

# Laboratorio di Elettromagnetismo e Circuiti - canale M-Z

## Relazione sulla seconda esperienza di laboratorio

Gruppo 19: L. Pietropaoli, S. Scacco, A. Scarpa, F. Scipione

27 settembre 2024

### Indice

<b>1</b>	<b>Abstract</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Formule utilizzate</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Procedura sperimentale</b>	<b>2</b>
3.1	Strumentazione . . . . .	2
3.2	Costruzione . . . . .	3
3.3	Presa dati . . . . .	3
<b>4</b>	<b>Risultati sperimentali</b>	<b>4</b>
<b>5</b>	<b>Analisi dati</b>	<b>5</b>
5.0.1	Discussione sulle incertezze . . . . .	5
5.0.2	Calcolo dello sfasamento in radianti . . . . .	6
5.0.3	Valori teorici attesi della frequenza di taglio . . . . .	6
5.0.4	Interpolazione per frequenza di taglio . . . . .	6
5.1	Circuito RC . . . . .	7
5.2	Circuito CR . . . . .	7
5.3	Circuito LR . . . . .	8
<b>6</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>9</b>

## 1 Abstract

In questa seconda esperienza ci si è concentrati sullo studio dei **circuiti RC, CR e LR in regime sinusoidale**.

Nello specifico, si sono acquisiti dati sul rapporto tra le tensioni di uscita (ai capi del condensatore o della resistenza) e di entrata e sul loro sfasamento (si fa riferimento alla sezione 2 per una trattazione più completa). Si è esplorata la fedeltà con cui i dati raccolti fossero in accordo con l'andamento previsto per la fase e l'ampiezza della funzione di trasferimento  $H(j\omega)$ , che corrisponde all'andamento delle funzioni  $|V_{out}/V_{in}|(\nu)$  e  $\Delta\Phi(\nu)$ .

Dopo aver graficato l'*andamento dei dati in funzione della frequenza di input* ci si è proposti di intrapolare, piuttosto che di verificare sperimentalmente, il raggiungimento della **frequenza di taglio** (o *cutoff frequency*).

## 2 Formule utilizzate

Le formule che descrivono l'andamento della tensione del generatore in regime sinusoidale e della tensione ai capi del condensatore sono:

$$V_S(t) = V_S \cos(2\pi\nu t) \quad (2.1)$$

$$V_C(t) = V_C \cos(2\pi\nu t + \Delta\Phi) \quad (2.2)$$

**Frequenza di taglio** (valore atteso):

$$\nu_0 = \frac{1}{2\pi\tau} \quad (2.3)$$

**Sfasamento in radianti:**

$$\Delta\Phi(t) = \frac{2\pi t}{\tau} \quad (2.4)$$

Parametro	Circuito RC	Circuito CR	Circuito LR
Costante di tempo	$\tau = RC$	$\tau = RC$	$\tau = \frac{L}{R+R_L}$
$ H(j\omega) $	$V_C/V_S = \frac{1}{\sqrt{1+(2\pi\nu\tau)^2}}$	$V_R/V_S = \frac{2\pi\nu\tau}{\sqrt{1+(2\pi\nu\tau)^2}}$	$V_R/V_S = \frac{R}{(R+R_L)\sqrt{1+(2\pi\nu\tau)^2}}$
$\arg H(j\omega)$	$\Delta\Phi = -\arctan(2\pi\nu\tau)$	$\Delta\Phi = \frac{\pi}{2} - \arctan(2\pi\nu\tau)$	$\Delta\Phi = -\arctan(2\pi\nu\tau)$

Tabella 1: Formule relative al calcolo della costante di tempo del circuito, del rapporto  $V_{out}/V_{in}$  e dello sfasamento per i tre circuiti studiati. La funzione  $H(j\omega)$  è la funzione di trasferimento del circuito, che mette in relazione le tensioni in input e output.

