



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA**

Università degli Studi di Brescia

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

Corso di Laurea magistrale in Ingegneria Elettronica

PROGETTO DI SISTEMI ELETTRONICI ANALOGICI

**Circuito per la generazione del tono
(sinusoidale a frequenza variabile) per Theremin**

Progetto n°17

Autori:

Luca Brescia

Matricola 706005

Simone Pezzottini

Matricola 89521

Indice

Obiettivo	2
1 Scelta dei componenti	3
1.1 Amplificatori operazionali LF353, LF356 e uA741	3
1.2 Oscillatore monolitico XR2206	4
1.3 Moltiplicatore analogico AD633	4
2 Scelte progettuali	7
2.1 VCO	7
2.2 Oscillatore sinusoidale di Wien	8
2.3 Moltiplicatore analogico	10
2.4 Filtro LP del quarto ordine	10
3 Risultati sperimentali	12
3.1 XR2206	12
3.2 Oscillatore di Wien	12
3.3 AD633	14
3.4 Filtro passa basso di ordine 4	15
3.5 uA741	17
3.6 Theremin	18
3.7 Problematiche	18
4 Conclusioni	20

Obiettivo

Realizzazione di un tono a frequenza variabile nello spettro delle frequenze udibili [$20Hz - 20kHz$] utilizzando un VCO e una capacità variabile con il movimento di una mano seguendo lo schema a blocchi mostrato in *Figura 1*. Il segnale modulato avrà un range di frequenze elevato, di conseguenza andrà mixato ad una sinusoide a frequenza determinata, per riportare lo spettro del segnale nel range delle frequenze udibili, e opportunamente filtrato per eliminare le componenti indesiderate.



Figura 1: Schema generale di funzionamento di un circuito per la realizzazione di un tono.

In generale lo schema richiesto per la realizzazione del progetto potrebbe essere il seguente:



Figura 2: Shema a blocchi generale del progetto

Capitolo 1

Scelta dei componenti

I blocchi minimi necessari alla realizzazione di questo progetto sono:

1. Oscillatore controllato in tensione (*VCO*);
2. Moltiplicatore analogico;
3. Oscillatore a frequenza fissata;
4. Filtro passa basso.
5. Prova di una modifica.

La scelta dei componenti è stata fatta considerando le caratteristiche del segnale da generare. In particolare, volendo realizzare uno shift in frequenza, vi è la necessità di lavorare con integrati con una banda passante adeguata. Avendo a disposizione una serie limitata di componenti si è deciso di utilizzare i seguenti:

1. l'oscillatore monolitico XR2206 come VCO;
2. Il moltiplicatore analogico AD633 per lo shift frequenziale;
3. L'amplificatore operazionale *LF356N* per la realizzazione dell'oscillatore a ponte di Wien per la generazione di una sinusoide di riferimento;
4. L'amplificatore *LF356P* per la realizzazione di filtro passa basso.
5. L'amplificatore *UA741* per la realizzazione dei filtri passa alto.

1.1 Amplificatori operazionali LF353, LF356 e uA741

La scelta di questi componenti tra quelli disponibili è stata fatta principalmente per le bande bassanti dei dispositivi.

Sono necessari componenti a banda elevata poiché, come risulta dal capitolo 3.3, si deve lavorare con frequenze dell'ordine delle centinaia di kHz.

Infatti le bande in gioco sono di circa 3MHz per LF353P mentre 5MHz per LF356N. Ad esempio, l'UA741 ha una GBP di 1 MHz tipico. I primi due operazionali sono stati scelti per:

1. LF356N per l'oscillatore armonica fondamentale
2. LF353P per il filtro passa basso del 4o ordine.

Importante osservare che l'LF353P ha al suo interno due amplificatori operazionali per cui è stato scelto per la realizzazione del filtro del 4o ordine in modo da ridurre il numero di integrati per la realizzazione del dispositivo. Inoltre, l'LF356N, avente una GBP maggiore (5MHz), permette di generare sinusoidi con un range di frequenze maggiore, altro motivo per cui si sono scelti i componenti come spiegato sopra. L'UA741 viene impiegato come filtro attivo passa alto del primo ordine (*ecomplificatorefinale*) per togliere le componenti inferiori a 10Hz come richiesto dal progetto e sfruttare contemporaneamente la banda passante ridotta del dispositivo al fine di attenuare le alte frequenze indesiderate.

I motivi per cui le frequenze in gioco risultino essere elevate sono indicate nel capitolo 3.3.

1.2 Oscillatore monolitico XR2206

Si è scelto di utilizzare XR2206 perchè permette la generazione di diverse forme d'onda sinusoidali, onde quadre, rampe, onde triangolari ed impulsi garantendo un'alta precisione, stabilità e distorsione. L'ampiezza e la frequenza dei segnali in uscita è direttamente modulabile dall'integrato, gestendo opportunamente gli ingressi. La gamma di frequenze generabili va dai 0.01 Hz a 1 MHz , quindi perfetto per le specifiche richieste dal progetto. In *Figura 1.1* è mostrato lo schema a blocchi del componente.

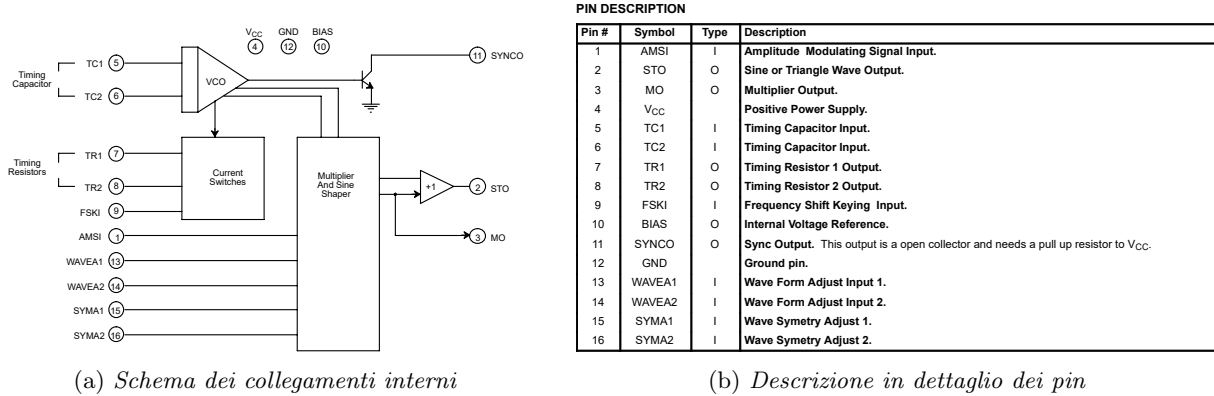


Figura 1.1: Schema a blocchi dell'oscillatore monolitico XR2206

La frequenza di oscillazione può essere determinata agendo sulla capacità o sulla resistenza equivalente collegate ai pin opportuni del componente, come riportato nel capitolo 2.

