UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

"PROGETTAZIONE ED ANALISI DI UN SISTEMA DI AMPLIFICAZIONE AUDIO"

Relatore: Prof. Matteo Meneghini

Laureando: Thomas Jahreis

ANNO ACCADEMICO 2021 – 2022

Data di laurea 22/09/2022

Indice:

1 Introduzione

2 Componenti del circuito

3 Simulazione

3.1 Diagramma di Bode

3.2 Analisi del rumore

4 Misure in laboratorio

5 Analisi delle prestazioni

6 Conclusioni e sviluppi futuri

7 Bibliografia

1.Introduzione

Gli amplificatori audio sono dei dispositivi elettronici il cui scopo consiste nel amplificare un segnale audio a bassa tensione in uno ad una tensione più alta. I segnali in uscita possono essere dell'ordine di una decina di volt fino a centinaia di migliaia di volt per gli amplificatori più potenti necessari per particolari applicazioni, come i concerti musicali. L'amplificazione permette di pilotare un carico, normalmente una cassa, un impianto stereo o delle cuffie, che altrimenti non sarebbe possibile alimentare dato il basso voltaggio del segnale originale[1]. Lo scopo di questa tesi è quello di analizzare il funzionamento ed il comportamento di un amplificatore audio per cuffie, andando nello specifico ad osservarne la differenza tra le aspettative teoriche e la resa effettiva una volta montato fisicamente il dispositivo. Si è pertanto proceduto studiando prima il circuito tramite un apposito programma di simulazione, LTSpice, e successivamente andando in laboratorio per analizzarne le differenze rispetto alla simulazione.

2. Componenti del circuito

L'amplificatore audio studiato in questa tesi è il BA120 (vedi Figura 1.1), progettato da “The blackbird sound project” [2] un blog dedicato all'autocostruzione audio a cura di “bsproj” che si identifica come un audiofilo ed appassionato di progettazione elettronica. Il BA120 è un dispositivo ideato per il pilotaggio di cuffie fino a 32Ω: la maggioranza delle cuffie commerciali. Una volta superati i 32Ω si entra nel campo delle cuffie professionali e, data la relativa scarsità d'utilizzo, si è preferito studiare un dispositivo con una maggiore applicabilità nella vita di tutti i giorni. Il circuito fa uso di un amplificatore operazionale OPA134 [3], prodotto dalla Texas Instruments ed è un operazionale specificatamente ideato per l'utilizzo in campo audio, grazie al proprio elevato guadagno ad anello aperto di 120dB su 600Ω, la tensione di rumore a 8 nV/√Hz, l'offset d'ingresso di +-0,5mV ed una THD di circa -122dB ad anello chiuso. Vengono inoltre utilizzati due diodi di tipo LED come riferimenti di tensione a 1,8V [2] e sei transistor, di cui 3 PNP e 3 NPN. Questi ultimi sono: 2 BC337[4] e 2 BC327[5], un BD139 ed un BD140[6]. I primi sono transistor a rivestimento plastico (TO-92) non adatto a smaltire il calore, di conseguenza vengono principalmente utilizzati per piccole potenze. I BD139 e 140 sono invece transistor a media potenza, di tipo TO-126, dotati di una parete metallica, smaltiscono meglio le temperature e per questo vengono utilizzati per lo stadio d'uscita dell'amplificatore audio[7]. L'amplificatore fa inoltre uso di varie resistenze e condensatori, in particolare la resistenza R1 da 100kΩ che assorbe la tensione in ingresso, e le resistenze R5 e R2 che fungono da partitore di corrente. Lo scopo di queste ultime è quello di dimezzare la tensione in uscita che ritorna nell'operazionale, in modo da avere un guadagno di tensione in uscita di circa il doppio. Da notare che i transistor Q1 e Q6, Q3 e Q5 sono rispettivamente in configurazione Darlington, ovvero che l'emettitore dei primi (Q1 e Q3) è collegato direttamente alla base degli ultimi (Q6 e Q5). Questo permette un guadagno in corrente elevatissimo ed una resistenza d'ingresso particolarmente alta [7]. I transistor Q2 e Q4 invece fungono da limitatori di corrente, grazie ai diodi connessi alle loro basi, in modo da evitare picchi troppo elevati che potrebbero danneggiare gli altri componenti.

