

UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale
Corso di Laurea in Ingegneria dell'energia

Relazione per la prova finale

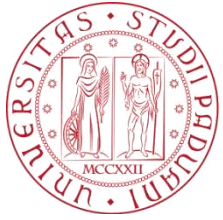
Caratterizzazione elettromagnetica delle sonde di campo magnetico locale ad alta frequenza per la macchina RFXMOD 2

Tutor universitario:
Nicolò Marconato

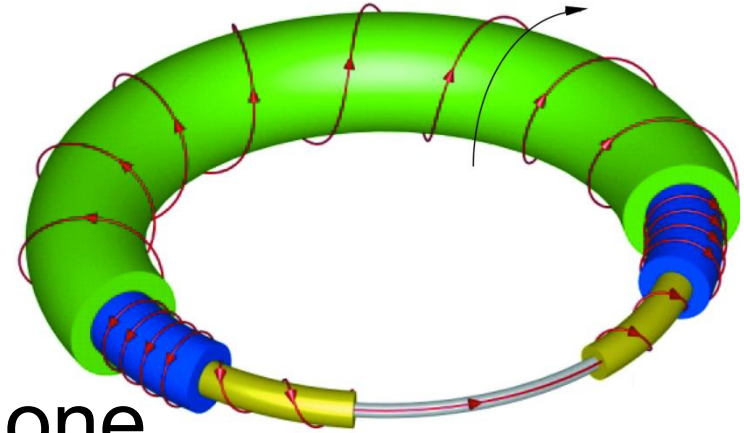
Laureando
Alessandro Stefani
Novembre 2023



RFX – MOD2



- RFX-MOD2: esperimento che studia la fisica dei plasmi da fusione
- **‘Reversed field pinch’** per contenere il plasma
- Miglioramento rispetto a RFX-MOD e possibilità di lavorare anche come Tokamak
- Diagnostica magnetica fondamentale all'operazione



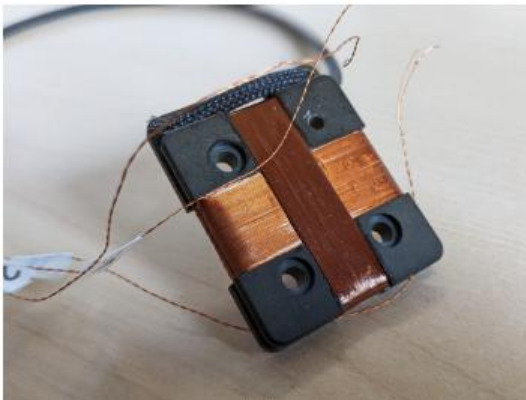


MAGNETIC PICK-UP COILS



Sono presenti varie **sonde** che si differenziano per

- Larghezza di banda
- Numero di assi su cui operano



Noi studiamo le sonde magnetiche di tipo induttivo che lavorano ad **alta frequenza**

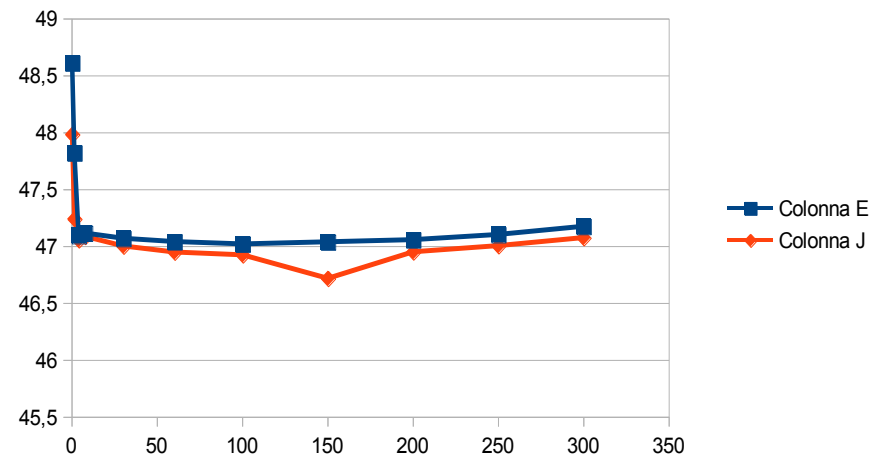
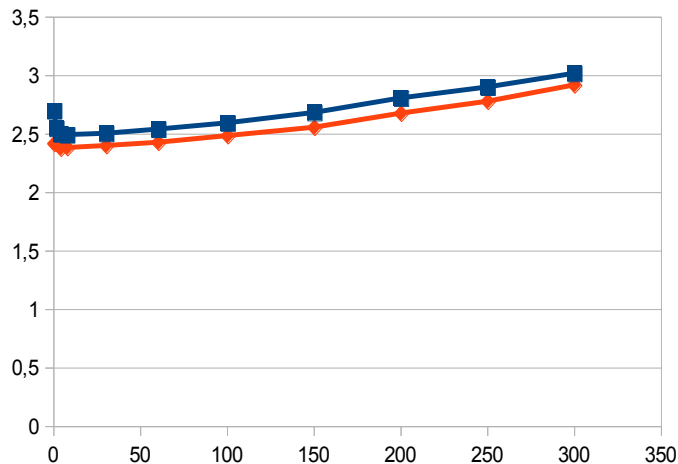


