TACCUINO DI INGEGNERIA · STRUMENTI · MISURE ELETTRONICHE

Oscilloscopio digitale

Il quaderno completo dello strumento che fa vedere le tensioni nel tempo: storia, fisica, catena di misura, banda e campionamento, trigger, sonde, datasheet, errori, sicurezza, taratura ed esercizi.

Indice

1 A cosa serve e un po’ di storia
2 La fisica alla base
3 Come funziona, passo per passo
4 Schema a blocchi
5 Formule ed esempi svolti
6 Grafici
7 Specifiche reali: come leggere un datasheet
8 Varianti e tecnologie
9 Errori tipici e come evitarli
10 Sicurezza e norme
11 Taratura e manutenzione
12 Esercizi con soluzione
13 Glossario
14 Fonti

1 A cosa serve e un po’ di storia

Il multimetro dice **quanto** vale una tensione; l’oscilloscopio dice **come cambia nel tempo**. Sullo schermo l’asse orizzontale è il tempo e quello verticale è la tensione: si vede la forma d’onda, cioè il «disegno» del segnale. Da quel disegno si ricavano ampiezza, frequenza, tempo di salita, ritardi fra due segnali, disturbi, rimbalzi e difetti che durano pochi miliardesimi di secondo.

Chi ripara un alimentatore lo usa per vedere l’ondulazione residua; chi progetta un circuito digitale per controllare che i fronti siano puliti; chi lavora con l’audio per vedere se un amplificatore «taglia» i picchi; chi studia un sensore per capire quanto è rumoroso. In ogni laboratorio di elettronica è lo strumento che si accende per primo, perché trasforma qualcosa di invisibile in un’immagine da interpretare.

La domanda guida di questo taccuino è sempre la stessa: **perché lo strumento funziona così?** Capire la catena interna serve a fidarsi delle misure giuste e a riconoscere quelle sbagliate, che sullo schermo hanno spesso un aspetto convincente.

Dal tubo a raggi catodici allo strumento digitale

Il primo antenato è il tubo a raggi catodici di Karl Ferdinand Braun (1897): un fascio di elettroni colpisce uno schermo fluorescente e viene deviato da un campo. Nei decenni successivi il tubo diventò strumento di misura: una tensione a dente di sega spostava il punto luminoso da sinistra a destra a velocità costante (la **base dei tempi**), e la tensione da misurare lo spostava in verticale.

Il passo decisivo fu il **trigger**, introdotto negli strumenti commerciali alla fine degli anni Quaranta: la scansione parte solo quando il segnale attraversa una soglia scelta, così ogni passaggio del punto ridisegna la forma nello stesso posto e l’immagine resta ferma. Da lì nacque l’oscilloscopio come lo conosciamo, con le manopole «volt/divisione» e «tempo/divisione».

Negli anni Ottanta e Novanta i convertitori analogico-digitali veloci e le memorie economiche portarono all’oscilloscopio **a memoria digitale** (DSO): il segnale viene campionato, salvato in memoria e disegnato da un processore. Oggi quasi tutti gli strumenti sono digitali: aggiungono misure automatiche, analisi di spettro, decodifica di protocolli seriali, salvataggio su file e controllo dal computer.

Tabella. Tappe principali (date indicative, secondo le storie dei costruttori)

Periodo	Novità	Che cosa ha cambiato
1897	tubo di Braun	un fascio di elettroni diventa un «pennino» senza inerzia
anni ’30	base dei tempi a dente di sega	l’asse orizzontale diventa tempo
anni ’40–’50	scansione con trigger	immagini ferme e misurabili

Tabella. Tappe principali (date indicative, secondo le storie dei costruttori)

Periodo	Novità	Che cosa ha cambiato
anni ’70	oscilloscopi a memoria analogica	si possono vedere eventi singoli
anni ’80–’90	oscilloscopio digitale (DSO)	memoria, misure automatiche, computer
dal 2000	fosforo digitale, segnali misti, ADC a 12 bit	più dettagli, protocolli, canali logici

Che cosa troverai qui. Prima la fisica e la catena interna, poi lo schema a blocchi, le formule con esempi numerici, i grafici, come si legge un datasheet, le varianti, gli errori tipici, la sicurezza, la taratura, gli esercizi con soluzione, un glossario e le fonti.

2 La fisica alla base

Un segnale elettrico è una tensione che cambia nel tempo, $v(t)$. Per descriverlo servono poche grandezze: l’**ampiezza** (quanto si allontana da zero), il **periodo** T (dopo quanto si ripete) e la **frequenza** $f = 1/T$ (quante volte si ripete in un secondo). Per una sinusoide si usano il valore di picco, il picco-picco e il valore efficace (RMS), cioè la tensione continua che scalderebbe una resistenza allo stesso modo.

Il secondo mattone è l’idea di Fourier: **ogni segnale periodico si può scrivere come somma di sinusoidi** a frequenze multiple della fondamentale. Un’onda quadra contiene la fondamentale e le armoniche dispari, sempre più piccole; più il fronte è ripido, più armoniche alte servono a disegnarlo. Questo spiega perché la **banda** dello strumento conta: se l’oscilloscopio non lascia passare le armoniche alte, i fronti appaiono più lenti e arrotondati.

Terzo mattone: ogni circuito reale ha resistenze e capacità parassite, e una resistenza R che carica una capacità C forma un **filtro passa-basso** con costante di tempo $\tau = RC$. L’ingresso di un oscilloscopio (1 MΩ in parallelo a una decina di picofarad) e la sonda sono proprio di questo tipo: per questo si parla di banda, tempo di salita ed effetto di carico.

Ultimo mattone: il **campionamento**. Un oscilloscopio digitale non registra una curva continua ma una sequenza di numeri presi a intervalli regolari. Il teorema di Nyquist-Shannon dice che una sinusoide è ricostruibile se si prendono più di due campioni per periodo; se si campiona troppo lentamente le frequenze alte si «travestono» da frequenze basse (aliasing).

$$v(t) = V_p \cdot \sin(2\pi f t + \varphi),\ f = 1/T$$

Sinusoide: ampiezza di picco, frequenza, fase.

$$V_{RMS} = \sqrt{\left((1/T) \int v^2 \, dt \right)},\ \text{sinusoide: } V_{RMS} = V_p/\sqrt{2}$$

Valore efficace: media dei quadrati, poi radice.

$$v_{quadra}(t) = (4A/\pi) \cdot [\ \sin \omega t + (1/3) \sin 3\omega t + (1/5) \sin 5\omega t + \ldots\ ]$$

Serie di Fourier dell’onda quadra di ampiezza A: solo armoniche dispari, ampiezza 1/n.

$$\tau = RC,\ f_{-3\ dB} = 1 / (2\pi RC)$$

Filtro RC: costante di tempo e frequenza di taglio.