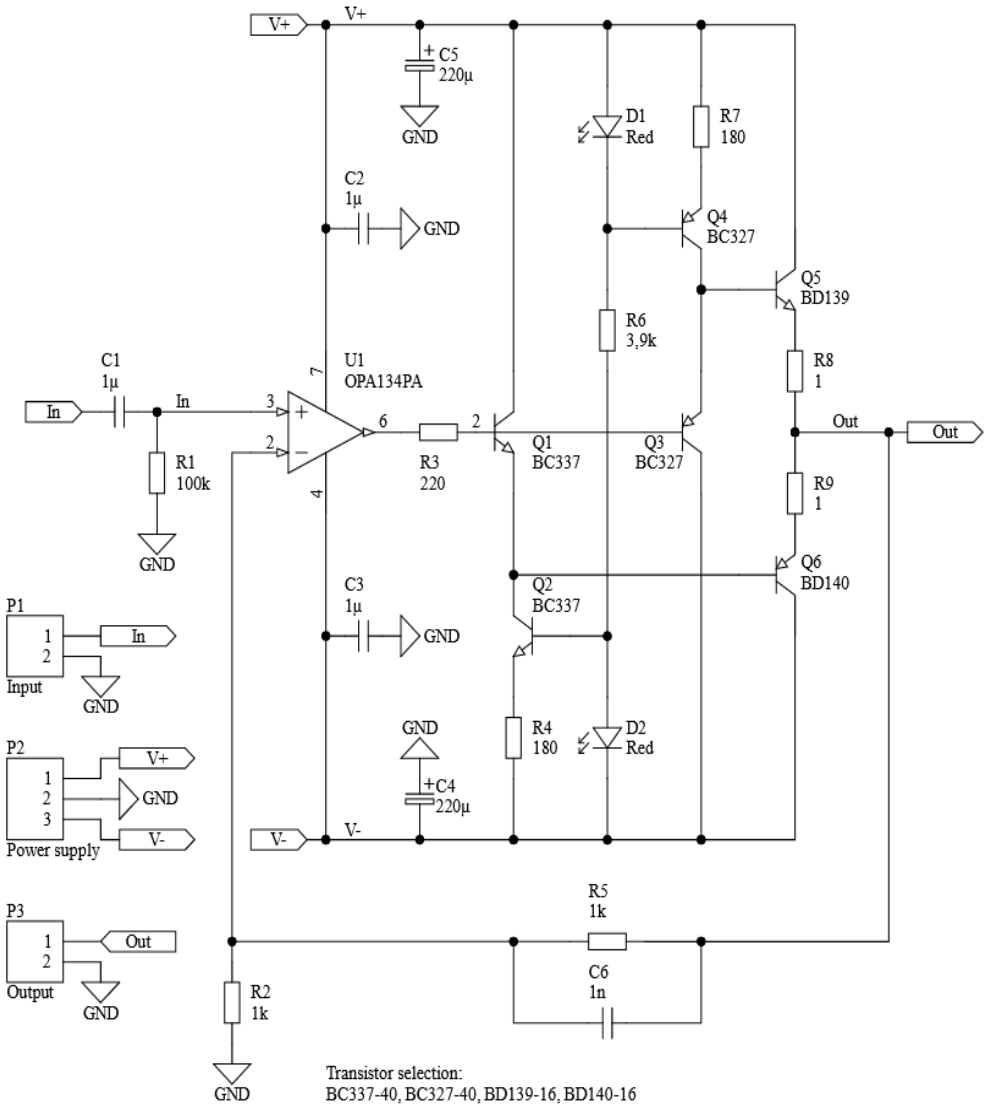

Figura 1.1: Il BA120

3.Simulazione

Per l'analisi teorica è stato utilizzato il programma LTSpice XVII, ossia la 17esima versione del programma realizzato dalla Analog Devices (originariamente dalla Linear Tecnology) basato su SPICE, un programma open source per la simulazione di circuiti. Sono state utilizzate le funzioni interne al programma per la predizione del comportamento del circuito, nello specifico sono stati analizzati il diagramma di Bode, per comprenderne il guadagno in rapporto alla frequenza e la fase, ed il rumore tramite la funzione NOISE. Come si può notare in Figura 2.1 alcuni transistor sono stati cambiati, la scelta è stata fatta per motivi di reperibilità facendo attenzione di scegliere componenti dalle caratteristiche equivalenti, in modo da non inficiare il comportamento generale. Sono stati sostituiti i BC327 ed i BC337 con , rispettivamente, i BC547B [8] ed i BC557C [9]. Così facendo si è potuto simulare l'amplificatore per ottenere dei dati direttamente paragonabili alle misure effettuate in laboratorio successivamente.

