

TEMPO DI CONVERSIONE, SCELTA DEL CONVERTITORE A/D E NECESSITA' DI UN CIRCUITO S/H (Sample & Hold)

La conversione A/D ideale di una tensione analogica $v_a(t)$ consiste nel prelievo di campioni di tale tensione analogica in ben precisi istanti t_i (istanti separati fra loro da uguali intervalli di tempo T_s , indicati come periodi di campionamento) e nell'attribuzione di un codice binario a tali campioni. In questa conversione ideale, i campioni $v(t_0), v(t_1), v(t_2) \dots v(t_n)$ sono valori di tensione relativi a singoli istanti, sono puntiformi e hanno una durata temporale nulla. Dire che i campioni hanno durata temporale nulla equivale a dire che il processo di digitalizzazione è anch'esso istantaneo. Equivale a dire cioè che, nel momento stesso in cui il convertitore preleva un campione, esso è già in grado di fornire, in uscita, il codice di questo campione.

Nel campionamento reale invece le cose vanno in maniera diversa perché l'operazione di digitalizzazione non è istantanea, nel senso che il convertitore impiega un tempo non nullo per fornire il codice di un campione: deve cioè passare un certo tempo dal momento in cui il convertitore preleva un campione e il momento in cui, sulle linee di uscita, è pronto il codice relativo al campione.

Questo intervallo temporale è detto “tempo di conversione” (T_{Conv}) e può avere, secondo il tipo di convertitore, una durata che va (per i convertitori più diffusi) da qualche NANOsecondo alle centinaia di MILLisecondi.

Nel campionamento reale nasce quindi il problema che il convertitore riceve un campione nell'istante t_i , ma non è in grado di fornire il codice del campione in t_i stesso, ma solo dopo un tempo di conversione T_{Conv} , che può essere per esempio di 30 millisecondi.

Premesso che il tempo di conversione deve essere sempre minore del periodo di campionamento T_s (cioè dell'intervallo di tempo che intercorre tra i prelievi di due successivi campioni), se durante questo tempo di conversione di 30 millisecondi il valore della tensione di ingresso rimanesse costante, non ci sarebbe problema, perché il convertitore fornirebbe come uscita il codice di una tensione uguale a quella dell'istante t_i .

Però la tensione di ingresso, in generale, non rimane costante, ma varia dopo l'istante teorico t_i di conversione e continua a farlo nel corso di tutto l'intervallo di tempo detto “tempo di conversione”, continuando a influenzare il processo di digitalizzazione.

Accade quindi che il convertitore presenti in uscita non il codice binario relativo al valore della tensione analogica nell'istante teorico di campionamento t_i , ma il codice relativo, per esempio, all'istante $t' = t_i + 5[\text{ms}]$ o all'istante $t'' = t_i + 18[\text{ms}]$.

Se estendiamo questa osservazione a tutti gli istanti di campionamento, ci rendiamo conto che l'esistenza di un tempo di conversione non nullo fa sì che non abbiamo più i codici relativi ai campioni negli istanti teorici di campionamento¹, ma i codici relativi a istanti che² non sono quelli

1 (codici relativi a istanti regolarmente distanziati da un uguale periodo di campionamento T_s)

2 (per effetto dei tempi di conversione non nulli e non necessariamente uguali tra loro)

previsti dal processo teorico di digitalizzazione e non sono neanche equidistanti fra loro, il che determina una “deformazione” del processo di conversione.

Per esempio può accadere che un processo di conversione con periodo di campionamento

$T_c=100\text{ms}$, il quale dovrebbe fornire i codici binari relativi agli istanti:

$t_0, t_0+100[\text{ms}], t_0+200[\text{ms}], t_0+300[\text{ms}], \dots, t_0+m*100[\text{ms}]$

fornisca invece i codici relativi agli istanti:

$t_0+30[\text{ms}], t_0+120[\text{ms}], t_0+210[\text{ms}], t_0+315[\text{ms}], \dots, t_0+(m*100+K) [\text{ms}]$.

Nel processo reale di digitalizzazione, la presenza di un tempo di conversione non nullo determina uno scostamento fra i codici ideali (cioè i codici relativi ai valori della tensione analogica da convertire v_a negli istanti teorici T_i di conversione) e i codici reali, che non sono più i codici relativi ai valori della v_a negli istanti teorici T_i di conversione, ma i codici della v_a relativi a istanti successivi agli istanti teorici T_i (istanti T_i che diventerebbero solo istanti di inizio-conversione).

