

Gli Oscilloscopi

A cura di ing. Domenicantonio Grillo

INDICE

1	L'oscilloscopio	pag. 1
1.1	Lo schermo	pag. 1
1.2	Tipi di oscilloscopi	pag. 2
2	Oscilloscopi analogici	pag. 2
2.1	Il tubo a raggi catodici	pag. 3
2.2	La Sezione Verticale	pag. 5
2.3	La Sezione Orizzontale	pag. 5
2.4	Il trigger	pag. 6
2.5	L'Holdoff	pag. 6
3	Gli oscilloscopi numerici	pag. 7
3.1	Il Trigger negli oscilloscopi numerici	pag. 8
4	Gli strumenti numerici	pag. 8
4.1	Strumenti numerici a campionamento	pag. 9
4.2	Blocchi fondamentali di uno strumento numerico a campionamento	pag. 10
4.3	Il convertitore Analogico Digitale negli strumenti numerici a campionamento	pag. 10
4.3.1	Componenti fondamentali	pag. 10
4.3.1.1	Il campionatore	pag. 11
4.3.1.2	Il quantizzatore	pag. 12
4.4	Il convertitore A/D: soluzioni circuitali	pag. 13
4.4.1	Il convertitore A/D ad approssimazioni successive	pag. 14
4.4.2	Il convertitore flash	pag. 15
4.4.3	I convertitori multiplexati	pag. 17
4.5	La memoria di acquisizione	pag. 17
4.6	La visualizzazione	pag. 19
5	Gli oscilloscopi a memoria digitale	pag. 20
5.1	Architettura di elaborazione seriale	pag. 21
5.2	Struttura generale di un oscilloscopio a memoria digitale	pag. 21
6	Il campionamento	pag. 23
6.1	Metodi di campionamento	pag. 23
6.2	Il campionamento in tempo reale	pag. 24
6.3	Il campionamento in tempo reale con interpolazione	pag. 25
6.4	Il campionamento in tempo equivalente	pag. 25
6.5	Il campionamento in tempo equivalente casuale o asincrono	pag. 26
6.6	Il campionamento in tempo equivalente sequenziale o sincrono	pag. 28
7	Fattori relativi alle prestazioni	pag. 28
7.1	Larghezza di banda	pag. 28
7.2	Tempo di salita	pag. 29
7.3	Frequenza di campionamento	pag. 30
7.4	Frequenza di acquisizione della forma d'onda	pag. 31
7.5	Lunghezza di registrazione	pag. 31
8	Gli oscilloscopi ai fosfori digitali	pag. 32
8.1	Architettura di elaborazione parallela	pag. 32
9	Gli oscilloscopi campionatori	pag. 33

1 L'oscilloscopio

L'oscilloscopio è il principale strumento di misura utilizzato in campo elettronico. La sua caratteristica principale è la possibilità di visualizzare su uno schermo (Figura 1) la forma d'onda del segnale sotto misura consentendo la determinazione dei suoi parametri caratteristici, come ad esempio l'ampiezza e il periodo. Generalmente, sull'asse verticale è riportata la tensione, mentre su quello orizzontale è riportato il tempo.

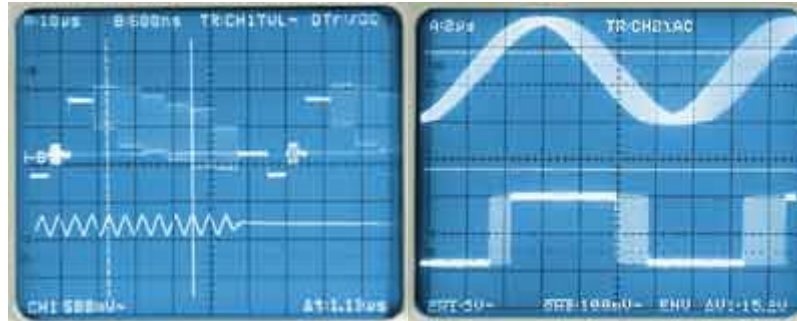


Figura 1 – Forme d'onda visualizzate sullo schermo di un oscilloscopio.

1.1 Lo schermo

Lo schermo è uno dei componenti principali dell' oscilloscopio poiché consente di eseguire visivamente una prima analisi del segnale e, almeno tradizionalmente, di effettuare delle misure con una certa precisione. Dall'analisi visiva possono scaturire le prime informazioni sul segnale, come ad esempio, la forma d'onda, distorsioni, presenza di disturbi ed altro. Quanto migliore è la qualità dello schermo, tanto migliore sarà la visualizzazione delle tracce. Le misurazioni a video sono rese possibili grazie ad un "reticolo" (Figura 2) che, tipicamente, suddivide lo schermo in otto divisioni verticali e dieci divisioni orizzontali. Le divisioni sono suddivise a loro volta in cinque piccoli tratti, le divisioni secondarie o minori o suddivisioni, utilizzati per eseguire misure più accurate.

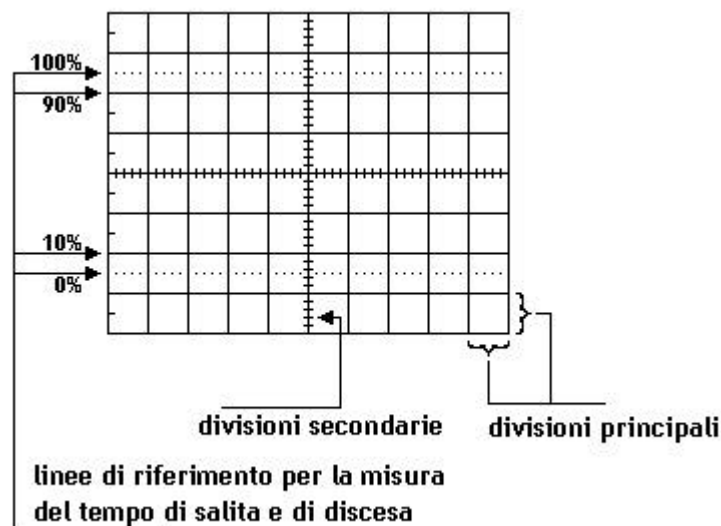


Figura 2 – Schermo tipico di un oscilloscopio.

Alcuni oscilloscopi riportano sull'asse verticale dello schermo le indicazioni 0%, 10%, 90%, 100% per facilitare le operazioni di misura del tempo di salita e di discesa dei fronti d'onda del segnale. La maggior parte degli oscilloscopi attuali riporta sullo schermo anche alcune informazioni relative alla configurazione dello strumento, come ad esempio il valore in volt corrispondente ad ogni divisione verticale e il valore in secondi corrispondente ad ogni divisione orizzontale.

1.2 Tipi di oscilloscopi

Gli apparecchi elettronici possono essere classificati in due categorie: **analogici** e **digitali**. Gli apparecchi analogici sono interessati a segnali di tensione che variano con continuità nel tempo, mentre quelli digitali impiegano anche segnali numerici. Ad esempio, un giradischi tradizionale è un apparecchio analogico mentre il Compact Disc, noto anche come lettore CD, è un apparecchio digitale. Gli apparecchi digitali sono anche noti come apparecchi **numerici**. Analogamente, gli oscilloscopi si distinguono in analogici e digitali (Figura 3). Ciascun tipo di oscilloscopio presenta delle caratteristiche proprie che lo rendono adatto per talune applicazioni. Per quelle più comuni è possibile scegliere indistintamente l'uno o l'altro.

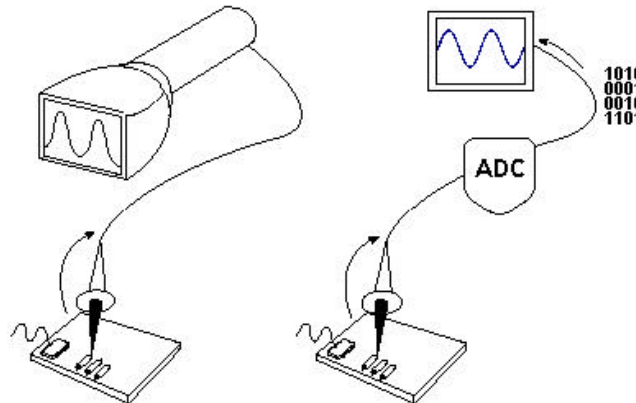


Figura 3 - Gli oscilloscopi analogici visualizzano la forma d'onda del segnale, mentre gli oscilloscopi numerici dapprima campionano il segnale e poi lo ricostruiscono visualizzandone la forma d'onda.

In genere, è preferibile utilizzare gli oscilloscopi analogici quando è importante visualizzare l'evoluzione di segnali in tempo reale, ossia al momento stesso in cui si verificano. In genere il loro utilizzo è ristretto all'analisi dei segnali periodici e, sotto opportune condizioni, dei segnali ripetitivi. Gli oscilloscopi numerici, invece, sono preferibili quando è necessaria l'analisi di segnali anche non ripetitivi o quando bisogna catturare singoli eventi o segnali transitori. Per offrire un maggiore campo di applicazioni sono nati negli ultimi anni dei modelli ibridi analogico/numerici che racchiudono entrambe le soluzioni in un unico strumento. In ogni caso, è necessario che siano verificati i limiti imposti dalle prestazioni dello strumento. Ad esempio, è fortemente consigliato non utilizzare un oscilloscopio analogico per analizzare segnali con contenuto spettrale superiore ad 1 GHz a causa dei limiti imposti in frequenza dal tubo a raggi catodici.

Gli oscilloscopi numerici possono essere suddivisi ulteriormente in oscilloscopi a **memoria digitale (DSO)**, oscilloscopi a **fosfori digitali (DPO)** e oscilloscopi **campionatori**.

2 Oscilloscopi analogici

L'oscilloscopio analogico (Figura 4) è ancora oggi considerato lo strumento fondamentale per ottenere confidenza con la metodologia di misurazioni in tempo reale, che sono ottenibili in modo pratico e rapido grazie ad ai vari sistemi di misura concentrati in questa tipologia di apparecchiature. Il primo oscilloscopio analogico appare nel 1897 quando vengono eseguite le prime misure con un tubo a raggi catodici. L'architettura tipica di un oscilloscopio analogico è riportata in Figura 5.

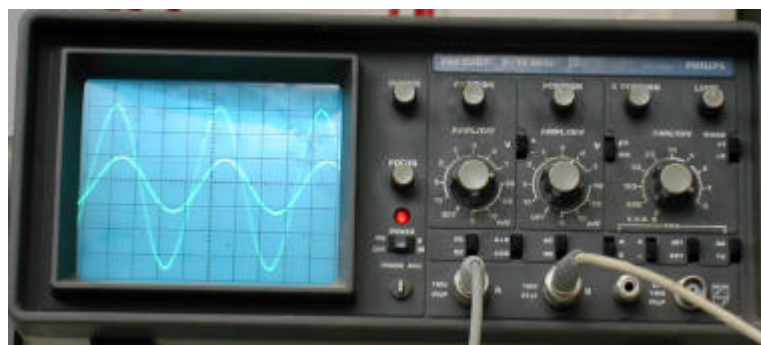


Figura 4 – Pannello frontale di un'oscilloscopio analogico.

2.1 Il tubo a raggi catodici

Il componente fondamentale di un oscilloscopio analogico è il **tubo a raggi catodici (CRT)** (Figura 6 e 7), un dispositivo elettronico che è in grado di visualizzare la forma d'onda di un segnale elettrico su uno schermo. Esso è costituito da un contenitore di vetro in cui è stato realizzato il vuoto che comprende, fondamentalmente, un **cannone elettronico**, un **sistema di deflessione** e uno **schermo** luminescente. Il cannone elettronico è un dispositivo che produce e focalizza un **fascio di elettroni**, anche noto come **pennello elettronico** ed è costituito da un **riscaldatore**, un **catodo**, una **griglia** e una **lente focalizzatrice**.

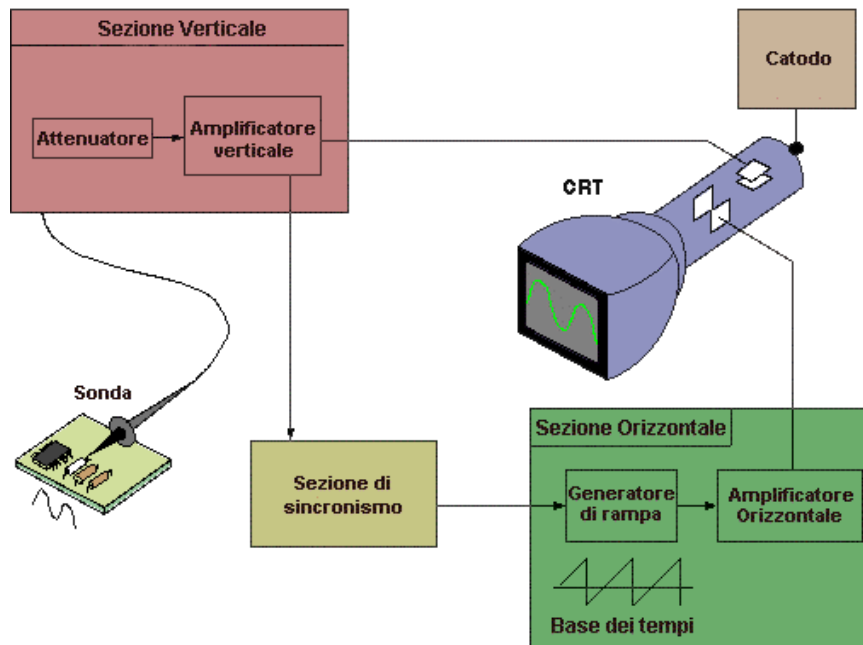


Figura 5 - Tipica architettura di un oscilloscopio analogico.

Un filamento metallico, il riscaldatore, percorso da una corrente elettrica riscalda un elettrodo, il catodo, che pertanto emette elettroni per effetto termoelettrico. Una griglia controlla il flusso degli elettroni che sono poi accelerati grazie ad una serie di elettrodi (anodi) posti a potenziale positivo rispetto al catodo. Essi, inoltre, sono realizzati con una forma geometrica particolare allo scopo di rendere il pennello elettronico di sezione puntiforme. Per questo motivo, il sistema costituito da detti anodi prende il nome di lente focalizzatrice.

Il pennello elettronico è inviato poi al sistema di deflessione. Questo è costituito da due coppie di piastre elettriche, che deflettono il fascio in relazione al potenziale elettrico ad esse applicato e lo dirigono in un punto ben definito dello schermo. Le piastre orizzontali, anche dette **placche di deflessione verticale**, controllano i movimenti verticali del pennello (Figura 8), mentre quelle verticali, anche dette **placche di deflessione orizzontale**, ne controllano i movimenti orizzontali. La parte interna dello schermo è ricoperta da una sottile pellicola di una sostanza fluorescente, comunemente detta "fosforo", che è in grado di emettere energia luminosa se viene colpita dagli elettroni con sufficiente energia cinetica. Parte dell'energia luminosa emessa è visibile sullo schermo come un punto luminoso la cui intensità luminosa e fuoco sono regolabili rispettivamente dalla griglia e dalla lente focalizzatrice.



Figura 6 - Tubi a raggi catodi.

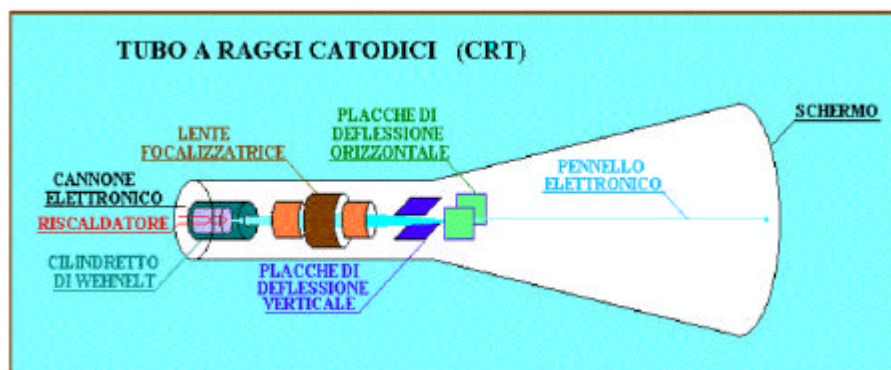


Figura 7 - Shema di un tubo a raggi catodici.

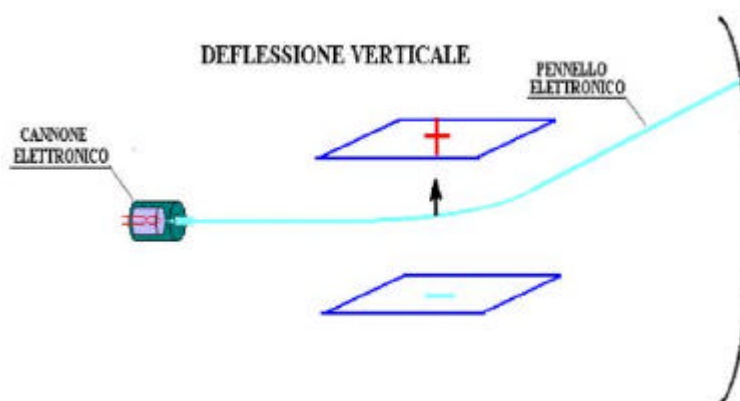


Figura 8 - Il pennello elettronico viene deflesso verticalmente dalle placche orizzontali di una quantità proporzionale al valore dell'ampiezza del segnale sotto misura ed inviato sullo schermo.

È quindi possibile controllare la posizione del punto luminoso sullo schermo grazie al sistema di deflessione: una tensione V_Y inviata alle placche di deflessione verticale controlla la posizione sull'asse verticale, o **Y** o **asse delle ampiezze**, del punto luminoso, mentre una tensione V_X inviata alle placche di deflessione orizzontale ne controlla la posizione sull'asse orizzontale, o **X** o **asse dei tempi**. La posizione di un punto P visualizzato sullo schermo, dunque, ha le coordinate (x,y) imposte dalla coppia di valori (V_X, V_Y).

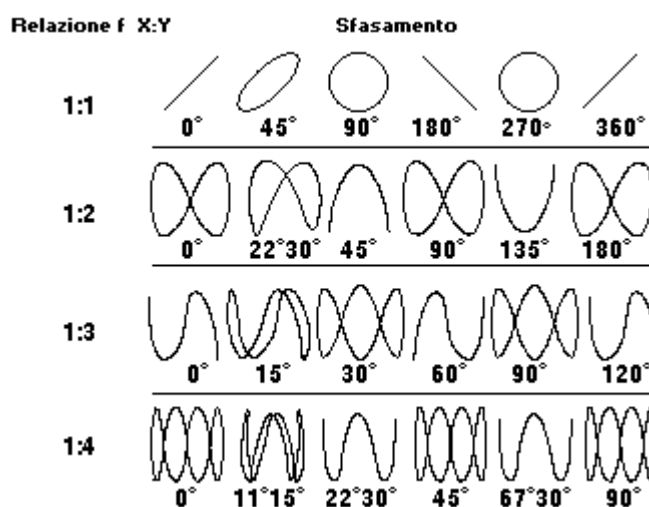


Figura 9 – Figure di Lissajons per diversi angoli di fase e per diversi rapporti in frequenza tra i due segnali.

