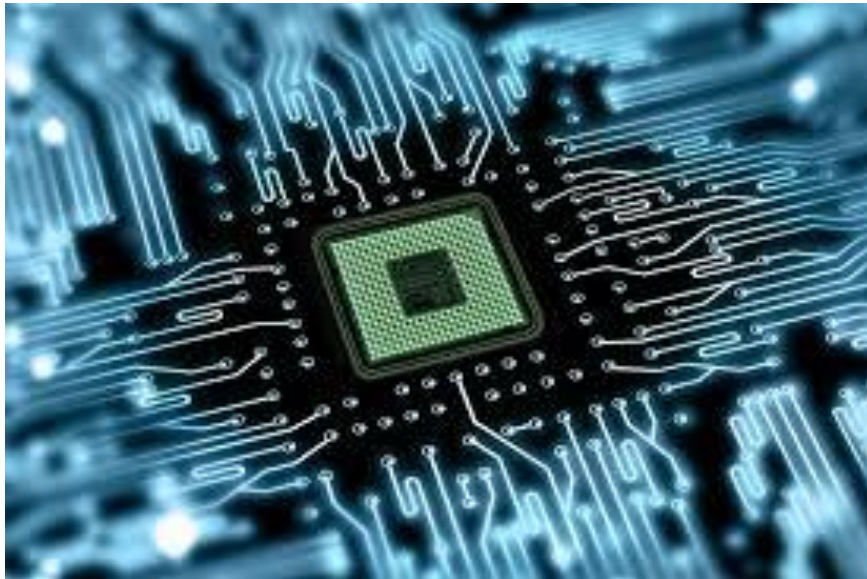


Seminari di elettronica

Guerino Mangiamele

La conversione analogica-digitale



I segnali nel mondo reale SONO analogici.

Per esempio la temperatura, il suono, la quantità di luce sono grandezze analogiche perché “variano con continuità nel tempo ed assumono infiniti valori”, cioè una grandezza fisica analogica quale la temperatura, non passa da 15°C a 18°C senza passare, anche per un solo istante tra tutti gli infiniti valori intermedi (15,0000001 °C, 15,0000002 °C, ecc...).

Del resto noi parliamo in modo analogico ed ascoltiamo in modo analogico....

Ma il computer, e tutti i sistemi tecnologici moderni sono in grado di comprendere soltanto il linguaggio binario digitale, composto da 2 soli elementi: Zero e Uno. In termini “elettronici”, assenza di tensione (0 Volts) o presenza di tensione (5 Volts).

Quindi ogni qualvolta vogliamo rilevare con sensori, tutto ciò che ci sta attorno e vogliamo farlo elaborare da un dispositivo elettronico (un computer, un termostato domestico, uno smartphone, una televisione....) dobbiamo convertirlo in un linguaggio che i sistemi elettronici sono in grado di comprendere. Questi dispositivi sono detti CONVERTITORI ANALOGICO-DIGITALI.

Viceversa, quando vogliamo noi interfacciarci ad un sistema elettronico, sarà necessaria la funzione inversa, una conversione DIGITALE-ANALOGICA.

Un semplice esempio: quando parliamo al telefono, la nostra voce (analogica) viene captata da un microfono (sensore analogico), il segnale generato dal microfono viene trasformato in digitale da un convertitore A/D.

Così, il computer presente nello smartphone può elaborarlo ed inviarlo al nostro interlocutore. Sul telefono del nostro interlocutore, arriveranno dati digitali che il computer del suo smartphone elaborerà e trasformerà in analogico per mezzo di un convertitore Digitale –analogico. Il segnale così riconvertito potrà essere ascoltato per mezzo dell'altoparlante.

