Immagine che contiene testo, clipart

Descrizione generata automaticamente

**AUDIO PROCESSING**

***UNIVERSITA’ DEGLI STUDI DI CATANIA  
DIPARTIMENTO DI MATEMATICA E INFORMATICA  
LAUREA TRIENNALE IN INFORMATICA  
A.A. 2021/22  
Prof. Filippo L.M. Milotta***

**ID PROGETTO:** 04

**TITOLO PROGETTO:** Chip C64 SID

**AUTORE 1:** Samuele Maria Gallina

**AUTORE 2:** Martin Gibilterra

**AUTORE 3:** Manuel Comis

**Indice**

[**1.** **Obiettivi del progetto** 2](#_Toc89731065)

[**2. Riferimenti Bibliografici** 2](#_Toc89731066)

[**3. Risultati Ottenuti / Argomenti Teorici Trattati** 3](#_Toc89731067)

# **Obiettivi del progetto**

Il progetto si pone l’obiettivo di contestualizzare, storicamente e tecnologicamente, l’hardware del Commodore 64, descrivendo in modo particolarmente dettagliato le caratteristiche, il funzionamento e le potenzialità del suo chip audio dedicato: il MOS SID.

Il Commodore 64 è tutt’ora il computer più venduto di sempre. Con la sua produzione su larga scala, l’azienda Commodore sfornò un prodotto di successo, piazzando sul mercato dal 1982 al 1994 circa 20 milioni di unità.Immagine che contiene elettronico, tastiera, macchina da scrivere

Descrizione generata automaticamente

L’originale Commodore 64, chiamato in Italia "il biscottone" per il suo form factor e il suo colore marroncino

La matrice del successo dell’home computer dell’azienda di Jack Tramiel, storico direttore di Commodore, fu una serie di elementi che, messi insieme nel modo giusto e nel momento giusto, ne decretarono il successo rendendolo un fenomeno di costume anche negli anni a venire. Il Commodore 64 si distinse infatti per la sua facilità d’uso, il basso prezzo e le sue capacità grafiche e sonore all’avanguardia, per il periodo in cui venne creato.

Il Commodore 64 ha anche il merito di essere stato il primo home computer ad essere dotato di un chip dedicato alla sintesi sonora fornito di generatori di inviluppo ADSR, il MOS SID, che riusciva a sintetizzare 3 voci (anche umane) indipendenti contemporaneamente.

In secondo luogo, verrà fornita una dimostrazione pratica su come il MOS SID veniva programmato, in linguaggio BASIC, per la riproduzione di suoni più o meno complessi. Per la dimostrazione verrà usato l’emulatore VICE.

In conclusione, viene presentato un excursus temporale riguardante l’evoluzione dei chip e delle periferiche dedicati all’audio, dal post-rilascio del Commodore 64 fino alla fine degli anni ‘90 con l’esordio delle schede audio dedicate.

LE PREMESSE

Il Commodore 64 nacque con l’obiettivo di creare nuovi standard tecnologici riguardanti la grafica e l’audio per imporsi sul settore videoludico e degli home computer, con l’intenzione di surclassare tecnologicamente anche i prodotti precedenti della stessa Commodore, quali il PET e il VIC-20, rendendo le tecnologie Commodore appetibili alle aziende produttrici di console e videogiochi da sala a tal punto da usarle nei loro prodotti.

Immagine che contiene testo, macchina da scrivere

Descrizione generata automaticamenteEsso fu pensato dapprima come un prodotto quasi d’élite non rivolto al mercato consumer; tuttavia, verso la fine del 1982 Commodore decise di puntare sul mercato degli home computer, nonostante le difficoltà che avrebbe incontrato in alcuni mercati continentali come quello europeo, nel quale aveva già diversi competitors sul mercato come lo ZX Spectrum.

Nonostante ciò, Jack Tramiel, il CEO di Commodore, si rese conto che, grazie alla recente produzione di chip audio e video (rispettivamente SID e VIC-20) di ultima generazione, la sua azienda potesse inserirsi in una fetta di mercato ancora inesplorata: le famiglie, che desideravano sempre più un computer a basso prezzo che potesse intrattenere anche a livello ludico.

