



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: 0F

TITOLO PROGETTO: Bello il digitale... ma l'analogico?

AUTORE 1: Cassaro Emilio

AUTORE 2: Coniglio Felice Simone

AUTORE 3: Buzzone Antonio Santo

Indice

1. Obiettivi del progetto	2
2. Metodo Proposto / Riferimenti Bibliografici	4
3. Risultati Attesi / Argomenti Teorici Trattati	5

1. Obiettivi del progetto

Discutere le conversioni A/D e D/A:

Al giorno d'oggi la trasmissione e l'elaborazione dell'informazione poggiano sempre più sul digitale per la sua praticità, facilità nel rilevare errori nell'informazione che stiamo elaborando che può essere così memorizzata molto facilmente.

In particolare nelle applicazioni audio l'elaborazione dei segnali avviene quasi esclusivamente in digitale, relegando pochissimi passaggi all'analogico. Per convertire un segnale da analogico a digitale e viceversa è necessaria una apposita circuiteria che permette una conversione che mantiene il segnale finale il più possibile fedele a quello originale.

A questo scopo si utilizzano i cosiddetti ADC (Convertitore Analogico/Digitale) e DAC (Convertitore Digitale/Analogico) che rispettivamente convertono un segnale analogico tempo continuo in un segnale binario (nelle applicazioni più semplici) e viceversa.

Illustrare il funzionamento dei dispositivi di conversione:

Il funzionamento ideale di un **convertitore analogico digitale** (ADC) è molto semplice: si basa sul concetto di **quantizzazione**, operazione che divide l'intervallo di variazione della grandezza da convertire in sottointervalli di eguale ampiezza che discretizzano i valori che può assumere la nostra forma d'onda.

La quantizzazione è necessaria in quanto il segnale che dobbiamo ottenere deve essere trasformato per conservare l'informazione in forma binaria. A ogni sottointervallo assoceremo quindi una opportuna codifica, che dipende dal numero di sottointervalli in cui dividiamo l'intervallo di variazione della nostra forma d'onda, il quale è direttamente dipendente dal numero di bit, e quindi dalla precisione, che decidiamo di utilizzare per codificare il nostro segnale.

Nello specifico un ADC, nella sua forma più semplice lavora attribuendo al nostro segnale (che in un certo istante di tempo avrà un certo valore) un codice binario, spesso crescente, e che viene assegnato al superamento di una opportuna soglia. (e.g. ADC Flash).

Il funzionamento di un **convertitore digitale analogico** (DAC) si basa sulla tecnica della pesatura binaria per cui a diverse configurazioni di ingressi (in questo caso binari) corrispondono specifici valori di output.

Nel processo di conversione da analogico a digitale si ha una lieve perdita d'informazione, corrispondente all'errore apportato durante l'operazione di quantizzazione, pari in dimensione al valore del **Less Significant Bit** (LSB), per cui riconvertendo in analogico il segnale otteniamo un segnale lievemente differente da quello di partenza, seppur di una quantità infinitesima.

Obiettivo di questo progetto sarà presentare un esempio di ADC e DAC.

Esempio di dispositivo D/A per l'ascolto in cuffia

Il funzionamento del dispositivo è molto semplice ed elementare in quanto è impossibile ottenere risultati con un certo grado di precisione senza conoscenze avanzate di elettronica ed elaborazione di segnali audio più in generale.

Una soluzione casereccia potrebbe essere la seguente: la cascata di un filtro passa-banda (che si occupa di filtrare il segnale limitandolo in banda), un blocco di sample and hold che descriveremo successivamente, la cascata di due amplificatori a singolo transistor (per amplificare il segnale appena filtrato e portarlo a un valore tale da essere convertito correttamente) e in fine un ADC. Il segnale in uscita sarà quindi pronto per essere trasmesso attraverso dispositivi appositi (e.g. Radiotrasmettitori).

Possiamo quindi ricevere il segnale appena trasmesso attraverso un'apposita circuiteria di ricezione, amplificandolo attraverso uno stadio a singolo transistor e dandolo in pasto a un DAC, che riconverte il segnale da digitale ad analogico. Il segnale che otteniamo presenta delle imperfezioni dovute alla grossolanità della conversione, soprattutto se il numero di bit dei convertitori non è adeguato.

Per ovviare a ciò, per smussare il ripple che presenta questo segnale possiamo filtrarlo ulteriormente con un filtro passa basso che elimina tutte le alte frequenze.

Il segnale finale, d'intensità molto bassa e di poca potenza, può essere quindi ascoltato attraverso un paio di cuffie.