Per visualizzare l'andamento nel tempo di un segnale, allora, è sufficiente applicare una tensione che varia con la stessa legge temporale alle placche di deflessione verticale, ed una tensione che varia linearmente

alle placche di deflessione orizzontale. In questo modo il punto luminoso si muove sullo schermo in su se la tensione è positiva, o in giù se la tensione è negativa, e contemporaneamente da sinistra verso destra. Questa modalità di funzionamento dell'oscilloscopio si chiama **base dei tempi** e il segnale inviato alle placche di deflessione orizzontale è generato internamente all'oscilloscopio.

Se invece la modulazione dell'asse delle ascisse è affidato ad un segnale prelevato dall'esterno, allora la modalità di funzionamento dell'oscilloscopio si chiama **modalità XY** (Figura 9). Questa modalità è spesso utilizzata per misurare il rapporto in frequenza tra due segnali e l'angolo di fase tra due segnali isofrequenziali.

Il CRT limita la gamma di frequenze dei segnali visualizzabili da un oscilloscopio analogico. A frequenze molto basse, il segnale appare come un punto luminoso che si sposta lentamente per cui è difficile individuare la forma d'onda. A frequenze elevate il limite è imposto dalla velocità di scrittura del CRT: la luminosità della traccia risulta troppo bassa e il segnale non è più visibile. Gli oscilloscopi analogici più veloci possono visualizzare segnali fino a frequenze di circa 1 GHz.

2.2 La Sezione Verticale

Il segnale di tensione da misurare, prima ancora di essere applicato alle placche orizzontali, viene inviato ad un sistema di condizionamento, la **sezione verticale**, costituito fondamentalmente da un attenuatore e un amplificatore. L'attenuatore variabile permette di ottenere le varie portate di sensibilità con l'attenuatore tutto disinserito si avrà la massima sensibilità verticale, ad esempio 2 mV/div, consentita dall'amplificatore per elevare i millivolt del segnale di ingresso fino alle decine di volt necessari alla deflessione del pennello elettronico. A seconda di come si regola la scala verticale (comando VOLT/DIV), la tensione del segnale viene ridotta o aumentata permettendo all'operatore di visualizzare al meglio la traccia sullo schermo.

Il segnale si propaga poi alle placche di deflessione verticale del CRT che causa lo spostamento verticale del punto luminoso sullo schermo.

2.3 La Sezione Orizzontale

Per potere tracciare un grafico sullo schermo l'oscilloscopio deve utilizzare delle informazioni per l'asse orizzontale, o X da correlare a quelle che gli vengono inviate per l'asse verticale o Y, dal sistema verticale. La sezione orizzontale dell'oscilloscopio fa fronte a questa necessità generando la tensione che provoca lo spostamento orizzontale, da sinistra verso destra, del pennello di elettroni che disegna la traccia luminosa dello schermo. Per tale scopo la sezione orizzontale realizza un generatore di scansione, lo "sweep generator", che produce una forma d'onda a dente di sega o a "rampa" (V_x di Figura 10), utilizzata per comandare la scansione orizzontale. La pendenza di tale rampa determina la velocità con cui si sposta il pennellino lungo l'asse orizzontale e quindi determina il numero di secondi a divisione sullo schermo. Le prestazioni di un oscilloscopio dipendono anche dalla linearità del tratto in salita della rampa di scansione.

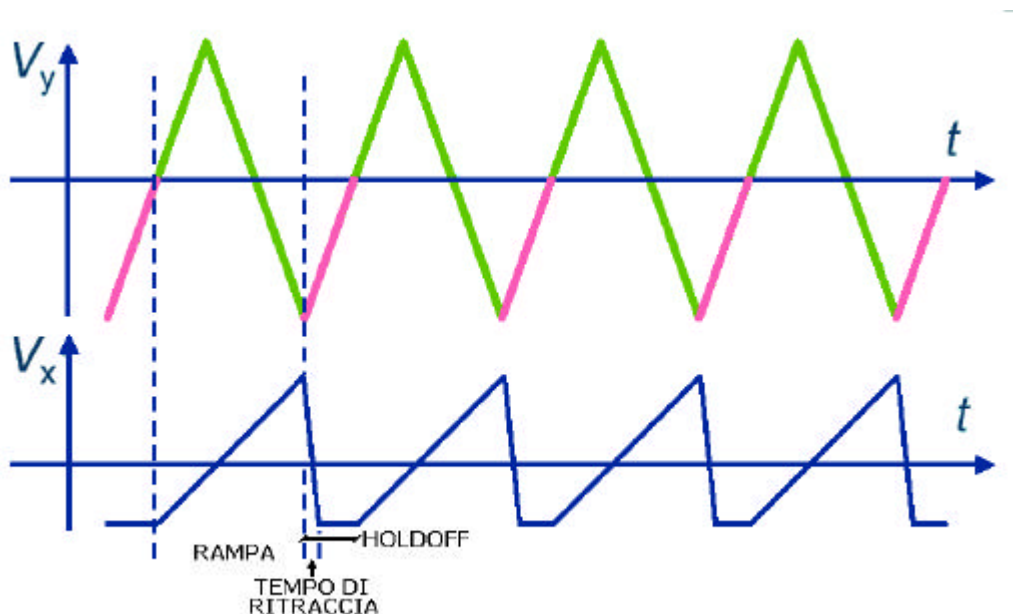


Figura 10

Per la maggior parte degli oscilloscopi analogici, il generatore di scansione è calibrato in unità di tempo, ed è per tale motivo che spesso è denominato "generatore della base dei tempi". Scansioni in rapida successione fanno sì che il movimento del punto sia percepito come una linea continua.

Alle frequenze più alte il punto luminoso può spazzolare l'intero schermo fino a 500.000 volte al secondo. Inoltre, maggiore è la frequenza con cui il fascio colpisce un punto particolare dello schermo, tanto maggiore sarà la luminosità di quel punto.

Durante il **"tempo di ritraccia"** o **"tempo di flyback"** il pennellino ritorna alla sua posizione iniziale alla sinistra dello schermo e la sua "ritraccia" non viene visualizzata (impulso di "unblanking").

2.4 Il trigger

Per riprodurre la forma d'onda del segnale sullo schermo dell'oscilloscopio è necessario stabilire quando deve avvenire la scansione della traccia. A tale scopo sono impiegati complessi e importanti circuiti dell'asse dei tempi che provvedono allo "sgancio del trigger". Il trigger determina l'istante in cui parte la scansione a seguito di condizioni predefinite che debbono essere necessariamente soddisfatte. Queste condizioni prendono il nome di **eventi** o **eventi di trigger** e sono in genere definite su di un segnale, detto **segnale di trigger** che in genere coincide con quello sotto misura. Si definiscono, a tal uopo, **punti di trigger** i punti del segnale di trigger che gli eventi suddetti. Non è possibile definire gli eventi a caso, per determinare i parametri di un segnale mediante misurazioni eseguite a video, infatti, è necessario che sia visualizzata una traccia stabile. Ciò è possibile solo se il periodo T_x del segnale a rampa coincide con un multiplo intero del periodo T_Y :

$$T_x = mT_Y$$

con m intero positivo. Se tale relazione non è soddisfatta, ad ogni spazzolata viene visualizzata una traccia che è disposta diversamente da quelle visualizzate in precedenza (Figura 11). La visione nitida e stabile della forma d'onda che compare sullo schermo dell'oscilloscopio è provocata dal continuo passaggio del pennello elettronico del tubo a raggi catodici, sempre sulla stessa traccia. È pertanto necessario sincronizzare l'istante di partenza della rampa con il punto iniziale della porzione del segnale da visualizzare.

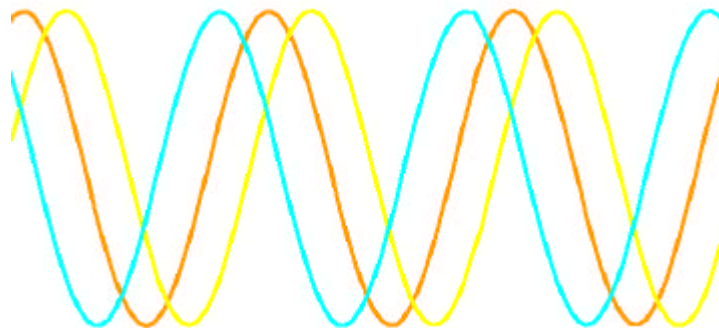


Figura 11 – Se la base dei tempi non è ben sincronizzata allora saranno visualizzate forme d'onda che scorrono velocemente sullo schermo rendendo la traccia instabile. L'esempio di figura mostra tre forme d'onda ottenute in tre scansioni successive.

2.5 L'Holdoff

Il "tempo di holdoff" comprende il "tempo di ritraccia" ed un tempo di inattività che può essere regolato dall'operatore. Il comando di Holdoff permette, infatti, di determinare un intervallo di tempo in cui la base dei tempi è disabilitata a riconoscere un eventuale evento di trigger (Figura 12) generando, così, un tempo morto tra una scansione e l'altra. Questa funzione può rilevarsi di importanza decisiva quando si verifichi una incertezza nel riconoscimento dell'evento di trigger. Il segnale di trigger, infatti, può avere una forma d'onda complessa con molti possibili punti di trigger, come un treno a impulsi digitale o quando la forma d'onda è ripetitiva. Come si può dedurre dalla Figura 13, ciascun punto di livello prefissato sul fronte d'onda positivo è candidato ad essere un punto di trigger. D'altra parte, non tutti possono esserlo altrimenti verrebbe visualizzata sullo schermo una traccia non stabile. Regolando opportunamente il periodo di Holdoff è possibile far sì che, come punto di trigger, venga utilizzato solo il primo impulso di un treno. In tale modo

l'oscilloscopio mostrerà sempre il primo impulso. I punti di trigger, infatti, non sono riconosciuti durante il tempo di Holdoff, ossia il periodo che segue ciascuna acquisizione.

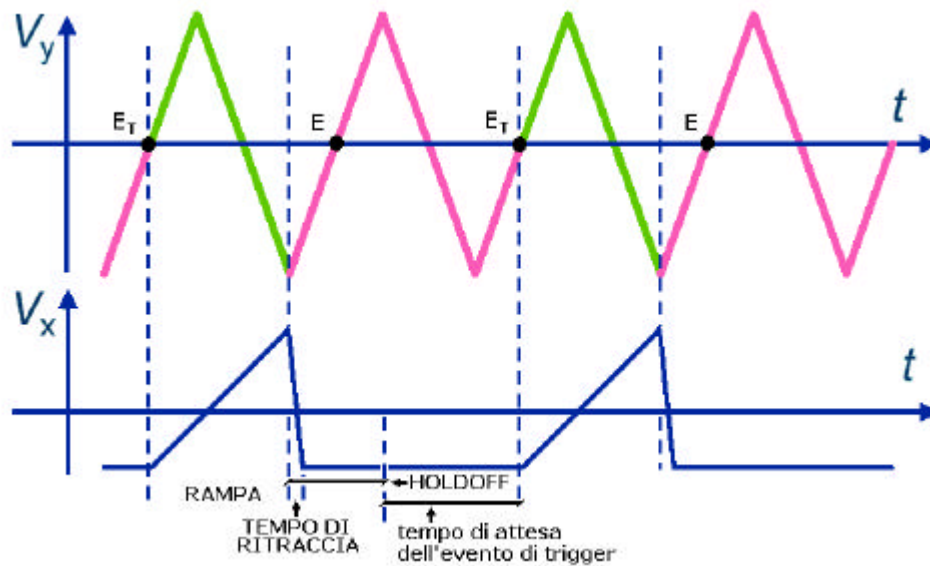


Figura 12 – Durante il tempo di Holdoff la sezione di trigger non abilita la generazione della rampa per la scansione della traccia.

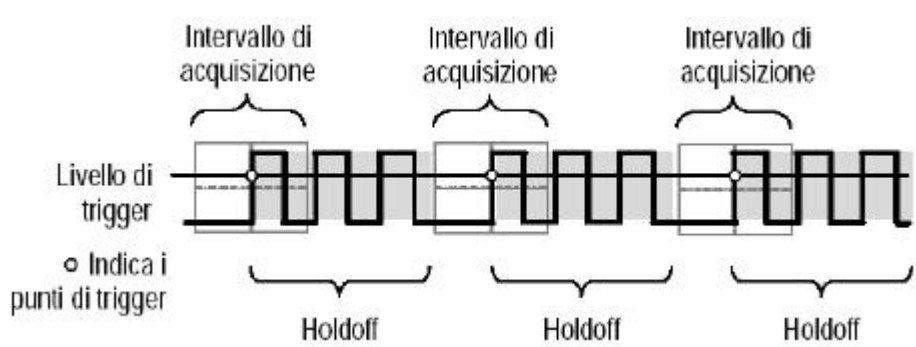


Figura 13

3 Gli oscilloscopi numerici

A differenza degli oscilloscopi analogici, gli oscilloscopi numerici (Figura 14) impiegano un convertitore analogico digitale (A/D) per rappresentare la tensione sotto misura in forma numerica. L'oscilloscopio acquisisce la forma d'onda come serie di campioni e li memorizza finché ne ha accumulato un numero sufficiente per tracciarla; a questo punto la ricostruisce e la visualizza.

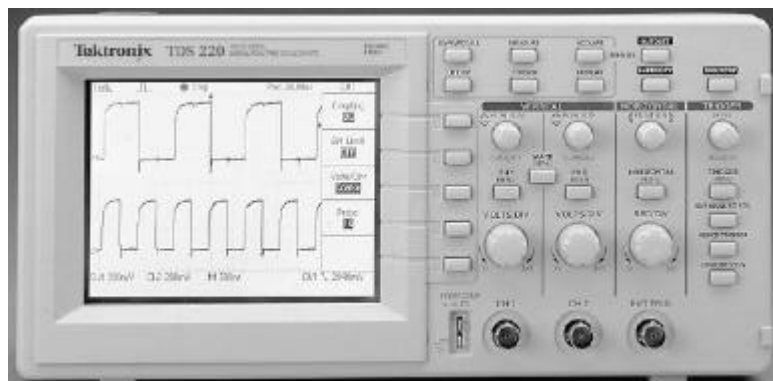


Figura 14 – Pannello frontale di un'oscilloscopio numerico.

Gli oscilloscopi digitali possono essere classificati in **oscilloscopi a memoria digitale (DSO)**, **oscilloscopi ai fosfori digitali (DPO)** e **oscilloscopi campionatori**. Nel caso di segnali periodici, la larghezza di banda dell'oscilloscopio digitale è una funzione della larghezza della banda analogica dei componenti all'ingresso dell'oscilloscopio, alla quale in genere si fa riferimento con il termine "punto a -3dB ". Nel caso di eventi singoli o transitori, quali gli impulsi e i gradini, la larghezza di banda può essere limitata dalla frequenza di campionamento dell'oscilloscopio. L'architettura tipica di un oscilloscopio numerico è riportata in Figura 15.

3.1 Il trigger negli oscilloscopi numerici

Il trigger determina il momento in cui l'oscilloscopio inizia ad acquisire i dati e a mostrare una forma d'onda. Quando il trigger è impostato correttamente, l'oscilloscopio è in grado di convertire visualizzazioni instabili o schermate vuote in forme d'onda significative. Quando l'oscilloscopio inizia ad acquisire una forma d'onda, raccoglie i dati a sufficienza per disegnare i dati a sinistra del punto di trigger. L'oscilloscopio continua ad acquisire dati in attesa che si verifichi la condizione di trigger. Dopo avere individuato un evento, l'oscilloscopio continua ad acquisire dati in modo da poter disegnare la forma d'onda alla destra del punto di trigger.

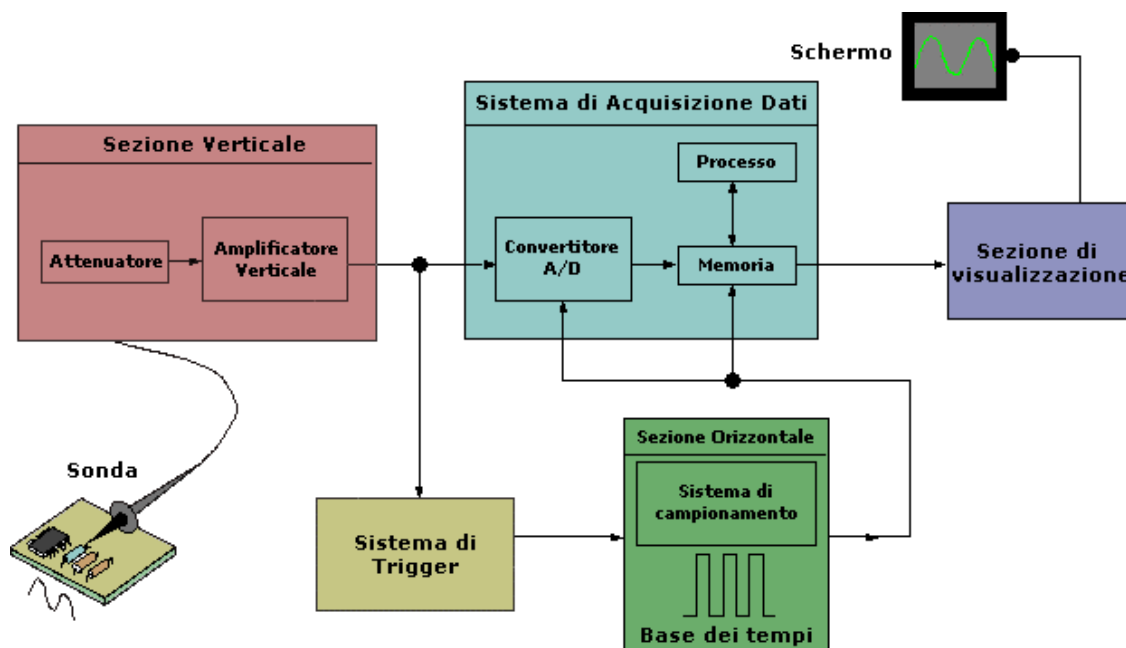


Figura 15 -Tipica architettura di un oscilloscopio digitale.

4 Gli strumenti numerici

L'attuale disponibilità di microprocessori in grado di gestire e di elaborare dati numerici con prestazioni sempre più spinte rende molto vantaggioso effettuare, inizialmente, una conversione analogico digitale del segnale da analizzare e operare, successivamente, sui valori campionati per ricavare le informazioni di interesse. Questa metodologia operativa sta profondamente modificando non solo la struttura, ma anche la modalità di impiego della strumentazione elettronica più recente, la quale viene indicata genericamente con il nome di *strumentazione di misura numerica* per mettere in risalto che una parte sempre più consistente dell'intero strumento opera su valori numerici, e che il risultato è disponibile in forma numerica.

Negli strumenti elettronici numerici, la conversione in una collezione di valori numerici del segnale analogico da analizzare offre la possibilità di una opportuna elaborazione dei campioni, impiegando adeguati algoritmi numerici, per valutare il parametro di interesse.

I vantaggi offerti da questo modo di operare sono molteplici. Ad esempio, per ricavare un parametro diverso da quello inizialmente previsto è sufficiente modificare solo l'algoritmo di elaborazione. È possibile realizzare strumenti che sono in grado di fornire il valore di più grandezze contemporaneamente: non si deve cioè utilizzare uno strumento diverso per ogni specifica misurazione, come avviene nel caso di strumenti analogici. Ciò consente, in particolare, di evitare la duplicazione dei blocchi comuni ad ogni strumento, come, ad esempio, il blocco di condizionamento di ingresso o quello di visualizzazione dei risultati ottenuti. Il costo di uno strumento numerico, pertanto, risulta spesso inferiore al costo globale degli strumenti analogici richiesti per determinare le varie grandezze incognite.

