

Esperienza 2: Digitalizzazione di un segnale proveniente dal sensore di temperatura LM35 mediante flash ADC sotto forma di termometro a LED

Laura Francesca Iacob, Sara Pieri, Sara Schippa
 Università degli Studi di Perugia, CdL in Fisica

Anno Accademico 2024/2025

Estratto: Una componente fondamentale dei sistemi di acquisizione dati (DAQ) è l'Analog to Digital Converter (ADC), il quale opera una digitalizzazione del segnale che originariamente è di tipo analogico.

Dopo aver verificato il funzionamento del sensore di temperatura LM35, si costruisce un flash ADC a quattro canali contrassegnati da LED mediante una combinazione opportuna di partitori resistivi e comparatori e lo si impiega per digitalizzare una variazione termica.

Keywords: sensore di temperatura, flash ADC, canali, segnale digitale, LED

1 Introduzione teorica

Il segnale si definisce come una grandezza fisica variabile nel tempo a cui è associata un'informazione. Il sistema per rilevare, acquisire e memorizzare la variazione di tale grandezza è il Data Acquisition system (DAQ).

In origine, solitamente, i segnali sono quantità analogiche, ovvero sono associati a variazioni di ampiezza continue in un tempo anch'esso continuo. Una moltitudine di sistemi elettronici agiscono sui segnali attraverso componenti hardware che lavorano in digitale, ovvero codificati in una serie di bit. Per questo motivo, oggi è necessario utilizzare dei meccanismi che permettano la conversione tra analogico e digitale.



Figure 1: Schematizzazione di un semplice sistema di acquisizione dati.

Il più semplice DAQ (Figure 1) è formato da componenti che manipolano opportunamente il segnale in ingresso per prepararlo ad una successiva elaborazione. Uno dei componenti essenziali è proprio Analog-to-Digital Converter (ADC), il quale “collabora” con il sistema Sample and Hold (S&H). La digitalizzazione prevede un primo campionamento del segnale in entrata attraverso un processo di discretizzazione della scala dei tempi ed una successiva quantizzazione dell'ampiezza in segnali discreti.

Il campionamento del segnale a livello temporale ($x(t) \rightarrow x[t]$) è solitamente scandito da intervalli regolari individuati dal *sampling rate* o frequenza di campionamento. La suddetta (1) si definisce come l'inverso della distanza tra due campionamenti del segnale analogico ΔT_c , che rappresenta il tempo che passa tra due campionamenti adiacenti.

$$f_c(\text{Hz}) = \frac{1}{\Delta T_c(s)} \quad (1)$$

La discretizzazione dell'ampiezza conclude il processo di quantizzazione: i valori di ampiezza derivati dal campionamento vengono associati ad una scala di valori prefissati.

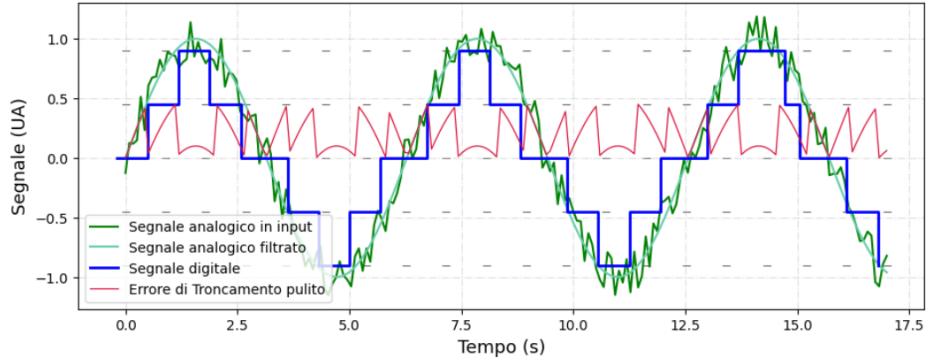


Figure 2: Segnale sottoposto ad un processo di digitalizzazione.

La bontà del meccanismo descritto è espressa dalla *risoluzione*, parametro che indica la più piccola variazione che il sistema costruito riesce a percepire. Questo dipende dal numero di canali dell'ADC (solitamente di ampiezza costante K), ovvero gli n intervalli in cui il range massimo di valori considerato è stato suddiviso.