## 3 Procedura sperimentale

### 3.1 Strumentazione

Gli strumenti utilizzati durante questa esperienza sono stati i seguenti:

- multimetro Fluke 77, utilizzato come ohmetro per misurare le resistenze
- generatore di funzioni *InsteK GFG-8216A*
- oscilloscopio digitale *Tetronix TDS 1002*
- cavi con connettori BNC, morsetti e raccordi a T



Figura 1: Foto della strumentazione utilizzata: l'oscilloscopio, il generatore di funzioni e il multimetro.

### 3.2 Costruzione

Per svolgere le misure richieste in questa seconda esperienza il generatore di funzioni è stato collegato al canale 1 dell'oscilloscopio per mezzo di un connettore BNC, mentre al canale 2 è stato connesso l'elemento circuitale di cui si è voluta misurare la tensione, anch'esso tramite un cavo con connettore BNC e morsetti. Entrambi i canali dell'oscilloscopio sono stati settati con accoppiamento di tipo "DC" e attenuazione "1x".

Sono stati realizzati tre circuiti: **RC**, **CR** e **LR** col fine di misurare la tensione ai capi del condensatore o della resistenza; in Figura 2 sono visionabili le tre diverse configurazioni.<sup>1</sup>

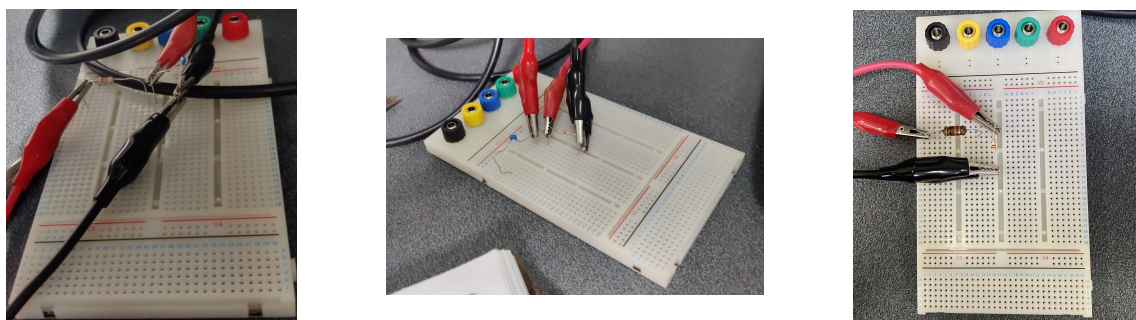


Figura 2: I tre circuiti utilizzati per l'esperienza. Il circuito RC ha i morsetti dell'uscita sul condensatore, mentre il circuito CR e LR li hanno sulla resistenza.

E la loro schematizzazione è mostrata in Figura 3:

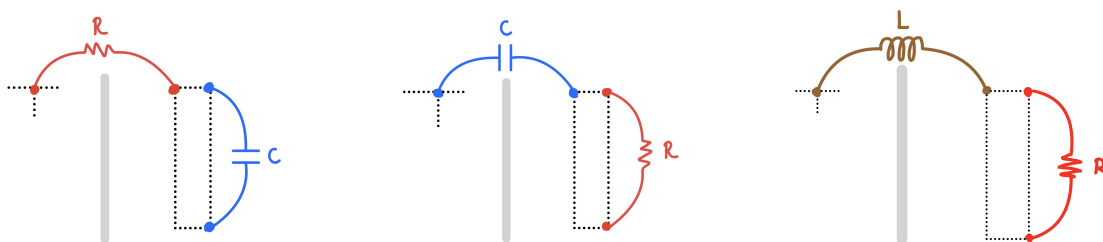


Figura 3: Circuiti RC, CR, LR schematizzati. Il bipolo verticale corrisponde all'elemento rispetto al quale è concentrata l'attenzione.