È spesso possibile, inoltre, migliorare l'accuratezza dei risultati, o la velocità di esecuzione delle misurazioni. Poiché il risultato di ogni misurazione è espresso in forma numerica, è possibile eseguire su di esso ulteriori elaborazioni, sia utilizzando la capacità di elaborazione dello strumento stesso sia mediante un host computer al quale lo strumento può essere collegato.

4.1 Strumenti numerici a campionamento

Una tecnica molto usata per registrare l'evoluzione nel del tempo di segnali analogici è quella del campionamento che consiste nel prelevare i valori dell'ampiezza del segnale in determinati istanti di tempo. È possibile, successivamente, registrare tali valori su un supporto fisico, che potrebbe essere la memoria di massa di un Personal Computer, in un formato numerico ad esso adatto, ad esempio in binario. Detti valori prendono il nome di campioni del segnale. In Figura 16 sono riportati un segnale sinusoidale e i campioni che la rappresentano. Si può notare come sia possibile ricostruire con ottima approssimazione il segnale di partenza, la sinusoide, semplicemente unendo i punti che la rappresentano, ovvero i **campioni**, mediante una linea retta. Gli istanti nei quali si prelevano i valori devono essere distanziati di un tempo identico per ogni campione ed almeno pari al tempo necessario per eseguire tale operazione.

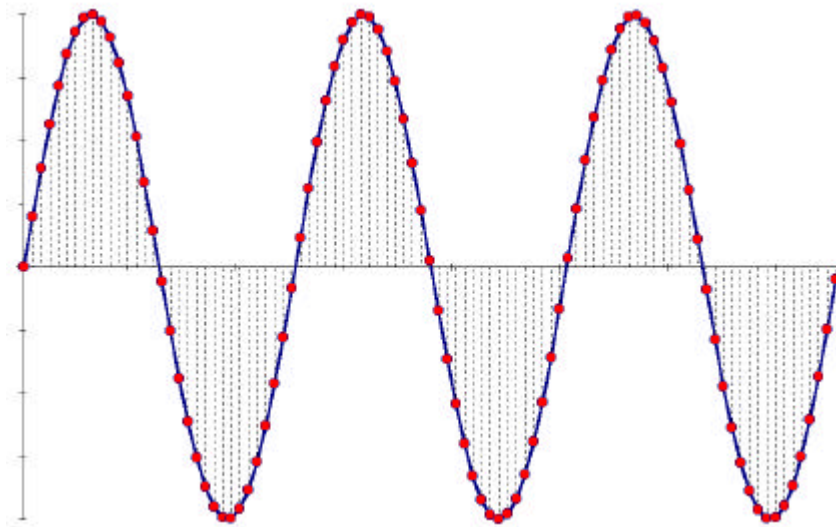


Figura 16 – Segnale sinusoidale campionato.

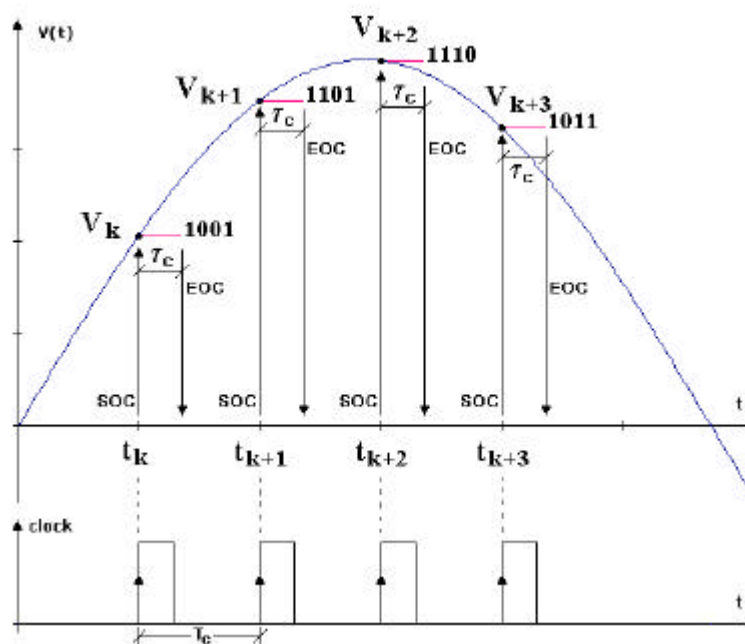


Figura 17

Il dispositivo preposto all'operazione del campionamento e alla trasformazione dei valori campionati in un formato numerico che sia adatto alla memorizzazione è il **convertitore analogico digitale (ADC)** (Figura 19). Trattasi di un dispositivo che è in grado di trasformare una grandezza elettrica, in genere una tensione, in una informazione di tipo numerico. Questa operazione, però, non è immediata ma necessita di un **tempo di conversione**. Affinché dette informazioni abbiano, poi, il significato di grandezze di tipo istantaneo è necessario che il tempo di conversione sia trascurabile rispetto alle variazioni del segnale.

La Figura 17 illustra la tecnica del campionamento. Il segnale analogico è campionato in corrispondenza dei fronti di salita di un opportuno segnale, il segnale di clock, negli istanti t_k . Per eseguire poi la trasformazione dei valori campionati V_k espressi in volt in una loro rappresentazione in formato binario è necessario un tempo di conversione t_c . La Figura 17 mostra anche come non sia possibile eseguire una successiva operazione di campionamento prima ancora che sia esaurito il tempo di conversione del campione precedente.

4.2 Blocchi fondamentali di uno strumento numerico a campionamento

La maggior parte degli strumenti numerici presentano una struttura comune schematizzata in Figura 18. Il blocco di **condizionamento analogico** permette di amplificare o attenuare il segnale in ingresso in modo che il blocco successivo, costituito dal **Sample & Hold** e dal **convertitore A/D**, possa lavorare nelle migliori condizioni possibili, in particolare permette di utilizzare tutti, o la maggior parte, i bit del convertitore A/D.

Il blocco di condizionamento esegue, talvolta, anche un filtraggio passa-basso per evitare gli inconvenienti legati al fenomeno dell'aliasing. Il Sample & Hold ed il convertitore A/D sono delegati rispettivamente al campionamento e alla conversione in numerico del segnale in ingresso. I valori numerici sono generalmente espressi in forma digitale o **binaria**, ovvero in una sequenza finita di numeri, i cosiddetti **bit**, che possono assumere solamente i valori **0** e **1**. Il numero di cifre che costituisce il numero espresso in binario coincide con il numero di bit del convertitore A/D. I campioni digitalizzati sono quindi immagazzinati nella memoria dello strumento e resi disponibili per eventuali elaborazioni.

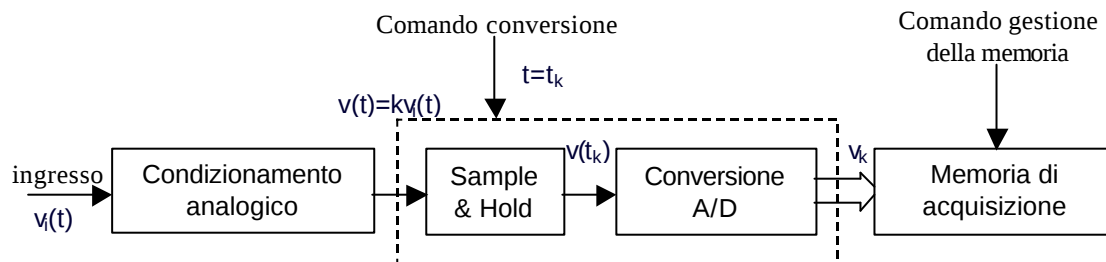


Figura 18 – Blocchi fondamentali di uno strumento numerico. Il **comando di conversione** che definisce degli istanti di campionamento, è gestito dal **segnale di clock** mentre il **comando gestione della memoria**, per la selezione del segmento di segnale da acquisire, è controllato dal **segnale di trigger**.

4.3 Il convertitore Analogico Digitale negli strumenti numerici a campionamento

Le caratteristiche di uno strumento numerico dipendono fortemente da quelle del **convertitore analogico digitale (ADC)** impiegato. Questo ne determina le prestazioni e il campo di impiego. Il convertitore analogico digitale è un dispositivo che è in grado di trasformare una grandezza elettrica, in genere una tensione, in una informazione di tipo numerico generalmente espressa in forma digitale.

4.3.1 Componenti fondamentali

Un convertitore analogico digitale è in genere costituito dai tre blocchi riportati in Figura 19.

La trasformazione di un segnale da analogico a numerico viene eseguita mediante le tre operazioni fondamentali:

- **Campionamento.** In questa fase si passa dalla rappresentazione nel dominio del tempo continuo alla rappresentazione nel dominio del tempo discreto. Il segnale viene 'prelevato' in fissati istanti di tempo t_k . Detto segnale prende il nome di **segnale campionato** mentre gli elementi che lo costituiscono prendono il nome di **campioni**.

- **Quantizzazione.** In questa fase si passa dalla rappresentazione delle ampiezze dal dominio continuo a quello discreto. L'ampiezza del segnale 'prelevato' non può assumere tutti i valori, ma solo alcuni. Il numero dei valori possibili è definito dal numero di bit del convertitore. Il segnale elaborato da questo blocco prende il nome di **segnale quantizzato**.
- **Codifica.** Il valore numerico quantizzato è rappresentato in una opportuna base di numerazione. Per la maggior parte, viene utilizzata la rappresentazione in binario ovvero in base due.

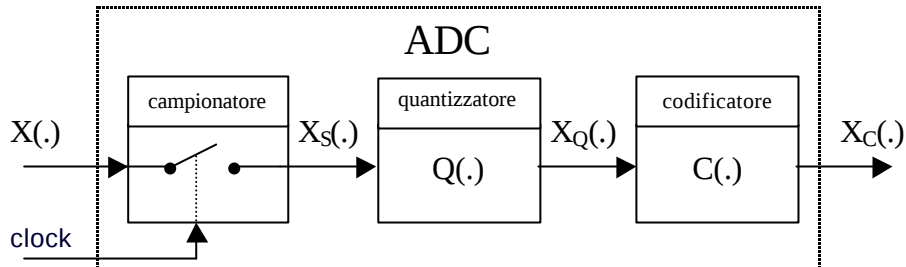


Figura 19 – Schema a blocchi di un convertitore A/D. Talvolta il blocco campionatore è esterno al convertitore.

Queste operazioni, però, non sono immediate a causa dei tempi intrinseci che sono necessari per eseguire ciascuna delle tre attività. Il convertitore A/D, ad esempio, necessita di un **tempo di conversione** per trasformare la grandezza X_S in un valore numerico e rappresentarla nella base di numerazione scelta. Per eliminare cause di ambiguità affinché X_C sia la rappresentazione numerica della grandezza X_S è necessario che quest'ultima non vari durante tutto il tempo di conversione. Questa condizione è soddisfatta solo se X_C è un segnale continuo di ampiezza costante nel tempo. Se addirittura questa condizione è già soddisfatta dal segnale X allora non è strettamente necessario utilizzare il blocco campionatore.

4.3.1.1 Il campionatore

È in genere costituito da un amplificatore **Sample & Hold (S&H)**, un sistema preposto al campionamento (fase **sample**) del segnale di ingresso in un fissato istante t_k e alla tenuta (fase **hold**) del valore del segnale assunto all'istante t_k . I componenti fondamentali di un S&H sono schematizzati in Figura 20.

Da un punto di vista di principio, esso è costituito da un interruttore comandato e da un condensatore la cui capacità ha la funzione di memorizzare (hold) il valore assunto dal segnale all'istante in cui l'interruttore viene aperto (istante di campionamento).

La definizione della particolare modalità di funzionamento, sample oppure hold, avviene applicando un opportuno segnale binario, il **segnale di clock**, all'ingresso di controllo. Ad esempio, il livello logico basso può corrispondere al modo sample, mentre quello alto può corrispondere al modo hold (Figura 20).

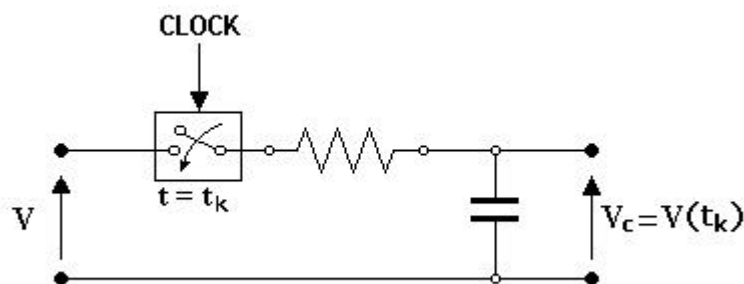


Figura 20 – Circuito Sample & Hold. L'interruttore è pilotato con un segnale di clock di periodo T_c e la resistenza rappresenta le perdite ohmiche dell'interruttore.

La resistenza R e la capacità C viste all'ingresso del S&H sono dimensionate in modo da fornire il prodotto RC molto piccolo, idealmente nullo, durante la fase sample e molto grande, idealmente infinito, durante la fase hold. In queste condizioni il condensatore si carica velocemente, con una costante di tempo piccola, e si scarica lentamente, con una costante di tempo molto grande. Nel caso ideale, il condensatore si carica istantaneamente nella fase sample e mantiene il valore di carica durante tutta la fase hold.

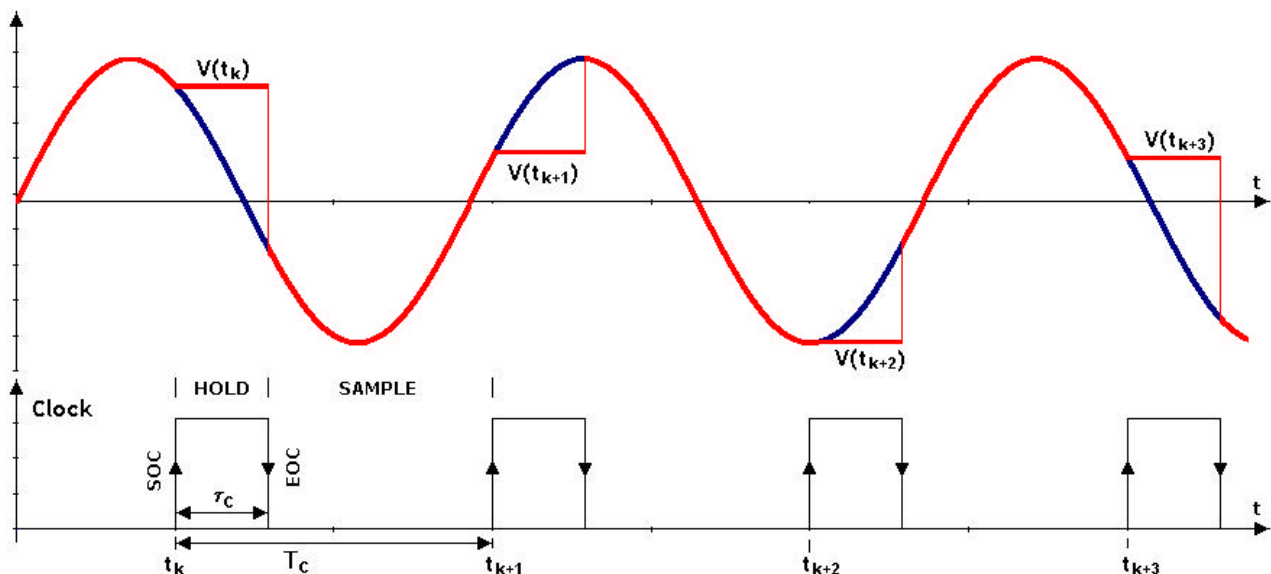


Figura 20

Quando si decide di eseguire un campionamento, si invia il segnale **SOC** (Start Of Conversion) al sistema che si porta nella modalità di funzionamento **hold**. Viene quindi comandata l'apertura dell'interruttore all'istante t_k permettendo al condensatore di rimanere carico al valore di tensione in quell'istante. Il segnale **EOC** (End Of Conversion), invece, comanda la chiusura dell'interruttore portando il sistema a lavorare nel modo **sample**. In questa modalità di funzionamento il condensatore si carica istantaneamente e la tensione ai suoi capi coincide con quella di ingresso.

Non è possibile eseguire una nuova acquisizione finché non si rileva il segnale EOC (End Of Conversion) che segnala la fine della conversione.

Un eventuale segnale di disturbo sovrapposto al segnale di clock potrebbe innescare l'operazione del campionamento in istanti non previsti generando un'erronea registrazione della forma d'onda. Per evitare un simile inconveniente, i moderni sistemi di acquisizione permettono di regolare la sensibilità del circuito di rilevamento del comando SOC e il numero di eventi di trigger che si debbono verificare per arrestare la registrazione. Inoltre, la tecnica del campionamento nelle misurazioni di valore istantaneo, non permette di rigettare o attenuare eventuali disturbi legati al rumore sovrapposto al segnale che si verificano all'istante di campionamento.

Un circuito S/H con tempi di campionamento molto brevi è fortemente utilizzato in quegli strumenti, come i sistemi di acquisizione dati, in cui si desidera che la frequenza di campionamento sia molto elevata al fine di poter esaminare segnali dal contenuto spettrale molto ricco.

Il teorema del campionamento impone una condizione alla frequenza con cui si deve campionare il segnale, e cioè che debba essere verificata la seguente disuguaglianza:

$$f_c > 2f_i$$

dove f_c è la frequenza legata al segnale di clock con la quale viene aperto l'interruttore e f_i è la frequenza del segnale in ingresso.

Nel caso in cui questa relazione tra le frequenze non sia soddisfatta ci si imbatte nel fenomeno dell'*aliasing*, ossia della sovrapposizione in frequenza delle repliche del segnale, centrate a frequenza multipla della frequenza di campionamento, con modifica dello spettro e relativa perdita del suo contributo informativo. Nessun tipo di filtraggio può, in tale situazione, ricostruire il segnale di partenza perché il suo contributo spettrale è stato irrimediabilmente contaminato.

4.3.3.1.2 Il quantizzatore

È un dispositivo che trasforma l'ampiezza di un segnale analogico in un valore numerico (Figura 21). Non tutti i valori numerici in uscita sono possibili. Il quantizzatore, infatti, restituisce un insieme discreto di simboli il cui numero e il cui valore sono definiti da uno dei parametri principali che caratterizza un convertitore A/D. Se il codificatore a valle esegue la trasformazione in binario allora il parametro in esame è il numero di **bit**. Questo parametro è molto importante poiché definisce il numero di cifre che compone il valore numerico in uscita e quindi la risoluzione del convertitore A/D.

La funzione di trasferimento del quantizzatore prende il nome di **caratteristica di quantizzazione** ed è costante a tratti. Essa è descritta dalla seguente relazione:

$$T_k < X_S \leq T_{k+1} \Rightarrow X_Q = Q_k$$

L'operazione di quantizzazione consiste quindi nell'attribuire ad un valore di ampiezza del segnale di ingresso un livello tra quelli disponibili: per esempio, con riferimento alla Figura 21 tutti i valori compresi tra T_1 e T_2 saranno associati al simbolo Q_2 , che in binario potrebbe corrispondere al numero (codice) 010.

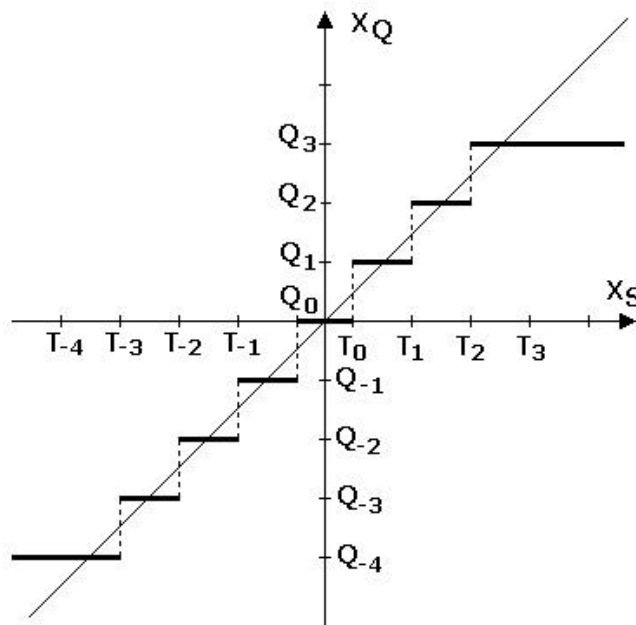


Figura 21 – Caratteristica di quantizzazione bipolare per un convertitore a 3 bit. Presenta 8 livelli di quantizzazione e 7 livelli di soglia. L'asse delle ordinate riporta i valori X_Q di uscita mentre l'asse delle ascisse riporta la tensione di ingresso, solitamente espressa in Volt.

Un convertitore A/D con uscita in binario avente N numero di bit fornisce $B=2^N$ **livelli di quantizzazione**, $B-1$ **livelli di soglia** e risoluzione pari a FS/B , dove FS è il fondo scala del convertitore A/D. Ad esempio, un convertitore A/D ad 8 bit presenta un quantizzatore con $2^8=256$ livelli di quantizzazione e 255 livelli di soglia. La sua risoluzione riferita ad 1 Volt è di $1/256$ V.

4.4 I convertitori A/D: soluzioni circuitali

Il blocco di **conversione A/D** trasforma, dunque, il segnale analogico in ingresso in un segnale numerico. Per eseguire questa trasformazione sono adottate diverse tecniche. La scelta dipende essenzialmente dal numero massimo di bit richiesto per la codifica e dalla massima velocità di conversione. Questi due parametri sono tra loro correlati in quanto, in generale, all'aumentare dell'uno diminuisce l'altro.

I valori digitali forniti dal blocco A/D sono in genere conservati nella **memoria di acquisizione** e resi disponibili per eventuali elaborazioni successive e/o per visualizzare la forma d'onda.

Le prestazioni di accuratezza e di banda di un oscilloscopio digitale dipendono in maniera significativa dal blocco di conversione A/D; questo è caratterizzato, principalmente, dalla risoluzione e dal tempo di conversione. La risoluzione è legata al numero di bit disponibili per rappresentare l'ampiezza del segnale, mentre il tempo di conversione è legata al numero di campioni convertiti al secondo (Sample/second, S/s).

In un usuale oscilloscopio digitale la conversione viene normalmente eseguita con 8 bit ma per particolari esigenze di accuratezza sono disponibili anche strumenti con un numero maggiore di bit.

La frequenza di campionamento massima può assumere valori in un campo molto esteso e parecchi sono gli sforzi fatti dai costruttori per elevare sempre di più il limite superiore di questo parametro. Attualmente, anche gli oscilloscopi più modesti eseguono un campionamento con velocità dell'ordine di alcune decine di MS/s; i più sofisticati strumenti disponibili arrivano invece fino a decine di GS/s.

Vengono presentate adesso tre soluzioni circuitali ampiamente diffuse per la conversione del valore analogico di una grandezza in uno digitale, in cui ogni livello logico è contraddistinto da una opportuna

sequenza di bit che ne codifica il valore, secondo una caratteristica quale, ad esempio, quello di Figura 22. In particolare, la figura fa riferimento ad una caratteristica unipolare di un convertitore A/D con 3 bit di risoluzione.

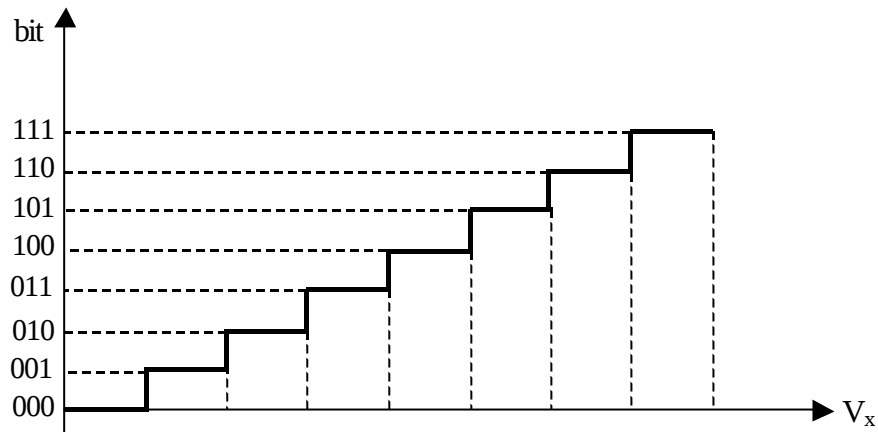


Figura 22

4.4.1 Il convertitore A/D ad approssimazioni successive

Il convertitore A/D ad approssimazioni successive è il convertitore più comune, a basso costo, con una risoluzione tipica di 16 ÷ 18 bit, con velocità di campionamento superiore ad 1MS/s ed ha una buona linearità integrale, ossia la sua caratteristica manifesta una scarsa deviazione, a causa di errori di offset e di guadagno, dalla caratteristica ideale.

Un possibile schema a blocchi funzionale di un convertitore A/D ad approssimazioni successive è riportato in Figura 23. Esso comprende un registro ad approssimazioni successive (SAR), un convertitore D/A (DAC) ad alta velocità per la conversione da digitale ad analogico, e da un comparatore sul circuito di retroazione. A completamento, sono riportati anche il blocco di condizionamento ed un S&H, tipicamente necessario per questo tipo di convertitore.

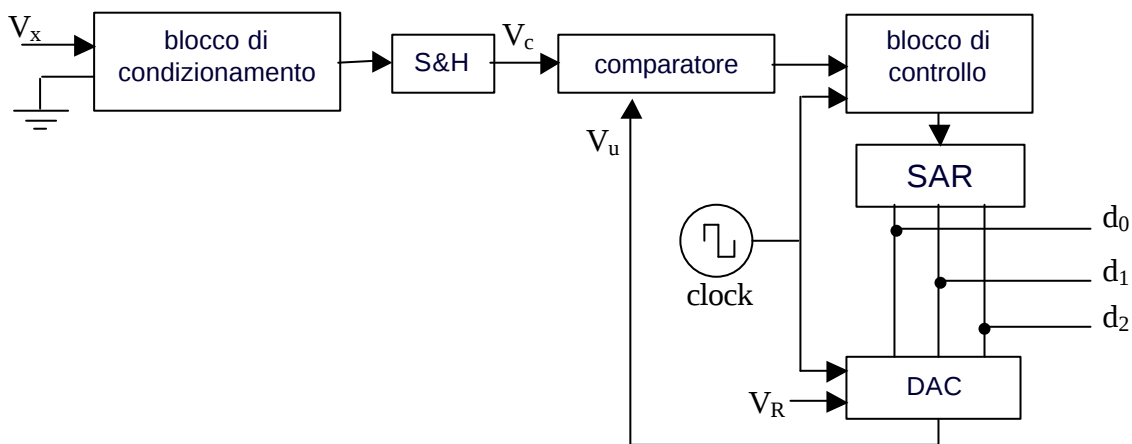


Figura 23

Il principio di funzionamento consiste nel generare n tensioni che sono di volta in volta confrontate con il valore della tensione incognita. Gli n valori sono ottenuti per passi e con risoluzione sempre maggiore. Ciò avviene modificando uno per volta il valore dei bit che costituiscono il numero binario $d_0d_1d_2...d_{n-1}$ fornito dal SAR a partire dal bit più significativo (d_{n-1}). Il metodo, in buona sostanza, esegue una ricerca binaria del valore della grandezza incognita attuata a passi sempre più fini (Figura 24).

L'DAC genera in uscita una tensione pari a:

$$V_u = \left(d_0 2^0 + d_1 2^1 + d_2 2^2 + \dots + d_{n-1} 2^{n-1} \right) \frac{V_R}{2^n} = k\Delta$$

dove V_R è la tensione di riferimento, n è il numero di bit del convertitore, k è il valore codificato in decimale del codice binario in uscita al SAR, di cui d è il generico bit, e Δ è la risoluzione del convertitore. Ebbene, il convertitore ad approssimazioni successive pone inizialmente $d_{h-1}=1$ lasciando gli altri bit a zero e confronta il valore di tensione corrispondente, fornito dal DAC, con la tensione incognita.

Se quest'ultima risulta inferiore, allora al passo successivo sarà $d_{h-1}=0$, $d_{h-2}=1$ con tutti gli altri bit a zero, altrimenti sarà $d_{h-1}=1$, $d_{h-2}=1$ e tutti gli altri bit a zero. L'operazione si ripete n volte, fino a quando è verificato il peso dell'ultimo bit.

La velocità di un convertitore A/D ad approssimazioni successive è limitata dalla velocità del convertitore D/A presente nel ciclo di reazione.

La misura è affetta da un errore di quantizzazione. Questo errore è sempre più piccolo all'aumentare del numero dei bit ed è per questo che versioni tipiche di convertitori ad approssimazioni successive sono caratterizzate da un numero elevato di bit.

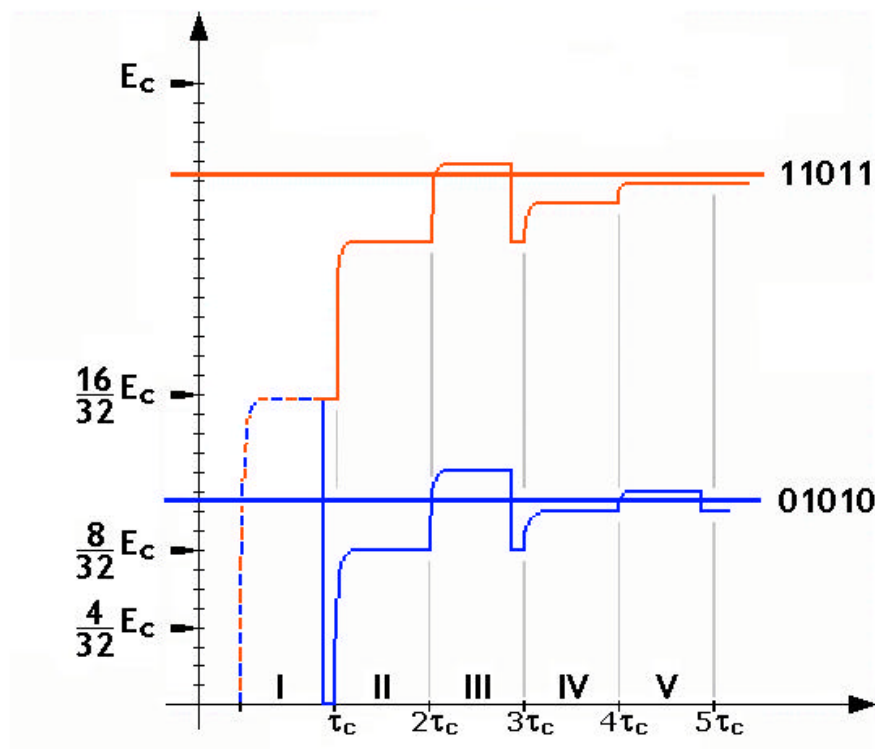


Figura 24 – Principio di funzionamento di un convertitore ad approssimazioni successive a 5 bit con tempo di conversione pari a $n\tau_c$.

Aumentare il numero di bit migliora anche la risoluzione, definita come:

$$Q = \frac{FS}{2^n}$$

dove n è il numero di bit e FS è la tensione di fondo scala. Tuttavia un numero maggiore di bit porta ad aumentare il tempo di conversione poiché occorre intervenire su un numero maggiore di cifre.

4.4.2 Il convertitore flash

I **flash converter** sono una classe di convertitori A/D caratterizzati da una elevata velocità di conversione, tanto da poter essere considerati quasi istantanei. Lo schema di un convertitore Flash è costituito da 2^n resistori uguali, posti in serie tra loro in modo da ripartire la tensione di riferimento in frazioni uguali, e da 2^n-1 comparatori che confrontano la tensione incognita con una opportuna frazione della tensione di riferimento. Le uscite dei comparatori sono poste in ingresso ad una rete logica di codifica che fornisce una opportuna sequenza di bit in uscita.

Si consideri, ad esempio, lo schema di Figura 25 di un flash converter a 3 bit. In questo caso specifico occorrono $2^3=8$ resistori e $2^3-1=7$ comparatori. Questo schema è *unipolare*, cioè possono essere misurate

solo tensioni a segno costante. La tensione di riferimento, inoltre, deve essere dello stesso segno di quella incognita.

Una volta applicata la tensione V_x in ingresso vengono eseguiti 7 confronti in parallelo mediante i comparatori, le cui uscite possono essere alte o basse a seconda del risultato del confronto:

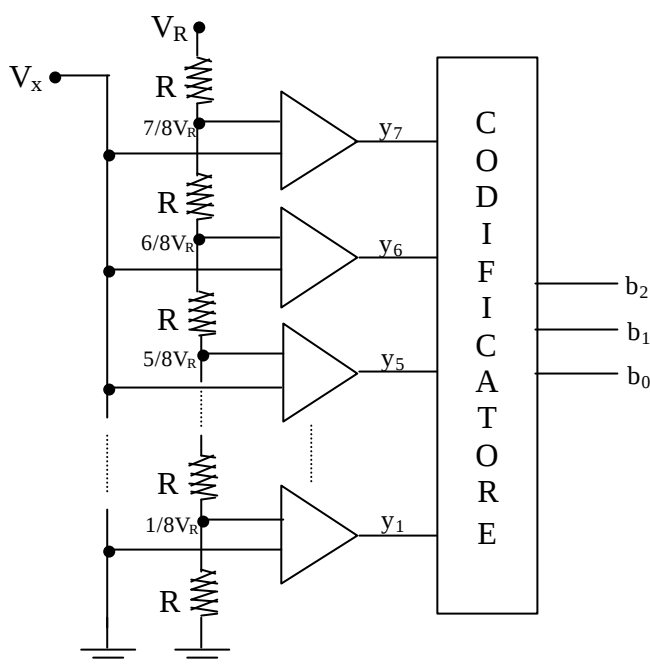


Figura 25

se $0 < V_x < V_R/8$ non commuta nessuno;

se $V_R/8 < V_x < 2V_R/8$ il primo comparatore commuta e fornisce uscita alta;

se $2V_R/8 < V_x < 3V_R/8$ i primi due comparatori commutano e forniscono uscita alta;

in generale, se $jV_R/8 < V_x < (j+1)V_R/8$ i primi j comparatori commutano e forniscono uscita alta.

La rete di codifica, infine, implementa una tabella di verità (Tabella 1) mediante la quale la sequenza dei valori logici in uscita ai comparatori (i primi j forniscono 1, i restanti 2^n-1-j danno 0) viene codificata con una sequenza di 3 bit.

uscite dei comparatori							bit di uscita		
y_7	y_6	y_5	y_4	y_3	y_2	y_1	b_2	b_1	b_0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
0	0	0	0	0	1	1	0	1	0
0	0	0	0	1	1	1	0	1	1
0	0	0	1	1	1	1	1	0	0
0	0	1	1	1	1	1	1	0	1
0	1	1	1	1	1	1	1	1	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabella 1

Con i flash converter si individuano 2^n livelli di tensione ma non è possibile stabilire il valore esatto di V_x : si riscontra un errore di quantizzazione legato al numero di bit usati con uno scostamento massimo atteso di ampiezza $V_R/2^n$. Pertanto occorre operare con un numero significativo di bit in modo da rendere tale errore sufficientemente piccolo per l'applicazione in esame. D'altronde aumentare il numero di bit significa aumentare la complessità le dimensioni e la potenza dissipata dal circuito.

È importante ricordare che ogni errore nella realizzazione di una resistenza del partitore si traduce in uno scostamento di tutti i livelli.

4.4.3 I convertitori multiplexati

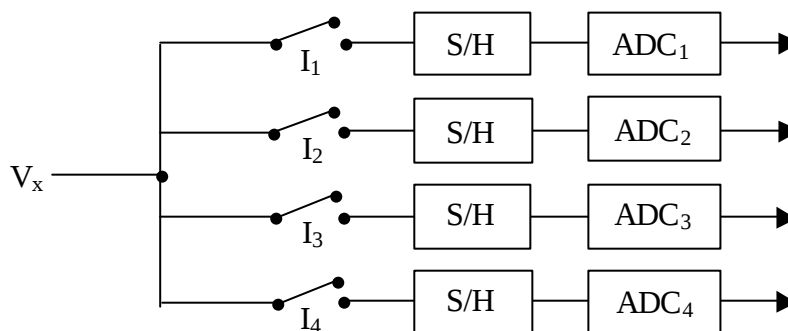
Per realizzare convertitori con un'elevata frequenza di campionamento occorre utilizzare una architettura di tipo parallelo.

In generale, fissato il periodo di conversione, la frequenza di campionamento non si può scegliere alta quanto si vuole perché prima di prelevare il campione successivo occorre aver terminato la conversione del campione precedente. Detto, allora, τ_c il tempo di conversione di un singolo convertitore, se si dispone di N convertitori A/D uguali disposti in parallelo, e se si organizza la conversione in modo tale che mentre uno di essi esegue la conversione il successivo riceve in ingresso un altro campione ed inizia la sua conversione, si può ottenere un convertitore A/D complessivo con un periodo di campionamento pari a τ_c/N .

I convertitori così realizzati prendono il nome di **convertitori multiplexati**, a divisione di tempo, nel senso che solo uno degli N convertitori è connesso in ogni istante all'ingresso.

Si consideri lo schema di Figura 26 realizzato con 4 convertitori caratterizzati dall'avere lo stesso tempo di conversione τ_c .

Inizialmente viene chiuso I_1 mentre gli altri interruptori restano aperti; il circuito S/H campiona e mantiene costante il valore del segnale V_x durante la conversione operata da ADC₁. Dopo un intervallo di tempo di durata $\tau_c/4$ viene chiuso I_2 mentre gli altri interruptori sono aperti. Il relativo blocco S/H campiona e memorizza cosicché parte la conversione di un secondo campione mediante ADC₂. Dopo un intervallo $2 \tau_c/4$ dall'istante iniziale, mentre ADC₁ e ADC₂ sono in conversione, viene chiuso I_3 e gli altri interruptori sono aperti. Avvenuto un nuovo campionamento di V_x parte la conversione ad opera di ADC₃. Durante la conversione dei primi tre convertitori, che avviene con I_1 , I_2 e I_3 aperti, dopo $3 \tau_c/4$ dall'istante iniziale si chiude I_4 ed ha luogo un nuovo campionamento della V_x . Il campione viene quindi convertito da ADC₄. Dopo un tempo pari a τ_c , ADC₁ ha terminato la sua conversione e si riprende il ciclo.