2. Metodo Proposto / Riferimenti Bibliografici

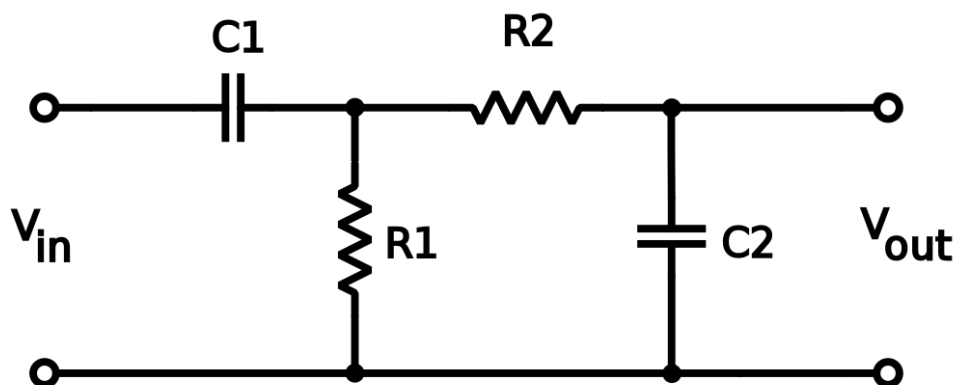
Trattazione teorica sulle condizioni di conversione:

I segnali analogici per essere elaborati e trasmessi hanno bisogno di essere convertiti in digitale per facilitare la trasmissione e l'elaborazione.

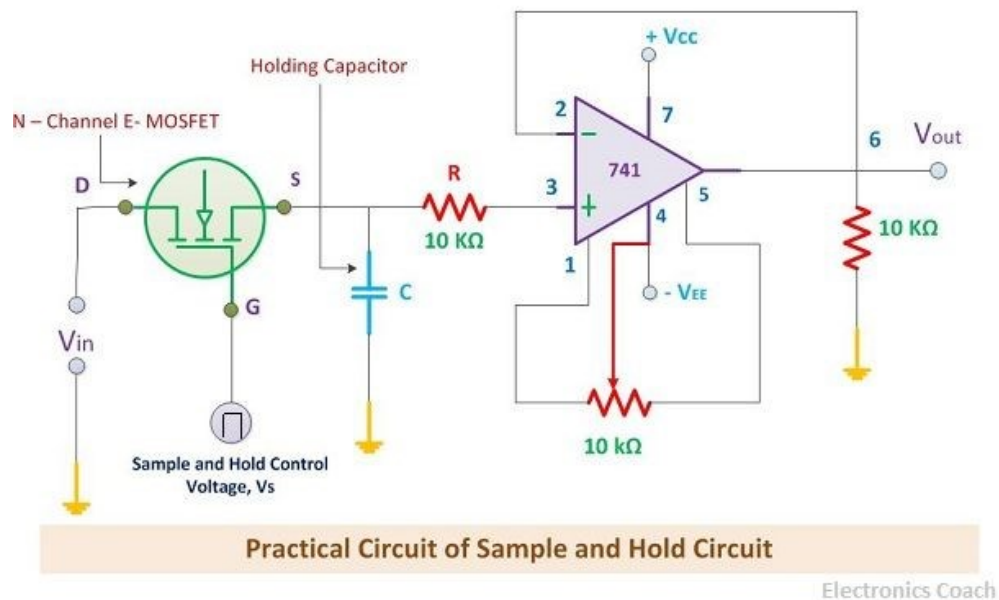
Per convertire un segnale analogico in digitale è necessaria un'apposita circuiteria di sample and hold: La frequenza a cui viene campionato il segnale potrebbe essere troppo elevata per cogliere le rapide variazioni del segnale da convertire, è quindi necessario mantenere il valore analogico costante per il tempo necessario al convertitore o ad altri circuiti successivi per compiere delle operazioni sul segnale.

Prima ancora di elaborare il segnale in questo stadio di campionamento e quantizzazione è necessario assicurarsi che valgano le condizioni di campionamento, dettate dal **Teorema del campionamento di Shannon-Nyquist** che afferma che un qualunque segnale $x(t)$ strettamente limitato in banda è ricostruibile fedelmente se campionato a una frequenza di campionamento maggiore o uguale alla frequenza di Nyquist, pari a 2 volte la larghezza di banda del segnale. Nel caso in cui questa condizione non venga rispettata si incorre nel fenomeno dell'aliasing, ossia un fenomeno distruttivo del segnale che distorce le code dello spettro del segnale campionato.

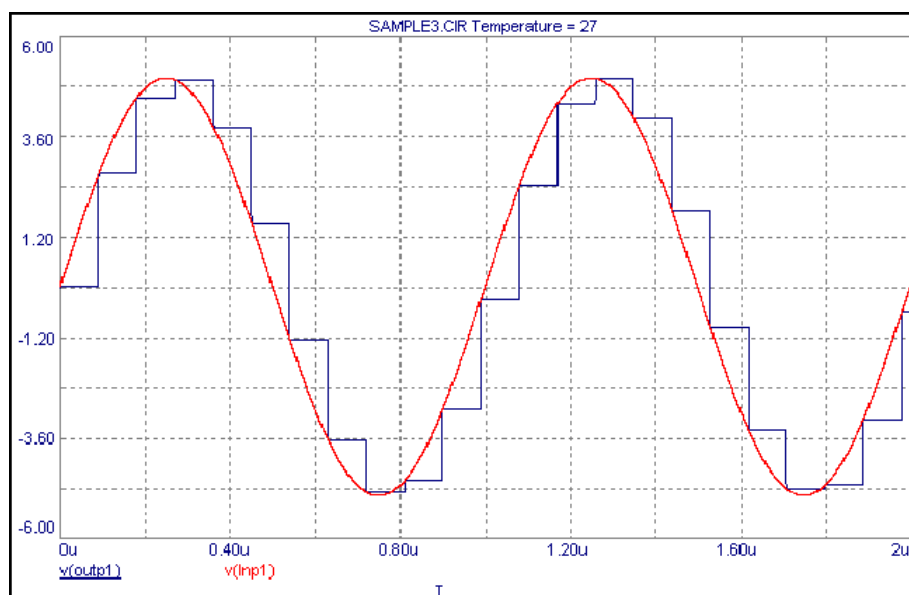
Per limitare la banda di un segnale è necessario filtrarlo. In una normale applicazione atta ad elaborare un segnale basterebbe utilizzare un filtro passa-basso per limitare la banda del segnale, ma nel caso di applicazioni audio la tipologia di filtraggio preferibile è quella passa-banda, in quanto l'orecchio umano non è in grado di sentire toni a frequenza inferiore di 20Hz e superiore ai 20kHz. Per lo scopo ricorriamo a un filtro passivo del secondo ordine risultante dalla cascata di un filtro passa-alto CR e di un filtro passa-basso RC.