### 3.3 Presa dati

In primo luogo è stato utilizzato il multimetro in configurazione di ohmetro per misurare le resistenze. Poi, dopo aver selezionato il segnale di onda sinusoidale sul generatore di funzioni, è stata impostata la stessa scala per entrambi i canali per avere misure coerenti fra loro. Successivamente si è misurata l'ampiezza del segnale in input con due cursori orizzontali di tipo *ampiezza* tangenti rispettivamente al massimo e al minimo della sinusoide. Per ogni frequenza scelta (si veda la sezione 4) si è proceduto nel modo seguente:

- per calcolare l'**ampiezza** del segnale in output sono stati utilizzati due cursori orizzontali di tipo *ampiezza* tangenti al massimo e al minimo della funzione sinusoidale.
- lo **sfasamento** fra il segnale di entrata e di uscita è stato calcolato con due cursori verticali di tipo *tempo* posti in modo da intersecare rispettivamente i massimi della funzione in input e di quella in output.

<sup>1</sup>Si noti che la resistenza utilizzata nel circuito RC e CR è diversa da quella utilizzata nel circuito LR, come riportato nella sezione 4; verrà chiarito il motivo in sottosezione 5.3.

## 4 Risultati sperimentali

I valori delle grandezze misurate che caratterizzano i vari sistemi circuitali sono riportate nella tabella Tabella 2:

Grandezza fisica	Valore misurato	Tolleranza
Resistenza -(circuito RC e CR)	$R_1 = 2676 \Omega$	5%
Capacità (circuito RC e CR)	$C = 22 \text{ nF}$	n.d.
Induttanza (circuito LR)	$L = 10 \text{ mH}$	n.d.
Resist. interna (circuito LR)	$R_L = 38.6 \Omega$	5%
Resistenza (circuito LR)	$R_2 = 456 \Omega$	n.d.

Tabella 2: n.d. = "non determinato". Per tale grandezza, il costruttore non fornisce alcuna incertezza.

A questo punto, si sono svolte le tre principali prese dati, i cui risultati sono illustrati<sup>2</sup>. in Tabella 3, Tabella 4, Tabella 5:

Frequenza	Ampiezza	Scala $\Delta V$	$\Delta t$ Picchi	Scala $\Delta t$
0.10 kHz	1940 mV	1.00 V	80 $\mu\text{s}$	250 $\mu\text{s}$
0.25 kHz	1920 mV	1.00 V	64 $\mu\text{s}$	250 $\mu\text{s}$
0.50 kHz	1880 mV	1.00 V	70 $\mu\text{s}$	250 $\mu\text{s}$
1.00 kHz	1860 mV	1.00 V	60 $\mu\text{s}$	250 $\mu\text{s}$
2.00 kHz	1620 mV	0.50 V	50 $\mu\text{s}$	250 $\mu\text{s}$
2.50 kHz	1480 mV	0.50 V	48 $\mu\text{s}$	100 $\mu\text{s}$
2.70 kHz	1420 mV	0.50 V	46 $\mu\text{s}$	100 $\mu\text{s}$
3.00 kHz	1340 mV	0.50 V	44 $\mu\text{s}$	50.0 $\mu\text{s}$
10.00 kHz	600 mV	0.20 V	22.4 $\mu\text{s}$	25.0 $\mu\text{s}$
25.00 kHz	236 mV	0.10 V	9.6 $\mu\text{s}$	10.0 $\mu\text{s}$
50.00 kHz	124 mV	0.05 V	4.9 $\mu\text{s}$	5.0 $\mu\text{s}$
100.00 kHz	64.8 mV	0.02 V	2.48 $\mu\text{s}$	2.5 $\mu\text{s}$

Tabella 3: Dati relativi allo studio del condensatore in regime sinusoidale, insieme alla scala a cui i dati sono stati presi. Questo servirà ad assegnare le incertezze in sezione 5. Il valore  $V_S$  di input è 1960 mV, ad una scala di 500 mV.

