

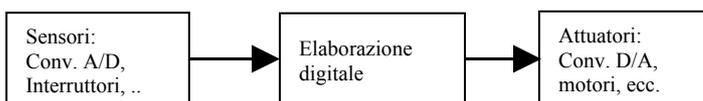
Conversione A/D D/A.

Il mondo digitale è presente anche in campo radiantistico, si pensi ad applicazioni DSP (Digital Signal Processing) in campo radio e non, all'interfacciamento di apparati con la scheda audio del PC per la decodifica di varie modulazioni: la presenza dei 'bit' è sempre più frequente. Il mondo analogico non è in discussione, anche perchè tutti i fenomeni fisici che conosciamo sono analogici, ovvero misurabili con continuità nel tempo e in valore.

Ci sono infinite applicazioni che usufruiscono del digitale: in campo del divertimento (musica, video, mp3,) al campo industriale, alla ricerca, al radiantismo e tanti altri ancora.

Da bravi radioamatori 'curiosi' non resta che esplorare anche il digitale.

Il principale vantaggio del digitale deriva dal fatto che il risultato della elaborazione del segnale dipende da qualcosa che fisicamente non “palpabile”: il software. Modificare l'elaborazione è relativamente semplice: basta cambiare il software. Contrariamente le elaborazioni analogiche richiedono hardware, ovvero elettronica, componenti che una volta cablati risolvono quel solo problema. Ricablare il tutto per modificare l'elaborazione è complesso e costoso.

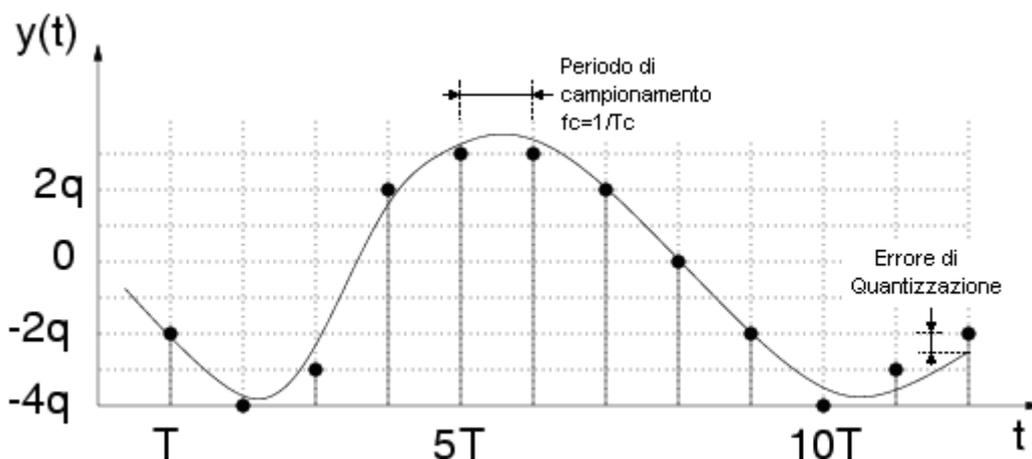


Un apparato nel mondo digitale è composto, quindi, da una serie di sensori e attuatori, che lo interfacciano con l'esterno e da un sistema di elaborazione numerica.

I convertitori analogico/digitale (A/D) e digitale/analogico (D/A) sono una importante categoria di dispositivi per interfacciare il mondo analogico.

Un convertitore A/D consente di acquisire una grandezza elettrica (che a sua volta può rappresentare una grandezza fisica come, pressione o temperatura) e di trasformarla in digitale. Un convertitore D/A fa esattamente il contrario, converte il dato digitale in una corrispondente grandezza elettrica.

Il processo di conversione può avvenire in diversi modi, ma in ogni caso porta delle approssimazioni. Un segnale digitale non è certamente uguale al segnale analogico, ma rispettando alcune ‘regole’ ne è una sua rappresentazione più o meno fedele.



Due sono le principali problematiche. Una grandezza digitale è finita, ovvero un numero digitale è composto da un numero di cifre prestabilito, questo numero può variare in relazione alle necessità, ma comunque ha una lunghezza massima, ne consegue che se le cifre a disposizione sono 3, posso rappresentare il numero 999, ma non 1000, oppure 456, ma non 456,3. Una grandezza analogica può assumere qualunque valore ed un circuito analogico, ad esempio un filtro processa completamente qualunque valore del segnale in ingresso. Si parla in questo caso di **quantizzazione**.

