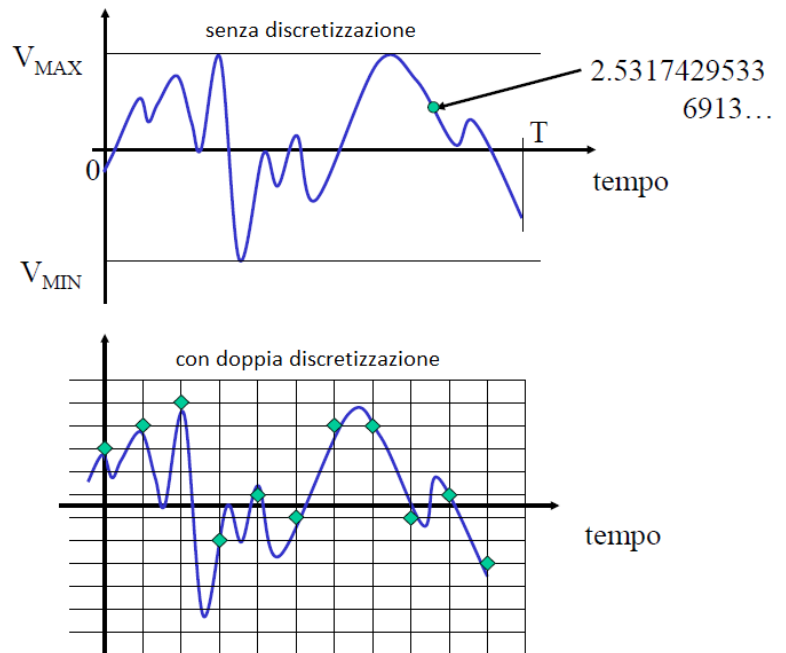


CONVERSIONE A/D

Introduzione

La conversione analogico/digitale è quel processo che permette di ottenere una rappresentazione digitale di un generico segnale originariamente analogico. Questo processo avviene molto frequentemente nel campo delle misure perché i trasduttori in genere producono in uscita un segnale analogico, ovvero un segnale in tensione o in corrente, proporzionale alla grandezza misurata. Per poter memorizzare, elaborare e trasmettere questi segnali con il computer o un qualunque elaboratore è necessario convertire il segnale analogico in digitale, ovvero una sequenza di numeri. È necessario effettuare tale conversione poiché i segnali provenienti dai trasduttori sono continui nel tempo e dunque possono assumere tutti i valori fra un limite superiore e uno inferiore. Si hanno quindi infiniti valori del segnale tra 0 e T, ciascuno teoricamente caratterizzato da infinite cifre. Occorrerà dunque convertire tale segnale continuo in un valore ben preciso rappresentato da una sequenza di numeri. Esempi conversione analogico digitale: televisione, bilancia digitale, microfono del cellulare. Il segnale analogico è quindi un dato noto e/o disponibile all'utente con continuità del tempo: può assumere un numero infinito di valori in qualunque Δt , piccolo a piacere. Il segnale digitale invece è un dato noto e/o disponibile all'utente in forma discreta nel dominio del tempo, può essere rappresentato con una sequenza di numeri. Per poter memorizzare, trattare e trasmettere i segnali con un computer, è necessario procedere ad una doppia discretizzazione:



- Campionamento = discretizzazione lungo l'asse del tempo cioè si osserva il valore di tensione un numero finito di volte nell'unità di tempo poiché non è possibile infiniti valori in un intervallo finito di tempo. Durante questa fase dunque il dato analogico viene suddiviso in un insieme di dati discreti.
- Conversione A/D = discretizzazione lungo l'asse verticale. Ogni valore campionato al punto precedente è caratterizzato da un numero reale (infinite cifre), in quanto il segnale analogico di partenza è continuo e può assumere infiniti valori nell'intervallo finito fra la tensione minima accettabile e la tensione massima. La conversione A/D è il processo con cui il valore reale della grandezza analogica di un dato nell'istante temporale viene convertito in un valore numerico con un numero finito di cifre. Durante questa fase quindi si assegna una parola digitale ad ogni stato discreto secondo un codice opportuno. Per poter effettuare tale conversione occorrono dei convertitori