Frequenza	Ampiezza	Scala $\Delta V$	$\Delta t$ Picchi	Scala $\Delta t$
0.10 kHz	80 mV	0.05 V	2480 $\mu\text{s}$	2500 $\mu\text{s}$
0.25 kHz	182 mV	0.10 V	960 $\mu\text{s}$	2500 $\mu\text{s}$
0.50 kHz	336 mV	0.10 V	460 $\mu\text{s}$	1000 $\mu\text{s}$
1.00 kHz	620 mV	0.20 V	190 $\mu\text{s}$	500 $\mu\text{s}$
2.00 kHz	1060 mV	0.20 V	80 $\mu\text{s}$	250 $\mu\text{s}$
2.50 kHz	1210 mV	0.20 V	58 $\mu\text{s}$	100 $\mu\text{s}$
2.70 kHz	1260 mV	0.20 V	50 $\mu\text{s}$	100 $\mu\text{s}$
3.00 kHz	1340 mV	0.20 V	42 $\mu\text{s}$	100 $\mu\text{s}$
10.00 kHz	1840 mV	0.50 V	5.2 $\mu\text{s}$	10.0 $\mu\text{s}$
25.00 kHz	1920 mV	0.50 V	0.6 $\mu\text{s}$	10.0 $\mu\text{s}$
50.00 kHz	1920 mV	0.50 V	0.2 $\mu\text{s}$	5.0 $\mu\text{s}$

Tabella 4: Dati relativi allo studio del condensatore in regime sinusoidale, insieme alla scala a cui i dati sono stati presi. Questo servirà ad assegnare le incertezze in sezione 5. Il valore  $V_S$  di input è 1.96 V, ad una scala di 1.00 V.

<sup>2</sup>L'oscilloscopio mostra i segnali di tensione superiori al singolo volt direttamente in volt e non in millivolt. Sono stati convertiti tutti in millivolt per ragioni di uniformità e ordine.

Frequenza	Ampiezza	Scala $\Delta V$	$\Delta t$ Picchi	Scala $\Delta t$
0.10 kHz	1640 mV	0.50 V	80 $\mu$ s	1000 $\mu$ s
0.25 kHz	1640 mV	0.50 V	60 $\mu$ s	1000 $\mu$ s
0.50 kHz	1620 mV	0.50 V	40 $\mu$ s	1000 $\mu$ s
1.00 kHz	1660 mV	0.50 V	28 $\mu$ s	200 $\mu$ s
2.50 kHz	1600 mV	0.50 V	20 $\mu$ s	100 $\mu$ s
5.00 kHz	1440 mV	0.50 V	19 $\mu$ s	50.0 $\mu$ s
7.50 kHz	1280 mV	0.50 V	16 $\mu$ s	50.0 $\mu$ s
7.80 kHz	1240 mV	0.50 V	16 $\mu$ s	50.0 $\mu$ s
8.00 kHz	1200 mV	0.50 V	16 $\mu$ s	50.0 $\mu$ s
20.00 kHz	720 mV	0.50 V	10.4 $\mu$ s	10.0 $\mu$ s
50.00 kHz	270 mV	0.10 V	4.9 $\mu$ s	5.0 $\mu$ s
100.00 kHz	134 mV	0.05 V	2.5 $\mu$ s	5.0 $\mu$ s

Tabella 5: Dati relativi allo studio del condensatore in regime sinusoidale, insieme alla scala a cui i dati sono stati presi. Questo servirà ad assegnare le incertezze in sezione 5. Il valore  $V_S$  di input è 1800 mV, ad una scala di 500 mV.

## 5 Analisi dati

### 5.0.1 Discussione sulle incertezze

In ogni misura, non essendoci oscillazione tra i valori del segnale riportate dai cursori, possiamo valutare le incertezze da assegnare ad ogni punto sperimentale nel seguente modo:

- Dal manuale dell'oscilloscopio si evince che ad ogni misura è assegnata una incertezza di lettura di tipo sistematico. Tale incertezza è di entità compresa tra lo 0% e il 3% della scala scelta per le misure. Non essendo note, e per motivi di tempo, queste incertezze non verranno considerate per la trattazione in sezione 5. In ogni caso, questo errore sistematico riguarda tutte le misure allo stesso modo, e pertanto provoca "solo" una dilatazione o un offset dei dati.
- Per poter fare un confronto tra i dati, ad ogni misura è stata assegnata un'incertezza pari a  $1/\sqrt{12}$  della risoluzione del cursore: ad ogni scala scelta per le misure sull'oscilloscopio, la risoluzione del cursore (cioè la distanza tra ogni "tacca" su cui può essere posizionato) è  $1/50$  della scala. Se tale incertezza viene interpretata come "digitale", essa corrisponde ad una distribuzione uniforme in cui il valore misurato (ammesso non sia affetto da sistematiche) è  $1/50$  della tacca. A questa distribuzione assegniamo quindi  $1/\sqrt{12}$  della tacca come incertezza sulle misure, sia sui tempi che sull'ampiezza. L'incertezza assegnata al singolo valore di lettura del cursore è pertanto  $1/50\sqrt{12}$  della scala scelta per la misurazione. Poiché i cursori necessari alla determinazione di un  $\Delta$  sono due, e di questi viene catturata la differenza, allora l'incertezza totale assegnata sul dato è la somma in quadratura delle due. In conclusione, l'incertezza che assegniamo ad ogni dato è  $1/50\sqrt{6} \approx 1/120$  della scala scelta.

Poiché, per il calcolo del modulo della funzione di trasferimento, occorre fare il rapporto di due ampiezze, misurate a scale diverse (quindi con errori diversi), l'incertezza finale che otteniamo è, con la Equazione 5.1:

$$\frac{\sigma_{|H|}}{|H|} = \sum_{i=1}^n \beta_i^2 \frac{\sigma_{x_i}^2}{\mu_i^2} = \frac{\sigma^2[V_C]}{V_C^2} + \frac{\sigma^2[V_S]}{V_S^2} \quad (5.1)$$

### 5.0.2 Calcolo dello sfasamento in radianti

Come si nota dalle tabelle relative ai dati sperimentali, lo sfasamento tra le tensioni è stato registrato in termini di *tempo*. Per passare alla sua espressione in radianti ci si serve della Equazione 2.4:

$$\Delta\Phi(t) = \frac{2\pi t}{\tau}$$

L'incertezza sulle misure di  $\Delta\Phi$  [rad] si calcola propagando quelle su  $t$  e  $\tau$  secondo la seguente formula<sup>3</sup>:

$$\frac{\sigma_{\Delta\Phi}^2}{\Delta\Phi^2} = \sum_{i=1}^n \beta_i^2 \frac{\sigma_{x_i}^2}{\mu_i^2} = \frac{\sigma^2[t]}{t^2} + \frac{\sigma^2[\tau]}{\tau^2}$$

### 5.0.3 Valori teorici attesi della frequenza di taglio

Si riportano nella Tabella 6 i valori della costante di tempo  $\tau$  e della frequenza di taglio  $\nu_0$  attesi, secondo le Equazione 2.3 e Tabella 1:

	Parametro	Valore	Incetezza
<b>Circuito RC/CR</b>	Costante di tempo ( $\tau$ )	58.9 $\mu$ s	2.9 $\mu$ s
	Frequenza di taglio ( $\nu_0$ )	2.70 kHz	0.14 kHz
<b>Circuito LR</b>	Costante di tempo ( $\tau$ )	20.22 $\mu$ s	1.01 $\mu$ s
	Frequenza di taglio ( $\nu_0$ )	7.88 kHz	0.39 kHz

Tabella 6: Valori teorici attesi. Si osservi che poiché gli unici parametri misurati con una tolleranza assegnata (5%) sono le resistenze, allora tutte le grandezze teoriche presentano la medesima incertezza relativa.

### 5.0.4 Interpolazione per frequenza di taglio

Dai grafici che seguiranno nelle sottosezione 5.1, sottosezione 5.2, sottosezione 5.3, emerge che il comportamento dei punti nei pressi della frequenza di taglio è quello di allinearsi lungo una retta, di cui è possibile fare interpolazione.

