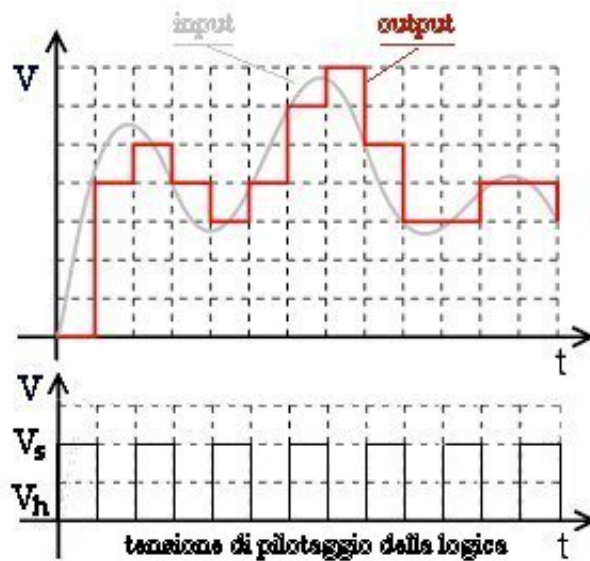


# I Circuiti di Sample & Hold

Maurizio Monteduro

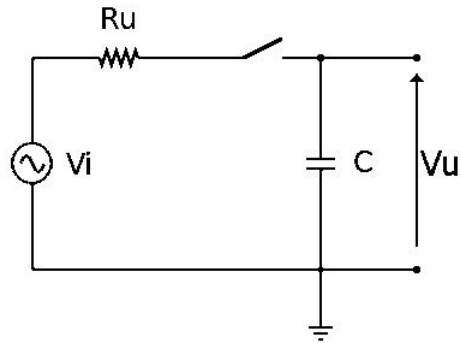
In lingua anglosassone “*To Sample*” significa “*Campionare*” e “*To Hold*” vuol dire “*Mantenere*”. Questi dispositivi, pertanto, vengono anche definiti “*Circuiti di Campionamento e Tenuta*”. Sono in grado di seguire un segnale e di mantenere il valore istantaneo che esso presenta nel momento in cui arrivi un impulso di comando al dispositivo. Vengono normalmente utilizzati in tutti quegli strumenti di misura che necessitano un segnale costante in ingresso, come alcuni convertitori Digitale-Analogici, nei periodimetri, in linee di ritardo analogiche, ecc...

L'effetto di un circuito di campionamento e tenuta è riportato nella seguente immagine:



Esistono due categorie principali di circuiti Sample & Hold: gli analogici ed i digitali.

Il dispositivo analogico più semplice ed immediato è costituito da un interruttore seguito da un condensatore:



Quando l'interruttore è chiuso, la tensione ai capi del condensatore segue la tensione di ingresso (siamo in "Sampling"); aprendo l'interruttore il condensatore, non potendosi scaricare, manterrà la tensione che era presente in ingresso all'atto dell'apertura ("Holding").

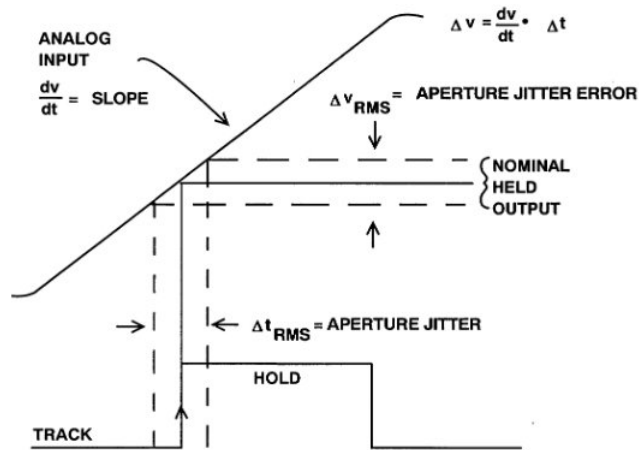
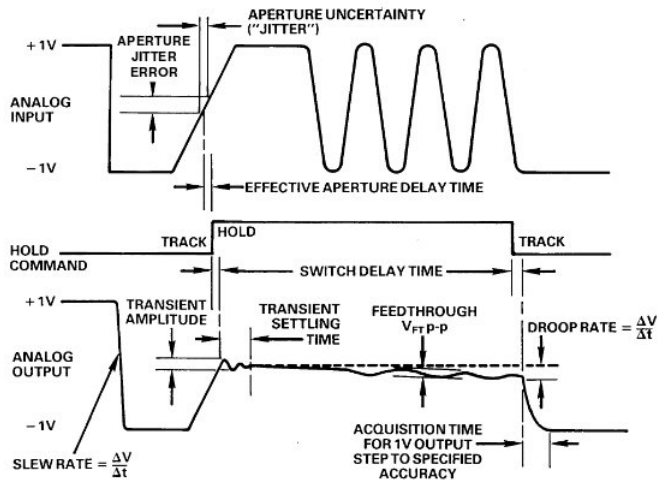
Se, di per sé, il concetto è banale, in realtà si avranno vari problemi fonte di errori. In primo luogo dobbiamo considerare un ritardo dovuto al tempo di reazione che intercorre fra il momento in cui la logica di controllo ordina l'apertura e l'istante in cui questa effettivamente avviene. Questo errore comporterà il fatto che il valore di tensione che io andrò a leggere non sarà  $V(t_0)$  ma sarà pari a  $V(t_0 + \Delta t)$  in cui abbiamo indicato con  $\Delta t$  il tempo di apertura.

