

# Relazione Circuiti 2

Nicolò Raffaeli, Francesco Rossi, Alessandro Varsi

Marzo 2023

## Abstract

In questa seconda esperienza di laboratorio di elettronica abbiamo potuto osservare l'andamento della caduta di potenziale ai capi di diverse componenti circuitali nel caso di circuiti RL, RC e RLC, impulsati con corrente a **onda quadra**. Abbiamo potuto lavorare con un nuovo strumento non presente alla prima esperienza, cioè l'**oscilloscopio**, e con nuovi elementi circuitali quali **condensatori** e **induttanze**. Tutte le tabelle sono riportate in appendice.

## Indice

<b>1</b>	<b>Parte Prima: RL e RC</b>	<b>2</b>
1.1	Obiettivo . . . . .	2
1.2	Svolgimento e Presa Dati . . . . .	2
1.2.1	Circuito RC . . . . .	2
1.2.2	Circuito RL . . . . .	3
1.3	Analisi Dati . . . . .	3
1.3.1	Circuito RC . . . . .	3
1.3.2	Circuito RL . . . . .	5
1.4	Conclusione . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Parte Seconda: RLC</b>	<b>7</b>
2.1	Obiettivo . . . . .	7
2.2	Svolgimento e Presa Dati . . . . .	7
2.2.1	Regime Sovrasmorzato . . . . .	7
2.2.2	Regime di Smorzamento Critico . . . . .	7
2.2.3	Regime Sottosmorzato . . . . .	7
2.3	Analisi Dati . . . . .	8
2.3.1	Regime di sovrasmorzamento . . . . .	8
2.3.2	Smorzamento critico . . . . .	9
2.3.3	Regime sottosmorzato . . . . .	11
2.4	Conclusione . . . . .	12
<b>3</b>	<b>Appendice: Tabelle</b>	<b>13</b>
3.1	Parte Prima . . . . .	13
3.2	Parte Seconda . . . . .	14

# 1 Parte Prima: RL e RC

## 1.1 Obiettivo

Studio e analisi dei circuiti RL e RC, in particolare della caduta di potenziale ai capi degli elementi circuitali tipici dei due circuiti cioè induttanza per quanto riguarda il primo e condensatore nel secondo, nel momento in cui questi sono sollecitati con corrente impulsata a onda quadra.

## 1.2 Svolgimento e Presa Dati

Prima di cominciare a costruire i circuiti è stato necessario costruire l'impulso in onda quadra in maniera adatta attraverso l'oscilloscopio, che ci ha permesso di osservare con precisione l'onda generata dal generatore di funzioni. Regolando frequenza e ampiezza dell'onda abbiamo impulsato la corrente ideale per l'analisi dei circuiti. In ordine abbiamo costruito prima RC e poi RL ponendo gli elementi circuitali in serie e mettendo le sonde per la presa dati delle cadute di potenziale ai capi dell'elemento tipico del circuito, in figura denominato Z.

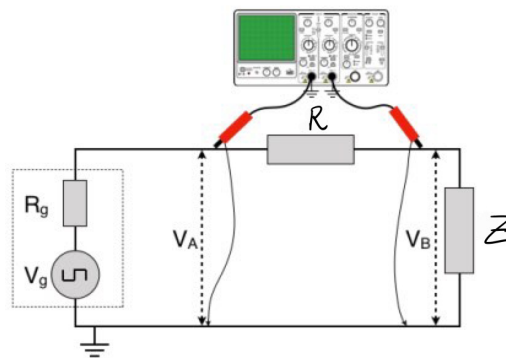


Figura 1: Configurazione dell'apparato RL e RC

Per controllare la corretta calibrazione delle sonde le abbiamo collegate ai punti di test dell'oscilloscopio:

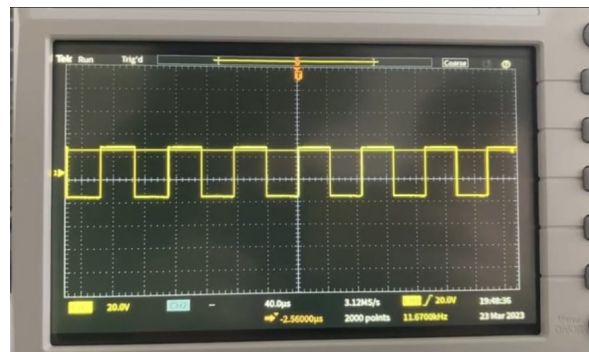


Figura 2: Impulso in entrata

Per quanto riguarda la scelta dell'errore da associare alle misure si è deciso di procedere nel seguente modo: il valore fornito dal cursore dell'oscilloscopio non oscillava per la misura dei tempi, quindi abbiamo scelto come errore la sensibilità dello strumento; il valore della tensione, invece, spesso oscillava tra due valori  $V_{inf}$  e  $V_{sup}$ , quindi abbiamo utilizzato il punto medio come dato finale e la semiampiezza dell'intervallo come errore.

### 1.2.1 Circuito RC

Il primo circuito che abbiamo costruito è RC, ponendo la sonda B ai capi del condensatore per campionare la caduta di potenziale  $V_C(t)$ . Abbiamo simulato la chiusura del circuito selezionando l'offset

a zero e studiando il primo semiperiodo dell'onda quadra; in questo modo la differenza di tensione erogata dal generatore di funzioni per l'onda quadra era centrata nel suo valore medio.