Convertitori

I convertitori sono sistemi di acquisizione digitale di segnali che sono l'interfaccia tra analogico e digitale. Tali sistemi sono basati su:

- Convertitori analogico-digitale (A/D o ADC)
- Convertitori digitale-analogico (D/A o DAC)

Generalmente la conversione avviene dall'analogico al digitale poiché i sistemi digitali presentano numerosi vantaggi come, ad esempio:

- Elevata insensibilità ai disturbi del segnale campionato
- Bassa incertezza con costi relativamente contenuti = bassa incertezza dovuta al fatto che non si accumula l'incertezza
- Ripetibilità e riproducibilità
- Compatibilità intrinseca coi sistemi di calcolo

- Facilita di manipolazione, trasmissione, registrazione e riproduzione = può essere facilmente elaborato e trasmesso

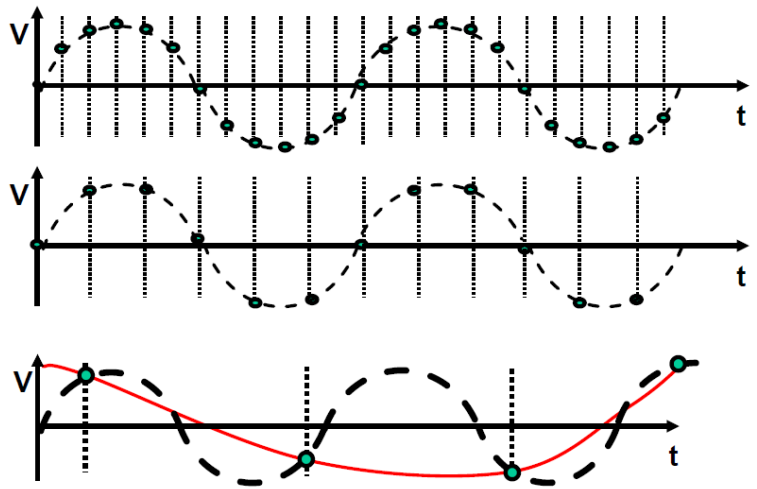
Campionamento

Nella fase di campionamento è fondamentale capire ogni quanto tempo si deve campionare il segnale infatti se si osserva il segnale con una frequenza troppo elevata si aumenta la mole di dati che si deve memorizzare. Come è già stato detto il campionamento di un segnale analogico avviene in forma discreta, dunque in un segnale campionato sia la grandezza $V(t)$ che il tempo t sono espressi in forma discreta. Definiamo intervallo di campionamento la variazione di tempo tra un campionamento e il suo successivo, mentre parliamo frequenza di campionamento come dell'inverso dell'intervallo di campionamento:

$$\Delta t_c = t_i - t_{i-1}$$

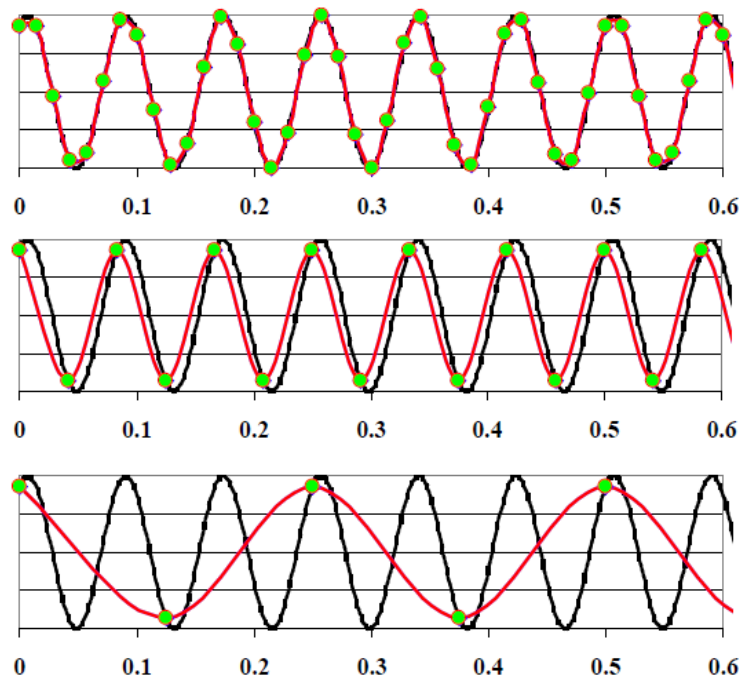
$$f_c = 1/\Delta t_c$$

Come si vede nelle prime due figure a fianco è sempre possibile ricostruire l'andamento del segnale, anche nel grafico di mezzo, infatti, è possibile riconoscere l'andamento del segnale, anche se il livello di dettaglio è un po' minore. Diminuendo però ancora l'intervallo di campionamento non è possibile definire in modo univoco l'andamento del segnale. Come si vede nel terzo grafico infatti, basandosi solo sui punti verdi campionati, si potrebbe ricostruire l'andamento del segnale come la linea rossa: il che è evidentemente un errore che prende il nome di aliasing.



Aliasing

Trattiamo per ora la situazione di un segnale armonico: questo non lede la generalità dello studio, come vedremo più avanti, ma permette una semplificazione dell'analisi del fenomeno. Il problema dell'aliasing è legato alla relazione tra la frequenza del segnale f_s e la frequenza di campionamento f_c . Si dimostra, e si intuisce anche graficamente, che il problema di non ricostruire correttamente l'andamento del segnale sia quando la frequenza di campionamento non è almeno il doppio della frequenza del segnale. Per "ricostruire correttamente l'andamento" si intende riuscire a riconoscere la frequenza del segnale in modo corretto. In questi tre esempi vediamo che nel primo grafico l'aliasing non si manifesta poiché $f_c > 2f_s$. Nel secondo grafico invece siamo al limite poiché la frequenza è ricostruita correttamente ma l'ampiezza in generale non lo è; infatti $f_c = 2f_s$. In questo caso siamo nella situazione in cui ci sono due valori per ogni periodo del segnale da campionare a seconda di quando acquisisco il primo dato avrò una stima di ampiezza diversa; al limite se il primo valore venisse acquisito in un istante in cui il segnale è pari a 0, anche tutti gli altri sarebbero campionati quando il segnale è a 0. Questo perché $f_c = 2f_s$ significa che si campiona esattamente ogni mezzo periodo del segnale. Infine, nel terzo grafico la frequenza del



del

segnale in nero non viene correttamente rilevata. La frequenza apparente, quella in rosso, è inferiore a quella corretta poiché $f_c < 2f_s$: si ha quindi aliasing.

Tale concetto è espresso dal teorema del campionamento, o teorema di Shannon, che afferma che se un segnale continuo a banda limitata contiene solo frequenze inferiori a $f_{s,max}$ il segnale sarà campionato correttamente se $f_c > 2f_{s,max}$. Infatti occorrono almeno due campioni sul periodo poiché:

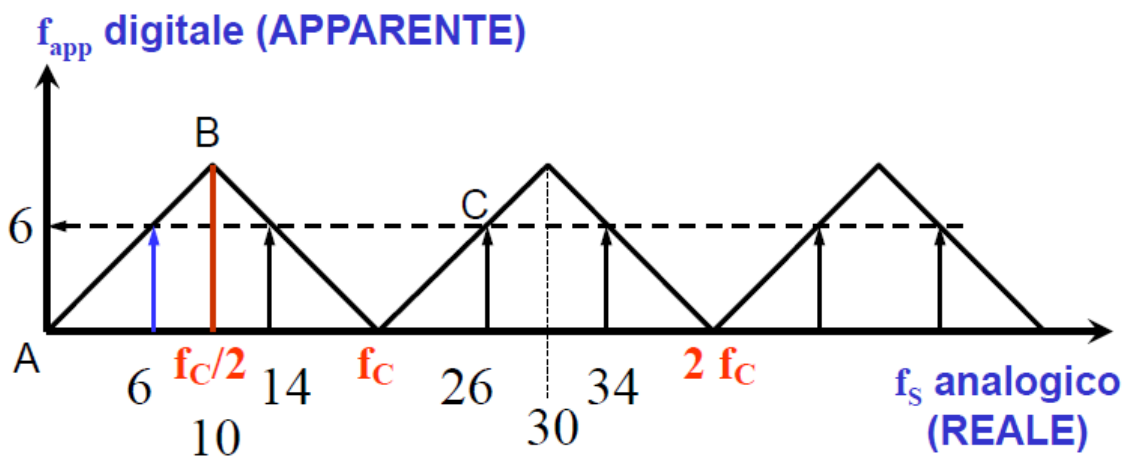
$$f_c = 1/\Delta t_c \qquad f_s = 1/T_s$$

