Laboratorio di Segnali e Sistemi

- Esercitazione -5 -

Amplificatore Operazionale 2

Claudio Luci

SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

last update : 070117

Argomenti dell'esercitazione:

- Filtro attivo passa basso
- Cenni al rumore nei circuiti elettronici
- Generatore di rumore

Importante: questi circuiti serviranno per l'esercitazione 9,
quindi non "smontateli".

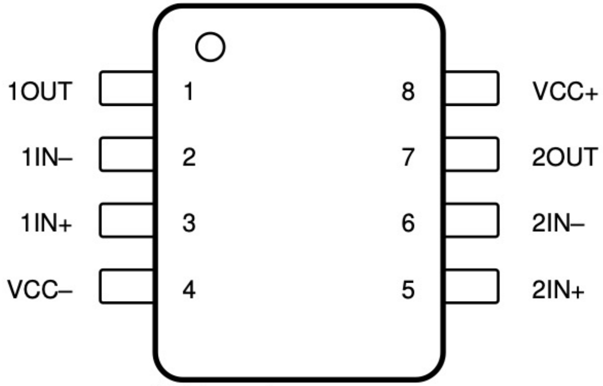
Fateli in una parte "isolata" della scheda cosi non occupate tutto lo spazio.

Fate un montaggio "pulito"

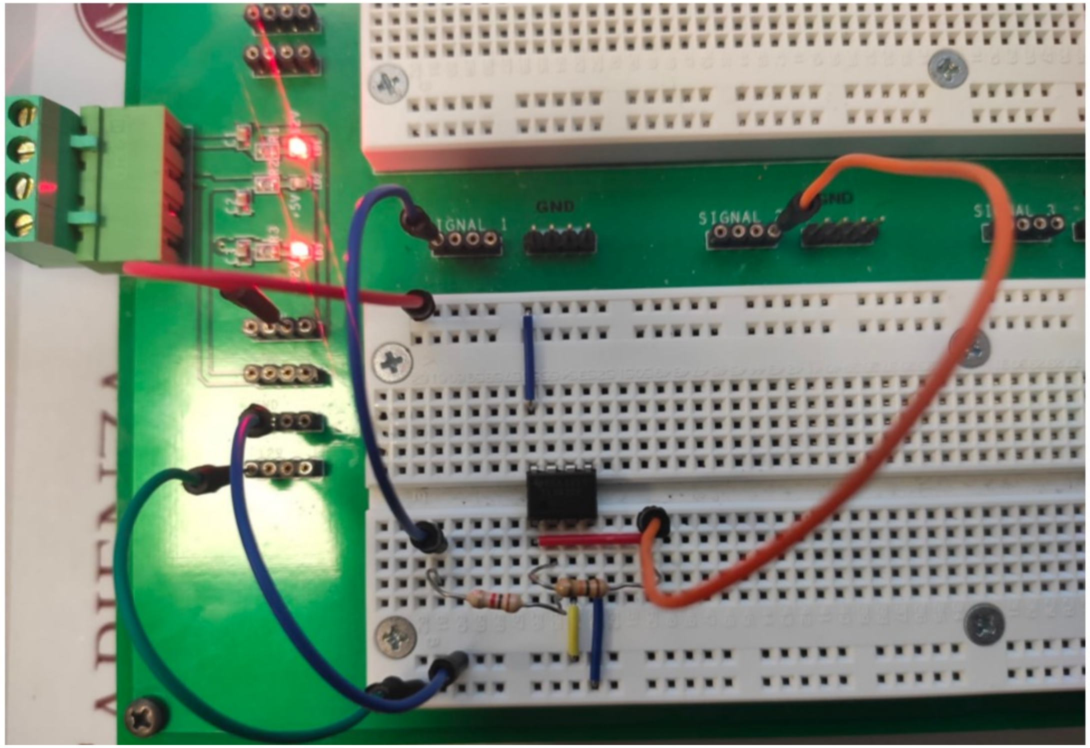
Al termine dell'esperienza rimontare il filtro attivo VCVS nella versione $K \simeq 1.586$ (filtro Butterworth) e lasciarlo montato possibilmente nella stessa basetta in cui si trova il generatore di rumore (dovrà essere riutilizzato nell'esperienza 9).
Non smontare il generatore di rumore anch'esso farà parte dell'esperienza 9. Prendere nota delle condizioni di lavoro utilizzate durante questa esperienza in modo da ritrovare facilmente il punto di lavoro durante l'esperienza 9.

OP-AMP TL082: piedinatura

- ❑ In laboratorio utilizzeremo l'amplificatore operazionale TL082. Si tratta di un circuito integrato a 8 piedini che contiene due amplificatori operazionali .
- ❑ Questo op-amp va alimentato con doppia alimentazione, ad esempio si può usare ± 12 V.
- ❑ L'amplificatore non puo' erogare correnti elevate, quindi le resistenze della rete di reazione non possono essere troppe piccole.



Not to scale

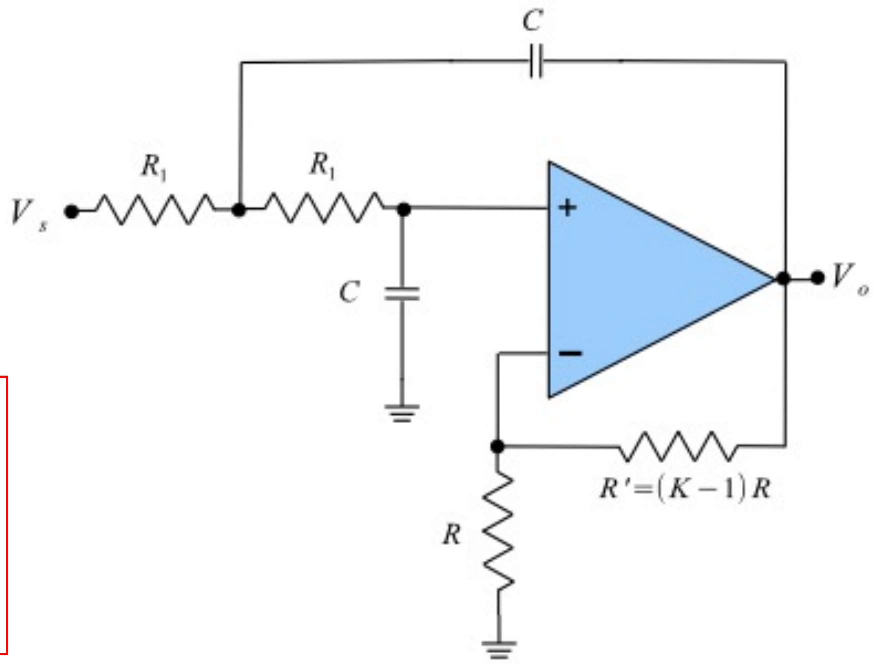


L'integrato è visto dall'alto

Filtro passa basso VCVS del II ordine

$$\omega_c = \frac{1}{R_1 C}$$

C = 10 – 100 nF
R = 1.5 – 15 K
R,R' = 1 – 10 K



È preferibile avere R_1 grande per avere una grande resistenza d'ingresso

$$\frac{R'}{R} = K - 1$$

Vogliamo costruire un filtro attivo VCVS del secondo ordine utilizzando l'amplificatore operazionale TL082, con frequenza di taglio $f_T \approx 1\ kHz$ e studiare la funzione di trasferimento per due valori di K:

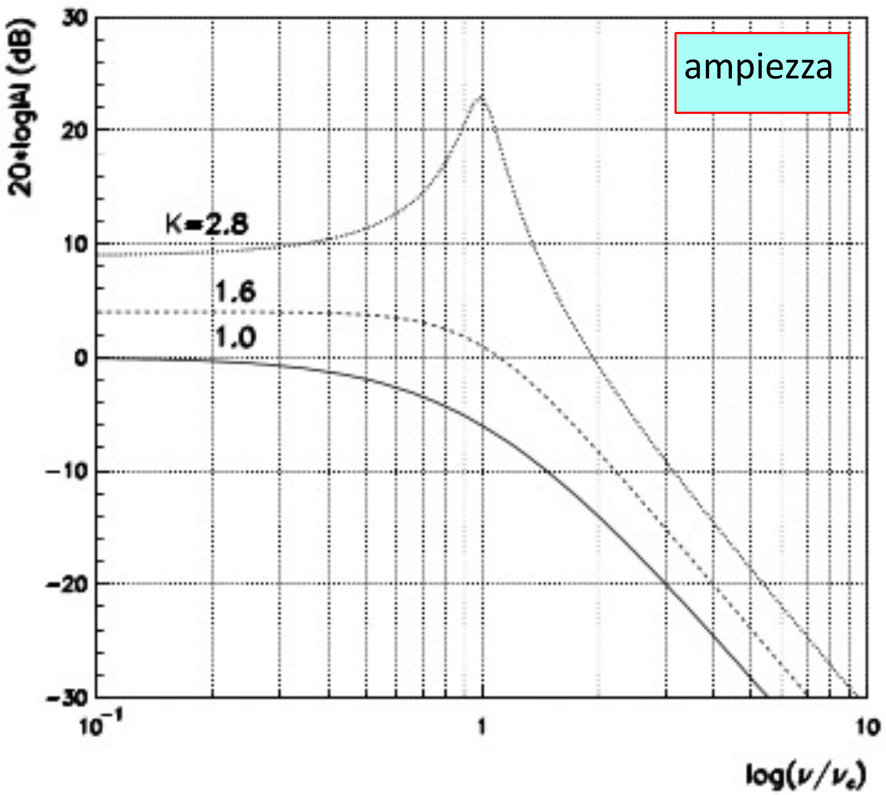
1. $K \approx 1.586$ (filtro Butterworth);
2. $K \approx 2.5$ (overshooting);

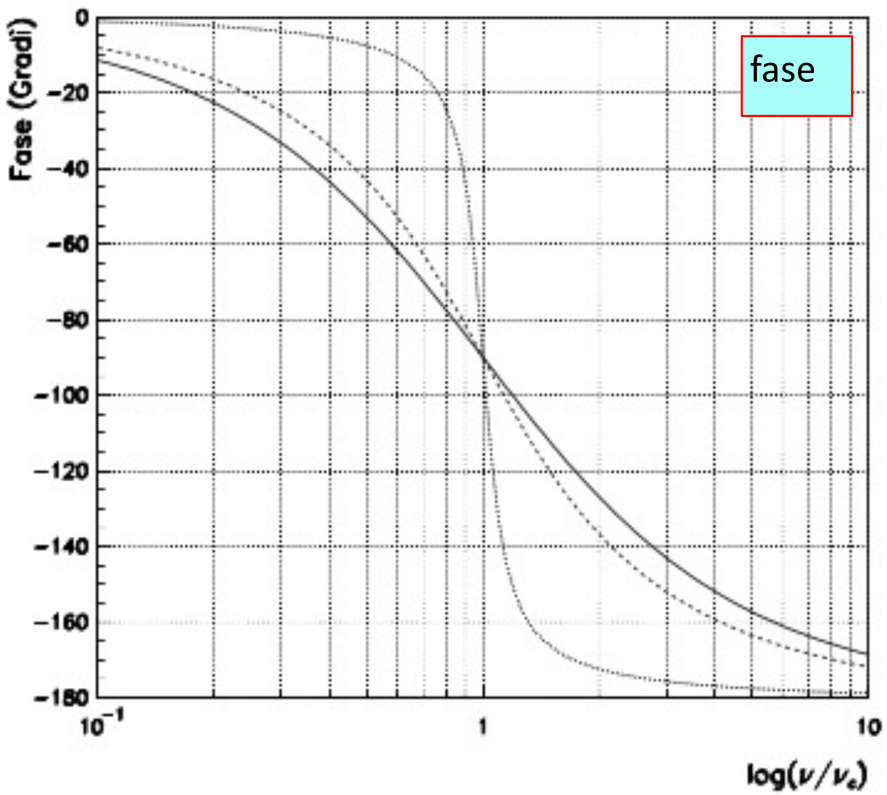
Misure

Prendere un numero adeguato di punti (per i due valori di K) in modo da studiare l'andamento del modulo e della fase della funzione di trasferimento.

OP-AMP: risposta del filtro VCVS

- La forma della risposta di un filtro VCVS dipende, nella regione di transizione, dal fattore di amplificazione K, come si vede in figura, dove sono riportati gli andamenti dell'ampiezza e della fase :

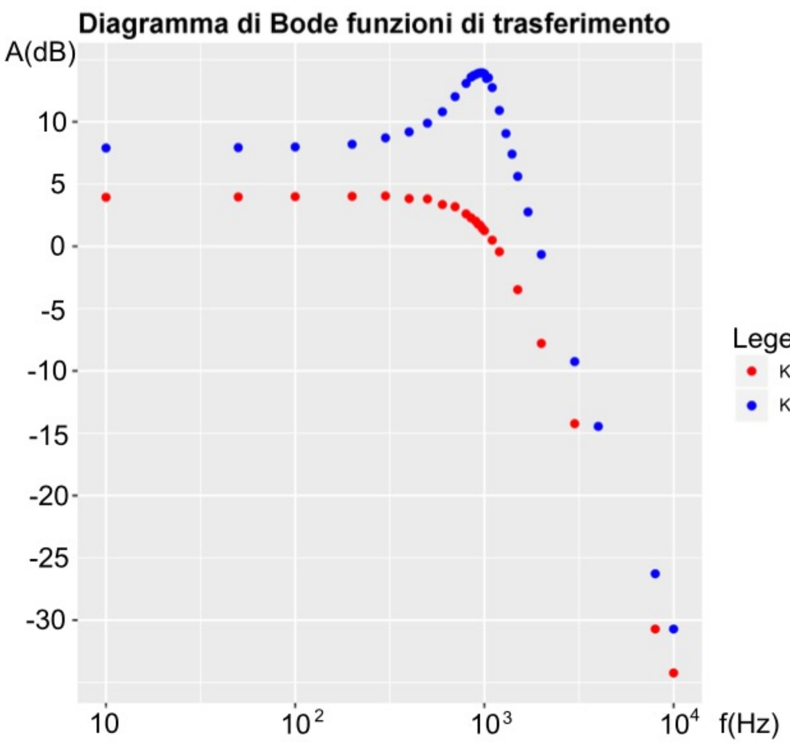




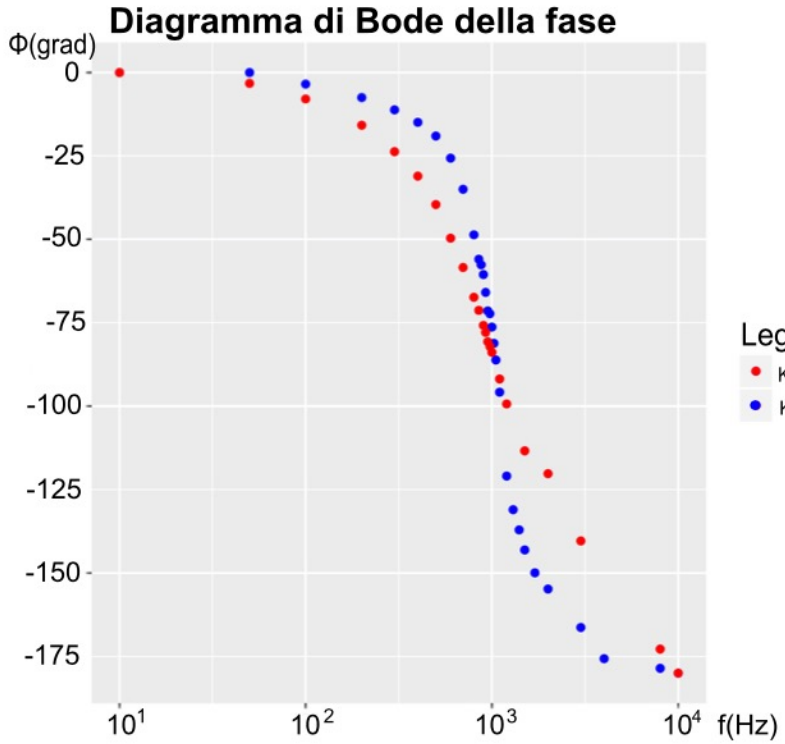
- Per valore di K superiori a 1.586 il modulo dell'ampiezza mostra un ***overshooting*** attorno alla frequenza critica, mentra la fase mostra, al crescere di K, una transizione sempre più netta;
- Il valore K=1.586 individua il filtro **Butterworth**, ovvero quello caratterizzato dalla massima ***piattezza*** nella regione al di sotto della frequenza di taglio.

N.B. lo sfasamento alla frequenza di taglio è di -90°

Una misura fatta nel 2019



(a) Diagrammi di Bode del modulo delle funzioni di trasferimento.



(b) Diagrammi di Bode della fase delle funzioni di trasferimento.

$$T = \frac{K}{(sCR_1)^2 + (3-K)(sCR_1) + 1} \Longrightarrow \omega_c = \frac{1}{R_1 C}$$

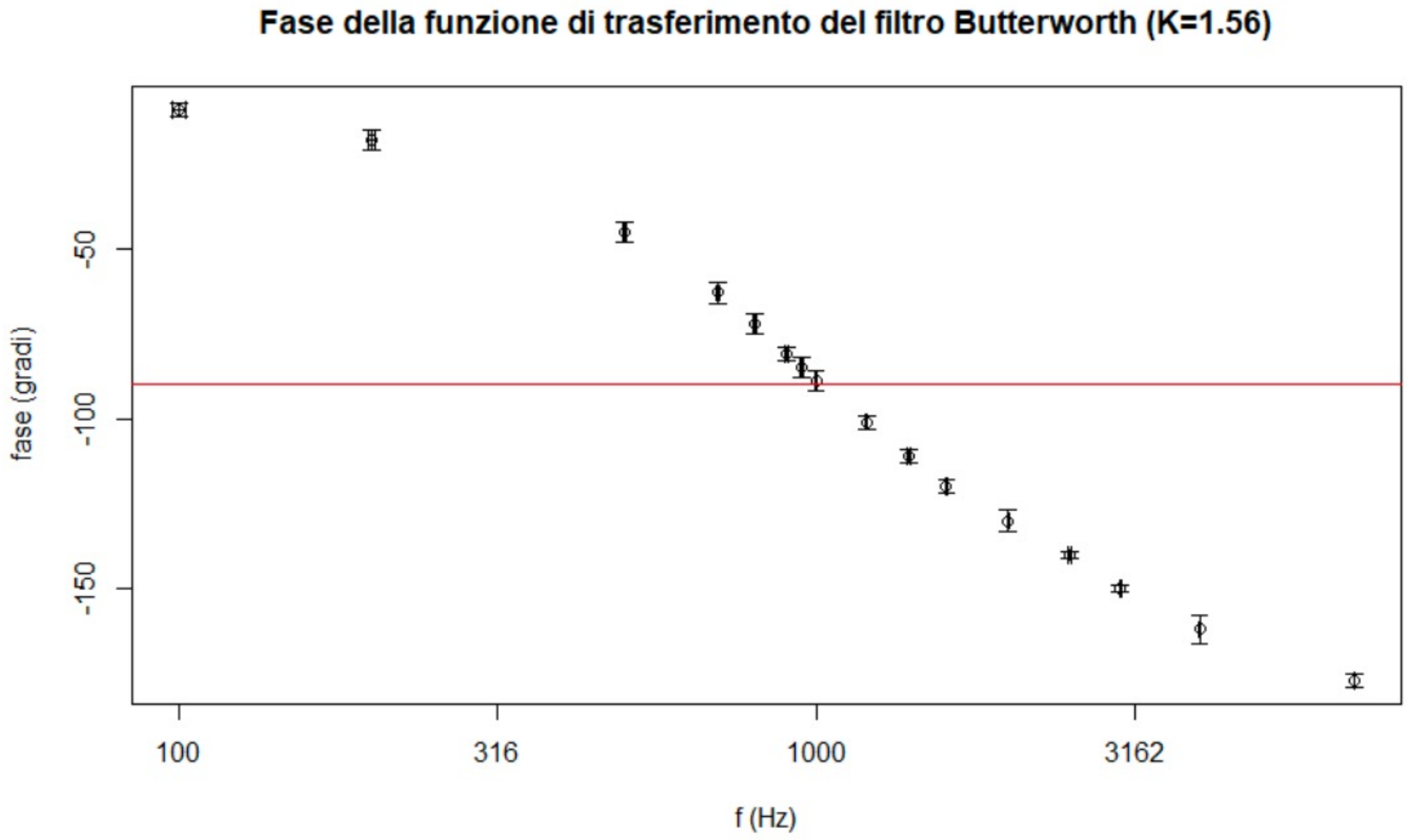
$$s = j\omega$$

$$|T(\omega_C)| = \frac{K}{3-K}$$

$$K = 2.5 \ \Longrightarrow |T(\omega_C)| = \frac{2.5}{3-2.5} = 5 = 14\ dB$$

$$K = 1.586 \ \Longrightarrow |T(\omega_C)| = \frac{1.586}{3-1.586} \approx \frac{1.586}{\sqrt{2}} \approx 1.12 = 1\ dB$$

Misura della frequenza di taglio dalla fase



Studio del rumore

Il rumore nei circuiti elettrici

- Se prendiamo un qualsiasi circuito elettronico e analizziamo il valore di una grandezza elettrica (tensione o corrente) in un punto, vediamo che esso non è stabile e pulito nel tempo ma fluttua intorno al valore aspettato **s(t)**
- La fluttuazione **casuale** intorno al segnale è chiamata **RUMORE** e la indichiamo con **n(t)**.
- Ad esempio la tensione **V(t)** all'uscita di un circuito, possiamo esprimerla come la somma di tre termini:

$$\boxed{V(t) = s(t) + n(t) + d(t)}$$

(segnale + rumore + disturbi)

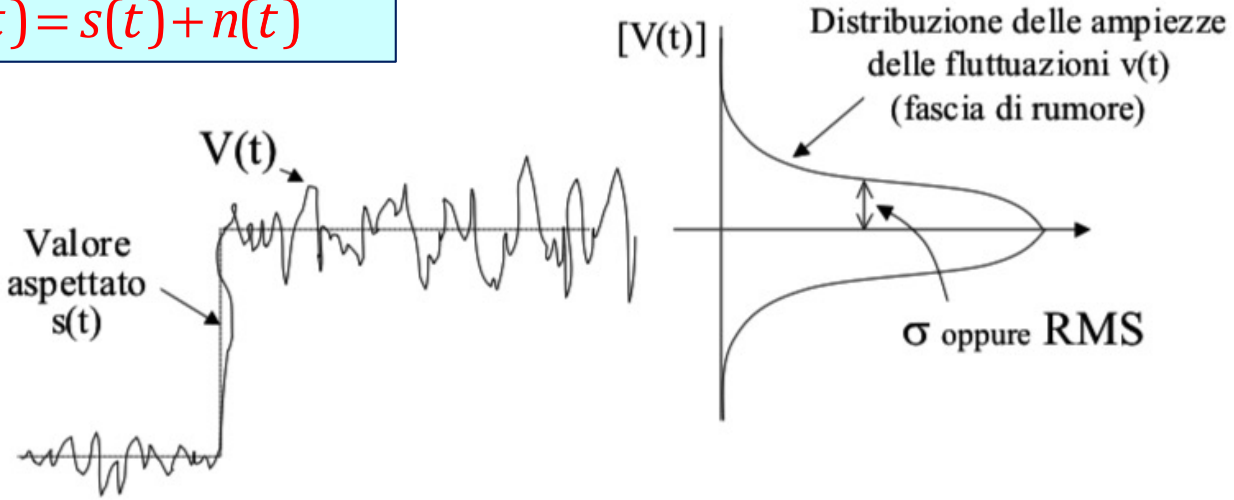
- Il termine **d(t)** rappresenta i disturbi, ovvero fluttuazioni del segnale certamente indesiderate ma riconducibili a cause precise (induzioni, interferenze) e quindi in linea di principio eliminabili con un'attenta realizzazione del circuito o con una schermatura (gabbia di Faraday) del circuito stesso. Nel seguito non considereremo più i disturbi esterni.
- Il rumore invece è un segnale indesiderato presente nel circuito per effetto dei meccanismi fisici di funzionamento del circuito stesso (rumore di fondo). Esso è intrinseco al circuito e non è riducibile oltre certi limiti.
- Il rumore è un segnale totalmente casuale, sia in ampiezza e fase e sia in frequenza.
- Su un tempo finito si può predire il suo scarto quadratico medio (rms) ma l'ampiezza istantanea rimane impredicibile.

N.B. se l'ampiezza del segnale s(t) è confrontabile con le fluttuazioni del rumore n(t), esso non potrà essere rivelato.

Caratterizzazione del rumore

- Il rumore **NON** è caratterizzato dal suo andamento nel tempo n(t) perché per sua natura n(t) è diverso da un'osservazione all'altra e perché non è predicibile, cioè non possiamo predire quale ne sarà il valore n(t+dt) all'istante successivo all'osservazione.
- Nella grande maggioranza dei casi, la distribuzione delle fluttuazioni (rumore) ha una forma ben approssimabile ad una **Gaussiana** centrata proprio sul livello di segnale idealmente presente in quel punto se non ci fosse rumore. Questo equivale a dire che il **valor medio del rumore è nullo**.

$$V(t) = s(t) + n(t)$$

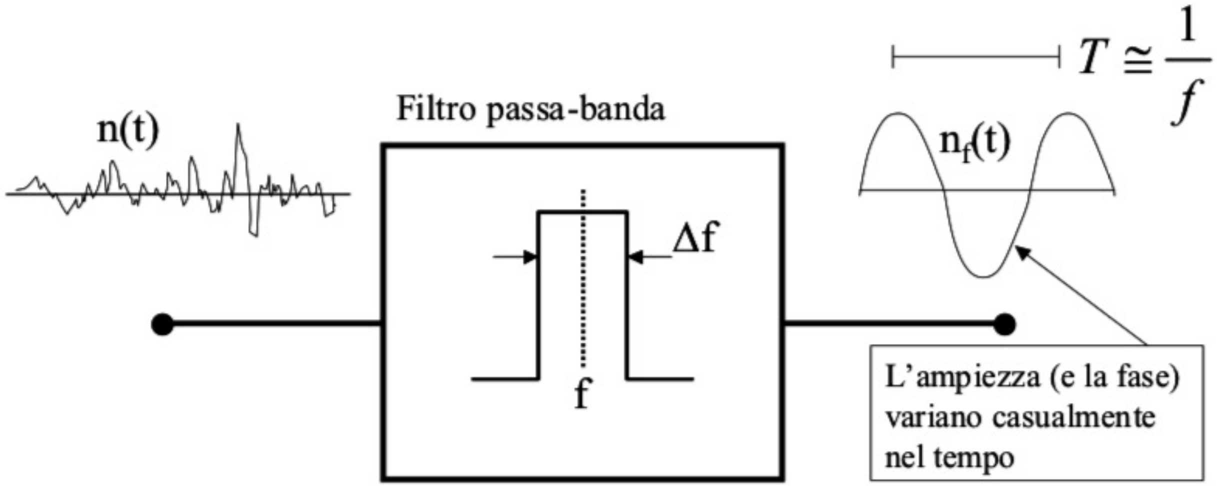


$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

- L'entità delle fluttuazioni viene caratterizzata dalla deviazione standard σ della distribuzione, che può essere approssimata dalla **radice quadrata dello scarto quadratico medio (rms)**.
- Il valore quadratico medio del rumore <$n^2(t)$>, che ha le dimensioni di [V^2] oppure [A^2], è un'indicazione della potenza trasportata dal rumore stesso.

Spettro in frequenza del rumore

- Come ogni segnale elettrico, anche il rumore n(t) può essere scomposto secondo una trasformata di Fourier. Esso sarà quindi caratterizzato anche dal suo **spettro in frequenza**.
- Per misurare sperimentalmente le **componenti armoniche del rumore**, in particolare quella alla frequenza f, si può pensare idealmente di prendere il rumore n(t) e di farlo passare in un circuito passa banda centrato proprio alla frequenza f e avente una larghezza di banda Δf.
- All'uscita del filtro ci saranno solo sinusoidi $n_f(f)$ di frequenza compresa tra (f-Δf/2) e (f+Δf/2)
- Ogni sinusoide ha valor medio nullo e un suo scarto quadratico medio associato a quella frequenza.



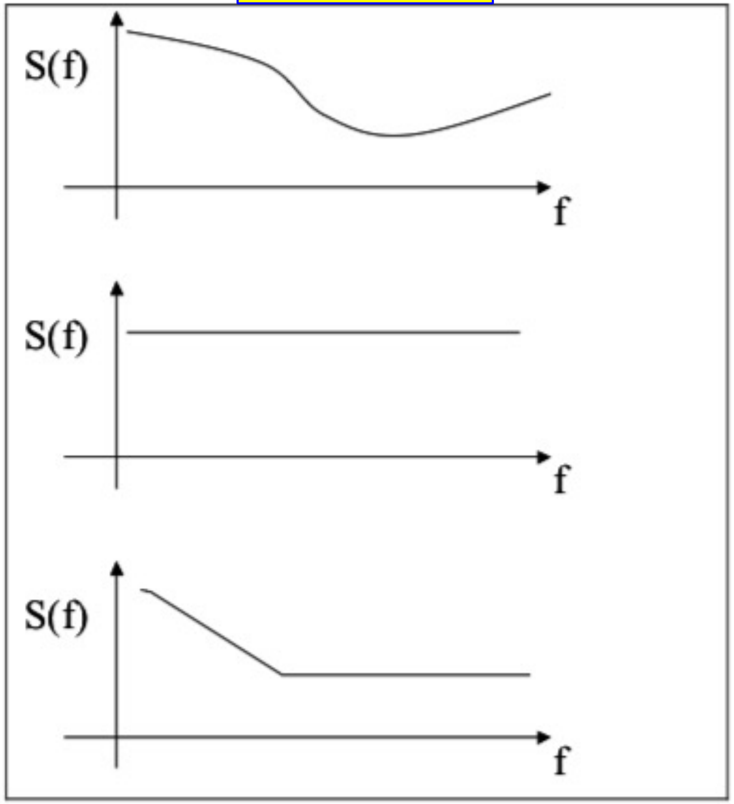
- Il valore quadratico medio dell'insieme delle sinusoidi che escono dal filtro diviso per la larghezza Δf del filtro stesso, definisce la **densità spettrale di potenza** del rumore alla frequenza f.

$$S(f) = \frac{< n_f^2(t) >}{\Delta f}$$

Spettro di potenza del rumore

- Ripetendo il procedimento precedente variando la frequenza centrale f del filtro, si può ottenere la densità spettrale di potenza del rumore a tutte le frequenze. Esso costituisce lo **spettro di potenza** del rumore.

$$S(f) = \frac{<n_f^2(t)>}{\Delta f}$$



- Lo spettro di potenza del rumore può avere in linea di principio un andamento qualsiasi.

- Se lo spettro è piatto, cioè se il valore quadratico medio di ogni componente in frequenza del rumore è uguale alle altre, si dice che lo **spettro è bianco** (white noise).

- Se lo spettro non è bianco, in gergo si dice che è ``colorato''. Ad esempio, se sono più ampie le frequenze basse, si dice che il rumore è rosa, in analogia con l'effetto che si avrebbe in luce visibile.

- La potenza totale del rumore è data dalla somma delle singole componenti:

$$<n^2(t)> \; = \int_0^\infty S(f) \cdot df$$

Rapporto segnale-rumore (SNR)

- Nello studio del rumore, di solito, più che il valore in termini assoluti, ha importanza la sua entità rispetto al segnale, rappresentata usualmente dal rapporto segnale/rumore (**signal to noise ratio**) definito come rapporto tra il valore quadratico medio del segnale e quello del rumore.

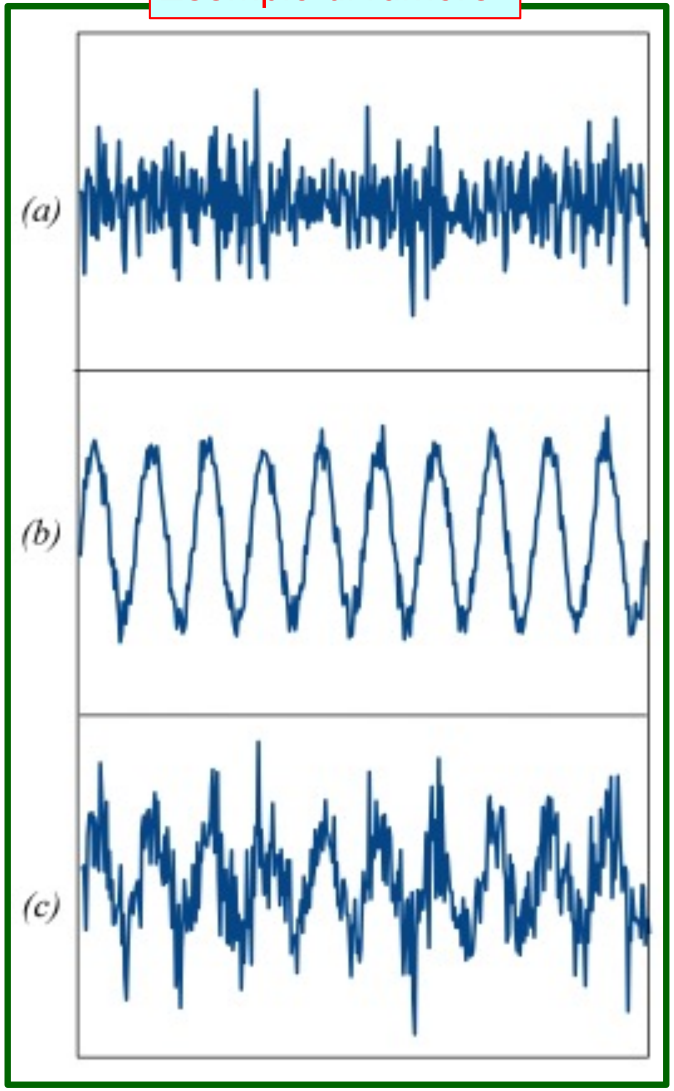
$$SNR = \frac{<s^2(t)>}{<n^2(t)>}$$

- Spesso questa quantità viene espressa in dB:

$$SNR = 10 \cdot \log_{10} \frac{<s^2(t)>}{<n^2(t)>} \text{ dB}$$

- È necessario sottolineare che la definizione suddetta è legata alla larghezza della banda di osservazione in frequenza, dato che le distribuzioni spettrali del segnale e del rumore sono generalmente molto diverse. Se la banda di osservazione si allarga, il rapport SNR diminuisce, mentre aumenta se selezioniamo solo una banda ristretta attorno alla frequenza di interesse per il segnale.

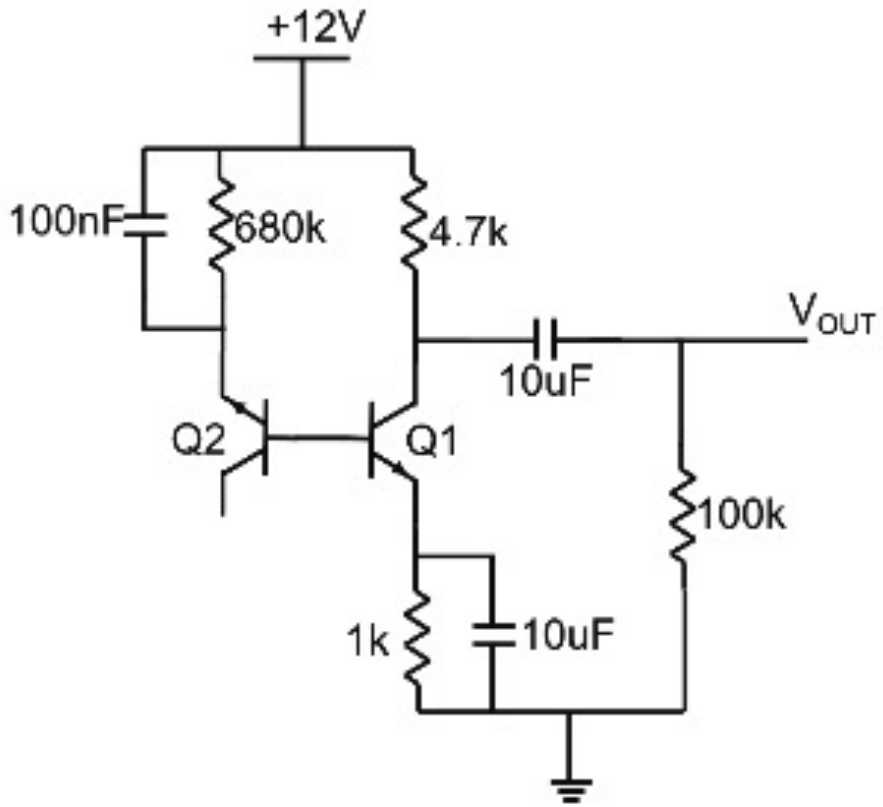
Esempio di rumore



a) Tipico rumore visto all'oscilloscopio
b) Un segnale sinusoidale con rumore moderato
c) Un segnale sinusoidale con forte rumore

Generatore di rumore

Realizzare il generatore di rumore basato su transistor 2N2222A come mostrato in Fig. 4.2. Montare con cura ed ordinatamente il circuito perché sarà necessario riutilizzarlo nell'esperienza 9.



Nota:
il rumore deve essere dell'ordine di 100 mV. Minimo una ventina di mV, altrimenti l'esperienza 9 con arduino non funziona

Verificare il funzionamento del circuito caratterizzando il rumore prodotto sull'uscita. Collegare l'uscita del generatore di rumore all'ingresso V_s del filtro VCVS passa-basso e verificare l'attenuazione del rumore ottenuta prima e dopo il filtro.

Alcuni risultati sul rumore

In figura 8 è visualizzato il rumore bianco prodotto in uscita dal circuito, di scarto quadratico medio $rms = 200 \pm 3$ mV. Se si filtra questo segnale attraverso il Butterworth realizzato nella prima parte dell'esperienza, si osserva che l'ampiezza viene ridotta a $rms' = 16 \pm 4$ e la forma dell'onda è una somma di sinusoidi a basse frequenze: le componenti di frequenza maggiore di 1 kHz sono state attenuate.

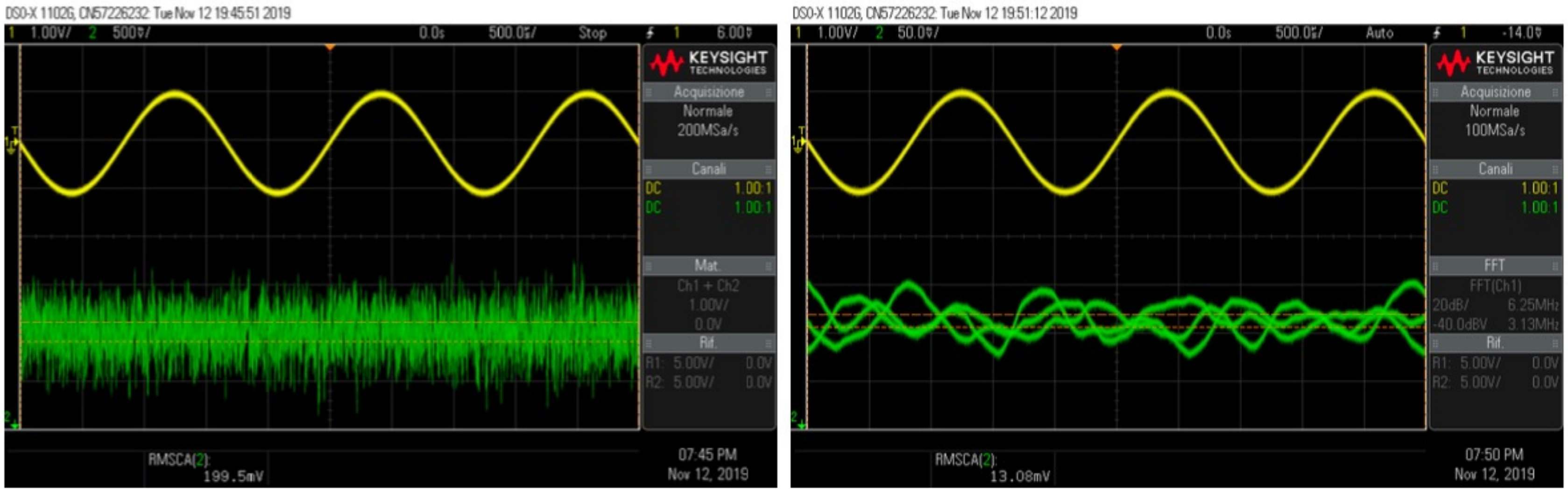
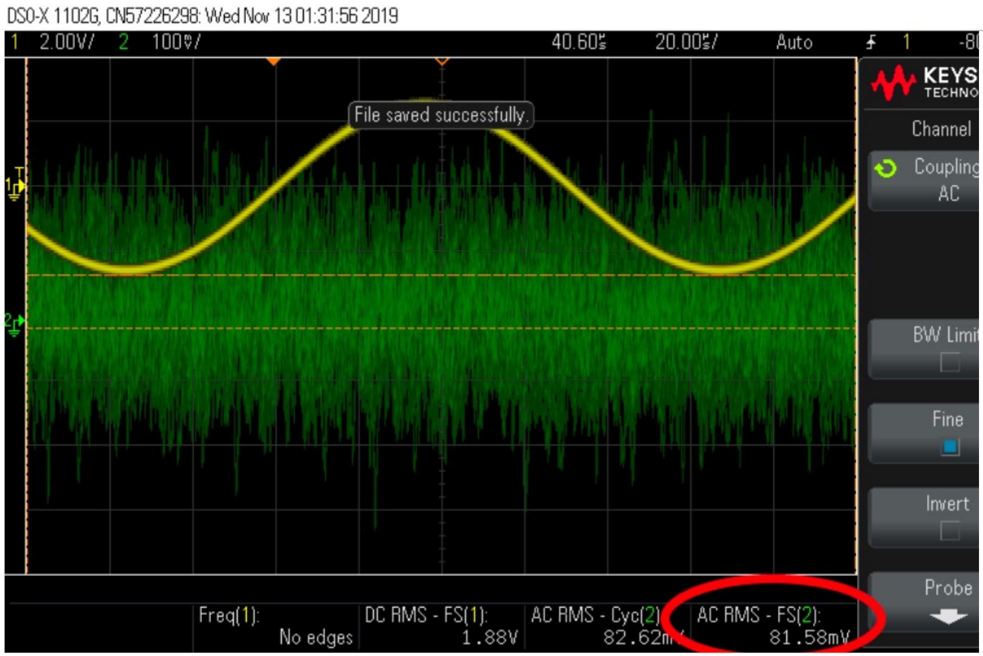
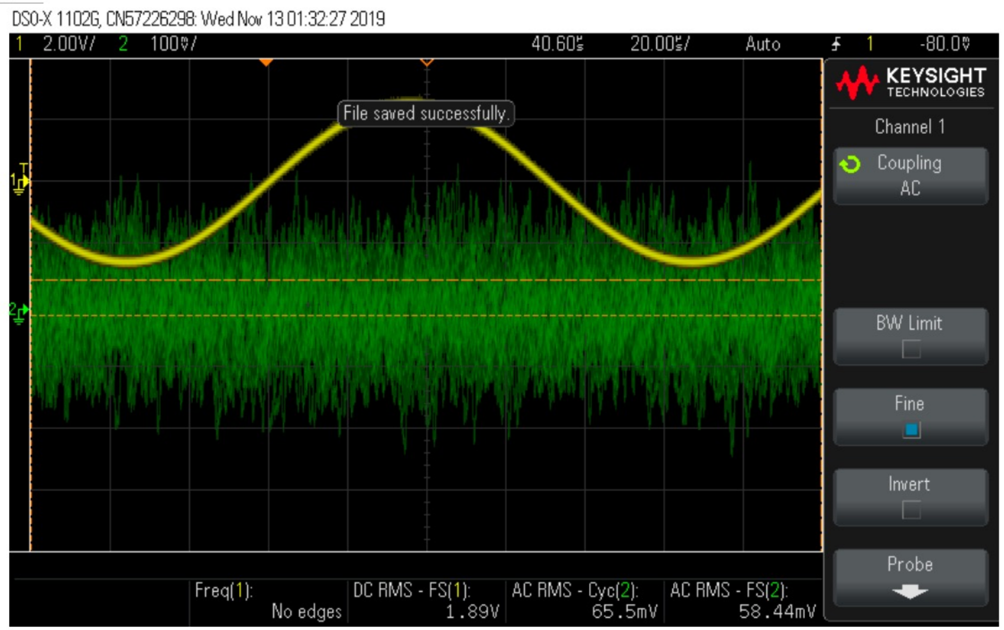


Figura 8: Grafico del segnale prodotto dal generatore di rumore. L'output della figura di destra è stato filtrato attraverso il Butterworth.

- ❑ N.B. mandate sul canale 1 dell'oscilloscopio un'onda sinusoidale con la quale date il trigger all'oscilloscopio, altrimenti risulta difficile visualizzare il rumore sull'oscilloscopio.
- ❑ Misurate l'RMS del rumore, con e senza filtro VCVS

Alcuni risultati sul rumore





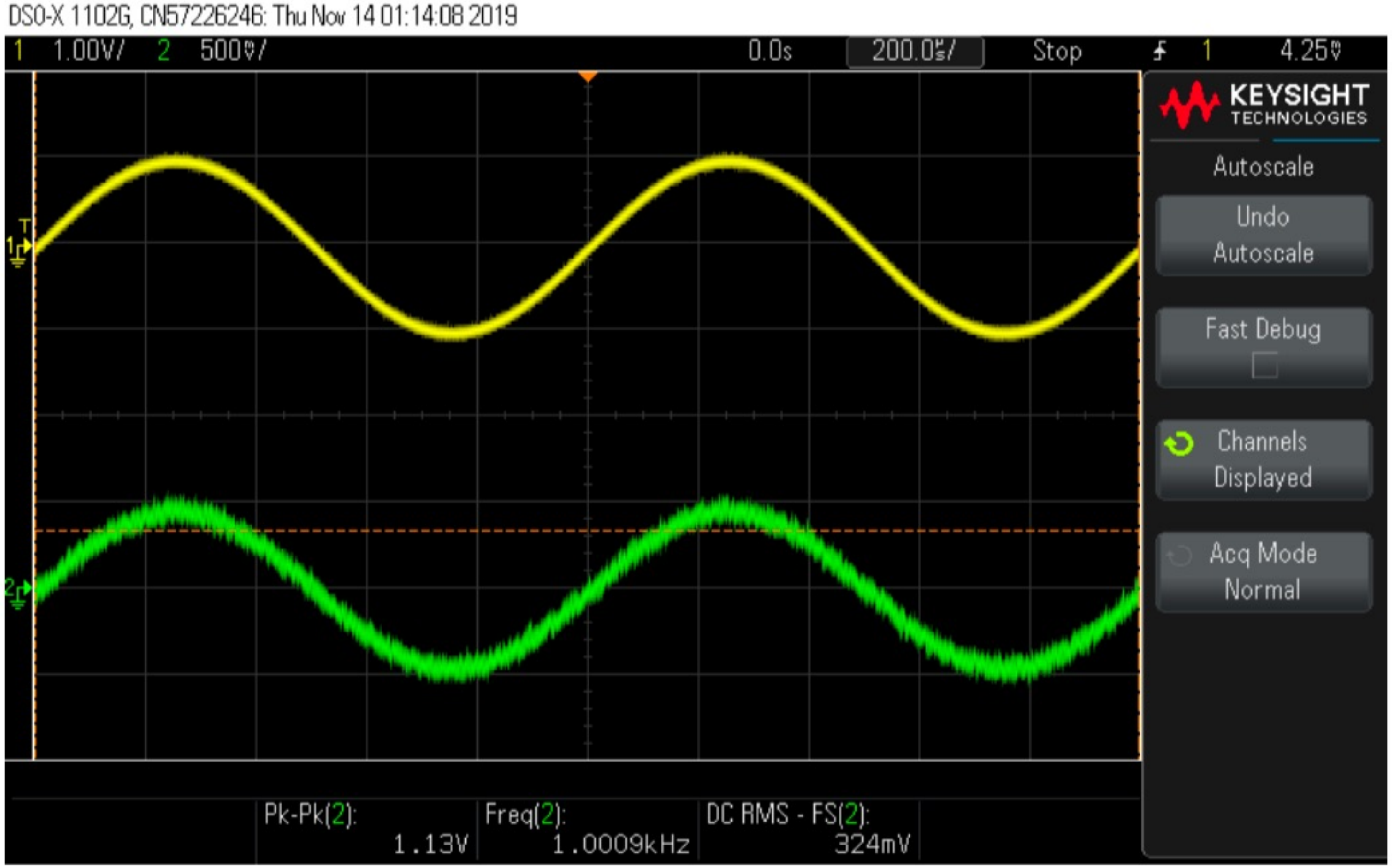
Senza filtro: RMS 81 mV

con filtro: RMS 58 mV

Sinusoide più rumore

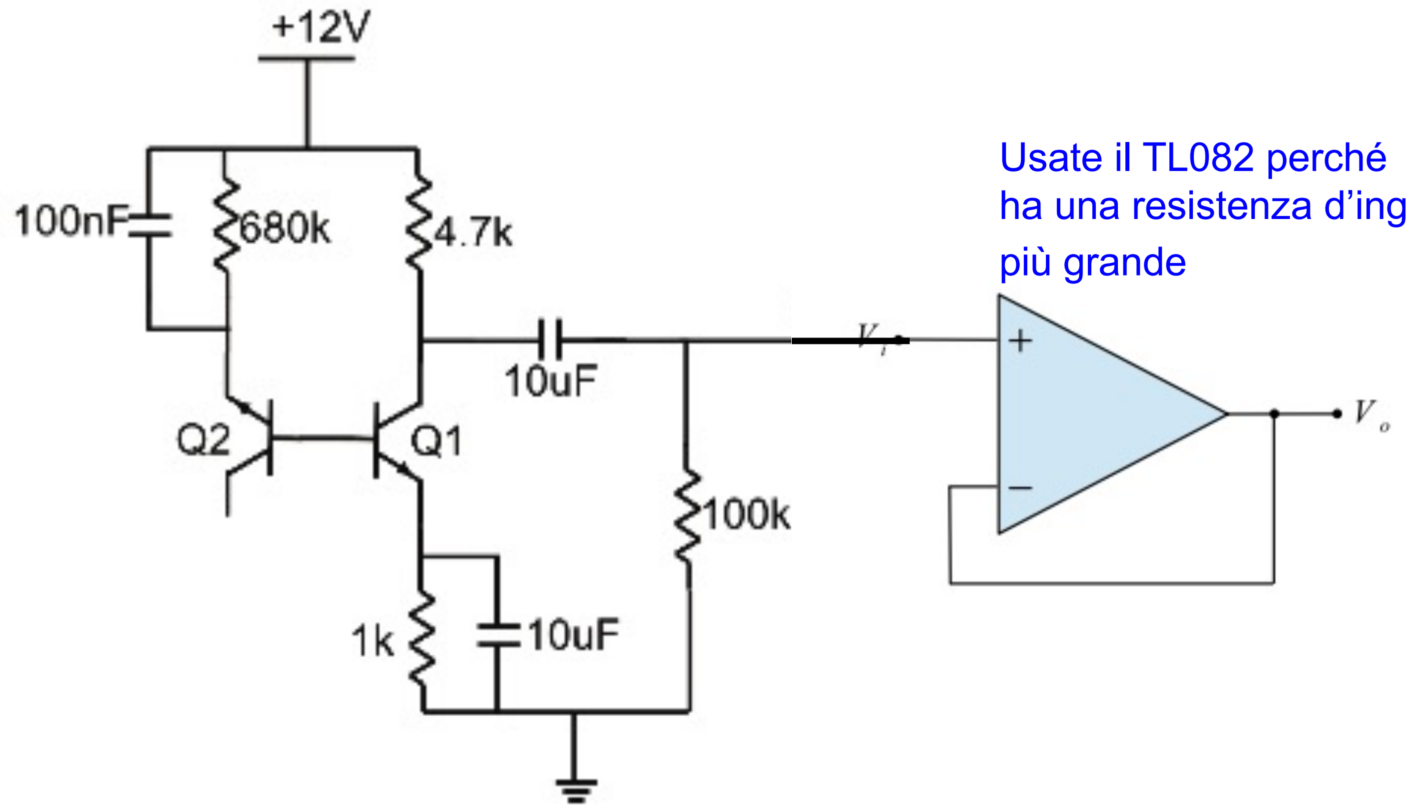
Provate a sommare il rumore ad un segnale sinusoidale utilizzando il sommatore

Sinusoide
più rumore



Generatore di rumore con emitter follower

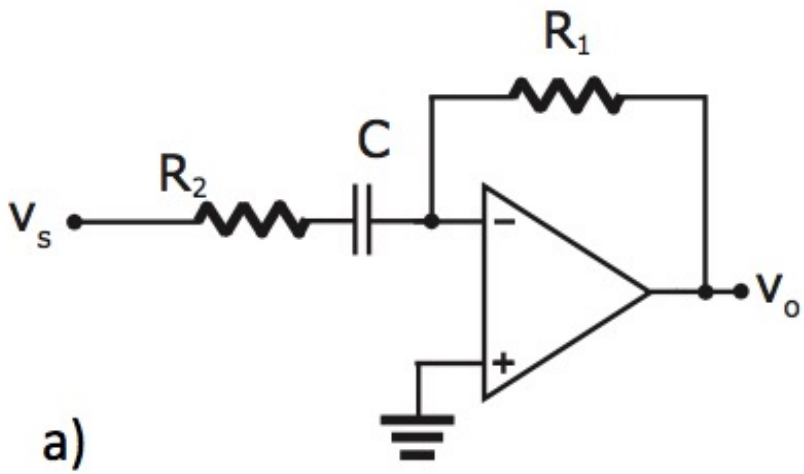
Potrebbe esserci un problema di adattamento di impedenza quando collegate il generatore di rumore al sommatore, oppure al filtro, oppure quando lo collegate ad arduino.
Se accade provate allora a mettere un emitter follower all'uscita del generatore e ripetete le misure.



Usate il TL082 perché ha una resistenza d'ingresso più grande

Circuito derivatore (facoltativo)

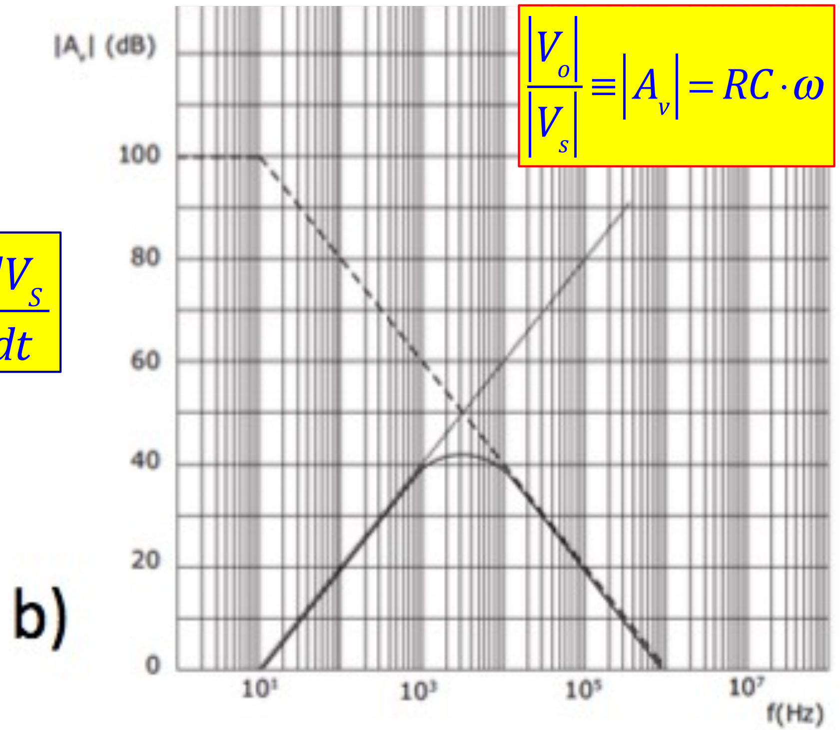
Realizzare un circuito derivatore utilizzando l'amplificatore operazionale TL082 come indicato in Fig. 3.4 a), con opportuna scelta dei componenti R_1 e C in modo che il valore di R_1C sia dell'ordine di 10^{-4} s. Scegliere la resistenza R_2 opportunamente in modo che $R_2 C \ll R_1 C$.



R_1=100 K
R_2 = 10 K
C = 1 nF

$$V_o = -RC \cdot \frac{dV_s}{dt}$$

$$V_o = RC \cdot \omega \cdot V_p \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$



$$\frac{|V_o|}{|V_s|} \equiv |A_v| = RC \cdot \omega$$

Studiare la sua risposta in frequenza attraverso il diagramma di Bode. Verificare attraverso una serie di misure a frequenze opportune che il comportamento del circuito si discosta da quello di un derivatore ideale a causa del comportamento dell'operazionale ad alte frequenze. Studiare la risposta a segnali impulsivi fornendo in ingresso al circuito un segnale impulsivo di forma quadrata.

Fare prima l'onda quadra

Circuito derivatore: onda quadra

Figure 6: Visualizzazione tramite oscilloscopio dei segnali di output (verde) e input (giallo, con frequenza 1 kHz e ampiezza 80 mV).

Circuito derivatore: segnale sinusoidale

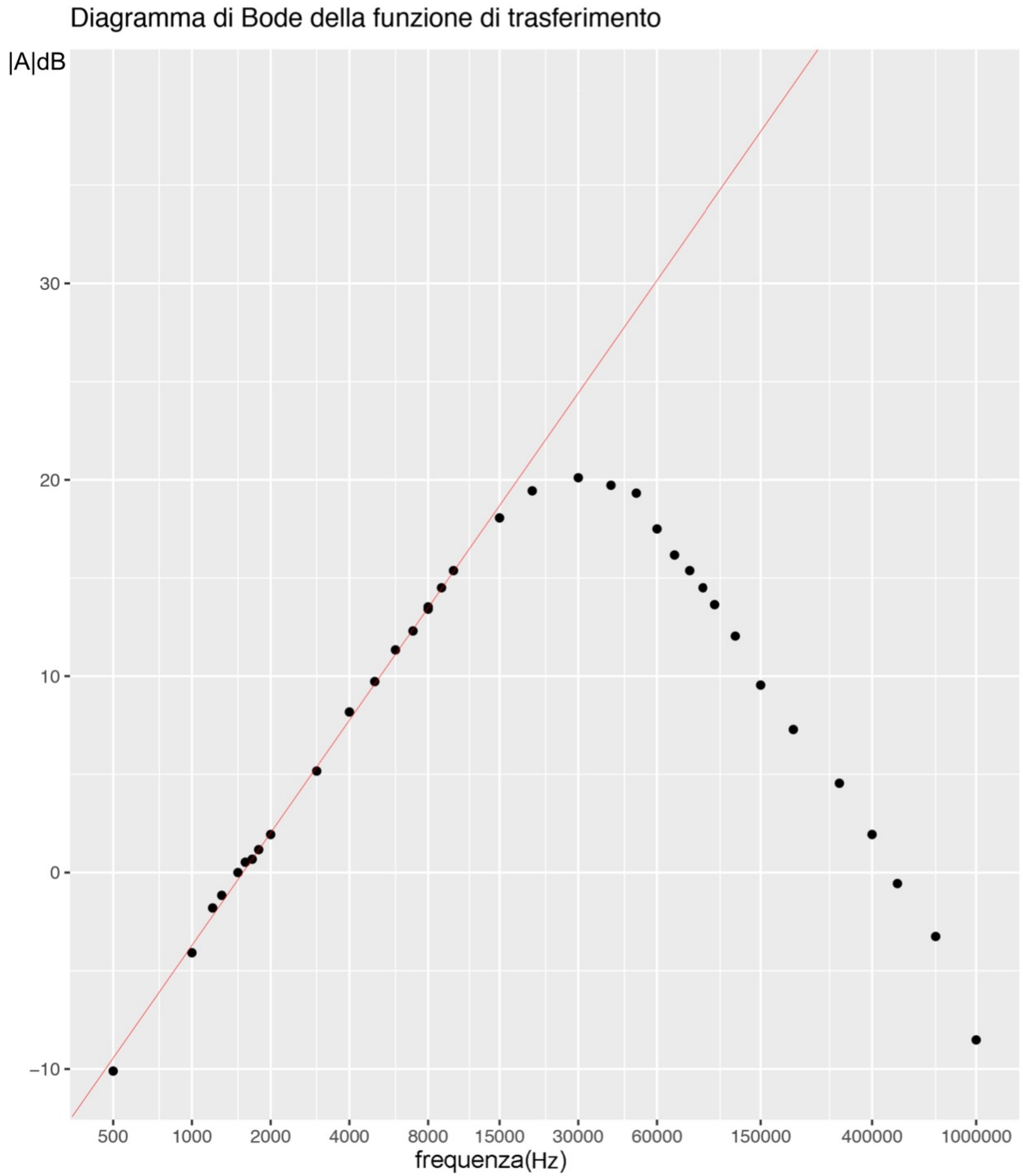


Figure 7: Diagramma di Bode dell'ampiezza in funzione della frequenza. La retta rossa rappresenta l'andamento dell'amplificazione per un amplificatore ideale: $|A| = RC\omega$.

SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Fine esercitazione 5