Normalmente, per realizzare gli interruttori, vengono impiegati transistor ad effetto di campo o transistor bipolari. In ambo i casi i tempi di apertura medi non superano i 100ns.

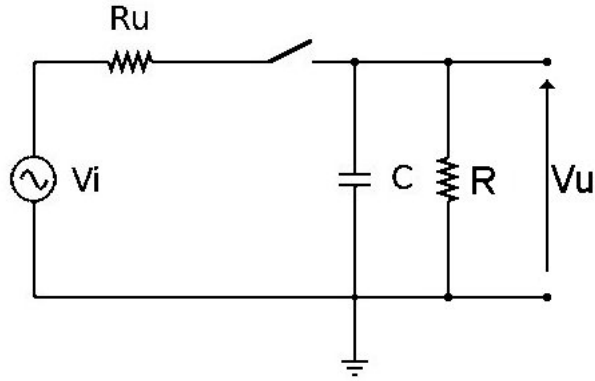
Un'ottima rappresentazione di questo tipo di errori è reperibile nel tutorial MT-090 della Analog Device, reperibile alla URL:

<http://www.analog.com/media/en/training-seminars/tutorials/MT-090.pdf>

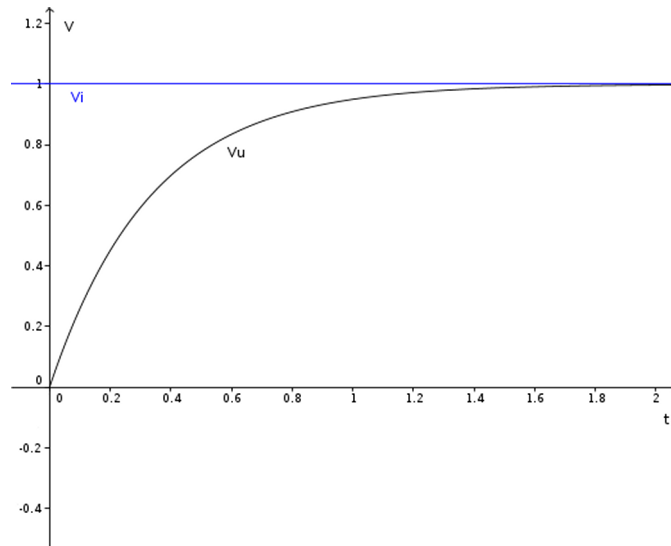
da cui le due immagini che seguono sono tratte:



Oltre a questa prima causa di errore, bisogna considerare che il condensatore avrà un tempo di carica, dovuto alla resistenza  $R_u$  non nulla del circuito di cui vado a prelevare l'informazione, ed un tempo di scarica dovuto alla resistenza  $R$  non infinita dell'utilizzatore.