PROVE PRATICHE - 1



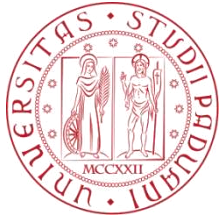
- Obiettivo: calibrare le sonde magnetiche
- Caraterizziamo il sistema di misura
- Misurazione modulo e fase dell'impedenza del solenoide HF con **impedenziometro**
- Calcolo resistenza e induttanza del solenoide HF

f(kHz)	Z(Ohm)	phi(deg)	R1(ohm)	L1(uH)	Z2(Ohm)	phi2(deg)	R2(ohm)	L2(uH)
0,532	2,7	3,45	2,6951067718	48,607832641	2,42	3,8	2,4146795533	47,980679716
1,78	2,6	11,87	2,54440373	47,817897782	2,48	12,3	2,4230730246	47,238202658
4,28	2,8	26,89	2,4972541462	47,091320574	2,69	28,06	2,3738052394	47,053528266
8,02	3,44	43,64	2,4894944247	47,112042185	3,36	44,92	2,3791938204	47,082856771
30,5	9,36	74,5	2,5013512001	47,065931392	9,32	75,1	2,3964776322	46,998324549
60,468	18,05	81,92	2,5370293004	47,036917668	18	82,26	2,4242038109	46,945311262
100,425	29,78	85,01	2,5903201674	47,016883161	29,71	85,21	2,4809015002	46,92037693
150,372	44,52	86,55	2,679101386	47,034932205	44,21	86,69	2,552608899	46,714161273
200,319	59,29	87,29	2,8032779895	47,05366631	59,15	87,41	2,672907712	46,947110375
250,266	74,12	87,76	2,8970110929	47,100086749	73,96	87,85	2,7746665845	47,001243301
300,212	89,03	88,06	3,0139253012	47,171475335	88,84	88,12	2,9145119084	47,072449959

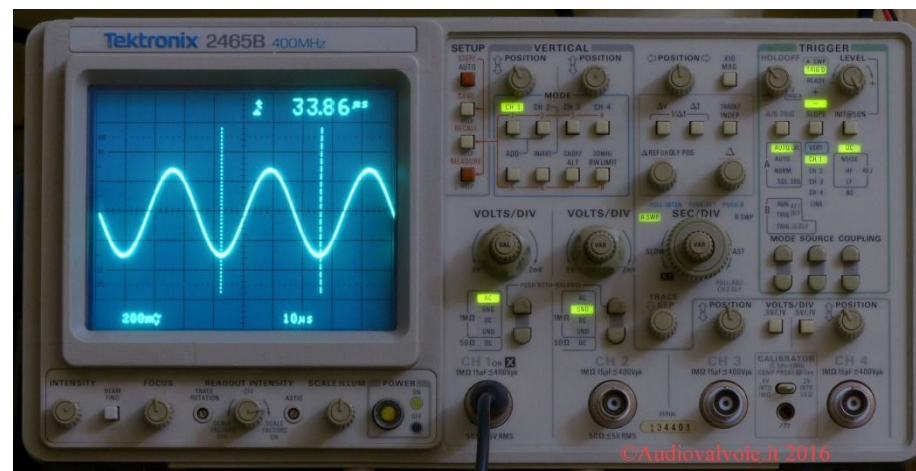


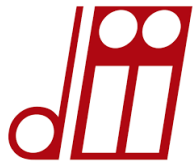


PROVE PRATICHE - 2



- Misurazione corrente e tensione del magnetic pickup coil con **oscilloscopio**
- **Induttanza** del solenoide **troppo elevata** per ottenere una corrente sufficiente alle frequenze di interesse
- Studio per design di un solenoide di dimensioni ridotte per operazione HF





STRUMENTI PER SIMULAZIONI

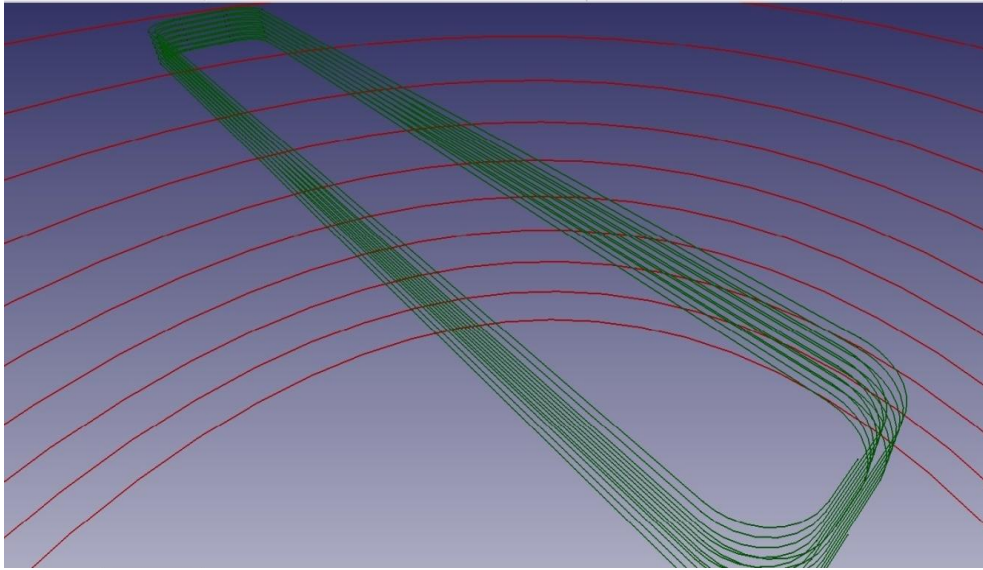


- **FreeCad**: per il disegno della geometria degli oggetti
- **FastHenry**: per il calcolo di resistenze e induttanze di solenoide HF e magnetic pickup coil
- **LTspice**: per simulare il circuito equivalente del sistema elettromagnetico