1.3 Moltiplicatore analogico AD633

La scelta del moltiplicatore analogico o mixer è stata obbligata in quanto non erano presenti altri componenti del genere a disposizione. Tuttavia garantisce delle buone prestazioni permettendo di restare nelle specifiche di progetto. Infatti, possiede elevate impedenze d'ingresso sia sugli ingressi differenziali X e Y , che sull'ingresso sommatore Z . Una bassa impedenza d'uscita che permette quindi di disaccoppiare la parte a monte del circuito con quella che si trova a valle. Lavora con una larghezza di banda pari ad 1 MHz e uno slew rate pari a 20 $V/\mu S$. Si può notare, come mostrano in figura 1.2, che il componente inizia a tagliare ad una frequenza inferiore rispetto alla banda passante teorica indicata, tagliando intorno ai 500 kHz . Tuttavia, dal punto di vista teorico, questo non impone una limitazione ai fini del progetto.



Figura 1.2: Banda passante del moltiplicatore analogico AD633

La figura 1.3 mostra sia il pinout che lo schema blocchi interno dell'*AD6333*. Il segnale in uscita dal mixer si calcola con la seguente formula:

$$W = \frac{(X1 - X2)(Y1 - Y2)}{10[V]} + Z \quad (1.1)$$

Come si può notare dalla formula in segnale viene attenuato di un fattore 10 V , quindi sarà necessaria una compensazione negli stadi successivi.

Analizzando il caso che gli ingressi X2, Y2 e Z collegati a massa, ovvero che diano contributo nullo. L'equazione 1.1 diventa:

$$W = \frac{X1 * Y1}{10[V]} \quad (1.2)$$

Ora si consideri che i due ingressi siano sinusoidali:

$$X1 = A \sin(\omega_1 t + \varphi_1) \quad (1.3)$$

$$Y1 = B \sin(\omega_2 t + \varphi_2) \quad (1.4)$$

$$W = \frac{AB}{2} [\cos((\omega_1 - \omega_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2)) - \cos((\omega_1 + \omega_2)t + (\varphi_1 + \varphi_2))] \frac{1}{10|V|} \quad (1.5)$$

Aggiungendo l'ipotesi che le due sinusoidi abbiano fase nulla la formula 1.5 diventa:

$$W = \frac{AB}{2} [\cos((\omega_1 - \omega_2)t) - \cos((\omega_1 + \omega_2)t)] \frac{1}{10|V|} \quad (1.6)$$

Si nota quindi che all'uscita del mixer si avrà un segnale dato dalla combinazione delle due sinusoidi in ingresso, le cui componenti spettrali saranno date una dalla somma delle componenti spettrali delle singole e l'altra dalla loro differenza. Quindi inserendo un opportuno filtro passa basso si va a selezionare solo la componente spettrale d'interesse, ovvero quella compresa tra 20 Hz e 20 kHz .

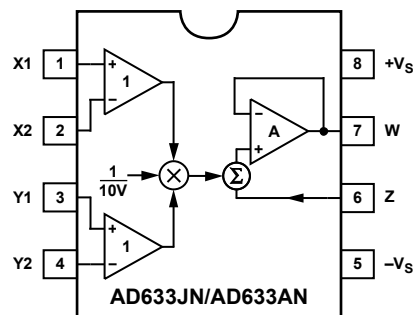


Figura 1.3: PinOut e schema a blocchi dell'AD633

Capitolo 2

Scelte progettuali

Nella realizzazione di questo progetto si deve prestare particolare attenzione allo spettro del segnale di uscita. Nello specifico, si deve valutare la distorsione armonica totale (*THD*) della sinusoide di uscita osservando quanto le armoniche indesiderate, anche generate da disturbi intrinseci del sistema, influiscano sulle performance del dispositivo. Per ridurre l'effetto di armoniche a frequenza esterna alla banda udibile si è scelto di introdurre cascate di filtri passa alto e passa basso in modo da cercare un insieme di filtri passa-banda che producano un effetto accettabile per l'esperienza. Di seguito è riportato lo schema a blocchi del sistema:

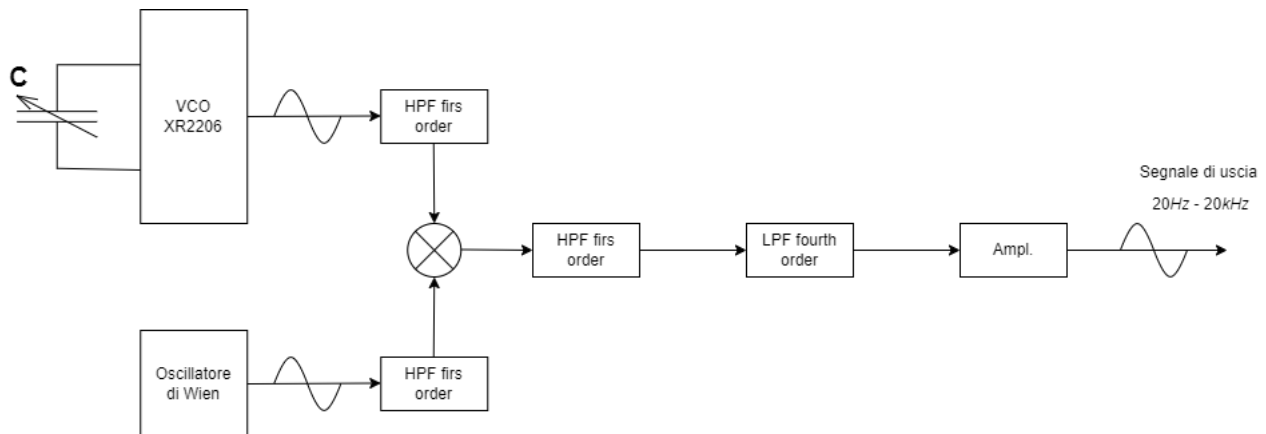


Figura 2.1: Schema a blocchi del sistema realizzato

Nelle sezioni successive vengono analizzate singolarmente le scelte effettuate per ogni singolo blocco del sistema.