Una volta filtrato il segnale siamo sicuri che la sua banda sia limitata. Si procede quindi al sampling e all'holding. Un circuito del genere è realizzabile a partire da due amplificatori operazionali in configurazione buffer, da un condensatore che mantiene costante la tensione ai suoi capi per un certo intervallo di tempo T , pari all'inverso della frequenza di campionamento, e da un interruttore che si apre e si chiude alla frequenza di campionamento. Per realizzare realmente l'interruttore si ricorre ad un transistor NMOS.

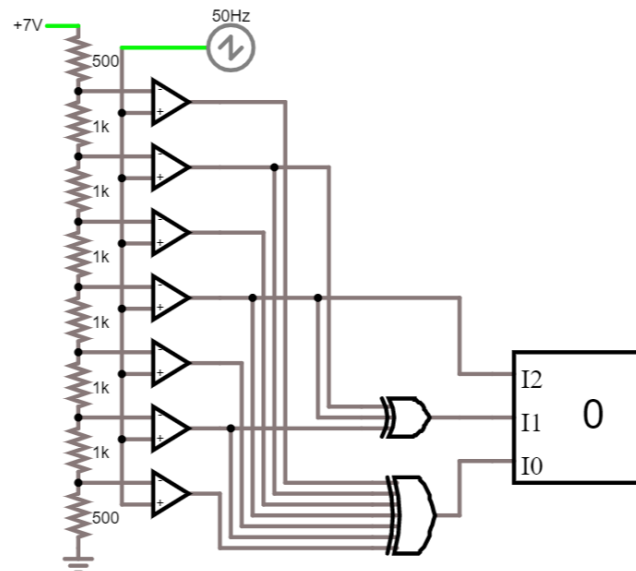


Il circuito nella figura di sopra dà in output, data ad esempio una sinusoide ad una certa frequenza in ingresso, una forma d'onda approssimata rispetto all'input come si nota dalla figura subito sotto.



Con l'output ottenuto dal circuito di sample and hold il convertitore analogico/digitale può lavorare in maniera ottimale.

Un convertitore analogico/digitale di tipo Flash è formato da degli amplificatori operazionali, che fanno da comparatori di tensione, da resistori che fanno da riferimenti di tensione e da porte XOR, che permettono di codificare il segnale in binario in base a particolari configurazioni di soglia superata.

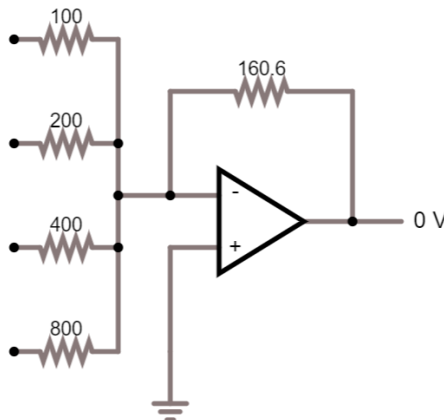


I componenti appena menzionati sono collegati come nello schematico di sopra, che illustra un ADC a 3 bit: i resistori, dall'alto verso il basso, fanno cadere la tensione a step di 1V in questo esempio, il generatore di segnale in alto, che rappresenta il nostro segnale da convertire, viene portato in ingresso al piedino invertente di tutti gli amplificatori operazionali, i quali in parallelo sono connessi tramite il piedino non invertente ai nodi formati nella connessione tra i resistori. Il range dinamico degli operazionali può essere, ad esempio, di 0-5V, per cui il segnale d'uscita del singolo operazionale sarà esattamente 5V (1 logico) soltanto quando la tensione del segnale da convertire supera la tensione al nodo non invertente, uguale a quella di riferimento al nodo del resistore corrispondente.

I segnali d'uscita sono quindi convogliati a delle porte XOR che procedono alla codifica, in questo caso espressa da numeri naturali crescenti nell'intervallo 0-7.