E' evidente che lo scostamento di valore dei codici reali dai codici ideali è tanto maggiore quanto maggiore è la velocità di variazione della tensione v_a analogica.

Se noi vogliamo che l'errore di quantizzazione massimo del convertitore sia pari al passo di quantizzazione Q , o al bit meno significativo LSB, o che, in termini equivalenti, la risoluzione del convertitore rimanga pari a Q o a LSB, **dobbiamo ipotizzare che la velocità di variazione della tensione non sia abbastanza alta da consentirle di descrivere, nel tempo di conversione T_{Conv} un distanza in Volt pari al passo Q di quantizzazione**³. Dobbiamo cioè ipotizzare che si abbia:

$$(dv_a/dt)_{max} < Q/T_{Conv}$$

Se invece la velocità di variazione della tensione analogica è maggiore⁴ di Q/T_{Conv} , **dobbiamo anteporre al convertitore un circuito** che applichi al convertitore un valore di tensione bloccato sul livello assunto dalla tensione analogica nell'istante teorico di campionamento, o bloccato al valore assunto dopo un brevissimo intervallo susseguente all'istante teorico T_i .

Il circuito che ci serve è il “**circuito di Campionamento e Mantenimento**” (o circuito “**Sample and Hold**”), che **fornisce in uscita (entro un tempo brevissimo, per esempio di $3 \mu\text{s}$) un valore fisso e stabile della tensione che viene applicata al suo ingresso nell'istante T_i** .

Il circuito Sample & Hold (circuito “**S & H**”) cioè, se gli si presenta in ingresso, nell'istante T_i , una certa tensione analogica, è in grado di fornire in uscita, entro pochi microsecondi⁵, un valore stabile di tale tensione.

3 se il segnale analogico cresce, nel tempo di conversione T_{Conv} , di una quantità maggiore di Q , esso oltrepassa la fascia di quantizzazione in cui si trova il valore di inizio-conversione e quindi assume un valore cui spetterebbe un codice più elevato rispetto a quello che verrà effettivamente assegnato.

4 Abbiamo parlato di una quantità “maggiore di Q ” perché nella quantizzazione col metodo dell'approssimazione, che è il più usato, l'ampiezza delle fasce di quantizzazione (a eccezione della prima) è Q . Se il valore prelevato all'inizio della conversione si trova sul margine inferiore della fascia e se, nel tempo di conversione, la tensione analogica di ingresso cresce di una quantità pari a Q , essa assume un valore corrispondente alla fascia superiore, cioè un valore al quale corrisponde un codice diverso da quello che verrà attribuito al campione prelevato.

In realtà imporre che la variazione del segnale analogico, durante il tempo di conversione, valga Q non evita di commettere l'errore di 1 LSB nel caso in cui il valore prelevato all'inizio della conversione si trovi a metà della fascia (o ancora più in alto). In tal caso, per cadere nell'errore – e avere un codice errato – basterà una variazione della tensione analogica di ingresso pari a $Q/2$ (o ancora più piccola).

5 Gli integrati “S&H” **LF198**, LF298 ed LF398 hanno tempi di acquisizione dell'ordine dei **6 microsecondi**, o comunque compresi, a seconda del valore di capacità applicato, fra i 4 e i 20 microsecondi.

Dunque, per non commettere errori superiori a Q , e quindi superiori a 1 LSB (o in altri termini per rispettare la risoluzione prevista), la massima velocità di variazione della tensione analogica da convertire deve essere tale che:

$\left(\frac{dV_a}{dt}\right)_{MAX} \leq \frac{Q}{T_{conv}} \quad (**)$	<p>Condizione di NON SUPERAMENTO DELL'ERRORE DI 1 LSB e di NON NECESSARIETÀ del circuito di Sample and Hold</p>
---	---

*Se è fissato il tipo di convertitore (e quindi se risultano fissati il tempo di conversione T_{conv} e il passo Q di quantizzazione), la condizione ci informa sulla eventuale necessità dell' S & H: se la **velocità** di variazione del segnale analogico è **minore** del rapporto Q/T_{Conv} , allora non c'è bisogno di S & H.*