L'elaborazione di un dato digitale avviene in tempi distinti, ad ogni scadere di intervallo, scandito da un clock, avvengono operazioni, ne consegue che i dati acquisiti hanno significato per l'istante di acquisizione. Di quello che succede fra una

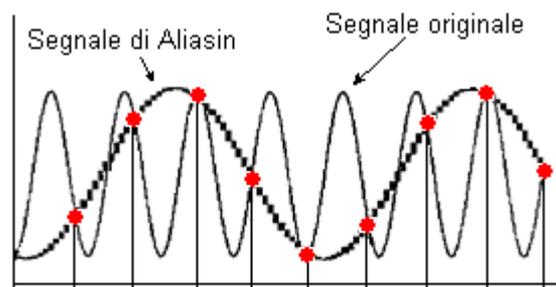
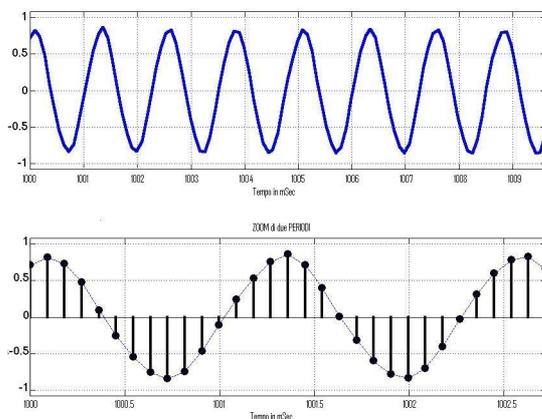
acquisizione e quella successiva nulla è dato a sapere. Si parla in questo caso di **campionamento**.

Per valutare gli effetti della campionatura ci viene di aiuto il teorema del campionamento di Nyquist - Shannon, il quale afferma che se il campionamento avviene con una frequenza adeguata, si è in grado di ricostruire il segnale originale utilizzando il dato campionato.

Teorema del campionamento.

Nelle considerazioni che seguono si fa riferimento ad una sinusoidale, di frequenza f_s e di ampiezza A

Questa semplificazione non fa perdere di generalità, in quanto un segnale complesso lo si può pensare come composto dalle sue armoniche.



Il teorema del campionamento afferma che una sinusoidale può essere campionata senza perdere informazioni se la velocità di campionamento (f_c) è almeno il doppio della frequenza della sinusoidale: $f_c > 2 f_s$.

Se viene a meno queste regola, dati i punti acquisiti, non esiste più una sola sinusoidale che li interconnette, ma diverse. Il fenomeno è chiamato aliasing.

Tutte le sinusoidi con frequenza $f=f_s+l*f_c$ (aliasing) e $f=-f_s+l*f_c$ (folding), dove l è un intero positivo o negativo, soddisfano gli stessi punti di campionatura. Se $f_s=400\text{Hz}$ e $f_c=2000\text{Hz}$ i segnali:

$f=400\text{Hz}$

$$f=400 + 1*2000 = 2400$$

$$f=400 + 2*2000 = 4400$$

$$f=400 + 3*2000 = 6400$$

$$f=-400 + 1*2000 = 1600$$

$$f=-400 + 2*2000 = 3600$$

$$f=-400 + 2*2000 = 5600$$

ecc.

soddisfano gli stessi campioni. Limitando il segnale acquisito a meno di 1000Hz ($f_c/2$) si è certi di escludere tutti i segnali di aliasing, esiste una sola sinusoidale di $f < 1000\text{Hz}$ che interconnette i punti.

L'effetto stroboscopico è della stessa natura dell'aliasing. Se si osserva una ruota su cui, per comodità, è posto un riferimento e la si illumina con uno stroboscopio, che si accende con un ritmo costante, si vede il riferimento avanzare o retrocedere in funzione velocità della ruota e in relazione alla frequenza di illuminazione.

Se il periodo di rotazione della ruota (il tempo per fare un giro) è uguale al periodo dello stroboscopio, allora si vedrà il riferimento fermo, ovvero il riferimento sarà nella stessa posizione ogni volta che la lampada stroboscopica si illumina.

Se la frequenza di illuminazione è superiore alla velocità della ruota si vedrà il riferimento 'ruotare' in senso contrario alla rotazione della ruota e viceversa, se la frequenza di illuminazione è inferiore alla velocità di rotazione.

Il movimento, in un senso o in quello contrario, del riferimento è puramente illusorio. Si può pensare di valutare la velocità della ruota confrontandola con la frequenza di illuminazione, ma occorrono alcuni vincoli, infatti se il riferimento risulta fermo il tempo di rotazione è pari o una frazione intera del periodo dello stroboscopio. In sostanza non si può determinare se la ruota ha fatto un giro preciso o più giri oppure è ferma.



Se lo stroboscopio si illumina una volta al secondo, e il riferimento è visto fermo, la ruota ha compiuto almeno un giro completo, ma possono essere anche 2, 3, ecc. ovvero la velocità di rotazione può essere un multiplo intero della velocità di illuminazione.