IL CONVERTITORE Analogico-Digitale A/D

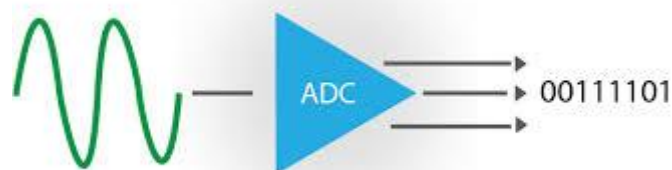
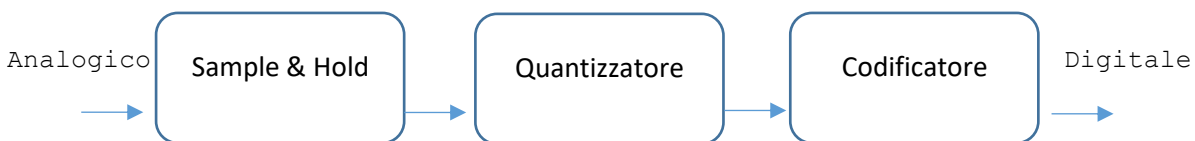
Un convertitore da analogico a digitale (ADC) riceve un segnale di ingresso analogico e converte l'ingresso, attraverso una funzione matematica, in un segnale di uscita digitale.

Tre sono le fasi principali di un dispositivo elettronico ADC

Il segnale viene campionato **S/H**

Il segnale campionato è quantizzato. **Quantizzatore**

Il segnale quantizzato è codificato digitalmente. **Codificatore**



Campionamento

Tramite il campionamento trasformiamo una funzione a tempo continuo che può assumere infiniti valori in momenti diversi, in una funzione discretizzata che può assumere infiniti valori in diversi indici discreti.

Il campionamento viene generalmente eseguito con un circuito Sample-And-Hold (campionamento e memorizzazione, si possono fare semplici esperimenti usando un condensatore e un interruttore). Per poter ricostruire il segnale, dobbiamo considerare il Teorema di SHANNON del campionamento che afferma che :

Per poter ricostruire correttamente un segnale, bisogna prelevare un numero di campioni pari almeno al doppio della frequenza massima del segnale analogico.

Esempio: Quando noi parliamo, emettiamo suoni a varie frequenze, generalmente comprese tra i 100Hz e i 5000 Hz. Quindi per poter ricostruire correttamente un segnale dobbiamo prelevare almeno 10000 campioni ogni secondo, cioè con una frequenza di campionamento di 10000 Hz.

Frequenza di campionamento dell'ADC

La frequenza di campionamento, può essere legata alla velocità dell'ADC. La frequenza di campionamento viene misurata utilizzando "campioni al secondo", in cui le unità sono in SPS o S / s (o se si utilizza la frequenza di campionamento, sarebbe in Hz). Questo significa semplicemente quanti campioni o punti dati ci vogliono in un secondo. Più campioni prende l'ADC, più alte sono le frequenze che può gestire.

Un'equazione importante sulla frequenza di campionamento è:

$$f_s = 1 / T$$

Dove,

f_s = frequenza di campionamento

T = Periodo del campione o tempo impiegato prima di ripetere il campionamento

Ad esempio, nella Figura che segue, f_s è 20 S / s (o 20 Hz), mentre T è 50 ms. La frequenza di campionamento è molto lenta, ma il segnale di uscita è approssimato ma piuttosto simile al segnale analogico originale. Questo perché la frequenza del segnale originale è lenta 1 Hz, il che significa che la frequenza era ancora abbastanza buona da ricostruire un segnale simile.

