

Esercitazione numerica sulla trasformata di Fourier

Luca Arnaboldi ^{*}
Veronica Sacchi [†]

5 maggio 2019

Sommario

In questo documento ci proponiamo di presentare un'analisi dei dati raccolti durante alcune delle esperienze svolte durante il corso di Laboratorio 2. In particolare svolgeremo la trasformata di Fourier discreta di alcuni segnali campionati con Arduino, servendoci del pacchetto `numpy.fft`.

La repository del documento, con tutto il materiale utilizzato può essere visualizzata al seguente link: <https://gitlab.com/l.arnaboldi/secondo-esercizio-lab2>.

1 Forme d'onda

1.1 Onde sinusoidali

In questa prima sezione presentiamo la trasformata di Fourier di diverse forme d'onda, generate tramite il generatore di funzioni e acquisite con Arduino.

La Figura 1 mostra una sinusoidale di frequenza $(112.00 \pm 0.05)\text{Hz}$, di cui sono stati acquisiti solo 256 punti, con un conseguente intervallo temporale campionato piuttosto ridotto, da cui consegue una risoluzione in frequenza molto limitata (si noti infatti il profilo “liscio” della trasformata corrispondente). Possiamo notare come, a parte la componente in $f = 0$, che rappresenta l'offset del segnale, si ha un picco proprio in corrispondenza di $\sim 100\text{Hz}$: teoricamente, se l'onda generata fosse una sinusoide perfetta si dovrebbe avere una singolarità di tipo delta in questo punto, effetto che però non si osserva, oltre al fatto che si hanno valori non nulli per diverse altre frequenze. Il grafico in scala logaritmica permette di apprezzare ancora meglio per quale frequenza si ottiene il picco della trasformata.

Le discrepanze con la teoria sono dovute al fatto che l'onda generata non è un'onda sinusoidale perfetta poichè il generatore è un generatore reale e anche l'acquisizione risente di errori strumentali e rumori o fluttuazioni dell'intervallo di campionamento, imperfezioni che possono rendere conto delle altre armoniche presenti o della finitezza del picco prima osservato.

Sempre nella Figura 1 è presente anche il grafico della trasformata in scala logaritmica per la frequenza: da questo si può vedere come il ridotto numero di punti produca un intervallo di campionamento sulla frequenza troppo ridotto. Infatti il picco è “spigoloso”, sintomo che in quella zona ci sono pochi punti da graficare.

Queste osservazioni si trovano riconfermate nel grafico in Figura 2, che mostra un'acquisizione di 2048 punti di un'onda sinusoidale di frequenza $f_2 = (161.25 \pm 0.05)\text{Hz}$, che ha una risoluzione in frequenza molto più elevata. Come prima si può osservare un picco all'incirca in corrispondenza

^{*}e-mail: luca.arnaboldi@arn4.it, matricola: 565650

[†]e-mail: ver22albireo@gmail.com, matricola: 566308

di f_2 molto più elevato degli altri anche se l'altezza risulta finita, in contrasto con la teoria, per via delle limitazioni reali messe in luce nel paragrafo precedente.

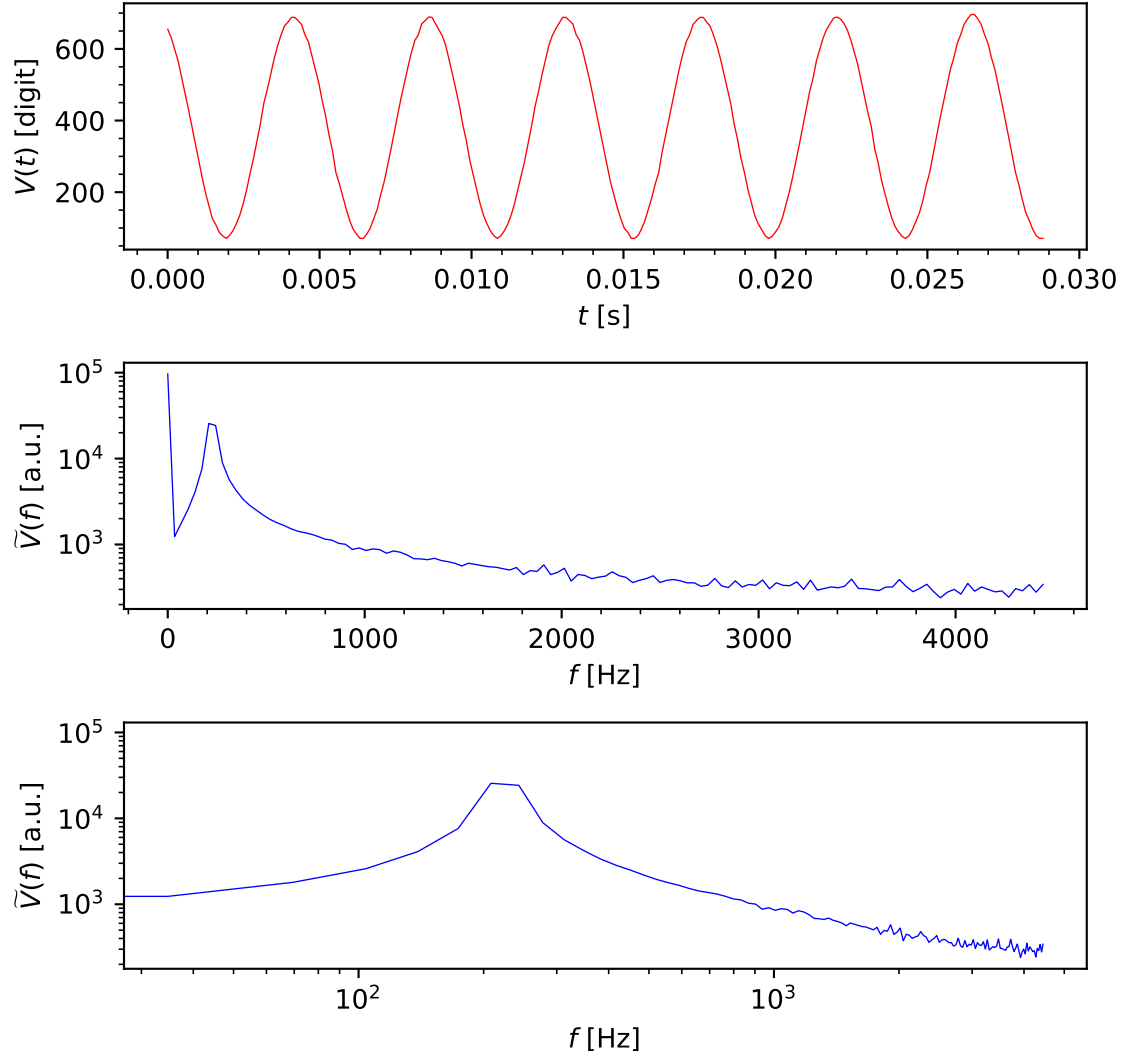


Figura 1: trasformata di un'onda sinusoidale di frequenza $(112.00 \pm 0.05)\text{Hz}$, della quale sono stati campionati 256 punti. Il primo grafico presenta i punti campionati con le relative barre d'errore, mentre gli altri due mostrano la relativa trasformata, ottenuta tramite la trasformata discreta del set di dati operata dal pacchetto `numpy.fft`, il primo con una scala lineare, il secondo con una scala logaritmica in frequenza.

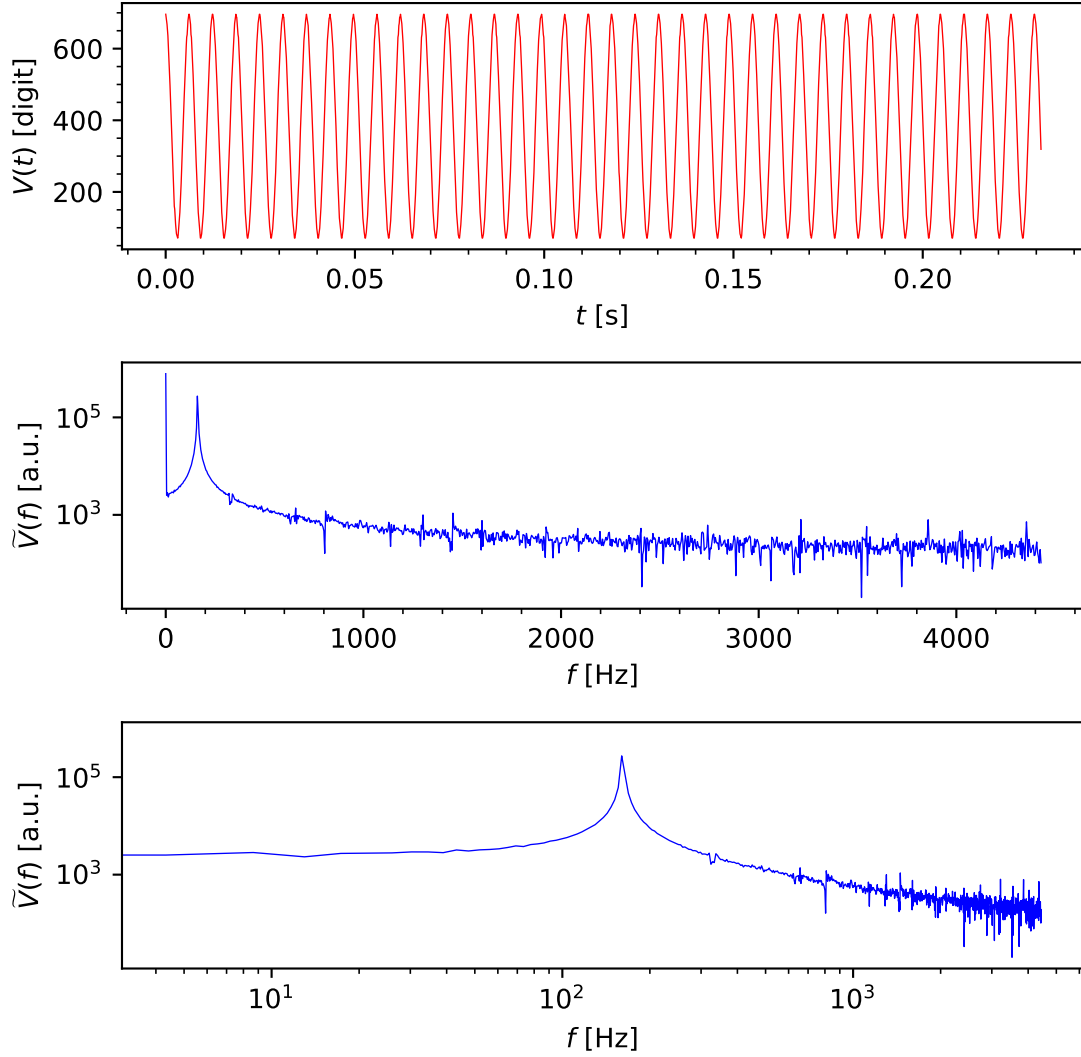


Figura 2: trasformata di un'onda sinusoidale di frequenza $(161.25 \pm 0.05)\text{Hz}$ con 2048 campionamenti. Anche in questo caso nel primo grafico vengono rappresentati i punti acquisiti con le relative barre d'errore e negli altri due si ha la relativa trasformata, con una scala sulle frequenze lineare nel primo caso e logaritmica nel secondo.

1.2 Onde triangolari

Le Figure 3 e 4 mostrano invece due onde triangolari, rispettivamente a frequenza $(98.57 \pm 0.05)\text{Hz}$ e $(311.12 \pm 0.05)\text{Hz}$ di cui sono stati acquisiti solo 256 punti, il che, come prima, comporta una bassa risoluzione in frequenza della trasformata. Notiamo come, oltre ad $f = 0$, siano presenti picchi, anche se la bassa risoluzione in frequenza li rende difficili da distinguere dal rumore sottostante. In teoria, ricordando i calcoli dei coefficienti di Fourier di un'onda triangolare, ci aspetteremmo dei picchi solo in corrispondenza di armoniche dispari (multipli dispari della re-

quenza dell'onda) e con un andamento $\sim \frac{1}{n^2}$ in altezza del picco (dove n indicizza l'armonica e dunque deve essere dispari, visto che abbiamo detto che il picco deve avere altezza nulla su quelle pari).