Si può valutare la velocità reale di rotazione della ruota valutando l'angolo di spostamento del riferimento fra un flash e il successivo, ma solo se si è certi che la ruota gira ad una velocità inferiore alla frequenza dello stroboscopio (altrimenti non si sa se la ruota ha fatto più di un giro). E' lo stesso effetto che si usa(va) per

regolare la velocità dei piatti del giradischi o del rotore di una telescrivente dove si paragona la velocità di rotazione con la frequenza di rete (50Hz) che modula l'intensità luminosa di una lampadina.

Il fenomeno di aliasing e di folding, sono simili al fenomeno dello stroboscopio.

Un modo pratico per evidenziare la situazione è rappresentare il segnale nel dominio delle frequenze, nella figura è riportato lo spettro per un lettore CD:



La figura evidenzia come il segnale originale sia 'traslato' alle frequenze di campionamento. La specularità del profilo del segnale, intorno alle frequenze multiple di f_c ricorda la modulazione in AM. In effetti il processo di acquisizione digitale è una operazione di moltiplicazione fra il segnale analogico e un impulso di ampiezza unitaria e di durata infinitamente piccola.

La modulazione in AM è sostanzialmente una operazione di moltiplicazione fra la portante ed il segnale modulante.

Per rispettare i limiti imposti dal teorema del campionamento, occorre assicurarsi che il segnale acquisito non contenga armoniche superiori a metà della frequenza di campionamento, occorre quindi filtrare il segnale con un filtro passa-basso.

Nell'esempio di cui sopra, il campionamento è a 44,1 KHz, il limite della massima frequenza acquisibile è 24,05 KHz. Anche riducendo il segnale audio a 20 KHz, non è pensabile realizzare un filtro analogico sufficiente 'buono' da abbattere di diverse decine di dB le armoniche superiori a 24 KHz, occorre ridurre ulteriormente la frequenza di taglio del filtro. Nel caso di un lettore CD si usano soluzioni chiamate oversampling, decimazione, e un filtraggio digitale.

In realtà il teorema del campionamento è più ampio, anche se la situazione illustrata è la più diffusa. Il limite reale della frequenza di campionamento non è correlato con la massima frequenza del segnale da acquisire, ma con la banda del segnale. In sostanza, se f_c è la frequenza di campionamento, la banda del segnale acquisibile deve essere inferiore a $f_c/2$. La differenza non è poca, specie in campo radio.

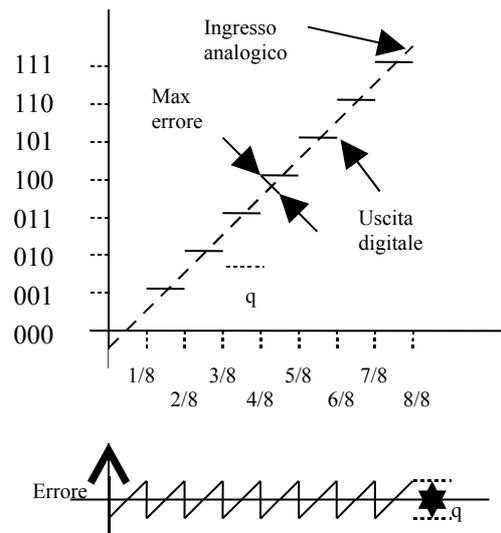
Se si pensa di acquisire un segnale in banda 2 metri, 145 MHz, si è portati a pensare che occorra un campionamento ad almeno 300MHz, cosa difficile, in quanto sono richiesti componenti assai veloci, inoltre un numero molto elevato di campioni (almeno 300 MS/sec), richiede una alta velocità di elaborazione e quindi processori costosi. Se invece ci si sofferma a valutare la banda, che per i 2 metri è di circa 2MHz, da 144 a 146, allora è ragionevole pensare di usare un campionamento a frequenza a 4MHz, il doppio della banda passante, cosa molto più semplice.

Quantizzazione

La quantizzazione, come anticipato, è la necessità di rappresentare, nel mondo digitale, valori con un numero finito di cifre. La dinamica del segnale acquisito dipende dal numero di bit del convertitore la precisione di conversione sarà non più grande della minima lettura, che corrisponde al bit meno significativo.