Réclame statunitense del Commodore 64 (1982)

L’ORIGINE DEL COMMODORE 64

A quel punto, il boss di Commodore commissionò ai suoi dipendenti il design di un nuovo computer da esibire al CES di Chicago nel 1981. Nel giro di due giorni, Commodore progettò quello che poi sarebbe diventato il Commodore 64, per poi presentarlo alla fiera. Il prodotto ebbe molto successo, anche a causa della mancanza di competitors all’evento stesso, mettendo ancor di più in risalto l’hardware all’avanguardia di Commodore.

Jack Tramiel e la linea di prodotti Commodore, al CES di Chicago (1981)

Nel 1982 iniziò la produzione in massa e l’interesse crebbe esponenzialmente tra i consumatori grazie al fatto che Commodore distribuiva la propria libreria software nei più grandi negozi al dettaglio degli Stati Uniti, il che garantiva una visibilità senza precedenti per i loro prodotti.

IL CONTESTO STORICO E TECNOLOGICO

Nel 1982 l’industria informatica era ancora molto acerba e i suoi prodotti erano riservati maggiormente ad un uso lavorativo piuttosto che casalingo, a parte poche eccezioni rappresentate dalle primissime console da gioco casalinghe come l’Atari 2600 o da computer user-oriented come l’Apple II.   
Il Commodore 64 si posiziona nel pieno di un lungo periodo di alfabetizzazione informatica che nelle case statunitensi ed europee sdoganò lentamente l’uso del computer per le attività giornaliere di natura gestionale e ludica, in quanto fino ad allora i competitors avevano offerto solo soluzioni ad altissimo prezzo e destinate esclusivamente a scopi lavorativi o educativi, come ad esempio i primi PC IBM dei primi anni ‘80 oppure il britannico BBC Micro.

La maggior parte di questi sistemi necessitava ancora grandi spazi, sia per le macchine in sé sia per l’uso che negli ambienti di lavoro se ne faceva, in quanto il computer era utile a gestire grandi mole di dati che, per le ridotte capacità degli hardware, erano difficili da elaborare in tempi brevi e che, spesso e volentieri, erano conservati in dischi rigidi multipli e voluminosi che costituivano un problema di stoccaggio non indifferente negli spazi di lavoro e ancor di più nelle case delle famiglie.

Per abbattere i costi di produzione e quindi il prezzo di vendita, il Commodore 64 venne proposto come una macchina “base” fornita di porte d’espansione che permettevano di collegare i propri dispositivi, come ad esempio il monitor o il mouse, separatamente.   
Commodore 64 abbatteva gran parte dei limiti tecnici del suo tempo proponendo un hardware all’avanguardia delle dimensioni di una tastiera. Esso era caratterizzato da una grande capacità di elaborazione (principalmente RAM) per l’epoca rispetto ai competitors, il supporto a memorie di massa più portabili come le cassette ma soprattutto dall’introduzione di un’uscita video antenna RF, che permetteva al Commodore 64 di essere una vera e propria macchina da gioco, determinandone il successo.

CARRELLATA VELOCE DELL’HARDWARE DEL COMMODORE 64

Immagine che contiene testo, elettronico, circuito

Descrizione generata automaticamente

La scheda madre del Commodore 64, al centro il MOS SID 6581

Il Commodore 64 possiede delle componenti che per l’epoca erano all’avanguardia tra cui:

* Il microprocessore MOS Technology 6510
* una DRAM di 64kB
* 1 chip dedicato alla grafica (il VIC-II)
* 1 chip dedicato all’audio (il SID).

Il sistema operativo adottato dal Commodore 64 è molto semplice ed è costituito principalmente da 3 parti ovvero il KERNAL (il kernel creato per gli home computer a 8 bit dalla società Commodore), il monitor in linguaggio macchina e un interprete BASIC.  
Le ultime 2 componenti permettono intuitivamente di programmare le azioni da far svolgere alla macchina.

