
Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione
Corso di Laurea in Ingegneria Informatica

Relazione per la prova finale
***«Creazione di effetti per strumenti musicali mediante
elaborazione audio in tempo reale su microcontrollore»***

Relatore: Prof. Fantozzi Carlo

Laureando: Fagnani Alessio
Matricola n.: 2103431

Padova, 22/09/2026

COSA: Un pedale multi-effetto è un dispositivo elettronico che permette la creazione e l'uso di più effetti audio.

COME: Realizzati mediante sistemi digitali, con microcontrollore.

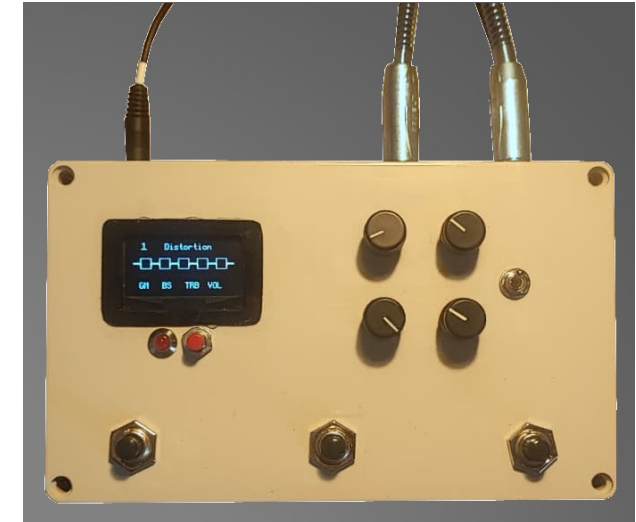
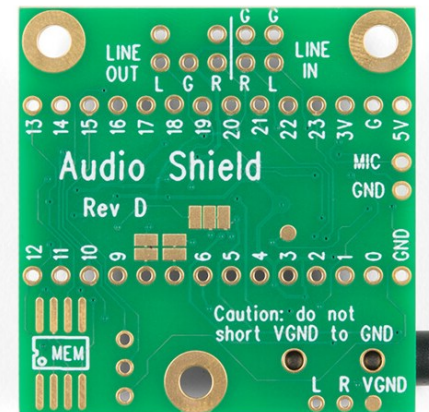


OBIETTIVI:

- Realizzazione di una sistema software che supporti lo sviluppo di effetti.
- Creazione di elementi modulari come filtri, quantizzatori, oscillatori e linee di ritardo.
- Implementazione di effetti algoritmicamente rilevanti.
Nello specifico:
 - 1) Effetto distorsione
 - 2) Effetto tremolo
 - 3) Effetto “bitcrusher”
 - 4) Effetto vibrato
 - 5) Effetto chorus

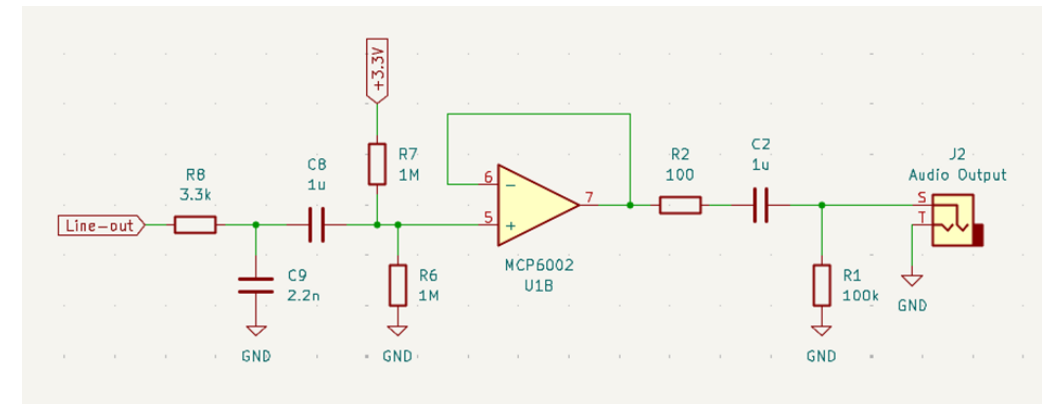
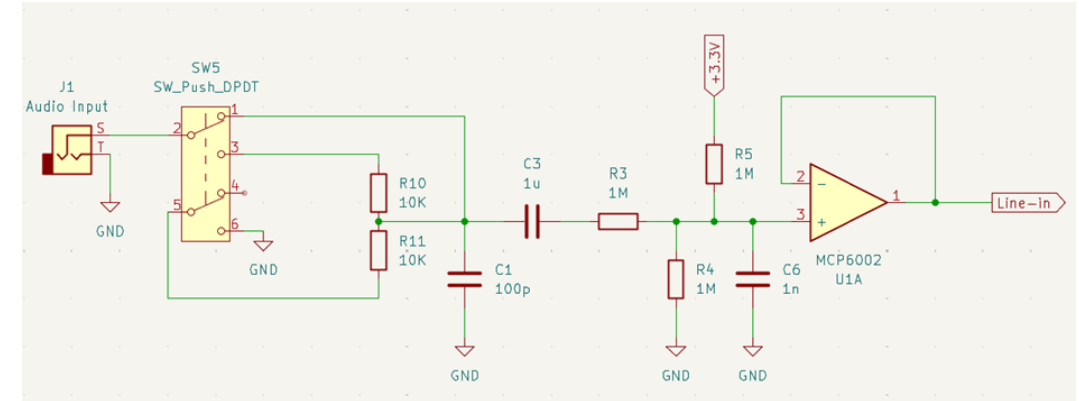
HARDWARE:

- **Teensy 4.1**, dotato di ARM Cortex M7 e 1MB di RAM
- **Audio shield**, capace di gestire input e output stereo a 44.1kHz
- **Circuito stampato**
- **Schermo OLED 128x16**
- **Potenziometri**, per i parametri
- **Pulsanti**, per attivazione di funzioni
- **Interruttori**, per azionamento di circuiti



BUFFER:

- Adattare l'impedenza tra strumento e ADC e DAC e carico.
- Accomodare l'esigenze di tensione dei ADC e DAC.
- Filtrare il segnale, rimuovendo DC e frequenze superiori a 20kHz.
- Adeguare il segnale a più tipi di strumenti (passivi / attivi).



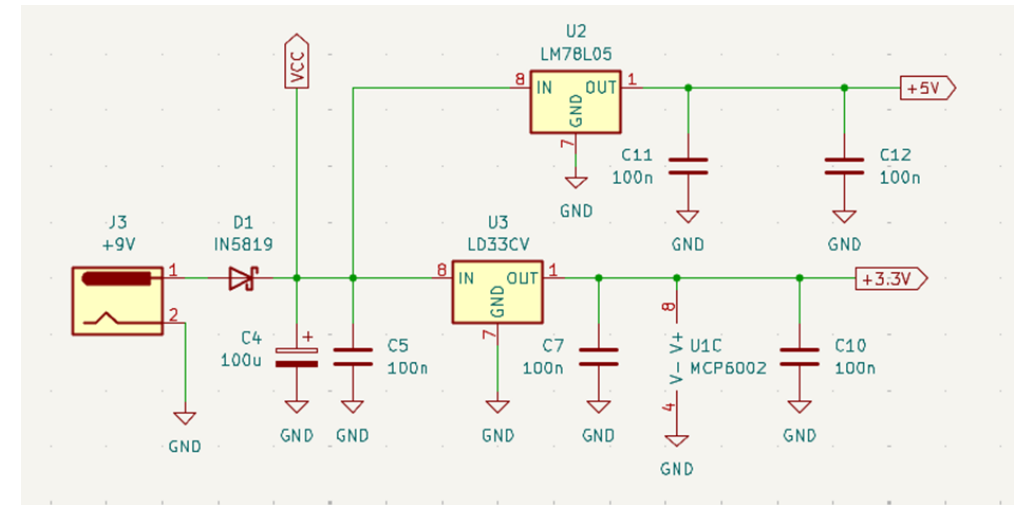


DESCRIZIONE DEL LAVORO



CIRCUITO DI ALIMENTAZIONE:

- Proteggere da polarità inversa.
- Provvedere 3.3V, 5V e 9V stabilmente.