- Figura 26 -

In questo modo si riesce ad ottenere un campionamento a frequenza pari ad un quadruplo di quella del singolo convertitore, cioè il convertitore complessivo presenta un periodo di campionamento pari a $1/4$ del tempo di conversione del singolo convertitore.

4.5 La memoria di acquisizione

In un oscilloscopio numerico, il convertitore A/D esegue continuamente la conversione della grandezza analogica in ingresso in un segnale digitale, con frequenza imposta dal segnale di clock. In assenza del segnale di trigger i campioni così acquisiti sono trasferiti anch'essi continuamente nella memoria di acquisizione. Poiché il periodo di campionamento è costante ed è noto, è possibile risalire al legame temporale tra i campioni memorizzati a partire dalla posizione che occupano nella memoria di acquisizione.

Da un punto di vista logico è possibile immaginare la memoria di acquisizione come costituita da un buffer circolare di capacità N (Figura 27). Pertanto, una volta riempita la memoria con N campioni, il nuovo campione acquisito, I_{N+1}^{mo} , viene memorizzato nella posizione occupata dal primo, che viene così perso. Analoga sorte accade ai campioni successivi. In altre parole, alla fine di ogni ciclo, nella memoria sono sempre conservati gli ultimi N campioni acquisiti. Il trasferimento si interrompe quando si verificano le condizioni imposte sull'evento di trigger.

Il segnale di trigger può influire sul funzionamento della memorizzazione con modalità che possono essere scelte dall'operatore in base all'indagine che si desidera effettuare. Per illustrare alcune di queste modalità si supponga che all'ingresso di un oscilloscopio sia applicato un segnale analogico avente l'andamento temporale illustrato in Figura 28 dove sono indicati anche il livello e la pendenza scelti per ottenere l'evento di trigger. Mentre il sistema acquisisce i campioni trasferendoli nella memoria di acquisizione, ad un certo istante T_0 si verificherà un evento di trigger. Intanto nella memoria sono già conservati gli ultimi N campioni acquisiti in precedenza.

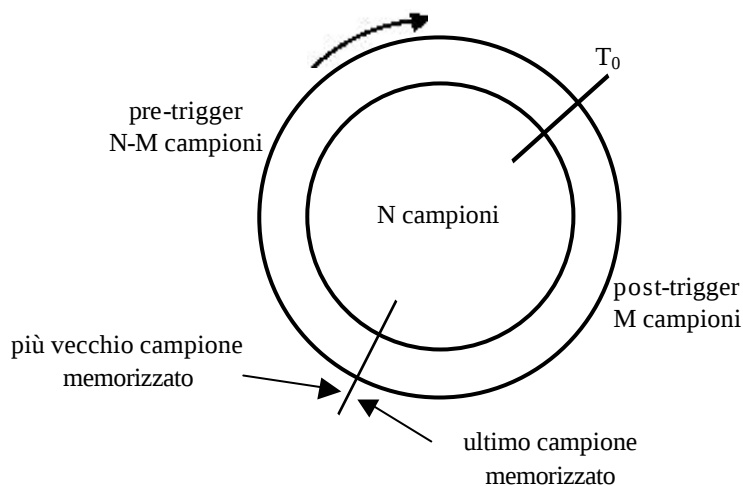


Figura 27

Se lo strumento è stato predisposto per visualizzare M campioni di post-trigger, allora la memorizzazione si arresterà dopo M campioni dall'istante T_0 . Poiché il blocco di conversione rimane continuamente in funzione, i campioni successivi all' M^{mo} andranno quindi persi poiché non saranno trasferiti nella memoria di acquisizione. All'arresto della memorizzazione in memoria sono pertanto conservati N campioni allocati temporalmente rispetto all'istante di trigger in base al valore del parametro M con cui lo strumento è stato predisposto.

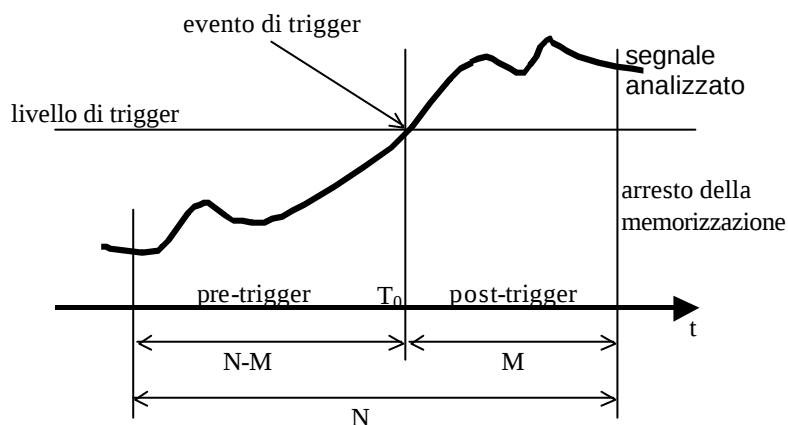


Figura 28

In Figura 28 è illustrato il caso in cui il valore di M è compreso fra 0 e N . Quando la memorizzazione viene arrestata in memoria sono quindi conservati M campioni acquisiti dopo l'evento di trigger e $N-M$ campioni acquisiti prima. Possono cioè essere analizzate anche porzioni di segnale precedenti all'evento di trigger; è questa una prestazione molto interessante, non disponibile in un usuale oscilloscopio analogico. Da un punto di vista applicativo questa prestazione può essere molto utile, e in qualche caso addirittura indispensabile, come ad esempio quando interessa analizzare la causa di un guasto. Utilizzando la condizione di guasto stessa per generare l'impulso di trigger, si riesce a memorizzare, e quindi visualizzare, anche l'andamento del segnale prima del guasto, facilitando in tal modo l'individuazione della causa che lo ha generato. La durata temporale della porzione di segnale conservata in memoria rispetto all'evento di trigger dipende dalla frequenza di campionamento adottata, dalla capacità complessiva della memoria e dal valore del parametro M scelto con opportune modalità dall'operatore.

Se $M=0$, l'evento di trigger blocca la memorizzazione e gli N campioni presenti in memoria sono tutti relativi a una porzione di segnale che precede il trigger.

Se invece $M=N$ tutti gli N campioni memorizzati sono successivi all'evento di trigger; concettualmente è come se tale evento abilitasse la conservazione dei campioni in memoria.

Con riferimento all'evento di trigger si può affermare che nel primo caso in memoria sono conservati solo campioni appartenenti al passato, mentre nel secondo caso i campioni appartengono al futuro.

Nella situazione illustrata in Figura 28 appartiene al passato la porzione costituita da $N-M$ campioni, mentre la restante porzione formata da M campioni appartiene al futuro: in letteratura queste due porzioni vengono dette rispettivamente di **pre-trigger** e di **post-trigger**.

Nei primi oscilloscopi digitali, e in quelli attuali con modeste prestazioni, la dimensione della porzione di post-trigger può essere 0, $N/2$ o N ; le corrispondenti predisposizioni dello strumento sono denominate rispettivamente STOP, CENTER, START, o simili, come mostrato in Figura 29.

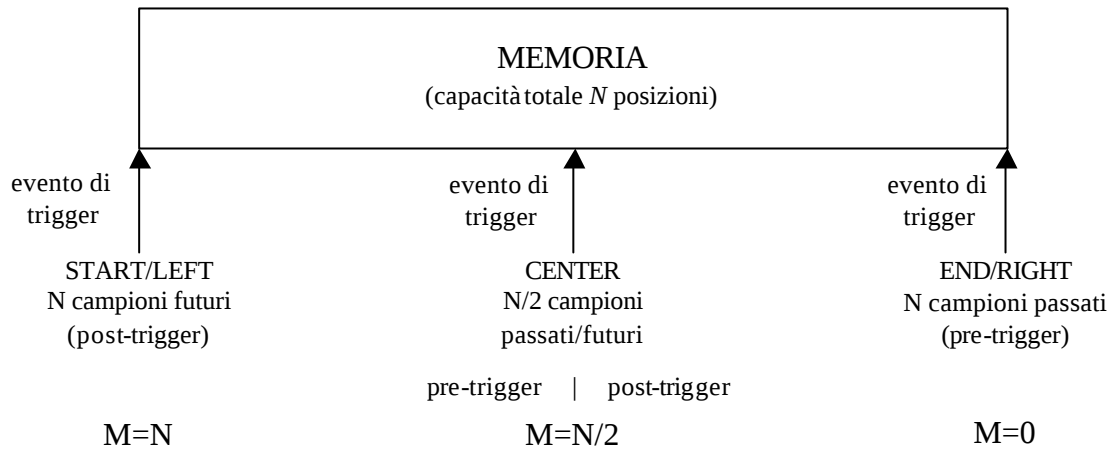


Figura 29

Negli oscilloscopi più recenti si può assumere un numero elevato di valori interi, aumentando così la possibilità di scelta. Generalmente M può assumere un qualsiasi valore intero compreso tra 0 e un massimo anche maggiore di N ; in qualche caso, invece, la minima variazione possibile di M è maggiore di uno.

Ovviamente, poiché l'arresto della memorizzazione non può avvenire prima del verificarsi dell'evento di trigger non ha significato considerare valori negativi di M . È invece possibile fissare $M > N$; in questo caso viene fissato il ritardo che deve intercorrere tra l'evento di trigger e la porzione di segnale che si desidera analizzare. Questo ritardo può assumere anche valori piuttosto elevati.

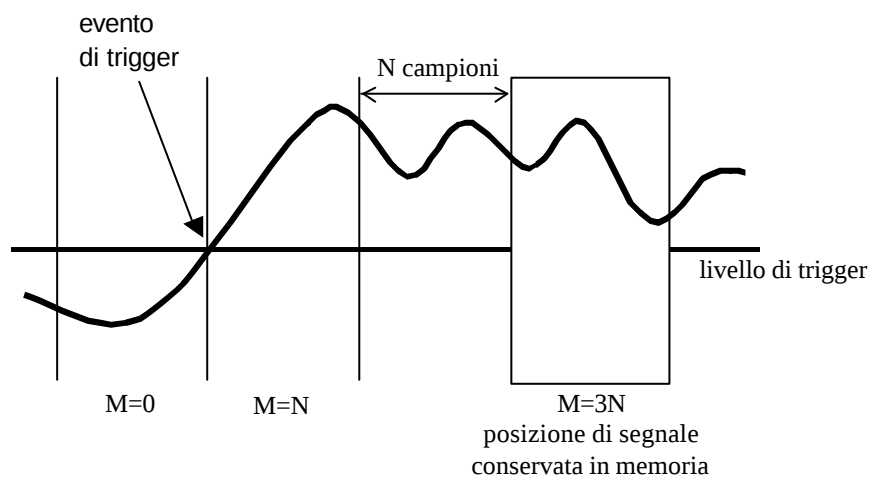


Figura 30

In Figura 30 è schematizzato il caso con $M=3N$: in memoria sono conservati N campioni relativi a una porzione di segnale che inizia dopo aver acquisito $2N$ campioni successivi all'evento di trigger.

4.6 La visualizzazione

Per ricavare le informazioni di interesse i campioni depositati nella memoria di acquisizione devono essere opportunamente manipolati. Normalmente tali campioni sono utilizzati per ricostruire la forma d'onda di una porzione di interesse del segnale d'ingresso; in tal caso l'insieme delle attività richieste viene svolta nel blocco di visualizzazione. Come già ricordato, questo blocco può far parte di uno strumento autonomo oppure costituire una risorsa comune inserita in un più complesso sistema elettronico e utilizzabile per tutte

le esigenze di presentazione dei risultati ottenuti. Nel seguito si farà per semplicità riferimento al primo caso in quanto più diffuso. In un oscilloscopio digitale la visualizzazione viene di solito realizzata utilizzando tubo a raggi catodici il cui funzionamento può essere di tipo vettoriale oppure **raster**; la tendenza all'impiego è sempre più rivolta verso i tubi raster.

L'esempio più semplice di tubo vettoriale è costituito dal tubo a raggi catodici, presente in un normale oscilloscopio analogico; in esso la posizione del fascio elettronico è determinata dalle tensioni applicate alle due coppie di placche di deflessione. L'impiego di questo tipo di tubi richiede ovviamente l'uso di due convertitori digitali-analogici per convertire i valori digitali, che esprimono l'ampiezza e il ritardo associati a ogni campione da visualizzare, in tensioni analogiche.

La presenza della memoria di acquisizione rende relativamente indipendenti le prestazioni in frequenza dai blocchi posti a monte e a valle di essa. Non è quindi necessario che il tubo vettoriale presenti una banda passante molto ampia.

Il funzionamento di un tubo raster è molto simile a quello di un tubo televisivo. Lo schermo viene considerato come una matrice composta da NxM aree elementari, dette **pixel**, ognuna delle quali emette luce quando viene eccitata dal fascio elettronico. Nel caso più semplice, il fascio elettronico scandisce con continuità tutti i pixel dello schermo, come mostrato in Figura 31; ogni pixel viene eccitato o meno a seconda dell'intensità assunta dal fascio durante la scansione.

La visualizzazione di una traccia, oppure di un carattere alfanumerico, richiede l'eccitazione di un opportuno insieme di pixel. Si tratta quindi di modulare l'intensità del fascio in modo che durante la scansione, che avviene in modo indipendente dalla traccia da visualizzare, siano eccitati solo i pixel desiderati.

Lo schermo di un tubo raster è normalmente costituito da qualche centinaio di righe e di colonne. Il tubo di un oscilloscopio di prestazioni normali può presentare ad esempio 368 righe e 576 colonne. Per ottenere un'immagine di migliore qualità strumenti di prestazioni elevate sono invece dotati di schermi di maggiore risoluzione; ad esempio, lo schermo di un oscilloscopio di un certo pregio è formato da 810 righe e 696 colonne.

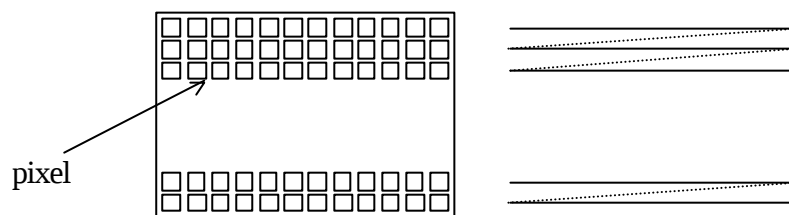


Figura 31

Non tutto lo schermo viene utilizzato per la visualizzazione delle tracce; in genere due porzioni laterali, una verticale e una orizzontale sono infatti utilizzate per fornire informazioni alfanumeriche.

L'aggiornamento della traccia sullo schermo avviene con una frequenza di solito compresa fra 50 e 70 Hz. La gestione del pennello elettronico (sincronismo di riga, di quadro, ...) è ottenuta mediante circuiti integrati molto simili a quelli utilizzati in un normale tubo televisivo; essi rappresentano una parte del circuito necessario al funzionamento del tubo stesso.

La qualità della traccia visualizzata in un tubo raster è inferiore a quella ottenibile con un tubo vettoriale di un oscilloscopio analogico; la risoluzione fornita da entrambe le soluzioni è invece paragonabile, nonostante il numero limitato di livelli rappresentabili in un tubo raster. Si deve infatti tener presente che la risoluzione ottenibile in un oscilloscopio analogico dipende dalla capacità dell'occhio umano di discriminare due diverse posizioni del pennello elettronico sullo schermo; supponendo di poter discriminare due posizioni che differiscono fra loro di 0,3-0,5 mm, un oscilloscopio analogico dotato di uno schermo di 100 mm permette pertanto di individuare 200-300 posizioni diverse. Un tubo raster con 256 righe presenta quindi una risoluzione paragonabile a quella di un oscilloscopio analogico. Aumentando il numero di righe del tubo raster è possibile ottenere una risoluzione superiore.

Si deve però notare che sullo schermo viene spesso presentata solo una parte dell'informazione disponibile nella memoria dello strumento, soprattutto per quello che riguarda l'asse temporale. Un opportuno uso dei cursori e l'impiego di successive espansioni della scala orizzontale permette di raggiungere risoluzioni temporali molto elevate, normalmente superiori a quelle disponibili in un oscilloscopio analogico.

5 Gli oscilloscopi a memoria digitale

Un oscilloscopio numerico convenzionale, noto come oscilloscopio a memoria digitale (DSO), è dotato di un display raster anziché dei fosfori luminosi.

I DSO permettono di acquisire e visualizzare anche eventi che si presentano solo una volta, ossia i transitori. Poiché le informazioni sulla forma d'onda esistono in forma digitale, sotto forma di serie di valori binari memorizzati, esse possono essere analizzate, archiviate, stampate o elaborate dall'oscilloscopio stesso o da un computer esterno. La forma d'onda è visualizzabile anche quando il segnale di ingresso non è più presente. A differenza degli oscilloscopi analogici, gli oscilloscopi a memoria digitale offrono la memorizzazione permanente del segnale e un'elaborazione estesa della forma d'onda. Tuttavia, i DSO in genere non hanno uno schermo a gradazioni di intensità in tempo reale, cosicché non possono rappresentare vari livelli di intensità nel segnale mentre esso è presente.

Alcuni dei sottoinsiemi di cui sono composti i DSO sono simili a quelli degli oscilloscopi analogici. Tuttavia i DSO contengono sottoinsiemi aggiuntivi per l'elaborazione dei dati, adoperati per raccogliere e visualizzare i dati relativi all'intera forma d'onda. Un DSO si basa su un'architettura di elaborazione seriale (Figura 32) per acquisire e visualizzare i segnali.



Figura 32

5.1 Architettura di elaborazione seriale

Come nell'oscilloscopio analogico, il primo stadio di un DSO è un amplificatore verticale dove appositi comandi permettono di regolarne il guadagno.

Successivamente, un convertitore analogico-digitale (A/D) determina il valore dell'ampiezza del segnale in vari istanti (tecnica del campionamento) e li trasforma in valori digitali, detti campioni.

Questo processo si chiama digitalizzazione del segnale. Un apposito clock determina la frequenza con la quale il convertitore A/D segue il campionamento: tale frequenza è detta frequenza di campionamento e viene espressa in campioni al secondo (S/s).

I campioni generati dal convertitore A/D vengono registrati nella memoria di acquisizione come punti rappresentativi della forma d'onda; un singolo punto può essere composto da più campioni. La serie di tutti i punti rappresentativi della forma d'onda costituisce una "registrazione" e il loro numero è detto lunghezza di registrazione; gli istanti iniziale e finale della registrazione sono determinati dal sistema trigger.

Il DSO include un microprocessore che, oltre ad eseguire altre operazioni, gestisce anche i comandi presenti sul pannello frontale dello strumento. Il segnale passa poi attraverso la memoria di visualizzazione e viene quindi visualizzato.

A seconda delle specifiche funzioni di un oscilloscopio, è possibile che i campioni siano sottoposti a ulteriori elaborazioni per migliorare la qualità della traccia. Può essere disponibile anche un sistema di pretrigger che permette di osservare eventi precedenti l'istante di trigger. La maggior parte degli odierni oscilloscopi digitali offre anche una scelta di misure parametriche automatiche che semplificano le procedure di misura.