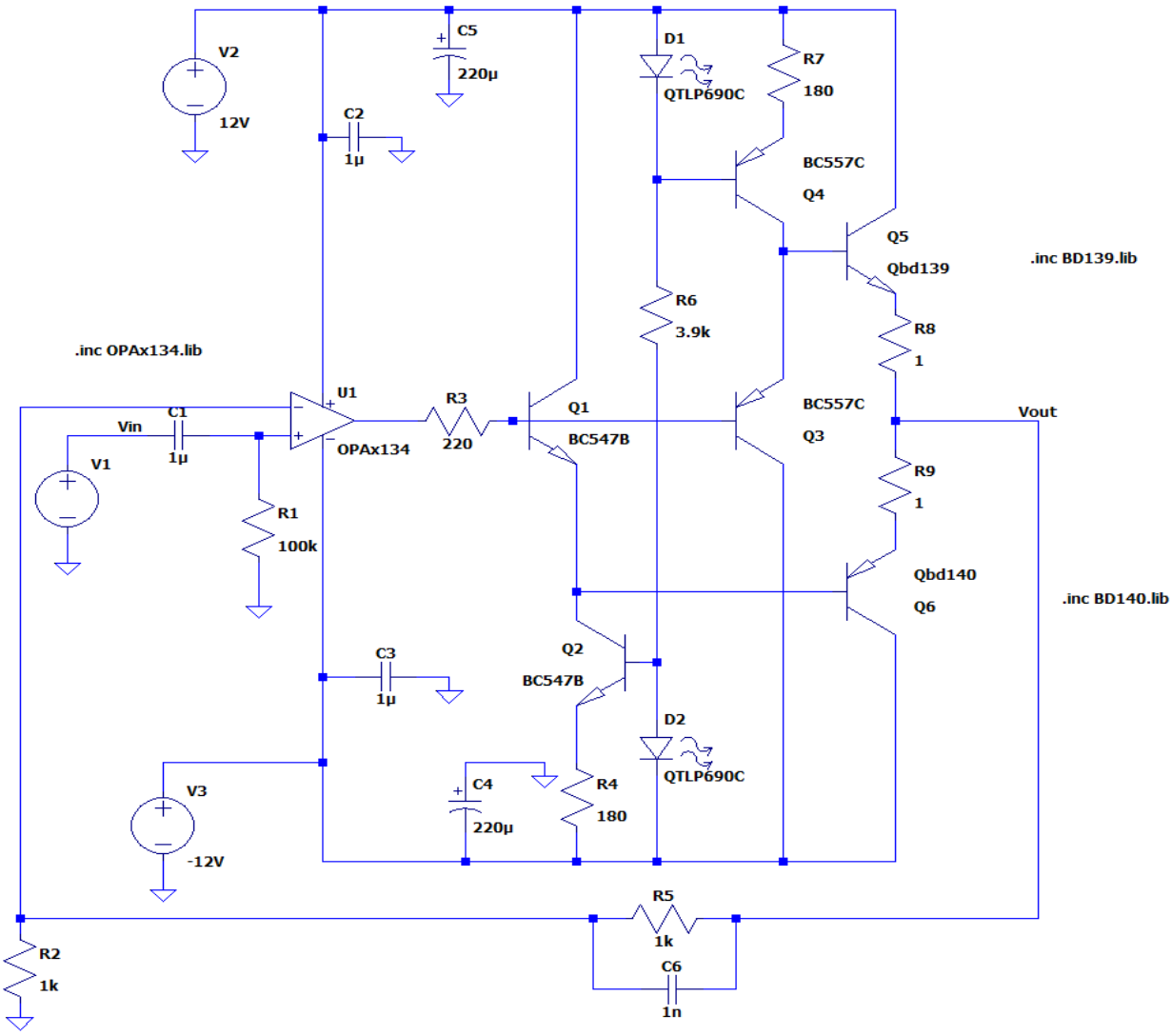

Figura 2.1: Schema del BA120 nel simulatore

3.1Diagramma di Bode

Il diagramma di Bode comprende due caratteristiche del circuito: il modulo e la fase. Il diagramma del modulo rappresenta il guadagno del circuito, ossia il rapporto tra la tensione in uscita rispetto a quella in ingresso. Questa è la principale qualità di un amplificatore audio, in quanto l'aumento di tensione in uscita permette non solo il pilotaggio di impedenze maggiori, ma una maggiore nitidezza dei suoni oltre che un volume più alto. La fase invece rappresenta la velocità di risposta dell'amplificatore audio, ossia la differenza di tempo che intercorre tra il raggiungimento di un particolare valore da parte del segnale d'ingresso rispetto al tempo del segnale in uscita. Permette quindi di capire se il circuito reagisce in anticipo o in ritardo rispetto al segnale d'ingresso. Si è ottenuto il diagramma di Bode praticando uno sweep in corrente alternata analizzando le frequenze dai 20Hz ai 500kHz. Dato che l'orecchio umano non è in gradi di percepire suoni a frequenze minori di 20Hz o maggiori di 20kHz, il resto dell'analisi è stato effettuato per apprezzare le capacità di amplificazione del BA120.

3.2Analisi del rumore

Il rumore rappresenta l'interferenza contenuta in un segnale. Esso può essere dovuto a vari fattori, come la temperatura delle componenti, dalla presenza di campi elettrici o magnetici prodotti da componenti vicine tra loro o lo stesso segnale in ingresso all'amplificatore. Può anche essere dovuto alle sorgenti di alimentazione del circuito siano esse molto rumorose. In generale il rumore è sempre presente in qualsiasi circuito elettronico, per cui è importante che esso sia sempre tenuto in considerazione e che sia il più basso possibile, specialmente nelle applicazioni audio. Un segnale audio rumoroso implica un ascolto sgradevole, caratterizzato da suoni poco nitidi e da un rumore di fondo costante nei casi più gravi. L'analisi è stata effettuata tramite la funzione noise di LTSpice, la quale pratica uno sweep delle frequenze e produce un analisi stocastica del circuito linearizzato attorno al proprio punto di funzionamento in corrente continua. Esegue quindi le seguenti formule:

$$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\eta)^2}{2\sigma^2}} \qquad R_{xx}(\tau) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T} x(t+\tau) \cdot x(t)\, dt$$

$$S_{xx}(\omega) = 2\int_0^{\infty} R_{xx}(\tau) e^{-j\omega\tau}\, d\tau \qquad V_n(\omega) = \sqrt{S_{vv}(\omega)} \quad [V/\sqrt{Hz}]$$

In pratica la funzione calcola la tensione di rumore del circuito all'aumentare della frequenza. La tensione di rumore si ottiene come il prodotto tra la trasformata di Fourier dell'autocorrelazione del rumore del segnale e la radice quadrata del delta delle frequenze considerato.