Potendo anche pensare di ricorrere all'uso di un condensatore di valore più limitato, bisogna tener conto che, comunque, questo si scaricherebbe sui propri parametri parassiti. Nel caso più banale, ovvero considerando trascurabili capacità ed induttanze parassite, soprattutto sull'interruttore, e ponendo  $R \gg R_u$ , il condensatore si caricherà con una costante di tempo  $\tau \approx R_u C$  con il noto andamento  $v_c(t) = v_i \left(1 - e^{-\frac{t}{R_u C}}\right)$  con l'andamento riprodotto in figura:

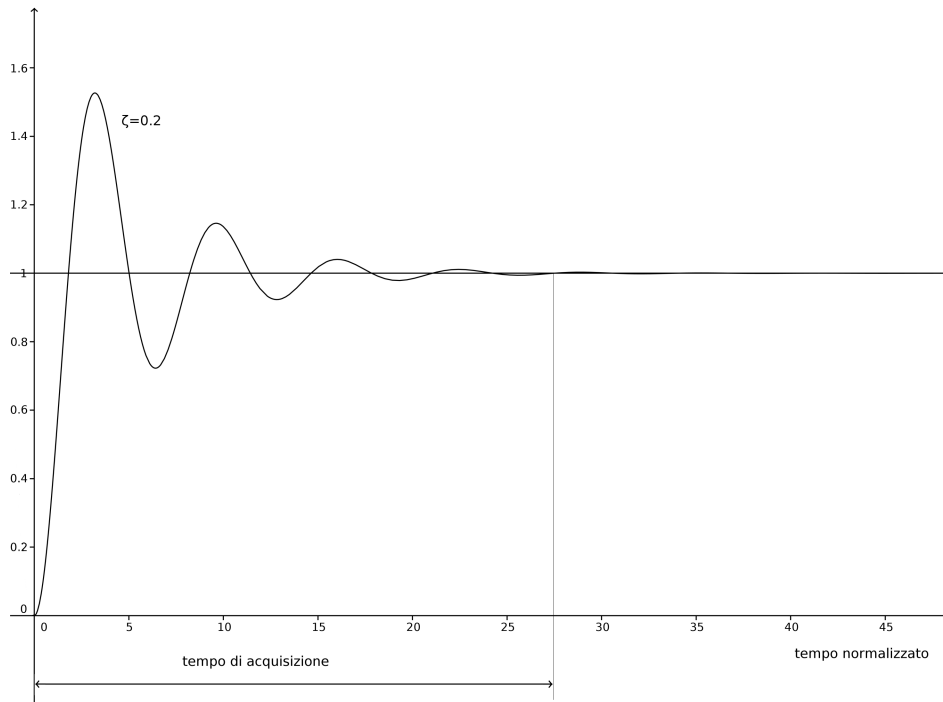


Da questa immagine si nota chiaramente come, per poter contenere l'errore entro lo 0.01%, dovremmo attendere almeno 9 costanti di tempo prima di poter considerare significativa la lettura.

Questa analisi è, però, troppo superficiale. Bisogna, infatti, tenere conto che, mentre il circuito sta mantenendo un valore, il segnale in ingresso varia. Il

caso peggiore si verifica quando l'uscita del dispositivo deve percorrere l'intera escursione a fondo scala, partendo dal valore minimo.

Ricordando che, per un condensatore, vale la relazione  $i_C(t) = \frac{dV(t)}{dt}$ , vediamo che il tempo necessario a "prendere" il segnale, detto "*tempo di acquisizione*", dipende dalla corrente massima disponibile in ingresso. In queste condizioni la relazione precedente va riscritta come  $\frac{dV(t)}{dt} < I_M$  in cui  $I_M$  indica la corrente massima disponibile. Se, ad esempio, l'ingresso del dispositivo è l'uscita di un amplificatore operazionale, il tempo di acquisizione sarà determinato dalla corrente massima in uscita dall'operazionale, dalla sua Slew Rate e dal suo tempo di risposta. Tenendo presente che, mediamente, i circuiti di campionamento e tenuta sono costituiti da un insieme di dispositivi analogici e digitali, avremo una certa quantità di parametri parassiti (capacità interelettrodeiche dell'interruttore e capacità parassite degli operazionali, legate a resistenze e ad induttanze parassite) che vanno ad invalidare il modello del prim'ordine che abbiamo considerato. Si rende quindi più doverosa una rappresentazione più aderente alla realtà, come potrebbe essere quella riportata in figura, relativa ad un modello di second'ordine:

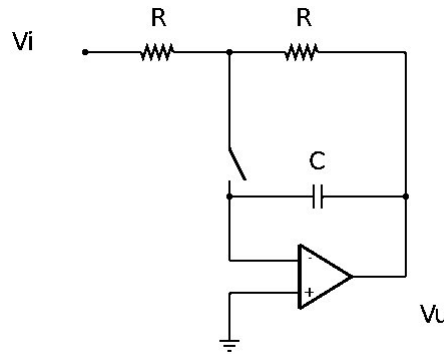


I valori riportati sugli assi coordinati sono puramente indicativi.