L'errore di conversione si può valutare e, normalmente, viene considerato come fosse rumore. Se si prende in considerazione un semplice convertitore a 3bit si può quantizzare il segnale analogico con 8 livelli. Se la massima tensione acquisita è 8 volt si ottiene la seguente tabella/grafico di conversione:

bin	Dec	V_i in Volt
000	0	$0 \leq V_i < 1$
001	1	$1 \leq V_i < 2$
010	2	$2 \leq V_i < 3$
011	3	$3 \leq V_i < 4$
100	4	$4 \leq V_i < 5$
101	5	$5 \leq V_i < 6$
110	6	$6 \leq V_i < 7$
111	7	$7 \leq V_i < 8$



Il massimo errore si ha a metà gradino, se un gradino rappresenta la variazione di 1bit pari, nell'esempio, ad 1 volt l'errore è di $\pm 1/2$ bit pari a $\pm 0,5$ volt.

Essendo la tensione massima di 8 volt, l'errore sulla tensione massima di ingresso è di $0,5/8=6,75\%$.

Se si considera l'errore come rumore indesiderato, lo si può indicare con il rapporto segnale rumore $SNR = P_S/P_R$. Per farlo occorre valutare la potenza del rumore generato dall'errore di quantizzazione il risultato, in dB, è $SNR_{dB} = 1,76 + 6,02N$ dove N il numero di bit del convertitore AD, nell'esempio $SNR = 1,7 + 6,02 * 3 = 18,06 + 1,7 = 19,76$ dB.

Questo è il solo rumore imputabile alla quantizzazione, ed è normalmente assimilato a rumore bianco, distribuito uniformemente su tutta la banda del segnale acquisito. In realtà equiparare il rumore di acquisizione a rumore bianco non è sempre corretto, specie quando si manipolano segnali bassi rispetto il massimo possibile per il convertitore e quando c'è correlazione fra il segnale campionato e la frequenza di campionamento (es $f_s = 2000$ Hz e $f_c = 80000$ Hz). In questi casi compaiono evidenti righe nello spettro del segnale campionato.

Esistono altre fonti di imprecisione, che portano ad aumento di rumore, queste sono dovute imprecisione nella costruzione del convertitori, sono non linearità, mancanza di monotonicità, ed altri ancora.

L'insieme di queste imperfezioni sono caratterizzate dal costruttore con un parametro ENOB, Effective Number Of Bit. Un convertitore a 12 bit può avere un valore di ENOB = 10 il che significa che i due bit meno significativi si 'perdono' nel rumore in parte dovuto alla quantizzazione e in parte nelle imperfezioni nella costruzione del convertitore.

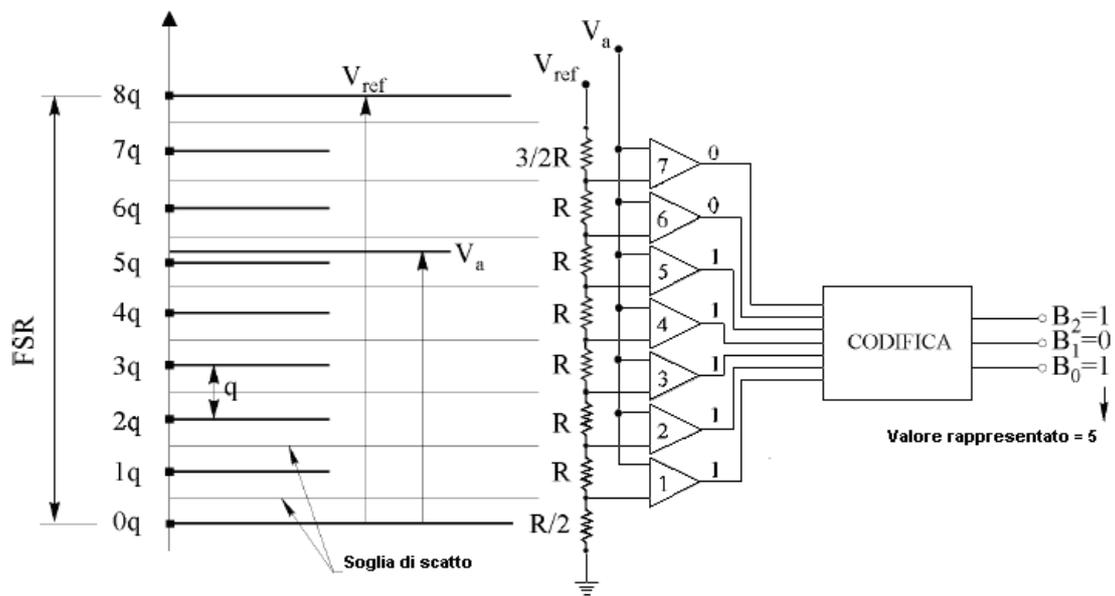
Ovviamente oltre al rumore introdotto dalla conversione, esiste anche il rumore classico del circuito.

La conversione.