4.Misure in laboratorio

Le misure sono state effettuate nel laboratorio LED dell'edificio DEI/A, sul circuito da me realizzato (Figura 4.1). Si è utilizzata la seguente apparecchiatura: un oscilloscopio, un generatore di tensione ed un generatore di forme d'onda.

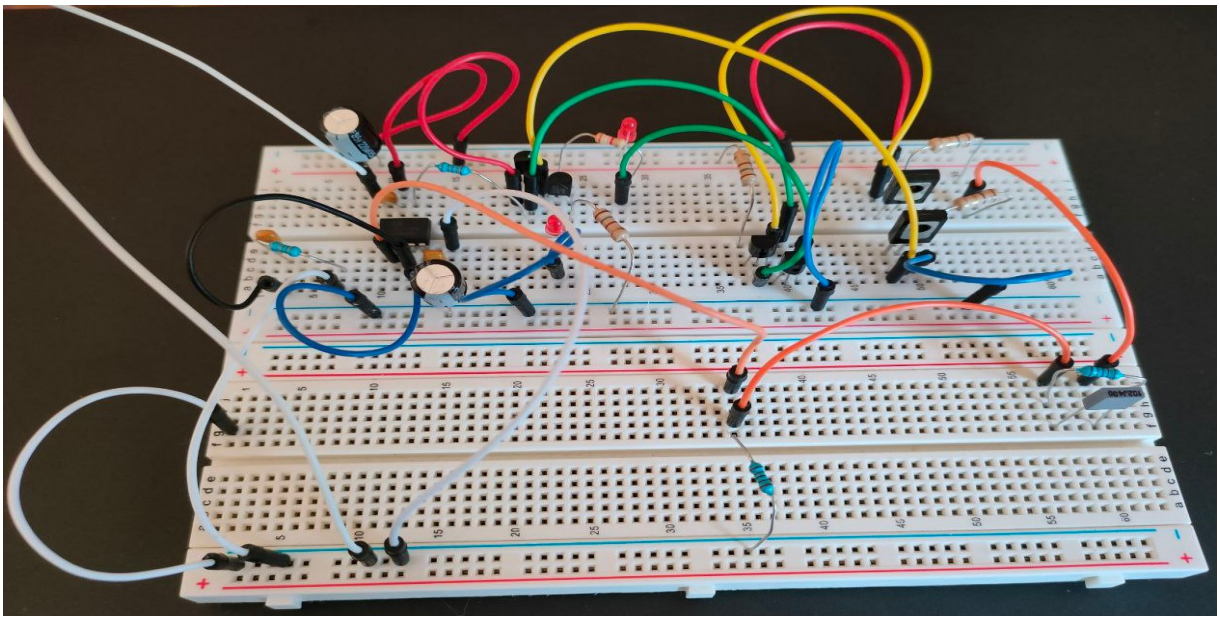

Figura 4.1: Il BA120 realizzato su breadborad

L'oscilloscopio aveva lo scopo di misurare le onde in ingresso ed in uscita, posizionando le sonde una all'uscita del circuito ed una collegata direttamente all'uscita del generatore di forme d'onda. Tramite l'oscilloscopio, è stato possibile misurare l'ampiezza dei due segnali assieme al valore di picco positivo e negativo degli stessi. Inoltre, si è misurata anche la differenza di tempo intercorsa tra il passaggio al valore zero dei due segnali, in modo da calcolarne la fase tramite la funzione:

$$ph = 360\text{x}(\Delta t / p)$$

Dove ph indica la fase dell'onda in uscita, Δt la differenza di tempo tra le due onde e p indica il periodo delle due onde. Il modulo invece è stato ottenuto tramite il rapporto tra l'ampiezza del segnale d'uscita e quella del segnale in ingresso, trasformato poi in dB.
Successivamente le misure sono state replicate connettendo all'uscita delle cuffie Sennheiser Momentum On-ear per testare la resa. Dato che le cuffie non sono impedenze puramente resistive, si è preferito utilizzarne delle reali per delle misure qualitativamente migliori. Le Momentum sono cuffie da 18Ω, con risposta in frequenza dai 16Hz ai 22kHz [10]. Di conseguenza le misurazioni effettuate con il carico sono state limitate ai 20kHz per evitare di danneggiare quest'ultimo.

5. Analisi delle prestazioni

Dall'analisi del diagramma di Bode(Figura 5.1) si può facilmente notare che il circuito si comporta come un filtro passa-basso, in cui le frequenze più basse vengono amplificate maggiormente rispetto a quelle alte. Notiamo infatti che a circa 218kHz abbiamo un calo di 3dB del modulo, ad indicare che è presente un polo nella funzione di trasferimento il quale produce un abbassamento del guadagno che arriva a 1dB a 500kHz. Nella pratica, ci si aspetta una resa efficiente in tutte le frequenze dell'udibile. Per quanto riguarda il diagramma di Bode misurato in laboratorio (vedi Tabella 5.1 e Figura 5.2) si è osservato un guadagno leggermente minore a quanto previsto, dovuto probabilmente alla non idealità dei componenti. Il divario è comunque molto piccolo, dell'ordine dei 0,1dB ed è pressoché costante nelle misurazioni. Nelle misure prese connettendo le cuffie invece (Figura 5.4 e Tabella 5.2), il guadagno si alza arrivando ai 6dB per buona parte del campo dell'udibile, eccetto i 20Hz come previsto anche dalla simulazione. Suppongo che la presenza di un carico aggiuntivo vada a sopperire alla non idealità delle resistenze presenti nel circuito, permettendo così di alzarne il guadagno. Si ha invece un calo importate del guadagno dopo i 2kHz probabilmente dovuto all'aggiunta di un polo nella funzione di trasferimento da parte delle cuffie, che, come anticipato, non si comportano solo come carico puramente resistivo ma anche induttivo e capacitivo.