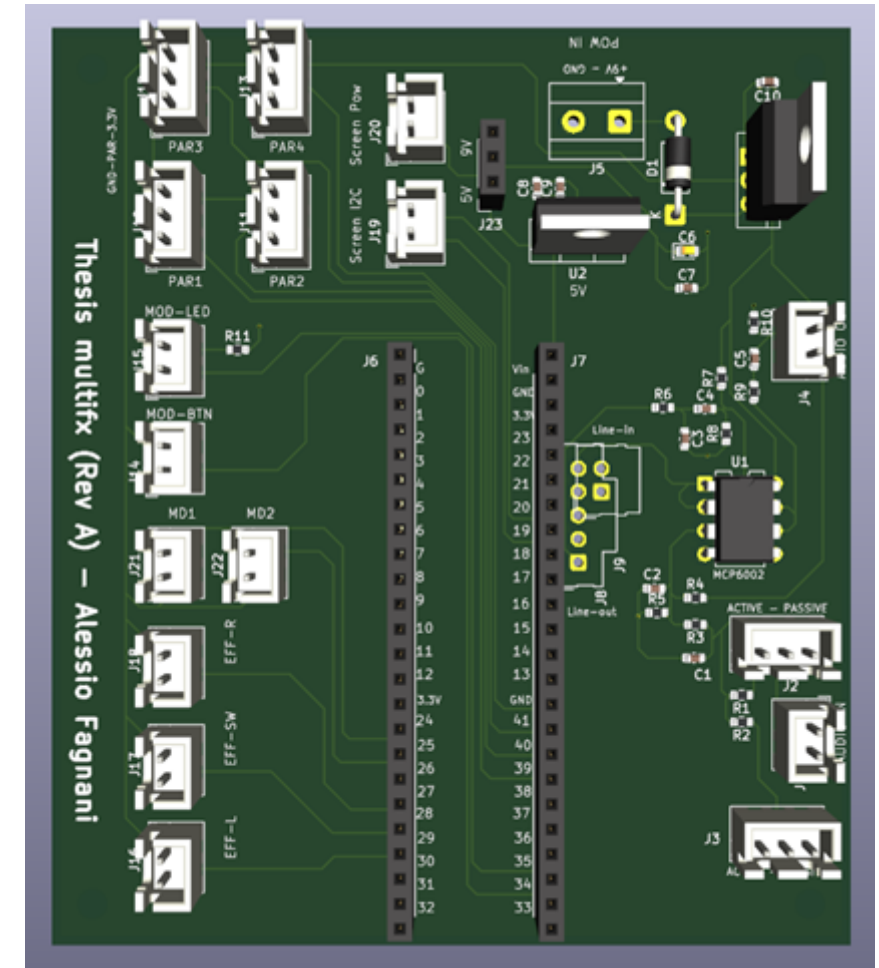


SCHEDA STAMPATA:

Progettata in KiCAD e realizzata su una scheda a 2 layer.

Utilizza sia componenti SMD (Surface Mounted Device) che a foro passante.

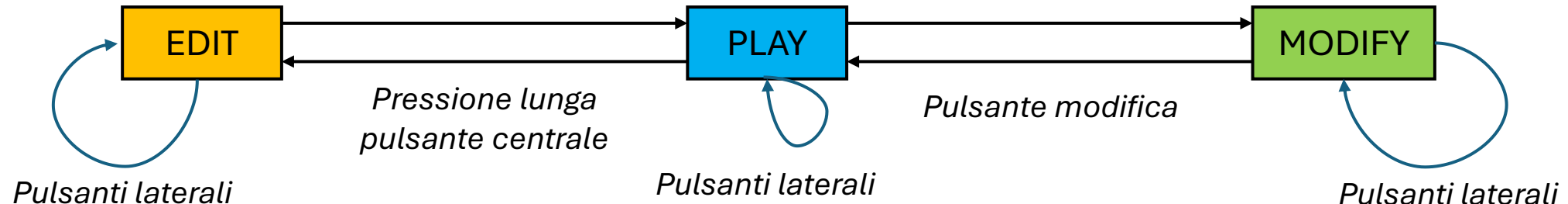
Il layer inferiore è di messa a terra, per mitigare interferenze elettromagnetiche ed offrire un percorso a bassa impedenza alla messa a terra.



MACCHINA A STATI

Il sistema software è organizzato come una macchina a stati.
Le transizioni tra stati vengono innescate dall'input dell'utente ricevuto tramite i pulsanti presenti.