I DSO sono ideali durante la progettazione di dispositivi multicanale, ad alta frequenza, che funzionano con segnali a evento singolo o basse frequenze di ripetizione. Nel corso della progettazione di un dispositivo digitale, in genere un tecnico deve esaminare quattro o più segnali simultaneamente e il DSO si rivela uno strumento essenziale.

5.2 Struttura generale di un oscilloscopio a memoria digitale

Quando l'andamento temporale è ottenuto a partire da un numero finito di campioni memorizzati all'interno dello strumento, si parla più precisamente di **oscilloscopi a memoria digitale (DSO)**. Lo strumento può memorizzare e quindi visualizzare solo porzioni di durata limitata di segnale giacché la capacità di memoria disponibile, per quanto grande, è comunque limitata. La scelta della porzione da memorizzare viene eseguita sulla base di un opportuno segnale di trigger.

Alcuni strumenti digitali sono costituiti solo dai tre blocchi funzionali rappresentati in figura 1 e sono spesso denominati **transient digitizer** o **waveform recorder**. Questa tipologia di strumenti hanno caratteristiche con prestazioni ottimizzate per l'acquisizione, in particolare di segnali transitori, i primi, e segnali ripetitivi, i secondi, con capacità di elaborazione e visualizzazione modeste o assenti.

L'oscilloscopio digitale contiene anche una CPU con capacità di elaborazione più o meno sofisticata e un blocco di visualizzazione. Si ha cioè una struttura completamente autonoma, che presenta tutti i blocchi funzionali necessari per analizzare l'andamento temporale di un segnale (Figura 33).

La memoria di acquisizione può essere considerata come un elemento di separazione fra due diverse architetture. A monte di tale blocco si ha una architettura di tipo serie, e precisamente due blocchi funzionali fra loro in cascata; a valle della memoria di acquisizione viene invece adottata una architettura di tipo parallelo, o a bus, la cui gestione è affidata a un'unità centrale o microprocessore.

Nella struttura parallelo i legami fra le prestazioni dei blocchi presenti non sono così rigidi come nell'architettura di tipo serie. Ne consegue, ad esempio, che non esiste un legame diretto tra la banda passante del blocco di condizionamento e quella del blocco utilizzato per la visualizzazione; ciò consente l'impiego di dispositivi di visualizzazione con prestazioni relativamente modeste, senza alcun degrado nelle prestazioni di banda dello strumento, con una conseguente riduzione del costo dell'apparecchiatura.

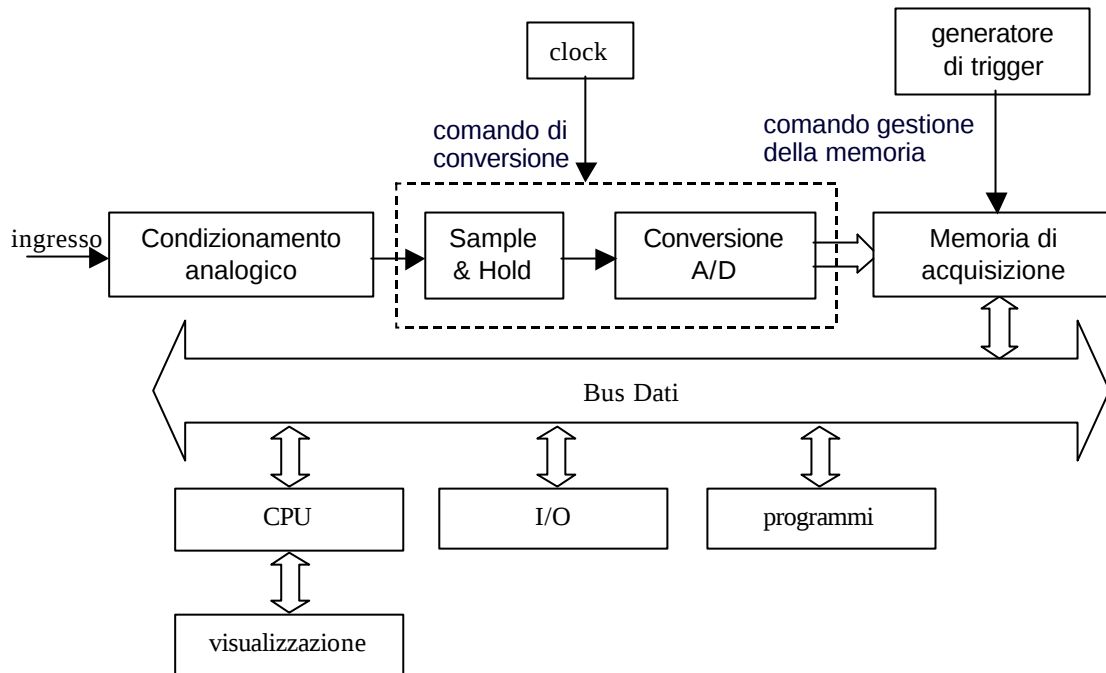


Figura 33

Il blocco di memoria, oltre a rendere relativamente indipendenti le prestazioni dei due tipi di architetture in cui lo strumento può essere suddiviso, permette anche di ottenere altre interessanti prestazioni, non ottenibili con una struttura analogica.

Con strutture digitali e con algoritmi elaborativi si possono ottenere delle prestazioni non raggiungibili con una classica struttura analogica, ma il raggiungimento di queste prestazioni richiede che siano soddisfatte determinate condizioni; in caso contrario i risultati ottenuti possono essere del tutto privi di significato. Il fatto più grave di questa situazione è che in genere non si ha alcuna indicazione esplicita che garantisca che le condizioni poste siano soddisfatte. Ad esempio, si supponga che il corretto funzionamento di uno strumento richieda che il segnale di ingresso sia stazionario; nel caso analogico, se tale condizione non è soddisfatta, il risultato fornito presenta in genere qualche anomalia, come ad esempio una fluttuazione della forma d'onda visualizzata che fa sorgere qualche dubbio sulla validità del risultato stesso. In un oscilloscopio digitale, invece, la mancata condizione può portare a un risultato completamente errato, ma quello che è peggio, spesso non viene fornita alcuna indicazione che permetta di mettere in dubbio la significatività del risultato.

Poiché generalmente lo strumento non è in grado di verificare se le condizioni richieste per un corretto funzionamento sono soddisfatte, la garanzia della correttezza del risultato fornito è di esclusiva competenza dell'operatore. Pertanto, anche se uno strumento digitale permette di ottenere prestazioni notevolmente superiori a quelle offerte dal corrispondente strumento analogico, per evitare errori grossolani è richiesta una profonda conoscenza delle sue modalità di funzionamento e di utilizzazione.

Nello schema a blocchi di Figura 33 non va trascurata l'importanza del blocco di I/O, ormai sempre presente in un qualsiasi strumento numerico. Mediante tale blocco è infatti possibile un collegamento con altri dispositivi, o con un host computer. Il caso più tipico di utilizzazione del blocco di I/O si ha nel trasferimento a un host computer delle informazioni acquisite ed elaborate dallo strumento.

Altrettanto interessante è, inoltre, la possibilità di inviare allo strumento, mediante il blocco di I/O, opportuni comandi di predisposizione utilizzando un computer. Lo strumento può, cioè, essere considerato un componente di un più complesso sistema di misurazione, il cui scopo è quello di acquisire e gestire delle informazioni in modo automatico, ad esempio per un collaudo di un prodotto finito, oppure per la verifica del corretto funzionamento di un processo di produzione.

Il blocco di I/O consente, inoltre, il collegamento dello strumento con una normale stampante; si può così ottenere una stampa su carta della traccia visualizzata sullo schermo. Con i primi oscilloscopi, ciò avveniva solo utilizzando registratori a carta, i quali presentano notevoli limiti soprattutto in termini di banda, oppure apparecchiature fotografiche, il cui uso non è però molto agevole.

In ogni oscilloscopio digitale, il blocco di conversione A/D riveste un ruolo di primaria importanza e parecchi sono gli sforzi fatti dai costruttori per incrementare le sue prestazioni, soprattutto nei riguardi della frequenza di campionamento. Questo blocco esegue due distinte attività: il campionamento del segnale analogico di ingresso e la quantizzazione dei campioni ottenuti; questa seconda attività è necessaria per rappresentare su un registro di memoria il valore numerico del campione acquisito con un numero finito di bit.

Come schematizzato in Figura 33, il comando per il blocco di conversione viene fornito da un segnale periodico, denominato clock, la cui frequenza può essere anche molto elevata, dell'ordine di parecchie centinaia di MHz, o addirittura, nei più recenti modelli di strumenti, di decine di GHz.

I valori numerici così ottenuti vengono normalmente depositati nella memoria di acquisizione, la cui gestione generale è basata su un comando dipendente dalle modalità di funzionamento complessivo e usualmente ricavato dal segnale di ingresso. Nella situazione più semplice, questo comando, che prende il nome generico di **trigger**, può essere ottenuto dai segnali di ingresso con la stesse modalità utilizzate in un oscilloscopio analogico. Si può cioè fissare un livello e una pendenza; ogni volta che il segnale di ingresso assume il dato livello con la data pendenza, viene generato un impulso di trigger, che influenza il funzionamento del blocco di memorizzazione.

6 Il campionamento

È il processo che converte una parte del segnale d'ingresso in un certo numero di valori elettrici discreti ai fini della memorizzazione, elaborazione e/o visualizzazione. L'ampiezza di ciascun campione è uguale a quella del segnale d'ingresso nell'istante in cui esso viene campionato (Figura 34). Campionare equivale a scattare istantanee, ognuna delle quali corrisponde ad un punto specifico della forma d'onda. Queste istantanee sono disposte nell'ordine giusto in funzione del tempo in modo da ricostruire il segnale d'ingresso. Gli oscilloscopi digitali ricostruiscono sullo schermo il segnale a partire dalla serie di campioni memorizzati, rappresentando l'ampiezza lungo l'asse delle ordinate e il tempo lungo l'asse delle ascisse. Il segnale d'ingresso è visualizzato come una serie di punti. Se questi sono a grande distanza tra di loro ed è difficile interpretarli come una forma d'onda, è possibile unirli con linee, o vettori, mediante un procedimento matematico detto di interpolazione. Sono disponibili vari metodi di interpolazione, utilizzabili per produrre una rappresentazione precisa di un segnale d'ingresso continuo.

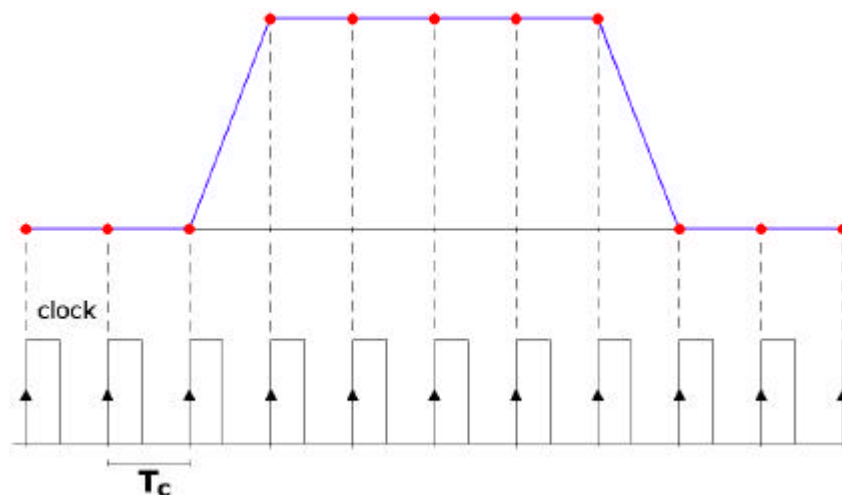


Figura 34

6.1 Metodi di campionamento

Alcuni oscilloscopi digitali permettono di scegliere, con appositi comandi di acquisizione del segnale, il metodo di campionamento. Sebbene esistano vari modi di realizzare la tecnologia di campionamento, per i moderni oscilloscopi digitali si utilizzano due metodi basilari: il campionamento in tempo reale e in tempo equivalente. Si noti che questa scelta non influisce sulle impostazioni della base dei tempi corrispondenti alle basse velocità di scansione, ha effetto solo quando il convertitore A/D non può campionare il segnale a

frequenza sufficientemente alta per completare la registrazione con i punti della forma d'onda in una sola passata.

Il campionamento in tempo equivalente può essere suddiviso ulteriormente in due categorie: casuale e sequenziale. Ciascun metodo presenta i suoi vantaggi a seconda del tipo di misure da eseguire.

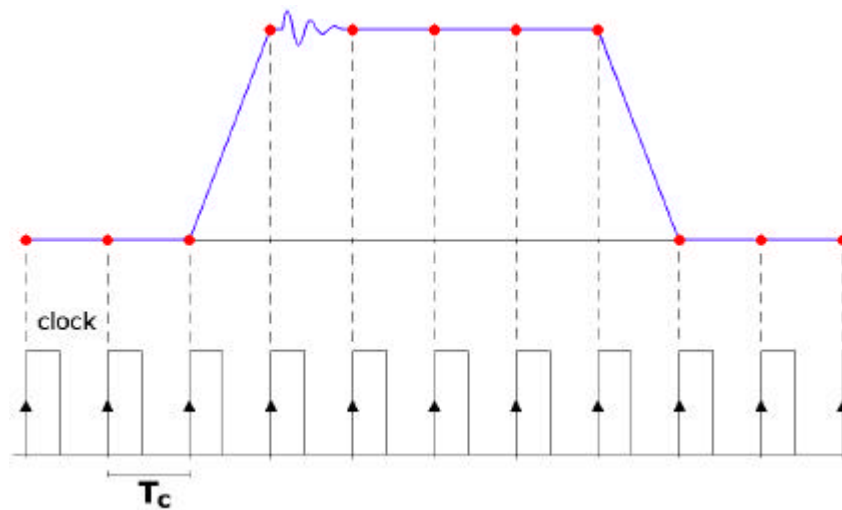


Figura 35 – Per catturare l'evento singolo sovrapposto al segnale è necessario acquisire ad una frequenza di campionamento superiore a $1/T_c$.

6.2 Il campionamento in tempo reale

La conversione A/D può essere organizzata con diverse modalità la scelta della modalità più adeguata a una data applicazione dipende dal tipo di segnale di ingresso e dal tipo di analisi che si desidera eseguire. Il modo più semplice e intuitivo per organizzare l'attività di conversione prende il nome di **one-shot**, oppure **single-shot** o **in tempo reale** ed è il metodo standard di campionamento in un oscilloscopio digitale. Il campionamento in tempo reale è il metodo ideale per analizzare quei segnali la cui gamma di frequenze è inferiore alla metà della massima frequenza di campionamento dell'oscilloscopio. In questo caso, l'oscilloscopio è in grado di acquisire in una sola scansione un numero di punti maggiore rispetto a quelli strettamente necessari per ricostruire in modo accurato la forma d'onda del segnale di ingresso.

Il campionamento in tempo reale è il solo modo disponibile per acquisire con un oscilloscopio digitale segnali transitori veloci, non ripetitivi o a evento singolo. Il campionamento in tempo reale presenta per gli oscilloscopi digitali i problemi maggiori, a causa della frequenza di campionamento necessaria per catturare con precisione gli eventi transitori ad alta frequenza, come illustrato in Figura 35. Questi eventi si presentano una sola volta e devono essere campionati simultaneamente alla loro comparsa. Se la frequenza di campionamento non è sufficientemente alta allora le componenti ad alta frequenza del segnale possono visualizzarsi a frequenze più basse; questo fenomeno si chiama **aliasing**, anche noto come fenomeno della sovrapposizione delle code dello spettro. Il campionamento in tempo reale è ulteriormente complicato dalla necessità di usare memorie ad alta velocità per memorizzare la forma d'onda una volta che sia stata acquisita e rappresentata in binario.

Utilizzando come comando per il blocco A/D un segnale di clock periodico di frequenza f_c , si procede al campionamento del segnale di ingresso, depositando in sequenza nella memoria di acquisizione, che per semplicità immaginiamo di tipo circolare, i campioni numerici ottenuti.

L'evento di trigger influisce sull'attività di memorizzazione con modalità diverse, che possono essere scelte dall'operatore. In ogni caso, quando la memorizzazione viene arrestata, in memoria sono conservati N campioni ottenuti in sequenza dal campionamento di una porzione del segnale di ingresso di durata pari a $NT_c = N/f_c$, localizzata temporalmente in una posizione dipendente dalla modalità di funzionamento scelta per il blocco di trigger. Le frequenze di campionamento f_c ottenibili con gli attuali convertitori A/D rendono particolarmente complessa la realizzazione non solo del blocco di conversione, ma anche di quello di memorizzazione. Si deve infatti tenere presente che, ad esempio, con una frequenza di campionamento di 1GS/s si ha a disposizione, sia per la conversione sia per la memorizzazione di ogni dato, un solo nanosecondo. Le soluzioni circuitali adottate dalle case costruttrici nella realizzazione di questi blocchi sono raramente rese note, e, quando ciò si verifica, vengono fornite solo indicazioni di massima.

In genere, per raggiungere velocità così elevate vengono adottate architetture di tipo parallelo: questa soluzione, pur permettendo di aumentare le prestazioni, richiede strutture particolarmente complesse, e quindi costose.

Ad esempio, ponendo in parallelo 4 convertitori funzionanti a 250MS/s, è possibile convertire il segnale con una frequenza di campionamento equivalente di 1GS/s. Ovviamente, per una corretta gestione dei 4 convertitori in parallelo, deve essere prevista una adeguata struttura di temporizzazione.

6.3 Il campionamento in tempo reale con interpolazione.

Gli oscilloscopi digitali acquisiscono campioni discreti del segnale e li visualizzano sullo schermo. Può essere difficile, tuttavia, rappresentare la forma d'onda di un segnale quando sono disponibili solo pochi punti, soprattutto per rappresentare le variazioni veloci del segnale dovute alle sue componenti ad alta frequenza. Per visualizzare una forma d'onda che sia una buona rappresentazione del segnale sotto misura, la maggior parte degli oscilloscopi numerici rende disponibile diverse modalità di interpolazione.

Mediante l'interpolazione, ad esempio, l'oscilloscopio unisce i punti campione con linee in modo che un segnale campionato con pochi punti per ciascun ciclo possa essere visualizzato con una apprezzabile precisione. Quando si utilizza il campionamento in tempo reale con interpolazione, l'oscilloscopio acquisisce solo alcuni campioni del segnale in una singola scansione e completa gli spazi vuoti con altri punti costruiti grazie all'interpolazione. Quest'ultima è quindi una tecnica di elaborazione che serve ad approssimare l'andamento della forma d'onda in base ad alcuni punti.

L'interpolazione lineare unisce i campioni con linee rette. Questo approccio è limitato alla ricostruzione di segnali con particolari caratteristiche (Figura 34), come ad esempio le onde quadre. Un secondo tipo che fornisce una maggiore versatilità è l'interpolazione $\sin(x)/x$, o **sinusoidale**, che permette di collegare i punti campione con degli archi di curva.