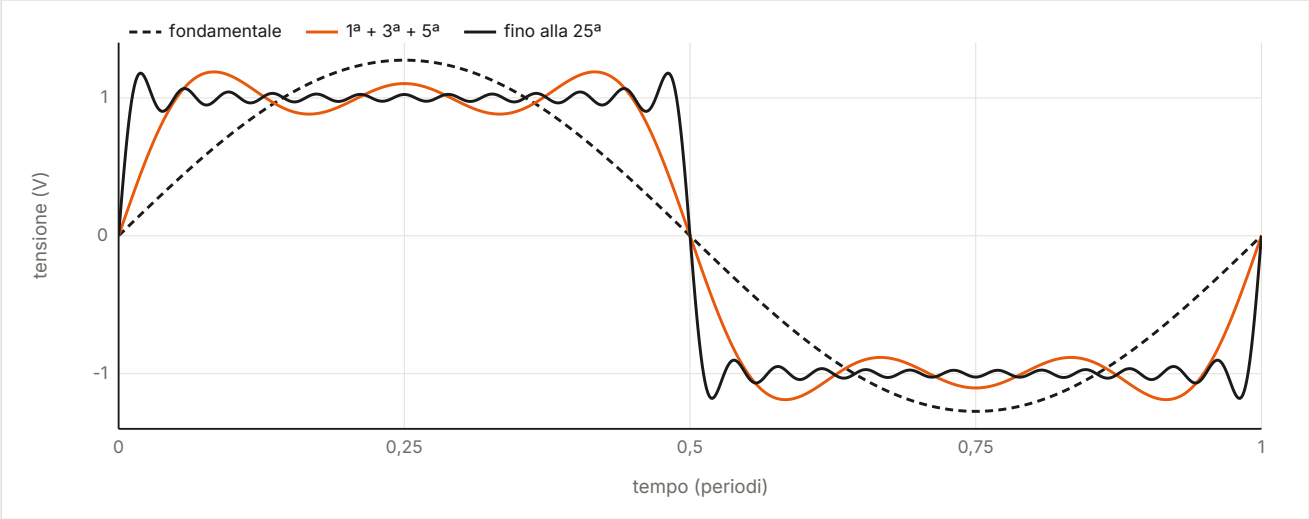


Figura. Un'onda quadra costruita sommando armoniche dispari. Più armoniche entrano, più i fronti si raddrizzano. Un oscilloscopio con poca banda «taglia» le armoniche alte e fa vedere un'onda simile alla curva arancio.

Idea chiave. Lo schermo mostra il segnale **dopo** che è passato per sonda, ingresso, amplificatore e convertitore. Ogni pezzo è un filtro e un piccolo carico: la misura è sempre il prodotto fra il segnale vero e lo strumento.

3 Come funziona, passo per passo

Seguiamo il viaggio di un segnale dalla punta della sonda fino al pixel sullo schermo.

1. La sonda

La sonda passiva più comune è la **10:1** (×10): dentro la punta c'è una resistenza da 9 MΩ con in parallelo un piccolo condensatore regolabile. Con il megaohm dell'ingresso forma un partitore che divide il segnale per dieci ma presenta al circuito un carico di 10 MΩ e pochi picofarad, molto più leggero della sonda 1:1. Lo strumento sa del fattore 10 (si imposta nel menu del canale) e moltiplica i numeri sullo schermo.

2. Accoppiamento e attenuatore d'ingresso

L'ingresso può essere **DC** (passa tutto, anche la componente continua), **AC** (un condensatore in serie toglie la continua: utile per vedere 50 mV di ondulazione sopra 12 V) o collegato a massa per trovare lo zero. Un attenuatore a scatti e un amplificatore a guadagno variabile portano qualunque segnale, da pochi millivolt a centinaia di volt, nell'intervallo giusto per il convertitore. Molti strumenti offrono anche un ingresso a **50** Ω per segnali veloci trasportati da cavi coassiali.

3. Amplificatore verticale e limitatore di banda

L'amplificatore stabilisce la banda dello strumento. Un interruttore di **limite di banda** (spesso 20 MHz) inserisce un filtro che taglia il rumore quando si misurano segnali lenti, per esempio l'ondulazione di un alimentatore.

4. Convertitore analogico-digitale (ADC)

L'ADC misura la tensione miliardi di volte al secondo e la trasforma in numeri a 8, 10 o 12 bit. A 8 bit lo schermo verticale è diviso in 256 livelli: se il segnale occupa solo due divisioni su otto, si usano appena 64 livelli. Per questo conviene sempre regolare i volt/divisione in modo che la forma d'onda riempia buona parte dello schermo. Negli strumenti economici la frequenza di campionamento è condivisa fra i canali: accendendo più canali ognuno riceve meno campioni al secondo.

5. Memoria di acquisizione

I campioni finiscono in una memoria circolare. La sua lunghezza (milioni di punti) decide per quanto tempo si può registrare alla massima velocità: *tempo* = *punti* / f_c. Quando si allarga la base dei tempi e la memoria non basta, lo strumento è costretto a **ridurre la frequenza di campionamento**, con il rischio di aliasing.

6. Trigger

Il circuito di trigger confronta il segnale con una soglia e decide quale istante diventa «tempo zero». Il caso più semplice è il fronte di salita oltre un livello; esistono trigger su impulsi troppo corti o lunghi, su runt (impulsi che non arrivano alla soglia), su pacchetti seriali. Grazie alla memoria circolare si vede anche ciò che è successo **prima** del trigger (pre-trigger). Modalità: **Auto** disegna comunque se il trigger non arriva; **Normale** aspetta l'evento; **Singolo** cattura una volta e si ferma.

7. Elaborazione e visualizzazione

Il processore ricostruisce la forma tra i campioni (interpolazione lineare o sin(x)/x), calcola le misure automatiche, applica funzioni matematiche (somma, differenza, FFT) e disegna. Fra un'acquisizione e la successiva c'è un **tempo morto** in cui lo strumento non guarda il segnale: la frequenza di aggiornamento (forme d'onda al secondo) dice quanto è probabile vedere un difetto raro.