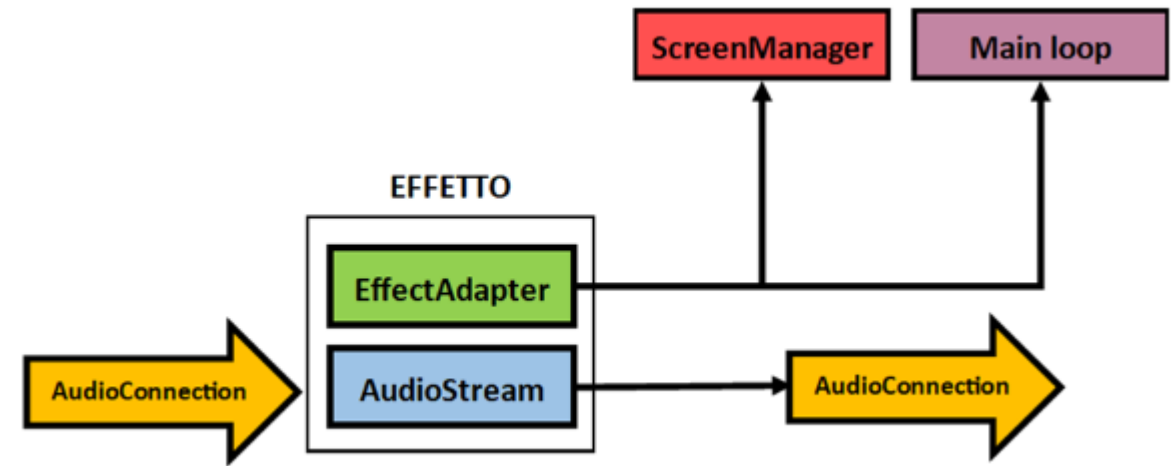
Gli stati sono: “**PLAY**” (l'utente ha accesso solo alla catena di effetti e può solo accenderli e spegnerli), “**MODIFY**” (estende lo stato precedente permettendo la modifica dei parametri) e “**EDIT**” (permette all'utente di cambiare la posizione degli effetti all'interno della catena).



PIPELINE AUDIO

La pipeline audio è costituita da oggetti di tipo “AudioStream”, capaci di ricevere input e trasmettere output, collegati tra di loro da oggetti di tipo “AudioConnection”.

Gli effetti ereditano dalla classe “AudioStream” e dalla classe “EffectAdapter”, creata appositamente per dare un’interfaccia comune.



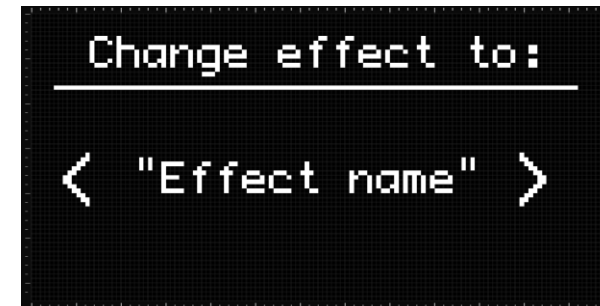
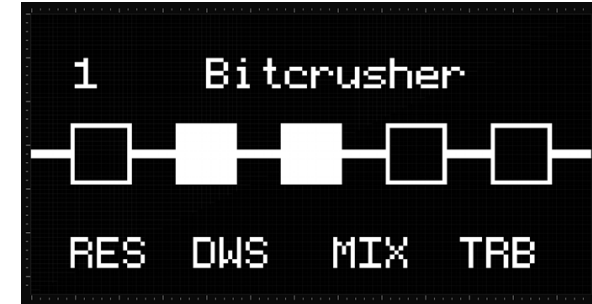
EffectAdapter si occupa della mappatura dei parametri agli input, dell’accensione e spegnimento dell’effetto e della comunicazione dello stesso col resto del sistema.

SCREEN MANAGER

L'interfaccia grafica è gestita dalla classe ScreenManager, la quale usa la libreria U8g2 per comunicare con lo schermo tramite protocollo I2C.

SAVE MANAGER

La classe SaveManager permette la memorizzazione dell'ultimo stato della catena di effetti tramite la memoria EEPROM presente sul microcontrollore.