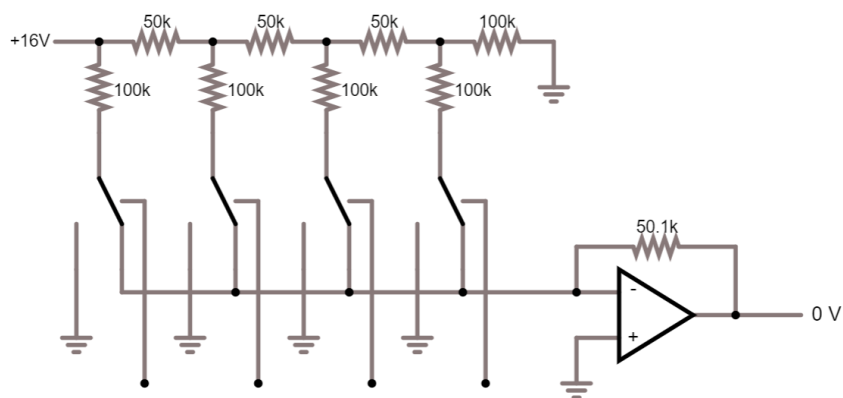
Il segnale che otteniamo infine è l'insieme di tre bit che codificano quasi alla perfezione il segnale originale, se non per l'errore introdotto descritto in precedenza.

Il convertitore digitale analogico, nella sua forma più semplice, è del tipo a pesatura binaria.



Il funzionamento di questo convertitore è basato sulla configurazione invertente dell'amplificatore operazionale. Il nodo a cui convergono tutti i resistori si chiama nodo sommatore ed è qui che vengono sommati tutti i contributi, ciascuno pesato in base al valore di resistenza a cui afferiscono i bit del segnale digitale.

Il segnale da convertire è infatti applicato bit per bit, dal più significativo al meno significativo, ai resistori, dall'alto verso il basso. Quello in figura è infatti un convertitore DAC a 4 bit. Lo svantaggio di questa configurazione è che il range di variazione della misura dei resistori che pesano il valore del singolo bit è troppo elevato. Come si nota infatti dalla figura abbiamo bisogno di 4 resistori di valore differente in ingresso. In un convertitore a 16 bit si arriva addirittura a valori di resistenze che tipicamente variano da 100Ω a $3.3M\Omega$. Per ovviare a questo problema si ricorre ad una differente configurazione circuitale che è la R-2R.



Con questa configurazione riusciamo a creare un convertitore perfettamente equivalente a quello precedente con il solo ausilio di resistori di 2 valori di cui uno è il doppio dell'altro.

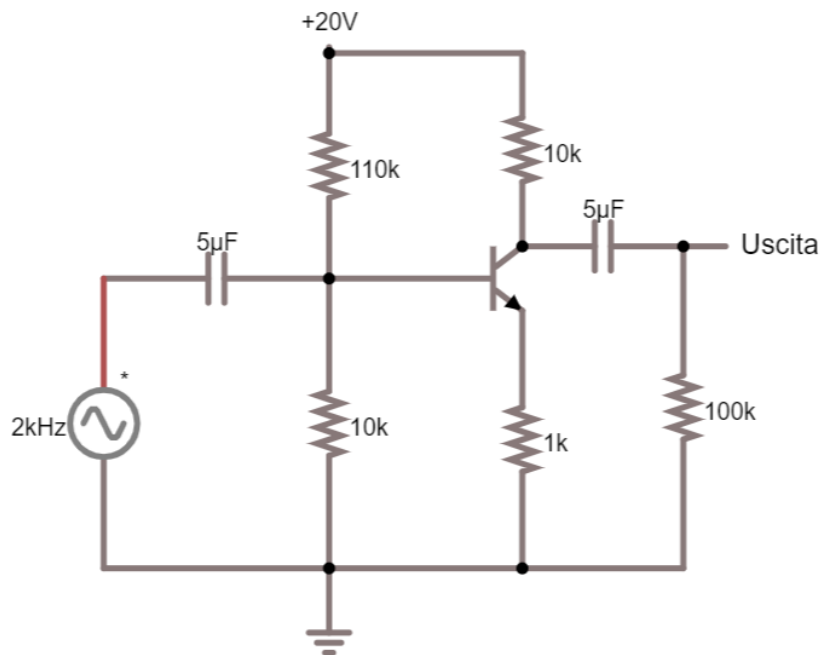
Per il circuito di sample and hold ricorriamo a un amplificatore operazionale LM741 e dimensioniamo il condensatore che mantiene la carica (hold) per il tempo necessario affinché venga elaborato dal convertitore, in modo che il filtro RC parassita che si forma tra il suddetto condensatore e la resistenza equivalente del transistor NMOS in regione di triodo non distorca il segnale.

Come detto precedentemente i convertitori lavorano assegnando al superamento di determinate soglie specifiche configurazioni di bit con peso differente nel caso degli ADC, e in base al peso che hanno i bit in

ingresso particolari valori dell'uscita nel caso dei DAC. Per garantire il corretto valore di ingressi a entrambi i convertitori è necessaria un'apposita circuiteria di amplificazione.

Ricorriamo in questo caso a dei semplici amplificatori a singolo transistor (in questo caso un BJT) in configurazione emettitore comune.

Sfruttiamo quindi la proprietà di amplificatore di transconduttanza dei transistori bipolari per amplificare segnali in ingresso.



Il modulo di amplificazione appena descritto è esattamente quello della figura di sopra.

Calcolo dei parametri di progetto:

Un filtro del genere ha una funzione di trasferimento pari a:

$$H(s) = \frac{sR_2C_2}{(1 + sR_1C_1)(1 + sR_2C_2)}$$

che mette in evidenza attraverso i suoi due poli le frequenze di taglio che si ottengono nel tracciamento del diagramma di Bode associato. Queste due frequenze sono:

$$f_L = \frac{1}{2\pi R_2 C_2} \quad \text{e} \quad f_H = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}$$

Se $R_1 = 1k\Omega$, $R_2 = 1k\Omega$, $C_1 = 8\mu F$, $C_2 = 8nF$ otteniamo $f_L = 20Hz$ e $f_H = 20kHz$, ossia la banda passante del filtro coincide con quella dell'orecchio umano.

Per far lavorare in modo efficiente il circuito di sample and hold (prendiamo come riferimento il circuito illustrato precedentemente) utilizziamo un condensatore da $10\mu F$ e un transistor STN3N45K3 (prodotto dalla STMicroelectronics) di tipo NMOS.

Il nostro convertitore analogico/digitale necessita di $2^N - 1$ resistori da $1k\Omega$, dove N è il numero di bit in uscita dell'ADC e di $2^N - 1$ amplificatori operazionali 741 e di porte logiche XOR integrate di tipo SN74ALS86N. Nel nostro caso scegliamo per semplicità un numero di bit pari a 4.

Il convertitore digitale/analogico necessita invece di un amplificatore operazionale 741 e da 5 resistori da $100k\Omega$, da 3 resistori da $50k\Omega$ e da un resistore di retroazione di circa $50k\Omega$.

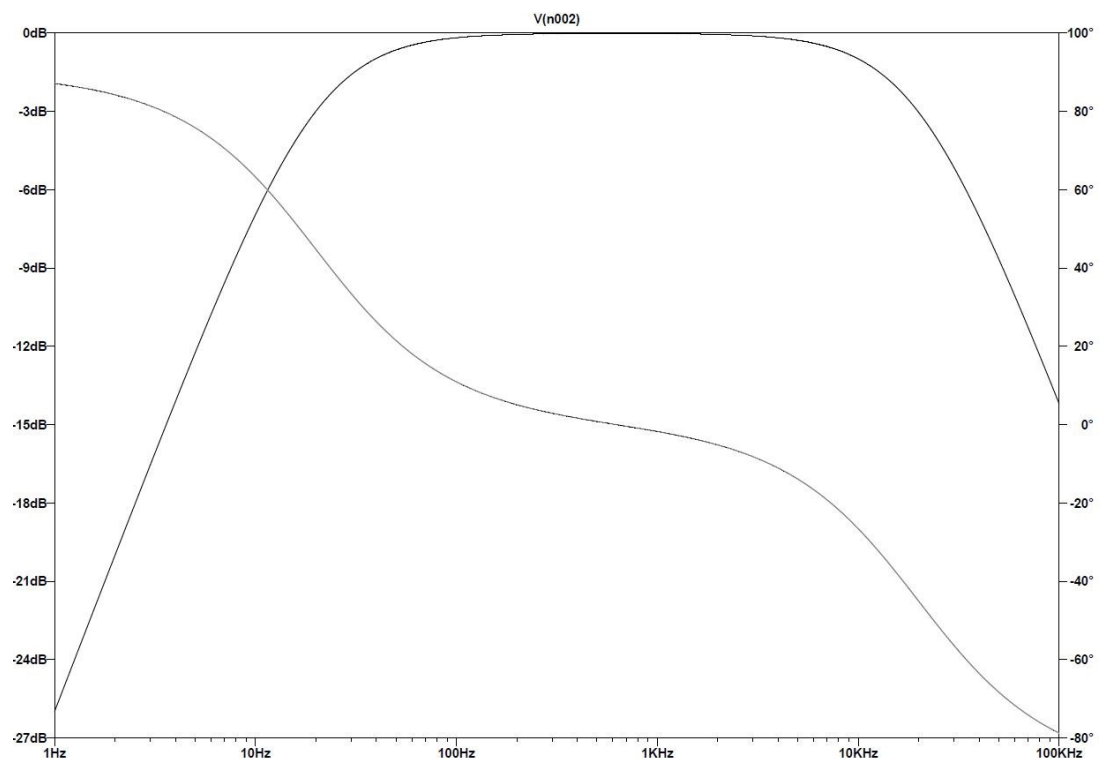
Il modulo di amplificazione a singolo transistor necessita di un NPN 2N3904 per il suo alto guadagno, di 4 resistori di polarizzazione del valore di $110k\Omega$, 2 da $10k\Omega$ e da $1k\Omega$, da 2 condensatori di disaccoppiamento del valore di $5\mu F$, da un resistore di carico del valore di $100k\Omega$ e da un OPAMP 741 in configurazione buffer. Il modulo di filtraggio finale è formato da un resistore da $1k\Omega$ e un condensatore da $8nF$.