Proseguendo, la Figura 5 mostra sempre una triangolare di frequenza $f_5 = (237.14 \pm 0.05)\text{Hz}$ di cui però sono stati acquisiti ben 2048 punti, che comporta una risoluzione in frequenza nettamente più alta, come si può immediatamente apprezzare dal profilo molto più frastagliato della relativa trasformata di Fourier rispetto alle figure precedenti. In questo caso risulta molto più facile distinguere quindi le armoniche principali di quest'onda dal rumore di fondo, e possiamo notare come l'andamento atteso per l'altezza dei picchi sia qualitativamente rispecchiato dai dati sperimentali, oltre al fatto che si osservano dei picchi chiaramente distinti dal rumore di fondo in corrispondenza dei multipli dispari di f_5 , come ci si attendeva dallo sviluppo dei coefficienti di Fourier di un'onda triangolare.

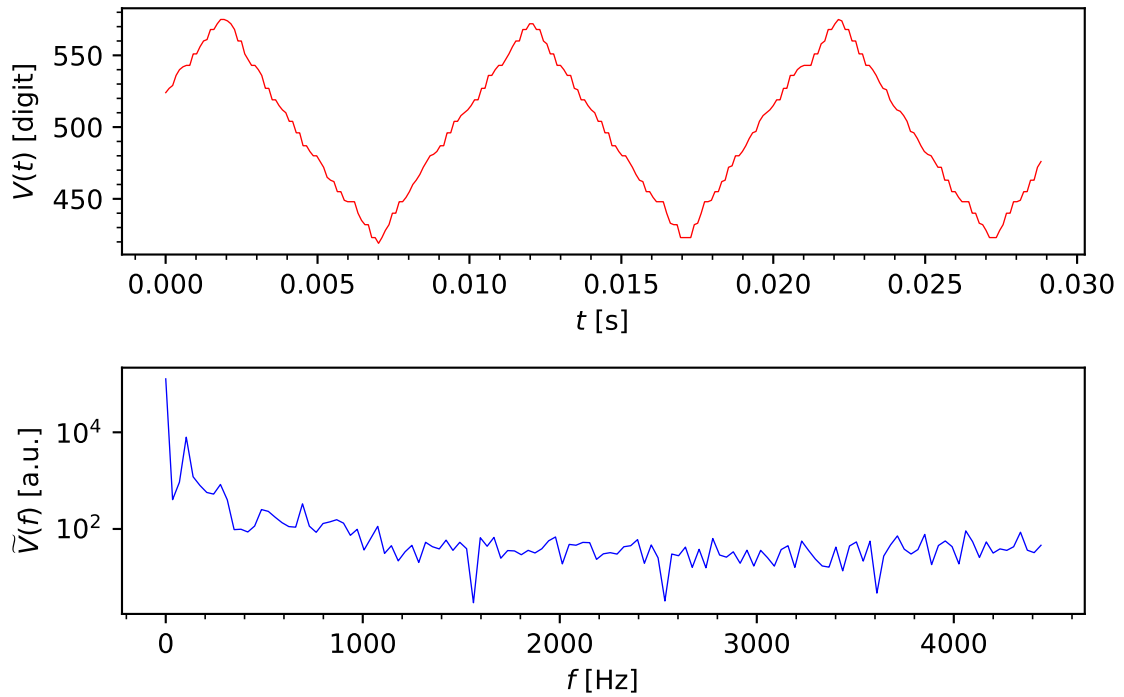


Figura 3: trasformata di un'onda triangolare di frequenza $(98.57 \pm 0.05)\text{Hz}$ il cui segnale é ricostruito attraverso 256 campionamenti. Si noti il profilo della trasformata discreta relativa, rappresentata nel secondo grafico, il cui andamento risulta assai poco leggibile per via della bassa risoluzione in frequenza, dovuta al ridotto numero di campionamenti effettuati.

1.3 Onda quadra

La Figura 6 mostra un'onda quadra di frequenza $(329.67 \pm 0.05)\text{Hz}$ di cui sono stati campionati 2048 punti. Data la lunga acquisizione il grafico dell'onda stessa risulta piuttosto illeggibile ma il grafico della trasformata di Fourier é molto risolto in frequenza ed é possibile apprezzare

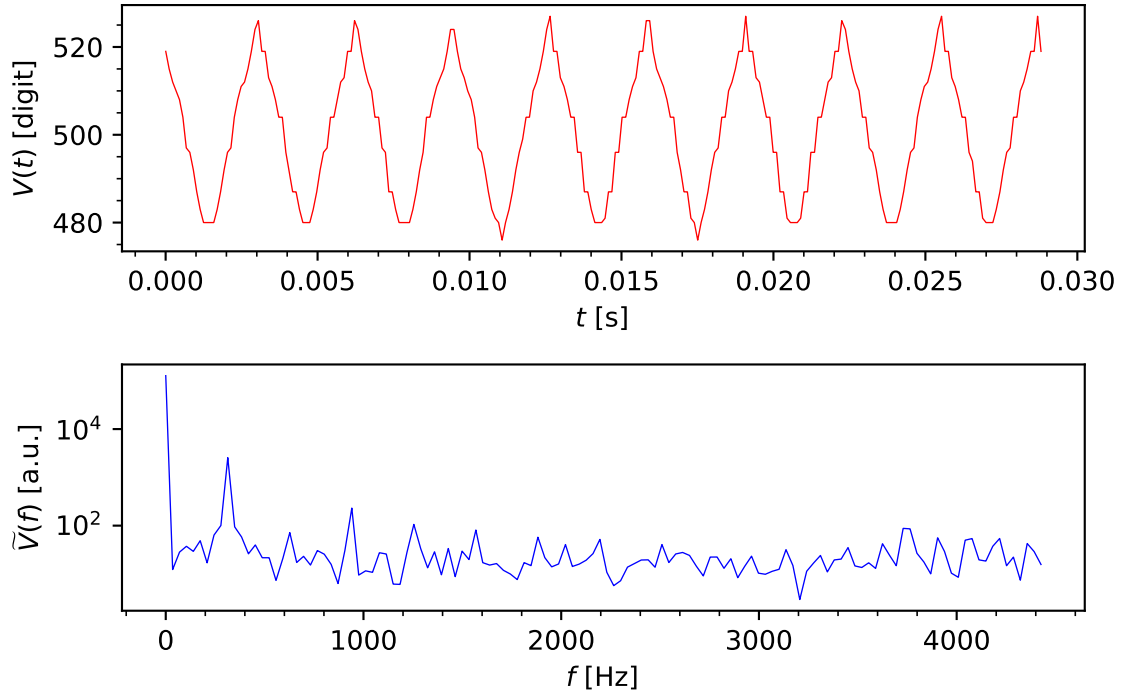


Figura 4: trasformata di un'onda triangolare di frequenza $(311.12 \pm 0.05)\text{Hz}$. Anche di questo segnale sono stati acquisiti 256 punti e anche qui, come nel grafico precedente si ottiene una trasformata discreta assai poco leggibile.

facilmente sia nello spettro in scala lineare che in quello in scala logaritmica la presenza di picchi in corrispondenza di multipli dispari della frequenza del segnale, nonché scorgere un andamento decrescente dell'altezza dei picchi stessi, (anche se è difficile osservare che sia proporzionale a $\sim \frac{1}{n}$ come indicherebbe lo sviluppo in coefficienti di Fourier di un'onda quadra).

1.4 *Pinna di squalo*

La Figura 7 mostra un segnale con il tipico andamento a *pinna di squalo* ottenuta in uscita da un integratore, mandando in entrata un'onda quadra di frequenza $f_7 = (21.75 \pm 0.05)\text{Hz}$. Osserviamo che un integratore RC di questo tipo si comporta come un filtro passa basso (sotto le opportune ipotesi), quindi ci aspettiamo che i picchi dovuti alle armoniche caratteristiche della quadra (presenti solo sulle armoniche dispari, nulli per quelle pari) vengano progressivamente attenuati all'aumentare delle frequenze con un andamento $A(n) = \frac{1}{n} \frac{1}{\sqrt{1+(\frac{n \cdot f_T}{f_T})^2}}$ (il primo coefficiente è dovuto allo sviluppo in Fourier di un'onda quadra mentre il secondo è l'attenuazione subita dall'armonica corrispondente attraversando il filtro passa-basso). Notiamo dal grafico della trasformata che effettivamente l'ampiezza delle varie armoniche decresce progressivamente ma risulta difficile distinguere dal rumore di fondo i picchi che teoricamente si dovrebbero osservare sulle armoniche dispari, lettura che potrebbe essere notevolmente migliorata acquisendo più punti e potendo quindi ottenere una risoluzione in frequenza nettamente migliore. Un set di dati lungo (di 2048 punti) per la *pinna di squalo* è stato in realtà acquisito, ed è raffigurato in Figura 8, ma

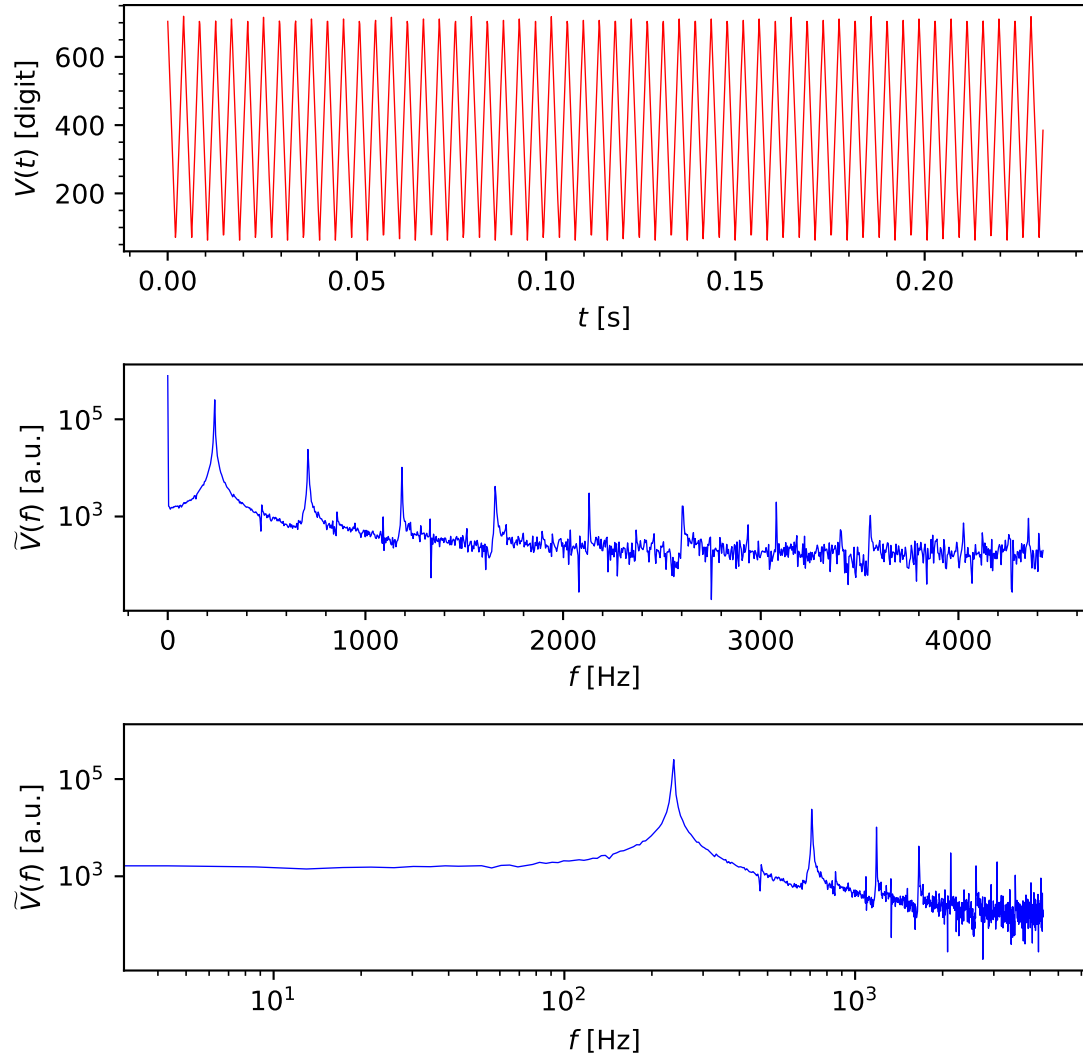


Figura 5: trasformata di un'onda triangolare di frequenza $(237.14 \pm 0.05)\text{Hz}$, di cui sono stati campionati 2048 punti. A differenza delle due immagini precedenti questa mostra come acquisendo un numero di punti maggiore la risoluzione in frequenza aumenti notevolmente, tanto che il profilo frastagliato della trasformata di questo segnale é assai ben rappresentativo dello sviluppo di un'onda triangolare, nonostante il rumore sottostante, visibile su quelle frequenze per cui ci si aspettava un coefficiente di Fourier nullo.

sfortunatamente anche lo spettro di questo segnale risulta molto inquinato dal rumore esterno, probabilmente perchè in questo caso si è scelta un'onda di frequenza $(53.11 \pm 0.05)\text{Hz}$, molto vicino alla frequenza di rete, e dunque non risulta possibile osservare chiaramente l'andamento teorico atteso nonostante l'alta risoluzione in frequenza.