Si è pertanto agito come segue:

- Si è trovata la coppia di dati adiacenti  $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ , dove  $x_{1,2}$  è il logaritmo della frequenza e  $y_{1,2}$  è o un rapporto di tensioni o una fase, che più si avvicina al valore costante  $|H(\omega_T)|$  o  $\Delta\Phi(\omega_T)$ , e si è calcolata la retta  $r$  passante per quei due punti (tenendo conto delle incertezze):

$$\begin{aligned} m &= \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} & \sigma_m &= \frac{\sigma[y_1] \oplus \sigma[y_2]}{x_2 - x_1} \\ c &= \frac{y_1 x_2 - y_2 x_1}{x_2 - x_1} & \sigma_c &= \frac{\sigma[y_1] x_2 \oplus \sigma[y_2] x_1}{x_2 - x_1} \end{aligned}$$

- Si è quindi calcolata l'intersezione analitica tra questa retta e il valore della ampiezza o della fase in corrispondenza della frequenza di taglio ( $k = 1/\sqrt{2}$  o  $k = \pi/4$  a seconda dei casi), con la relativa incertezza:

$$x_0 = \frac{k - c}{m} \quad \sigma[x_0] = x_0 \left( \frac{\sigma_c}{c} \oplus \frac{\sigma_m}{m} \right)$$

- Trovata l'ascissa di intersezione  $x_0 = \ln(\nu_0)$  si è ritornati sul dominio delle frequenze:

$$\nu_0 = e^{x_0} \quad \sigma[\nu_0] = \sigma[x_0] e^{x_0}$$

<sup>3</sup>Dove in questo caso  $\Delta\Phi$  è la  $f$ , funzione di due sole  $x_i$ , le  $\mu_i$  sono i valori attesi delle  $x_i$  e le  $\beta_i$  rappresentano gli eventuali esponenti a cui sono elevate le  $x_i$ .

## 5.1 Circuito RC

Dalle formule in Tabella 1 ci si aspetta che il circuito RC sia un **passa basso**, ovvero che l'ampiezza della funzione di trasferimento  $H(j\omega)$  sia superiore al valore di  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  per frequenze minori del valore di soglia e  $\Delta\Phi = 0$  per  $\nu = 0$ . Ci si aspetta, quindi, che i segnali di input e output siano inizialmente in fase tra di loro.

Si riportano i grafici dei valori ottenuti per ampiezza e fase:

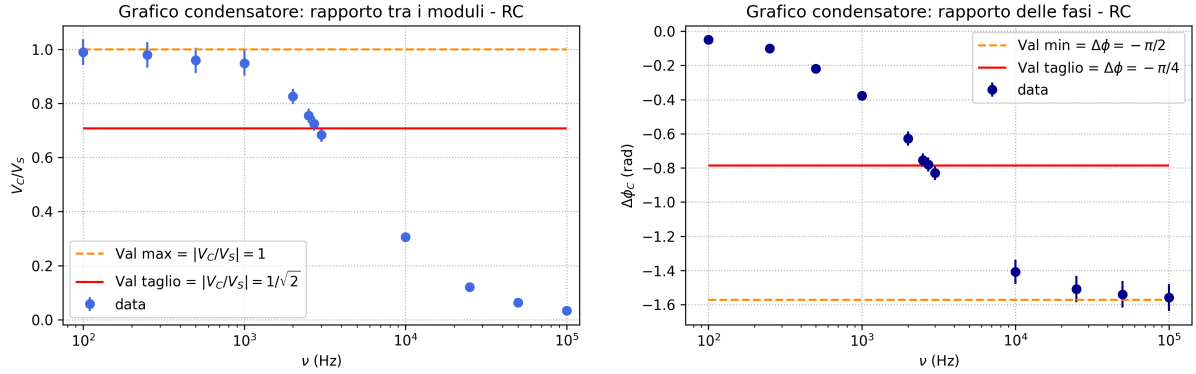


Figura 4: Rapporto tra le ampiezze dei segnali di input e output (sinistra) e fase del segnale di output per il circuito CR (destra). Le incertezze dei singoli punti sono state amplificate di un fattore 10 in modo da renderle visibili sul grafico.