Simulazione SPICE:

Simuliamo il comportamento del filtro passa banda attraverso il seguente listato SPICE:

```
FILTRO PASSA-BANDA
*
V1 1 0 AC 1 0
R1 2 0 1K
R2 2 3 1K
C1 1 2 8U
C2 3 0 8N
.AC DEC 1000 1 100K
```

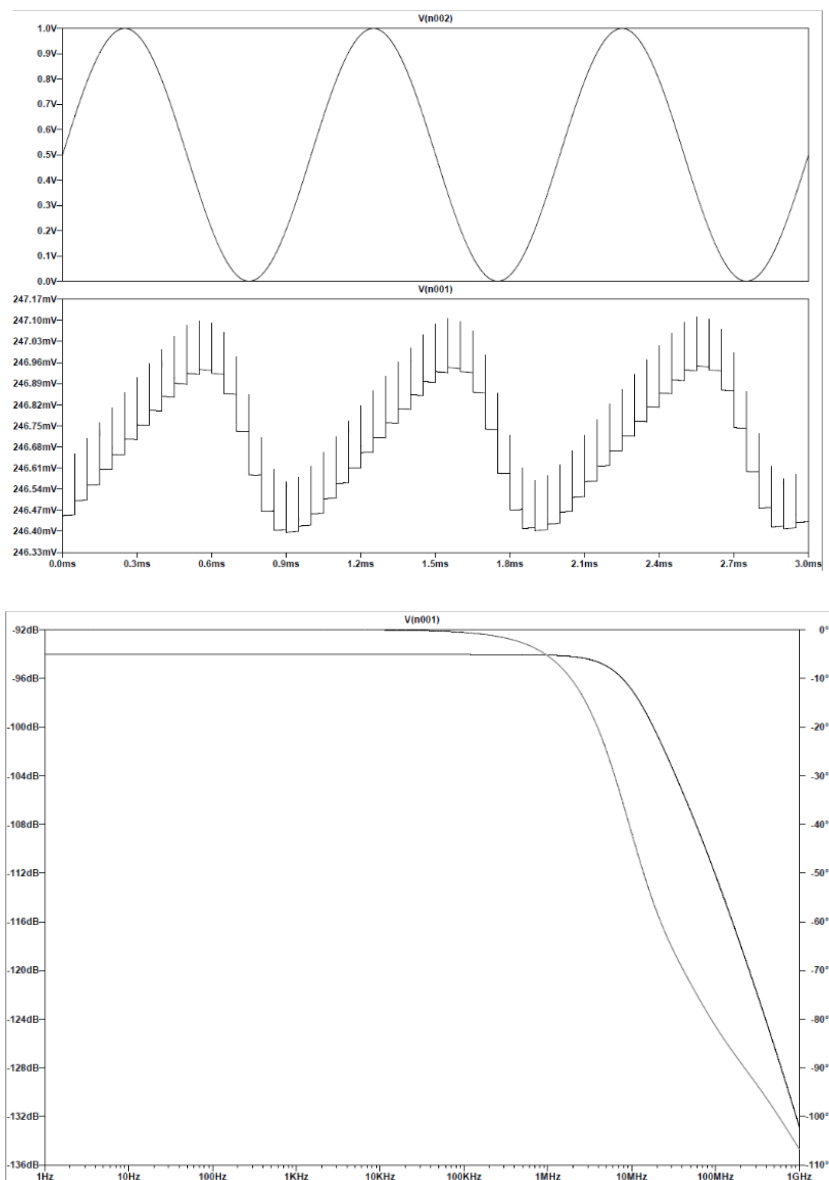
Otteniamo la seguente risposta in frequenza, ottima per filtrare un segnale di tipo audio.



Simuliamo il circuito di sample and hold attraverso il seguente listato SPICE:

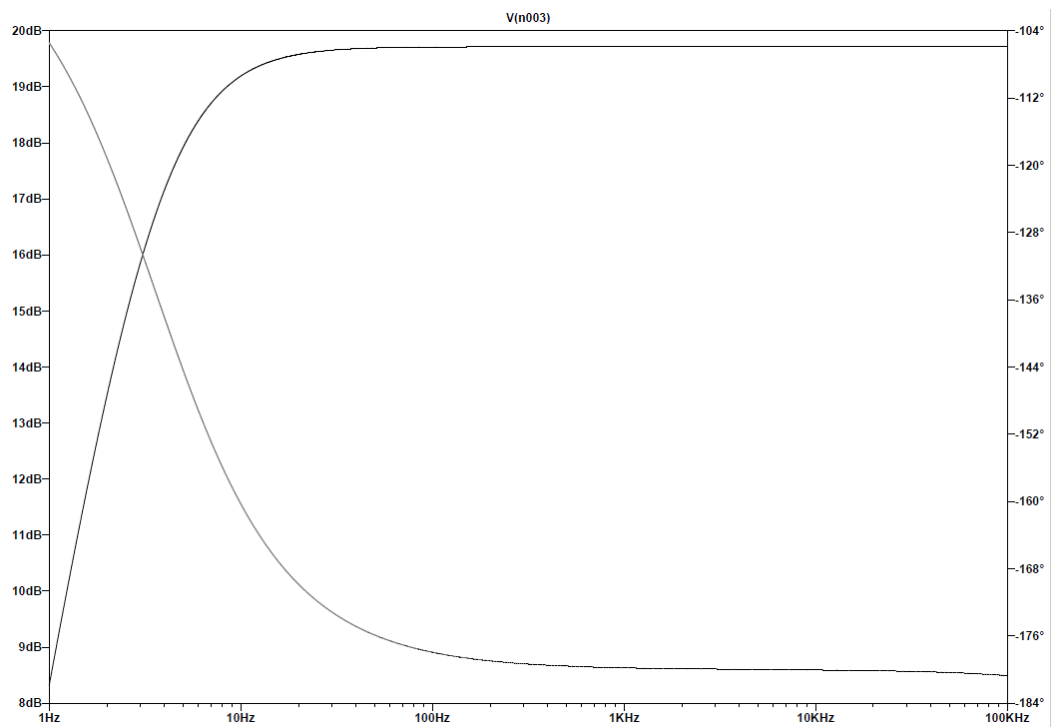
```
SAMPLE AND HOLD
*
VDD DD 0 10
VSS SS 0 -10
V1 1 0 AC 1 0 SIN 0 1 1K
M1 1 CLK 2 2 STN3N45K3
C1 2 0 10U
R1 2 3 10K
X1 0 3 DD SS 4 LM741
VCLK CLK 0 PULSE 0 5 0 1P 1P 1U 10U
.MODEL NMOS NMOS
.MODEL LM741.SUB
.AC DEC 1000 1 1G
;.TRAN .1U 500M 497M
```

Otteniamo da due distinte simulazioni, una in transitorio e l'altra una risposta in frequenza, i seguenti grafici. Notiamo che dall'analisi in transitorio il segnale originale è parecchio distorto. Questo comportamento dipende dalla bassa reattività del condensatore che forma come precedentemente detto un filtro RC passivo con la resistenza di accensione del transistor. Notiamo invece dal diagramma di Bode della risposta in frequenza che il circuito è ottimo per lavorare a frequenze audio non attenuando i segnali d'ingresso.



Simuliamo adesso il comportamento dell'amplificatore a singolo transistor:

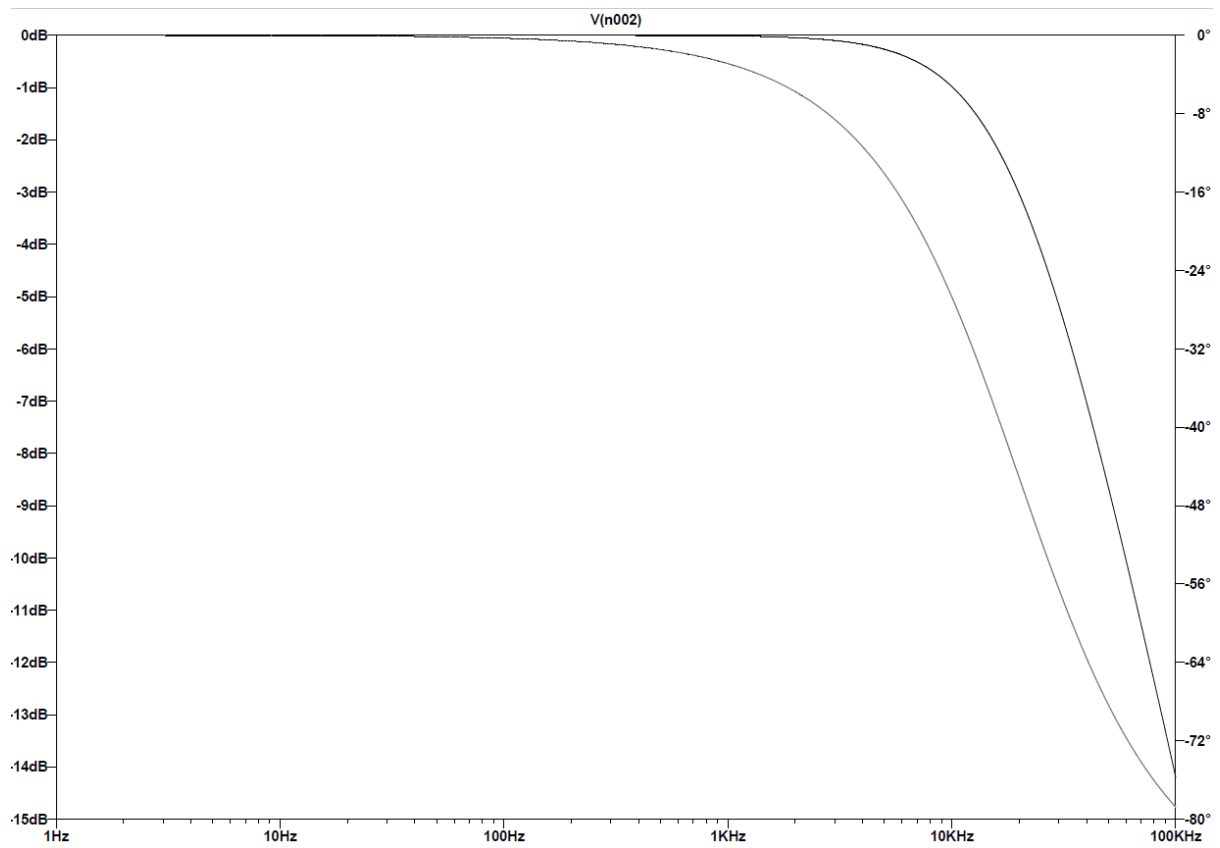
```
AMPLIFICATORE BJT
*
Q1 D G S S 2N3904
RD DD D 10K
RS S 0 1K
R2 G 0 10K
R1 DD G 110K
RL 2 0 100K
C1 1 G 5U
C2 D 2 5U
V1 1 0 AC 1 0
VDD DD 0 20
.MODEL NPN NPN
.AC DEC 1000 1 100K
```