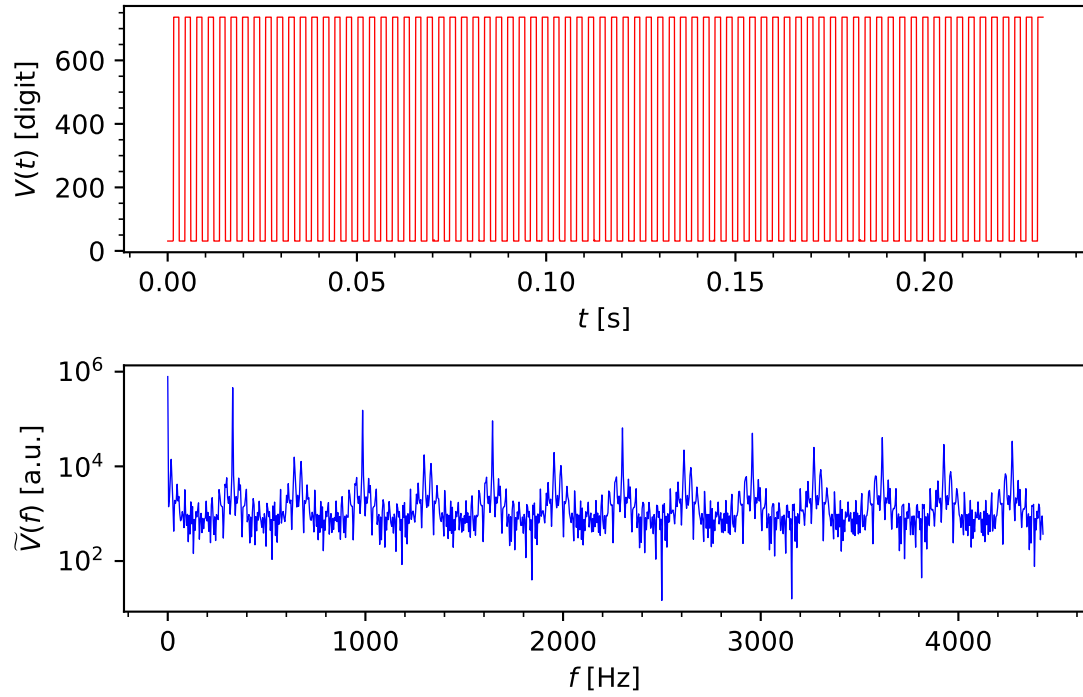


Figura 6: trasformata di un'onda quadra di frequenza $(329.67 \pm 0.05)\text{Hz}$ della quale sono stati acquisiti 2048 punti. Si può osservare come l'elevato numero di campionamenti eseguiti renda di difficile lettura la rappresentazione del segnale riportato nel primo riquadro, ma di contro dia una trasformata discreta molto ben risolta in frequenza, che potenzialmente potrebbe permettere di apprezzare più facilmente alcune proprietà caratterizzanti uno specifico segnale, talvolta molto più impliciti nella rappresentazione del segnale stesso.

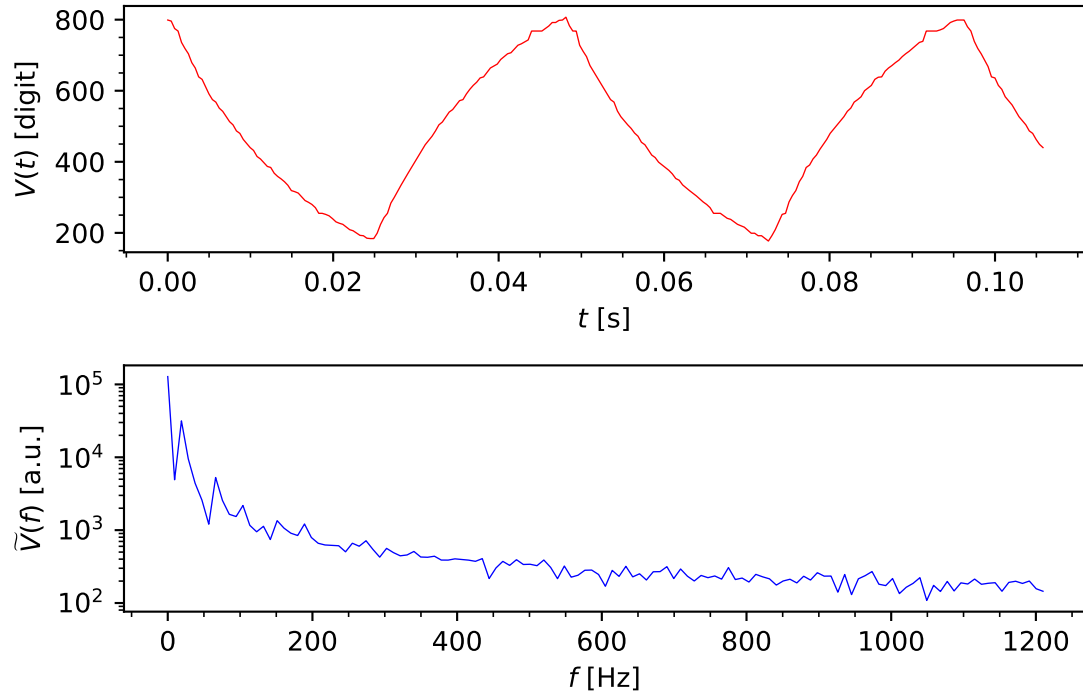


Figura 7: trasformata di un'onda a *pinna di squalo* di frequenza $(21.75 \pm 0.05)\text{Hz}$ di cui si sono effettuati 256 campionamenti. Il primo grafico rappresenta i punti acquisiti con le relative barre d'errore, mentre il secondo la sua trasformata di Fourier discreta. Notiamo come, nonostante il segnale sia ben definito attraverso i punti acquisti e risulti chiaramente leggibile il ridotto numero di campionamenti fornisce una trasformata di Fourier troppo poco risolta in frequenza, per cui non é possibile fare osservazioni significative su questo spettro.

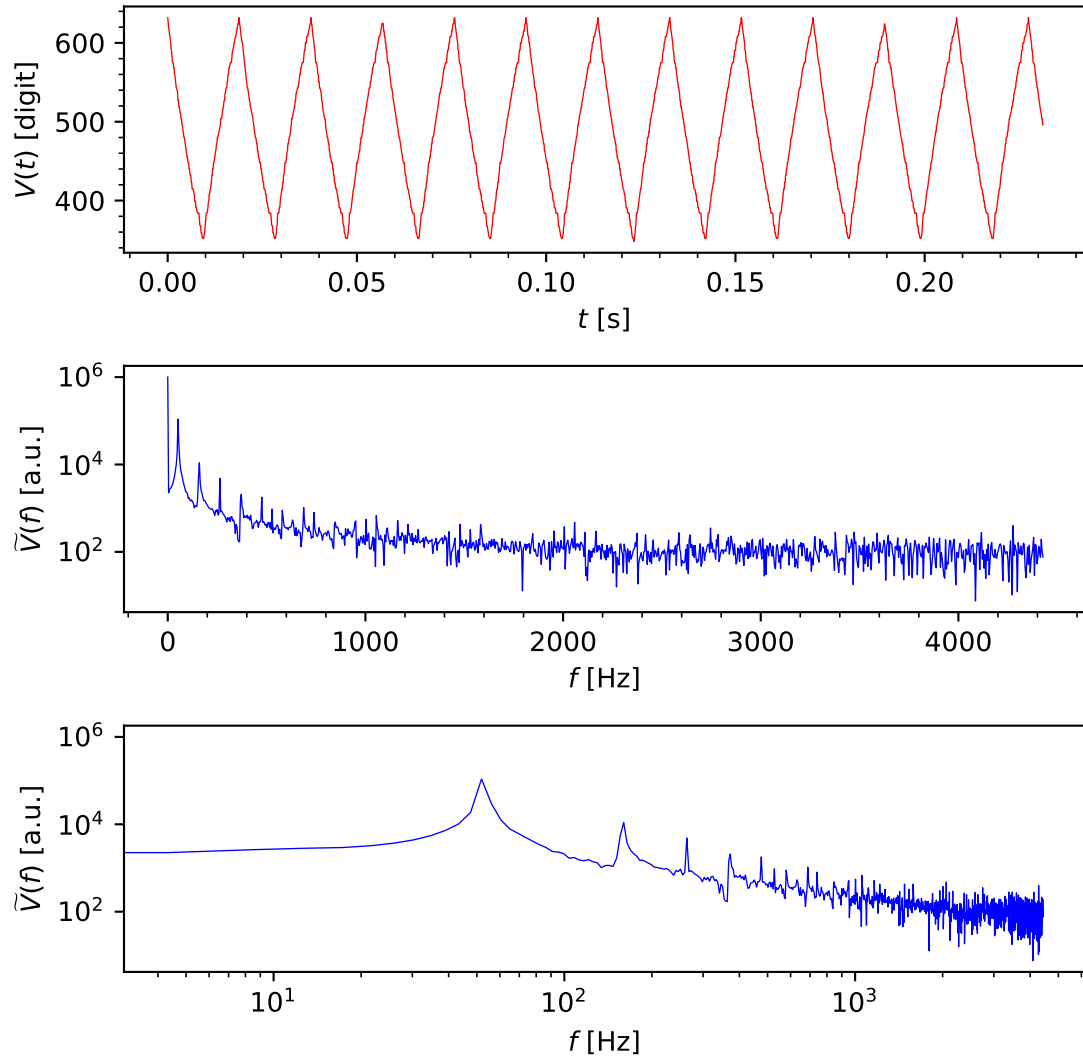


Figura 8: trasformata di un'onda a *pinna di squalo* di frequenza $(53.11 \pm 0.05)\text{Hz}$ di cui sono stati acquisiti 2048 punti. In questo caso l'elevato numero di periodi acquisiti (nonché la frequenza scelta) portano a una rappresentazione del segnale che potrebbe essere scambiato con un'onda triangolare, ipotesi che dovrebbe poter essere scartata dalla trasformata di Fourier. Tuttavia lo spettro di questo segnale, rappresentato nel secondo grafico, risulta molto inquinato dal rumore sottostante, che non permette di distinguere un'andamento chiaro dell'altezza dei picchi e di proporre osservazioni sufficientemente precise da permettere di distinguere tra le due forme, inconveniente probabilmente dovuto alla scelta di un segnale con una frequenza molto vicina alla frequenza di rete.