I sistemi di conversione analogica/digitale adottano normalmente dei meccanismi di confronto fra una tensione di riferimento e il segnale da convertire. I convertitori, quindi, hanno come elemento comune uno o più comparatori, realizzati con amplificatori operazionali. Le varie implementazioni hanno pregi e difetti che vanno valutati in base all'impiego del convertitore. Le caratteristiche valutano la velocità di conversione, il numero di bit, l'interfacciamento con il mondo digitale la disponibilità, nello stesso chip, di elementi circuitali accessori, le caratteristiche di linearità e altre ancora, non ultimo il costo.

Convertitore flash

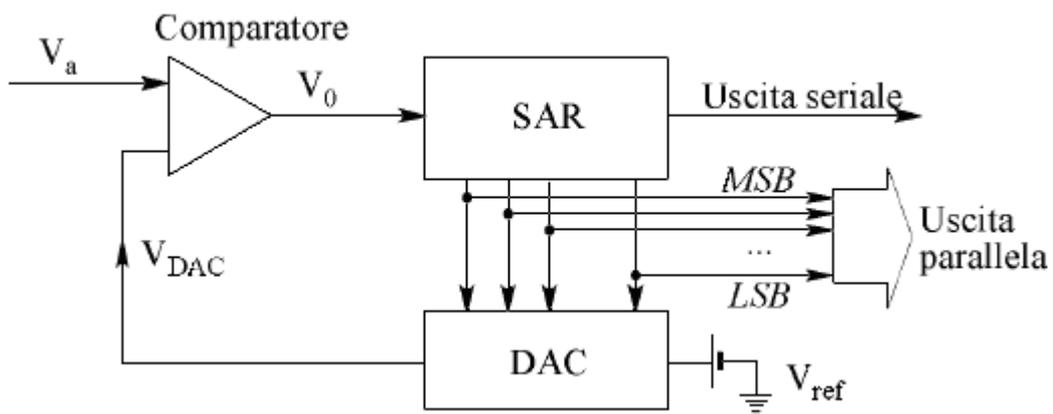
La conversione è realizzata confrontando varie tensioni, ottenute dal riferimento con un partitore resistivo, con la tensione da convertire.



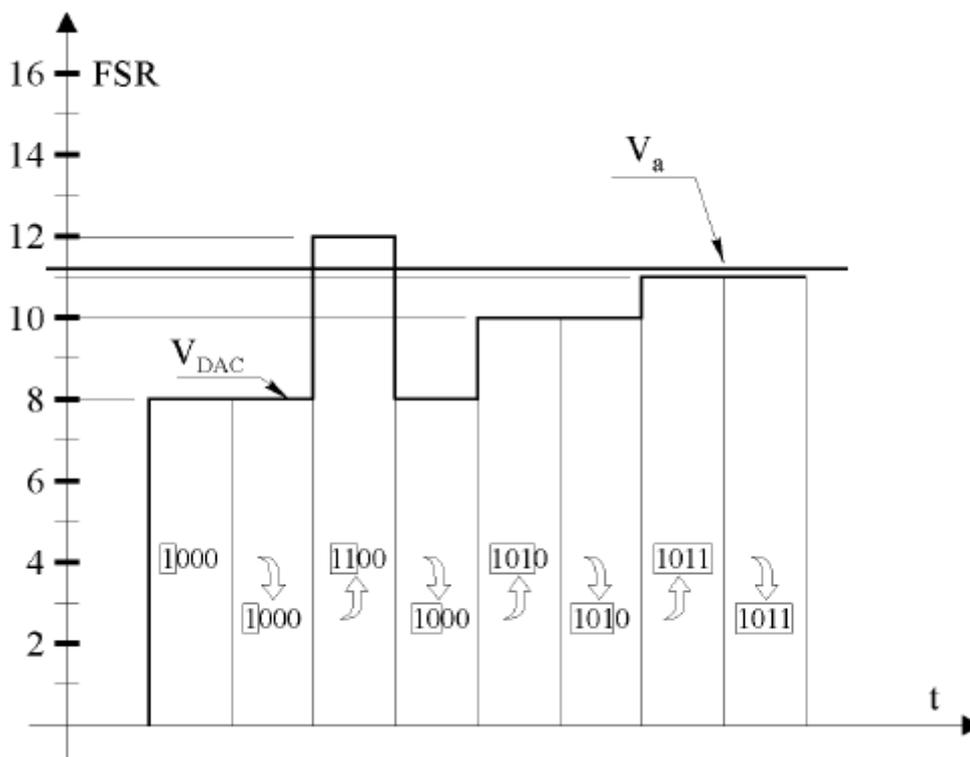
I comparatori con soglia di riferimento inferiore a V_a forniscono uscita a valore logico 1, i rimanenti a valore logico 0. Il sistema di codifica converte l'uscita dei comparatori in un valore binario, 101 (5) in figura. La velocità di conversione è elevata, ma la complessità del circuito pure, infatti occorre un numero alto di comparatori. Nel caso di conversione a 8 bit i comparatori sono $2^8 - 1 = 255$.