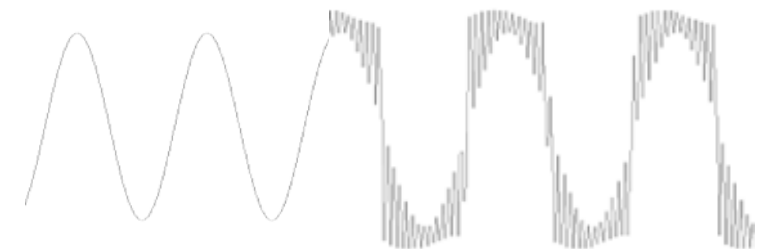
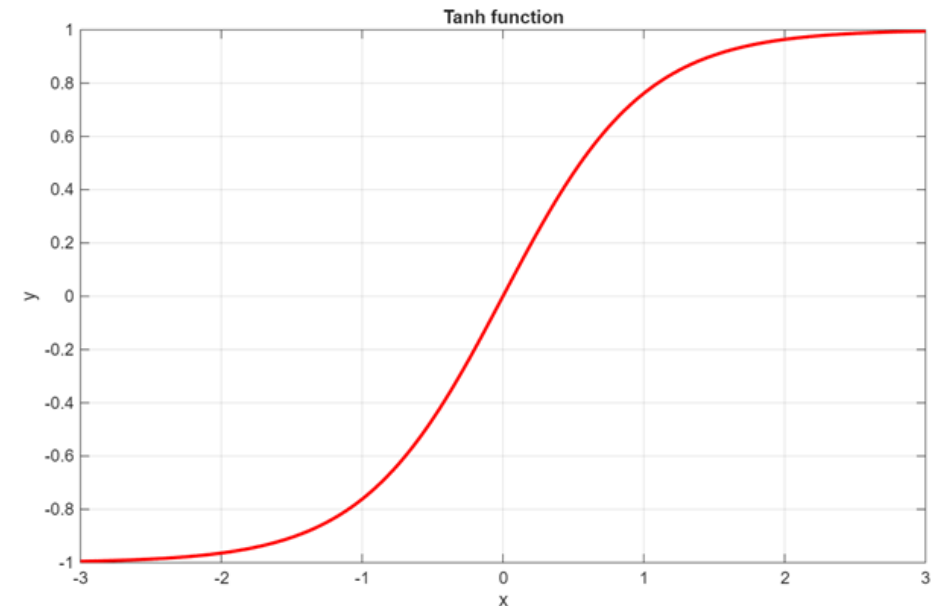
EFFETTO: DISTORSIONE

Effetto che modifica la forma d'onda tramite una funzione di clipping, generando nuove armoniche.

Una funzione di clipping simmetrica crea armoniche dispari (suono brillante e tagliente), mentre una funzione asimmetrica crea armoniche pari (suono caldo e saturo).

Questo effetto emula la distorsione analogica di circuiti a transistor/diodo, tramite la funzione tanh.

La funzione finale è: $y(x) = p_3 * f_{p4}(\tanh(p_1 * x + p_2))$

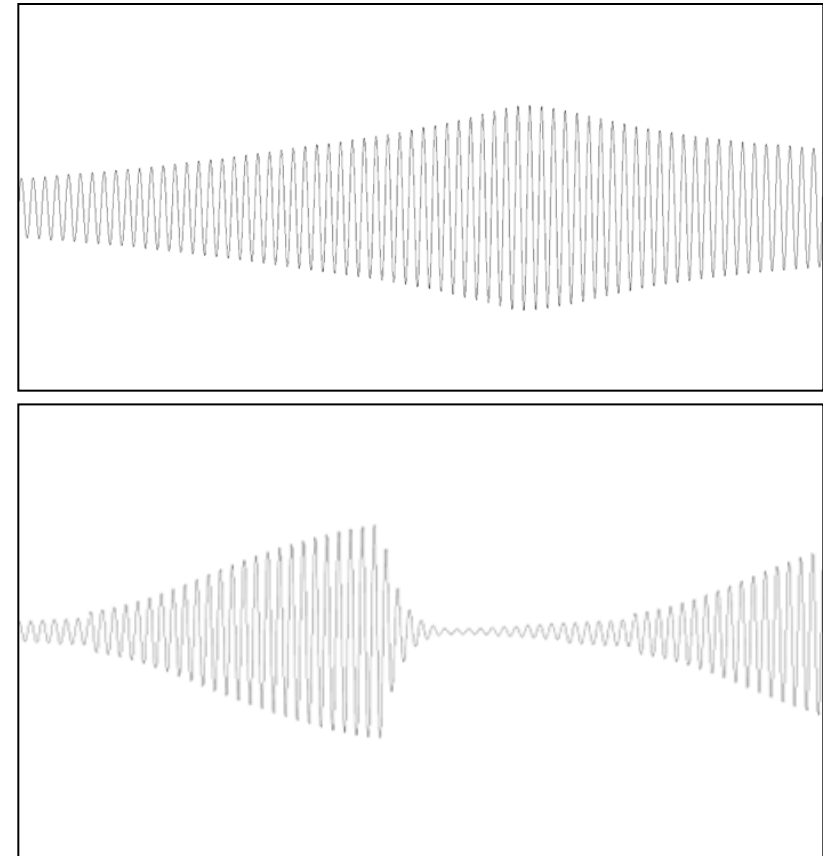


EFFETTO: TREMOLO

Effetto musicalmente analogo alla modulazione in ampiezza: il segnale modulatore è prodotto da un oscillatore a bassa frequenza (LFO).