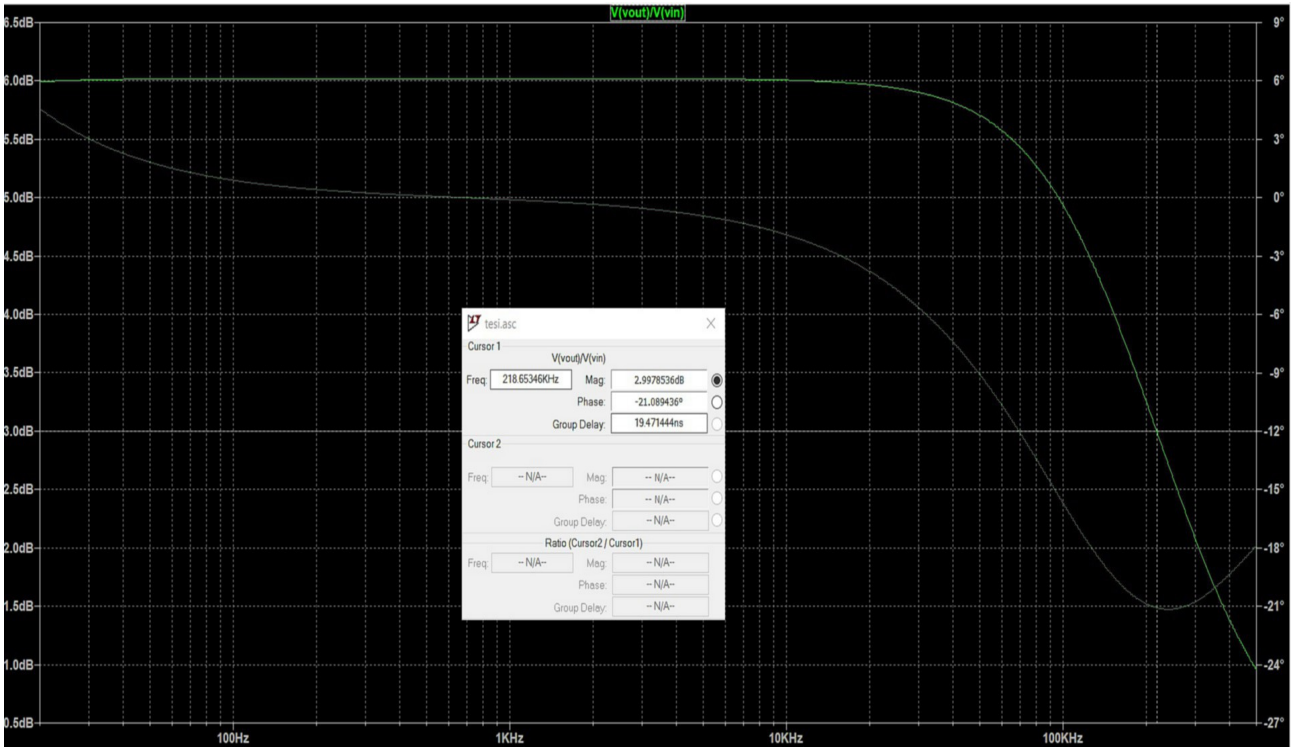

Figura 5.1: Diagramma di Bode: in linea piena il modulo, in linea tratteggiata la fase.

Frequenza	V_{out} max	V_{out} min	ΔV_{out}	V_{in} max	V_{in} min	ΔV_{in}	$\Delta(t_o-t_i)$
20	1,910	-2,100	4,010	1,000	-1,050	2,050	$7\ 10^{-4}$
50	1,920	-2,100	4,020	1,000	-1,030	2,030	$-1,2\ 10^{-4}$
100	1,910	-2,100	4,010	1,000	-1,030	2,030	$-1,6\ 10^{-5}$
200	1,910	-2,100	4,010	1,010	-1,040	2,050	$-8\ 10^{-6}$
500	1,920	-2,120	4,040	1,010	-1,050	2,060	$-8\ 10^{-6}$
1000	1,910	-2,110	4,020	1,010	-1,050	2,060	$-4\ 10^{-6}$
2000	1,890	-2,070	3,960	1,000	-1,030	2,030	$-2,4\ 10^{-6}$
5000	1,880	-2,060	3,940	0,980	-1,030	2,010	$-1\ 10^{-6}$
10000	1,850	-2,040	3,890	0,980	-1,020	2,000	$-7\ 10^{-7}$
15000	1,870	-2,060	3,930	0,980	-1,040	2,020	$-6\ 10^{-7}$
20000	1,860	-2,03	3,89	0,980	-1,040	2,020	$-6,8\ 10^{-7}$
50000	1,790	-1,97	3,76	0,980	-1,040	2,020	$-5,2\ 10^{-7}$
100000	1,650	-1,830	3,480	0,970	-1,03	2,000	$-4,6\ 10^{-7}$