La resistenza e la capacità utilizzate sono state prima misurate tramite il multimetro palmare per avere una stima iniziale ed un valore di riferimento, per poi successivamente controllare la validità dei nostri risultati.

$$R = (2.660 \pm 0.001) k\Omega$$

$$C = (98 \pm 1) nF$$

Le scelte sono state fatte in modo tale che la resistenza fosse più piccola rispetto a quella interna dell'oscilloscopio (circa  $1 M\Omega$ ) e la capacità più grande di quella in ingresso dell'oscilloscopio (circa  $20 pF$ ). Il valore della resistenza complessiva del circuito però era determinata dalla presenza della resistenza in serie del generatore di funzioni; la porta su cui abbiamo settato la prima parte dell'esperimento generava con una resistenza interna di  $600\Omega$ , per cui il valore finale della resistenza equivalente è risultato essere:

$$R_{eq} = 3260 \Omega$$

Il generatore di funzione è stato quindi settato su onda quadra, come già detto, a un  $V_{p-p} = 3.4V$  picco a picco, con un errore associato  $\sigma_V = 0.1 V$ , e ad una frequenza  $f = (26.69 \pm 0.04) Hz$ . Per questo circuito abbiamo valutato la caduta di potenziale solo sul condensatore. La tabulazione dei dati raccolti è riportata in appendice (1).

### 1.2.2 Circuito RL

Per analizzare il circuito RL abbiamo utilizzato un impulso in onda quadra analogo a quello per RC, con ampiezza e frequenza differenti:  $V_{p-p} = 2.8 V$  e frequenza stimata  $f = (786.7 \pm 0.4) Hz$ . Abbiamo mantenuto la stessa resistenza del circuito precedente che, come prima, va considerata in serie al generatore di funzioni. Per questo circuito abbiamo valutato la caduta di potenziale sull'induttanza, collegando la sonda B ai capi della stessa e campionando  $V_L(t)$ .

Abbiamo poi ricavato il valore di L tramite un'interpolazione dei dati. In questo caso non è stato possibile misurarne il valore a priori, tuttavia un'attenzione in più è stata rivolta alla resistenza dell'induttanza stessa, che avrebbe potuto inquinare l'analisi dei dati raccolti. Tale valore è stato stimato tramite il multimetro:  $R_L = (40.5 \pm 0.1) \Omega$ , errore preso in base alla sensibilità dello strumento. La tabulazione dei dati raccolti è riportata in appendice (2).

## 1.3 Analisi Dati

### 1.3.1 Circuito RC

Il fit è stato effettuato con la funzione che risolve l'equazione differenziale (*Legge di Kirchhoff*) che descrive l'andamento della tensione nel circuito; in particolare sul condensatore:

$$V_C(t) = V_g \left( 1 + \frac{-2}{1 + e^{-\frac{t}{\tau}}} e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

Per il fit abbiamo utilizzato un unico parametro libero  $\tau$ . Abbiamo riscontrato problemi nell'analisi dati e nel fit con la forma funzionale sopra espressa; per ovviare a questo problema abbiamo fatto un'importante osservazione: ci aspettiamo un semiperiodo della frequenza d'onda impulsata maggiore di almeno 5 volte il tempo caratteristico del sistema RC. I valori del tempo caratteristico aspettato  $\tau_{atteso} = RC \simeq 3.1948 \times 10^{-4} s$  e del semiperiodo  $T/2 \simeq 3.7 \times 10^{-2} s$  confermano questa ipotesi, dunque ci è sembrato ragionevole riscrivere la forma funzionale in modo diverso con buonissima approssimazione, semplificando il coefficiente della dipendenza esponenziale.

$$\frac{-2}{1 + e^{-\frac{T/2}{\tau}}} \simeq -2$$

La funzione con cui abbiamo interpolato i dati è quindi:

$$V_C(t) = V_g [1 - 2e^{-\frac{t}{\tau}}] \quad (1)$$

Dove  $V_g = \frac{1}{2} V_{p-p} = 1.7 V$

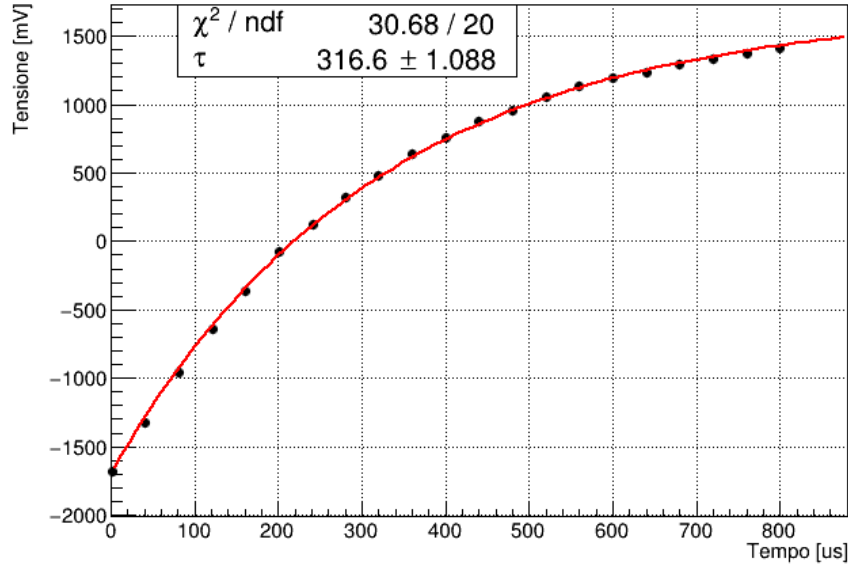


Figura 3:  $V_C$  per circuito RC

Il fit restituisce  $\chi^2_{rid} = 1.534$ , quindi possiamo concludere che il modello rispecchia bene la distribuzione dei dati. Da  $\tau$ , misura caratteristica del circuito, possiamo ricavare la capacità del condensatore in quanto  $\tau = RC = 316.6 \mu s$  e quindi:

$$C = \frac{\tau}{R} = 97.129 nF$$

L'errore associato si trova tramite la formula di propagazione degli errori:

$$\begin{aligned} \sigma_C^2 &= \left( \frac{\partial C}{\partial \tau} \sigma_\tau \right)^2 + \left( \frac{\partial C}{\partial R} \sigma_R \right)^2 = \\ &= \frac{1}{R^4} (R^2 \sigma_\tau^2 + \tau^2 \sigma_R^2) \end{aligned}$$

E quindi

$$\sigma_C = \frac{1}{R^2} \sqrt{R^2 \sigma_\tau^2 + \tau^2 \sigma_R^2} = 0.335 nF$$

In conclusione il valore della capacità risultato interpolazione dei dati è

$$C = (97.1 \pm 0.3) nF$$

La compatibilità tra questo valore e la capacità misurata con il multimetro può essere verificata con un t-test:

$$\frac{98 - 97.1}{\sqrt{0.335^2 + 1^2}} = 0.85 < 1$$

### 1.3.2 Circuito RL

Il fit è stato effettuato con la funzione che risolve l'equazione differenziale che descrive l'andamento della caduta di potenziale nel circuito; in particolare sull'induttore:

$$V_L(t) = \frac{-2V_g}{1 + e^{-\frac{t}{2f\tau}}} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Ipotizzando un'induttanza dell'ordine delle decine di  $mH$ , riproduciamo il discorso fatto in precedenza e semplifichiamo la forma funzionale utilizzata nel fit:

$$V_L(t) = -2V_g e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2)$$

Dove

$$V_g = \frac{1}{2} V_{p-p} = 1.4 \text{ V}$$

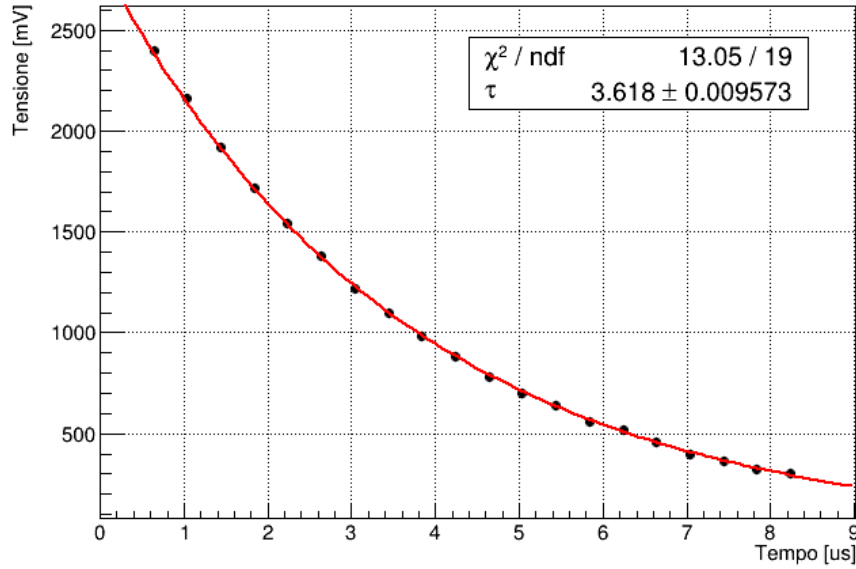


Figura 4:  $V_L$  per circuito RL

Il valore del  $\chi^2_{rid} = 0.68$  è molto buono e ci permette di concludere che il modello si adatta bene ai dati.

Per valutare l'influenza della resistenza interna dell'induttanza sulle nostre misure abbiamo calcolato  $L$  sia considerandola che non facendolo, per poi valutare la variazione percentuale tra i due valori ottenuti. La relazione tra tempo caratteristico e componenti circuitali è:

$$L = \tau R$$

Considerando la resistenza dell'induttanza, cioè utilizzando una resistenza  $R_{eq} = 3260\Omega + 40.5\Omega = 3300.5\Omega$  si ottiene

$$L_{reale} = 11.9412 \text{ mH}$$

Invece, immaginando l'induttanza come ideale, cioè utilizzando  $R = 3260\Omega$  si ottiene

$$L_{ideale} = 11.7947 \text{ mH}$$

Infine, la variazione percentuale

$$var\% = \frac{L_r - L_i}{L_i} = 1.24\%$$

Nonostante risulti poco significativa, abbiamo comunque deciso di proseguire con il valore reale, ottenuto considerando anche la resistenza interna dell'induttanza. L'errore associato è:

$$\sigma_L = \sqrt{R^2 \sigma_\tau^2 + \tau^2 \sigma_R^2} = 0.0316 \text{ mH}$$

Il valore definitivo dell'induttanza diventa quindi

$$L = (11.94 \pm 0.03) \text{ mH}$$

## 1.4 Conclusione

Nella prima parte dell'esperienza, dove abbiamo analizzato le prime due configurazioni, attraverso il test del  $\chi^2_{rid}$  abbiamo verificato che i modelli utilizzati per i fit, (1) e (2), siano compatibili con i dati presi in laboratorio.