$$f_c \geq 2f_s \quad \rightarrow \quad \Delta t_c \leq \frac{T_s}{2}$$

Nel caso di un generico segnale, è possibile scomporlo in somma di tanti segnali armonici, ciascuno caratterizzato dalla propria frequenza, ampiezza e fase iniziale. Per non avere il problema dell'aliasing sarà necessario avere $f_c > 2f_{s,max}$, dove $f_{s,max}$ è la frequenza massima fra quelle contenute nel segnale. In altre parole, scomponendo il segnale iniziale in somma di segnali armonici, $f_{s,max}$ è la frequenza del segnale armonico con frequenza più elevata.

Il fenomeno dell'aliasing quindi crea questo problema: se si ha un segnale armonico a frequenza f_s , dopo il campionamento, la frequenza apparente del segnale ottenuto f_{app} è inferiore a f_s . Il diagramma qui sotto permette di calcolare quale sarà la frequenza apparente, una volta nota la frequenza reale e la frequenza di campionamento. Se:

- $f_s < \frac{f_c}{2}$ non si ha aliasing infatti $f_{app} = f_s$ che corrisponde al tratto di diagramma fra il punto A e il punto B
- $f_s > \frac{f_c}{2}$ si ha aliasing. La frequenza apparente si ottiene procedendo come segue: per prima cosa si parte dalla frequenza del segnale (esempio 26 Hz), si sale fino ad incrociare il diagramma, in questo caso fino al punto C, e poi ci si sposta orizzontalmente a sinistra fino ad incrociare l'asse verticale (esempio 6Hz).



L'aliasing non è correggibile a posteriore; per poterlo evitare è possibile procedere in due modi diversi:

1. Alzare f_c fino a che non sia maggiore di $2f_s$, ammesso che io sappia quale frequenza massima sia contenuta nel segnale
2. Usare un filtro analogico, prima del convertitore A/D, che rimuova tutte le frequenze superiori a $\frac{f_c}{2}$. I filtri anti-aliasing sono filtri passa basso: tagliano tutte le frequenze f_s del segnale superiore a $\frac{f_c}{2}$

Conversione A/D

La conversione avviene per mezzo del convertitore che effettua una ricerca binaria condotta nel seguente modo: il convertitore calcola la media tra V_{max} e V_{min} , confronta poi il dato V con tale valore e se risulta essere maggiore della media restituisce 1 altrimenti restituisce 0, da questo momento in poi procede per iterazione fino ad identificare il valore V . Nel dividere sempre a metà il campo e nel restituire un valore binario il convertitore effettua implicitamente delle approssimazioni. Il convertitore alla fine di tale procedimento restituirà un numero binario: maggiore è il numero di cifre del numero binario maggiore è la risoluzione. Avendo a disposizione una parola binaria di n bit è possibile rappresentare esattamente 2^n valori:

- 8 bit $2^8=256$ stati diversi
- 10 bit $2^{10}=1024$ stati diversi
- 12 bit $2^{12}=4096$ stati diversi
- 16 bit $2^{16}=65536$ stati diversi
- 32 bit $2^{32}=4294967296$ stati diversi