2.1 VCO

Il VCO, *Voltage Controlled Oscillator*, è un generatore di segnali che modifica la frequenza di oscillazione del segnale generato in funzione della tensione applicata al suo ingresso.

In relazione all'integrato utilizzato, il cui schema interno è riportato in figura *Figura 2.2*, la frequenza di oscillazione f_0 viene controllata da una capacità esterna C , detta capacità di *timing* collegata tra i *pin5* e *pin6* e dalla resistenza R posta in ingresso ai *pin7* e *pin8*. Essa viene calcolata come:

$$f_0 = \frac{1}{RC} \quad (2.1)$$

Regolando il valore di R , dato dalla somma di $R_1 + 1k\Omega$, e di C , si imposta a piacere la frequenza di oscillazione. Nel progetto si è scelto di utilizzare una resistenza R fissa in quanto si ha una capacità variabile per la regolazione della frequenza.



Figura 2.2: Schema a blocchi interno dell'oscillatore monolitico XR2206

Dal datasheet, per garantire una buona stabilità in temperatura, viene consigliato di utilizzare valori di R compresi tra $4k\Omega < R < 200k\Omega$ e valori di C compresi tra $1\mu F < C < 100\mu F$.

Dal momento che la capacità risulta variabile, in quanto dipendente dalla posizione della mano dell'utente e dalla geometria dell'antenna realizzata, si è scelta una R di $100k\Omega$ per cercare di rispettare, almeno in parte, il range fornito dal datasheet per garantire una buona stabilità in temperatura.

2.2 Oscillatore sinusoidale di Wien

Per la realizzazione di un segnale sinusoidale a frequenza fissata si è scelto di utilizzare un oscillatore a ponte di Wien auto-avviante, il cui schema è riportato in *Figura 2.3*



Figura 2.3: Schema generale di un oscillatore a ponte di Wien auto-avviante.

Analizzando la *f.d.t* del circuito si osserva che il prodotto $A \cdot B$ deve essere 1, quindi un numero reale. Il blocco di forward A è rappresentato dal guadagno del circuito ovvero:

$$A = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (2.2)$$

Mentre, in presenza di R e C di valore unico, il blocco di feedback B è rappresentato dall'equazione:

$$B = \frac{1}{3 + j\omega CR - j\frac{1}{\omega CR}} \quad (2.3)$$

Per l'innescio delle oscillazioni è necessario che il guadagno ad anello aperto sia inizialmente $A \cdot B > 1$ ed $A > 3$ per poi assestarsi a $A \cdot B = 1$ ed $A = 3$. La tecnica più semplice consiste nel disporre due diodi in antiparallelo lungo l'anello di retroazione dell'OpAmp.

Quando V_O è bassa i diodi presentano un'alta resistenza differenziale mentre all'aumentare di V_O essa diminuisce.

Per rispettare le condizioni di lavoro imposte, il guadagno A può essere posto, circa, all'85% del suo valore nominale ($A=2,5 - 2,55$) così si fa in modo che $A > 3$ all'avvio che poi si riduce ad $A=3$ a regime.



Figura 2.4: FFT della sinusoide a 295kHz in uscita dall'oscillatore acquisita tramite oscilloscopio

Per la valutazione della distorsione della sinusoide ottenuta si utilizza il calcolo del THD riportato nell'equazione:

$$THD(\%) = 100 \cdot \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (2.4)$$

Tutti i valori di tensione devono essere in RMS:

$$V_{RMS} = \frac{V}{\sqrt{2}} \quad (2.5)$$

La presenza di un THD più o meno buono si manifesta con un andamento della sinusoide di uscita più o meno ideale. L'aggiunta di nuove armoniche può essere causata dalla sensibile alle temperature dell'oscillatore di Wien, che porta anche ad una variazione delle ampiezze. Un'altra possibile fonte di disturbi e/o distorsioni potrebbe essere la saturazione dell'amplificatore utilizzato per realizzare l'oscillatore, oltre che altre fonti esterne.

2.3 Moltiplicatore analogico

Alla moltiplicazione di due segnali nei tempi corrisponde la convoluzione degli stessi in frequenza. Questo porta ad ottenere due sinusoidi centrate a frequenza $\omega_1 + \omega_2$ e $\omega_1 - \omega_2$.

In *Figura 2.5* viene mostrato il risultato ottenuto moltiplicando la sinusoide ottenuta precedentemente *Sezione 2.2* con l'oscillatore di Wien, avente una ω_0 di 45kHz, e una sinusoide generata dal generatore di funzione ad una frequenza di 20 kHz.



Figura 2.5: FFT del segnale in uscita dall'AD633, con test tra Oscillatore di Wien avente $\omega_0 = 45\text{kHz}$ 12V picco e generatore di funzione con segnale 20 KHz e 2.5V picco.

Essendo i due segnali in gioco di 20kHz e 45kHz, dalla *Figura 2.5* si può notare come vengano generate due sinusoidi aventi armoniche fondamentali a $(45 - 20)\text{kHz}$ e $(45 + 20)\text{kHz}$.

Inoltre, le ampiezze rilevate risultano in linea con i risultati teorici in quanto l'ampiezza di picco dei due segnali in gioco è di 12V e 2.5V rispettivamente, che vengono moltiplicate tra loro e divise di un fattore 10 come specificato nel datasheet del componente. Si nota anche come le due ampiezze non siano uguali: questo è un errore dovuto alla non-linearità del componente. Tuttavia, per la nostra applicazione questo errore è irrilevante in quanto interessa maggiormente la componente armonica del segnale.

2.4 Filtro LP del quarto ordine

Il prodotto di due sinusoidi del mixer porterà in uscita due sinusoidi a frequenze diverse ovvero una sarà $\omega_{wien} + \omega_{VCO}$ e l'altra a $\omega_{wien} - \omega_{VCO}$. Per rientrare nelle specifiche di progetto, è stato necessario introdurre un filtro passa-basso (LP) tale che permettesse di avere in uscita solo la componente armonica $\omega_{wien} - \omega_{VCO}$.