L'oscillatore è capace di emettere onde con più forme: sinusoidale, quadrata, triangolare, a sega e a rampa.

La forma dell'onda è controllata da uno dei quattro parametri, mentre gli altri tre controllano frequenza dell'oscillatore e quantità di modulazione (uno è inutilizzato).

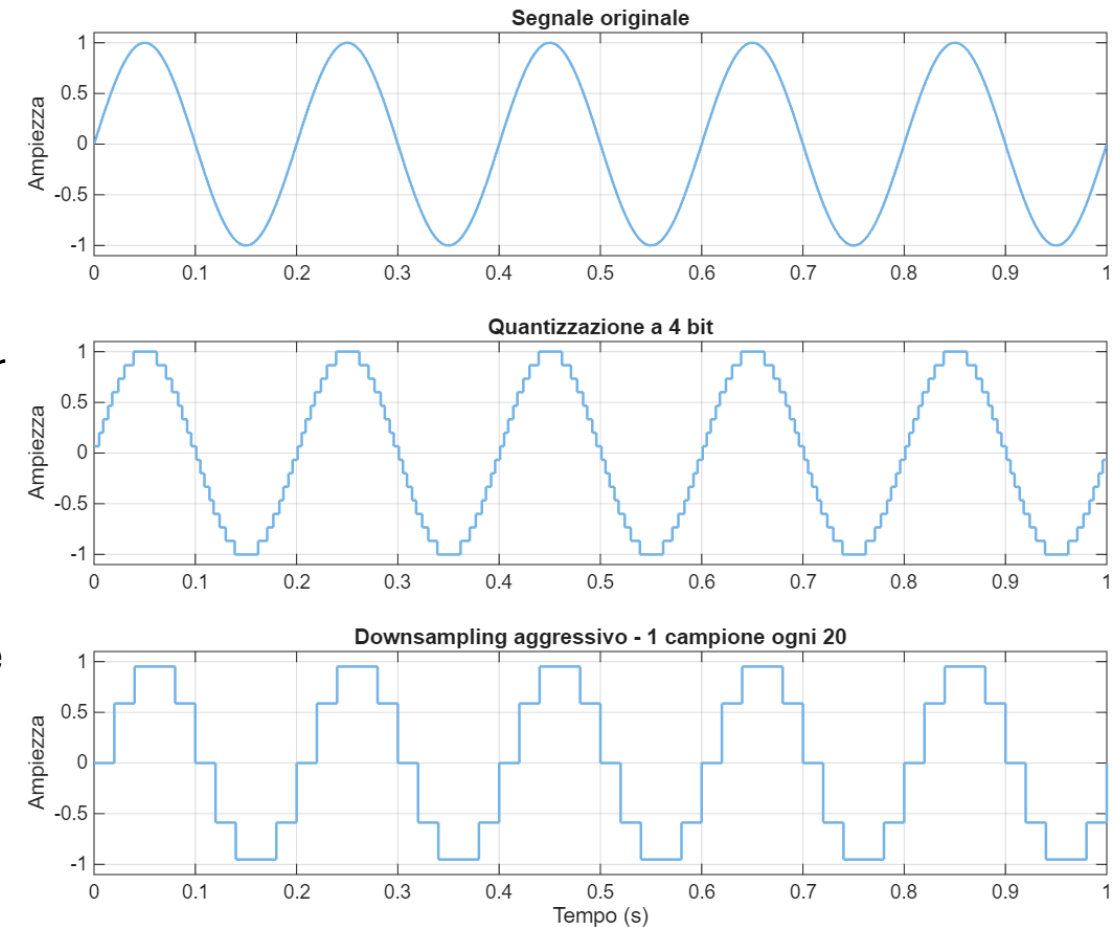


EFFETTO: BITCRUSHER

Effetto il cui funzionamento si basa sulla digitalizzazione di segnali analogici. Ha due stadi: quantizzazione e sottocampionamento.

Quantizzazione: riduce il numero di bit disponibili per rappresentare il segnale, introducendo errori di quantizzazione.