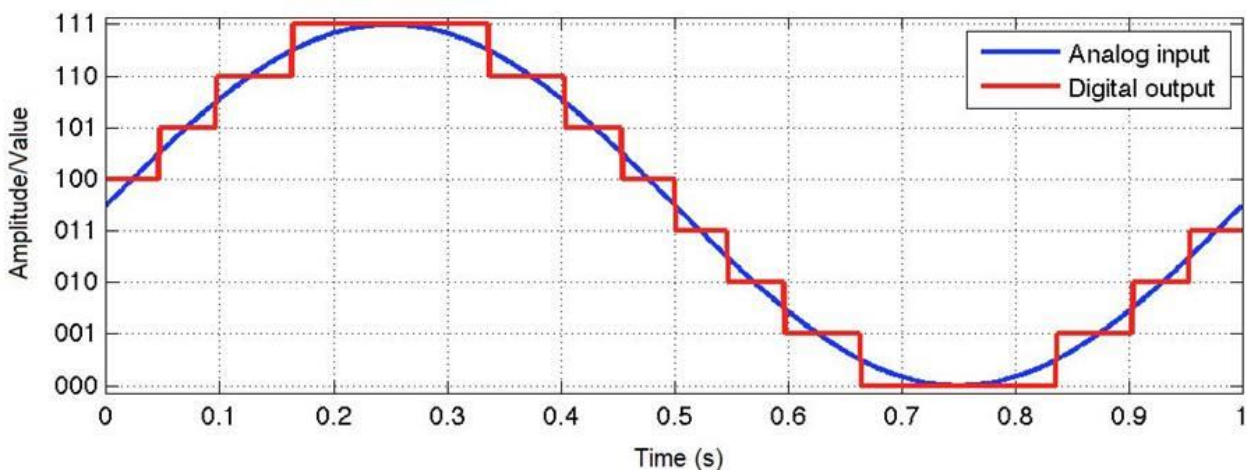


Figura 1

Cosa succede quando la frequenza di campionamento è considerevolmente più lenta? .

È importante conoscere la frequenza di campionamento dell'ADC perché è necessario sapere se causerà l'aliasing.

Un elevato Aliasing si ottiene quando un'immagine / segnale digitale viene ricostruita, differisce notevolmente dall'immagine / segnale originale causato dal campionamento.

Se la frequenza di campionamento è lenta e la frequenza del segnale è elevata, l'ADC non sarà in grado di ricostruire il segnale analogico originale che causerà al sistema la lettura di dati errati. Un buon esempio è mostrato nella Figura 2.

Esempio di aliasing ADC

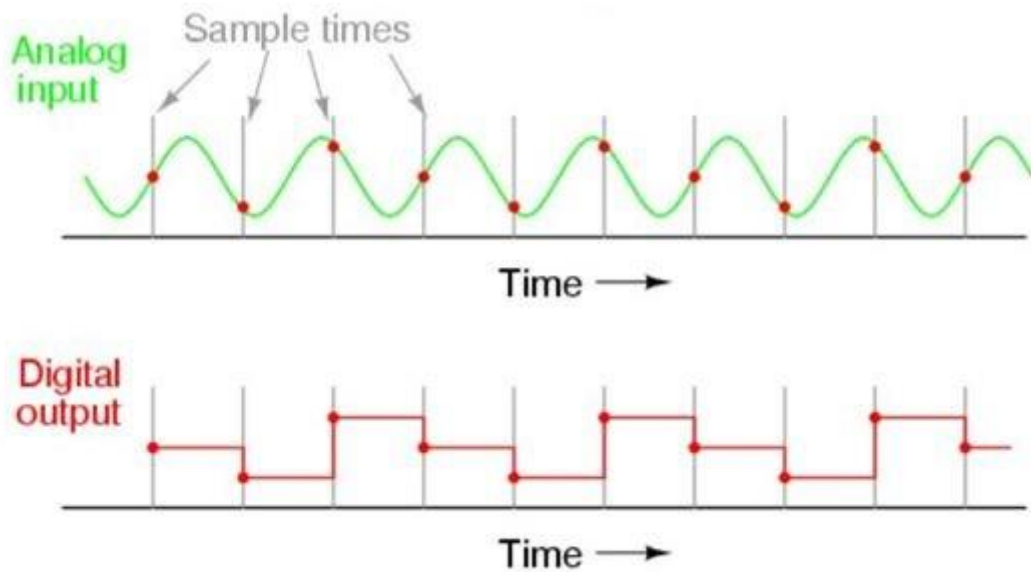


Figura 2 . (Fonte: An example of how aliasing happens Tony R. Kuphaldt - Lessons in Electric Circuits)

In questo esempio, si può notare il fenomeno dell'aliasing. L'uscita del segnale digitale non è affatto vicina al segnale originale poiché la frequenza di campionamento non è abbastanza elevata da tenere il passo con il segnale analogico.