In particolare, nel circuito RC abbiamo verificato correttamente la carica del condensatore attraverso l'analisi della sua caduta di potenziale, mentre nel circuito RL è stata verificata l'opposizione alla corrente da parte dell'induttanza.

Infine, siamo stati in grado di quantificare l'influenza della resistenza interna dell'induttore, osservando che il risultato del calcolo sull'induttanza cambiava di circa un punto percentuale.

## 2 Parte Seconda: RLC

### 2.1 Obiettivo

L'obiettivo di questa seconda parte è costruire il circuito RLC in maniera tale da ottenere tutti e tre i regimi di corrente possibili per questo circuito, cioè **regime sottosmorzato**, **sovrasmorzato** e di **smorzamento critico**, dipendenti dai valori degli elementi circuitali.

### 2.2 Svolgimento e Presa Dati

Per poter fare questo tipo di analisi, non avendo uno strumento in grado di misurare l'induttanza, abbiamo utilizzato il valore di  $L$  fornitoci dal fit del circuito RL.

Una scelta importante è stata quella di utilizzare la porta del generatore di funzioni con resistenza  $R_{int} = 50\Omega$  che abbiamo quindi, almeno in prima battuta, stimato trascurabile rispetto alla resistenza del circuito. Anche in questo caso abbiamo studiato i valori di caduta della tensione rispetto a un onda quadra impulsata, in stretta analogia con la parte precedente.

#### 2.2.1 Regime Sovrasmorzato

Inizialmente abbiamo mantenuto tutti gli elementi circuitali utilizzati nella prima parte:  $C = 98nF$ ,  $R = 2660\Omega$  e  $L = (11.94 \pm 0.03)mH$ . I valori di  $\gamma$  e  $\omega_0$  sono quindi

$$\gamma = \frac{R}{2L} = 111390.28 \text{ s}^{-1}$$
$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 29233.77 \text{ s}^{-1}$$

Dato che  $\gamma > \omega_0$  ci si aspettava un regime sovrasmorzato. L'ipotesi è stata confermata dopo aver impulsato l'onda quadra, con  $V_{p-p} = 11.5V$  e frequenza stimata  $f = (264.4 \pm 0.1)Hz$ . La tabella con i dati si trova in appendice (3).

#### 2.2.2 Regime di Smorzamento Critico

Per passare allo smorzamento critico è risultato necessario scegliere una resistenza precisa. Avendo i valori di  $C$  e  $L$  abbiamo fatto una previsione su omega e gamma per trovare la  $R_{critica}$ :

$$\gamma \simeq \omega_0$$
$$R_{critica} = 2\sqrt{\frac{L}{C}} \simeq 698\Omega$$

Quest'ultima è stata costruita attraverso 3 resistenze in serie per un totale di  $2330\Omega$  in parallelo con una da  $1000\Omega$ . Per la presa dati in questo caso abbiamo impulsato un'onda quadra con valori di  $V_{p-p} = 11V$  e frequenza stimata  $f = (6.86 \pm 0.01)Hz$ . La tabella con i dati si trova in appendice (4).

#### 2.2.3 Regime Sottosmorzato

Infine per ottenere l'ultima tipologia di andamento, quello sottosmorzato, abbiamo cambiato tutti gli elementi circuitali scegliendo un condensatore da  $10nF$ , una resistenza  $330\Omega$  e un'induttanza non conosciuta, riuscendo a ottenere l'andamento sottosmorzato.

Il motivo per cui è stato necessario sostituire gli elementi è che non eravamo in grado di osservare 5 picchi sull'oscilloscopio dato che lo smorzamento era troppo intenso. Abbiamo ipotizzato che uno dei motivi fosse il troppo basso valore di  $L$  e il troppo alto valore di  $R$ , che insieme concorrevano all'aumento di  $\gamma$ . Presi  $V_{p-p} = 8.7V$  e frequenza stimata  $f = (9.81 \pm 0.01)Hz$ ; in appendice mettiamo i dati (5).

## 2.3 Analisi Dati

### 2.3.1 Regime di sovrasmorzamento

Per questo primo regime abbia interpolato i dati con la funzione

$$V_R(t) = Ae^{-\gamma t} (e^{\beta t} + e^{-\beta t})$$

Dove  $\beta = \sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2}$ .