2 Oscillatore Smorzato

Passiamo ad analizzare le acquisizioni di segnali in uscita da oscillatori armonici smorzati costruiti con tre componenti, una resistiva, una capacitiva e una reattiva. In particolare si sono scelti un'induttanza di valore nominale $L = 0.5 \text{ H}$ e come componente resistiva si aveva la resistenza interna dell'induttore; nelle didascalie sono riportati i valori della capacità di volta in volta utilizzata, oltre al tempo effettivo di campionamento (ricavato da una media sul set di dati acquisito), da cui è possibile ricavare l'ampiezza dello spettro di frequenze. Osserviamo che, come ci aspettiamo, il tempo effettivo di campionamento sovrastima sistematicamente il passo nominale scelto, perchè oltre alle fluttuazioni statistiche di questo intervallo, bisogna tener conto del tempo di digitalizzazione di Arduino. Le Figure 9, 10, 11 e 12 mostrano i grafici di quattro segnali dati dall'oscillatore smorzato per due diverse scelte della componente capacitiva, di cui sono stati campionati sempre 2048 punti ma in per tutte le acquisizioni alcuni sono stati scartati poichè considerati poco indicativi, in quanto il segnale risultava eccessivamente smorzato perchè Arduino ne potesse apprezzare le variazioni; questa scelta si traduce naturalmente in una perdita di risoluzione in frequenza, tuttavia considerando dati che potrebbero non descrivere accuratamente il sistema studiato l'aumento di risoluzione derivante sarebbe solo fittizio, da cui segue la scelta operata. Il numero di punti utilizzati è stato annotato anch'esso nella descrizione delle figure, e in relazione ad essi si può osservare come la trasformata abbia un profilo più o meno frastagliato. Per quanto riguarda lo spettro in frequenza dato dalla trasformata di Fourier di questo segnale ci aspettiamo un picco in corrispondenza della frequenza di oscillazione, che sotto le ipotesi di sotto smorzamento nelle quali abbiamo lavorato, dovrebbe essere ben rappresentata dal valore dato da:

$$\omega \simeq \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

da cui possiamo stimare la frequenza con $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$. Questo valore è stato anch'esso riportato nelle didascalie di ogni figura per permettere una lettura più agevole dei grafici. Osserviamo che effettivamente, oltre al valore in $f = 0$ che rappresenta solo il *bias* del segnale, e dunque poco descrittivo - nel nostro caso - del sistema che studiamo, si ha effettivamente un picco in corrispondenza della frequenza di risonanza f_0 , che non diverge per via dello smorzamento e che dovrebbe avere una larghezza tanto minore quanto più alto è il fattore di qualità dell'oscillatore:

$$Qf = 2\pi \frac{E_{stored}}{E_{lostpercycle}} = \frac{\omega\tau}{2}$$

dove τ è il tempo di smorzamento definito da $\tau = \frac{R}{L}$. Osserviamo come nel nostro caso τ sia rimasta approssimativamente costante per tutte queste acquisizioni (non esattamente perchè la resistenza interna dell'induttore dipende dalla frequenza, ma noi trascuriamo questo effetto), dunque semplicemente si dovrebbe osservare una diminuzione della larghezza del picco all'aumentare della frequenza (e quindi al diminuire di C), come effettivamente si riesce ad apprezzare. Infine anche il passo di campionamento variabile tra un'acquisizione e un'altra permette di esplorare uno spettro di frequenze più o meno ampio (maggiore è il passo di campionamento minore sarà f_{max} e quindi più stretto lo spettro), ma questo viene ad incidere nuovamente solo sulla risoluzione in frequenza, senza permetterci di apprezzare altri effetti oltre al picco prima discusso e il rumore statistico di cui risente l'acquisizione.

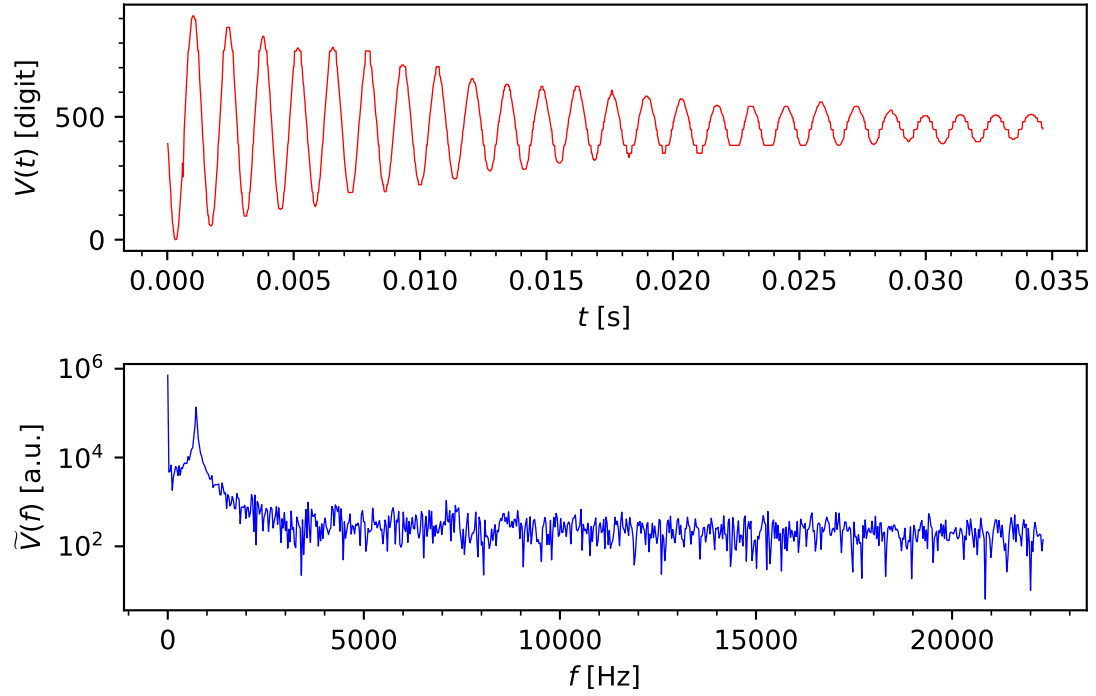


Figura 9: LA figura mostra lo studio di un oscillatore smorzato, ottenuto con una componente capacitiva di valore $C = 0.10 \mu\text{F}$, e dunque frequenza caratteristica $f_0 = 0.7 \text{ kHz}$. Il primo pannello mostra i 1547 punti campionati del segnale, con le relative barre d'errore, con passo di campionamento medio pari a $(22.4 \pm 2.1) \mu\text{s}$, che dà un range di frequenze esplorato fino a $f_{max} = (44 \pm 4) \text{ kHz}$; il secondo pannello invece mostra la relativa trasformata di Fourier discreta, con l'atteso picco in corrispondenza della frequenza di risonanza attesa e larghezza circa 500 Hz .

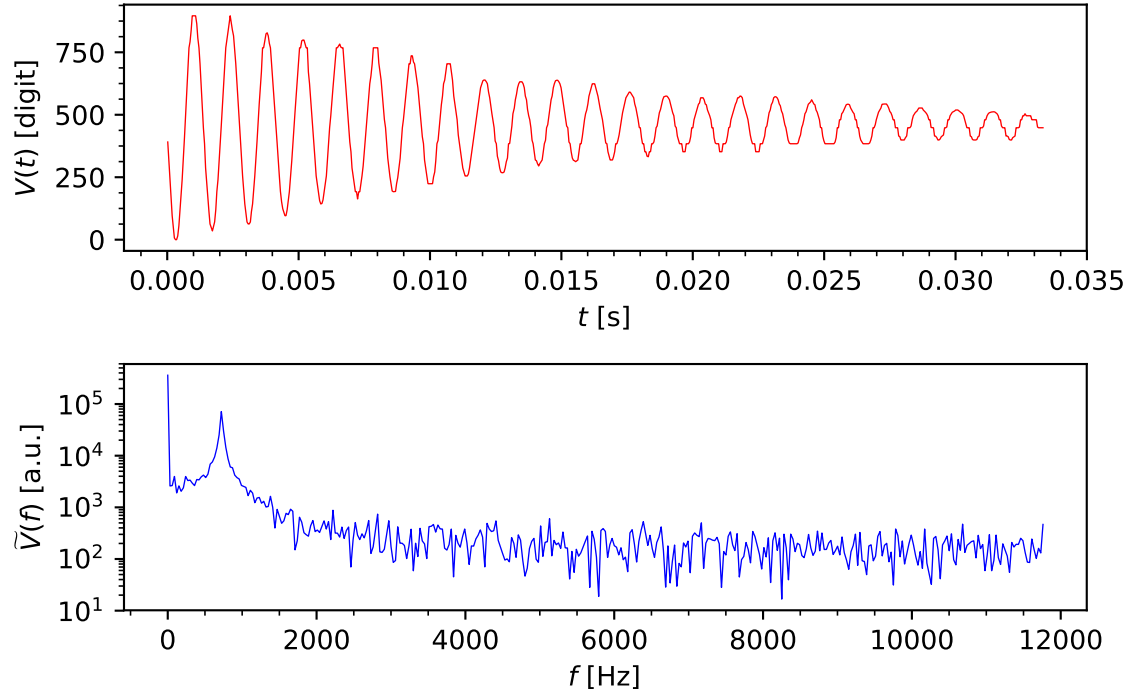


Figura 10: Il primo pannello mostra i primi 784 punti campionati, con relative barre d'errore, di un'oscillazione smorzata ottenuta attraverso mediante un condensatore di capacità $C = 0.10 \mu\text{F}$ e frequenza caratteristica $f_0 = 0.7 \text{ kHz}$. Il passo di campionamento medio risulta pari a $(42.5 \pm 2.3) \mu\text{s}$, dunque sono state esplorate le frequenze fino a $f_{max} = (23.5 \pm 1.3) \text{ kHz}$. Il secondo pannello mostra la trasformata di Fourier discreta di questo segnale, e come prima notiamo un picco in corrispondenza della frequenza di risonanza, di larghezza di nuovo pari a $\sim 500 \text{ Hz}$.

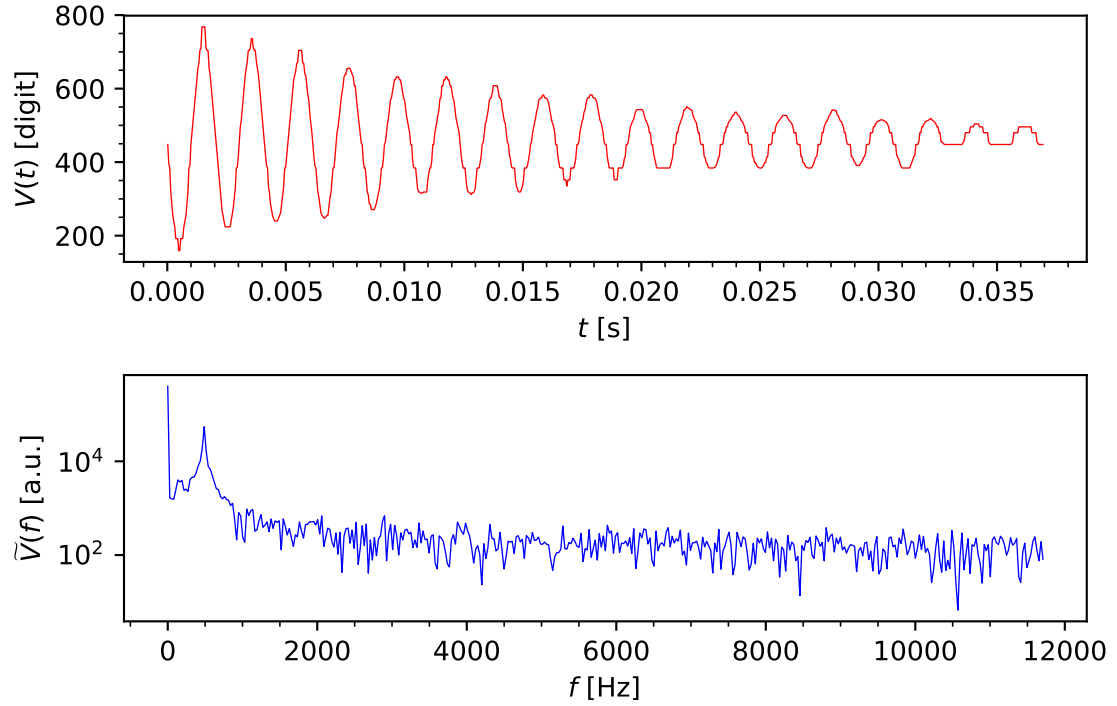


Figura 11: Quest'immagine analizza un'oscillatore smorzato caratterizzato da una capacità e una frequenza caratteristica pari rispettivamente a $C = 0.22 \mu\text{F}$ e $f_0 = 0.5 \text{ kHz}$, il cui segnale è stato campionato con 869 punti. Il passo di campionamento medio è risultato pari a $(42.5 \pm 2.3) \mu\text{s}$ da cui si è avuta una frequenza massima di $f_{max} = (23.5 \pm 1.3) \text{ kHz}$. Il secondo pannello come sempre mostra la trasformata di Fourier discreta e anche qui si osserva un picco in corrispondenza di f_0 ma il picco risulta più largo che nel caso precedente, e circa pari a 700 Hz.