IL MOS SID: UNA PANORAMICA DELL’HARDWARE

Il chip SID è uno dei principali motivi di successo del Commodore 64. Progettato dal capo ingegnere Robert Yannes, che reputava i chip sonori dell’epoca come “primitivi e ovviamente progettati da persone che non sapevano niente sulla musica”, è un circuito integrato in cui troviamo sia componenti digitali che analogiche; esso è in grado di sintetizzare 3 voci separate sfruttando 4 forme d’onda notevoli ovvero:

* Onda quadra
* Onda a dente di sega
* Onda triangolare
* Rumore pseudo-casuale

Ovviamente il SID è anche in grado di combinare queste 4 onde per creare di più particolari e complesse.  
Oltre a questo per sintetizzare i suoni il SID si occupa anche di applicare un inviluppo per attenuare le note in maniera lineare, modulare 2 voci tra loro e applicare dei filtri analogici con frequenza di taglio decidibile dal programmatore. I filtri analogici sono realizzati fisicamente grazie a dei condensatori esterni al chip.

Ci furono diverse versioni del chip SID, si ricordano il 6581 e l’8580. Con l’8580 si introdussero diverse migliorie, tra cui la possibilità di eseguire un AND logico tra onde arbitrarie, operazione che il 6581 permette solamente tra onda quadra e triangolare. L’8580 inoltre ha migliorie anche architetturali che permettono di dissipare meno calore e produrre dei suoni più chiari rispetto al 6581.

L’originale 6581 aveva un difetto: ogni volta che il volume di uno dei canali cambiava valore, il chip produceva un brevissimo pop anomalo. Quest’anomalia fu sfruttata molto dai musicisti che componevano musica sul Commodore 64 per simulare strumenti a percussione (e quindi creare virtualmente un quarto canale audio digitale con una risoluzione di 4 bit) o per sintetizzare la voce umana. Immagine che contiene testo, screenshot

Descrizione generata automaticamenteIn particolare, veniva modificato il valore del registro del master volume in modo repentino, consentendo al programmatore/musicista di riprodurre dei sample digitali primitivi in PCM a 4 bit. Tuttavia, questa pratica era CPU-intensive e le capacità dell’hardware limitate costringevano a fare dei compromessi in termini di potenza di calcolo.

Tuttavia, il 6581 fu preferito da diversi utenti, tra cui i musicisti, in quanto il suono fortemente distorto prodotto permetteva di simulare meglio gli strumenti musicali più “grezzi” come la chitarra elettrica e in generale il volume generato dal 6581 era più alto di quello dei successori, a fronte di numerosi problemi elettronici che abbassavano inevitabilmente la vita media del chip, creando un mercato consistente di SID danneggiati.

Vista all'oscilloscopio dei 3 canali audio (più il quarto canale “virtuale”) durante la riproduzione di un brano (Tetris – Wally Beben, 1988)

CARATTERISTICHE TECNICHE

Il chip è dotato di 3 canali audio indipendenti che possono riprodurre un suono che spazia in un range di 8 ottave e un range di frequenze da 16 a 4000 Hz e che possono essere modulati in ampiezza fino a 48 dB. Come detto prima, i 3 canali sono in grado di riprodurre 4 onde elementari, generate dagli oscillatori audio che possono essere sincronizzati tra loro nel tempo, più le loro combinazioni. In particolare, il rumore pseudo-casuale è generato grazie a uno shift register a 23 bit, il Fibonacci LFSR.

Il chip supporta anche la modulazione ad anello, utile per generare effetti audio “metallici”. La modulazione ad anello si serve di un circuito chiamato “modulatore ad anello” che prende in ingresso due onde (solitamente sinusoidali) e restituisce in due uscite diverse la somma e la differenza tra le due onde. Questa tecnologia si evolverà in seguito nella sintesi FM.

Per ogni oscillatore vi sono dei controlli di volume delle componenti dell’inviluppo ADSR, grandissima novità per l’epoca. Vi è la possibilità di applicare 3 filtri sonori ovvero il passa-basso, il passa-alto e il passa-banda.  
Il chip vanta la presenza di 2 convertitori ADC (analogico-digitale) a 8 bit, utili per collegare dei controller da gioco, e un input audio esterno.

COME FUNZIONA IL SID?

Per riprodurre i suoni il Commodore 64 riserva una parte di RAM al SID, ovvero la regione che va da $d400 (54272) fino a $d41c (54300) più un’altra zona che contiene gli stessi valori specchiati. Ogni cella della RAM riservata al SID ha un compito in particolare.