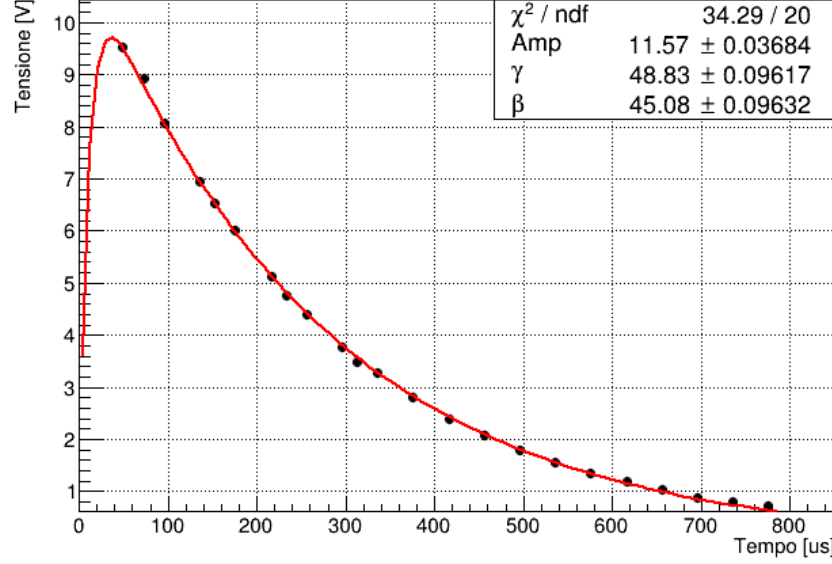


Figura 5:  $V_R$  in regime di sovrasmorzamento

Il valore del  $\chi^2$  suggerisce un buon adattamento del modello ai dati. Per non trattare numeri troppo piccoli, è stato utilizzato un fattore di 1000 per i valori di  $\gamma$  e  $\beta$ , che quindi sono espressi in  $ns^{-1}$ ; il valore coerente con le unità di misura sugli assi ( $\mu s^{-1}$ ) si ottiene dividendo per 1000. Quindi

$$\gamma = (48.8 \pm 0.1) \times 10^{-3} \mu s^{-1}$$

$$\beta = (45.1 \pm 0.1) \times 10^{-3} \mu s^{-1}$$

Procedo a propagare l'errore di  $\gamma_{atteso} = \frac{R}{2L}$

$$\sigma_{\gamma_{atteso}}^2 = \frac{1}{4} \left( \frac{\partial \gamma}{\partial R} \sigma_R^2 + \frac{\partial \gamma}{\partial L} \sigma_L^2 \right) = \frac{1}{4L^2} (\sigma_R^2 + R^2 \sigma_L^2) = 283 s^{-1}$$

Eseguo quindi T-TEST per  $\gamma$ :

$$\frac{\gamma_{atteso} - \gamma_{fit}}{\sqrt{(\sigma_{atteso})^2 + (\sigma_{fit})^2}} = 209$$

Analogamente itero le stesse procedure di calcolo su  $\omega_0^2$  calcolato a partire dai  $\gamma$  e  $\beta$  del fit, ponendo  $f = \omega_0^2 = \gamma^2 - \beta^2$ :

$$\sigma_f^2 = \left( \frac{\partial f}{\partial \gamma} \right)^2 \sigma_\gamma^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial \beta} \right)^2 \sigma_\beta^2 + 2 \frac{\partial f}{\partial \beta} \frac{\partial f}{\partial \gamma} \sigma_{\gamma\beta} = 4\gamma^2 \sigma_\gamma^2 + 4\beta^2 \sigma_\beta^2 + 8\gamma\beta \sigma_{\gamma\beta} = 1.76 \times 10^{14} s^{-2}$$

Perciò:

$$\omega_{0fit}^2 = (34.3 \pm 1.3) \times 10^7 s^{-1}$$

Mentre la varianza di  $\omega_0^2$  aspettato:

$$\sigma^2(\omega_0^2) = \frac{1}{(LC)^2} \left[ \left( \frac{\sigma_C}{C} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_L}{L} \right)^2 \right] = 8.06 \times 10^{13} s^{-2}$$



Sicchè:

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC} = (8.54 \pm 0.09) \times 10^8 \text{ s}^{-2}$$

Eseguo quindi T-TEST per  $\omega_0^2$ :

$$\frac{\omega_0^2 - \omega_{0fit}^2}{\sqrt{(\sigma_{atteso})^2 + (\sigma_{fit})^2}} = 53$$

Sebbene il  $\chi_{rid}^2$  fosse quasi accettabile, è evidente che i parametri calcolati dal fit non siano compatibili con i valori attesi.

La propagazione degli errori per i nostri parametri è analoga per i successivi due regimi, con valori di  $\gamma$  e  $\omega_0^2$  ovviamente diversi per ogni regime a seconda degli elementi circuitali di partenza, dunque alcuni di questi calcoli non verranno ripetuti in seguito.

### 2.3.2 Smorzamento critico

Per eseguire il fit è stata utilizzata la seguente forma funzionale:

$$V_R(t) = Ate^{-\gamma t}$$

L'interpolazione non si è conclusa con successo. L'algoritmo non ha verificato che i dati si distribuissero in maniera aspettata. Ci siamo chiesti allora cosa potesse essere andato storto.