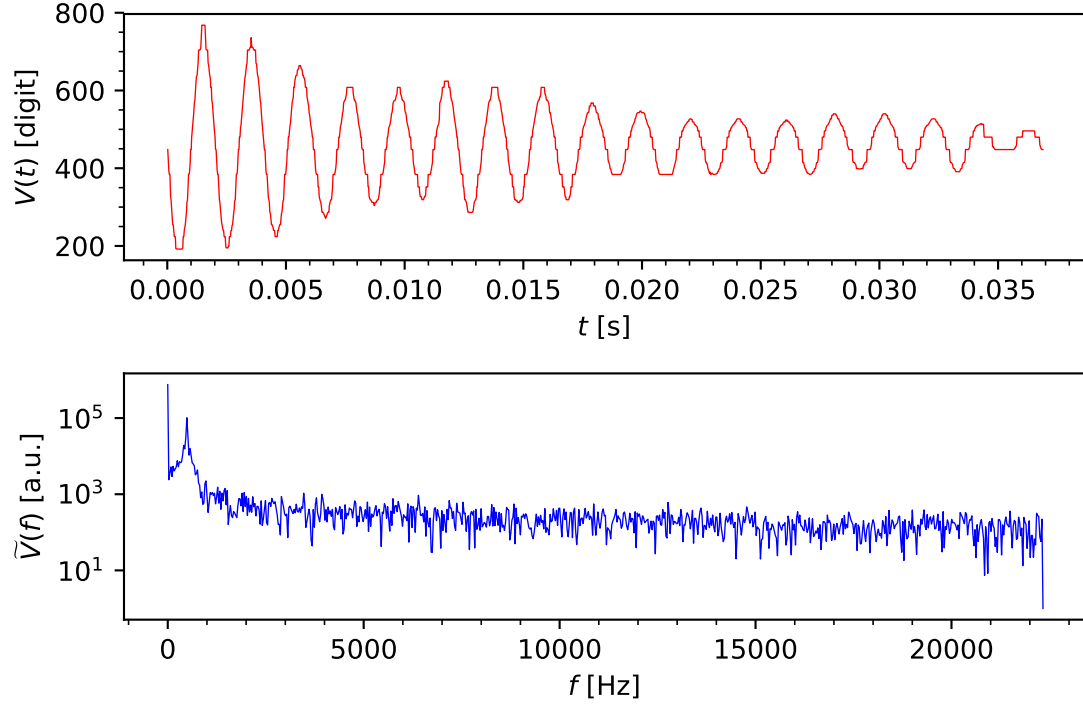


Figura 12: L'ultima figura di questa sezione riporta ancora un'oscillazione smorzata, molto simile alla precedente, sempre con capacità (nominale) e frequenza rispettivamente $C = 0.22 \mu\text{F}$ e $f_0 = 0.5 \text{ kHz}$. I punti considerati sono 1648, con un passo di campionamento medio di $(22.4 \pm 2.1) \mu\text{s}$ e una conseguente $f_{max} = (44 \pm 4) \text{ kHz}$. Come prima si osserva che il secondo pannello, recante la trasformata, mostra un picco in corrispondenza della risonanza, di larghezza circa 700 Hz, per poi decadere in rumore statistico per le frequenze maggiori.

3 Induttanze con conduttori nel core

In questa sezione si studiano i segnali di oscillatori smorzati come nella sezione precedente, dove però all'interno dell'induttore si sono posti differenti tipi di materiale conduttore. L'effetto che questo materiale produce è quello di diminuire il fattore di qualità dell'oscillatore dato che all'interno di essi si generano correnti parassite che tendono a schermare il flusso del campo magnetico. Nei termini della trasformata questo si traduce in uno spettro analogo a quello di un oscillatore smorzato come quelli analizzati nella sezione precedente, ma con il picco sulla frequenza caratteristica di larghezza crescente al decrescere del fattore di qualità.

Prendendo come riferimento il segnale con induttore vuoto, in Figura 13, si può osservare che nel caso dell'alluminio pieno (Figura 14) il picco è effettivamente più largo, e l'effetto è molto più accentuato nei casi di alluminio profilato e segato, nelle Figure 15 e 16 rispettivamente. Si potrebbe pensare inizialmente che questo risulti inatteso, visto che nel primo caso la quantità di alluminio è maggiore e gli effetti derivanti dalla sua presenza dovrebbero presentarsi in modo più marcato, ma ad una più attenta analisi emerge che in un blocchetto pieno di alluminio le correnti parassite sono molto meno sfavorite rispetto ai casi dell'alluminio profilato o segato, in cui si ha anche un'aumento della sezione efficace e quindi della resistenza; queste correnti conducono a un effetto di schermatura del campo e siccome gli effetti di risonanza sono legati al flusso concatenato alle spire dell'induttanza, si ha che gli effetti di allargamento del picco di risonanza vengono di fatto attenuati.

Per quanto riguardare il ferro invece si osserva un effetto simile a quello qui sopra discusso nel caso del ferro laminato, anche se in misura ancora più marcata (considerando anche che le correnti parassite sono fortemente sfavorite nel ferro laminato), in Figura 17, mentre il campionamento del ferro pieno riportato in Figura 18 risulta troppo esiguo per ricavarne uno spettro di frequenze da cui si possa desumere qualche informazione.

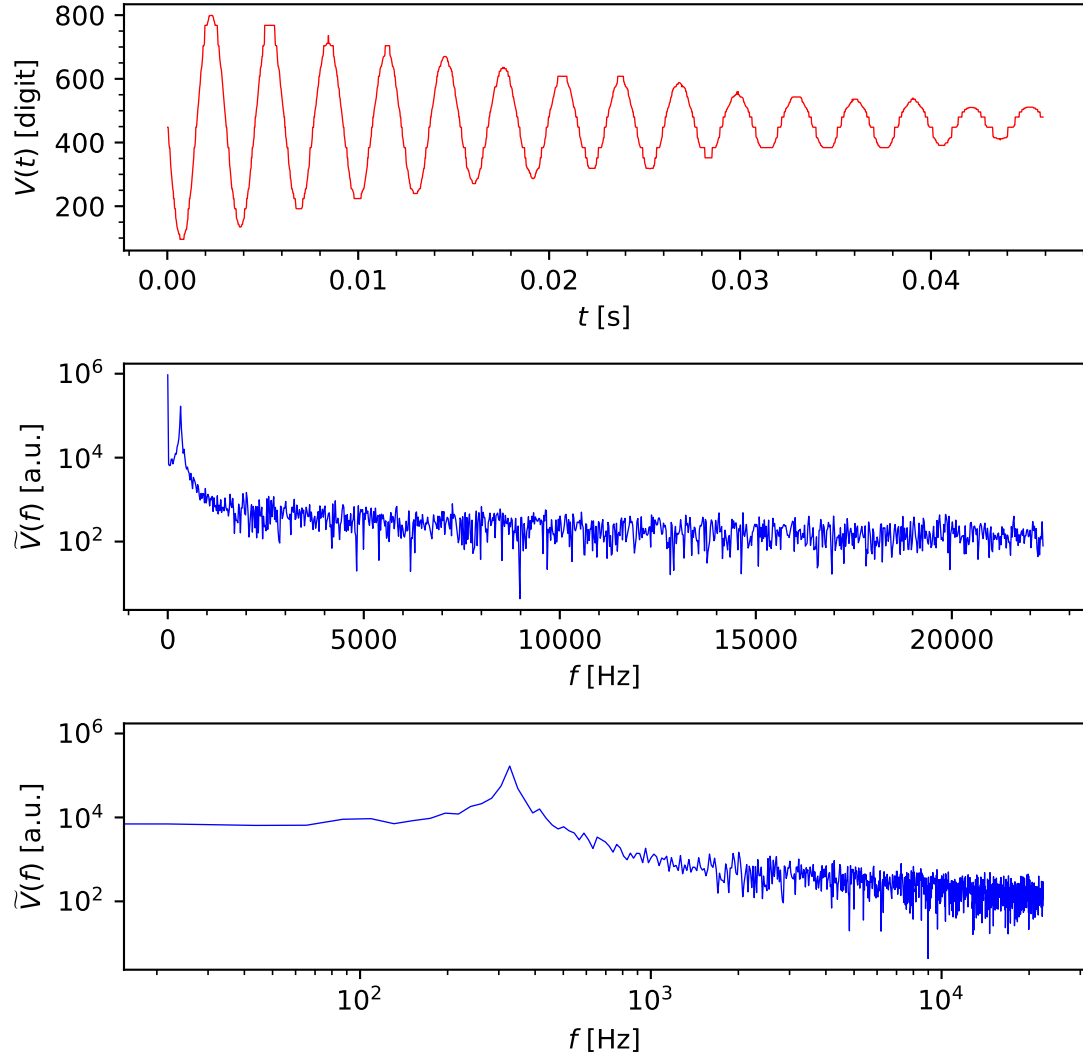


Figura 13: la figura mostra il segnale dato da un oscillatore smorzato esattamente come quelli studiati nella sezione precedente, nel cui core non é stato inserito nulla. I tre pannelli mostrano rispettivamente i punti del segnale campionato, con le relative barre d'errore, la relativa trasformata discreta con la scala lineare di frequenze e per ultima la trasformata del segnale con la scala logaritmica di frequenze, già ampiamente commentate nella sezione 2.

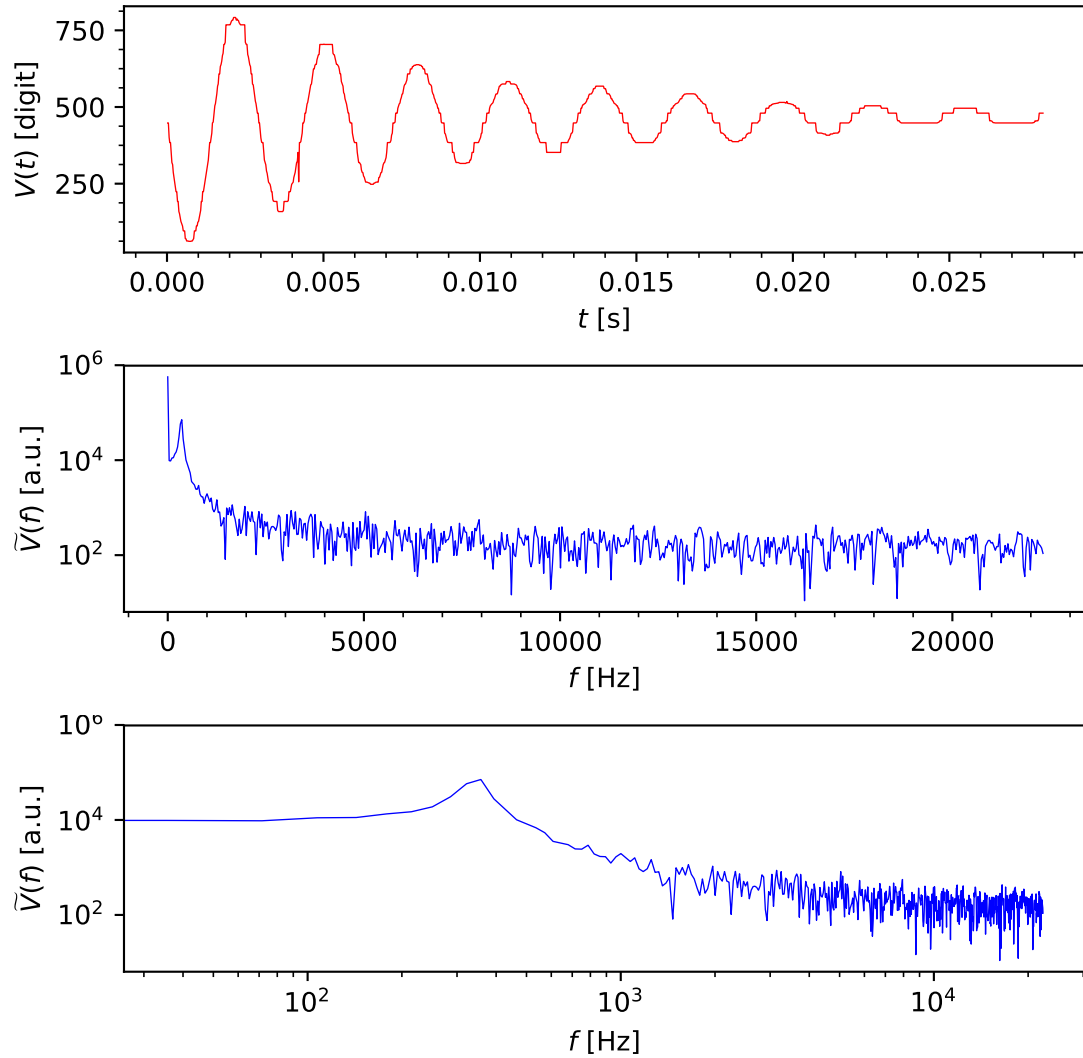


Figura 14: la figura mostra l'analisi del segnale in uscita da un oscillatore smorzato, dove però é stato infilato un blocchetto di alluminio pieno nel core dell'induttanza utilizzata. In analogia alla figura precedente vengono graficati, nell'ordine, il segnale campionato nel dominio del tempo, la trasformata di questo prima con le frequenze in scala lineare e poi con queste ultime in scala logaritmica.