Una regola empirica per capire se si va incontro al problema dell'aliasing è l'utilizzo del Teorema di Shannon-Nyquist già citato in precedenza, secondo il quale frequenza di campionamento deve essere almeno il doppio della frequenza più alta nel segnale per ricreare il segnale analogico originale. La seguente equazione viene utilizzata per trovare la frequenza di Nyquist:

$$f_{\text{Nyquist}} = 2f_{\text{Max}}$$

Dove,

f_{Nyquist} = Frequenza di Nyquist

f_{Max} = La frequenza massima che appare nel segnale

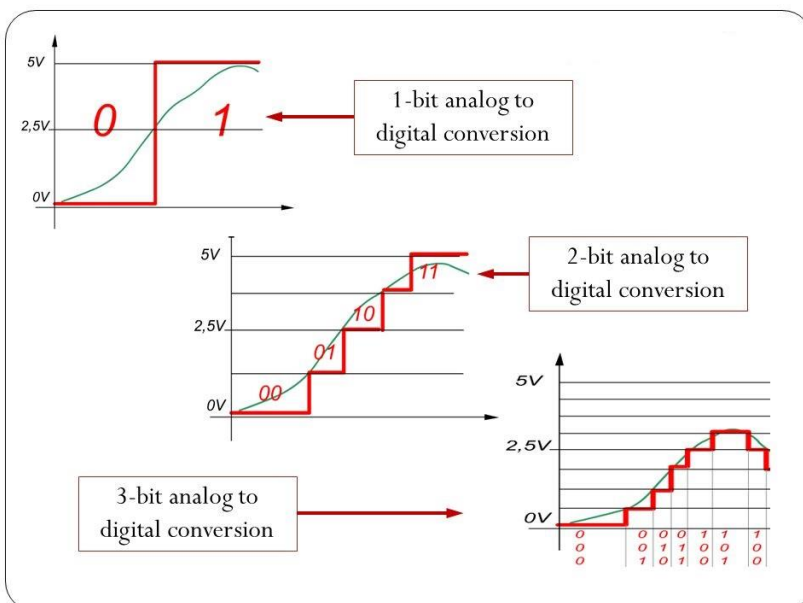
È anche bene notare che ci sono casi in cui il rumore esterno può introdurre alte frequenze impreviste nel segnale analogico e creare errate conversioni in quanto la frequenza di campionamento non è in grado di gestire la frequenza del rumore aggiunta. È sempre una buona idea aggiungere un filtro anti-aliasing (filtro passa-basso) prima che inizi l'ADC e inizi il campionamento, poiché può impedire ad alte frequenze impreviste di arrivare al sistema.

Quantizzazione

La quantizzazione è il processo di acquisizione di un segnale di tensione continua e mappatura su un numero discreto di livelli di tensione. Il numero di livelli di tensione influisce sul rumore di quantizzazione che si verifica. Poiché i computer digitali sono di natura binaria, il numero di livelli di quantizzazione è in genere una potenza di 2, ovvero

$$N = 2^n - 1$$

dove n è il numero di bit di quantizzazione.



Per esempio, se utilizziamo 3 bit di quantizzazione (risoluzione a 3 bit) abbiamo 7 livelli, se utilizziamo un Byte abbiamo 255 livelli.

Il convertitore ADC presente sulla scheda Arduino è a 10 bit, quindi una risoluzione a 10 bit e pertanto $(2^{10} - 1)$ livelli disponibili, cioè 1023.

Supponendo di voler convertire un segnale analogico che varia da 0 a $V_{REF} = 5V$, dobbiamo suddividere l'intervallo in 1023 parti. L'intervallo di quantizzazione sarà di $5/1023$, quindi 4,89 mV.

Durante la quantizzazione, il valore campionato viene quindi approssimato al livello più vicino disponibile. Naturalmente si compie un errore che è tanto più limitato quanto più alte sono la frequenza di campionamento e la risoluzione.

