \coth \frac{3H}{a} - \frac{a}{3H} \right) + \mu_{\text{sat}} * H$$

$$a = \frac{B_{\text{sat}}}{(\mu - \mu_{\text{sat}})}$$







Si è dimostrato, nella prima parte della tesi che i tre circuiti, applicando una determinata tensione si comportano allo stesso modo nonostante abbiano una composizione differente e possono quindi essere considerati equivalenti. Nella seconda parte della tesi invece si è voluto sperimentare in che modo la saturazione influisce sulla risposta in corrente sia del circuito magnetico che del trasformatore. Si è notato che la saturazione fino ad un certo valore non si manifestava, e a partire da questo diventava sempre più rilevante, fino a deformare completamente la sinusoide. In particolare, confrontando le due risposte ottenute da circuito magnetico e trasformatore si è notato che a parità di tensione applicata la saturazione si è manifestata in anticipo sul trasformatore, dato che su quest'ultimo la permeabilità non lineare è più risentita rispetto al caso del circuito magnetico con traferro, dove la permeabilità dell'aria rimane invece costante.