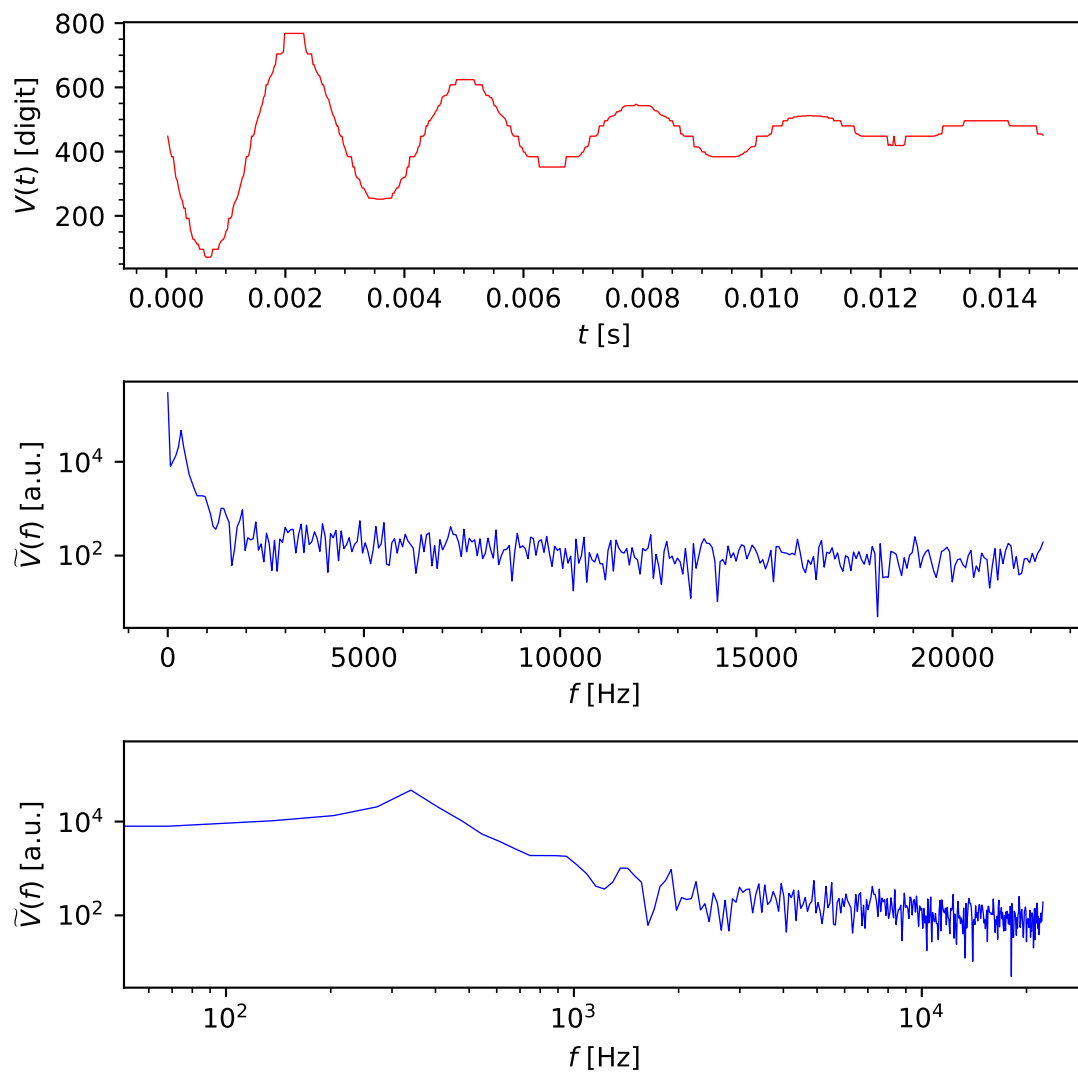


Figura 15: quest'immagine tratta il segnale dato un oscillatore smorzato costruito con un'induttanza nel cui core é stato infilato dell'alluminio profilato. Come prima viene grafica il segnale e la sua trasformata, che presenta un andamento simile a quello dell'oscillatore smorzato vuoto a meno della larghezza del picco.

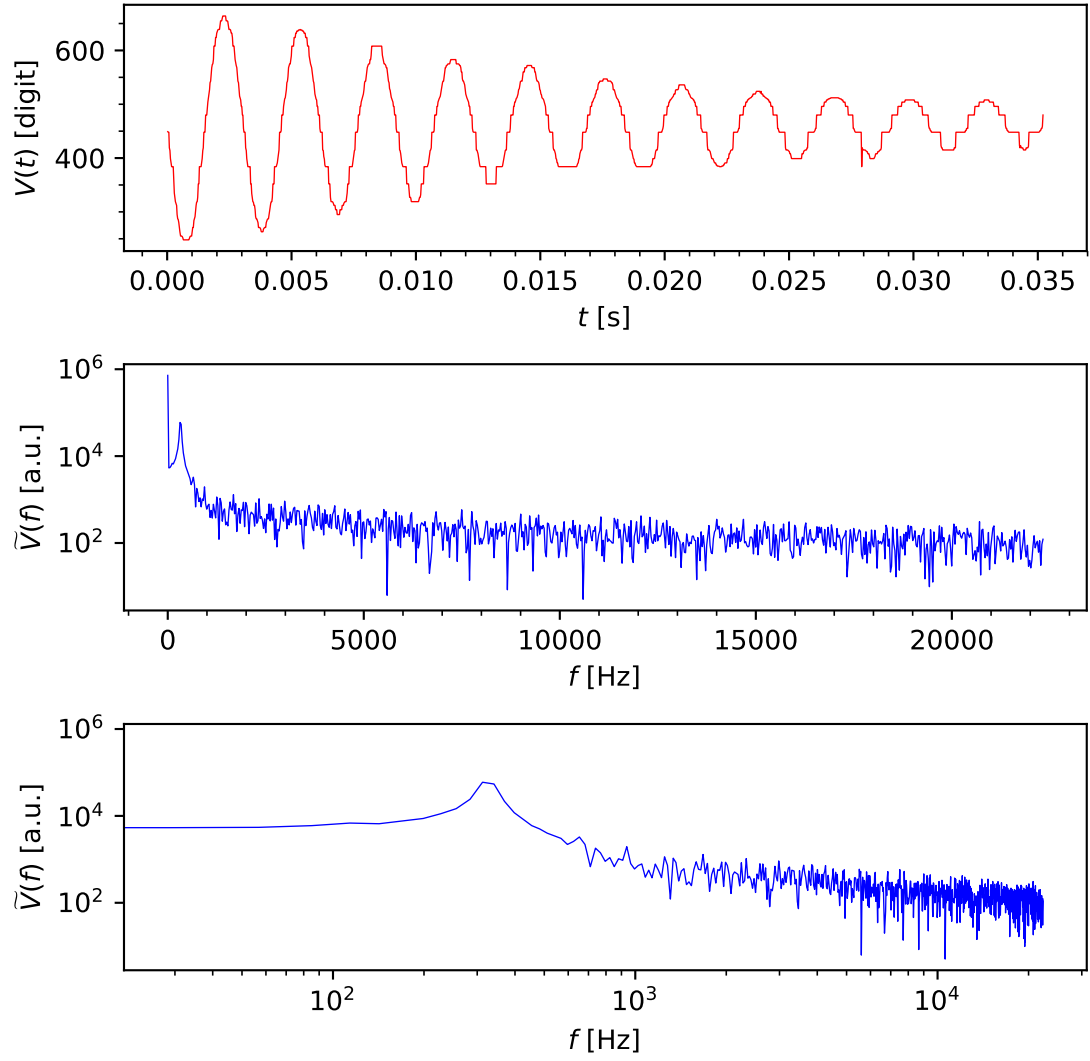


Figura 16: in questa immagine viene studiato un oscillatore smorzato dove l'induttanza che lo caratterizza presenta l'alluminio profilato segato nel core. Anche qui osserviamo il tipico picco di risonanza degli oscillatori smorzati dove però si evidenzia una larghezza maggiore rispetto al caso del core vuoto.

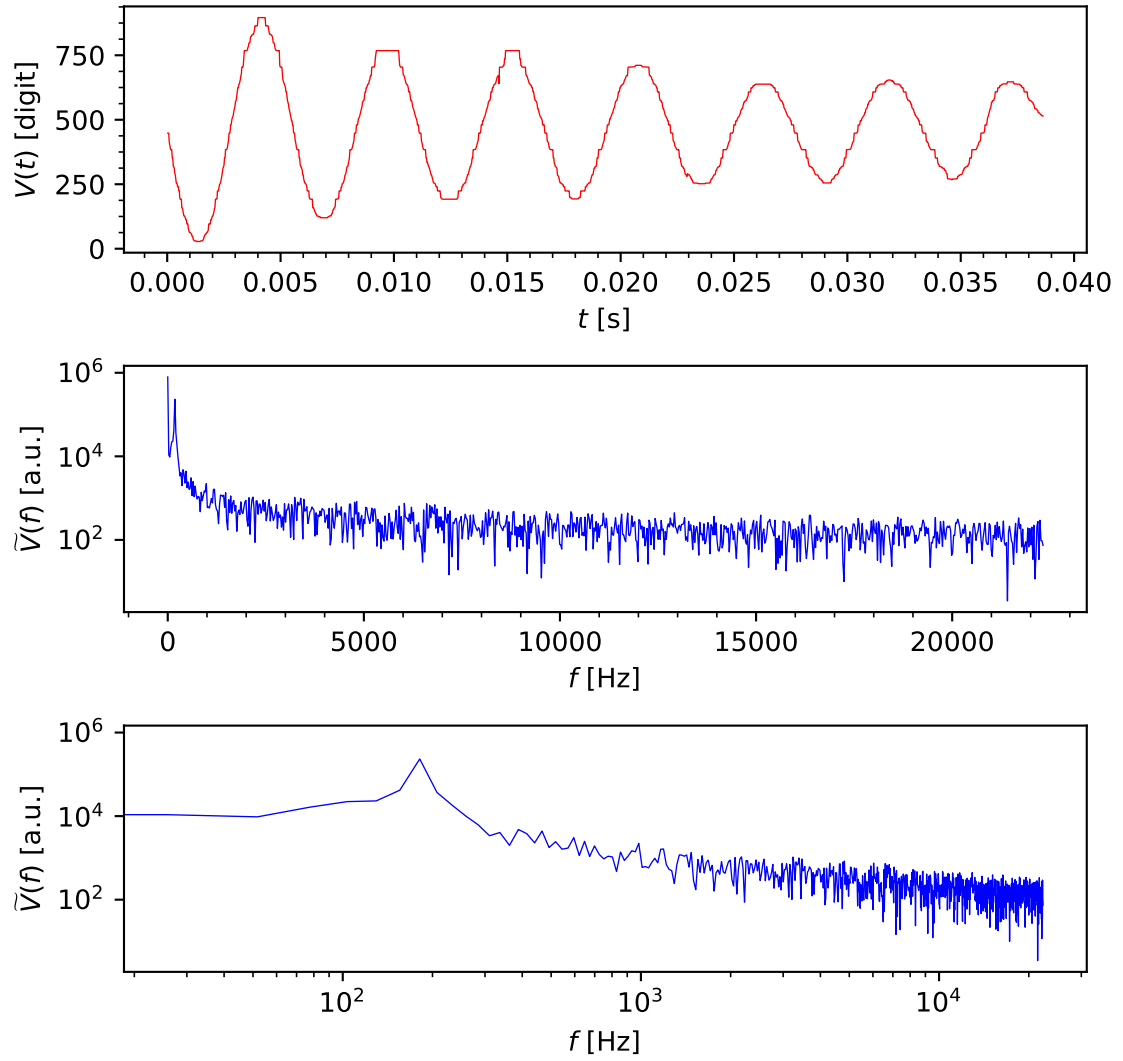


Figura 17: Quest'immagine presenta lo studio di un oscillatore con ferro laminato nel core dell'induttanza che lo costituisce. Come prima si hanno i tre pannelli con il segnale campionato 9e le relative barre d'errore) insieme alla trasformata riportata con la doppia scala in frequenza.