Dalla condizione di non superamento dell'errore si ricava:

$$\left(\frac{dv_a}{dt}\right)_{MAX} \leq \frac{Q}{T_{Conv}} \Rightarrow T_{Conv} \cdot \left(\frac{dv_a}{dt}\right)_{MAX} \leq Q \Rightarrow T_{Conv} \leq \frac{Q}{\left(\frac{dv_a}{dt}\right)_{MAX}}$$

ossia:

$T_{Conv} \leq \frac{Q}{\left(\frac{dV_a}{dt}\right)}$	<p>Condizione⁶ sul TEMPO DI CONVERSIONE affinché NON venga superato l'ERRORE di 1 LSB e affinché NON sia NECESSARIO il circuito di <i>Sample and Hold</i>.</p>
--	---

Se dobbiamo decidere che tipo di convertitore usare, la condizione ci dice che ne dobbiamo scegliere uno il cui tempo di conversione T_{conv} sia minore o uguale al rapporto fra l'errore di quantizzazione Q imposto dal problema e la massima variazione del segnale analogico.

Dalla precedente relazione si ricava anche:

$T_{Conv(MAX)} = \frac{Q}{\left(\frac{dV_a}{dt}\right)_{MAX}}$	<p>Massimo TEMPO DI CONVERSIONE che l'ADC può impiegare senza che sia superato l'ERRORE di 1 LSB e senza che sia NECESSARIO il circuito di <i>Sample and Hold</i>.</p>
--	---

⁶ Se nella condizione comparisse (come in alcuni testi) $Q/2$ invece di Q , il tempo di conversione “sicuro da errori maggiori di 1 LSB” sarebbe più basso, cioè, per non superare l'errore (e per non aver bisogno di un circuito S & H) ci vorrebbe un convertitore più veloce, e la condizione risulterebbe più restrittiva.

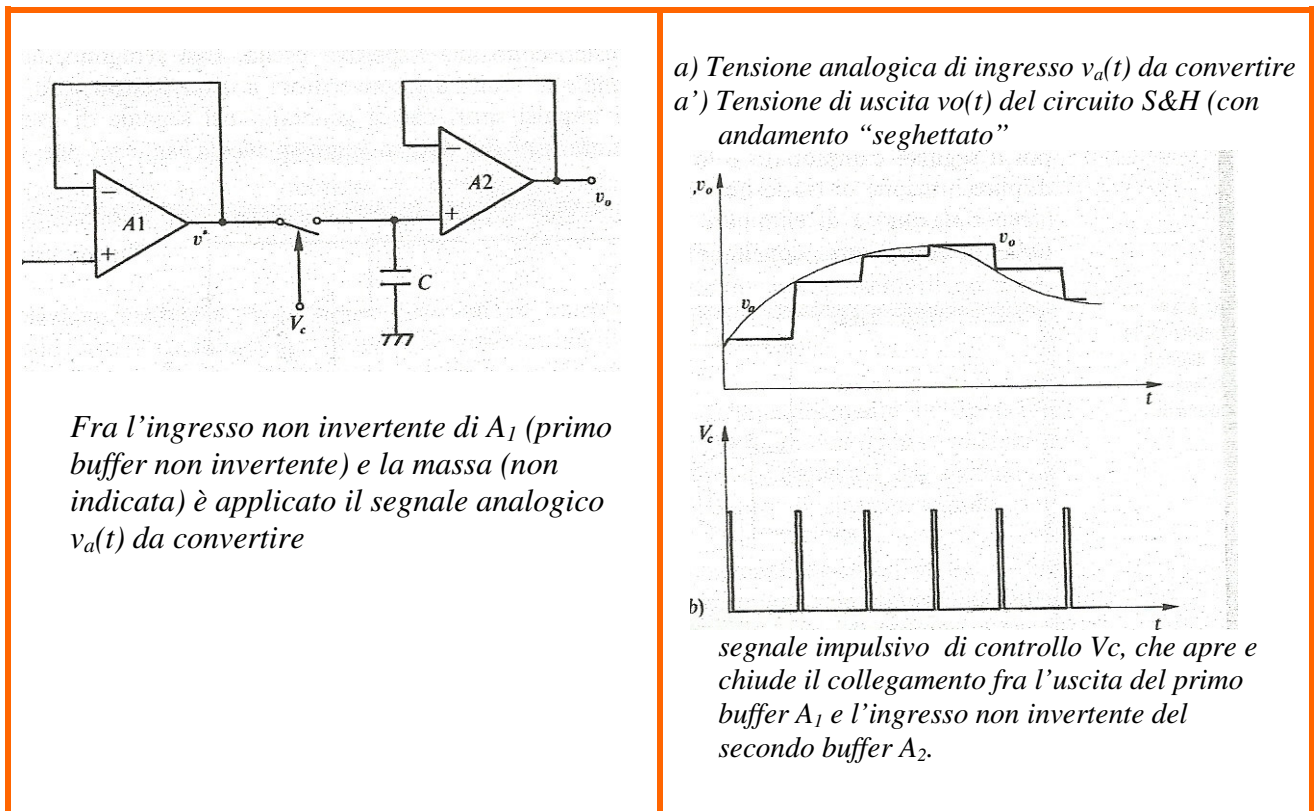
Per non commettere errori, la massima velocità di variazione della tensione analogica da convertire dovrebbe essere tale che:

$$(dv_a/dt)_{max} < (Q/2)/T_{conv}$$

che (essendo $Q=LSB= V_{FS}/2^n$ si può anche scrivere:

$$(dv_a/dt)_{max} < ((V_{FS}/2^n)/2)/T_{conv}$$

COME E' FATTO E COME OPERA IL CIRCUITO S&H



In linea di principio possiamo ritenere che un circuito Sample & Hold sia formato da tre elementi:

1. un primo buffer non invertente ad operazionale, il quale riceve, fra l'ingresso non invertente e massa, il segnale analogico $v_a(t)$ da convertire
2. un interruttore elettronico⁷, pilotato dal segnale di controllo V_c , che apre e chiude il collegamento fra l'uscita del primo buffer A_1 e l'ingresso non invertente del secondo buffer, ingresso ove è posto (col l'altro terminale a massa) un condensatore C
3. un secondo buffer non invertente ad operazionale, il quale riceve, fra l'ingresso non invertente e massa, il segnale v' di uscita del primo buffer analogico, segnale costituito da valori del segnale $v_a(t)$ da convertire; il secondo buffer quindi ha:
 - come segnale di ingresso la tensione di carica o di scarica del condensatore
 - come segnale d'uscita il segnale di uscita v_o dell'intero dispositivo

Osserviamo che:

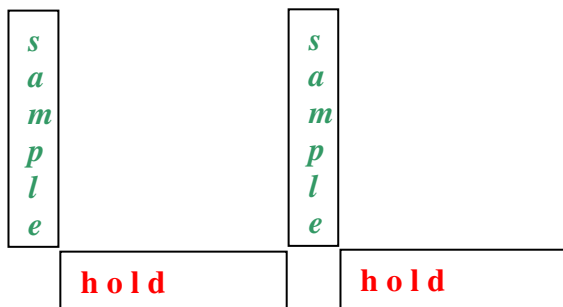
- il CONDENSATORE si può CARICARE, o scaricare, (raggiungendo il valore del segnale analogico di ingresso $v_a(t)$, fornendo tensione al secondo buffer), solo quando l'interruttore elettronico analogico è CHIUSO, cioè quando il segnale di controllo V_c è a LIVELLO LOGICO ALTO
- il condensatore NON si può caricare (né scaricare), mantenendo così il valore di tensione assunto in precedenza, quando l'interruttore elettronico analogico era aperto (staccato), cioè quando il segnale di controllo V_c era a

⁷ Per esempio un interruttore analogico a CMOS o a FET o un interruttore digitale, come una "porta di trasmissione".

livello logico basso; in questa situazione infatti C risulta completamente isolato⁸

- l'interruttore elettronico è pilotato dal segnale di controllo V_c , che è una sequenza di impulsi stretti di controllo; dal grafico si vede che, nel corso degli stretti intervalli di tempo nei quali gli impulsi di controllo sono alti, la tensione di uscita v_o (quella ad andamento seghettato) "insegue" la tensione di ingresso v_a (fase di "sample", mentre negli intervalli di tempo, più estesi, nei quali la tensione di controllo è bassa, la tensione di uscita v_o (sempre quella ad andamento seghettato) rimane bloccata sul valore di v_a assunto durante l'ultimo impulso alto di controllo (fase di "hold).