Volendo un filtro molto selettivo e visto che il componente *LF353P* ha al suo interno due amplificatori, si è scelto di utilizzare un filtro attivo di ordine 4. Realizzandolo tramite un filtro di Chebyshev con due celle Sallen-Key in casacata.



Figura 2.6: Filtro attivo di ordine 4.

Dove la sua risposta teorica in frequenza del modulo del filtro risulta essere quella riportata nel diagramma di Bode mostrato in *Figura 2.7*.



Figura 2.7: Diagramma di Bode del modulo del filtro.

La funzione di trasferimento del filtro del quarto ordine può essere visto come il prodotto in cascata delle funzioni di trasferimento delle due celle Sallen-Key del secondo ordine. La funzione della prima cella risulta:

$$H_1(s) = \frac{V_u}{V_{in}} = \frac{1}{1 + sC_1(R_1 + R_2) + s^2C_1C_2R_1R_2} \quad (2.6)$$

Mentre la funzione di trasferimento della seconda cella risulta essere:

$$H_2(s) = \frac{V_{out}}{V_u} = \frac{1}{1 + sC_3(R_3 + R_4) + s^2C_3C_4R_3R_4} \quad (2.7)$$

La funzione di trasferimento totale del filtro sarà data dal prodotto delle due funzioni di trasferimento

$$H(s) = H_1(s)H_2(s) = \frac{V_{in}}{V_u} \frac{V_u}{V_{out}} = \frac{V_{in}}{V_{out}} \quad (2.8)$$

Capitolo 3

Risultati sperimentali

3.1 XR2206

Per la realizzazione dell'armonica a frequenza variabile ci siamo appoggiati al datasheet del componente scegliendo come valori di partenza quelli mostrati in esempio.

La capacità variabile è stata realizzata con un supporto rigido e della carta di alluminio posta a bandiera. Il tutto è stato collegato come mostrato in figura.

Le prestazioni ottenute con questo tipo di antenna sono le seguenti:

3.2 Oscillatore di Wien

Il circuito finale utilizzato per realizzare l'oscillatore di Wien è quello riportato in figura 3.1.

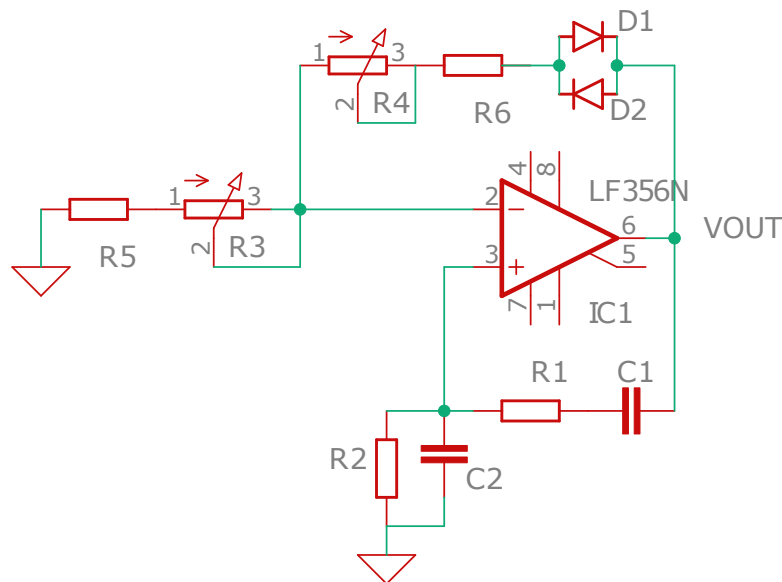


Figura 3.1: Schematico dell'oscillatore di Wien utilizzato

Si può notare che sono stati aggiunti due potenziometri, $R3$ e $R4$ rispettivamente, del valore $1k\Omega$, in serie alle resistenze $R5$ e $R6$ del valore di $1k\Omega$. Tale scelta è stata fatta per accordare l'oscillazione del segnale e ridurre quindi la distorsione armonica. Tuttavia si è notato che la presenza di questi ultimi può portare alla perdita dell'oscillazione stessa, in quanto se i due potenziometri hanno valori simili l'oscillazione scompare. Grazie ai potenziometri, si ha la possibilità di sbilanciare il ponte rendendo possibile l'avviarsi dell'oscillatore ottenendo un'oscillazione stabile e con una possibilità di regolazione.

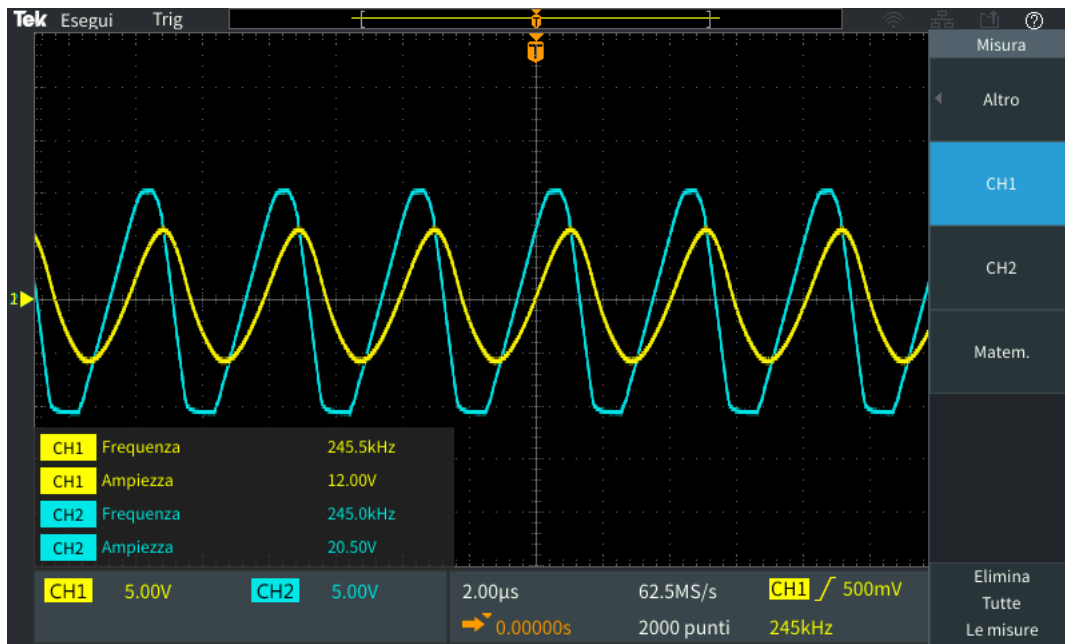


Figura 3.2: Confronto tra i segnali in uscita dall'oscillatore di Wien prima e dopo il fitro BP in cascata.