Tabella 5.1: Misurazioni senza carico

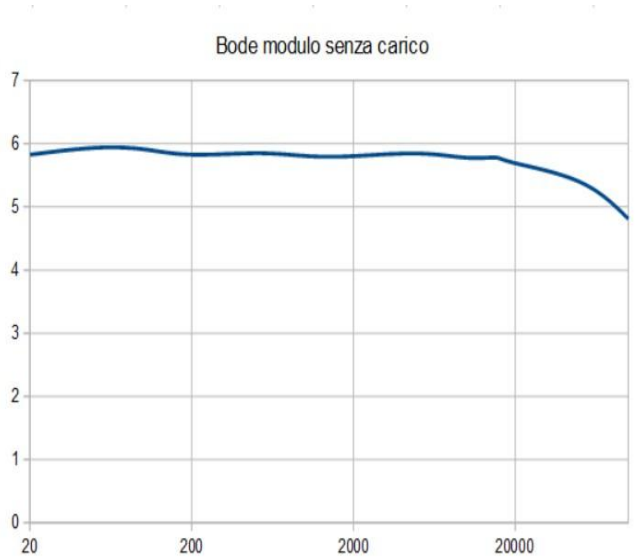

Figura 5.2: misura del modulo in laboratorio

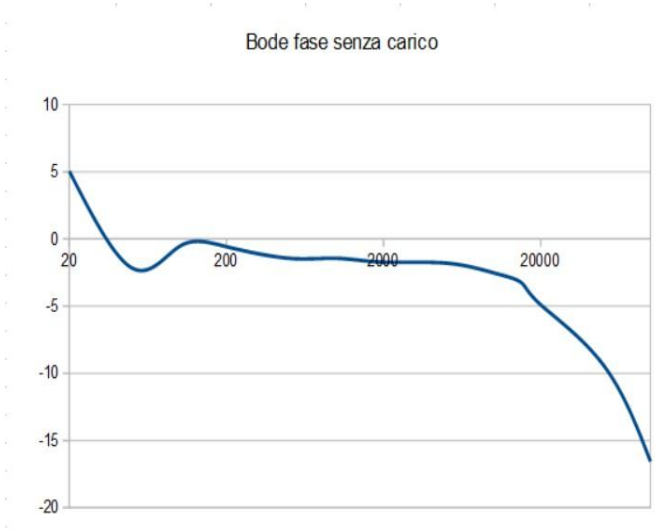

Figura 5.3 : misura della fase in laboratorio

Per quanto riguarda la fase invece (Fig. 5.1), nelle simulazioni teoriche parte dai 4.5° e scende fino ai -21° poco dopo i 200kHz rimanendo intorno agli 0° tra i 200Hz e i 2kHz. Fisicamente, la fase rappresenta il ritardo tra l'onda in uscita rispetto a quella in ingresso. Questa è ottenibile come il rapporto tra la differenza di tempo di picco delle delle due onde rispetto al periodo dei segnali, il tutto moltiplicato per l'angolo giro (360° se vogliamo la fase in gradi mentre 2π se vogliamo la fase in radianti). La dipendenza della fase dal ritardo rispetto al periodo implica che l'aumento della fase

alle alte frequenze non indica per forza un aumento del ritardo tra le due onde. Quanto invece una tendenza quasi costante, di qualche microsecondo, che tende a svanire intorno ai 500kHz. Nelle misure effettuate in laboratorio (Fig.5.3) la fase, in assenza di carico, ha un andamento che corrisponde alle aspettative. Fa eccezione un picco negativo ai 50Hz che è probabilmente dovuto ai disturbi introdotti dall'alimentazione del circuito. Infatti lo stesso generatore di tensione utilizzato in laboratorio è alimentato a 50Hz. Dalle misure prese con le cuffie connesse (Fig. 5.5)invece si nota un abbassamento generale della fase, di circa -3° con calo più drastico dopo 1kHz. La differenza maggiore si nota ai 5kHz, in cui le misure non solo si discostano di quasi 7° ma si ha anche un minimo assoluto nelle misurazioni con carico. Le ragioni del minimo posso essere molteplici ad esempio la tolleranza sulla misura, data l'alta frequenza dell'onda una tolleranza di 1μs riporterebbe il valore in linea con gli altri. Potrebbe anche essere a causa del comportamento non ideale delle cuffie, che possono avere introdotto un polo nella funzione di trasferimento. In effetti anche il modulo di Bode inizia a calare tra i 2kHz ed i 5kHz e ciò andrebbe a favore dell'ipotesi di un nuovo polo aggiunto dal carico dopo i 2kHz.