L'interpolazione $\sin(x)/x$ è un procedimento matematico di calcolo di punti allo scopo di riempire gli intervalli tra i campioni effettivi. Questo metodo di interpolazione è adatto ai segnali con andamenti curvilinei e irregolari, molto più comuni delle onde quadre e degli impulsi nelle applicazioni. Ne consegue che l'interpolazione $\sin(x)/x$ è il metodo preferito nei casi in cui la frequenza di campionamento è da 3 a 5 volte superiore alla larghezza di banda del sistema. Questo metodo permette di visualizzare segnali con grande accuratezza anche disponendo di un limitato numero di punti di campionamento.

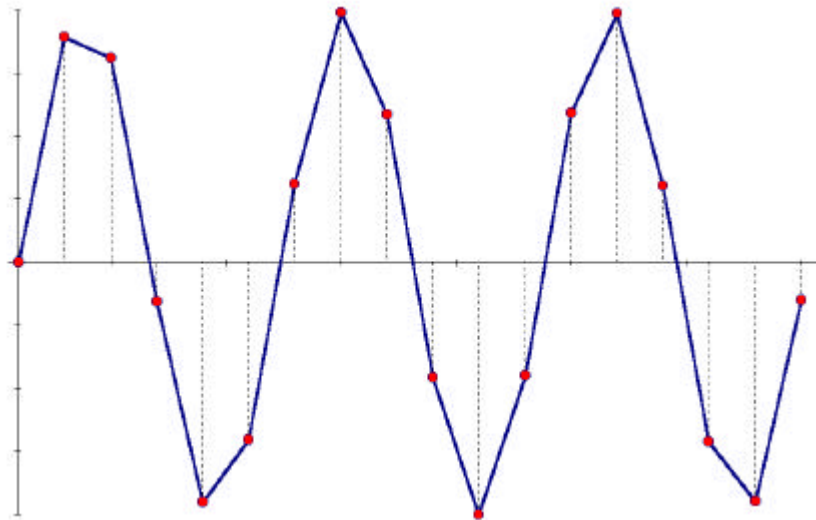


Figura 36 – Sinusoide campionata con pochi punti per periodo senza utilizzare alcuna tecnica di interpolazione. Unendo i punti non è possibile riconoscere una sinusoide. Con la tecnica di interpolazione, inserendo solo 5 punti per ogni campione è possibile ricostruire un segnale come quello di Figura 16.

6.4 Il campionamento in tempo equivalente

L'uguaglianza delle diverse porzioni di un segnale ripetitivo può essere sfruttata per ricostruire l'andamento temporale delle porzioni utilizzando i campioni prelevati in ripetizioni successive. La scelta di eseguire un campionamento in tempo equivalente ha senso se, per un dato segnale, la massima frequenza di campionamento non verifica il criterio di Nyquist e se la banda passante dell'oscilloscopio è non inferiore alla

massima frequenza contenuta dal segnale, in modo da non introdurre deformazioni. È, inoltre, necessario essere in grado di selezionare le singole porzioni di segnale ed avere garanzie che esse siano effettivamente delle repliche. Per sfruttare al meglio la ripetitività sono state sviluppate due modalità di campionamento; la prima è utilizzata prevalentemente negli oscilloscopi analogici a campionamento, ed è spesso denominata **campionamento tempo equivalente sincrono**; la seconda, propria degli oscilloscopi digitali, è meglio nota come **campionamento tempo equivalente asincrono** (o **random**).

Quando è necessario eseguire misure su segnali con gamma di frequenze superiore alla metà della massima frequenza di campionamento dell'oscilloscopio, allora non è consigliabile utilizzare il campionamento in tempo reale poiché l'oscilloscopio potrebbe non acquisire un numero sufficiente di campioni per visualizzare con accuratezza la forma d'onda del segnale sotto misura. Se detto segnale è ripetitivo allora si può ricorrere al campionamento in tempo equivalente.

I sistemi a campionamento in tempo equivalente traggono vantaggio nel fatto che la maggior parte dei segnali che si verificano in natura o artificialmente dall'uomo, sono eventi ripetitivi. Il campionamento in tempo equivalente permette di costruire in modo accurato un'immagine di un segnale catturando poche informazioni durante ciascuna ripetizione. La forma d'onda si crea lentamente, come una serie di lampade che si accendono una dopo l'altra. In questo modo l'oscilloscopio può acquisire con precisione i segnali con componenti a frequenza molto più alta della frequenza di campionamento dell'oscilloscopio.

Esistono due tipi di campionamento in tempo equivalente: casuale e sequenziale; ciascuno ha i suoi vantaggi. Il campionamento in tempo equivalente casuale permette di visualizzare il segnale d'ingresso prima del punto di trigger, senza bisogno di utilizzare una linea di ritardo. Il campionamento in tempo equivalente sequenziale offre precisione e risoluzione temporale molto più alte. Entrambi i metodi richiedono che il segnale d'ingresso sia ripetitivo.

6.5 Il campionamento in tempo equivalente casuale o asincrono.

Gli strumenti digitalizzatori (campionatori) in tempo equivalente casuale impiegano un clock interno che funziona in modo asincrono rispetto al segnale d'ingresso e a quello di trigger, come illustrato nella Figura 37. I campioni vengono acquisiti senza interruzione, indipendentemente dalla posizione del trigger, e vengono visualizzati in base al periodo di tempo intercorrente tra il campione e il trigger. Sebbene i campioni siano acquisiti in sequenza nel tempo, il loro ordine è casuale rispetto al trigger, da qui il termine "casuale" per indicare tale tipo di campionamento: i campioni compaiono in punti a caso lungo la forma d'onda quando essa si visualizza. La capacità di acquisire e visualizzare i campioni prima del punto di trigger è il vantaggio essenziale di questa tecnica di campionamento, che elimina la necessità di linee di ritardo o di segnali di pretrigger esterni.

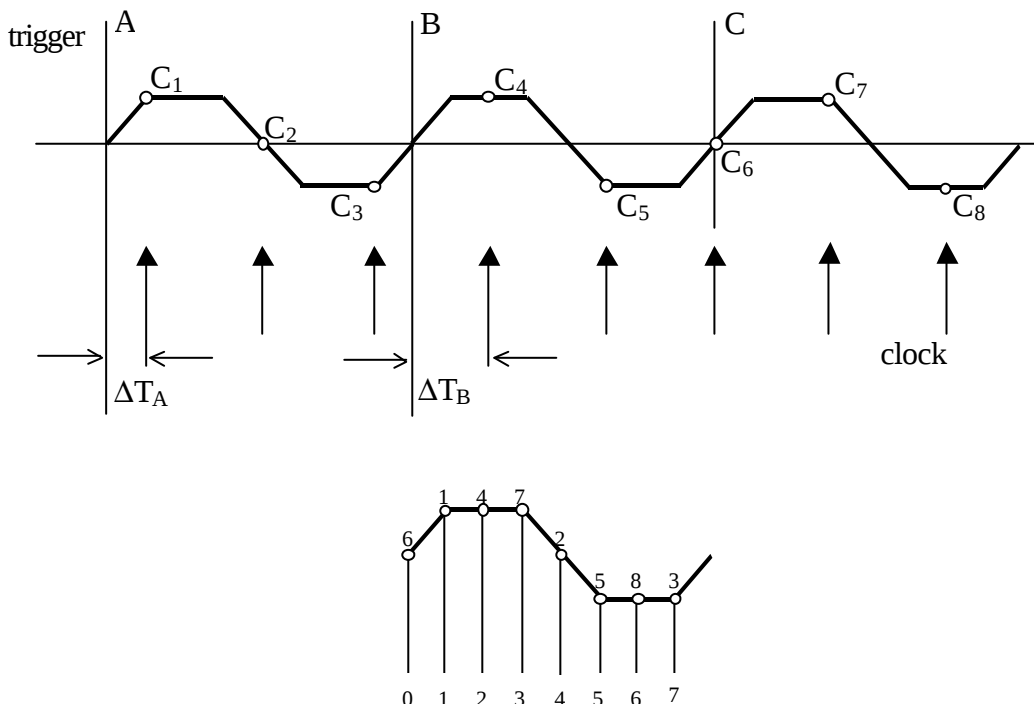


Figura 37

A seconda della frequenza di campionamento e dell'intervallo di tempo sul display, il campionamento casuale può anche consentire di acquisire più di un campione ogni volta che si comanda il trigger. Tuttavia, a velocità di scansione più alte l'intervallo di acquisizione si riduce, finché il digitalizzatore non può eseguire il campionamento su ogni trigger. È a tali velocità di scansione che spesso si eseguono misure di temporizzazione di grande precisione e che si hanno i massimi vantaggi dalla straordinaria risoluzione temporale del campionatore in tempo equivalente casuale. Il limite della larghezza di banda per il campionamento in tempo equivalente casuale è minore di quello relativo al campionamento in tempo equivalente sequenziale. Se T è non noto, si utilizza la modalità di campionamento asincrona, dove si associa al campione acquisito il suo ritardo rispetto al precedente evento di trigger. Il ritardo si traduce in una diversa collocazione dei campioni nelle celle di memoria: la loro posizione è determinata dal ritardo rispetto al trigger. Il segnale di ingresso è campionato con una frequenza costante f_c , indipendentemente dagli istanti di trigger; gli impulsi di trigger si verificano cioè in modo completamente asincrono rispetto agli istanti di campionamento, da cui il nome di asincrono, o casuale, dato a questa tecnica di campionamento.

Fra due successivi impulsi di trigger viene prelevato un numero molto limitato di campioni, non rigorosamente costante a causa della asincronicità, o in genere del tutto insufficiente per una adeguata ricostruzione della forma d'onda in esame; a tale scopo devono quindi essere utilizzati insiemi di campioni ottenuti da periodi diversi del segnale.

Per ottenere una ricostruzione corretta è perciò necessario conoscere il legame temporale esistente fra ogni impulso di trigger e il corrispondente insieme di campioni acquisiti. Tutti gli eventi di trigger vengono inoltre fatti corrispondere allo stesso istante temporale. In pratica, poiché il campionamento avviene con un periodo noto, per conoscere tale legame temporale è sufficiente misurare il ritardo esistente tra ogni impulso di trigger e il campione immediatamente successivo. La risoluzione temporale con cui è necessario determinare tale ritardo dipende anche dalla durata della porzione di segnale da analizzare e dal numero di campioni utilizzati per rappresentare tale porzione.

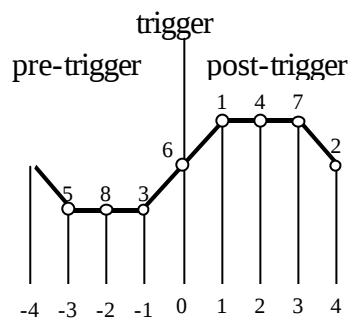


Figura 38

Per ricavare le principali relazioni che esistono tra i diversi parametri utilizzati nel campionamento asincrono si supponga di voler analizzare una porzione di segnale di durata T_0 utilizzando N campioni.

Detta T_0 la durata della porzione del segnale da analizzare, ed N il numero di campioni acquisiti, la frequenza di campionamento equivalente f'_c è data da:

$$f'_c = \frac{N}{T_0}$$

mentre la frequenza di campionamento effettiva f_c è pari a:

$$f_c = \frac{f'_c}{K} = \frac{N}{K \cdot T_0} \quad \text{con } K > 1$$

Si ha perciò $f_c < f'_c$; in pratica, il parametro K assume valori notevolmente elevati. La Figura 37 mostra una porzione ricostruita in condizioni di solo post-trigger. È possibile richiedere che gli $N = 8$ campioni siano per metà antecedenti e per metà successivi all'evento di trigger, come mostrato in Figura 38.

Le Figure 37 e 38 sono state ricavate, per semplicità, da un segnale periodico; in generale, la procedura descritta è valida per segnali ripetitivi.

L'individuazione di ogni porzione di durata T avviene mediante dei segnali di trigger e ogni campione acquisito viene collocato rispetto a tale evento; se un campione acquisito non appartiene alla porzione di segnale (sia pre- che post-trigger) di interesse, viene perso.

6.6 Il campionamento in tempo equivalente sequenziale o sincrono.

L'oscilloscopio acquisisce un solo campione per trigger, indipendentemente dall'impostazione time/div, ossia dalla velocità di scansione. Quando il digitalizzatore rileva un trigger, acquisisce un campione dopo un ritardo molto breve ma specificato. Quando viene comandato il trigger successivo, il digitalizzatore incrementa il ritardo di una piccola quantità Δt e acquisisce un altro campione. Questa operazione si ripete molte volte, con Δt aggiunto a ciascuna acquisizione precedente, finché non viene riempito il periodo di tempo. I campioni compaiono da sinistra a destra in sequenza lungo la forma d'onda quando questa viene visualizzata sullo schermo dell'oscilloscopio. In termini tecnici, è più facile generare un Δt molto breve e preciso che misurare con precisione le posizioni verticale e orizzontale di un campione rispetto al punto di trigger, come richiesto dai campionatori casuali. Questo ritardo misurato con precisione è ciò che permette a questi ultimi di ottenere una risoluzione temporale senza pari. Poiché con il campionamento sequenziale ciascun campione viene acquisito una volta rilevato il livello di trigger, non si può visualizzare il punto di trigger senza utilizzare una linea di ritardo analogica, che a sua volta può ridurre la larghezza di banda dello strumento. Se si può adoperare un pretrigger esterno, la larghezza di banda non cambia.

Il principio di funzionamento del campionamento tempo equivalente sincrono si basa sull'acquisizione di campioni di un segnale di periodo noto.

Il campionamento è detto sincrono quando, dati N , P e Q interi, con $P < Q$, è soddisfatta la relazione (1) che lega il periodo di campionamento T_c effettivo al periodo del segnale T :

$$T_c = \left(N + \frac{P}{Q} \right) T \quad (1)$$

Ad esempio, la scelta $N=1$, $P=1$ e $Q=5$, non verifica il criterio di Nyquist, poiché, essendo $N \neq 0$, risulta:

$$f_c = \frac{5}{6} f_s < f_{Nyquist} = 2 f_s$$

In termini di tempo equivalente, invece, risulta:

$$f_{ceq} = Q \cdot f_s = 5 f_s$$

Poiché, in tal modo è ricostruita una porzione di segnale mediante Q campioni. Per $N=1$, $P=3$ e $Q=5$, la sequenza periodica è ancora 5, ma i campioni non sono nel giusto ordine; i periodi richiesti sono adesso 7 e dipendono, senza una relazione precisa, dal rapporto tra P e Q .

7 Fattori e termini relativi alle prestazioni

Un oscilloscopio è analogo a una macchina fotografica, la quale acquisisce immagini osservabili e interpretabili. La velocità dell'otturatore, le condizioni di illuminazione, l'apertura e il codice ASA della pellicola influiscono sulla capacità della macchina fotografica di acquisire le immagini con nitidezza e precisione. Come i sistemi fondamentali di un oscilloscopio, i fattori relativi alla sue prestazioni influiscono in modo notevole sulla possibilità di ottenere con esso l'integrità del segnale richiesta.

7.1 Larghezza di banda

Indica la gamma di frequenze entro la quale l'oscilloscopio può eseguire misure accurate. All'aumentare della frequenza di un segnale, diminuisce la capacità dell'oscilloscopio di visualizzarlo con precisione. La larghezza di banda dell'oscilloscopio viene specificata come la frequenza alla quale un segnale d'ingresso sinusoidale è attenuato sino al 70,7% della sua ampiezza effettiva ed è detta punto a -3 dB. Se la larghezza di banda non è adeguata, allora l'oscilloscopio non è in grado di rilevare variazioni ad alta frequenza per cui l'ampiezza risulta distorta, i fronti non sono rilevati correttamente e si perdono i dettagli. Senza un'adeguata larghezza di banda, nessun'altra funzione dell'oscilloscopio risulta veramente utile. Per determinare la larghezza di banda dell'oscilloscopio necessaria per caratterizzare con precisione l'ampiezza di un segnale specifico, è sufficiente applicare la regola della moltiplicazione per 5. Un oscilloscopio selezionato mediante questa regola produce un errore inferiore a $\pm 2\%$ nelle misure, in genere sufficiente per le applicazioni più comuni. Tuttavia, all'aumentare della frequenza del segnale può non essere più possibile applicare questa

regola pratica. Tenere sempre presente che una larghezza di banda più ampia probabilmente garantisce una riproduzione più precisa del segnale (vedi Figura 39).

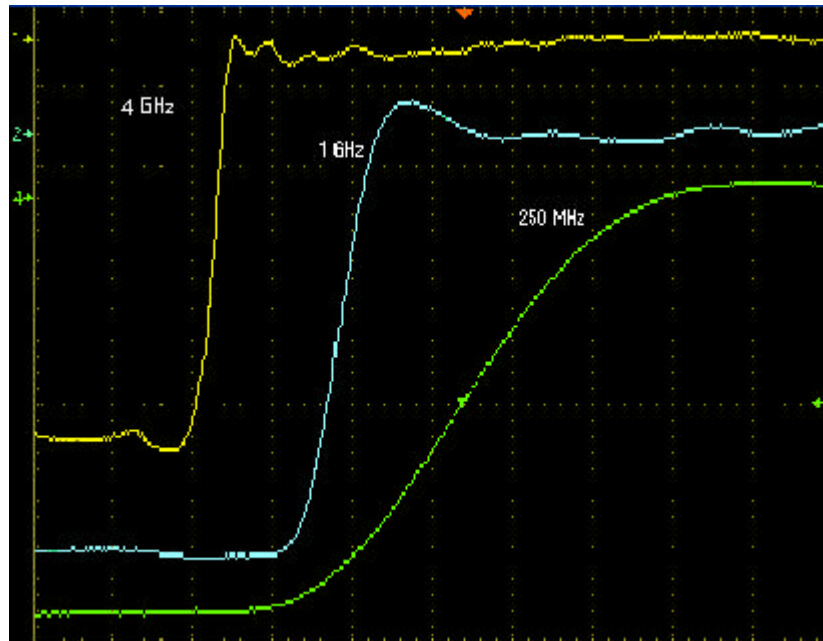


Figura 39 – Quanto più ampia è la larghezza di banda, tanto più precisa è la riproduzione del segnale, come mostrato nel caso di un segnale acquisito con banda 250 MHz, 1 GHz e 4 GHz.