Approssimazioni successive

È il convertitore più frequentemente utilizzato. Il confronto avviene fra la tensione da acquisire con una tensione generata da un convertitore digitale/analogico (D/A). Il convertitore D/A viene pilotato da un circuito denominato SAR, Successive Approximation Register che produce, ad ogni clock, una sequenza binaria opportuna, in funzione del risultato di comparazione.

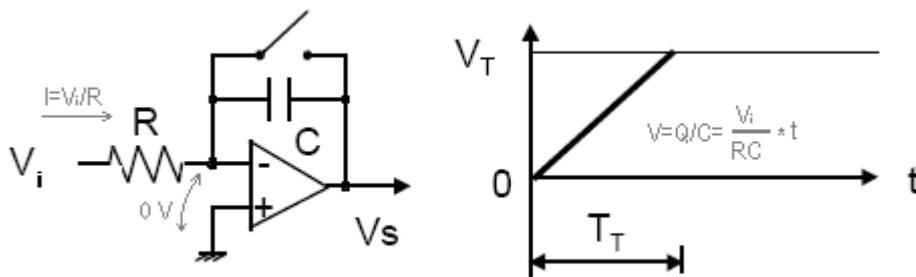


Quando la differenza fra segnale da acquisire e uscita del convertitore D/A è inferiore a $\frac{1}{2}$ bit, la conversione si arresta e la sequenza binaria è il valore convertito. Ad ogni clock bisogna attendere l'assestamento di tutta la catena, ovvero che il convertitore D/A produca la tensione in uscita e avvenga il confronto fra questa e la tensione da acquisire. Il convertitore ad approssimazioni successive è, quindi, relativamente lento. La seguente figura riporta la sequenza generata dal SAR.



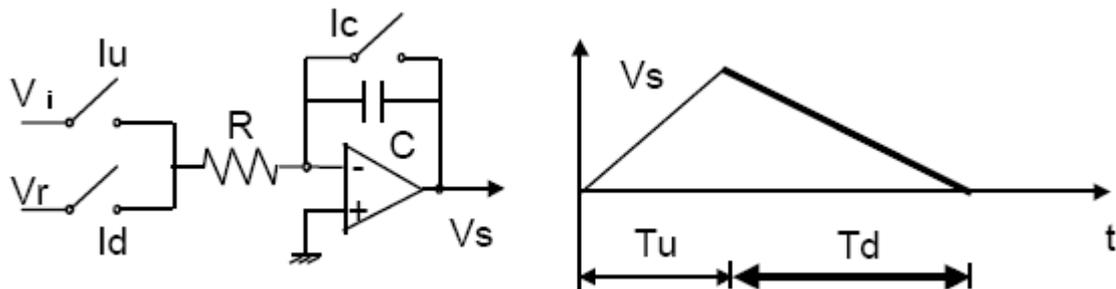
Convertitori a rampa.

In questi convertitori viene valutato il tempo necessario ad un condensatore per caricarsi ad una tensione prestabilita V_T attraverso una corrente dipendente da V_i . Il circuito di principio del convertitore si riduce ad un integratore, come in figura.



Se la tensione V_i resta costante il tempo di carica del condensatore dipende dalla costante $\tau = R \cdot C$, dalla tensione V_i e dalla soglia V_T . $V_i = RC \cdot V_T / T_T$. La tensione V_i può essere valutata con la misura del tempo T_T (es. contando i cicli di un clock). Questo approccio ha lo svantaggio della dipendenza del tempo T_T dai valori R , C e V_T , che possono variare da chip a chip, con la temperatura ed altro.