I grafici ottenuti confermano la previsione che il circuito sia un passa basso, in quanto l'ampiezza risulta essere maggiore del valore di taglio per valori inferiori alla frequenza di taglio calcolata. Quest'ultima viene stimata con un'interpolazione lineare come spiegato nella sottosezione 5.0.4. Essa risulta essere:

$$\nu_0^{|H|} = (2.82 \pm 0.11)\text{kHz}$$

$$\nu_0^{\Delta\Phi} = (2.73 \pm 0.28)\text{kHz}$$

## 5.2 Circuito CR

In questo caso, si ha che, sempre dalla Tabella 1, ci si aspetta che questo circuito sia una **passa alto**, ovvero che, al contrario del caso precedente, l'ampiezza sia maggiore del valore di soglia per  $\nu > \nu_0$ . Per la fase iniziale di  $H(j\omega)$ , ci si aspetta che essa sia pari a  $\Delta\Phi = \frac{\pi}{2}$ .

Si riportano i valori ottenuti per ampiezza e fase:

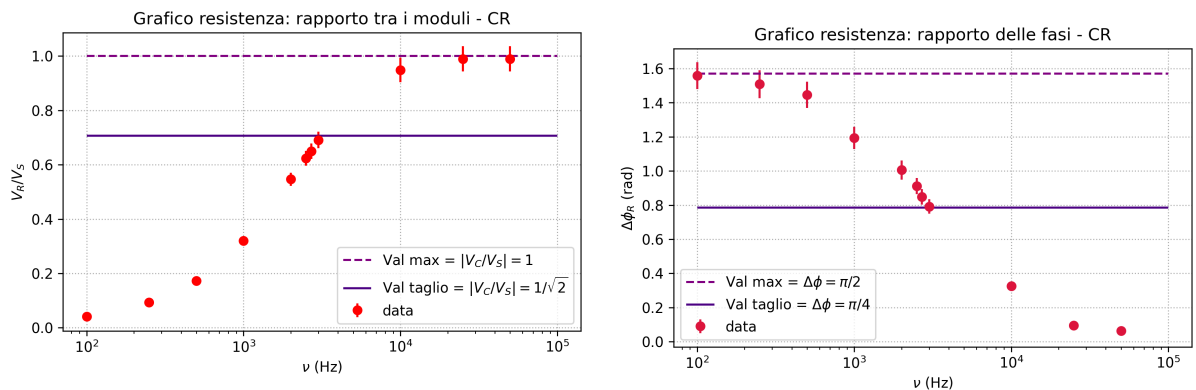


Figura 5: Rapporto tra le ampiezze dei segnali di input e output (sinistra) e fase del segnale di output per il circuito RC (destra). Le incertezze assegnate ai singoli punti sono state amplificate di un fattore 10 per permettere una migliore visione di quest'ultima.

Come previsto, dai grafici si nota come il circuito sia un passa alto, in quanto l'ampiezza risulta essere maggiore del valore di taglio per valori successivi alla frequenza di taglio calcolata. Quest'ultima viene stimata con un'interpolazione lineare come spiegato nella sottosottosezione 5.0.4. Essa risulta essere:

$$\nu_0^{|H|} = (3.13 \pm 0.27)\text{kHz}$$

$$\nu_0^{\Delta\Phi} = (3.04 \pm 0.15)\text{kHz}$$

### 5.3 Circuito LR

In questo caso, per Tabella 1, ci si aspetta che il circuito sia nuovamente un **passa basso**. Ora tuttavia l'ampiezza massima di  $H(j\omega)$  non è pari a 1, ma  $|H(j\omega)| \simeq 0.92$ . Questo perché, l'induttore propriamente schematizzabile come un induttore ideale, ma presenta una resistenza interna ( $R_L$ ), che aumenta la resistenza totale del circuito; infatti il circuito è equivalente ad un partitore di tensione, costituito da un induttore e da una resistenza equivalente, pari a  $R_{eq} = R + R_L$ . Questa schematizzazione permette di calcolare la corrente che scorre all'interno del circuito. La costante di tempo del circuito risulta, quindi, essere, come in Tabella 1 pari al rapporto di  $L$  e della  $R_{eq}$ . Applicando il ragionamento dei casi precedenti, si ottiene l'ampiezza di  $H(j\omega)$  formalmente simile a quella del caso del circuito RC, ma riscalata di un fattore  $\frac{R}{R+R_L}$  che con i dati numerici forniti è pari al valore già citato.