Frequenza	V_{out} max	V_{out} min	ΔV_{out}	V_{in} max	V_{in} min	ΔV_{in}	$\Delta(t_o-t_i)$
20	0,464	-0,536	1,000	0,240	-0,264	0,504	$4,8\ 10^{-4}$
50	0,460	-0,532	0,992	0,244	-0,256	0,500	0,000
100	0,464	-0,536	1,000	0,244	-0,264	0,508	$-7\ 10^{-5}$
200	0,468	-0,536	1,004	0,240	-0,250	0,500	$-3\ 10^{-5}$
500	0,468	-0,544	1,012	0,244	-0,264	0,508	$-1,8\ 10^{-5}$
1000	0,468	-0,548	1,016	0,244	-0,264	0,508	$-1,3\ 10^{-5}$
2000	0,460	-0,532	0,992	0,244	-0,260	0,504	$-8\ 10^{-6}$
5000	0,428	-508,000	0,936	0,240	-0,260	0,500	$-5\ 10^{-6}$
10000	0,404	-0,484	0,888	0,240	-0,264	0,504	$-2\ 10^{-6}$
20000	0,388	-0,460	0,848	0,240	-0,260	0,500	$-1\ 10^{-6}$

Tabella 5.2: Misurazioni con carico

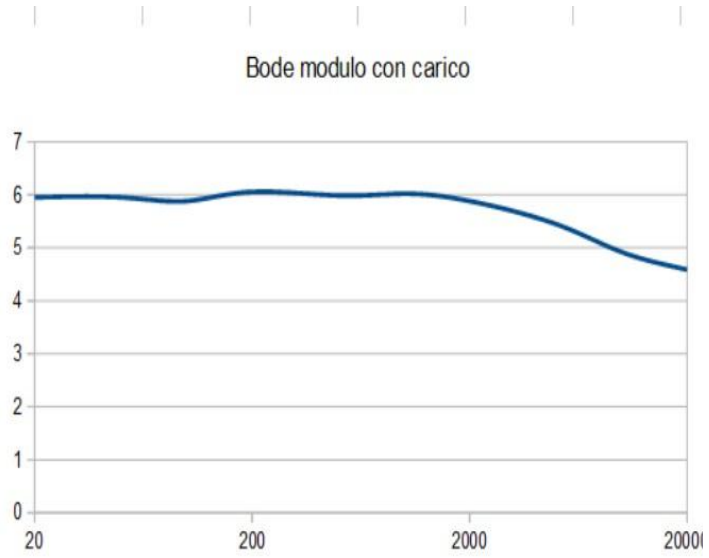

Figura 5.4: Modulo misurato con carico connesso

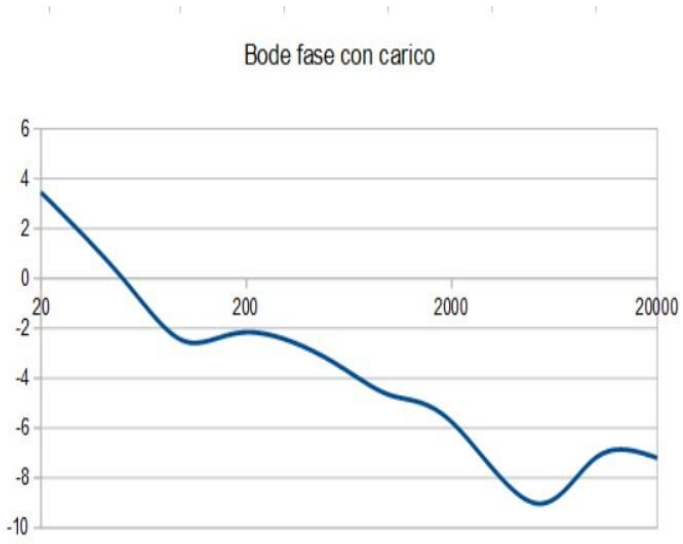

Figura5.5: Fase misurata con carico connesso

Passiamo ora all'analisi del rumore. Si è scelto di effettuare 500'000 campioni per l'analisi in modo da ottenere un grafico sufficientemente preciso, ossia in modo che sia disponibile un campione per ogni aumento di circa 1Hz nelle frequenze. Dal grafico risultante (Figura 5.6) si può notare che il rumore è più alto alle basse frequenze, cosiddetto flicker noise, mentre cala all'aumentare delle frequenze. Questo è un bene, dato che normalmente lo si considera concentrato alle alte frequenze nell'analisi teorica. Non è stato invece possibile effettuare l'analisi sperimentale, data l'elevata difficoltà ed i limiti fisici della strumentazione utilizzata.