Dalla figura notiamo la presenza di picchi di tensione che possono essere pericolosi per le apparecchiature, soprattutto quando il carico è di tipo induttivo.

Dobbiamo inoltre considerare che, nel momento in cui commutiamo in “Hold”, a causa della capacità dell’interruttore, una certa quantità di carica ritorna dal condensatore. La variazione di tensione che viene a generarsi è nota come *errore di offset del Sample & Hold*. Inoltre, e sempre a causa delle capacità interelettrodiche dell’interruttore, una piccola quantità di segnale, in misura proporzionale alla frequenza, transita dall’ingresso sul condensatore. Per ovviare a questo fenomeno è sufficiente aumentare la capacità. Così facendo ci tuteliamo anche dall’inevitabile deriva dovuta alle correnti di perdita sul condensatore dovute, principalmente, alle correnti di polarizzazione dei dispositivi attivi.

Per ovviare a tutti questi inconvenienti, pensiamo di disaccoppiare, in qualche modo, l’ingresso dall’uscita realizzando un primo tipo di circuito di Sample & Hold invertente:



Chiudendo l’interruttore, il segnale di ingresso  $V_i$  carica il condensatore ad una tensione pari a  $V_u = -V_i$ . Questo non potrà scaricarsi a causa della resistenza di ingresso pressoché infinita dell’operazionale che lo va a caricare. Durante il tempo in cui l’interruttore è aperto, il segnale di ingresso si sarà portato ad un nuovo valore di  $V_i'$  e, quindi, l’uscita  $V_u$  andrà a questo nuovo valore secondo la relazione:

$$V_u = -V_i + (V_i - V_i') \cdot \left[ 1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right]$$

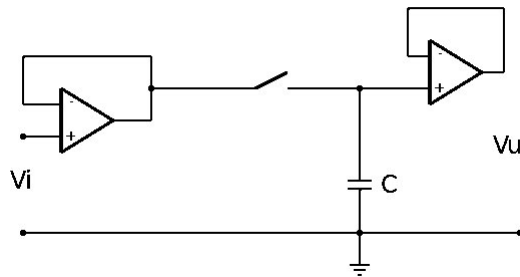
Dopo una decina di costanti di tempo, il valore dell’esponenziale è praticamente trascurabile (circa  $45 \cdot 10^{-6}$ ), per cui l’espressione precedente assumerà la forma seguente:

$$V_u = -V_i + (V_i - V_i') = -V_i'$$

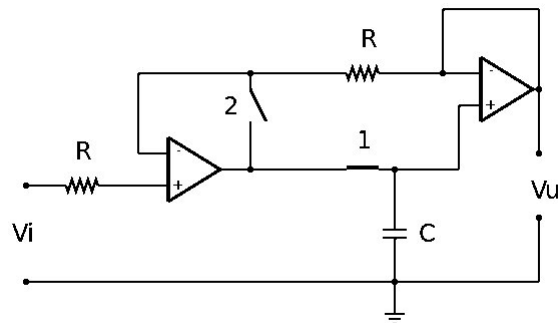
Il circuito considerato ha il vantaggio di presentare un’impedenza di uscita decisamente bassa e, quindi, sarà in grado di pilotare carichi relativamente forti

senza inficiare le sue prestazioni di mantenimento. Gli svantaggi risiedono, soprattutto, nella resistenza di ingresso, pari circa ad  $R$ , nel fatto che il segnale in uscita è sfasato di  $180^\circ$  rispetto al segnale originale e che 10 costanti di tempo possono essere troppe.