La figura 3.2 mostra l'uscita dell'oscillatore di Wien. In azzurro si può notare che la sinusoide satura sulla parte negativa e la pendenza di salita a discesa sono differenti, questo è dovuto allo sbilanciamento dei due potenziometri. L'insieme di questi due fattori porta all'introduzione di altre armoniche oltre alla fondamentale, come mostrato in bianco nella figura 3.3. Per risolvere il problema è stato aggiunto un filtro passivo all'uscita dell'oscillatore. Il filtro è di tipo passa banda formato da un condensatore per tagliare la continua, seguito da un passa basso RC ($R = 7.5k\Omega$; $C = 100pF$; $f_c = 212kHz$). L'aggiunta del filtro porta un sostanziale miglioramento della sinusoide d'uscita. Il miglioramento è visibile sia in figura 3.2, sinusoide gialla, dove si vede l'assenza di saturazione e fronti di salita e discesa pressoché identici, che in figura 3.3 dove si nota la notevole riduzione delle armoniche nello spettro del segnale.

Tuttavia, l'aggiunta del filtro porta ad un'attenuazione anche dell'armonica fondamentale e ad uno sfasamento di 90° in ritardo rispetto alla sinusoide originale. L'attenuazione è dovuta alla scelta della frequenza di taglio del filtro ($212kHz$), quindi il filtro inizia a tagliare circa $20/30kHz$ prima della fondamentale dell'oscillatore di Wien che risulta essere a $245kHz$. Lo sfasamento invece è dovuto al filtro del primo ordine passivo.

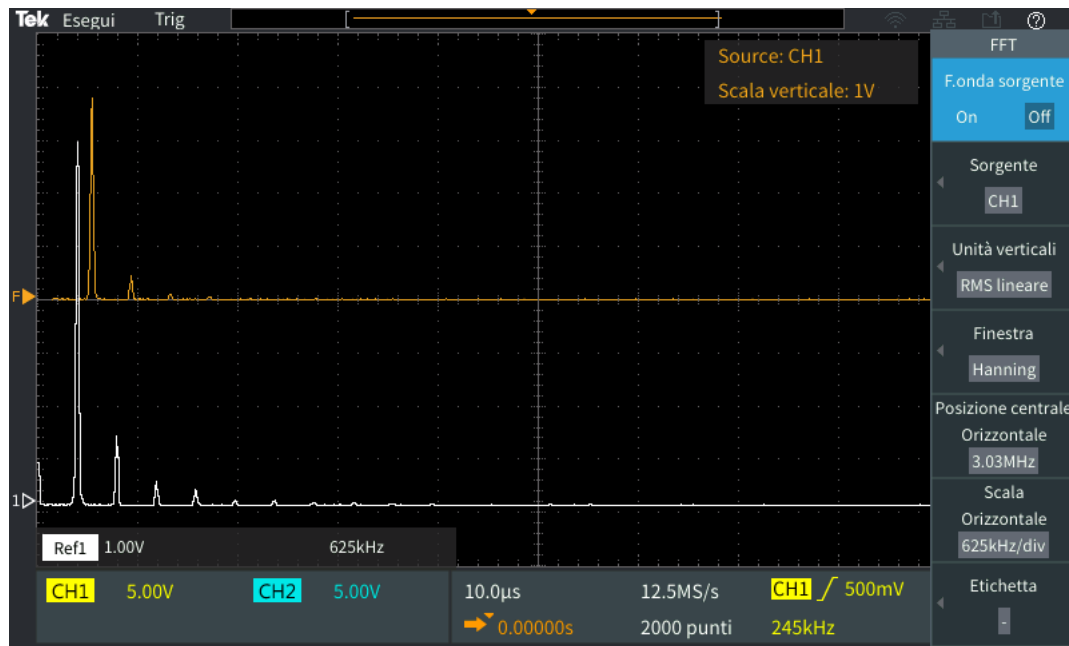


Figura 3.3: Confronto tra le FFT del segnale in uscita dall'oscillatore di Wien prima e dopo il filtro BP in cascata.

3.3 AD633

L'AD633 rappresenta il blocco del mixer nel nostro sistema. Il suo compito è fare il prodotto tra due sinusoidi in ingresso. Le due sinusoidi sono quella di riferimento dell'oscillatore di Wien e quella in uscita dal VCO. Quest'ultima sarà variabile e dipenderà dalla distanza della mano rispetto all'altro estremo della capacità variabile (banderuola in alluminio). Il circuito dell'oscillatore è mostrato in figura xxxxx

Una delle problematiche riscontrate durante l'utilizzo del mixer è stata la comparsa di un offset in continua dovuto all'impossibilità degli ingressi di scaricare le correnti di bias, correnti in continua, verso massa. Questo ha portato alla comparsa di offset negativo e allo smorzamento delle altre armoniche presenti in uscita, come mostra la figura xyz.

Il problema è stato risolto ponendo una resistenza di valore $680k\Omega$ agli ingressi del mixer e portandoli verso massa. La scelta di tale valore è stata condizionata dal fatto che si deve garantire un compromesso tra l'ingresso ad alta impedenza dell'AD633 e il partitore che si forma con la resistenza del filtro che produrrebbe un'attenuazione del segnale in ingresso. Il resistore scelto evita un'attenuazione del segnale e salvaguarda l'alta impedenza del componente. Il risultato è mostrato in figura blabla. Dove è possibile vedere le due armoniche fondamentali che vengono a formarsi dal prodotto di due sinusoidi, esattamente come ci si aspetta dalla teoria. Cosa che non accade in figura xyz, ovvero prima che venissero messe le resistenze.

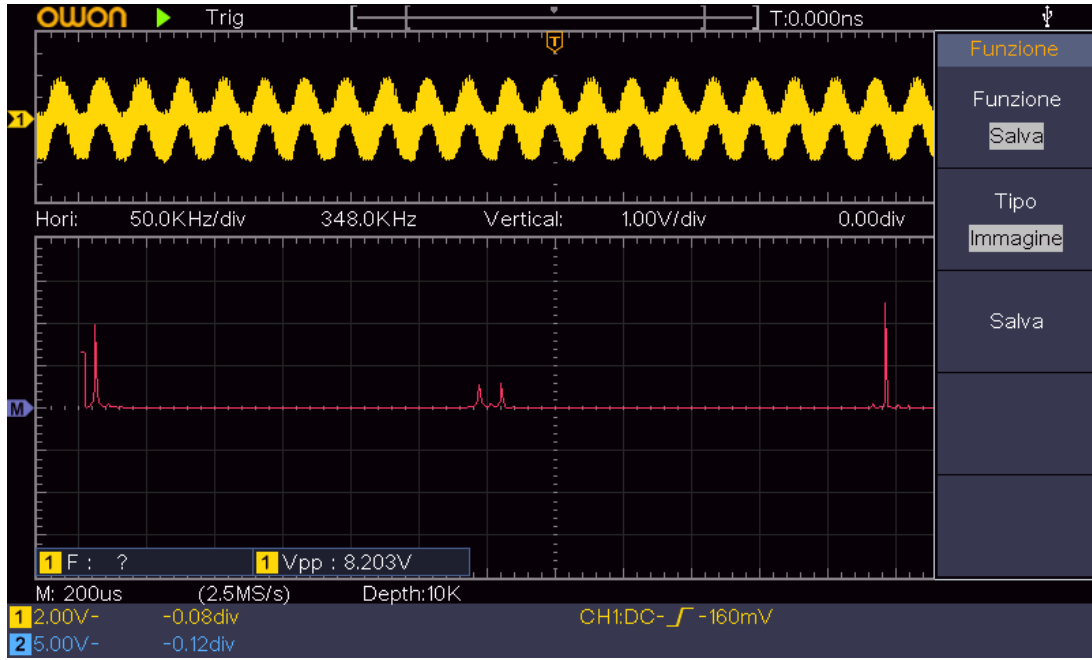


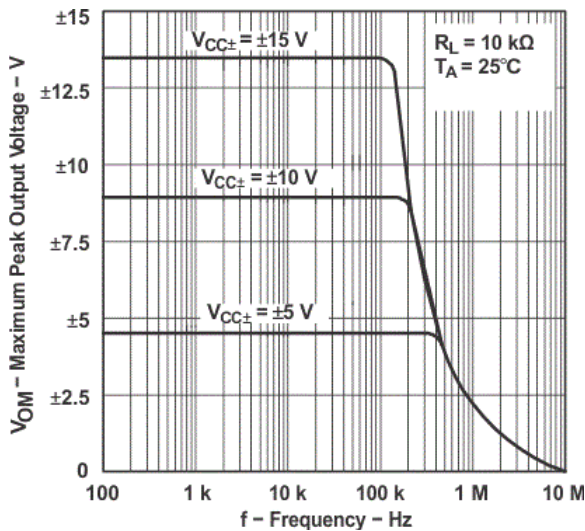
Figura 3.4: FFT in uscita dall'AD633 con fondamentale a 300k

3.4 Filtro passa basso di ordine 4

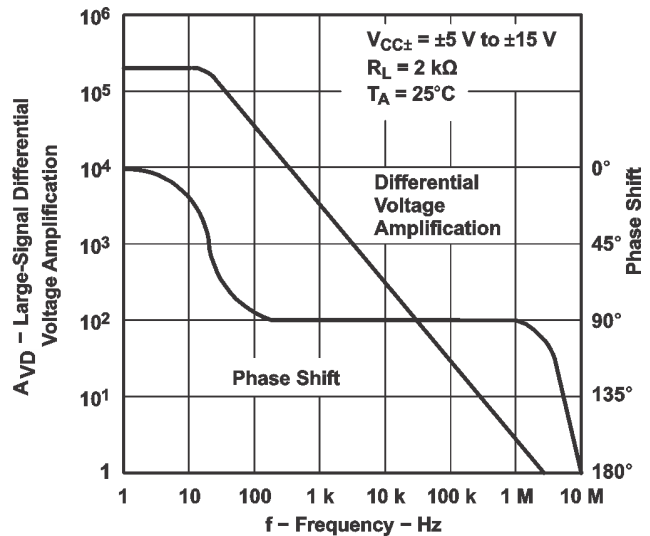
In uscita dal mixer è stato necessario inserire un filtro passa basso per eliminare le frequenze superiori ai 20kHz , come richiesto da specifica di progetto. Esso è necessario per eliminare le componenti date dalla somma delle frequenze in uscita al mixer risultanti dall'equazione. Infatti, dati due segnali del tipo $V_1 = A_1 \cdot \sin(\omega_1 t)$ e $V_2 = A_2 \cdot \sin(\omega_2 t)$, il segnale risultante dalla moltiplicazione analogica tra i due sarà dato dall'equazione 3.1:

$$V_m = V_1 \cdot V_2 = \frac{A_1 A_2}{2} [\sin((\omega_1 + \omega_2)t) + \sin((\omega_1 - \omega_2)t)] \quad (3.1)$$

La figura 3.5 mostra il comportamento in frequenza dell'LF353P, ovvero il componente utilizzato per la realizzazione del filtro passa basso di ordine quattro.



(a) Didascalia figura



(b) Didascalia figura

Figura 3.5: Diagrammi di bode del componente LF353P in anello aperto

La scelta di un filtro del quarto ordine è stata fatta sia per garantire un'attenuazione sufficiente delle armoniche successive ai 20kHz sia perché l'LF353P contiene al suo interno due operazionali. Quindi per evitare di lasciare flottanti dei pin che sarebbero potuti diventare una fonte aggiuntiva di rumore, si è deciso di utilizzare il componente al meglio delle possibilità. L'andamento del filtro ottenuto è mostrato in figura 3.6, la quale mostra che le scelte progettuali sono state corrette, in quanto i dati sperimentali rispecchiano l'andamento teorico del filtro. Come si può osservare in figura 3.6 i due andamenti sono molto simili.