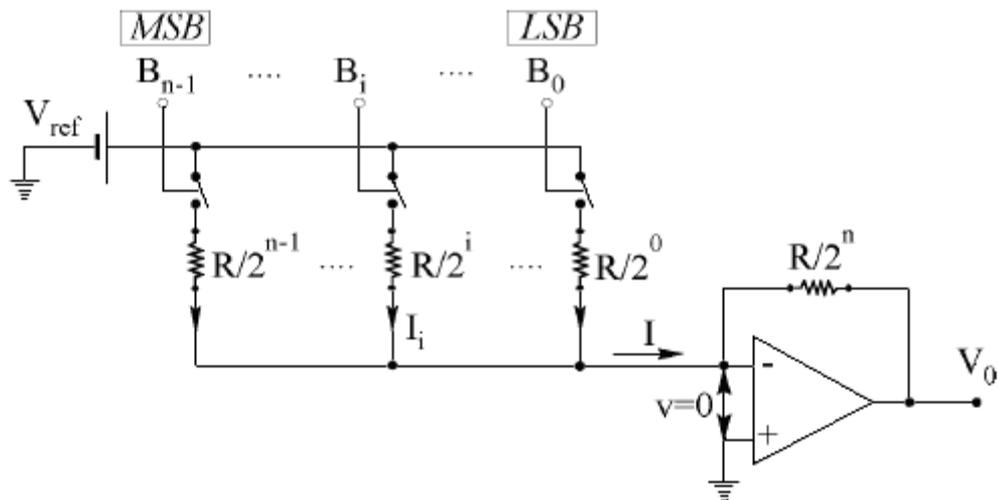
Il metodo a **doppia rampa** confronta i tempi di carica, attraverso V_i e scarica, attraverso una tensione di riferimento V_r , eliminando così la dipendenza da R , C e V_T .



Il condensatore viene caricato con la tensione da acquisire, V_i . Quando il condensatore raggiunge una soglia arbitraria prestabilita, si scarica il condensatore con la tensione V_r di riferimento. Al termine della scarica è (tensione di uscita = 0) vengono valutati i tempi T_U e T_D . In questo caso $V_i = V_r \cdot T_D / T_U$.

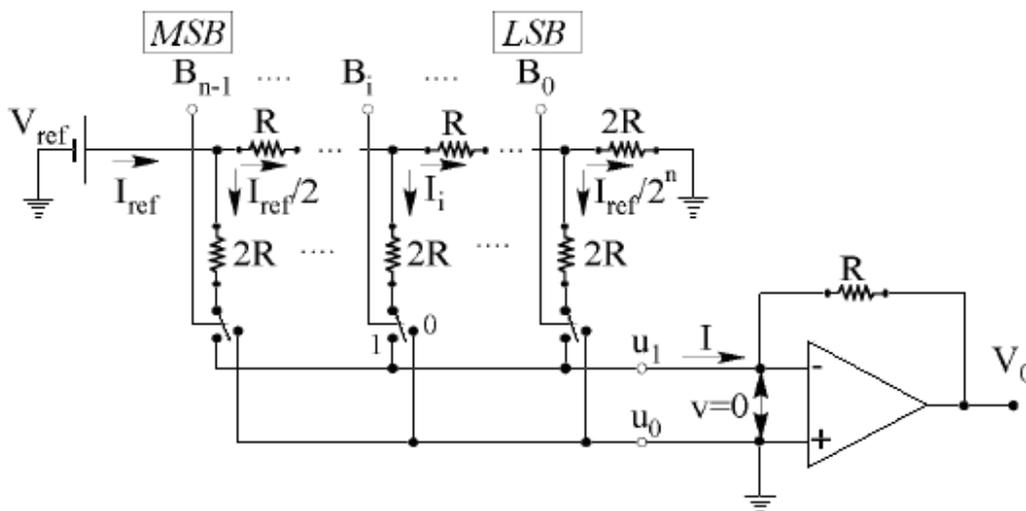
Conversione D/A

La conversione digitale analogica si può realizzare commutando opportunamente delle reti resistive che producono tensioni o correnti note. Lo schema che segue ne è in esempio esplicativo.



L'insieme delle resistenze costituisce una rete 'pesata', ogni resistenza apporta un contributo di corrente pari a $I_k = \frac{V_{ref}}{R} * 2^k$ dove K è il peso che corrisponde a un bit del valore da convertire. Nel caso di un convertitore a 3 bit, i pesi sono 0, 1, 2, se R vale 4 Kohm, le tre resistenze da usare sono 4, 2, 1 ($4K\Omega/2^0=4K\Omega$, $4K\Omega/2^2=2K\Omega$, $4K\Omega/2^2=1K\Omega$). Se la tensione di riferimento è 8 volt, le correnti nelle varie resistenze sono: ($8V/4K = 2mA$, $4mA$ e $8mA$). L'operazionale in figura, somma le correnti nelle varie resistenze se il rispettivo interruttore B_k è chiuso. La tensione in uscita sarà la somma delle correnti moltiplicata per la resistenza di retroazione $R/2^n$, $R/2^3 = 0,5Kohm$, nel nostro caso. Se la sequenza binaria è 111, l'uscita sarà: $(2+4+8)* 0,5= 7Volt$, mentre con 010 l'uscita sarà: $(0+4+0)* 0,5=2Volt$.

Il problema in un simile convertitore è la difficoltà di realizzare resistenze precise, una il doppio dell'altra. E' più facile realizzare una rete resistiva R/2R come in figura.

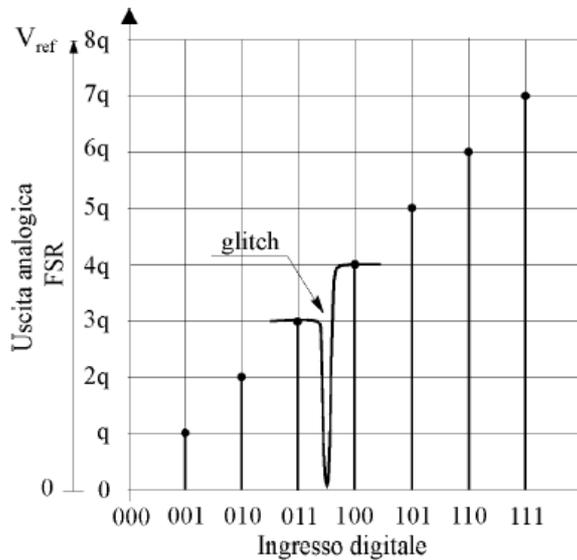


Dove le resistenze, di due valori, sono più semplici da realizzare.

Esistono altri tipi di conversione, ogni metodo ha caratteristiche di velocità, precisione e costi differenti.

Glitch

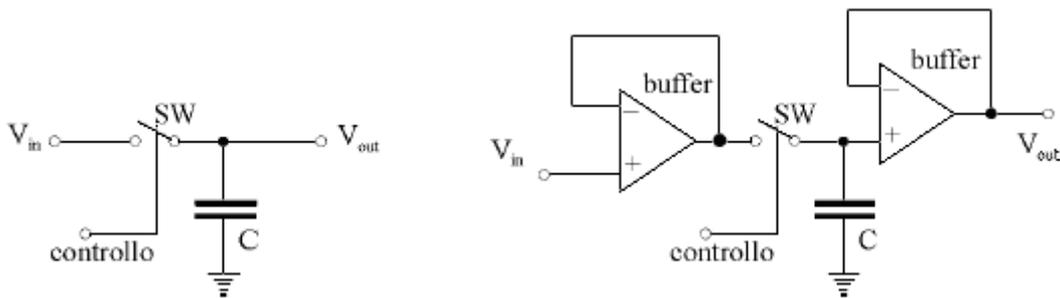
Un fenomeno indesiderato, che può essere risolto con un circuito di S&H, è chiamato glitch.



Quando il convertitore commuta da uno stato binario ad altri si possono verificare dei veloci transitori. Con il convertitore D/A a 3 bit, quando il valore digitale cambia da 011 a 100, ci può essere un breve istante in cui tutti i bit sono a 0 (il passaggio può essere visto in questo modo: 011 \rightarrow 000 \rightarrow 100), questo dà luogo al transitorio citato come indicato in figura.

Sample & Hold.

La conversione, sia A/D che D/A richiede tempo, durante questo tempo il segnale da convertire deve rimanere costante, la cosa ovviamente, non succede se il segnale in ingresso è variabile nel tempo o comunque se varia in tempi paragonabili al tempo di acquisizione. Se la grandezza da acquisire non è stabile, occorre 'fissarla' per il tempo necessario. Si utilizza allo scopo un circuito detto di sample and hold, S&H.



Il primo operazionale fornisce un'alta impedenza al circuito sotto misura, ma una bassa impedenza in uscita, in modo che la tensione sul condensatore si adegui 'velocemente' (in tempi brevi rispetto al tempo di acquisizione) alla tensione di ingresso. Prima dell'inizio dell'acquisizione l'interruttore SW viene aperto, il condensatore si trova alla tensione V_{in} all'istante di apertura e mantiene la tensione costante in virtù dell'alta impedenza del secondo operazionale.

Bibliografia

E. Cuniberti, L. De Lucchi, B. De Stefani “*Elettronica. Dispositivi e Sistemi*” Petrini Editore

J.H. McClellan, R.W. Schafer, M.A. Yoder “*DSP First. A multimedia approach*” Prentice Hall

Nicholas Gray “*ABCs of ADCs Analog-to-Digital Converter Basics*”
http://www.national.com/appinfo/adc/files/ABCs_of_ADCs.pdf

Nicola Locci “*Conversione AD e DA*”
Nicola Locci “*Componenti per le misure digitali*”
http://www.diee.unica.it/misure/Dispense/Misure_Elettroniche/Componenti_per_le_misure_digitali.pdf

“*UNDERSAMPLING APPLICATIONS*”
http://www.analog.com/UploadedFiles/Associated_Docs/18379346Section5.pdf

“*A/D converters*” http://www.hitequest.com/Kiss/A_D.htm