Questi stati sono i livelli di suddivisione dell'asse y. L'approssimazione del valore è migliore aumentando il numero di bit, lo svantaggio è l'aumento del tempo. La risoluzione prende anche il nome di quanto cioè la minima variazione della grandezza di ingresso apprezzabile dal quantizzatore; esso corrisponde al valore del bit meno significativo e viene detta LSB (*less significant bit*):

$$Q = 1LSB = \frac{FS_{max} - FS_{min}}{2^n}$$

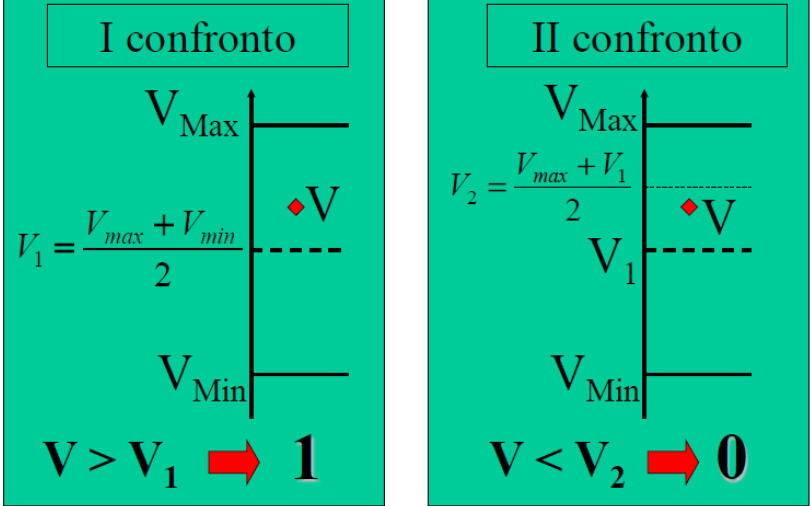
$$FS_{min} = 0 \quad Q = \frac{FS_{max}}{2^n}$$

Molto spesso si rischia di non ottimizzare la risoluzione; per ovviare a questo problema è possibile fare due diverse cose, sostanzialmente equivalenti:

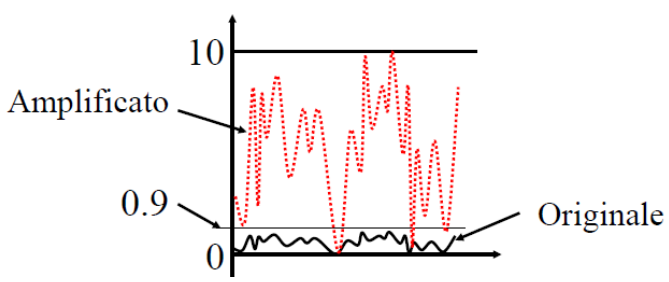
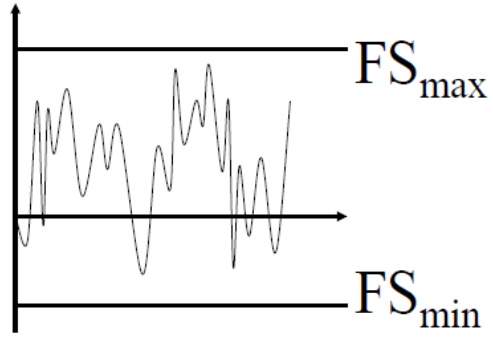
1. Amplificare il segnale analogico in modo che al posto che assumere affinché sia usata tutta la scala del convertitore A/D, senza saturare. In questo modo si sfrutta completamente la dinamica del convertitore.
2. Cambiare il fondo scala del convertitore, cioè il valore massimo che può essere misurato da un determinato strumento di misura, in modo da adattarlo al segnale. In realtà normalmente il fondo scala possibili sono un numero limitato.