Con questa assunzione, ipotizzando di avere a che fare con una differenza di potenziale, il voltaggio associato al canale di ADC i-esimo viene rappresentato da (2), dove V_0 indica il valore di riferimento.

$$V_i = Ki + V_0 \quad (2)$$

Di fatto, l'ADC è un classificatore, dato che il segnale in ingresso viene *classificato*, nel canale i-esimo sulla base della relazione (3).

$$V_{i-1} < V_x < V_i \quad (3)$$

La risoluzione è un ulteriore parametro capace di valutare la qualità della digitalizzazione del segnale, dato che si tratta necessariamente di un procedimento che provoca almeno una parziale perdita di informazione. L'errore commesso, inferiore alla risoluzione e riducibile mediante l'incremento del numero di canali, dipende dal metodo di assegnazione dei valori, che può avvenire per troncamento o per arrotondamento.

1.1 Flash ADC

Il *flash ADC* è un analog-to-digital converter che opera la digitalizzazione attraverso il confronto con un valore di soglia precedentemente impostato dal costruttore.

Per realizzare una componente elettronica capace di compiere questa operazione si può utilizzare un amplificatore operazionale sotto forma di **comparatore**. Il comparatore (Figure 3, sinistra) è un oggetto il cui scopo è quello di mettere a confronto il segnale in ingresso con uno di riferimento. Questo dell'operazionale sfrutta la saturazione in modalità di open loop causata dall'alimentazione V_{cc}^\pm (Figure 3, destra).

$$\begin{aligned} \text{If } V_{in} > V_{ref} &\Rightarrow V_{out} \rightarrow V_{cc}^+ \\ \text{If } V_{in} < V_{ref} &\Rightarrow V_{out} \rightarrow V_{cc}^- \end{aligned}$$

La zona in cui l'op-amp è lineare è molto piccola, pertanto farà uscire un segnale saturato negativo se quello in ingresso è minore della soglia, positivo nel caso opposto.

La tensione esemplare può essere riferita in varie modalità, tra cui anche usando un partitore (Figure 3), per cui si ricava il valore di riferimento come nella relazione (4).

$$V_{ref} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{cc} \quad (4)$$

Il più piccolo flash ADC è costituito da un **canale unico**, come in Figure 4 che contempla il montaggio di un LED per la visualizzazione diretta dell'operazione di comparazione. Il partitore funge da tensione di riferimento per il canale invertente dell'amplificatore, mentre quello non-invertente riceve il segnale in ingresso sottoposto a confronto.

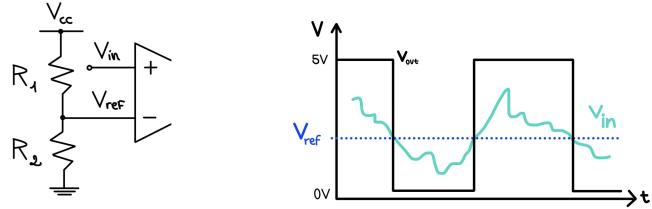


Figure 3: Comparatore con partitore (sinistra) e grafico $V(t)$ (destra).

L'alimentatore funge da V_{cc}^+ per il funzionamento dell'op-amp, ma permette anche di definire la differenza di potenziale ai capi del partitore. Dato che l'amplificatore non funziona correttamente in modalità unipolare, si rende necessaria anche una alimentazione negativa V_{cc}^- , collegata opportunamente. Avendo questi il ruolo di delimitare la saturazione del segnale in uscita, vengono affibbiati i valori standard di 5V e 0V rispettivamente a rappresentare l'*1* e lo *0 logico* (Paragraph 4).

Il funzionamento corretto del comparatore è permesso dalla *resistenza di pull up* R_3 , si analizzano gli scenari possibili ed il suo contributo. Senza perdita di generalità, si consideri di alimentare il circuito a 0V e 5V. Nel caso in cui il segnale inserito sia minore di quello di riferimento, il comparatore porta a saturazione l'uscita a 0V. La differenza di potenziale tra i punti A e B sarà nulla ed il LED spento, mentre quella tra C e B sarà proprio 5V, dissipata dalla resistenza in questione. Viceversa, nel caso di output saturato a 5V, la tensione ricadrà sul tratto B-A e accenderà la luce.