Ad esempio, le celle di memoria di indirizzo $d400 e $d401 sono usate per immagazzinare l’informazione sulla frequenza del suono del canale 1 ($d400 è il byte alto e $d401 il byte basso perché soli 8 bit sarebbero troppo pochi per rappresentare la frequenza). Un altro esempio lo rappresentano gli indirizzi $d405 e $d406. I bit 7…4 del $d405 rappresentano la durata dell’attack mentre i bit da 3 a 0 rappresentano la durata del decay. Allo stesso modo da 7 a 4 in $d406 vi è il livello di sustain e da 3 a 0 la durata della release. La tabella completa della configurazione dei registri controllo è consultabile [qui](https://www.c64-wiki.com/wiki/SID#Memory_Addresses_of_the_SID).

Da questi esempi si nota che la gestione della memoria era ottimizzata; infatti, sfruttava la possibilità di immagazzinare 4 numeri in 2 celle di memoria facendo un’opportuna suddivisione dei bit.

Immagine che contiene testo, ricevuta

Descrizione generata automaticamenteIl chip audio ha bisogno di comunicare con le altre componenti della macchina e fisicamente questo succede tramite i pinout schematizzati nell’immagine (qui si fa riferimento alla versione 6581).

Per fare qualche esempio si può parlare del pin EXT IN che intuitivamente è il pin per connettere al chip un dispositivo audio esterno.

Il pin AUDIO OUT invece serve per indirizzare l’audio verso l’uscita (dispositivi come le casse audio).

Approfondimenti disponibili [qui](https://www.c64-wiki.com/wiki/SID#Pinout).

UNA SIMULAZIONE DI GENERAZIONE SUONI TRAMITE IL SID

Per programmare il SID in modo tale da permettergli di generare le corrette frequenze, bisogna fare delle accortezze preliminari.

Il SID può rappresentare un insieme limitato e discreto di frequenze fisiche, la cui mappatura non segue un rapporto 1:1. Infatti, bisogna usare un fattore di normalizzazione (pari a 16.94), in quanto il SID rappresenta la frequenza con un numero a 16 bit e il range 16-4000 Hz deve essere rimappato su un intervallo di valori da 0 a 65535.

Indicando la frequenza fisica in Hz con f e il corrispondente digitale con fSID,

fSID = 16.94 \* f.

Ad esempio, il La fondamentale (440 Hz, La della quarta ottava), nel SID viene rappresentato con il valore 7.454.

Questa normalizzazione consente di regolare la frequenza di una nota, nonostante la rappresentazione in numeri interi, con una precisione di 1/17 di hertz anziché 1/12, come prevede la scala tonale fisica, permettendo quindi un tuning dell’audio più preciso rispetto ad altri chip dell’epoca.

Per simulare la generazione di un suono con il chip SID, si fornisce di seguito uno script in linguaggio BASIC. Per semplicità, lo script usa solamente la prima delle tre voci del SID (registri 54272 – 54278).

Lo script viene eseguito su un emulatore del KERNAL di Commodore 64 chiamato VICE.



La riga 10 assegna alla variabile S il valore 54272, cioè il primo registro di controllo del SID. Ciò viene fatto per semplificare la gestione dei 29 registri, che verranno indirizzati per spiazzamento.

Viene assegnato il valore 17 a W, che sarà la variabile che contiene le informazioni su quale tipo di onda generare. In questo caso, il valore 17 è uguale alla codeword binaria 00010001, dove il bit 4 se posto a 1 genera un’onda triangolare e il bit 0 è il bit di gate, che se posto a 1 inizia l’inviluppo del suono e quando posto a 0 lo termina (la gestione del bit di gate si può paragonare alla pressione e rilascio di un tasto nel pianoforte).

I valori W = 33, 65 e 129 corrispondono in binario alle codeword che attivano sul canale designato rispettivamente l’onda dente di sega, l’onda quadra e il rumore pseudocasuale.

In base al timestamp di esecuzione del Commodore 64 (cioè il valore in sessantesimi di secondo da quando il sistema è stato avviato), identificato da **ti**, viene generato un numero decimale tra 0 e 1 casuale grazie alla funzione **rnd,** che viene trasformato in intero. A quel punto, in base al numero ottenuto, verrà eseguita una tra le 4 linee poste dopo il goto: in questo caso, se il numero ottenuto è 1, verrà eseguita la linea 12.