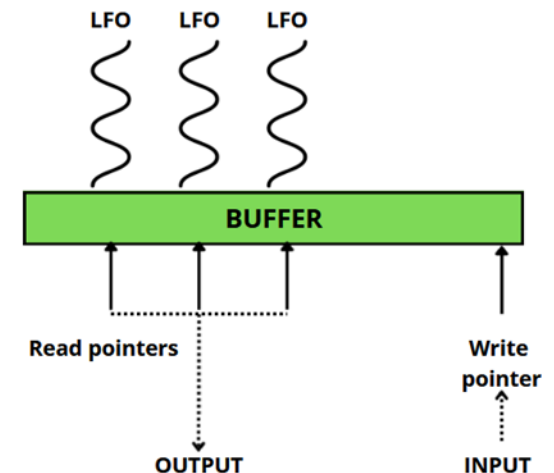
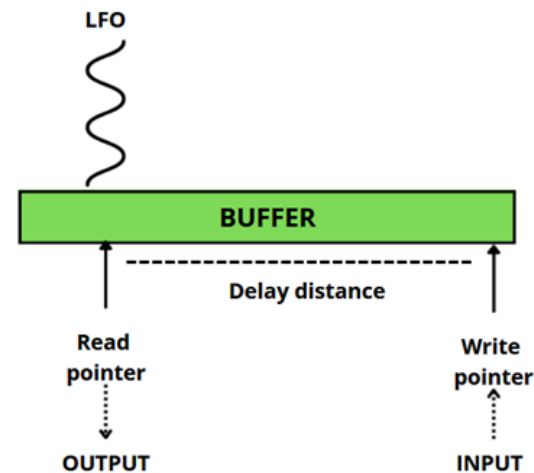
Downsampling: riduce la frequenza di campionamento, perciò parte del contenuto spettrale supererà la frequenza di Nyquist, introducendo alias.



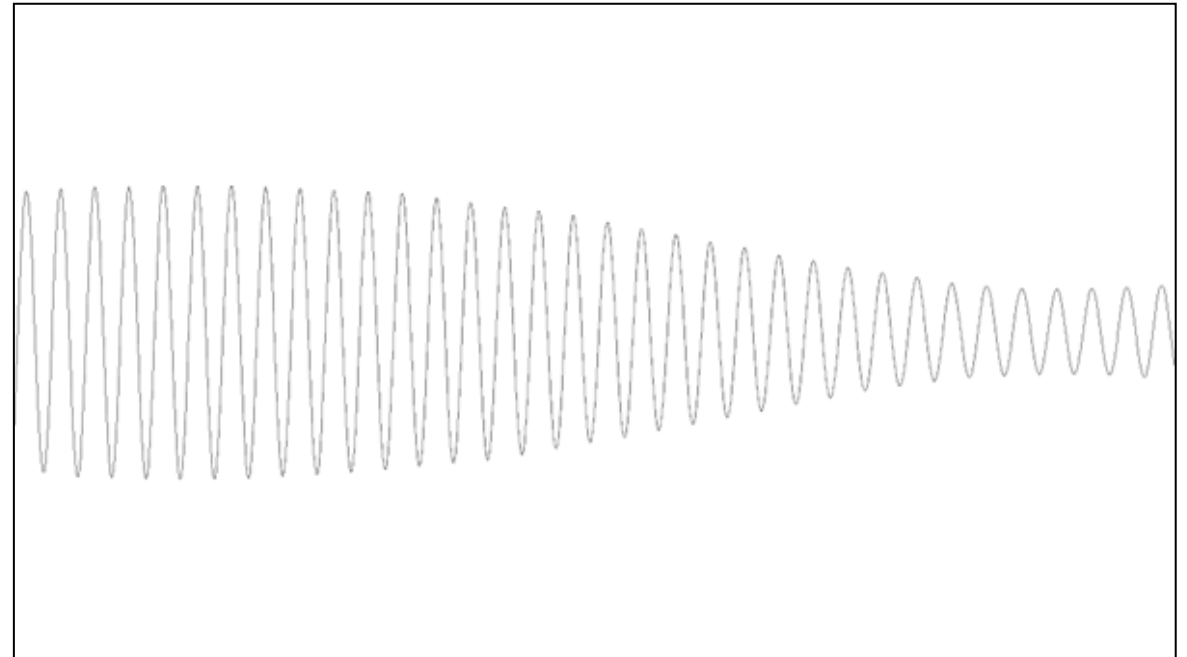
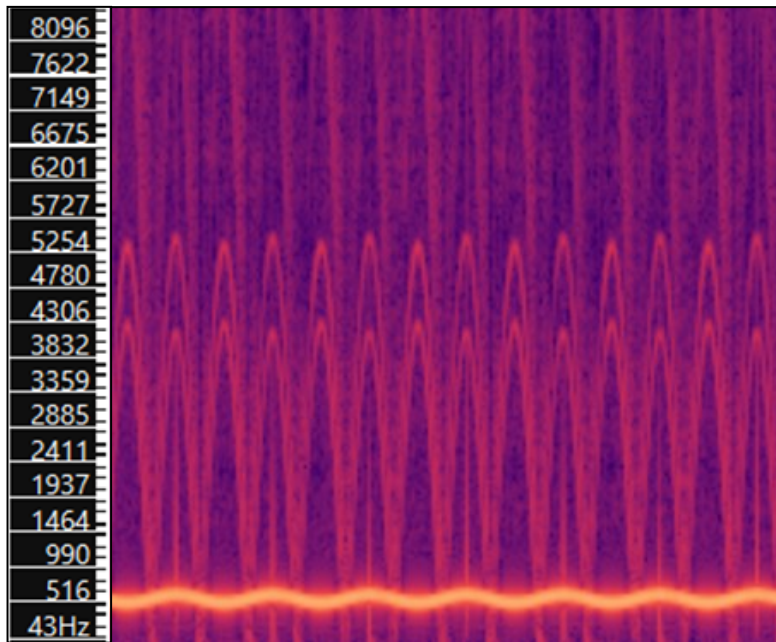
EFFETTI: VIBRATO E CHORUS