La presenza del LED nel circuito richiede ulteriori accorgimenti. A questo, dipendentemente dal colore della radiazione luminosa che emette, è associata una caduta di potenziale specifica. Per non compromettere la sua performance, si ricorda che la sua zona di funzionamento in corrente (*forward bias*) si trova nell'intervallo di 5-20mA. Si calcola di conseguenza il valore che deve assumere la resistenza di protezione r (Paragraph 4) per evitarne il danneggiamento.

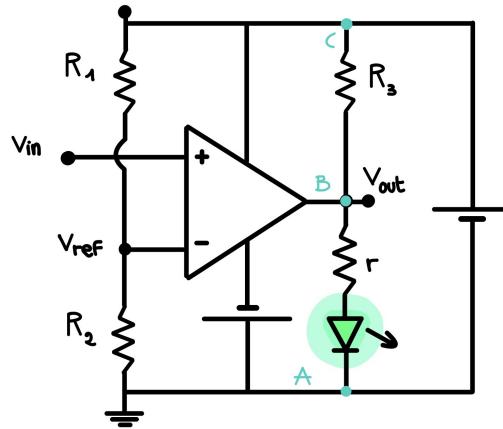


Figure 4: Schematics flash ADC ad un solo canale con LED.

Il *Light Emitting Diode*, o più semplicemente **LED**, è un diodo capace di emettere luce. Costruito esattamente come un diodo mediante una giunzione pn, ritrova la sua peculiarità nel materiale semiconduttore in uso nei due sistemi di droggaggio (solo alcuni materiali, come l'arsenurio di gallio GaAs, possono generare il fenomeno).

I diodi riescono ad emettere luce solo nella condizione particolare in cui alcuni elettroni, invece di scorrere seguendo la caduta di tensione, prendono posto nelle lacune della giunzione p, emettendo un fotone. Quantisticamente questo meccanismo si verifica quando il minimo della banda di conduzione ed il massimo della banda di valenza corrispondono alla stessa quantità di moto k , separati da un gap di energia corrispondente al fotone che dopo verrà generato.

2 Materiali e strumentazione

Il video che mostra l'accensione dei LED e ulteriori materiali inerenti sono disponibili presso la cartella *Drive* in collegamento ipertestuale.

In laboratorio è stata adoperata la strumentazione seguente:

- alimentatore DC Siglent SPD3303C;
- multmetro digitale RS Pro RS-12;
- amplificatore operazionale 741;
- sensore di temperatura LM35;
- resistori e LED;
- basetta sperimentale e cavi di collegamento.

3 Verifica funzionamento del sensore LM35

Il sensore di temperatura LM35 è un componente elettronico che permette di quantificare l'aumento della temperatura a cui è soggetto attraverso un aumento di tensione ai suoi capi. La legge che descrive tale incremento è lineare (Figure 5), dal momento che si sa, grazie ai dettagli riportati dal costruttore, che per ogni grado centigrado la tensione in uscita guadagna 10mV.

Dal datasheet sono note anche le soglie di temperatura a cui è possibile sottoporre il componente ($-55 \div 150$)°C e i limiti di voltaggio in alimentazione che può sopportare (4÷30)V nel caso in cui venga collegato in maniera opportuna.

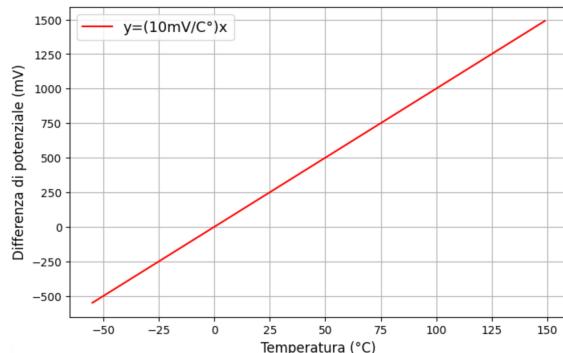


Figure 5: Andamento lineare teorico fornito dell'LM35.

In primis, si verifica il corretto funzionamento del sensore di temperatura in dotazione (LM35), montandolo singolarmente sulla breadboard, alimentandolo e osservando i cambiamenti di tensione (e quindi di temperatura) tramite un multmetro digitale.