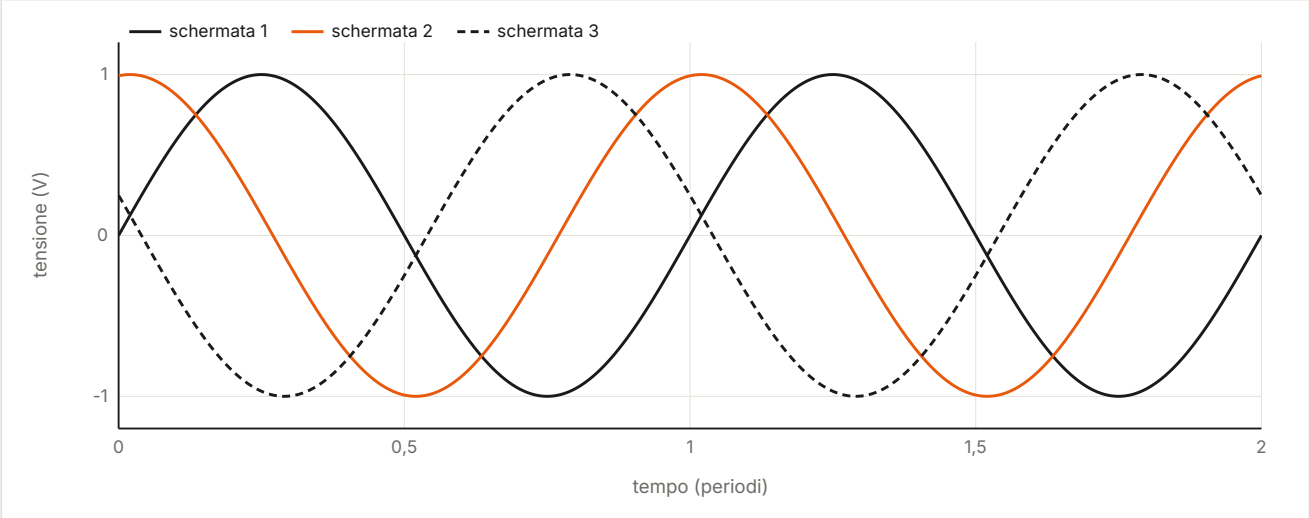
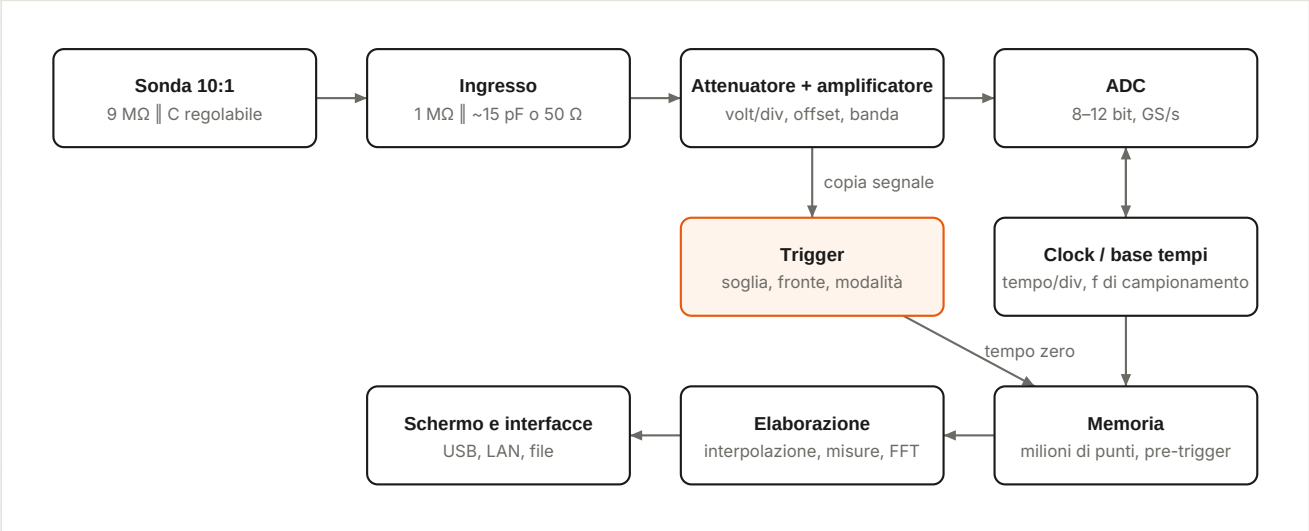


Figura. Perché serve il trigger: tre schermate della stessa sinusoide. Senza trigger ogni schermata parte in un punto diverso del ciclo e le curve si sovrappongono in un groviglio. Con il trigger su fronte di salita a 0 V tutte partirebbero come la curva nera.

4 Schema a blocchi



Schema. Catena di misura di un oscilloscopio digitale. In alto il percorso analogico, in basso quello digitale. Il trigger (arancio) decide quale tratto della memoria diventa la schermata.

Sonda e ingresso. Formano il primo partitore e il primo filtro. Da qui dipendono il carico sul circuito (resistenza e capacità che lo strumento aggiunge) e la fedeltà dei fronti.

Attenuatore e amplificatore. Adattano l'ampiezza alla finestra dell'ADC. Il loro guadagno è uno dei parametri controllati in taratura (accuratezza del guadagno DC). Qui si applica anche l'offset verticale.

ADC e clock. Il clock, generato da un oscillatore al quarzo, scandisce i campioni: la sua stabilità decide l'accuratezza della base dei tempi (tipicamente qualche decina di parti per milione).

Trigger. Lavora su una copia del segnale analogico o, negli strumenti più recenti, direttamente sui campioni digitali (trigger digitale, più preciso e con meno jitter).

Memoria ed elaborazione. Conservano i campioni intorno all'istante di trigger, li trasformano in un'immagine e in numeri. Le misure automatiche lavorano sui dati in memoria, non sui pixel: sono più precise di quanto si potrebbe leggere a occhio sulla griglia.

5 Formule ed esempi svolti

$$t_r \approx K / B,\ K \approx 0{,}35 \text{ (sotto 1 GHz) … } 0{,}40\text{–}0{,}45 \text{ (strumenti più veloci)}$$

Tempo di salita proprio dello strumento in funzione della banda B.

$$t_{r,mis} \approx \sqrt{(\, t_{r,seg}^{\,2} + t_{r,osc}^{\,2} + t_{r,sonda}^{\,2}\,)}$$

Tempo di salita mostrato: somma «in quadratura» dei contributi.

$$A_{letta}/A_{vera} = 1 / \sqrt{1 + (f/B)^2}$$

Riduzione d'ampiezza per un ingresso del primo ordine.

$$f_c > 2f_{max},\ f_{alias} = \left| f - k \cdot f_c \right|$$

Nyquist e frequenza apparente con k intero più vicino a f/f_c.

$$t_{reg} = N_{punti} / f_c,\ t_{schermo} = 10 \cdot (\text{s/div})$$

Durata registrabile e larghezza dello schermo (10 divisioni).

$$q = V_{FS} / 2^n,\ V_{FS} = 8 \cdot (\text{V/div})$$

Passo di quantizzazione con n bit su 8 divisioni verticali.

$$R_1 C_1 = R_2 C_2$$

Compensazione della sonda: costanti di tempo uguali nei due rami del partitore.

Esempio svolto. Quanto è lento lo strumento?

1. Oscilloscopio da 100 MHz, risposta tipo Gauss: K = 0,35.
2. $t_{r,osc} = 0{,}35 / 100 \cdot 10^6$ Hz $= 3{,}5 \cdot 10^{-9}$ s = **3,5 ns**.
3. Con uno strumento da 50 MHz: $0{,}35 / 50 \cdot 10^6$ = **7 ns**.
4. Conclusione: un fronte più veloce di qualche nanosecondo non si può misurare bene con questi strumenti.