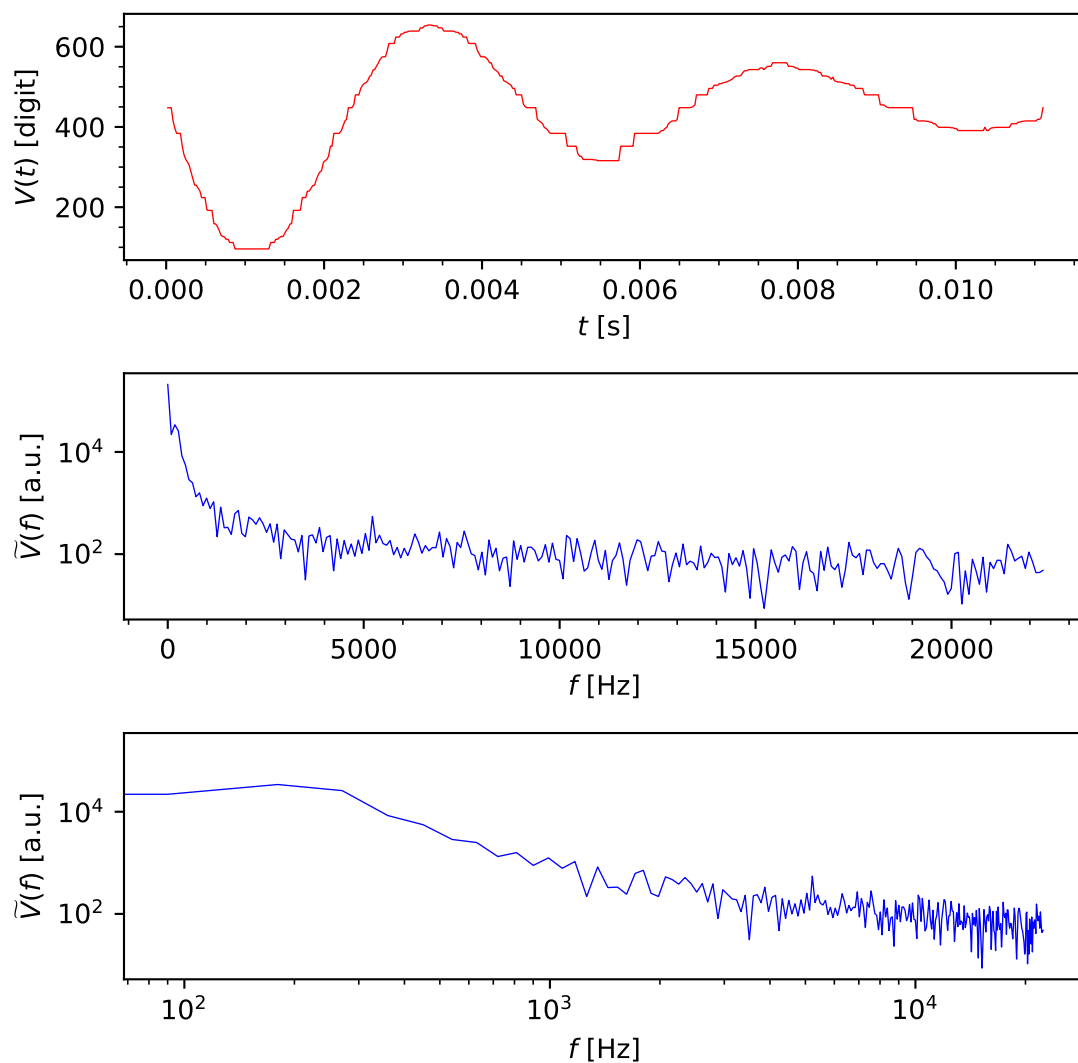


Figura 18: Infine presentiamo l'oscillatore smorzato con ferro pieno nel core della sua induttanza. Osserviamo che in questo caso lo smorzamento é talmente rapido, come si evince dal grafico del segnale nel primo pannello, che l'acquisizione non si protrae per un tempo abbastanza lungo per permettere lo sviluppo di uno spettro di frequenze che possa descriverlo in modo sufficientemente accurato.

4 Oscillatore a Reazione

In questa sezione ci occupiamo di analizzare le Figure 19, 20, 21 e 22, acquisizioni di 2048 punti in uscita da un oscillatore a reazione costruito con un transistor BJT in configurazione a emettitore comune. Per ogni successiva acquisizione Arduino era istruito in modo da mandare un impulso che facesse da seme dell'oscillazione e acquisisse i dati dopo un transiente iniziale in cui l'oscillazione risultava ancora instabile, e sono stati acquisiti i segnali in uscita per diverse regolazioni del potenziometro, corrispondenti a diversi valori per la corrente di base I_b riportati nella descrizione delle figure.

I pannelli sottostanti di ogni grafico riportano in scala lineare e logaritmica la trasformata di Fourier del segnale, che permette di apprezzare come i picchi dello spettro rappresentino le componenti dominanti del segnale. Passando a un'analisi più dettagliata le Figure 19 e 20 mostrano un picco nettamente più elevato per una frequenza attorno ai ~ 100 Hz, che dunque dovrebbe essere la frequenza di auto-oscillazione del circuito, ma il rumore presente non permette di distinguere nettamente altri possibili picchi. Al contrario, per le Figure 21 e 22, oltre a vedere un picco molto elevato poco sopra i 100 Hz, soprattutto sulla scala logaritmica si riescono ad apprezzare picchi sulle successive armoniche pari e dispari.

Se dunque dai primi due grafici si poteva ipotizzare che il segnale indotto nell'oscillatore a reazione fosse sinusoidale, magari con qualche imperfezione dovuta agli strumenti di acquisizione, questa supposizione viene nettamente scartata dalle due Figure successive 21 e 22, frutto di dati acquisiti esattamente con lo stesso apparato (l'unica differenza è appunto la regolazione del potenziometro), condizione che permette di escludere che le armoniche superiori siano un effetto attribuibile a queste cause strumentali. Probabilmente, data la tendenza dell'amplificatore montato nel circuito a distorcere le forme d'onda potrebbe essergli attribuita una parte del rumore o delle armoniche superiori che sono evidenziate nella trasformata di Fourier, insieme a molti dei limiti dell'apparato sperimentale di cui disponiamo. Infine osserviamo come i picchi in corrispondenza della frequenza di auto-oscillazione o suoi multipli hanno una larghezza non nulla, il che mostra come esista una banda centrata intorno alla frequenza caratteristica di frequenze che vengono selezionate dall'oscillatore e che vengono amplificate, anche se la scala poco dettagliata di cui facciamo uso non permette di darne una stima quantitativa della larghezza.

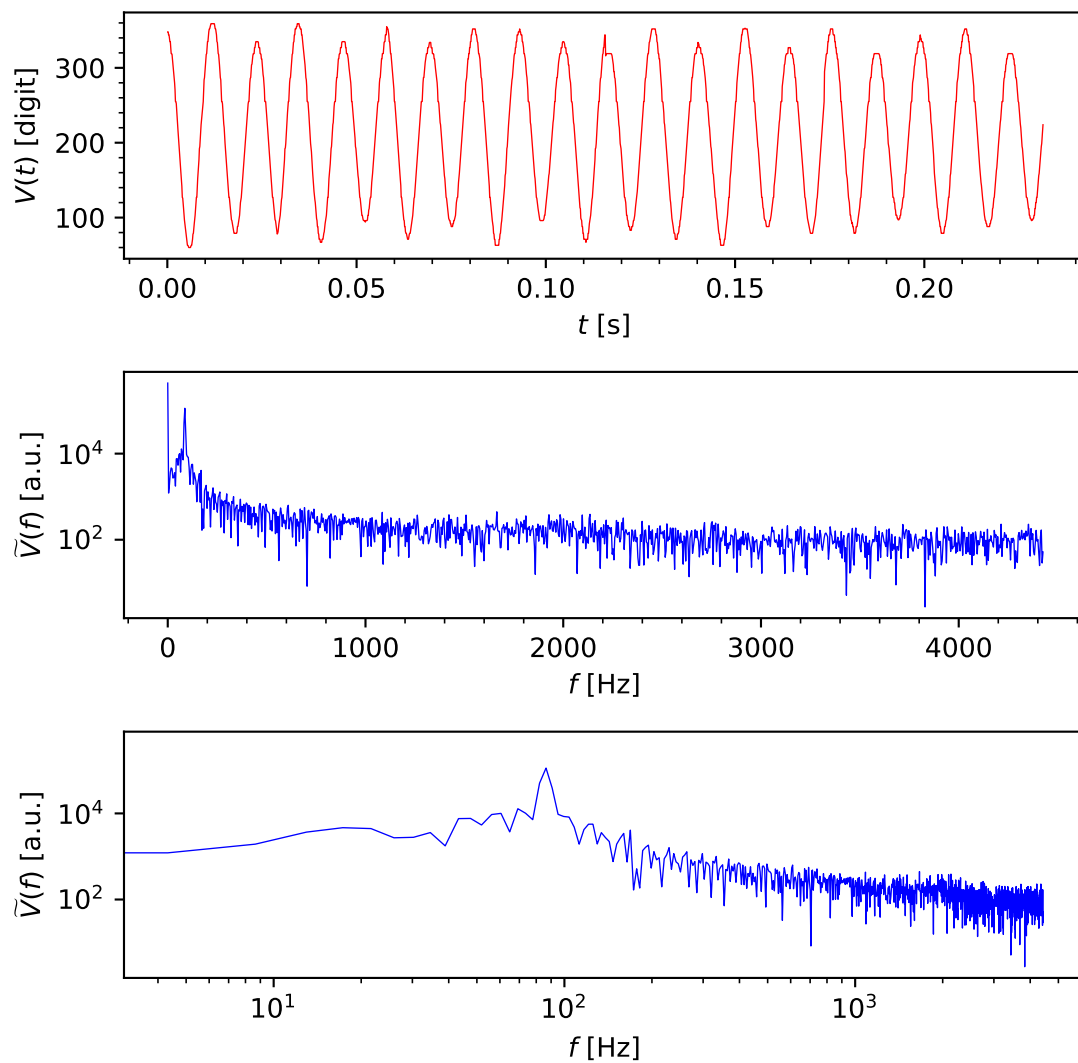


Figura 19: trasformata del segnale di un oscillatore a reazione con transistor in configurazione a emettitore comune. La trasformata è rappresentata con la doppia scala in frequenza: lineare e logaritmica. La corrente di base che caratterizza questa acquisizione, misurata con l'amperometro digitale risulta pari a $I_b = (0.57 \pm 0.05) \mu\text{A}$.