La suddetta osservazione preliminare è stata importante per le successive fasi, dal momento che conoscere l'intervallo di temperatura raggiungibili dall'LM35 ha permesso di determinare la struttura circuitale adatta per la costruzione dell'ADC (Paragraph 4); è infatti necessario impostare dei valori soglia (V_{ref}) che la tensione in ingresso (cioè ai capi dell'LM35) deve raggiungere affinché i LED si accendano.

Essendosi l'esperienza protratta per diversi giorni, l'operazione è stata ripetuta più di una volta dal momento che il sensore di temperatura è estremamente sensibile alla temperatura ambientale.

Nel primo tentativo compiuto, l'alimentazione è stata impostata a 5V, e la temperatura percepita è partita da circa 27°C (272mV), fino a raggiungere in qualche secondo un massimo di circa 35°C (351mV, con una sensibilità di 1mV).

Le modalità adottate di raffreddamento e riscaldamento del sensore di temperatura, seppur rudimentali, hanno permesso di estendere l'intervallo utilizzabile di tensione. La diminuzione della temepratura è stata operata per mezzo di un ventaglio, mentre per il suo incremento si è sfruttato il calore emesso da una bottiglia di acqua bollente, o da un bicchierino di caffè (Figure 6).



Figure 6: Manipolazione temperatura: ventaglio (sinistra), acqua calda (centro), caffè (destra).

4 Metodo sperimentale

Si è costruito un flash ADC utilizzando quattro amplificatori operazionali, uno per ciascun canale di digitalizzazione. Lo schematics è rappresentato in Figure 7.

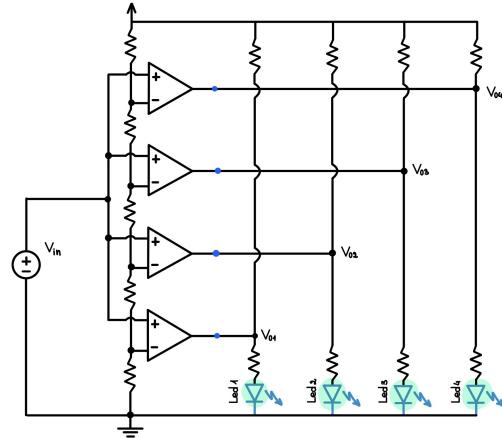


Figure 7: Schematics flash ADC a quattro canali.

La realizzazione del circuito, ovvero la scelta delle resistenze in uso, ha richiesto uno studio preliminare che tenesse conto dei LED a disposizione e dei valori di tensione raggiungibili dal sensore al variare della temperatura.

In primo luogo, si sceglie di utilizzare un'alimentazione comune agli amplificatori in modo tale da avere una saturazione a 5V, in quanto rappresentante uno standard dell'elettronica. Dopo aver montato il circuito, quindi, si simula con una alimentazione ulteriore una tensione tale da raggiungere la saturazione positiva e si regola l'alimentazione comune di conseguenza, aspettando di ottenere un valore effettivo erogato poco superiore a 5V. Si ripete lo stesso procedimento per V_{cc}^- , in modo tale da raggiungere una saturazione negativa a 0V.

Avendo utilizzato LED di colore giallo, corrispondenti ad una differenza di potenziale di circa 1.8V, si sceglie una resistenza da 1500Ω in modo che la corrente passante attraverso i diodi non ne provochi il danneggiamento.

Si stima che le resistenze di pull up necessarie debbano essere dell'ordine del $k\Omega$, per cui se ne utilizzano quattro identiche da 1100Ω , una per ogni ramo.

Avendo deciso di impiegare un'alimentazione da 5V, si calcolano di conseguenza i valori da assegnare al partitore resistivo, usando una resistenza in cima al tratto da $12k\Omega$. Si risolve il sistema (5) impostando una soglia iniziale da 270mV ed una risoluzione di 2 gradi per ciascun canale a LED.

$$\begin{cases} R = 12000 + 3y + x \\ \frac{5x}{R} = 0,020 \\ \frac{5y}{R} = 0,270 \end{cases} \quad \text{dove } R := \sum_{i=1}^5 R_i \quad (5)$$

Ponendo le resistenze intermedie $R_2 = R_3 = R_4 =: y$ e quella di soglia iniziale $x = R_1$, si stimano dei valori pari a $x \simeq 58\Omega$ e $y \simeq 777\Omega$.