Esempio svolto. Fronte vero da 5 ns visto con 100 MHz e sonda da 2 ns

1. Contributi: segnale 5 ns, strumento 3,5 ns, sonda 2 ns.
2. Somma dei quadrati: 25 + 12,25 + 4 = 41,25 ns².
3. Radice: √41,25 ≈ **6,4 ns**.
4. Errore: (6,4 − 5)/5 ≈ +28 %. Per scendere sotto il 3 % il tempo di salita del sistema deve essere circa 4 volte più piccolo del fronte da misurare.

Esempio svolto. Errore d'ampiezza su una sinusoide da 20 MHz con 50 MHz di banda

1. Rapporto f/B = 20/50 = 0,4.
2. Modello del primo ordine: $1/\sqrt{(1 + 0{,}4^2)} = 1/\sqrt{1{,}16} \approx 0{,}928$.
3. Si legge il 92,8 % dell'ampiezza: errore ≈ −7 %.
4. Per avere errore sotto il 3 % serve f/B ≤ 0,25 circa, cioè una banda almeno 4 volte la frequenza (le guide dei costruttori consigliano 5 volte).

Esempio svolto. Aliasing: 9,8 MHz campionati a 10 MS/s

1. k = intero più vicino a 9,8/10 = 1.
2. $f_{alias} = |9{,}8 - 1 \cdot 10|$ MHz = **0,2 MHz = 200 kHz**.
3. Sullo schermo compare una sinusoide stabile da 200 kHz che non esiste.
4. Rimedio: aumentare la frequenza di campionamento (base dei tempi più stretta o più memoria) e controllare con la misura di frequenza a due velocità diverse: se il valore cambia, era aliasing.

Esempio svolto. Memoria e base dei tempi

1. Strumento con 1 GS/s e 10 Mpunti.
2. Tempo registrabile alla massima velocità: $10 \cdot 10^6 / 10^9$ = 10 ms.
3. Con 5 ms/div lo schermo copre 10 × 5 = 50 ms: la memoria non basta.
4. f_c scende a $10 \cdot 10^6$/0,05 s = **200 MS/s**: segnali sopra 100 MHz verrebbero ripiegati.

Esempio svolto. Risoluzione verticale a 8 bit

1. Scala 500 mV/div: fondo scala 8 × 0,5 = 4 V.
2. q = 4 V / 256 ≈ **15,6 mV** per livello.
3. Un disturbo da 5 mV è più piccolo di un livello: non si vede.
4. Passando a 20 mV/div (con accoppiamento AC) q = 0,16 / 256 ≈ 0,63 mV: ora il disturbo occupa circa 8 livelli.

Esempio svolto. Compensare la sonda

1. Ramo della sonda: R_1 = 9 MΩ. Ramo dell'ingresso: R_2 = 1 MΩ, C_2 = 15 pF + 80 pF di cavo = 95 pF.
2. Condizione: 9 MΩ · C_1 = 1 MΩ · 95 pF.
3. C_1 = 95/9 ≈ **10,6 pF**.
4. Il trimmer della sonda serve a raggiungere esattamente questo valore guardando l'onda quadra di calibrazione.

6 Grafici

Cinque curve che riassumono il comportamento dello strumento. Sul sito, passando con il dito o il mouse sopra un grafico, si leggono i valori.

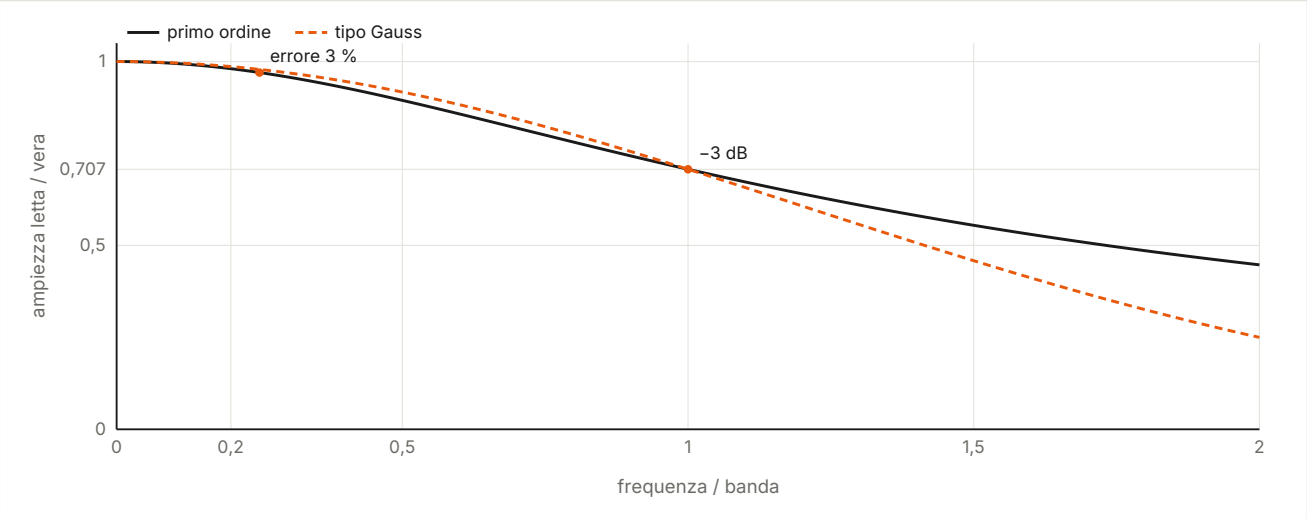


Figura. Ampiezza letta in funzione della frequenza. Alla frequenza di banda si legge il 70,7 % dell'ampiezza vera. Lo strumento tipo Gauss cala più dolcemente all'inizio e più in fretta dopo.