Notiamo dal diagramma di Bode della risposta in frequenza che il circuito guadagna 20dB a partire da una frequenza di taglio di circa 3Hz. L'uscita sarà quindi amplificata di 10 volte rispetto all'ingresso ma invertita in segno. L'amplificatore a emettitore comune è infatti un amplificatore di segnale invertente.

Simuliamo adesso il comportamento del filtro passa-basso:

```
FILTRO PASSA-BASSO
*
R1 1 2 1K
C1 2 0 8N
V1 1 0 AC 1 0
.AC DEC 1000 1 100K
```



Notiamo che questo filtro d'uscita presenta una banda passante che va da 0 a 20 kHz.
È quindi ottimo per mantenere intatti i segnali audio.

3. Risultati Ottenuti / Argomenti Teorici Trattati

Dalla simulazione dei vari blocchi circuitali notiamo un comportamento ottimo per quanto riguarda gli stadi di filtraggio e di amplificazione, anche se con differenti configurazioni dei BJT si possono ottenere risultati certamente migliori.

Risulta invece critico il dimensionamento dei componenti dello stadio di sample and hold: notiamo infatti dalla simulazione dei fastidiosi spike di tensione che potrebbero arrecare disturbo nella conversione.

La simulazione infatti è effettuata attraverso la descrizione di modelli reali (e.g. il transistor 2N3904 o l'OPAMP LM741) che presentano evidenti non-idealità, soprattutto per quanto riguarda il transistor che fa da interruttore campionatore.

D'altra parte per quanto riguarda i convertitori la trattazione da questo punto di vista può essere esclusivamente teorica: i modelli sono molto semplici e funzionano sempre seppur in modo grossolano; la parte difficile, se non infattibile, a questi livelli, è la simulazione.

Il simulatore SPICE è infatti un ottimo simulatore di circuiti che elaborano segnali analogici, per cui è estremamente complicato simulare il comportamento di circuiti digitali quali l'ADC e il DAC.

L'ADC infatti presenta al suo interno diverse porte XOR, non semplicissime da realizzare in SPICE e complicate da reperire nelle librerie. Inoltre l'analisi in transitorio sarebbe molto delicata da effettuare, in quanto anche nel più semplice dei convertitori avremmo ben 4 linee d'uscita, corrispondenti ai bit che codificano il segnale.


Per quanto riguarda la simulazione del DAC il limite non è circuitale: il convertitore si basa sulla pesatura binaria, per cui è di semplice fattura; il vero problema è la gestione dei valori in ingresso. Questa infatti richiederebbe, nel caso ad esempio di un DAC a 4 bit, di ben 4 generatori di tensione che simulano i valori che possono assumere i bit d'ingresso. Si tratta di un incastro di valori molto complicato che richiede parecchi tentativi di simulazione.

Da questo lavoro abbiamo quindi ottenuto un buon modello teorico, seppur artigianale, che nelle parti facilmente simulabili funziona proprio come dovrebbe, ma che rimane praticamente insimulabile per quanto riguarda la componentistica di conversione.

Sarebbe più opportuno un testing diretto su hardware del circuito, implementato fisicamente su PCB, molto semplice da realizzare nelle parti di filtraggio e di amplificazione, praticamente una follia per quanto riguarda la costruzione dell'ADC a 4 bit. Questo, infatti, richiederebbe ben 15 amplificatori operazionali per essere realizzato, impresa titanica e assolutamente insensata dato il costo irrisorio di ADC a 16 bit.

Costruire un ADC a 4 bit casereccio costerebbe più di 10 € solo per quanto riguarda gli amplificatori operazionali. È inutile dire che si trovano in commercio ADC a 16 bit integrati a circa 3 €.

Implementare fisicamente un simile circuito sarebbe una pura goliardata.

Concludiamo quindi che trattare in modo puramente teorico la conversione analogico/digitale a questi livelli è molto semplice, ma di impossibile implementazione. Ricorrere inoltre a modelli di convertitori molto più raffinati come i Sigma-Delta (che NON HANNO CONFRONTI. ) a questi livelli è praticamente complicatissimo.

Sarebbe invece già più ragionevole implementare un circuito che fa uso di convertitori già in commercio con gli stadi di filtraggio e amplificazione progettati in questa relazione.

Ci riserviamo di realizzare in futuro un esempio pratico, realizzato fisicamente su basetta, di quanto illustrato in questa relazione.