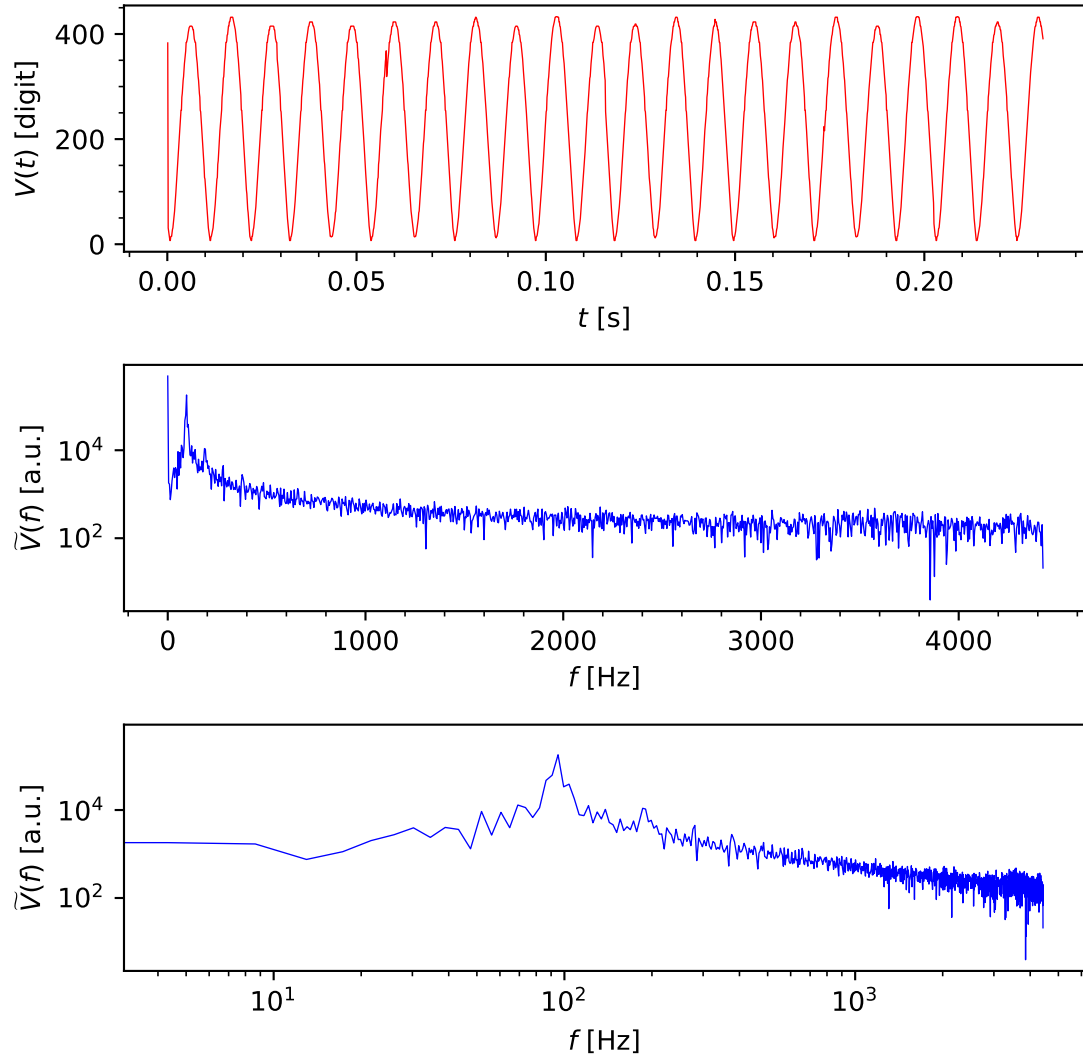


Figura 20: trasformata del segnale di un oscillatore a reazione con transistor in configurazione a emettitore comune. La trasformata è rappresentata con la doppia scala in frequenza: lineare e logaritmica. La corrente di base che caratterizza questa acquisizione, misurata con l'amperometro digitale risulta pari a $I_b = (0.69 \pm 0.05) \mu\text{A}$.

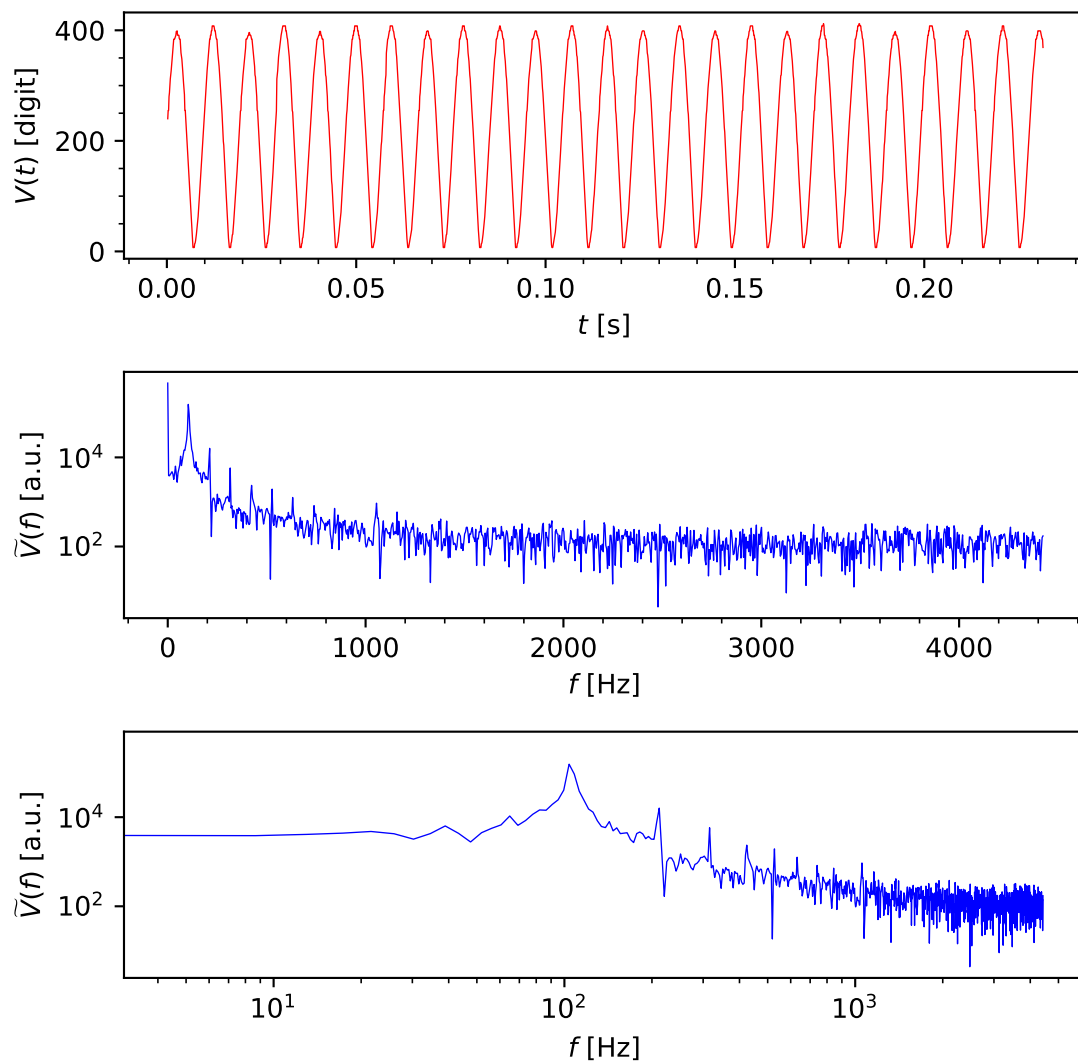


Figura 21: trasformata del segnale di un oscillatore a reazione con transistor in configurazione a emettitore comune. La trasformata è rappresentata con la doppia scala in frequenza: lineare e logaritmica. La corrente di base che caratterizza questa acquisizione, misurata con l'amperometro digitale risulta pari $aI_b = (0.86 \pm 0.05) \mu\text{A}$.

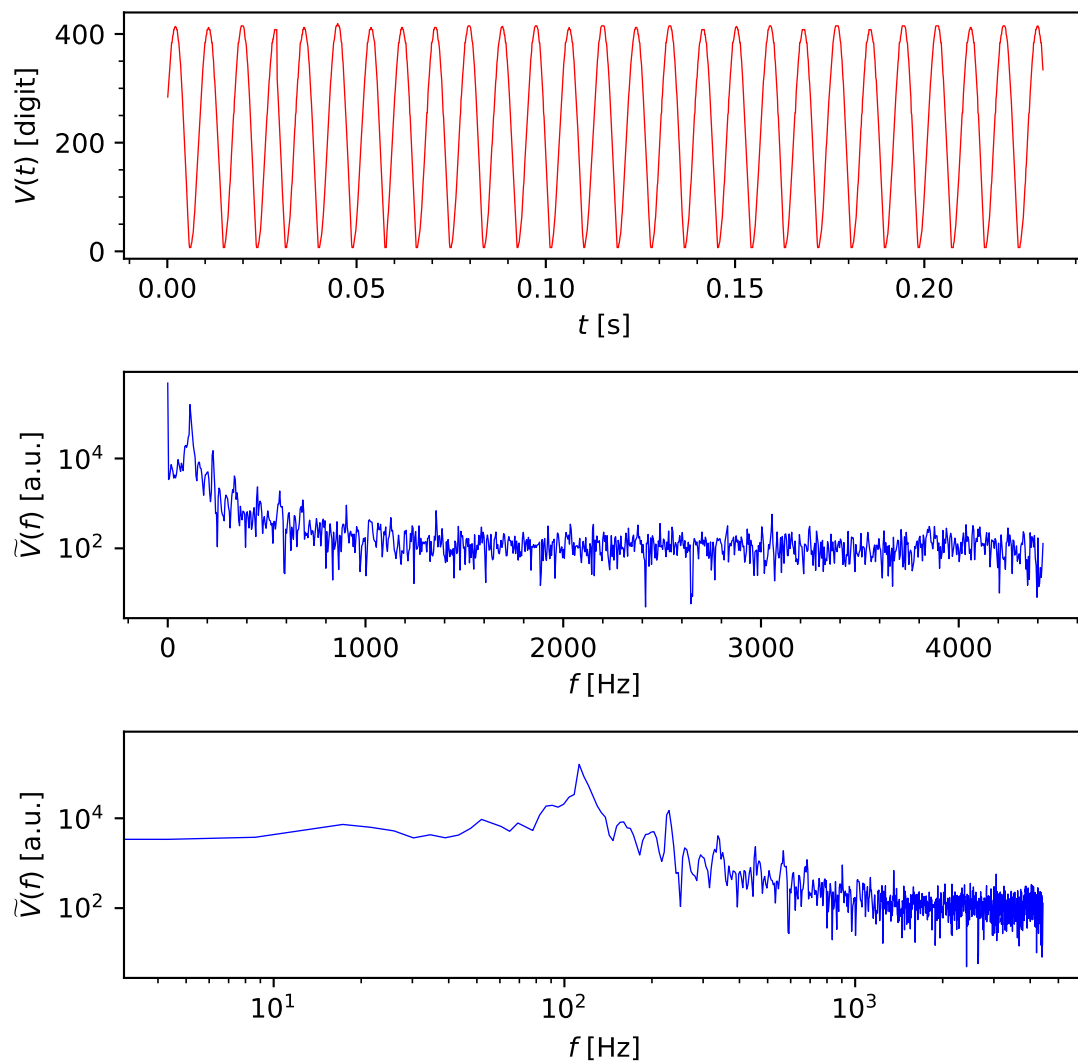


Figura 22: trasformata del segnale di un oscillatore a reazione con transistor in configurazione a emettitore comune. La trasformata è rappresentata con la doppia scala in frequenza: lineare e logaritmica. La corrente di base che caratterizza questa acquisizione, misurata con l'amperometro digitale risulta pari $aI_b = (1.01 \pm 0.05) \mu\text{A}$.