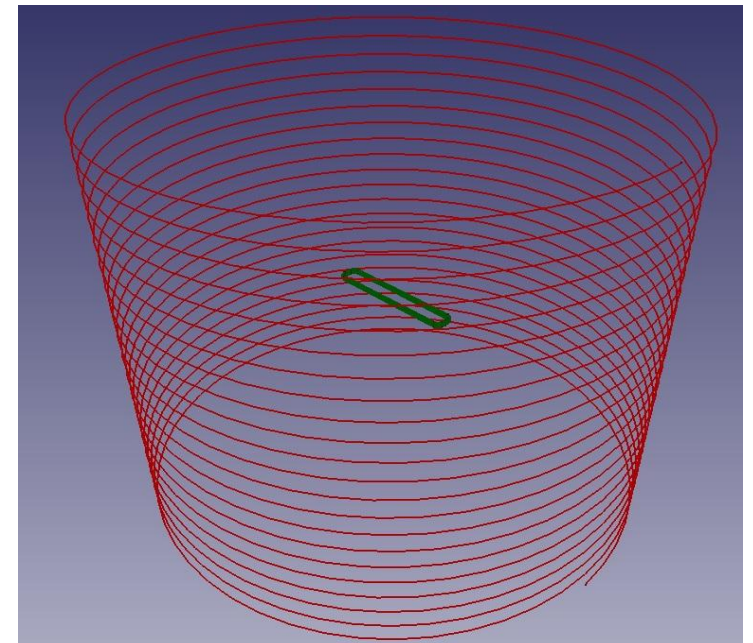


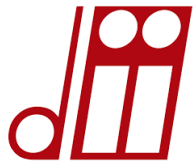
GEOMETRIA FREECAD



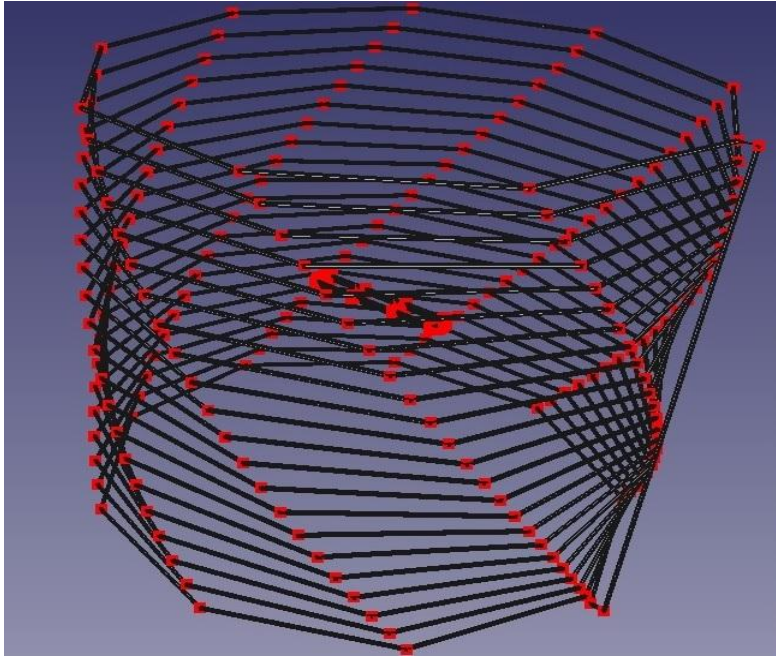
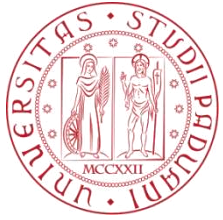
Magnetic pickup coil:
avvolgimento doppio
rettangolare con angoli
smussati, a 7 spire per
ogni avvolgimento

Solenoide HF: elica esterna
con diametro variabile a 22 spire

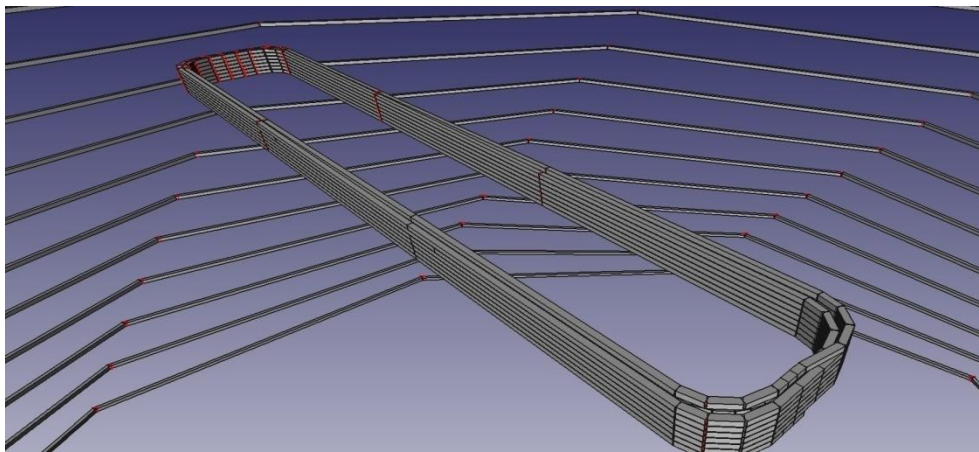




DA FREECAD A FASTHENRY



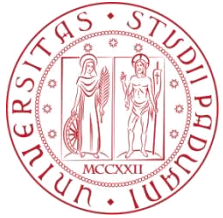
Si può utilizzare in Freecad un modulo per passare dalla geometria alla mesh