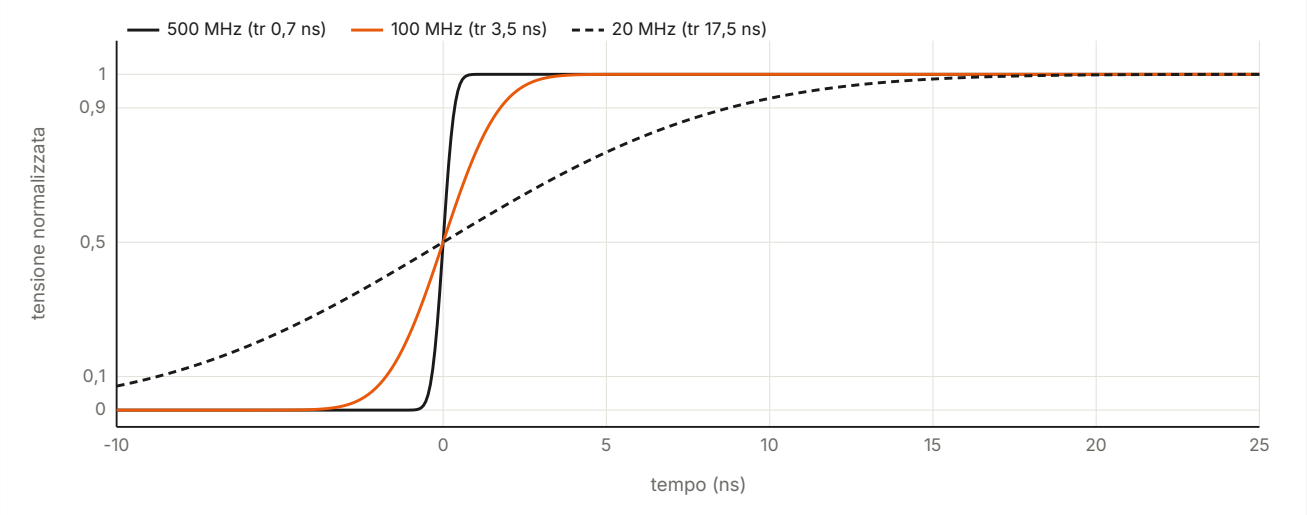


Figura. Un gradino ideale visto con bande diverse. Lo stesso fronte perfetto diventa una rampa tanto più lenta quanto minore è la banda. Il tempo di salita si misura fra il 10 % e il 90 %.

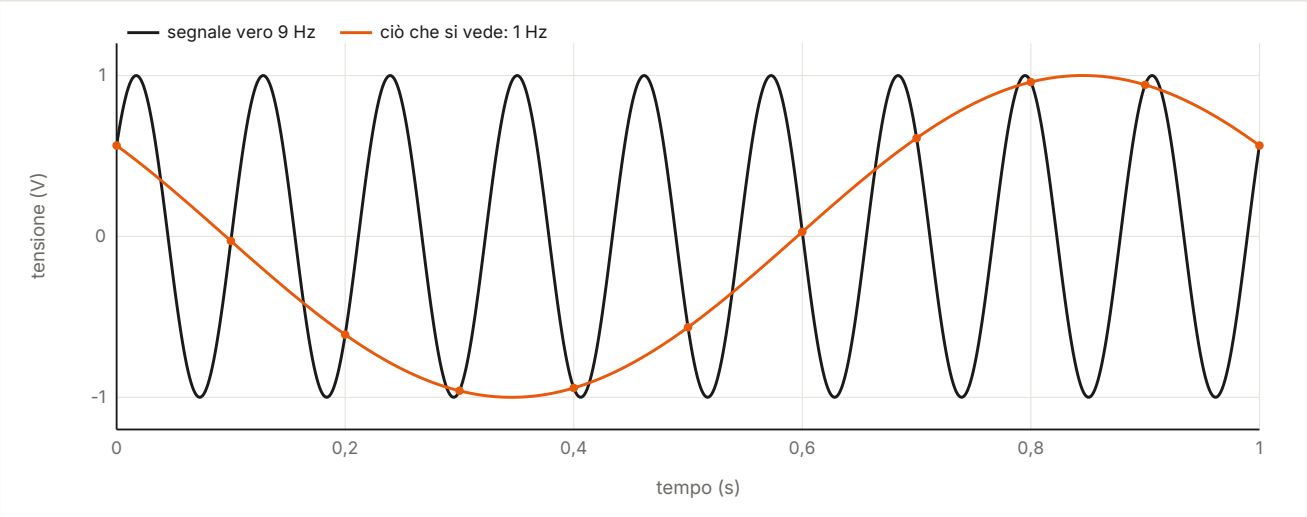


Figura. Aliasing: 9 Hz campionati a 10 campioni al secondo. I punti sono i campioni: stanno sia sull'onda vera sia su quella falsa, e lo strumento non può sapere quale sia quella giusta.

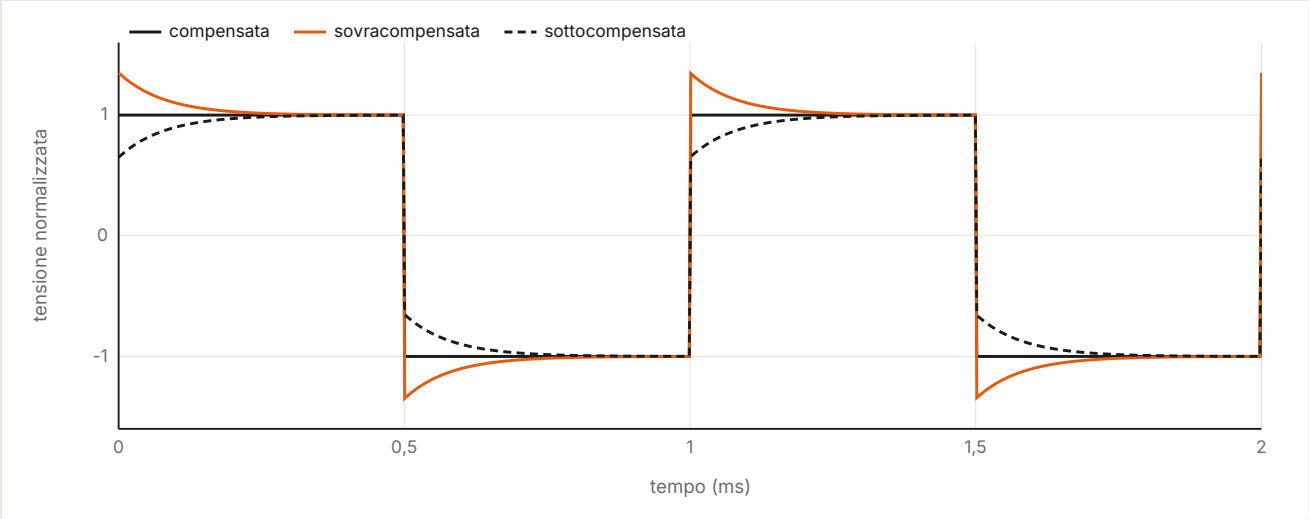


Figura. Onda quadra di calibrazione con sonda compensata e no. Con C_1 troppo grande compaiono picchi sugli spigoli; troppo piccola, gli spigoli si arrotondano. Si gira il trimmer finché l'onda è piatta.