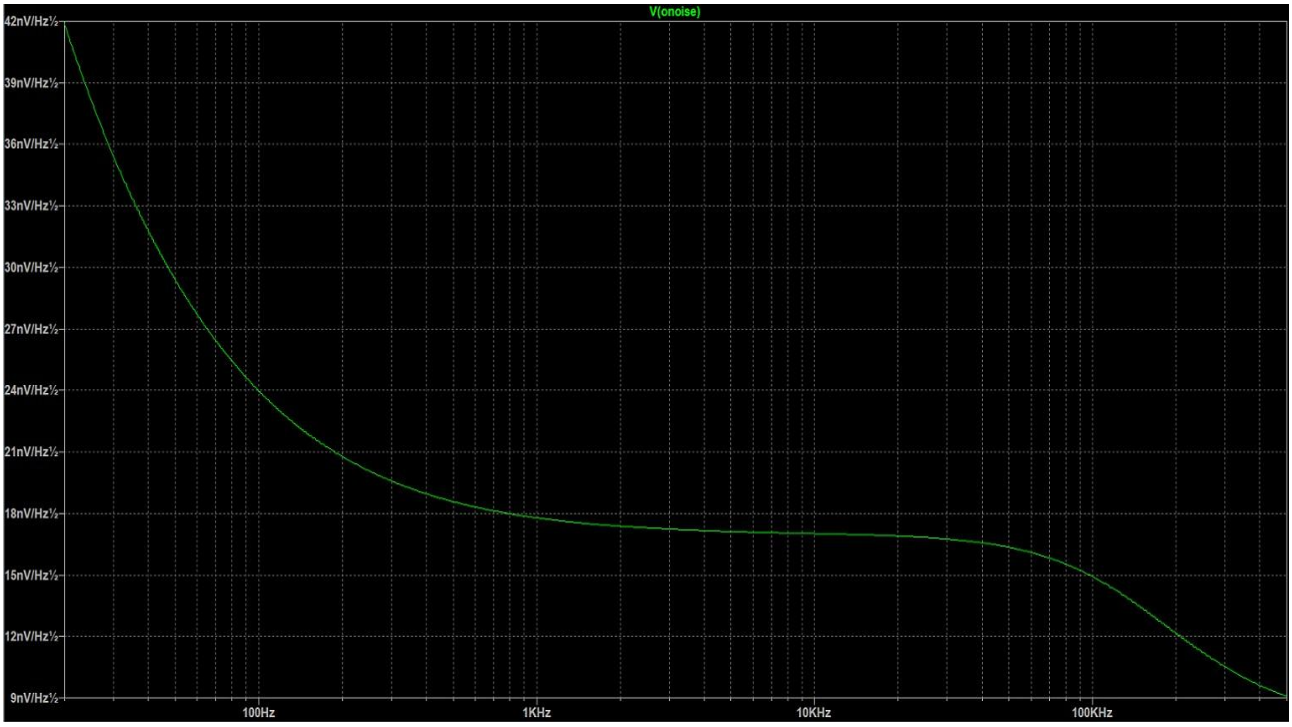

Figura 5.6: Diagramma del rumore

6. Conclusioni e sviluppi futuri

Dalle analisi sulle misure in laboratorio e sulle misurazioni, si notano delle sostanziali differenze particolarmente nel campo della fase. Questo dimostra come, nella progettazione di un qualunque circuito elettronico, sia sempre molto importante andare anche a testare il reale funzionamento di un circuito oltre che alle simulazioni. Data la non idealità delle componenti, così come non esista una standardizzazione che permette una perfetta simulazione. Nessun componente, anche se simulato basandosi su delle reali misure prese da test a campione si comporterà nella stessa maniera, questo è dovuto impossibilità di costruire due componenti in modo uguale. In particolare è necessario controllare i circuiti audio con un carico reale (eg. cuffie o amplificatori) in modo da evidenziare eventuali poli introdotti nel circuito, come nel caso in esame.

Eventuali sviluppi futuri sarebbero sicuramente misure aggiuntive, come l'analisi del rumore in laboratorio che non è stato possibile effettuare con gli strumenti a disposizione. Così come la THD (Total Harmonic Distortion) che permetterebbe di capire la distorsione introdotta dall'amplificatore. Si potrebbe inoltre aumentare il guadagno dell'amplificatore, nel caso si volessero pilotare carichi più impegnativi, modificando innanzitutto il partitore di tensione R5-R2. Facendo attenzione di non eccedere i limiti strutturali dei transistor e dell'operazionale, eventualmente cambiandoli e prendendone di più adatti all'utilizzo per potenze maggiori. Tenendo in considerazione che andrà aumentata anche la tensione di alimentazione. L'amplificatore, inoltre, è di tipo singolo, ciò significa che una volta connesso a delle cuffie non permette un uscita duale, ossia diversa per cuffia sinistra e destra. Sarebbe quindi possibile realizzare un circuito specchiato che permetterebbe di pilotare i due auricolari contemporaneamente fornendo un ascolto di tipo stereo invece che mono.

Bibliografia

[1] Ilardo R., Piccolo manuale di elettronica applicata, 22 febbraio 2018

[2] Bsproj, BA120: Amplificatore per cuffia ad alte prestazioni, The blackbird sound project, https://bsproj.it/ba120/

[3] Texas Instruments, OPAx134 Soundplus High Performance Audio Operational Amplifiers, Ottobre 2015, https://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa134.pdf?ts=1659027680355&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FOPA134

[4] ON Semiconductors, BC337 Amplifier Transistor: PNP Silicon, Settembre 2011, https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/bc337-d.pdf

[5] ON Semiconductors, BC327 Amplifier Transistor: NPN Silicon, Settembre 2011, https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/bc327-d.pdf

[6] STMicroelettronics, BD139-BD140, Maggio 2008, https://www.st.com/en/power-transistors/bd139.html

[7] Ilardo R., Breve guida all'uso dei transistor, http://www.raffaeleilardo.it/trans.htm

[8] Fairchild, BC547: NPN Epitaxial Silicon Transistors, Novembre 2014, https://www.mouser.com/datasheet/2/149/BC547-190204.pdf

[9] ON Semiconductors, BC557: PNP Epitaxial Silicon Transistor, Dicembre 2021, https://www.mouser.com/datasheet/2/149/BC547-190204.pdf

[10] Sennheiser, Momentum On-ear 2, Aprile 2013, https://assets.sennheiser.com/global-downloads/file/9835/spec_sheet_MOMENTUM_On-Ear_EN.pdf