Se il valore medio è diverso da 0, spesso ci si trova con un segnale che richiede un fondo scala elevato. In questi casi può risultare molto utili rimuovere il valore medio del segnale prima di inviarlo al convertitore A/D. In alcuni casi è possibile ottimizzare la risoluzione "eliminando" dal segnale analizzato il valore medio. Per fare ciò è possibile utilizzare due strategie:

1. Modalità AC = si filtra dal segnale la componente armonica a frequenza 0 Hz (se il valore medio cambia) cioè filtro che toglie le basse frequenze cioè le variazioni lente.
2. Sommatore analogico di tensione = si somma al segnale una tensione digitale uguale e contraria al valore medio del segnale (se il valore medio è costante)

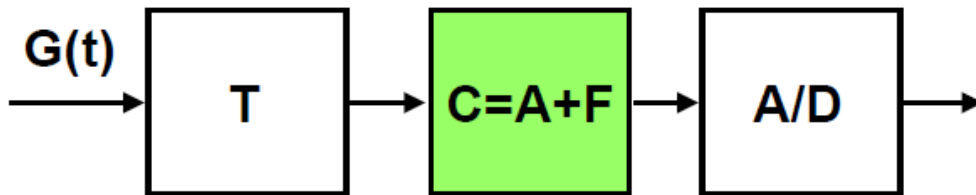


Uscita della conversione a 2bit: 10



Configurazione di ingresso nei sistemi di conversione A/D

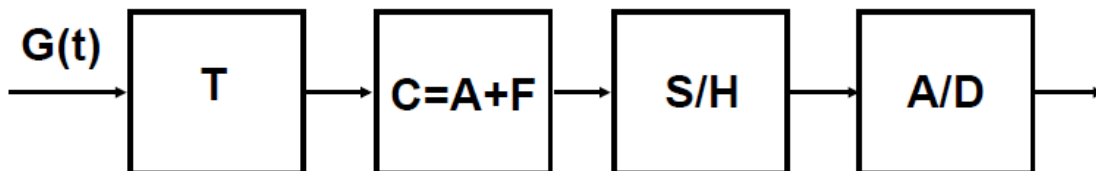
La configurazione vede la catena di misura composta da un trasduttore T che riceve la grandezza fisica da misurare $G(t)$, a valle del trasduttore si trova un blocco genericamente indicato come modulo di condizionamento del segnale C nel quale trovano alloggio l'amplificatore A e il filtro anti-aliasing F. Il segnale così preparato è nelle condizioni di poter essere digitalizzato, sfruttando al meglio le prestazioni del convertitore a patto di avere effettuato la scelta opportuna sulla frequenza di campionamento.



La conversione occupa un tempo che, seppur breve, è comunque finito: dunque tra l'istante di inizio conversione e quello in cui questa operazione si conclude, il livello del segnale può essere notevolmente modificato. La durata della conversione viene spesso anche definita come tempo di apertura o aperture time t_A . Il rischio di errore durante la conversione dipende dunque da due fattori:

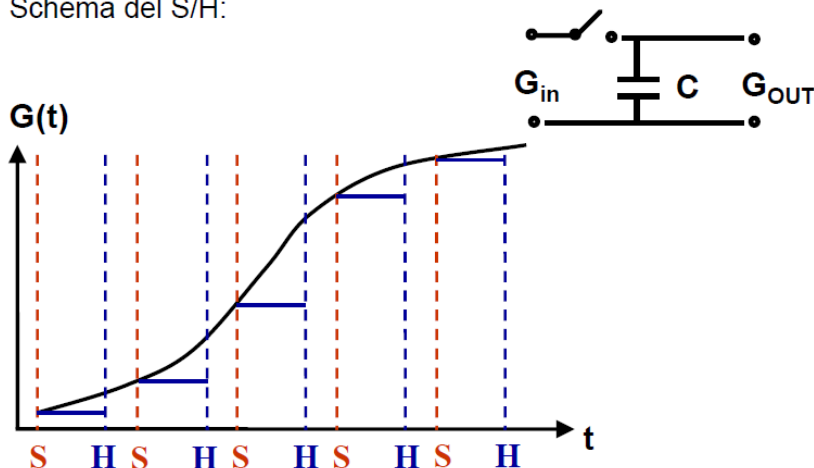
1. Dinamica del segnale = ovvero quanto questo varia velocemente
2. Durata dell'operazione di campionamento