Dalla linea 15 viene usata l’istruzione **POKE**: non è altro che una semplice assegnazione del valore dopo la virgola nella cella di memoria che ha indirizzo uguale al numero a sinistra della virgola. Nella linea 15 viene assegnato al valore massimo il controllo del master volume (registro 54296, valore 0000 1111), viene posto un attack lungo e un decay basso ponendo il valore 97 (registro 54277, valore 0110 0001), e vengono configurati sustain e release con un’alta durata (registro 54278, valore 1100 1000). Infine, viene assegnato il valore **w** della waveform al registro 54276.

Il codice soprascritto cicla all’infinito scalando linearmente la frequenza dell’onda generata casualmente, dal valore più alto al valore più basso, creando una scala musicale al contrario. Il suono udito sarà diverso la maggior parte delle volte grazie alla pseudocasualità fornita dalla funzione rnd(ti) basata sul timestamp del Commodore 64.

I SUCCESSORI DEL CHIP SID: SINTESI FM, SCHEDE DI ESPANSIONE AUDIO

*Parlare di cosa è successo nel settore dell’audio negli anni 90 fino alla creazione delle schede audio dedicate (fino a fine 90).*

Successivamente al SID vennero rilasciati altri chip audio come il MOS 7501, chip appunto derivato dal SID, utilizzato dal Commodore 16, il 116 e il Plus/4, che oltre a migliorare le prestazioni generali implementava una nuova funzionalità detta “bank switching” che permetteva di gestire dinamicamente i banchi di memoria tra ROM e RAM visibili alla CPU. Superato quindi lo stadio della PSG (Programmable Sound Generator) i chip iniziavano quindi ad avvicinarsi agli standard tecnologici dell’epoca; si iniziò quindi ad usare la sintesi FM (Frequency Modulation). Il passo avanti consisteva nel poter offrire una discreta varietà di toni andando a modulare un segnale portante nella sua frequenza tramite altri segnali.

La sintesi FM, infatti, è stata alla base di alcune delle più vecchie generazioni dei sintetizzatori Yamaha, come il popolarissimo DX 7, delle prime schede audio per PC, AdLib e Sound Blaster, dotate del chip Yamaha YM3812 e di molti dei chip audio dei cellulari per le suonerie polifoniche.

Questa tecnologia ebbe un’ampia diffusione dell’epoca 1986/90 quando la maggior parte delle schede arcade era dotata di un chip audio con 8 canali FM. L’FM era però inadatto alla riproduzione acustica dei suoni naturali, infatti, sono caratterizzati da sviluppi complessi che cambiano continuamente e in modo irregolare, incompatibile quindi coi modelli più semplici della sintesi FM.

Nel periodo in esame, e, in particolare tra il 1985 e il 1990, l’unico sistema alternativo alle tracce audio di un CD per ottenere un suono realistico digitale era l’ADPCM (Adaptive Pulse Code Modulation), comunemente assimilato al campionamento audio. Il suono PCM si basava su sequenze di campioni a 8 bit.

# **2. Riferimenti Bibliografici**

* <http://myretrocomputing.altervista.org/commodore-64/index.php>
* <https://it.wikipedia.org/wiki/MOS_SID>
* <https://www.c64-wiki.com/wiki/SID>
* https://www.youtube.com/watch?v=q\_3d1x2VPxk Minuto 3:14
* <https://www.youtube.com/watch?v=3grRR9-XHXg>
* https://it.wikipedia.org/wiki/Scheda\_audio

# **3. Risultati Ottenuti / Argomenti Teorici Trattati**

<Nota da rimuovere: Relativamente alle slide presentate nello Step 1, descrivere nel dettaglio:

se il progetto è sperimentale, i risultati ottenuti (in questa fase non parliamo più di risultati “attesi”, perché si presume che adesso abbiate già fatto il lavoro proposto allo Step 1 e abbiate dei risultati da mostrare);

se il progetto è compilativo, riportate gli argomenti teorici trattati.

La descrizione dev’essere quanto più possibile esaustiva, e sarà oggetto di valutazione.>