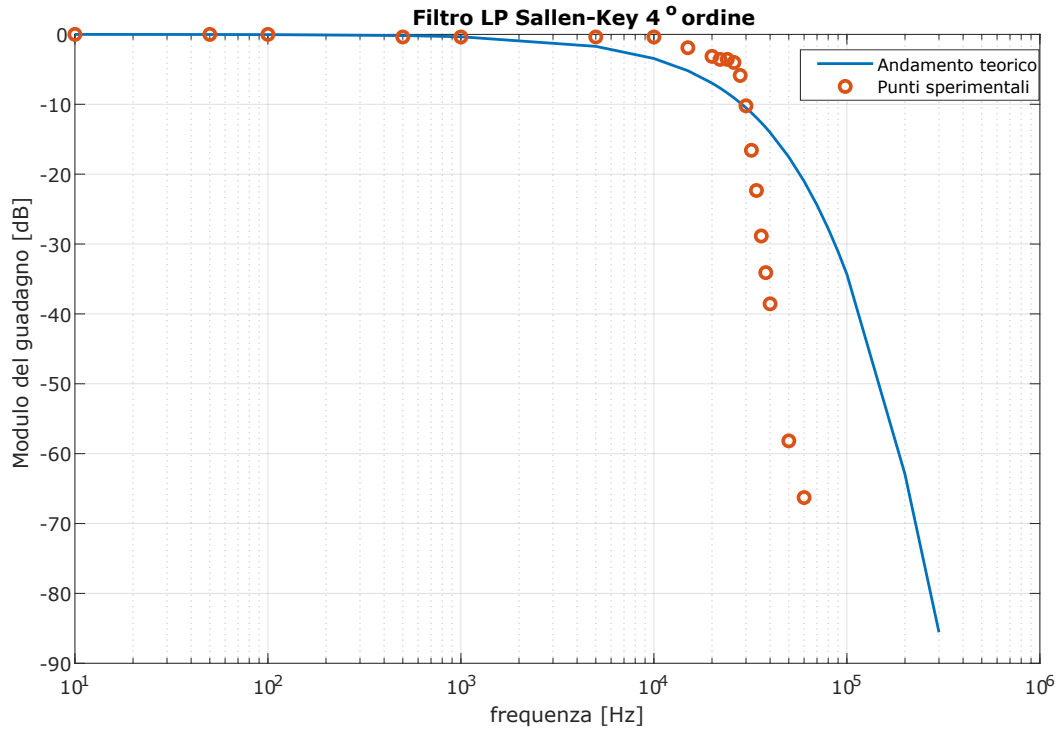


Figura 3.6: Diagramma di Bode del filtro Sallen-Key del 4° ordine

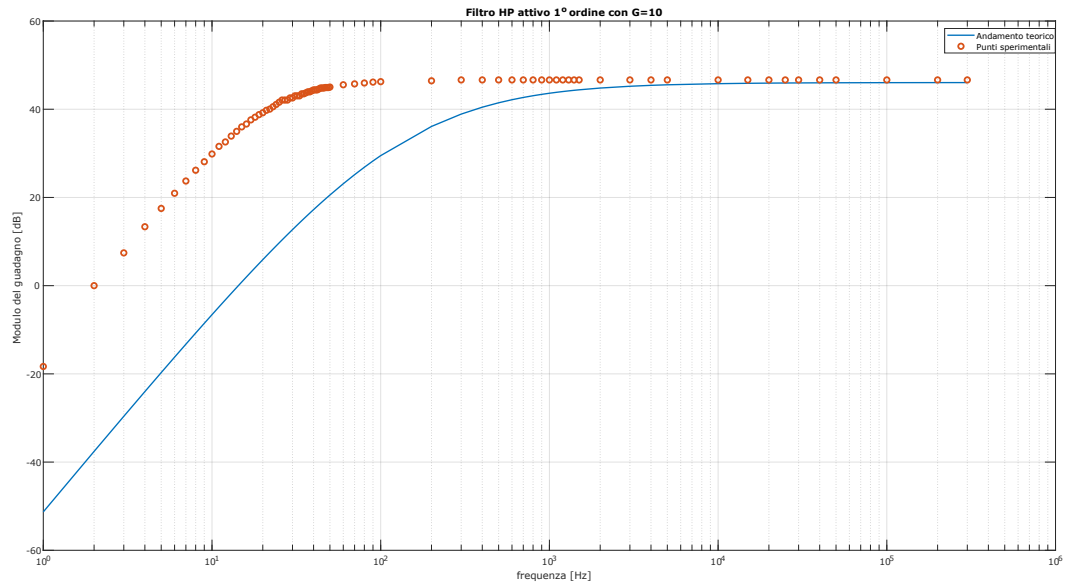


Figura 3.7: Diagramma di Bode del filtro passa alto del 1° ordine

3.5 uA741

Qua dentro ci mettiamo:

datasheet

Circuito

Risposta in frequenza bode

Giustificare che taglia a 10k perchè la banda passante dell'amplif. fa schifo

In mancanza di componenti abbiamo dovuto adattarci (in teoria ampli. spostato bode)