FastHenry ora interpreta correttamente gli oggetti e può calcolarne la resistenza e induttanza



RISULTATI FASTHENRY



- Mutue crescono al diminuire del raggio della bobina esterna
- Resistenza e autoinduttanza della **bobina esterna** diminuiscono al diminuire del raggio
- All'aumentare del numero di nodi aumenta la precisione, ma i valori si discostano di poco

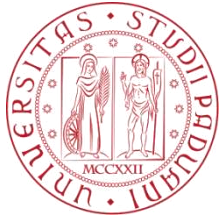
	Resistenza bobina interna	Induttanza bobina interna	Mutua	Mutua	Resistenza bobina esterna	Induttanza bobina esterna	Area bobinotto	k12	k21	kmedio
Diametro 139 mm	0,479	7,26461E-06j	3,83694E-07j	3,8059E-07j	0,586119	4,85437E-05j	0,3338429141	1,97E-02	1,93E-002	
Diametro 120 mm	0,479	7,26461E-06j	4,10463E-07j	4,10164E-07j	0,50712	3,81514E-05j	0,2488141382			
Diametro 100 mm	0,479	7,26461E-06j	4,41115E-07j	4,4141E-07j	0,423946	2,81573E-05j	0,1727875959			
Diametro 80 mm	0,479	7,26461E-06j	4,70814E-07j	4,66961E-07j	0,340772	1,92871E-05j	0,1105840614			
Diametro 60 mm	0,479	7,26461E-06j	5,04877E-07j	5,17925E-07j	0,260402	1,22187E-05j	0,0622035345	5,32E-002	5,47E-002	