Si è costruito il flash ADC seguendo lo schema riportato in Figure 7, ossia un sistema a quattro canali, costituito da altrettanti op-amp utilizzati come comparatori, ciascuno collegato al rispettivo ramo con LED (con resistenza di controllo r) e resistenza di pull up.

Ciascun op-amp è stato collegato, in corrispondenza del pin non invertente, al V_{out} del sensore di temperatura, a rappresentare il valore di tensione da “comparare”, mentre al pin invertente è stato assegnato il valore di soglia impostato con il rispettivo partitore resistivo.

In definitiva, la metodologia sperimentale adottata permetterebbe, all'aumentare della tensione rilevata dal sensore di temperatura, di visualizzare un'accensione dei quattro LED in maniera consequenziale, rispettivamente a circa 27°C, 29°C, 31°C, 33°C. Questo sta a significare che il segnale in entrata per ogni op-amp, avendo superato il valore soglia impostato, è stato amplificato dall'operazionale fino al raggiungimento della saturazione positiva (in corrispondenza del V_{cc}^+) che rappresenta l'*1 logico* della digitalizzazione del segnale.

5 Discussione dei risultati

Seguendo la discussione preliminare, in un primo momento è stato costruito un circuito utilizzando i valori di resistenze e di alimentazione riassunti nella Figure 8 (I°).

Questa configurazione ha generato dei problemi nel raggiungimento dell'obiettivo, in quanto, anche nel caso di tensione nulla in ingresso, si verificava un'accensione contemporanea di tutti i LED. Per individuare la ragione del malfunzionamento, è stata svolta una verifica mediante misura diretta con voltmetro ai capi degli elementi circuituali.

Si è osservato che il raggiungimento dell'*1 logico* era in linea con la tensione in uscita dell'amplificatore, giunto a saturazione in corrispondenza di V_{cc}^+ nonostante in ingresso la differenza di potenziale fosse nulla e, di conseguenza, sotto qualsiasi soglia impostata. Nel tentativo di promuovere il funzionamento del circuito, si è variata l'alimentazione positiva e si è verificato, una volta raggiunti i 10V, il risultato richiesto. L'ingresso nullo a confronto con i valori di soglia (modificati a causa dell'aumento della tensione) non ha prodotto luce. Montando il sensore di temperatura e riscaldandolo fino ad arrivare al primo valore di riferimento, il primo LED si è acceso.

L'aumento dell'alimentazione per il corretto funzionamento del flash ADC ha richiesto un nuovo studio dei valori di resistenza, necessari a definire le tensioni di soglia adeguate per il sensore di temperatura in uso. I valori di riferimento sono riassunti in Figure 8.

| | Partitore resistivo | | | V_{cc+} | V_{cc-} | V_o | V_{step} |
|-----|---------------------|-----------|-------|-----------|-----------|--------|------------|
| I° | 12kΩ | (3x) 56 Ω | 680 Ω | 5V | 1V | 270 mV | 20 mV |
| II° | 22kΩ | (3x) 56 Ω | 546 Ω | 11V | 2V | 261 mV | 24 mV |

Figure 8: Tabella riassuntiva delle due configurazioni circuitali analizzate

Procedendo con le modifiche descritte e aumentando opportunamente la temperatura dell'LM35 (Figure 6), si osserva il fenomeno ricercato: come illustrato nella progressione delle immagini in Figure 12, i LED si accendono quando la tensione registrata dal sensore raggiunge i valori soglia prestabiliti (Figure 11).

L'accensione dei LED è un meccanismo che permette di digitalizzare il segnale a livello visivo. La realizzazione di un video dell'operato ha permesso di individuare l'andamento dell'acquisizione del segnale su una scala dei tempi nota.

In Figure 9 è possibile visualizzare una rappresentazione del processo, permettendo di estrarre il segnale digitalizzato in Figure 10. Si mostra l'errore commesso rispetto al segnale in ingresso come differenza tra questo e quello digitale, che assume significato solo una volta raggiunta la prima soglia.