Sarebbe dunque desiderabile poter "congelare" un segnale al valore assunto da questo all'inizio del campionamento; tanto, per effetto del campionamento stesso, l'andamento del segnale dopo tale istante non interessa più sino al successivo campionamento, anzi la sua variazione è dannosa. L'elemento capace di "congelare" il segnale a un determinato istante è il *sample & hold* ossia un *campiona e trattiene*. Il S/H è un circuito elettronico che campiona $G(t)$ e ne mantiene costante il valore fino a conversione A/D finita. Il S/H va inserito immediatamente a monte del convertitore A/D.



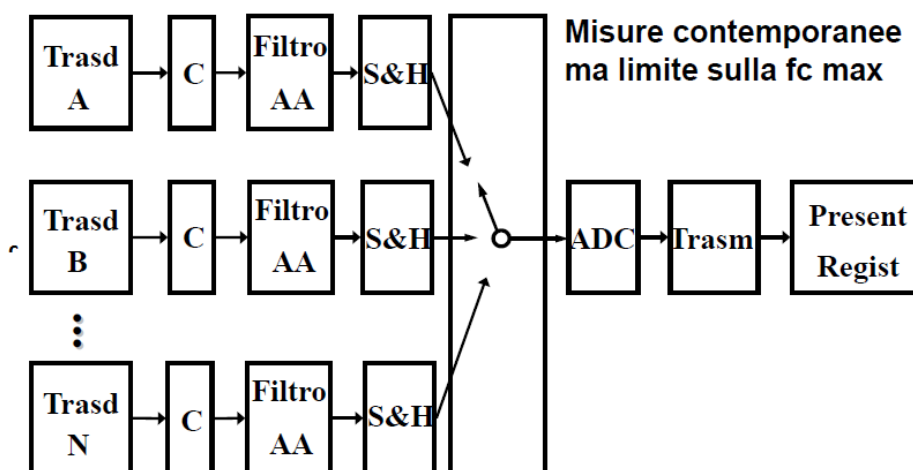
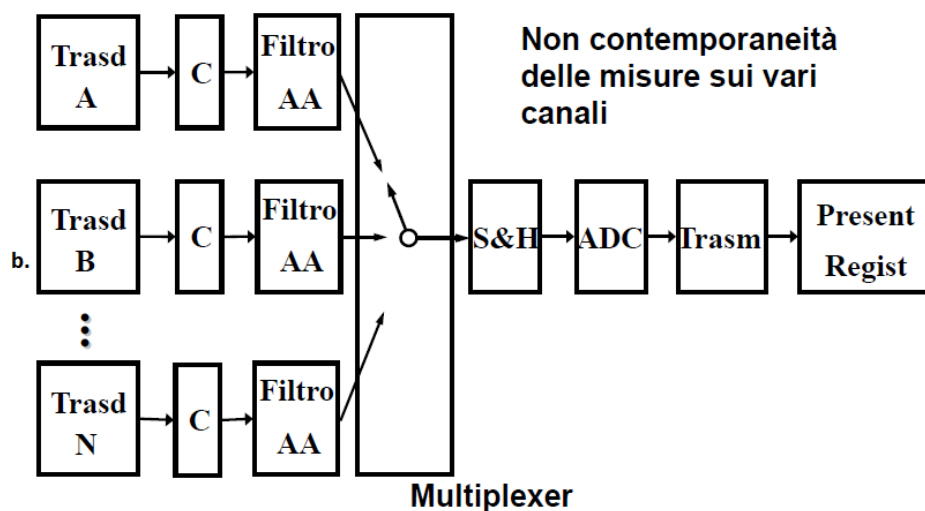
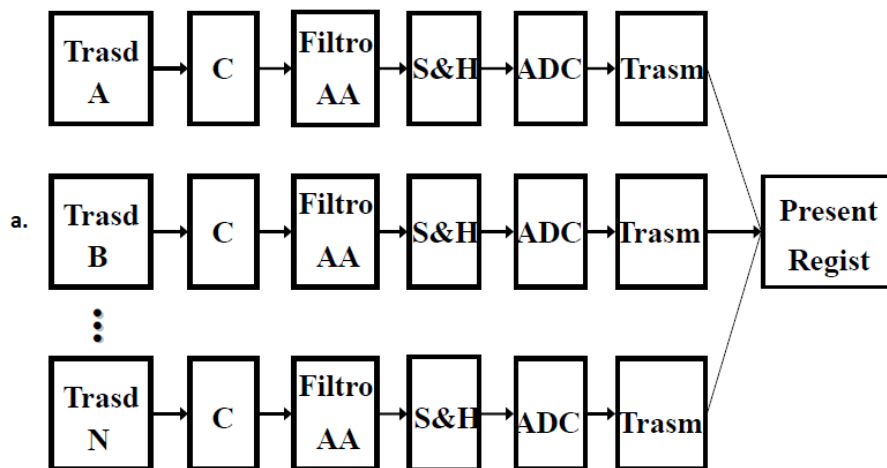
Non ci addentriamo nel suo metodo di funzionamento ma analizziamo uno schema semplice in cui ai capi di una capacità è applicato il segnale da convertire; nel momento in cui la conversione ha inizio l'apertura di un interruttore "trattiene" il valore della tensione vista ai capi della capacità sino al termine dell'operazione di conversione.