Abbiamo svolto l'esperienza virtuale alla ricerca di cosa potessimo aver sbagliato utilizzando la stessa resistenza, lo stesso capacitore e la stessa induttanza, provando a scaricare i dati dal simulatore e interpolando con la forma funzionale sopraindicata. Il risultato è soddisfacente:

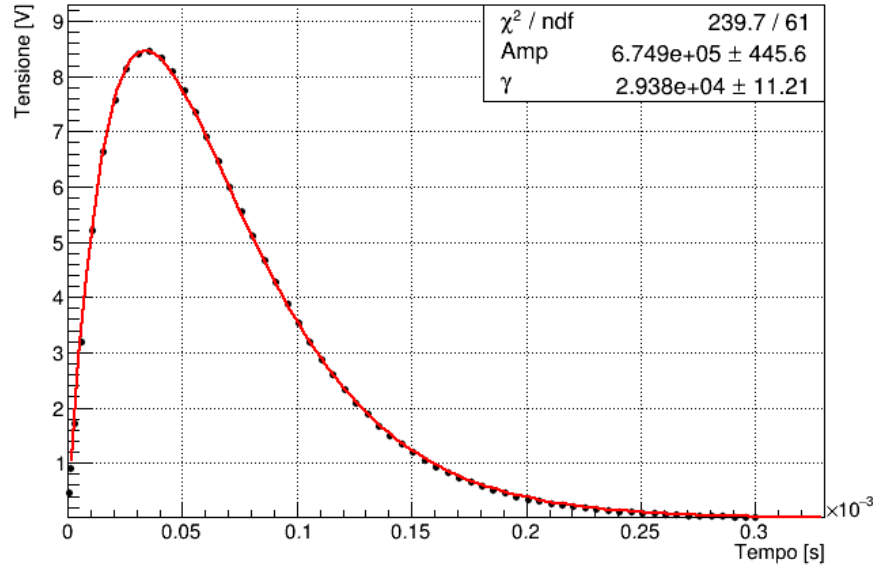


Figura 6:  $V_R$  in regime di smorzamento critico con esperimento virtuale

L'ipotesi per noi più plausibile è che la resistenza interna del generatore e quella dell'induttore abbiano compromesso i dati, spostando il regime verso un sovrasmorzamento: la resistenza complessiva da 50  $\Omega$  del generatore e 40  $\Omega$  dell'induttanza e della resistenza scelta portano a un  $R_{eq} > R_{critico}$ . Per verificare questa ipotesi abbiamo provato a interpolare il set di dati con la forma funzionale del regime sovrasmorzato:

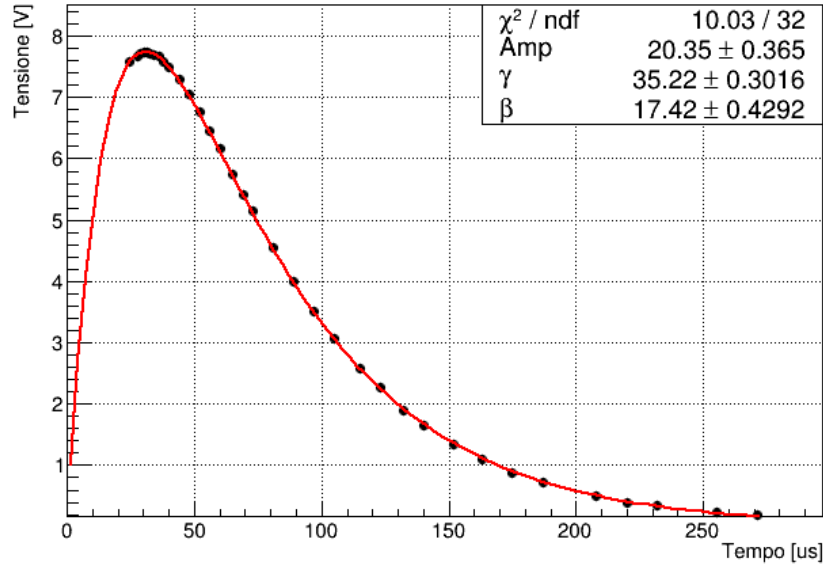


Figura 7: Dati presi per smorzamento critico fittati con sovrasmorzamento

Anche il valore del  $\chi^2$  conferma che la nostra ipotesi sull'errore sia giusta, e che la distribuzione dei valori da noi osservati sia di regime sovrasmorzato e non di smorzamento critico. In questo caso, considerando tutte le resistenze in gioco si ottiene  $R_{eq} = 790\Omega$  e con questo valore

$$\gamma_{atteso} = (33080 \pm 90) s^{-1}$$

Mentre

$$\gamma_{fit} = (35200 \pm 300) s^{-1}$$

Il t-test rivela che i valori risultano ancora non compatibili:

$$\frac{\gamma_{fit} - \gamma_{atteso}}{\sqrt{(\sigma_{atteso})^2 + (\sigma_{fit})^2}} = 6.76$$

Purtoppo, come per la precedente presa dati, si presenta il problema dell'incompatibilità tra i parametri del fit e i corrispettivi valori attesi.