Nel ricavare il valore della frequenza di taglio si deve imporre che il valore dell'ampiezza della funzione  $H(j\omega)$  diminuisca di un fattore  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  il valore massimo, che, per questo circuito vale  $|H(j\omega)|_{MAX} = 0.92$ . Si riportano i grafici dei valori misurati di ampiezza e fase:

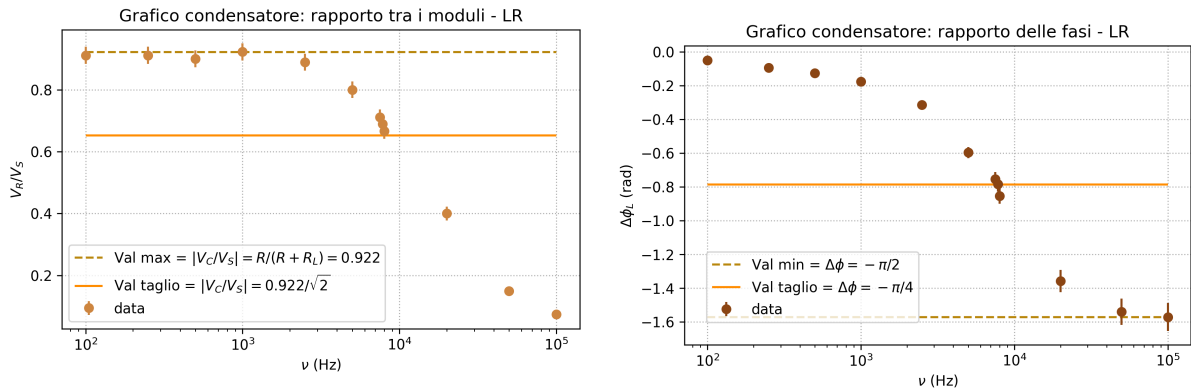


Figura 6: Rapporto tra le ampiezze dei segnali di input e output (sinistra) e fase del segnale di output per il circuito LR (destra). Le incertezze assegnate ai punti sono state amplificate di un fattore 10 per permettere una maggiore visibilità di queste ultime.

I grafici ottenuti mostrano come l'andamento rispetti quello previsto, ovvero che il circuito risulta essere un passa basso, in quanto le ampiezze maggiori si trovano per  $\nu > \nu_0$ , senza però, raggiungere mai il valore 1. In particolare, da un processo di interpolazione grafica, come descritto nella sottosottosezione 5.0.4 si ottengono i valori:

$$\nu_0^{|H|} = (8.14 \pm 0.62)\text{kHz}$$

$$\nu_0^{\Delta\Phi} = (7.80 \pm 0.36)\text{kHz}$$



## 6 Conclusioni

In conclusione, si riportano i valori ottenuti per le frequenze di taglio tramite interpolazione grafica e si confrontano con i valori aspettati:

	$\nu_0^T$ (kHz)	$\nu_0^{ H }$ (kHz)	$\nu_0^{\Delta\Phi}$ (kHz)
<b>circuito RC</b>	$2.70 \pm 0.14$	$2.82 \pm 0.11$	$2.73 \pm 0.28$
<b>circuito CR</b>	$2.70 \pm 0.14$	$3.13 \pm 0.27$	$3.04 \pm 0.15$
<b>circuito LR</b>	$7.88 \pm 0.39$	$8.14 \pm 0.62$	$7.80 \pm 0.36$

Tabella 7: Tabella riepilogativa sui valori di  $\nu_0$ . Con  $\nu_0^T$  si intende il valore teorico ottenuto a partire dalla costante caratteristica  $\tau$ .

Si può notare come tutte le frequenze ottenute da interpolazione grafica siano compatibili entro una sigma.

Potrebbe essere utile, per una maggiore accuratezza dell'esperienza, ripetere quest'ultima tenendo in considerazione maggiori fonti di incertezza, quali le sistematiche degli strumenti od incertezze sperimentali. Quest'ultime sarebbero riducibili grazie alle prese di misure ripetute, al fine minimizzare l'effetto di oscillazione dei singoli dati presi.