Mesh fitta

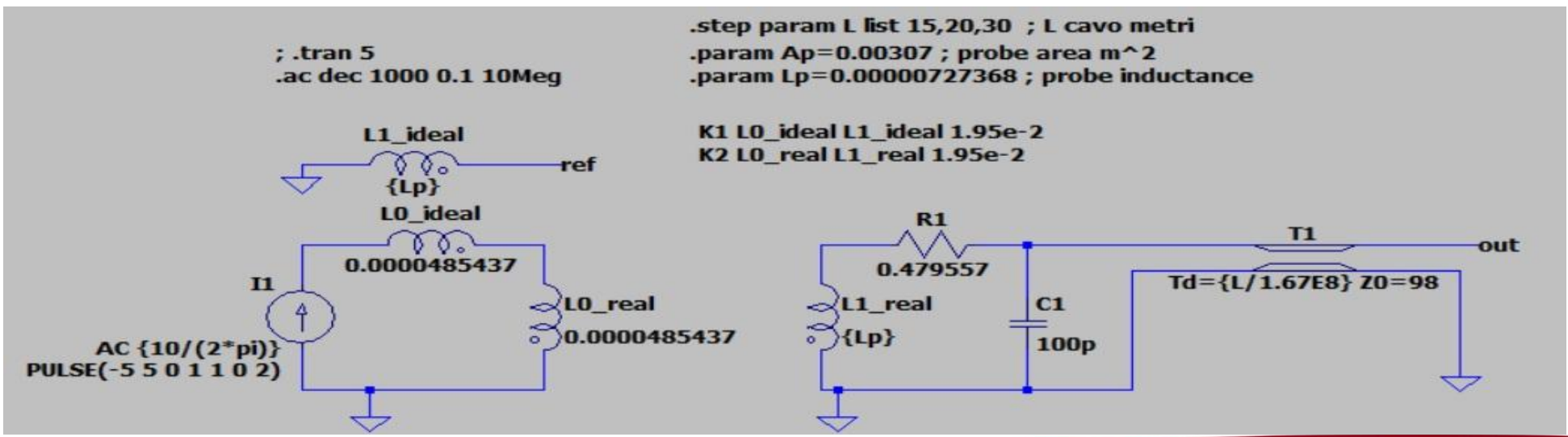
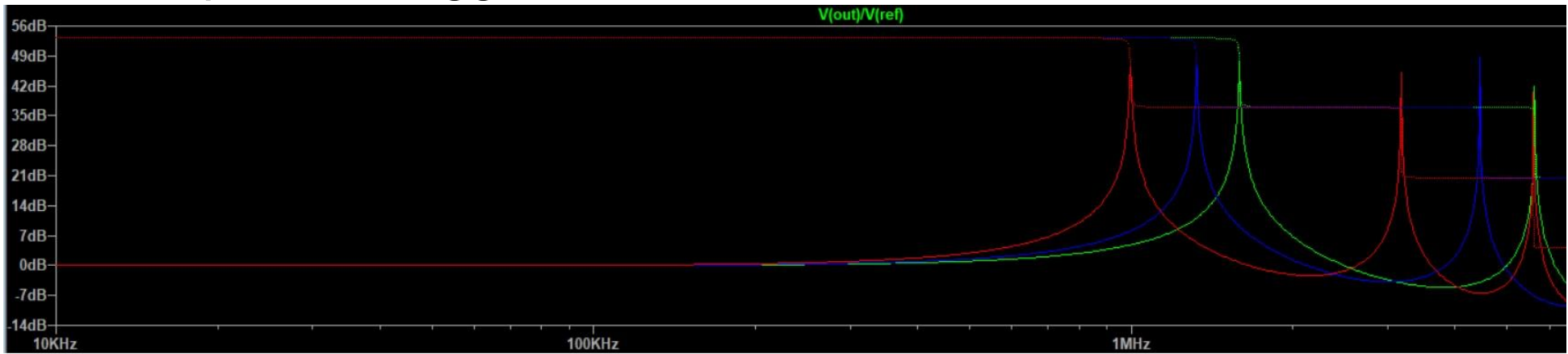
Diametro 139 mm	0,479557	7,27E-06	3,81E-07	3,74E-07	0,595793	5,14E-05		1,97E-02	1,93E-02	1,95E-02
Diametro 60 mm	0,479557	7,27E-06	5,06E-07	5,20E-07	0,261684	1,25E-05		5,32E-02	5,47E-02	5,39E-02

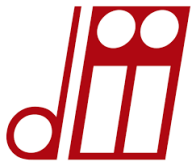


LTspice - 1



- Parametrizziamo il **cavo di trasmissione** (15, 20 e 30 metri)
- Output il rapporto tra la tensione alla sonda reale su quella ideale
- Con 30 metri abbiamo la risonanza a frequenze troppo basse con 15 a frequenze maggiori