7.2 Tempo di salita

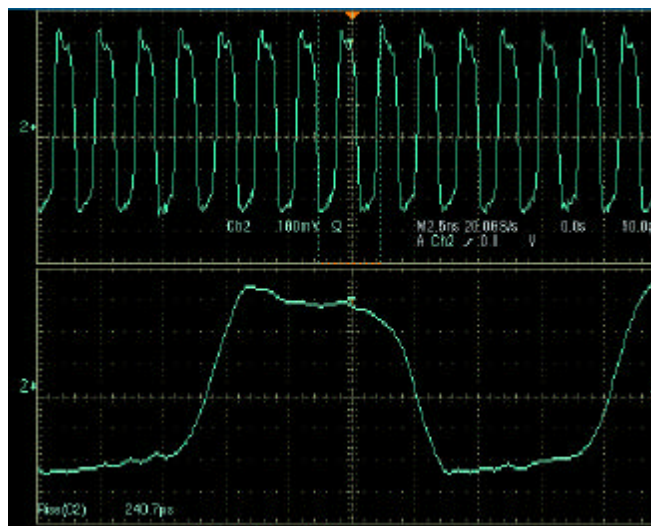
Il tempo di salita è uno dei fattori più appropriati per la scelta delle prestazioni di un oscilloscopio quando si intende eseguire misure su segnali digitali, come impulsi e gradini. L'oscilloscopio deve avere un tempo di salita sufficientemente breve per acquisire con precisione i dettagli di transizioni rapide. Il tempo di salita indica la gamma di frequenze utili di un oscilloscopio. Per calcolare il tempo di salita τ dell'oscilloscopio necessario per ottenere una appropriata misura del tempo di salita τ_m più breve di uno specifico segnale, è consigliato che sia verificata la seguente equazione:

$$t = \frac{\tau_m}{5}$$

Si noti che non sempre è possibile applicare questa regola pratica, così come nel caso della selezione della larghezza di banda, a causa delle frequenze altissime degli odierni segnali. Una costante mette in relazione la larghezza di banda e il tempo di salita dell'oscilloscopio; l'equazione è la seguente:

$$B = \frac{k}{t}$$

dove B è la larghezza della banda. Il valore della costante k è in genere compreso tra 0,35 e 0,45, e dipende dal tempo di salita della risposta all'impulso e dall'andamento della risposta in frequenza dell'oscilloscopio. In generale, gli oscilloscopi con banda inferiore ad 1 GHz forniscono $k=0,35$, mentre quelli con banda maggiore di 1 GHz forniscono un valore k che varia tra 0,40 e 0,45. Alcune famiglie logiche hanno tempi di salita intrinsecamente più brevi rispetto ad altre, come illustrato nella Figura 40.



famiglia logica	tempo di salita tipico	larghezza di banda calcolata
TTL	2 ns	175 MHz
CMOS	1,5 ns	230 MHz
GTL	1 ns	350 MHz
LVDS	400 ps	875 MHz
ECL	100 ps	3,5 GHz
GaAs	40 ps	8,75 GHz

Figura 40. tempi di salita di alcune famiglie logiche.

7.3 Frequenza di campionamento

La frequenza di campionamento indica il numero di campioni che lo strumento è in grado di acquisire in un secondo ed è espressa in campioni al secondo (S/s, **S**amples/**s**econd). A parità di altri parametri, una maggiore frequenza di campionamento permette di visualizzare maggiori dettagli della forma d'onda acquisita e diminuisce la probabilità che si perdano informazioni o eventi essenziali. La frequenza di campionamento minima può inoltre essere importante se occorre visualizzare segnali variabili lentamente nel corso di lunghi periodi di tempo.

È fin troppo ovvio che per ottenere una ricostruzione fedele del segnale su cui è stato operato un campionamento sono necessarie una frequenza di campionamento, un numero di livelli di conversione e una lunghezza della memoria di acquisizione infinite. Purtroppo le attuali tecnologie e i limiti fisici dei componenti non permettono di ottenere tali prestazioni. Per cui, per quanto elevate, la frequenza di campionamento e la lunghezza di memoria di acquisizione sono limitate.

Per determinare la frequenza di campionamento migliore sono disponibili vari criteri. Un primo strumento di scelta è fornito dal teorema di Nyquist secondo cui è possibile ricostruire con sufficiente accuratezza un segnale che varia con continuità nel tempo usando una frequenza di campionamento pari ad almeno il doppio della più alta frequenza contenuta nel segnale stesso, ed usando infiniti campioni. Ciò permette di evitare l'aliasing. Poiché nessun oscilloscopio offre una lunghezza di registrazione infinita e poiché non tutti i segnali, come ad esempio i glitch, sono continui, si ricava che il campionamento eseguito a una frequenza pari a solo il doppio della massima frequenza del segnale non assicura una buona ricostruzione del segnale. In realtà la ricostruzione precisa di un segnale dipende sia dalla frequenza di campionamento sia dal metodo di interpolazione adoperato per riempire gli spazi tra i campioni.

Per ottenere ricostruzioni accurate del segnale, l'oscilloscopio dovrebbe acquisire ad una frequenza di campionamento pari ad almeno 2,5 volte la più alta componente in frequenza del segnale se si usa l'interpolazione $\sin(x)/x$, ed almeno 10 volte se si usa l'interpolazione lineare.

Alcuni sistemi di misura con frequenze di campionamento sino a 20 GS/s e larghezze di banda sino a 4 GHz sono stati ottimizzati in modo da acquisire eventi transitori velocissimi sovracampionando a una frequenza pari a fino 5 volte la larghezza di banda.

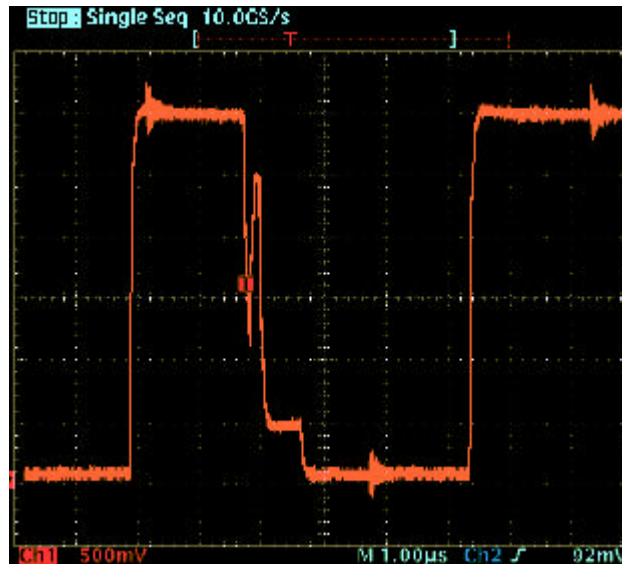


Figura 41. una frequenza di campionamento più alta fornisce una risoluzione maggiore del segnale, assicurando la visualizzazione di eventi intermittenti.

7.4 Frequenza di acquisizione della forma d'onda

Tutti gli oscilloscopi funzionano ad intermittenza, ossia acquisiscono il segnale un certo numero di volte al secondo fino a riempire la memoria di acquisizione, e rimangono inattivi durante gli intervalli tra una scansione e l'altra. Questo numero è la frequenza di acquisizione della forma d'onda e viene espresso in forme d'onda al secondo (wfms/s) e indica la velocità con la quale l'oscilloscopio acquisisce le forme d'onda. La frequenza di acquisizione della forma d'onda può variare molto, a seconda del tipo e del livello di prestazioni dell'oscilloscopio. Gli oscilloscopi con elevate frequenze di acquisizione permettono di osservare in modo notevolmente più approfondito l'andamento del segnale e aumentano significativamente la probabilità di acquisire con rapidità anomalie transitorie come il jitter, gli impulsi runt, i glitch e gli errori di transizione (vedi Figura 44).

Gli oscilloscopi a memoria digitale (DSO) impiegano un'architettura di elaborazione seriale per acquisire le forme d'onda a frequenze comprese tra 10 e 5.000 wfms/s. Alcuni DSO offrono una modalità speciale, che raggruppa più acquisizioni in una memoria a lungo termine, fornendo temporaneamente frequenze di acquisizione più alte, seguite da lunghi tempi morti di elaborazione che riducono la probabilità di acquisire eventi rari e intermittenti.

La maggiore parte degli oscilloscopi ai fosfori digitali (DPO) impiega un'architettura di elaborazione parallela per ottenere frequenze di acquisizione della forma d'onda molto più alte. Alcuni DPO possono acquisire milioni di forme d'onda in alcuni secondi, aumentando in modo significativo la probabilità di acquisire eventi intermittenti ed elusivi e consentendo di osservare più rapidamente i problemi del segnale. Inoltre, la capacità del DPO di acquisire e visualizzare tre dimensioni dell'andamento del segnale in tempo reale - l'ampiezza, il tempo e la distribuzione dell'ampiezza nel tempo - si traduce nella possibilità di analisi più approfondite dell'andamento del segnale.

7.5 Lunghezza di registrazione

Indica il numero campioni acquisibili con ciascun canale e che possono essere trasferiti nella memoria dello strumento per la ricostruzione della forma d'onda. Se il campionamento è uniforme, allora la durata della forma d'onda acquisita è inversamente proporzionale alla frequenza di campionamento dell'oscilloscopio.

$$\text{Durata} = \frac{\text{Lunghezza di registrazione}}{\text{Frequenza di campionamento}}$$

I moderni oscilloscopi permettono di scegliere la lunghezza di registrazione opportuna allo scopo di ottimizzare il livello di dettagli necessario per una specifica applicazione. Per analizzare un segnale sinusoidale estremamente stabile, si può scegliere una lunghezza di registrazione con pochi punti, ma se si

devono individuare, ad esempio, le cause di anomalie in un flusso complesso di dati digitali è necessario scegliere una lunghezza di registrazione con molti punti.

8 Gli oscilloscopi ai fosfori digitali

L'oscilloscopio ai fosfori digitali (DPO) è basato su un nuovo approccio all'architettura dell'oscilloscopio. Tale architettura consente a un DPO di offrire funzioni di acquisizione e visualizzazione uniche al fine di ricostruire con precisione i segnali.

Mentre il DSO si basa su un'architettura di elaborazione seriale per acquisire e analizzare i segnali, il DPO impiega un'architettura di elaborazione parallela per svolgere queste funzioni, come illustrato nella figura A. Il DPO dedica circuiti per l'acquisizione delle immagini della forma d'onda a frequenze elevate, ottenendo un livello più alto nella qualità della traccia. Queste prestazioni aumentano la probabilità di osservare i transitori che si verificano nei sistemi digitali, quali gli impulsi runt, i glitch e gli errori di transizioni.

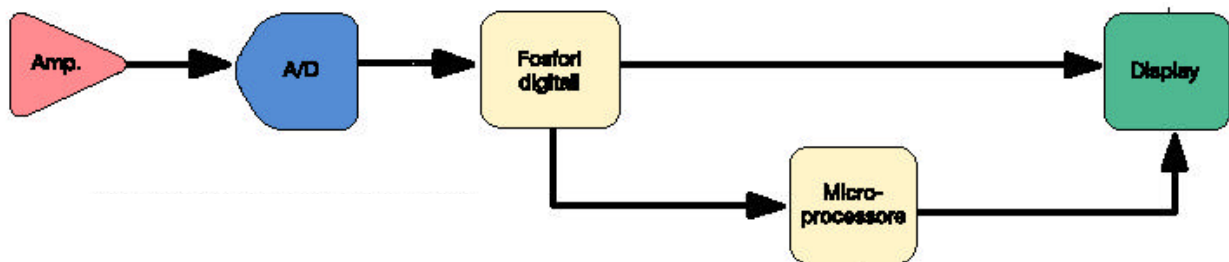


Figura 42

8.1 Architettura di elaborazione parallela

Lo stadio di ingresso del DPO è simile a quello di un oscilloscopio analogico (un amplificatore verticale) e il secondo stadio è simile a quello di un DSO (un convertitore A/D).

Per qualsiasi oscilloscopio, analogico, DSO o DPO, esiste sempre un tempo di holdoff durante il quale lo strumento elabora i dati acquisiti per ultimi, reimposta il sistema e attende l'evento successivo di trigger.

Durante questo intervallo l'oscilloscopio non rileva alcuna attività del segnale. La probabilità di osservare un evento infrequente o a bassa ripetizione diminuisce con l'aumentare il tempo di holdoff.

Occorre notare che è impossibile determinare la probabilità di cattura se ci si affida solo alla frequenza di aggiornamento dello schermo. In questo caso, infatti, è facile commettere l'errore di ritenere che l'oscilloscopio stia catturando tutte le informazioni sulla forma d'onda quando invece non è così.

L'oscilloscopio a memoria digitale acquisisce e processa le forme d'onda serialmente. Il collo di bottiglia in questo processo è la velocità del microprocessore, perché limita la frequenza di acquisizione della forma d'onda. Il DPO memorizza i dati relativi alla forma d'onda digitalizzata in un database ai fosfori digitali. Ogni trentesimo di secondo, un intervallo sufficientemente breve perché l'occhio umano percepisca l'immagine come se fosse continua, un'istantanea dell'immagine del segnale memorizzata nel database viene trasmessa direttamente al sistema di visualizzazione. Questa cattura diretta dei dati relativi alla forma d'onda e la loro trasmissione diretta dal database alla memoria del display elimina il collo di bottiglia nell'elaborazione dei dati intrinseco alle altre architetture. Ne risulta un aggiornamento dello schermo più veloce e una migliore rappresentazione in tempo reale del segnale. Gli eventi intermittenti, i dettagli e le caratteristiche dinamiche del segnale vengono acquisite in tempo reale. Il microprocessore del DPO funziona in parallelo a questo sistema integrato di acquisizione per gestire lo schermo, eseguire le misure automaticamente e regolare le funzioni dello strumento, cosicché non influisce sulla velocità di acquisizione dell'oscilloscopio.

Il DPO simula fedelmente le caratteristiche di visualizzazione offerte da un oscilloscopio analogico, visualizzando il segnale in tre dimensioni: il tempo, l'ampiezza e la distribuzione dell'ampiezza nel tempo, tutte in tempo reale. A differenza dell'oscilloscopio analogico, basato su fosfori chimici, il DPO utilizza fosfori digitali puramente elettronici, che in effetti costituiscono un database che viene aggiornato continuamente e avente una "cella" separata di informazioni per ogni pixel dello schermo dell'oscilloscopio. Ogni volta che quest'ultimo acquisisce una forma d'onda, ovvero ogni volta che viene comandato il trigger, essa viene memorizzata nelle celle del database. Ciascuna cella rappresenta un punto dello schermo e quando viene "colpita" dal segnale, si accumulano in essa le informazioni sulla luminosità della forma d'onda mentre le informazioni nelle altre celle non cambiano, cosicché le informazioni sulla luminosità si accumulano nelle celle per le quali la forma d'onda passa con maggiore frequenza. Quando il database ai fosfori digitali viene trasmesso al display dell'oscilloscopio, la forma d'onda si visualizza con aree di luminosità più o meno

grande in proporzione alla frequenza con la quale il segnale si presenta in ciascun punto, analogamente a quanto accade con le caratteristiche di intensità graduale dell'oscilloscopio analogico. Inoltre, a differenza di quanto fa quest'ultimo, il DPO visualizza con colori a buon contrasto le aree relative alle informazioni sul segnale che si presentano a frequenza diversa. Con un DPO è facile vedere la differenza tra una forma d'onda che si presenta quasi a ogni trigger e una che si presenta, per esempio, ogni 100 trigger. I DPO eliminano la barriera esistente tra le tecnologie degli oscilloscopi analogici e digitali, in quanto sono adatti per visualizzare segnali a frequenza alta o bassa, forme d'onda periodiche, transitori e variazioni del segnale in tempo reale. Solo il DPO fornisce l'asse Z (intensità) in tempo reale che invece manca nei DSO convenzionali.

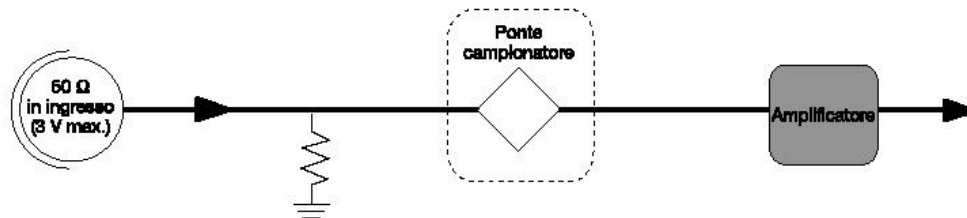


Figura 43

9 Gli oscilloscopi campionatori

Quando si eseguono misure su segnali ad alta frequenza, è possibile che l'oscilloscopio non sia in grado di acquisire un numero sufficiente di campioni in una sola scansione. L'oscilloscopio campionario è uno strumento ideale per acquisire con precisione segnali con componenti a frequenza molto più alta della frequenza di campionamento dello strumento. Questo tipo di oscilloscopio può eseguire misure su segnali a frequenza fino a un ordine di grandezza più alta rispetto a qualsiasi altro tipo di oscilloscopio. Nel caso di segnali periodici, può funzionare a larghezze di banda e velocità di temporizzazione dieci volte superiori rispetto agli altri tipi di oscilloscopi. Sono disponibili oscilloscopi campionatori in tempo equivalente sequenziale con larghezza di banda sino a 50 GHz.

A differenza degli oscilloscopi a memoria digitale e ai fosfori digitali, l'architettura dell'oscilloscopio campionario scambia le posizioni dell'attenuatore/amplificatore e del ponte campionatore, come illustrato nella Figura 43. Il segnale d'ingresso viene campionato prima di essere eventualmente attenuato o amplificato. All'uscita del ponte campionatore si può quindi adoperare un amplificatore a piccola larghezza di banda, in quanto il segnale è stato già convertito a una frequenza più bassa dalla porta campionatrice; ne risulta uno strumento con larghezza di banda molto più ampia. Lo svantaggio derivante da quest'ampia larghezza di banda è tuttavia la limitazione della gamma dinamica dell'oscilloscopio campionario. Poiché all'ingresso della porta campionatrice non c'è nessun attenuatore/amplificatore, non si può regolare l'ampiezza del segnale in ingresso, cosicché il ponte campionatore deve poterne sempre accettare l'intera gamma dinamica. Ne consegue che il range dinamico per la maggior parte degli oscilloscopi campionatori è limitata a circa 1 V picco-picco, mentre gli oscilloscopi a memoria digitale e quelli ai fosfori digitali accettano segnali di ampiezza fino a 50 - 100 volt. Inoltre, non si possono inserire diodi di protezione all'ingresso del ponte campionatore, in quanto si limiterebbe la larghezza di banda. Ne consegue una riduzione della tensione d'ingresso applicabile all'oscilloscopio campionario senza rischio di danni pari a circa 3 V, mentre agli altri tipi di oscilloscopio si possono applicare tensioni fino a 500 V.

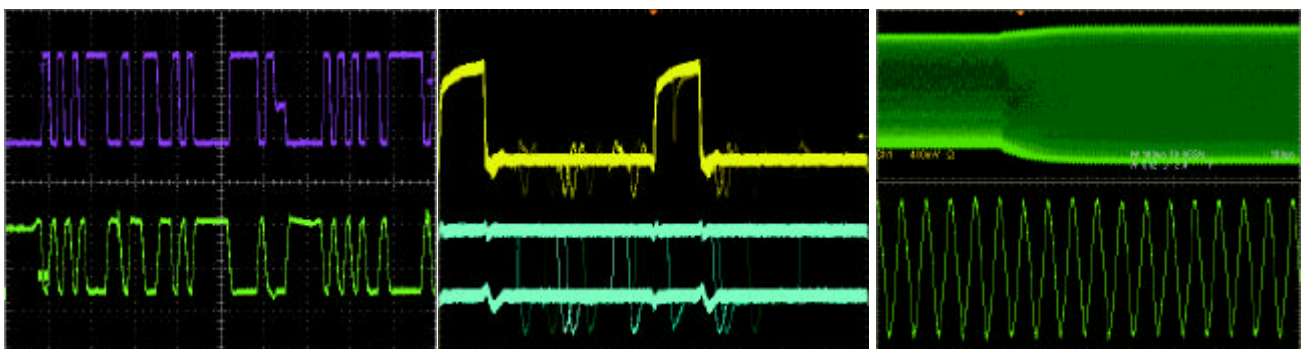


Figura 44 – Acquisizioni eseguite rispettivamente mediante oscilloscopi DSO, DPO e campionatori.