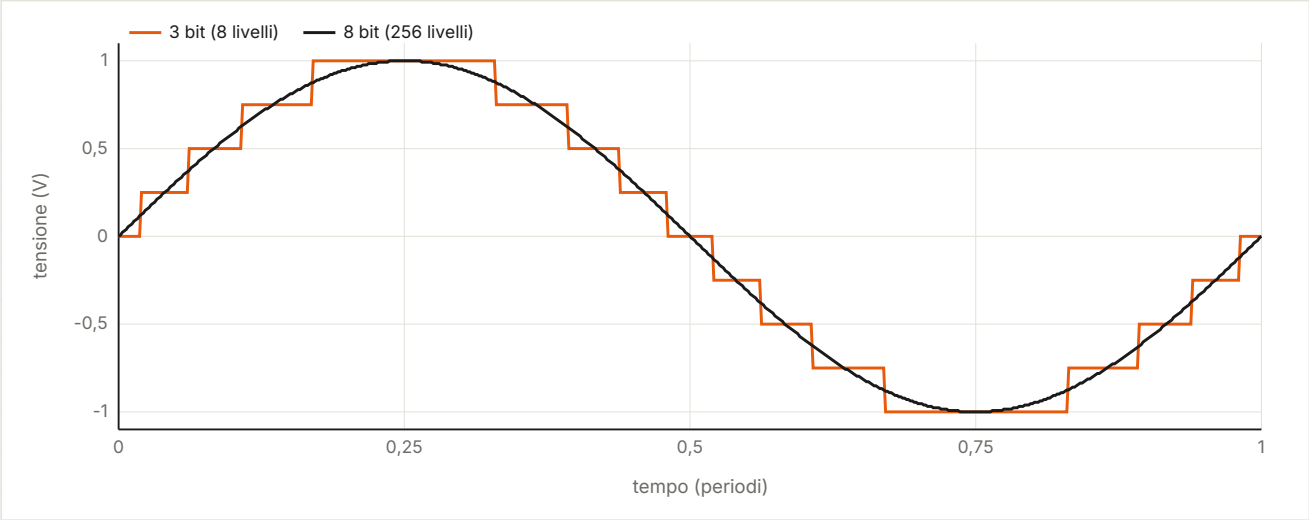


Figura. Una sinusoide quantizzata a 3 bit e a 8 bit. Con pochi bit la curva diventa una scala. A 8 bit i gradini ci sono ancora, ma sono piccoli se il segnale riempie lo schermo.

7 Specifiche reali: come leggere un datasheet

Il datasheet è la carta d'identità dello strumento. Le specifiche vere sono quelle **garantite** (con tolleranza e condizioni: temperatura, tempo di riscaldamento, intervallo di taratura); quelle «tipiche» o «nominali» sono indicative. Le voci da leggere per prime sono banda, frequenza di campionamento, memoria, bit dell'ADC, accuratezza del guadagno e impedenza d'ingresso.

Attenzione ai numeri condivisi: la frequenza di campionamento massima spesso vale con un solo canale acceso e si dimezza o si divide per quattro con più canali; la memoria indicata può essere la somma di tutti i canali o richiedere un'opzione a pagamento.

Tabella. Valori tipici per fascia di strumento (dati dei cataloghi dei costruttori, arrotondati)

Voce	Base da banco	Media	Alta gamma
Banda	50–100 MHz	200 MHz–1 GHz	4–100 GHz e oltre
Campionamento	1 GS/s condiviso	2,5–5 GS/s	20–250 GS/s
Bit dell'ADC	8	8–12	8–10 (12 in alcuni)
Memoria	1–24 Mpunti	10–250 Mpunti	fino a Gpunti
Accuratezza guadagno DC	±3 %	±1,5–2 %	±1–2 %
Ingresso	1 MΩ ‖ 13–16 pF	1 MΩ e 50 Ω	quasi solo 50 Ω

Tabella. Valori tipici per fascia di strumento (dati dei cataloghi dei costruttori, arrotondati)

Voce	Base da banco	Media	Alta gamma
Forme d'onda al secondo	decine di migliaia	centinaia di migliaia	milioni (in modalità speciali)

Tabella. Come si legge una riga di specifica

Scritto nel datasheet	Che cosa significa	Conseguenza pratica
Bandwidth (−3 dB): 100 MHz	a 100 MHz l'ampiezza letta è il 70,7 % del vero	per errore < 3 % usare sotto 20–25 MHz
Rise time: ≤ 3,5 ns (calcolato)	tempo 10–90 % proprio dello strumento	fronti sotto ~15 ns misurati con errore > 3 %
Sample rate: 1 GSa/s (1 canale), 500 MSa/s (2), 250 MSa/s (4)	velocità condivisa	con 4 canali Nyquist a 125 MHz
DC gain accuracy: ±3 % del fondo scala	errore del guadagno	1 V letto su 8 V di scala: incertezza ±0,24 V
Timebase accuracy: ±25 ppm	errore del clock	su 1 ms l'errore è 25 ns
Input: 1 MΩ ±1 % ‖ 15 pF ±3 pF	carico sul circuito	a 10 MHz 15 pF valgono circa 1 kΩ di reattanza

Esempio svolto. Incertezza su una misura di tensione continua

1. Scala 1 V/div, fondo scala 8 V; specifica ±3 % del fondo scala.
2. Incertezza del guadagno: 0,03 × 8 V = ±0,24 V.
3. Si legge 2,50 V: il valore vero sta fra 2,26 e 2,74 V.
4. Con un multimetro da ±0,5 % la stessa misura sarebbe 2,50 ± 0,01 V: per le tensioni continue precise si usa il multimetro, l'oscilloscopio per le forme.

Nota di laboratorio. Il datasheet va letto insieme alle condizioni: molte specifiche valgono dopo 30 minuti di riscaldamento, entro ±5 °C dalla temperatura della taratura e dopo una autotaratura (self-cal) eseguita dallo strumento.

8 Varianti e tecnologie

Tipo	Come funziona	Punti forti	Limiti
Analogico (a tubo)	il segnale devia direttamente il fascio	immagine immediata, nessun aliasing	niente memoria né misure automatiche; non più prodotto in serie
Digitale a memoria (DSO)	ADC + memoria + processore	misure, memoria, eventi singoli	aliasing, tempo morto
A fosforo digitale	DSO che accumula molte acquisizioni con «intensità»	mostra quanto spesso capita un evento	più costoso
A segnali misti (MSO)	DSO + 8–16 canali logici	analogico e digitale insieme, decodifica bus	canali logici a 1 bit
Portatile / palmare	batteria, ingressi isolati	misure sul campo, ingressi flottanti CAT III	banda e memoria minori
USB / da PC	acquisizione in un box, schermo sul computer	economico, grande schermo	dipende dal PC; attenzione alla massa
A campionamento (sampling)	campioni equivalenti su segnali ripetitivi	decine di GHz	solo segnali che si ripetono

Sonde

- **Passiva 10:1**: robusta ed economica, banda fino a qualche centinaio di MHz, carico 10 MΩ ‖ 10–15 pF.

- **Passiva 1:1**: per segnali piccolissimi, ma banda ridotta (spesso 6–10 MHz) e carico pesante.
- **Attiva**: amplificatore nella punta, capacità sotto 1 pF, banda di GHz; delicata e con tensione massima bassa.
- **Differenziale**: misura la differenza fra due punti nessuno dei quali a terra; indispensabile su circuiti collegati alla rete.
- **Ad alta tensione**: rapporto 100:1 o 1000:1 per kV.
- **Di corrente**: pinza a effetto Hall o trasformatore, misura la corrente senza interrompere il circuito.