### 2.3.3 Regime sottosmorzato

Per questo regime l'interpolazione dei dati è stata fatta con la funzione

$$V_R(t) = Ae^{-\gamma t} \sin \beta t \quad (3)$$

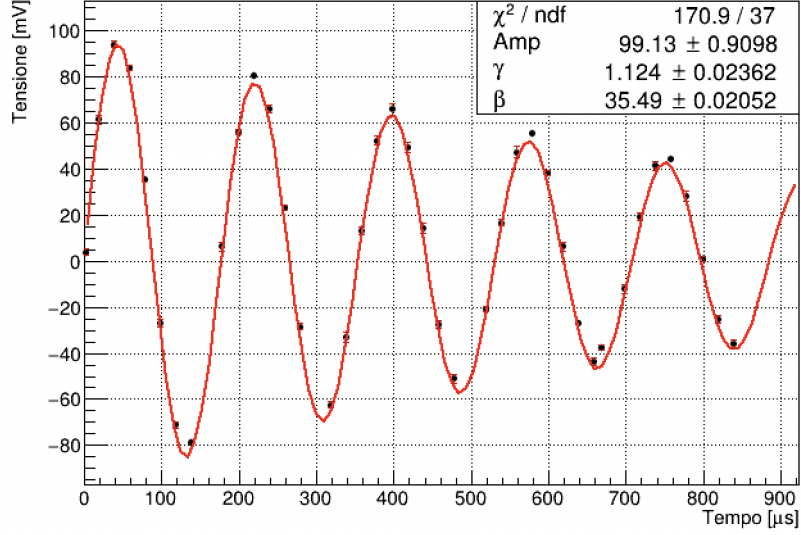


Figura 8:  $V_R$  in regime di sottosmorzamento

Il valore del  $\chi^2$  sembra mostrare un pessimo adattamento del modello ai dati, ma la distribuzione dei punti sul grafico suggerisce invece che la forma funzionale (3) sia corretta. Abbiamo scartato l'ipotesi che il modello fosse sbagliato. Una possibile giustificazione di questo comportamento può essere la presenza di errori parassiti connessi con l'operazione di misura e che potrebbero aver portato a degli outliers. Osserviamo, in effetti, che la maggior parte dei valori viene toccato dalla funzione interpolante, mentre alcuni sembrano essere molto distanti. Abbiamo allora provato a trattare questi dati come outliers e tentare un nuovo fit. Il risultato è il seguente:

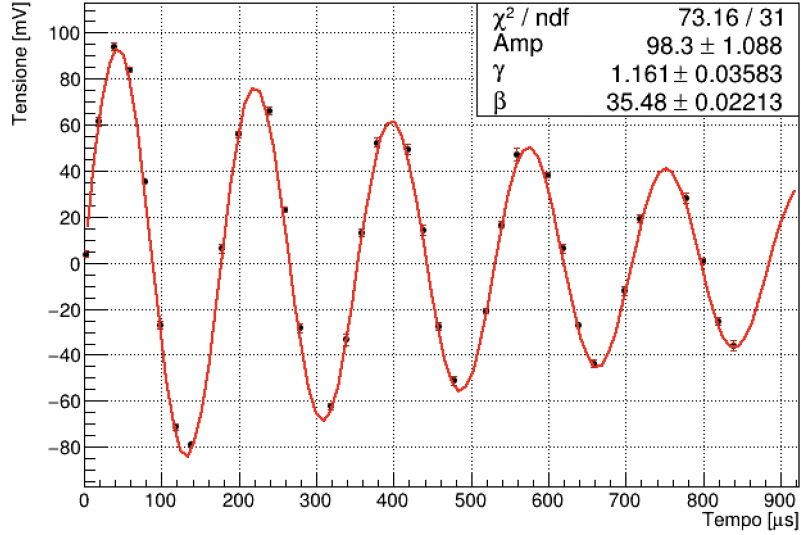


Figura 9: Nuovo fit per regime di sottosmorzamento scartando gli ipotetici outliers

La bontà dell'adattamento è sicuramente aumentata, ma è ancora lontana dal range di accettazione. Abbiamo allora avanzato un'altra ipotesi.

La causa del fallimento del test del  $\chi^2$  potrebbe anche essere attribuita ad un'erronea valutazione degli errori. Sull'asse dei tempi è stato scelto di utilizzare la sensibilità del cursore, che comunque risulta trascurabile rispetto alle scale in gioco; per quanto riguarda le tensioni, il valore letto oscillava in un intervallo variabile e quindi è stata scelta la sua semiampiezza come incertezza sul valore centrale.

Ad ogni modo, utilizzando i parametri forniti da *ROOT* è stato possibile stimare l'induttanza incognita utilizzata nel circuito:

$$L = \frac{R}{2\gamma} = 142 \text{ mH}$$

Non è possibile verificare la compatibilità con valori attesi di  $\gamma$  e  $\omega_0^2$  non conoscendo il valore vero dell'induttanza.

## 2.4 Conclusione

In tutti i regimi di RLC sono evidenti errori che non permettono una corretta analisi dei dati. Per quanto ci è stato possibile abbiamo tentato di motivare, mentre per quanto riguarda quello che non siamo riusciti a interpretare concludiamo che la presa dati non è stata effettuata adeguatamente sul circuito in considerazione.

Nonostante il buon adattamento dei dati nel regime di sovrasmorzamento, il valore dei parametri ottenuto dal fit è risultato incompatibile con quelli attesi.