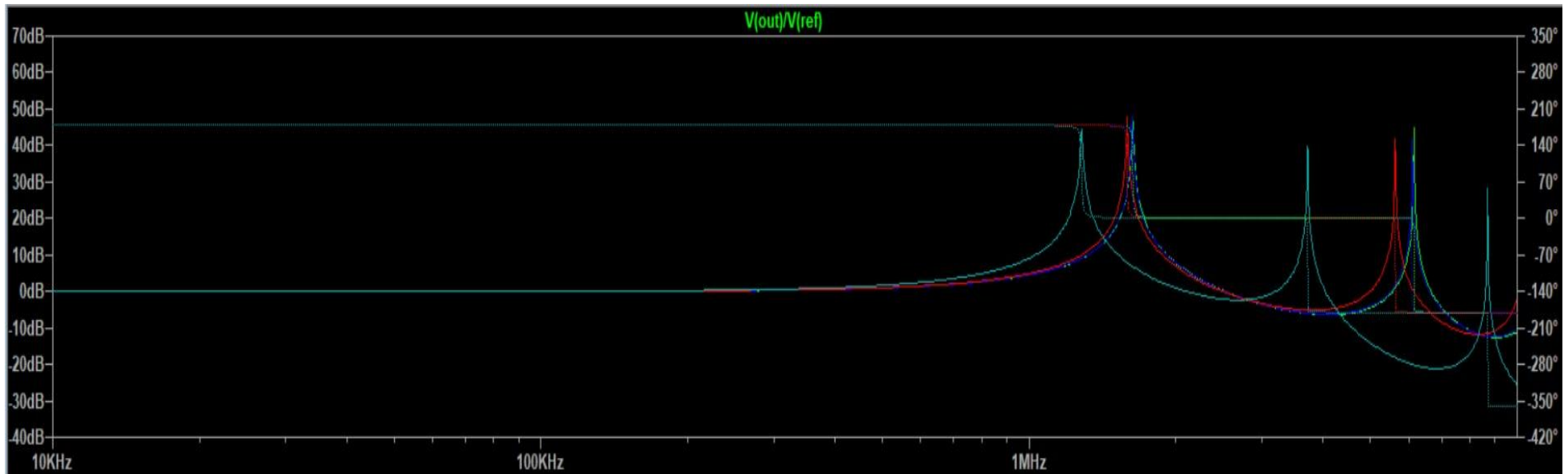


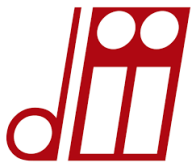


LTspice - 2



- Parametriamo la **capacità** (1, 10, 100 e 1000 pF)
- Con 1000 pF la risonanza è a frequenze troppo basse; con 100 pF è a frequenze maggiori, ma oltre non cambia praticamente nulla
- Per avere la banda migliore serve una capacità di massimo 100pF e un cavo lungo al massimo 15m





LTspice - 3



- Utilizziamo un generatore di tensione
- Output è la tensione indotta senza il cavo di trasmissione
- La tensione indotta è maggiore con un solenoide più piccolo e ciò ci dà una **maggiore sensibilità**

```
.ac dec 1000 0.1 10Meg
```

```
.param L=15
```

```
.step param x list 1 2
```

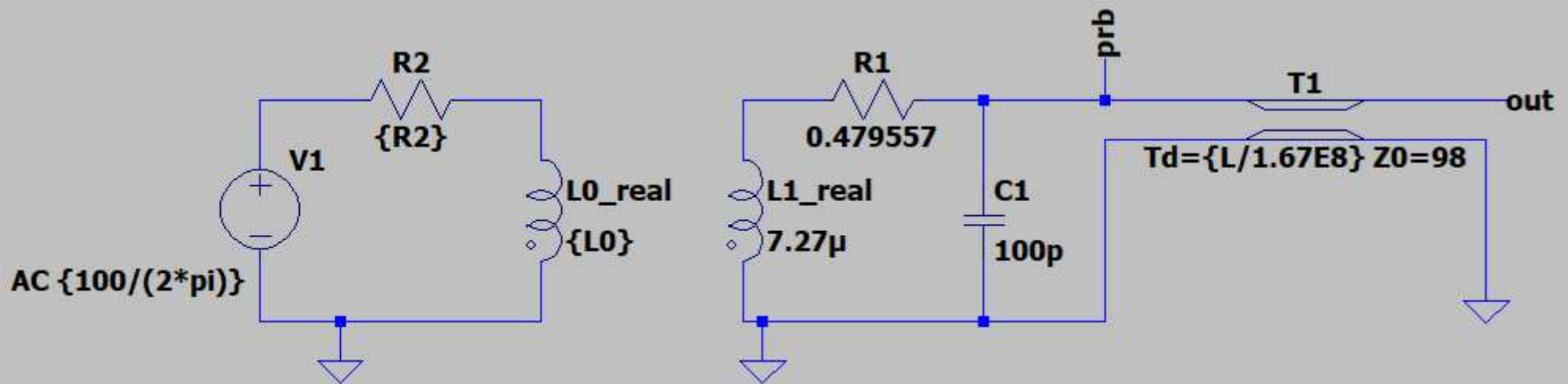
```
.param L0 table(x,1,5.14e-5,2,1.25e-5)
```

```
.param kk table(x,1,1.95e-2,2,5.4e-2)
```

```
.param R2 table(x,1,0.596,2,0.262)
```

```
K1 L0_ideal L1_ideal {kk}
```

```
K2 L0_real L1_real {kk}
```





LTspice - 3