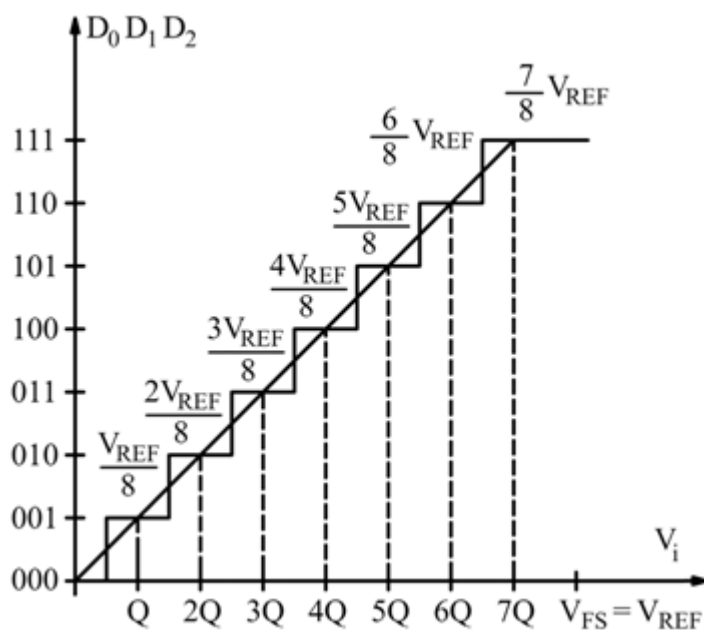
I moderni sistemi elettronici hanno risoluzioni di 8-10 bit per applicazioni standard, arrivando anche a 24-28 bit per dispositivi dove è richiesta una notevole precisione.

Il segnale può essere amplificato o attenuato prima di entrare nell'ADC, in modo che i livelli di tensione massima e minima offrano il miglior compromesso tra risoluzione dei livelli del segnale e minimizzazione del clipping.

Risoluzione ed errori di conversione

E' opportuno ricordare che tutta la catena di conversione, essendo frutto di approssimazioni, viene trasformata una grandezza analogica con infinite "sfumature" in una digitale avente un numero limitato di livelli, porta ad una degradazione del segnale che, in alcuni casi, quali la musica, non sono di poco conto.

Codifica



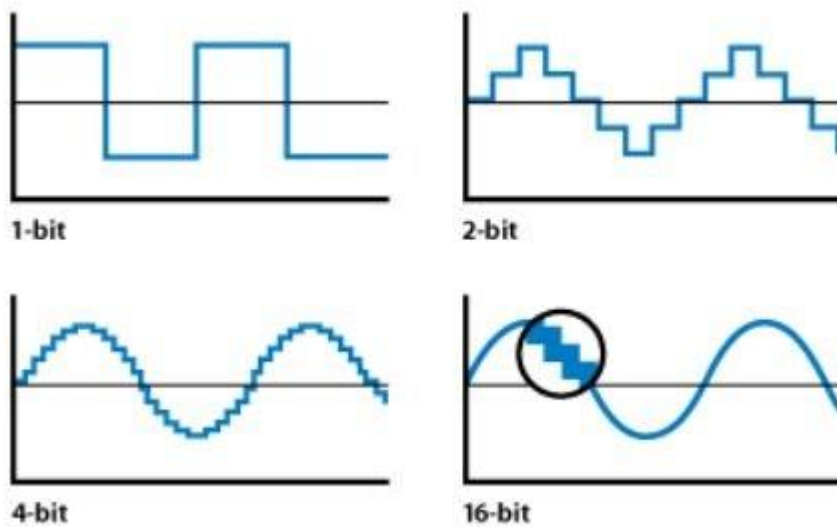
La codifica è il processo di conversione dei segnali quantizzati in una rappresentazione digitale. Questa codifica viene eseguita assegnando a ciascun livello di quantizzazione un'etichetta unica. Ad esempio, se vengono utilizzati tre bit, il livello più basso può essere (in binario) 000 e il successivo livello più alto 001, ecc.

Al termine di questa catena, il segnale analogico in ingresso sarà convertito in un segnale digitale di tipo binario interpretabile dai sistemi di elaborazione.