EFFETTI DEL SEGNALE DI PILOTAGGIO V_c



Sample → campionamento → la tensione sul condensatore cresce o decresce inseguendo v_a

Hold → mantenimento → la tensione sul condensatore è bloccata

⁸ Da una parte infatti è isolato dalla grande impedenza dell'interruttore elettronico aperto, dall'altra dall'elevata impedenza di ingresso del terminale di ingresso non invertente dell'operazionale

SAMPLE E HOLD E SEGNALE SINUSOIDALE

Spesso per individuare le condizioni nelle quali è necessario l'uso dei circuiti di Sample and Hold, si suppone che il segnale $v_a(t)$ da digitalizzare sia sinusoidale, oppure si fa riferimento alla componente sinusoidale a frequenza più alta presente nello spettro di $v_a(t)$.

Ipotizziamo come segnale di ingresso da convertire:

$$v_a(t) = V_a \cdot \text{sen}(2\pi \cdot f \cdot t)$$

La sua velocità di variazione, cioè la sua derivata temporale è:

$$\frac{d}{dt} [V_a \cdot \text{sen}(2\pi \cdot f \cdot t)] = 2\pi \cdot f \cdot V_a \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t)$$

La massima velocità di variazione della tensione, e quindi il massimo valore della derivata, si ha negli istanti di attraversamento dell'asse orizzontale, cioè negli istanti nei quali $v_a(t)=0$, nei quali il coseno vale 1:

$$\left[\frac{dv_a}{dt} \right]_{MAX} = \left[2\pi \cdot f \cdot V_a \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t) \right]_{t=0} = 2\pi \cdot f \cdot V_a \cdot 1 = 2\pi \cdot f \cdot V_a$$

Quindi la condizione (**) (che avevamo scritto, e che ora riportiamo):

$\left(\frac{dV_a}{dt} \right)_{MAX} \leq \frac{Q}{T_{conv}} \quad (**)$	<p>Condizione di NON SUPERAMENTO DELL'ERRORE DI 1 LSB e di NON NECESSARIETÀ del circuito di Sample and Hold</p>
---	---

diventa:

$2\pi \cdot f \cdot V_a \leq \frac{Q}{T_{conv}}$	<p>Condizione di NON SUPERAMENTO DELL'ERRORE DI 1 LSB e di NON NECESSARIETÀ del circuito di Sample and Hold</p>
--	---

e quindi:

$$2\pi \cdot f \cdot V_a \leq \frac{1}{T_{conv}} \cdot \frac{V_{FS}}{2^n}$$

Condizione di **NON SUPERAMENTO DELL'ERRORE DI 1 LSB**
e di
NON NECESSARIETÀ del circuito di **Sample and Hold**

MASSIMA VARIAZIONE IN VOLT NEL TEMPO DI CONVERSIONE (SENZA SUPERAMENTO DELL'ERRORE DI 1 LSB)

La massima variazione in Volt $|\Delta V_a|_{MAX}$ di $v_a(t)$, che può determinarsi nel corso del tempo di conversione T_{Conv} , è data dal prodotto della massima velocità in V/s, con la quale la variazione si compie, (valore massimo della derivata temporale) per il tempo impiegato (appunto T_{Conv}) a effettuare l'escursione:

$$|\Delta V_a|_{MAX} = \left[\frac{dv_a}{dt} \right]_{MAX} \cdot T_{Conv}$$

Affinché tale variazione non superi il passo di quantizzazione Q , deve essere:

$$|\Delta V_a|_{MAX} \leq Q$$

oppure:

$$|\Delta V_a|_{MAX} \leq \frac{V_{FS}}{2^n}$$

oppure ancora:

$$\left[\frac{dv_a}{dt} \right]_{MAX} \cdot T_{Conv} \leq \frac{V_{FS}}{2^n}$$

MASSIMA FREQUENZA CHE PUO' AVERE UN SEGNALE SINUSOIDALE PER ESSERE CONVERTITO SENZA S & H

$$f_a \leq \frac{1}{2^n \cdot \pi \cdot T_{Conv}}$$

**IMMAGINI NON AUTOPRODOTTE:
CORTESIA PETRINI e CALDERINI EDAGRICOLE**

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

**National Semiconductor Fogli tecnici LF 198
Monolithic Sample and Hold Circuits**

Cuniberti, De Lucchi, De Stefano Elettronica (3) Petrini

Mirandola Corso di Elettronica (Le conversioni elettroniche con laboratorio) Calderini edagricole