3.6 Theremin

3.7 Problematiche

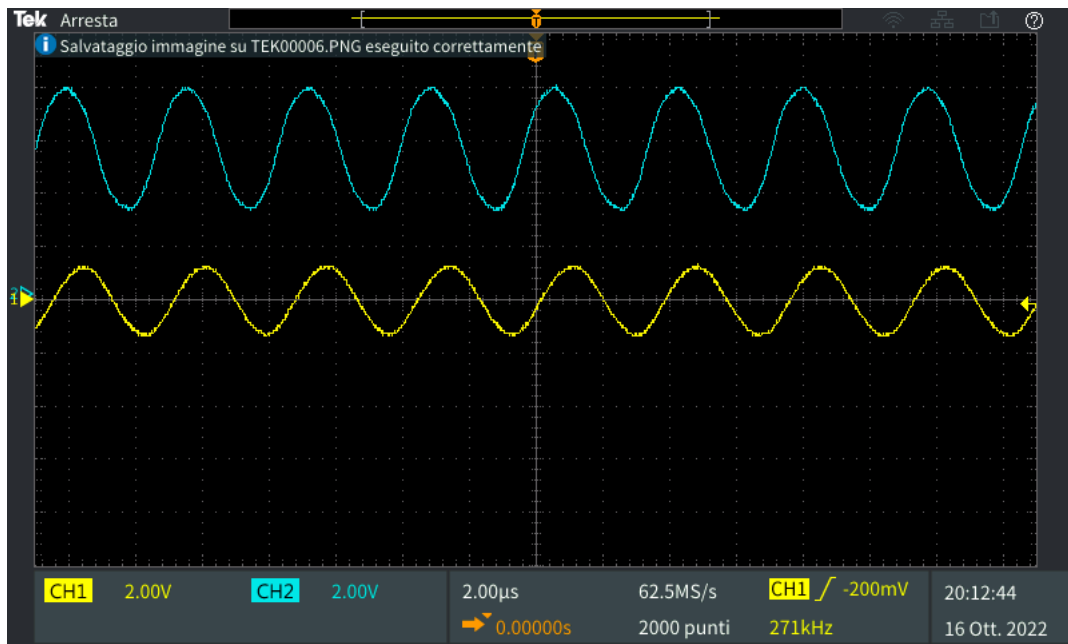


Figura 3.8: Confronto tra i segnali in uscita dall'oscillatore monolitico XR2206 prima e dopo il fitro LP in cascata.

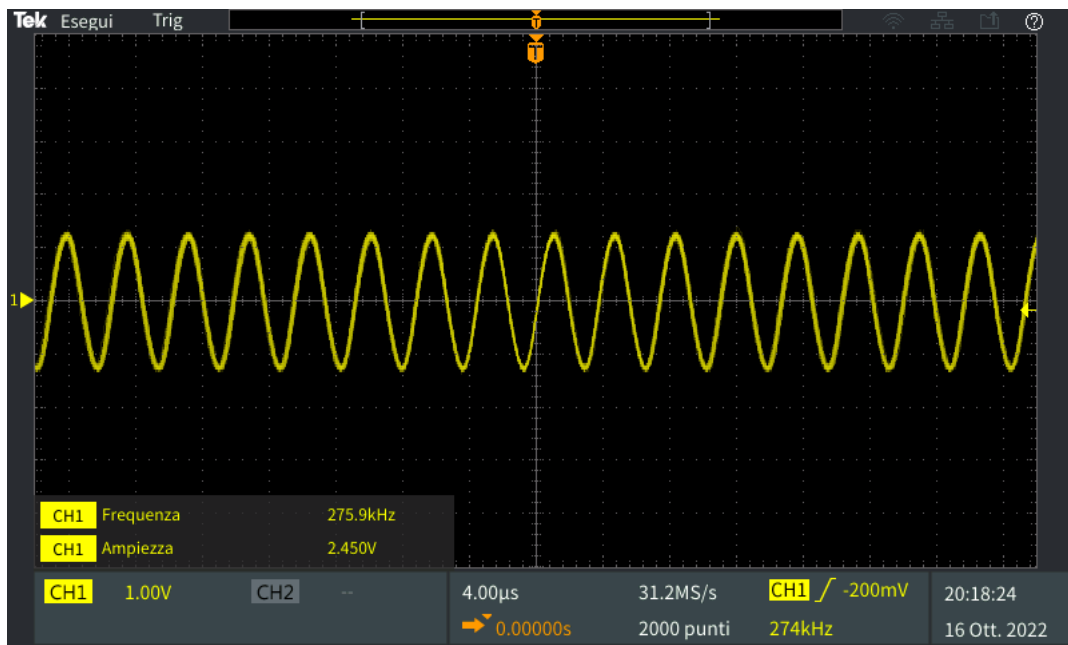


Figura 3.9: Segnale in uscita dal blocco XR2206 + LP.

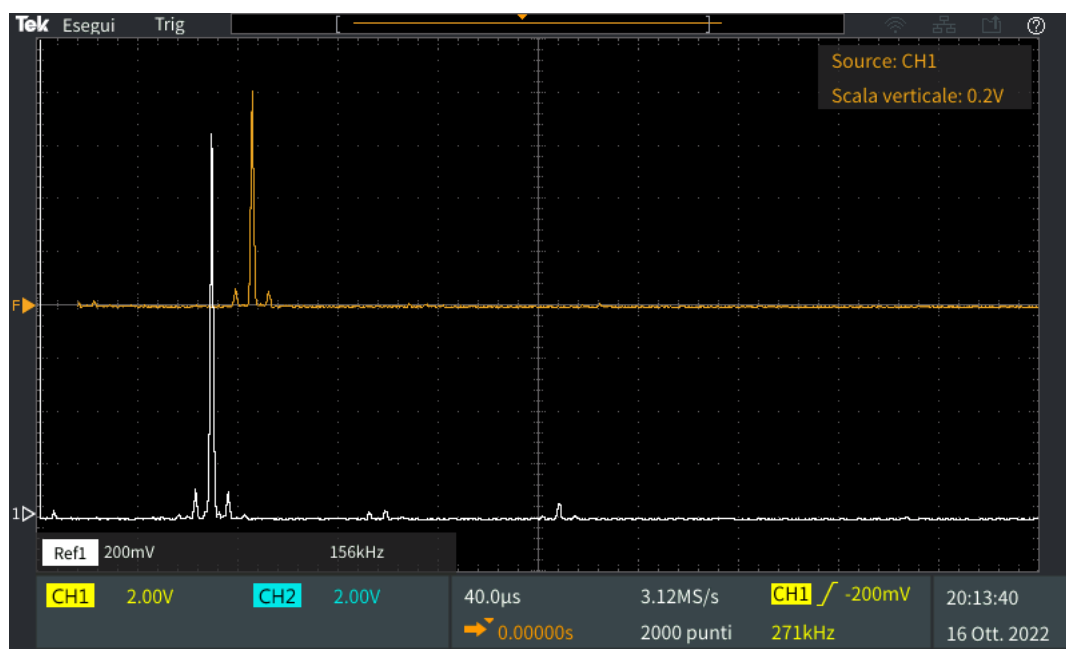


Figura 3.10: Confronto tra le FFT del segnale in uscita dall'oscillatore monolitico XR2206 prima e dopo il filtro LP in cascata.

Capitolo 4

Conclusioni

Bene questo progetto si conclude qui, *grazie a tutti!*