Il principio di funzionamento di entrambi gli effetti è la modulazione in frequenza: variando la velocità di lettura da un buffer tramite un LFO si hanno variazioni periodiche dell'altezza del suono riprodotto. Una lettura più lenta risulta in frequenze diminuite, al contrario quando il buffer è letto più velocemente appaiono aumentate.

Il vibrato usa un solo LFO ed un solo punto di lettura, mentre il chorus impiega più LFO e punti di lettura.



Nel chorus oltre alla variazione in frequenza, si ha anche variazione in ampiezza a causa delle interferenze costruttive e distruttive tra i vari punti di lettura.



PRESTAZIONI:

Le prestazioni medie per effetto in uso sono le seguenti:

- CPU: 2.02%
- RAM: 5.87%

L'uso totale di memoria FLASH per codice e dati è di 117KB su 8MB, cioè circa l'1.43%.

VALUTAZIONE PRATICA:

Il dispositivo creato è stato testato in ambito musicale e risulta essere facilmente utilizzabile. La valutazione pratica ha permesso di individuare aspetti da migliorare e punti di forza.

FUTURO DEL PROGETTO:

Il futuro del progetto comprende l'aggiunta di nuovi effetti, l'ottimizzazione degli algoritmi già implementati, il miglioramento dei controlli fisici e l'aggiornamento dell'interfaccia utente.

BIBLIOGRAFIA

- W. Pirkle, *Designing audio effect plug-ins in c++*, Routledge, 2019
- R. Jaeger e T. Blalock, *Microelectronic circuit design*, Mcgraw-Hill Education, 2010
- A. Clarke, *Digital Implementation of Vibrato*, Sydney University, 2012
- W. Hanson, C. Beagle, A. Altstaetter, A. Patterson, *PolarBear DSP Digital Effects Pedal*, Ohio Northern University, 2025
- B. Holmes, *Guitar Effects-pedal emulation and identification*, Queen's University Belfast, 2019

SITOGRAFIA

- Illumin Magazine (USC), *Pedal to the metal* (<https://illumin.usc.edu/pedal-to-the-metal>)
- Musicdsp.org, *Audio-EQ-Cookbook* (<https://www.musicdsp.org/en/latest/Filters/>)
- ElectroSmash.com, *pedalShield Arduino* (<https://www.electrosmash.com/pedalshield>)
- ElectroSmash.com, *Tube Screamer Analysis* (<https://www.electrosmash.com/tube-screamer-analysis>)
- ElectroSmash.com, *Big Muff Pi Analysis* (<https://www.electrosmash.com/big-muff-pi-analysis>)
- ElectroSmash.com, *Boss CE-2 Analysis* (<https://www.electrosmash.com/boss-ce-2-analysis>)