Risoluzione di ADC

La risoluzione dell'ADC è determinata quindi dalla sua lunghezza in bit. Un esempio rapido di come si può ottenere un segnale digitale più accurato è mostrato nella Figura 3. Con 1-bit si hanno solo due "livelli", con 2-bit, 4 livelli.... . Aumentando la lunghezza dei bit, i livelli aumentano rendendo il segnale fedele al segnale analogico originale.

Esempio di risoluzione del segnale digitale



Se è necessario un livello di tensione accurato per la lettura del sistema, è importante aumentare la risoluzione dei bit. La risoluzione dipende sia dalla lunghezza dei bit che dalla tensione di riferimento.

Le relazioni da tenere in conto in questo caso sono:

$$\text{Step Size} = V_{\text{Ref}} / N \quad (1)$$

Dove

Step Size = La risoluzione e la distanza tra i livelli espressi in tensione (volt)

V_{Ref} = Il riferimento di tensione (intervallo di tensioni) espresso in volt

N = Numero dei livelli di un ADC

ESEMPIO APPLICATIVO 1

Supponiamo che un'onda sinusoidale debba essere convertita in un intervallo di tensioni (V_{Ref}) di 5V. L'ADC ha una dimensione in bit di 12 bit e i livelli sono quindi 4096 (da 0 a 4095). In tal caso $\text{Step Size} = 5V / 4096 = 1,22 \text{ mV}$. Quindi, ogni qualvolta la tensione sinusoidale varia di più di 1,22mV, il dato digitale verrà variato. Si può dire che per $V_{\text{Ref}}=5V$ e per un convertitore ADC a 12 bit la precisione sarà di 1,22mV.

Se l'ADC avesse una lunghezza di bit molto piccola, diciamo solo 2 bit, la precisione si ridurrebbe a soli 1,25 V, con solo 4 livelli (0 V, 1,25 V, 2,5 V, 3,75 V e 5 V).

La tabella seguente mostra la lunghezza in bit, il loro numero di livelli e la risoluzione con riferimento a $V_{Ref}=5V$. La precisione aumenta all'aumentare della lunghezza dei bit.

Bit Length	Levels	Step Size (5V Range)
8-bits	256	19.53 mV
10-bits	1024	4.88 mV
12-bits	4096	1.22 mV
16-bits	65536	76.29 μV
18-bits	262144	19.07 μV
20-bits	1048576	4.76 μV
24-bits	16777216	0.298 μV

Grafico conversione bit rate ADC

Per aumentare la precisione, a parità di risoluzione si riduce la tensione V_{Ref} . Nei moderni sistemi digitali si tende a fornire una V_{Ref} pari a 3,3 V : in questo caso la precisione sarà più elevata e pari a $3,3/4096 = 0,8mV$.

Esempio applicativo 2

Si vuol conoscere quanta memoria in MB potrà occupare un brano musicale della durata di 3 minuti, utilizzando per la conversione un ADC con risoluzione 8 bit.

Lo spettro di un segnale audio musicale va da 50Hz a 20.000 Hz .

La frequenza di campionamento deve essere almeno di 40.000 Hz (40.000 campioni al secondo)

Quindi in 3 minuti di registrazione (180 secondi) vengono memorizzati

$40.000 \times 180 = 7200000$ byte , quindi 7,2 MB

Conversione da digitale ad analogico

Un convertitore da digitale ad analogico (DAC) prende un segnale digitale e lo converte, attraverso una funzione matematica, in un segnale analogico. Ancora una volta, il DAC può essere implementato in diversi modi, ma concettualmente contiene due passaggi.

Converti ogni fase temporale del segnale digitale in un "impulso" con l'energia appropriata. In un sistema reale, ciò potrebbe essere realizzato creando impulsi brevi che hanno la stessa tensione, ma la cui potenza totale viene modificata cambiando la lunghezza degli impulsi. Questo treno di impulsi produce un segnale la cui risposta in frequenza è periodica (e teoricamente si estende all'infinito).

Applicando poi un filtro passa-basso alla sequenza temporale degli impulsi. Si rimuovono le periodicità ad alta frequenza, lasciando solo il segnale originale.