Modalità di acquisizione

- **Campionamento normale**: un campione per punto.
- **Rilevamento di picco**: per ogni intervallo tiene massimo e minimo; non perde gli impulsi brevi anche con base dei tempi lenta.
- **Media**: media di molte acquisizioni; toglie il rumore casuale dei segnali ripetitivi.
- **Alta risoluzione**: media di campioni vicini nella stessa acquisizione; aggiunge bit effettivi a scapito della banda.

9 Errori tipici e come evitarli

Errore	Che cosa si vede	Come evitarlo
Sonda non compensata	spigoli arrotondati o con picchi; ampiezze sbagliate alle alte frequenze	compensare sul segnale quadro interno ogni volta che si cambia canale o sonda
Fattore sonda sbagliato	valori dieci volte troppo grandi o piccoli	impostare 10× nel menu del canale (o usare sonde riconosciute)
Aliasing	onda stabile ma di frequenza falsa	aumentare f_c; confrontare con base dei tempi diversa; usare rilevamento di picco
Banda insufficiente	fronti lenti, ampiezze ridotte	banda ≥ 5 volte la frequenza; per i fronti usare t_r del sistema ≤ 1/4 di quello del segnale
Massa lunga	oscillazioni (ringing) sui fronti che non esistono	molla di massa corta vicino alla punta
Effetto di carico	il circuito cambia comportamento quando si appoggia la sonda	sonda 10:1 o attiva; considerare i pF a frequenza alta
Massa collegata a un punto non a terra	scintilla, fusibili saltati, sonda o circuito bruciati	sonda differenziale isolata o strumento con ingressi isolati
Segnale troppo piccolo sullo schermo	forma «a scalini», misure imprecise	regolare V/div perché il segnale occupi 5–8 divisioni
Accoppiamento AC su segnali lenti	onde quadre lente che «calano» come rampe	usare DC per segnali sotto ~10 Hz
Fidarsi delle misure automatiche senza guardare	frequenza o RMS calcolati su un pezzo di periodo	mostrare almeno 2–3 periodi interi; controllare a occhio

Nota di laboratorio. Una regola di buon senso: prima di misurare il circuito, guardare un segnale conosciuto (il quadro di calibrazione o un generatore). Se lo strumento mostra bene quello, è più facile fidarsi del resto.

10 Sicurezza e norme

La norma di sicurezza per gli strumenti elettrici di misura e di laboratorio è la **IEC 61010-1** (in Europa EN 61010-1). Le sonde e gli accessori tenuti in mano hanno una parte propria, la **IEC 61010-031**; gli strumenti che misurano circuiti alimentati dalla rete seguono anche la **IEC 61010-2-030**. La compatibilità elettromagnetica è trattata dalla IEC 61326-1.

Le **categorie di misura** (CAT) dicono dove si può collegare lo strumento in base alle sovratensioni impulsive che potrebbero arrivare. Contano insieme categoria e tensione: «CAT II 300 V» non è uguale a «CAT III 300 V».

Tabella. Categorie di misura (IEC 61010)

Categoria	Dove	Esempi
senza CAT (ex CAT I)	circuiti non collegati direttamente alla rete	elettronica a batteria, uscite di alimentatori isolati
CAT II	apparecchi collegati alle prese	elettrodomestici, utensili, lato rete di un alimentatore
CAT III	impianto fisso dell'edificio	quadri di distribuzione, interruttori, motori fissi
CAT IV	origine dell'impianto	contatore, linee esterne, protezioni principali

Il pericolo della massa della sonda

In un oscilloscopio da banco alimentato da rete il **morsetto di massa di ogni sonda è collegato al conduttore di terra** della presa. Se si appoggia la clip di massa su un punto che ha tensione rispetto a terra (per esempio il lato primario di un alimentatore switching), si crea un cortocircuito attraverso la sonda: la clip può fondere, la pista del circuito bruciare, lo strumento danneggiarsi.

- Mai staccare la terra dello strumento per «farlo galleggiare»: le parti metalliche potrebbero andare in tensione.
- Per misure flottanti usare una **sonda differenziale** con categoria adeguata o un oscilloscopio con canali isolati.
- Controllare la tensione e la categoria stampate sulla sonda: vale la più bassa fra sonda e strumento.
- Per lavorare su circuiti collegati alla rete si può alimentare il circuito (non lo strumento) attraverso un trasformatore di isolamento, sapendo che questo non protegge chi tocca due punti del circuito.
- Ispezionare cavi e puntali: isolamento integro, nessun conduttore scoperto.

Attenzione. Questo taccuino è materiale di studio. Le misure su circuiti alimentati dalla rete devono essere fatte solo da persone formate, con strumenti e sonde adeguati e secondo le regole del luogo di lavoro.

11 Taratura e manutenzione

La **taratura** confronta lo strumento con un riferimento più accurato e riferibile a campioni nazionali, e documenta gli scostamenti in un certificato. Per un oscilloscopio di solito si fa ogni anno (o secondo l'intervallo indicato dal costruttore) in un laboratorio attrezzato. Si controllano almeno: accuratezza del guadagno DC su più scale, offset, banda (risposta a −3 dB con un generatore a livello costante), accuratezza della base dei tempi, sensibilità del trigger.

La **autotaratura** (self-cal) che lo strumento esegue da solo, a ingressi scollegati, compensa le derive interne di offset e guadagno: va fatta dopo il riscaldamento e quando la temperatura cambia molto, ma non sostituisce la taratura.

Tabella. Controlli da fare in laboratorio

Quando	Che cosa	Come
ogni uso	compensazione sonda	onda quadra 1 kHz interna, regolare il trimmer

Tabella. Controlli da fare in laboratorio

Quando	Che cosa	Come
ogni uso	fattore sonda e accoppiamento	menu del canale
ogni settimana	stato di cavi, puntali, clip	ispezione visiva
ogni mese o dopo sbalzi di temperatura	autotaratura	menu utilità, ingressi scollegati
ogni anno	taratura completa	laboratorio con calibratore riferibile, certificato

- Tenere libere le prese d'aria: il calore fa derivare offset e guadagno.
- Pulire lo schermo con un panno morbido appena umido, mai solventi.
- Non superare la tensione massima d'ingresso: nemmeno per un istante.
- Conservare le sonde arrotolate larghe, senza pieghe strette che rompono il conduttore centrale.
- Aggiornare il firmware solo da fonte ufficiale.

12 Esercizi con soluzione

Esercizio 1. Un oscilloscopio ha banda 200 MHz e risposta tipo Gauss. Qual è il suo tempo di salita?

Soluzione. $t_r = 0{,}35/200 \cdot 10^6 = 1{,}75$ ns.