### 3 Appedice: Tabelle

#### 3.1 Parte Prima

t(s)	V (mV)	$\sigma_s$	$\sigma_v$
1	-1680	1	20
41	-1320	1	20
80.8	-960	1	20
120.8	-640	1	20
160.8	-360	1	20
200.8	-80	1	20
240.8	119	1	20
280	319	1	20
320	479	1	20
360	639	1	20
400	759	1	20
440	879	1	20
480	959	1	20
520	1055	1	10
560	1130	1	10
600	1190	1	20
640	1230	1	20
680	1295	1	10
720	1330	1	10
760	1370	1	10
800	1410	1	10

Tabella 1: Raccolta dati di caduta del potenziale ai capi del condensatore

t( $\mu s$ )	V(mV)	$\sigma_x$	$\sigma_v$
0.64	2400	0.01	10
1.04	2160	0.01	10
1.44	1920	0.01	10
1.84	1720	0.01	10
2.24	1540	0.01	10
2.64	1380	0.01	10
3.04	1220	0.01	10
3.44	1100	0.01	10
3.84	980	0.01	10
4.24	880	0.01	10
4.64	780	0.01	10
5.04	700	0.01	10
5.44	640	0.01	10
5.84	560	0.01	10
6.24	520	0.01	10
6.64	460	0.01	10
7.04	400	0.01	10
7.44	360	0.01	10
7.84	320	0.01	10
8.24	300	0.01	10

Tabella 2: Raccolta delle cadute di potenziale ai capi dell'induttanza

### 3.2 Parte Seconda

$t(\mu s)$	$V(V)$	$\sigma_x$	$\sigma_v$
16	0.08	1	0.04
48	9.52	1	0.04
73	8.92	1	0.04
96	8.08	1	0.04
136	6.96	1	0.04
153	6.52	1	0.04
176	6	1	0.04
216	5.12	1	0.04
233	4.76	1	0.04
256	4.4	1	0.04
296	3.76	1	0.04
313	3.48	1	0.04
336	3.28	1	0.04
376	2.8	1	0.04
416	2.4	1	0.04
456	2.08	1	0.04
496	1.79	1	0.01
536	1.57	1	0.01
576	1.36	1	0.04
616	1.2	1	0.04
656	1.04	1	0.04
696	0.88	1	0.04
736	0.8	1	0.04
776	0.72	1	0.04

Tabella 3: Presa dati per il regime sovrasmorzato

$t(\mu s)$	$V(V)$	$\sigma_x$	$\sigma_v$
0.56	1.36	0.01	0.03
0.64	1.46	0.01	0.04
1.12	1.68	0.01	0.02
1.44	1.84	0.01	0.02
1.84	2.08	0.01	0.02
1.92	2.12	0.01	0.02
2.72	2.54	0.01	0.02
3.44	2.88	0.01	0.02
3.52	2.92	0.01	0.02
4.32	3.28	0.01	0.02
4.64	3.46	0.01	0.04
5.12	3.64	0.01	0.02
5.44	3.76	0.01	0.02
7.44	4.52	0.01	0.02
8.64	4.96	0.01	0.02
12.6	6.04	0.01	0.02
16.6	6.8	0.01	0.02
20.6	7.28	0.01	0.02
24.6	7.58	0.01	0.02
27.7	7.68	0.01	0.02
28.6	7.72	0.01	0.02
30.5	7.74	0.01	0.02
31.3	7.74	0.01	0.02
32.6	7.72	0.01	0.02
34	7.7	1	0.02
36	7.66	1	0.02
38	7.58	1	0.02
40	7.5	1	0.02
44	7.3	1	0.02
48	7.06	1	0.02
52	6.76	1	0.02
56	6.46	1	0.02
60	6.16	1	0.02
65.2	5.74	0.1	0.02
69.2	5.42	0.1	0.02
73.2	5.14	0.1	0.02
81.2	4.54	0.1	0.02
89.2	4	0.1	0.02
97.2	3.5	0.1	0.02
105	3.06	1	0.02
115	2.58	1	0.02
123	2.26	1	0.02
132	1.9	1	0.02
140	1.66	1	0.02
152	1.34	1	0.02
163	1.1	1	0.02
175	0.88	1	0.02
187	0.72	1	0.02
208	0.5	1	0.02
220	0.4	1	0.02
232	0.34	1	0.02
255	0.24	1	0.02
271	0.2	1	0.02

Tabella 4: Presa dati regime di smorzamento critico

$t(\mu s)$	$V(mV)$	$\sigma_x$	$\sigma_v$
1	4	0.1	1.2
18.4	61.6	0.1	2
38.4	94.2	0.1	1.4
58.4	84	0.1	1.2
78.4	35.4	0.1	0.7
98.4	-26.7	0.1	1.6
118	-71.1	1	1.2
138	-78.7	1	0.8
178	6.4	1	2
198	56	1	1.2
218	80.4	1	0.8
238	66	1	1.6
258	23.15	1	1.15
278	-28.3	1	1.6
318	-62.3	1	1.2
338	-33.1	1	2.4
358	13.1	1	1.7
378	52.5	1	1.7
398	66	1	2.4
418	49.55	1	2.05
438	14.4	1	2
458	-27.5	1	1.6
478	-51.1	1	2
518	-20.7	1	1.2
538	16.8	1	1.2
558	47.4	1	2.6
578	55.6	1	0.8
598	38.3	1	1.2
618	6.4	1	2
638	-26.7	1	0.8
658	-43.5	1	1.6
668	-37.55	1	1.25
698	-11.95	1	1.95
718	19.45	1	1.75
738	41.5	1	2
758	44.3	1	0.8
778	28.3	1	2.4
798	0.85	1	1.15
818	-25.1	1	1.6
838	-35.9	1	2

Tabella 5: Presa dati regime di sottosmorzato