Schema del S/H:



Se si hanno più di un canale da acquisire, è possibile avere diverse soluzioni:

- Un sistema di acquisizione completo per ciascun canale. Questa è la situazione più efficace, ma più costosa,
- Porre un S/H per tutto il sistema, e non uno per ogni canale, inserendo un multiplexer. Il problema è che il multiplexer collega un canale alla volta al convertitore, quindi i diversi canali non sono acquisiti nello stesso istante, ma in istanti successivi
- La situazione intermedia permette di bloccare tutti i canali nello stesso istante con un S/H per ogni canale e poi convertirli uno alla volta con un convertitore A/D



Tipi di campionamento e altre sue caratteristiche

Esistono due tipi di campionamento: asincrono e sincrono. Nel campionamento asincrono si acquisiscono i campioni ad intervalli di tempo costanti. Detto Δt il tempo trascorso tra una acquisizione e la successiva, si definisce la frequenza di campionamento $f_c = \frac{1}{\Delta t_c}$. Nel campionamento sincrono invece i campioni vengono acquisiti in maniera sincrona con un evento. In generale il campionamento sincrono è utile qualora vi sia un fenomeno fisico periodico il cui periodo è significativo per la grandezza da acquisire. Il valore massimo della frequenza di campionamento di un sistema A/D dipende da:

- Dal tempo di apertura
- Per i sistemi multi-canale con singolo convertitore anche dal numero di canali da acquisire: il clock del sistema A/D è una risorsa che deve essere ripartita tra tutti gli ingressi.

Fissando il fondo scala dei canali del convertitore A/D e scelta la frequenza di campionamento resta da impostare il tempo totale di acquisizione T . Tale scelta determina il numero di campioni N acquisiti per ogni canale dunque il tempo totale di acquisizione dipende dalla RAM. La RAM disponibile condiziona la massima durata dell'acquisizione: maggiore è l'acquisizione maggiore sarà la precisione. I possibili criteri di scelta sono:

- Durata temporale del fenomeno fisico
- Risoluzione df analizzano i dati del dominio delle frequenze: $df = \frac{1}{T} = \frac{1}{N\Delta t_c}$

Trigger

L'acquisizione può avere inizio o a un istante scelto dall'operatore che comanda l'inizio dell'acquisizione oppure ad un istante sincronizzato con il fenomeno fisico che si sta analizzando. In questo secondo caso si effettua l'acquisizione con il trigger. Il trigger è un dispositivo che permette di incominciare ad acquisire i dati quando un segnale preso come riferimento supera un prefissato livello con una prefissata tangente. Il segnale di riferimento può essere:

- Uno dei canali da acquisire (internal trigger)
- Un segnale esterno significativo per il fenomeno fisico che si sta analizzando (external trigger)