Esercizio 2. Si vuole misurare una sinusoide da 15 MHz con errore d'ampiezza sotto il 3 %. Che banda minima serve (modello del primo ordine)?

Soluzione. Serve $f/B \le 0{,}25$: $B \ge 15/0{,}25 = 60$ MHz. Con la regola prudente «5 volte» si sceglie 75–100 MHz.

Esercizio 3. Un segnale da 1,03 MHz viene campionato a 1 MS/s. Che frequenza si vede?

Soluzione. $k = 1$; $f_{alias} = |1{,}03 - 1|$ MHz = 30 kHz.

Esercizio 4. Uno strumento ha 24 Mpunti e campiona a 1 GS/s. Qual è la base dei tempi più lenta (s/div) che mantiene 1 GS/s?

Soluzione. Tempo registrabile: $24 \cdot 10^6 / 10^9 = 24$ ms. Su 10 divisioni: 2,4 ms/div; si sceglie lo scatto disponibile subito sotto, 2 ms/div.

Esercizio 5. Su 200 mV/div, quanto vale un livello di un ADC a 8 bit? E a 12 bit?

Soluzione. Fondo scala 1,6 V. 8 bit: 1,6/256 = 6,25 mV. 12 bit: 1,6/4096 ≈ 0,39 mV.

Esercizio 6. Fronte reale da 2 ns misurato con sistema strumento+sonda da 1,5 ns complessivi. Che tempo di salita si legge?

Soluzione. $\sqrt{(2^2 + 1{,}5^2)} = \sqrt{6{,}25} = 2{,}5$ ns: errore +25 %.

Esercizio 7. Una sinusoide occupa 6 divisioni picco-picco su 2 V/div. Calcola V_p e V_{RMS}.

Soluzione. $V_{pp} = 12$ V, $V_p = 6$ V, $V_{RMS} = 6/\sqrt{2} \approx 4{,}24$ V.

Esercizio 8. Un periodo occupa 4 divisioni a 50 µs/div. Che frequenza ha il segnale?

Soluzione. $T = 4 \times 50$ µs = 200 µs; $f = 1/T = 5$ kHz.

Esercizio 9. Ingresso 1 MΩ ‖ 15 pF. Che reattanza presenta la capacità a 10 MHz? Che cosa significa?

Soluzione. $X = 1/(2\pi \cdot 10^{7} \cdot 15 \cdot 10^{-12}) \approx 1{,}06$ kΩ. A 10 MHz lo strumento non è più «1 MΩ» ma circa 1 kΩ: su un circuito ad alta impedenza il carico è pesante, da qui l'uso della sonda 10:1.

Esercizio 10. La clip di massa della sonda viene collegata al lato primario di un alimentatore switching collegato alla rete. Che cosa succede e come si doveva fare?

Soluzione. La massa della sonda è a terra: si crea un cortocircuito verso terra attraverso la sonda, con scintille e danni (e scatto del differenziale). Si doveva usare una sonda differenziale di categoria adeguata o uno strumento con ingressi isolati.

13 Glossario

Aliasing — frequenza falsa che compare quando si campiona sotto il doppio della frequenza del segnale.

Accoppiamento AC/DC — scelta se far passare o bloccare la componente continua all'ingresso.

ADC — convertitore analogico-digitale: trasforma la tensione in numeri.

Banda (–3 dB) — frequenza a cui l'ampiezza letta scende al 70,7 % di quella vera.

Base dei tempi — scala orizzontale, in secondi per divisione.

Categoria di misura (CAT) — classe IEC 61010 che indica dove lo strumento può essere collegato in base alle sovratensioni.

Compensazione — regolazione della capacità della sonda perché divida allo stesso modo a tutte le frequenze.

DSO — oscilloscopio a memoria digitale.

Fattore di attenuazione — rapporto della sonda (1:1, 10:1, 100:1).

FFT — algoritmo che calcola lo spettro (le frequenze contenute) dai campioni.

Frequenza di campionamento — campioni al secondo (S/s), per esempio 1 GS/s.

Interpolazione sin(x)/x — ricostruzione della curva fra i campioni basata su Nyquist.

Jitter — piccola incertezza nel tempo di un fronte o del trigger.

Memoria (record length) — numero di campioni salvati per acquisizione.

MSO — oscilloscopio a segnali misti, con canali logici.

Pre-trigger — parte della registrazione che precede l'istante di trigger.

Ringing — oscillazione smorzata dopo un fronte, spesso causata da massa lunga.

RMS — valore efficace: radice della media dei quadrati.

Sonda differenziale — sonda che misura fra due punti isolati da terra.

Tempo di salita — tempo fra il 10 % e il 90 % di un fronte.

Tempo morto — tempo fra due acquisizioni in cui lo strumento non osserva il segnale.

Trigger — evento che fissa il «tempo zero» e rende l'immagine stabile.

Volt/divisione — scala verticale dello schermo.

14 Fonti

Le fonti sono elencate qui sotto con i collegamenti. I valori numerici del taccuino sono stati controllati sui documenti dei costruttori e delle norme indicati; i datasheet cambiano nel tempo, quindi per un modello preciso fa fede il documento più recente del costruttore. Il testo è scritto da zero, senza copiare le fonti.

Fonti e letture

· Tektronix, XYZs of Oscilloscopes — guida introduttiva del costruttore — https://www.tek.com/en/documents/primer/oscilloscope-basics

· Tektronix, How is bandwidth related to rise time? — costante K fra 0,35 e 0,45 — https://www.tek.com.cn/support/faqs/how-bandwidth-related-rise-time-oscilloscopes

· Fluke, Relationship between oscilloscope bandwidth and rise time — regola della banda 5 volte — https://fluke.com/en-in/learn/blog/oscilloscopes/what-is-the-relationship-between-oscilloscope-bandwidth-and-waveform-rise-time

· Keysight, Evaluating Oscilloscope Fundamentals — nota applicativa — https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-02782/application-notes/5989-8064.pdf

· Fluke, Safe test tools for real-world use — categorie di misura CAT — https://www.fluke.com/en/learn/blog/safety/safe-test-tools-real-world-use

· Measurement category — riassunto delle categorie IEC 61010 — https://en.wikipedia.org/wiki/Measurement_category

· IEC 61010-1, -031, -2-030 — sicurezza di strumenti di misura, sonde e circuiti di prova — https://webstore.iec.ch

· C. E. Shannon, Communication in the presence of noise — Proc. IRE, 1949: teorema del campionamento

· JCGM 200 (VIM) — vocabolario internazionale di metrologia — https://www.bipm.org/en/committees/jc/jcgm/publications

Appunti presi dalle fonti citate, a scopo divulgativo, gratuiti, pubblicati su sandrofeudo.com. Non serve a fare diagnosi né a usare apparecchi su persone. Puoi stamparlo e condividerlo citando la fonte.