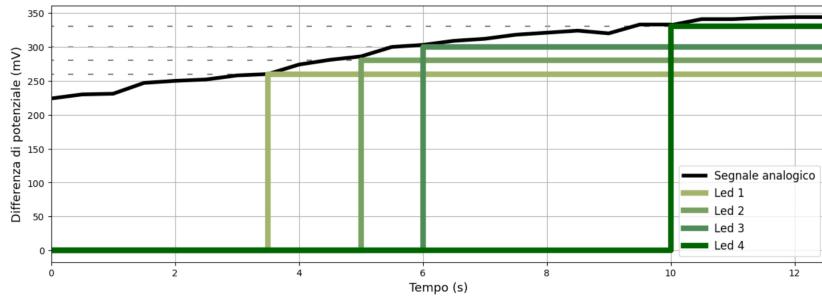


Figure 9: Digitalizzazione mediante LED del segnale in ingresso del sensore di temperatura.

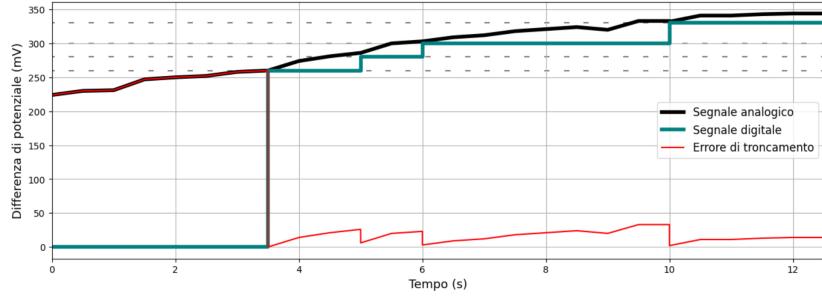


Figure 10: Segnale digitalizzato estratto ed errore commesso mediante troncamento.

6 Conclusioni

In definitiva si può affermare che, nonostante non si sia individuata la causa dei problemi tecnici riscontrati, il flash ADC è stato costruito correttamente apportando delle semplici modifiche degli elementi circuitali. Inoltre, si è osservata un'effettiva digitalizzazione del segnale, dal momento che tutti i LED si sono accesi al raggiungimento dei valori soglia prestabiliti.

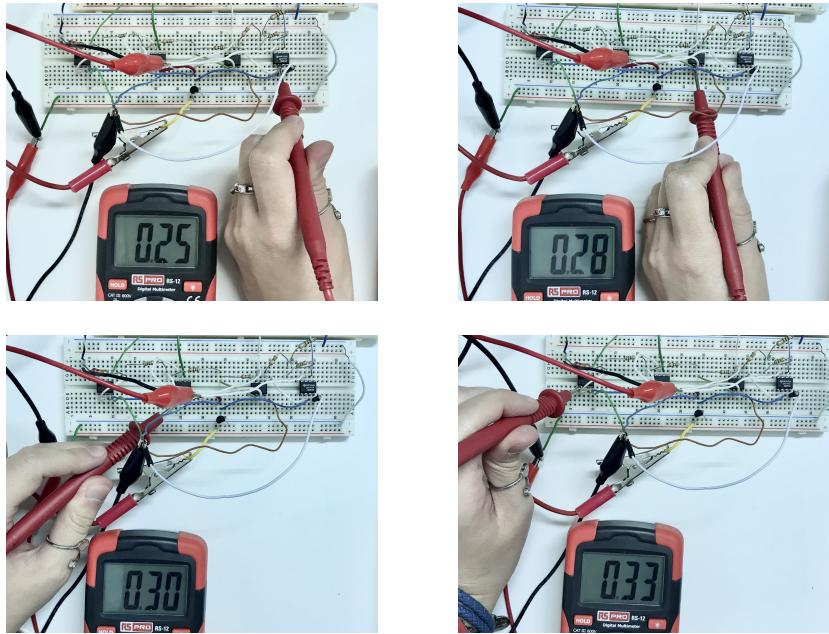


Figure 11: Tensioni di riferimento ai capi invertenti di ciascun amplificatore.

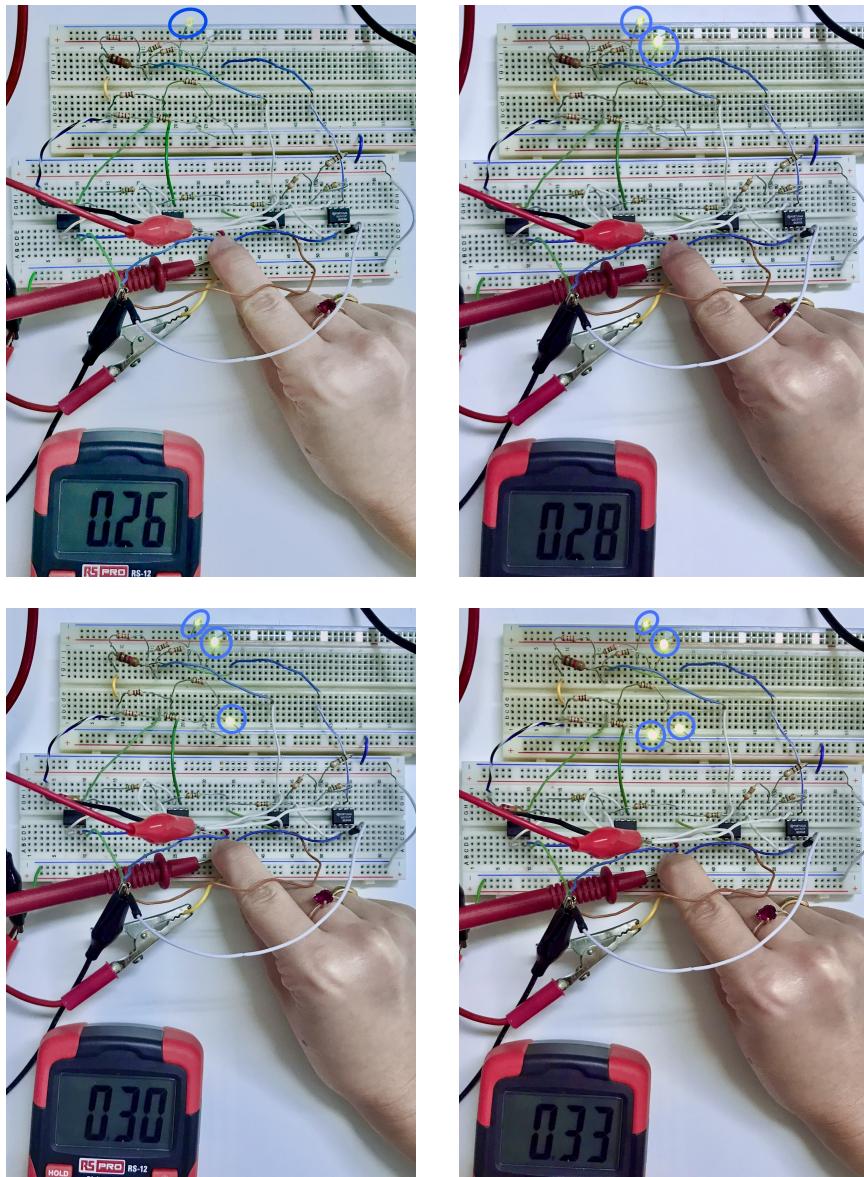


Figure 12: Accensione dei LED in sequenza a tensione crescente e visualizzazione con voltmetro digitale del raggiungimento dei valori di soglia.

Riferimenti

1. Duranti, M.; Laboratorio di elettronica e Tecniche di acquisizione dati. Università degli Studi di Perugia, 2024. Dispense online: https://www.fisgeo.unipg.it/~duranti/laboratoriodue/laboratorioele_24-25.html.
2. Millman, J.; Grabel, A.; Microelectronics. International Edition, Second Edition.
3. Shlezinger N.; Amar A.; Luijten B.; Van Sloun R.; Eldar Y; Deep Task-Based Analog-to-Digital Conversion. Electrical Engineering and Systems Science, 2022. Disponibile online: <https://arxiv.org/pdf/2201.12634.pdf>.
4. Arrow Company, 2023. Disponibile online: <https://www.arrow.com/en/research-and-events/articles/engineering-resource-basics-of-analog-to-digital-converters>.