Se si riuscisse a disaccoppiare il segnale di ingresso dal condensatore e lo stesso condensatore dal circuito di uscita, si riuscirebbe a risolvere parte dei problemi. I circuiti di elezione che realizzano questo disaccoppiamento sono i *Voltage Follower*, o inseguitori di tensione che ad una resistenza di ingresso praticamente infinita ne associano una di uscita pressoché nulla. Il circuito che pensiamo di realizzare è di questo tipo:



Il funzionamento è banale. Il principale svantaggio è legato al fatto che, una volta aperto l'interruttore, il primo inseguitore resta "sospeso" e diviene quindi fortemente vulnerabile alle saturazioni. Per ovviare a questo inconveniente bisognerà provvedere ad inserire una reazione locale che migliori la stabilità del dispositivo:

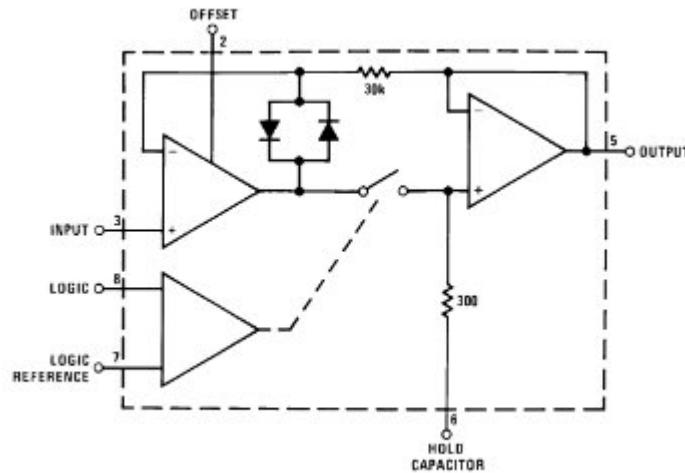


In modalità *Sample* l'interruttore *1* è chiuso mentre *2* è aperto. La tensione di ingresso si trova identica sul condensatore e sul morsetto non invertente del secondo operazionale, che funge da buffer, tramite l'interruttore *1*. Essendo praticamente infinita l'impedenza d'ingresso del primo voltage follower, non si hanno sensibili fenomeni di partizione mentre, essendo praticamente nulla la

sua impedenza di uscita, il condensatore si carica con una costante di tempo trascurabile.

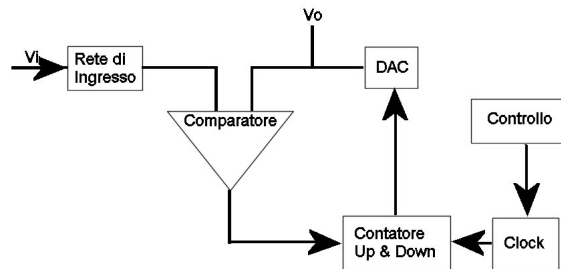
In modalità *Hold* l'interruttore 1 viene aperto mentre il 2 si chiude. Il condensatore vede così il morsetto non invertente del secondo operazionale e, quindi, un'impedenza pressoché infinita in parallelo e non può scaricarsi. La tensione presente ai suoi capi viene presentata in uscita e la resistenza serie che vede l'utilizzatore è considerabile praticamente nulla. La resistenza  $R$  fornisce la controreazione locale al primo inseguitore e contribuisce, inoltre, a minimizzare gli effetti di eventuali cortocircuiti sull'uscita.

Talvolta l'interruttore 2 viene ad essere sostituito da due diodi posti in antiparallelo, come nella figura seguente. Il funzionamento del dispositivo è, ovviamente, identico.



In questa illustrazione è riportato lo schema a blocchi del circuito integrato monolitico LF198 della Texas Instruments - National Semiconductors. Il condensatore è esterno al dispositivo.

Un doveroso cenno va fatto a proposito dei dispositivi di campionamento e tenuta digitali il cui schema a blocchi di principio viene riportato nell'immagine seguente:





La tensione di ingresso da campionare,  $V_i$ , è connessa, tramite una rete d'ingresso, ad un comparatore che abilita il conteggio avanti o indietro di un contatore Up & Down facendo sì che la sua uscita binaria, opportunamente trasformata in grandezza analogica tramite un convertitore digitale analogico, si porti al valore della tensione in ingresso. Il segnale fornito dal DAC, che costituisce il segnale di uscita, viene ad essere comparato con la stessa  $V_i$ .

Il contatore è l'elemento di immagazzinamento del segnale e, pertanto, rappresenta il condensatore dell'analogo dispositivo analogico. Il segnale di clock, che dovrà essere più veloce delle fluttuazioni della tensione di ingresso, viene ad essere conteggiato dal contatore che genererà, così, la rampa, a salire o a scendere, che seguirà l'ingresso e che si arresterà ogni volta che la logica di controllo andrà a fornire un apposito impulso di comando.

Una soluzione simile, proposta dalla Exar con l'uso del suo timer/contatore programmabile XR-2240, è riportata in figura:

