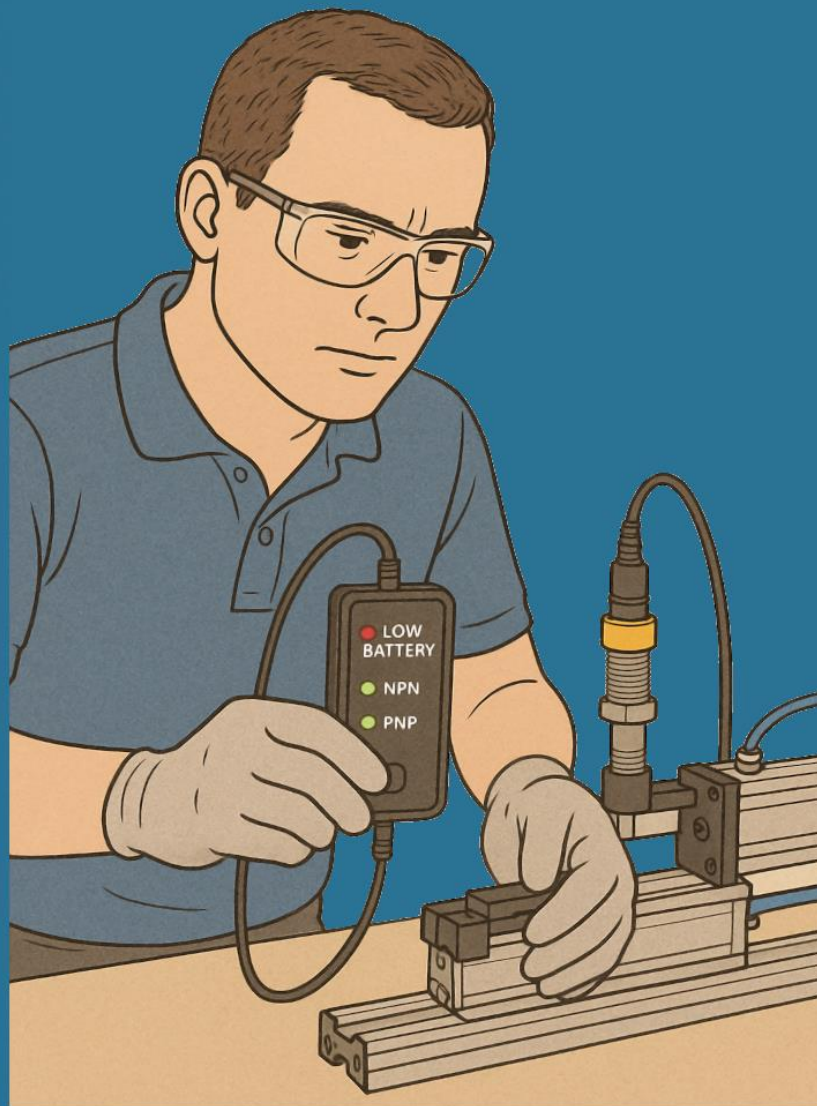


Tester per sensori NPN/PNP guida pratica alla realizzazione



Leonardo Chieco

Tester per sensori NPN/PNP

guida pratica alla realizzazione

Questo articolo presenta la progettazione completa di un tester per sensori industriali di tipo NPN e PNP, alimentato tramite due batterie da 9 V e dotato sia di funzioni di protezione sia di monitoraggio dello stato di carica. Il dispositivo nasce dall'esigenza, comune in ambito hobbistico, didattico e professionale, di disporre di uno strumento semplice e affidabile che permetta la verifica immediata del funzionamento dei sensori. Il circuito proposto è modulare e suddiviso in tre sezioni principali: il tester vero e proprio, che consente di identificare la tipologia del sensore e visualizzarne l'attivazione tramite LED; un limitatore di corrente progettato per proteggere sia il sensore sia il tester da possibili cortocircuiti o errori di cablaggio; e infine un indicatore di stato della batteria che permette all'utente di sapere quando la tensione di alimentazione sta scendendo al di sotto della soglia operativa.

Durante la fase di progettazione sono state utilizzate diverse simulazioni in LTspice per valutare accuratamente il comportamento del circuito nelle diverse condizioni operative.

Buona lettura!

L'autore

Leonardo Chieco è un ingegnere elettronico con oltre 20 anni di esperienza nella progettazione e sviluppo di software per il controllo dell'automazione (PC/PLC), nella progettazione di schede elettroniche per applicazioni industriali, firmware, robotica e mecatronica.

LinkedIn: <https://www.linkedin.com/in/leonardo-chieco-53550b129/>

1. Introduzione

La diffusione sempre più ampia dei sensori NPN e PNP in ambito industriale, hobbistico e didattico rende fondamentale poter disporre di strumenti semplici e affidabili per verificarne rapidamente il funzionamento. In molti contesti, dalla manutenzione di macchinari alla realizzazione di prototipi, fino alle esercitazioni nei laboratori scolastici, diventa estremamente utile avere un piccolo tester portatile capace di identificare la tipologia del sensore, verificarne la risposta e segnalare eventuali anomalie, senza dover ricorrere a strumenti più complessi.

L'idea alla base del dispositivo è quella di ottenere un sistema compatto, robusto e facilmente utilizzabile anche da utenti non esperti, ma allo stesso tempo progettato con metodologie rigorose e validato mediante simulazioni elettroniche di dettaglio. Il cuore del progetto è rappresentato dal tester vero e proprio, una piccola rete di transistor e resistenze che permette di determinare in modo immediato se un sensore è di tipo NPN o PNP e se lo stesso sta effettivamente commutando. Due LED distinti forniscono un'indicazione visiva chiara, eliminando ogni possibilità di ambiguità.

Quando si lavora con sensori industriali, soprattutto in contesti non controllati, può capitare di invertire i collegamenti, creare cortocircuiti accidentali o collegare dispositivi non perfettamente funzionanti. Un errore banale può danneggiare il tester o il sensore stesso. Per evitare questo rischio, il circuito integra una protezione attiva che limita la corrente massima erogata, assicurando che anche in caso di guasto non si superino condizioni potenzialmente pericolose. Lo stadio è stato progettato in modo da intervenire in modo progressivo e le simulazioni in LTspice hanno permesso di verificarne in dettaglio l'andamento della corrente in funzione del carico.

Poiché il dispositivo è alimentato da due batterie da 9 V poste in serie, è fondamentale sapere quando la tensione sta scendendo al di sotto di una soglia utile compromettendo il funzionamento del tester. Per evitare ciò, è stato realizzato un indicatore visivo basato su un transistor e un diodo Zener, in grado di accendere un LED quando la tensione scende oltre un certo valore. Un

approccio semplice, affidabile e privo di integrati complessi, perfettamente in linea con la filosofia progettuale dell'intero sistema.

Ciascuno di questi stadi verrà analizzato nel dettaglio, mostrando schemi elettrici, spiegando le scelte progettuali, illustrando i risultati delle simulazioni e discutendo criticità e margini di ottimizzazione. L'obiettivo non è solo presentare un circuito funzionante, ma anche accompagnare il lettore attraverso un vero e proprio percorso di progettazione elettronica, ricco di esempi concreti e ragionamenti tecnici ma presentati con un linguaggio chiaro e discorsivo.

2. Sensori industriali: cosa sono e come si classificano

In automazione industriale (ma non solo), i sensori sono dispositivi che rilevano una grandezza fisica, come la presenza di un oggetto, la distanza, un movimento, una posizione, e la trasformano in un segnale elettrico utile per pilotare comandi, contatori, logiche di controllo, PLC, CNC, ecc. Ad esempio, un sensore di prossimità (“proximity sensor”) può rilevare che un pezzo è arrivato in un punto della linea, e segnalare al controllore “oggetto presente / oggetto non presente” per far partire un’azione.

Quando il sensore fornisce un’uscita digitale (stato ON / OFF, “oggetto rilevato / non rilevato”), una fondamentale distinzione tecnica riguarda come viene generato elettricamente questo segnale. Le due configurazioni più comuni sono note come PNP e NPN.

Sensore “PNP” (uscita positiva / “sourcing”)

In un sensore PNP, quando viene attivato, l’uscita viene portata al potenziale positivo di alimentazione (V+). In pratica: il sensore “fornisce” corrente positiva al carico.

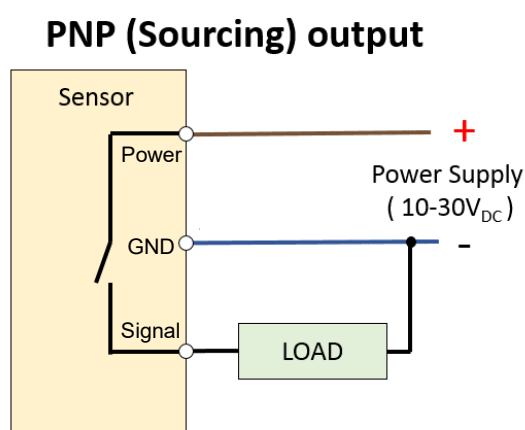


Figura 1: Sensore PNP

Viene spesso chiamato sensore di tipo “sourcing” (fornisce corrente).

Questo tipo di uscita risulta comodo quando l’ingresso del controllore o del PLC è predisposto per rilevare un “livello alto” di tensione (positivo) come segnale attivo.

Sensore “NPN” (uscita negativa / “sinking”)

In un sensore NPN, all'attivazione l'uscita viene portata a massa (0 V), cioè il sensore “chiude a massa” il circuito. In pratica: il carico è collegato al positivo di alimentazione, e il sensore lo collega a massa quando si attiva.

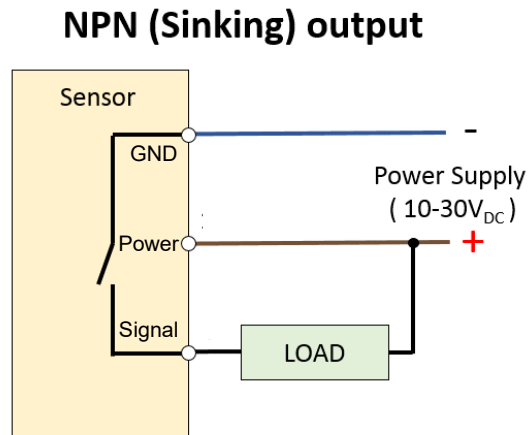


Figura 2: Sensore NPN

Si parla in questo caso di sensore di tipo “sinking” poichè assorbe corrente verso massa.

Quando l'uscita del sensore è NPN, l'ingresso del PLC o del dispositivo di controllo deve essere configurato per “aspettarsi” un segnale che va a massa per essere considerato attivo.

Il fatto di avere due tipi di uscita (PNP e NPN) riflette esigenze e vincoli pratici nei sistemi di automazione. Alcune logiche di controllo (PLC, moduli I/O, controllori) sono progettate per lavorare con segnali “positivi” (PNP), altre con segnali “verso massa” (NPN). Se si usasse l'uscita sbagliata, l'ingresso non rileverebbe correttamente lo stato del sensore. In contesti industriali europei e nord-americani, l'uso di PNP è spesso prevalente, cioè si tende a usare sensori con uscita positiva.

Alcuni sensori sono offerti in versione “PNP o NPN” per consentire flessibilità a seconda dell'impianto: ovvero lo stesso tipo di sensore (es. un sensore di prossimità) può essere cablato come PNP oppure NPN.

In genere le uscite dei sensori (sia PNP che NPN) sono progettata per tensioni e correnti modeste, quindi non pensati per pilotare direttamente attuatori “pesanti” (motori, grosse elettrovalvole...), ma per inviare un segnale di controllo (input a PLC, ingresso logico, relè intermedio, ecc.).

Le uscite dei sensori, a prescindere dalla configurazione circuitale (NPN o PNP), possono essere di tipo "Normally Open (NO)" o "Normally Closed (NC)". Queste definizioni indicano lo stato "a riposo" dell'interruttore elettronico interno al sensore (schematizzato nelle figure precedenti), ovvero il suo stato quando non viene rilevato alcun oggetto.

Nel caso di un'uscita NC, l'interruttore è normalmente chiuso. Questo significa che, nello stato a riposo (senza rilevamento), la linea del segnale di uscita è già collegata (a VCC o GND, a seconda che sia PNP o NPN) e fornisce un segnale attivo. L'interruttore si apre solo quando il sensore si attiva, ad esempio in presenza di un oggetto rilevato, interrompendo così il segnale di uscita.

In un sensore con uscita NO, l'interruttore è normalmente aperto. Pertanto, nello stato a riposo, la linea del segnale è flottante (disconnessa). L'interruttore si chiude e il segnale di uscita viene attivato (collegandosi a VCC o GND) solamente quando il sensore si attiva in seguito al rilevamento di un oggetto.

Spesso i sensori destinati a funzioni di sicurezza sono di tipo Normally Closed (NC). Questo perché la logica NC garantisce un comportamento “fail-safe”: in caso di guasto, il sistema passa automaticamente allo stato sicuro.

Ad esempio, un sensore di troppo pieno installato su una vasca dovrebbe essere configurato come NC. In questo modo, se il sensore si guasta, il cavo si interrompe o viene tranciato, il PLC smette di ricevere il segnale di continuità e interpreta la situazione come “vasca piena”. Di conseguenza interrompe l'alimentazione del liquido, evitando il rischio di traboccamento.

3. Progettiamo un tester per sensori

In questo capitolo affrontiamo la progettazione completa del circuito di test per sensori NPN e PNP, descrivendone la logica di funzionamento e le scelte tecniche alla base di ciascuno stadio. L'obiettivo è ottenere un dispositivo semplice, robusto e utilizzabile in ambito didattico o industriale per verificare rapidamente il corretto funzionamento dei sensori e la loro tipologia.

La progettazione sarà supportata da simulazioni eseguite con LTspice, indispensabili per validare ogni blocco funzionale, analizzare le correnti nei vari rami e verificare il comportamento del circuito in diverse condizioni operative.

Il sistema è strutturato in tre stadi principali:

1. **Tester vero e proprio**, responsabile del riconoscimento della tipologia del sensore e dell'attivazione dei LED indicatori.
2. **Limitatore di corrente**, necessario per proteggere il circuito e il sensore in caso di cortocircuiti accidentali.
3. **Controllo dello stato di carica delle batterie**, che permette di monitorare la tensione di alimentazione e avvisare l'utente quando è necessario sostituire le batterie.

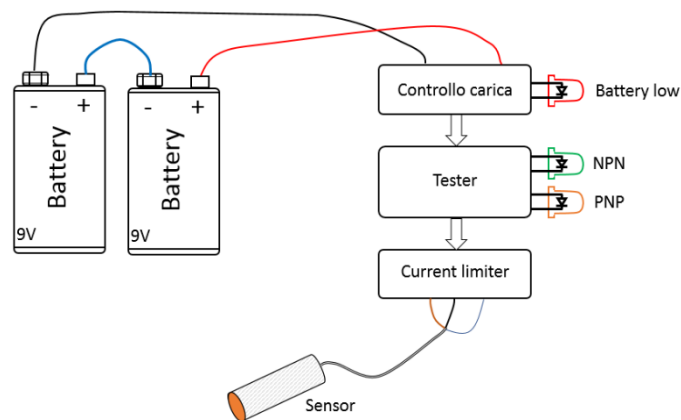


Figura 3: Schema concettuale del circuito

Nei paragrafi che seguono analizzeremo nel dettaglio ogni sezione, mostrando come le scelte circuitali siano state validate tramite simulazione e come sia

possibile ottimizzarne il comportamento in funzione delle condizioni operative previste.

Stadio limitazione corrente

Uno stadio limitatore di corrente realizzato con due transistor BJT NPN è una soluzione semplice ed efficace per impedire che il sensore assorba una corrente superiore a una soglia prefissata. Il principio di funzionamento si basa sul monitoraggio della caduta di tensione ai capi di una piccola resistenza di sense (R_{sense}), attraverso la quale scorre la corrente da limitare.

Lo stadio è tipicamente composto da:

1. Transistor principale (Q_1): è il dispositivo che fornisce corrente al carico.
2. Transistor di controllo (Q_2): è dedicato alla rilevazione della corrente. Il suo compito è intervenire quando la caduta sulla R_{sense} supera una soglia ($\sim 0,6-0,7$ V).
3. Resistenza di sense (R_{sense}): posta solitamente sull'emettitore di Q_1 .

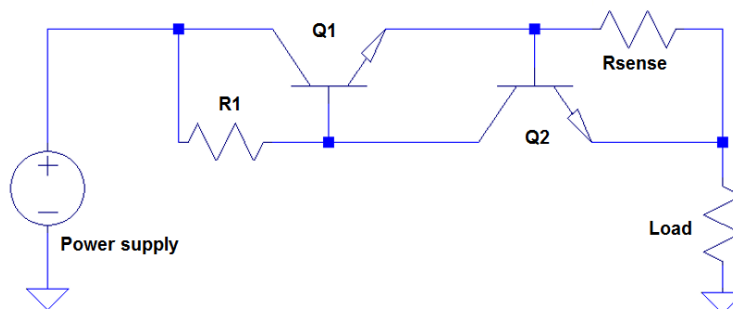


Figura 4: Tipico stadio limitatore di corrente

Quando la corrente assorbita dal carico è bassa o entro i limiti, la caduta di tensione su R_{sense} è insufficiente per polarizzare la giunzione base-emettitore di Q_2 . In questa condizione, Q_2 rimane interdetto e non influisce sul funzionamento di Q_1 : il circuito funziona normalmente, fornendo al carico la corrente richiesta.

Quando la corrente aumenta e genera una caduta su R_{sense} pari alla tensione di attivazione di Q_2 (circa 0,65 V), Q_2 entra in conduzione. A questo punto Q_2 preleva corrente dalla base di Q_1 , sottraendola al pilotaggio principale.

Il risultato è che Q_1 non può più aumentare la corrente verso il carico, perché la sua corrente di base viene limitata dall'azione di Q_2 : il transistor principale entra in una sorta di saturazione controllata o regime di corrente limitata.

La soglia di intervento è determinata da:

$$I_{LIM} = \frac{V_{BE,Q_2}}{R_{SENSE}}$$

dove V_{BE,Q_2} vale tipicamente 0,65 V.

Ad esempio, se $R_{SENSE} = 2.2 \Omega \rightarrow I_{LIM} \approx \frac{0.65 V}{2.2 \Omega} \approx 300 \text{ mA}$.

Osserviamo che la potenza che deve dissipare R_{SENSE} vale:

$$P_{R_{SENSE}} = R_{SENSE} \cdot I_{LIM}^2 = 2.2 \Omega \cdot (300 \text{ mA})^2 = 0.2 \text{ W}$$

La potenza che deve dissipare il transistor Q_1 non è trascurabile. Infatti, più il carico diminuisce, a parità di corrente (limitata), più la V_{CE,Q_1} aumenta.

Ricordiamo che, secondo la legge di Ohm, la tensione in uscita vale:

$$V_{LOAD} = R_{LOAD} \cdot I_{LIM}$$

Quindi, se I_{LIM} rimane costante e R_{LOAD} diminuisce, si abbassa anche V_{LOAD} e questo porta ad un aumento di V_{CE,Q_1} .

Come condizione limite possiamo stimare che:

$$P_{Q_1} = V_{CE_{MAX}, Q_1} \cdot I_{LIM} < 18 \text{ V} \cdot 0.3 \text{ A} = 5.4 \text{ W}$$

Ipotizzando di utilizzare un transistor con case TO220, calcoliamo le caratteristiche del dissipatore.

Sappiamo che:

$$T_J = T_A + P (R_{JC} + R_{CS} + R_{SA}) \rightarrow R_{SA} = \frac{(T_J - T_A)}{P} - R_{JC} - R_{CS}$$

Dove:

- T_J = temperatura massima giunzione ($^{\circ}\text{C}$)
- T_A = temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$)
- P = potenza dissipata (W) = 6 W
- R_{JC} = resistenza termica junction→case (TO-220 tipico) $\approx 1.5^{\circ}\text{C/W}$ (valore conservativo)
- R_{CS} = resistenza termica case→heatsink (pasta termica $\approx 0.5^{\circ}\text{C/W}$; isolante/mica $\approx 1.5^{\circ}\text{C/W}$)
- R_{SA} = resistenza termica heatsink →ambiente

Se puntiamo ad avere $T_J \approx 100^{\circ}\text{C}$ (scelta raccomandata per affidabilità a lungo termine), con una temperatura ambiente $T_A = 25^{\circ}\text{C}$ e $R_{CS} = 1.5$ abbiamo che $R_{SA} \leq 9.5^{\circ}\text{C/W}$.

Un piccolo dissipatore ad alette in alluminio estruso con $R_{SA} \approx 5\text{--}10^{\circ}\text{C/W}$ può andare bene.

I vantaggi di questo semplice circuito possono essere così riassunti:

- Semplicità circuitale e basso costo.
- Limitazione immediata e progressiva.
- Ideale per proteggere alimentazioni di sensori o piccoli carichi.

Proviamo a simulare il circuito con LTSpice.

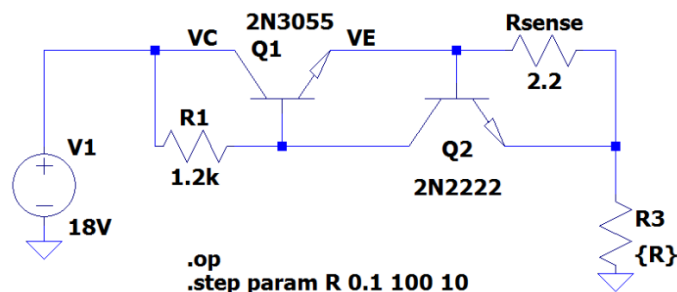


Figura 5: Schema del limitatore di corrente

È interessante analizzare come varia la corrente di uscita al variare del carico R3. Dal grafico si osserva che, per valori di carico elevati (superiori a $60\ \Omega$), la corrente

cresce in modo pressoché lineare. Quando invece il carico scende sotto tale soglia, la curva mostra una marcata riduzione della pendenza: questo comportamento indica l'intervento del limitatore di corrente, che impedisce al circuito di erogare valori superiori al limite previsto.

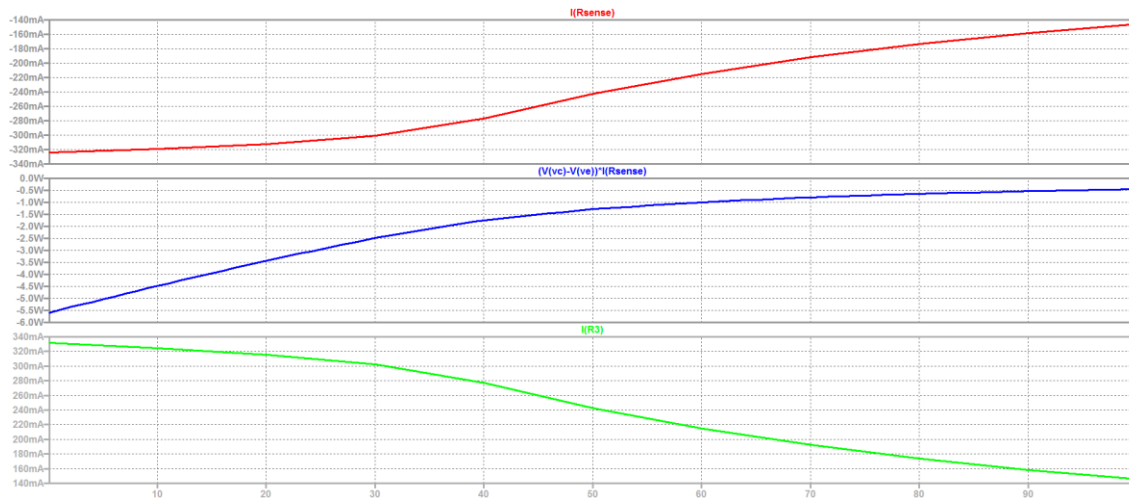


Figura 6: Andamento delle correnti e della potenza dissipata da Q₁

Stadio controllo batteria

Il circuito Tester proposto è alimentato da due batterie da 9 V collegate in serie, per ottenere una tensione totale di 18 V. In questa configurazione è utile disporre di un'indicazione visiva dello stato di carica, ottenibile tramite un LED. A questo scopo può essere utilizzato il circuito mostrato nella figura seguente.

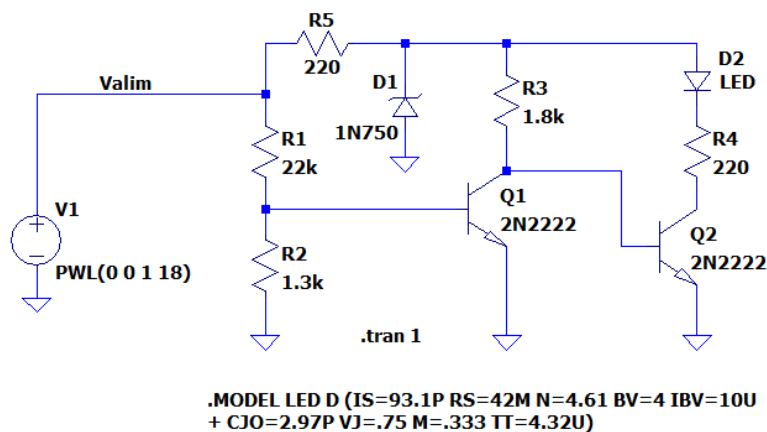


Figura 7: Schema dello stadio controllo della carica delle batterie

Con le batterie completamente cariche, il transistor Q_1 è polarizzato attraverso R_1 e R_2 e rimane in conduzione, mantenendo il suo collettore a una tensione prossima allo zero. In queste condizioni Q_2 è spento, dunque non scorre corrente nel LED, che quindi rimane spento.

Quando la tensione di alimentazione diminuisce, la corrente di base di Q_1 si riduce progressivamente, fino a non essere più sufficiente a tenerlo in conduzione. Appena Q_1 si spegne, la tensione sul suo collettore aumenta fino ad avvicinarsi al valore stabilito dal diodo Zener D_1 , ovvero 4.7V; a questo punto Q_2 entra in conduzione e il LED si accende.

Il diodo Zener è inserito proprio per mantenere quasi costante la corrente nel LED, e quindi la sua luminosità, anche se la tensione delle batterie continua a calare.

La figura seguente mostra l'andamento della corrente su R_4 (e quindi nel LED) al variare della tensione di alimentazione. Si osserva che, tra 12 V e 18 V, il LED rimane spento. Quando la tensione scende sotto i 12 V, il LED si accende e, grazie all'azione del diodo Zener, la corrente che lo attraversa resta quasi costante fino a circa 8 V.

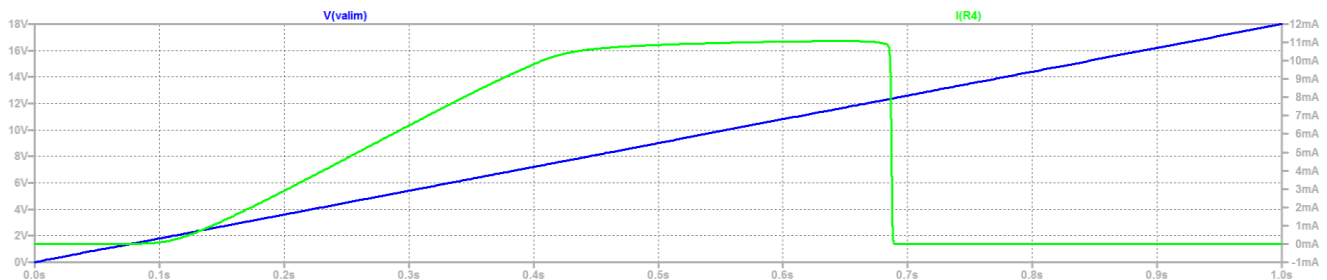


Figura 8: Andamento della corrente nel LED

Stadio Tester

Con riferimento alla figura seguente, quando nessun sensore è collegato al circuito, nella serie $R_1 + R_2 + R_3 + R_4$ scorre una corrente di circa 2 mA. Le resistenze R_1 e R_4 determinano le tensioni V_{BE} applicate ai transistor Q_1 e Q_2 . Con questa corrente, la caduta ai loro capi è:

$$V_{BE} = 220 \, \Omega \times 2 \, \text{mA} = 0.4 \, \text{V}$$

un valore insufficiente a polarizzare le giunzioni base-emettitore, quindi Q_1 e Q_2 rimangono spenti. Di conseguenza i LED D_1 e D_2 sono spenti.

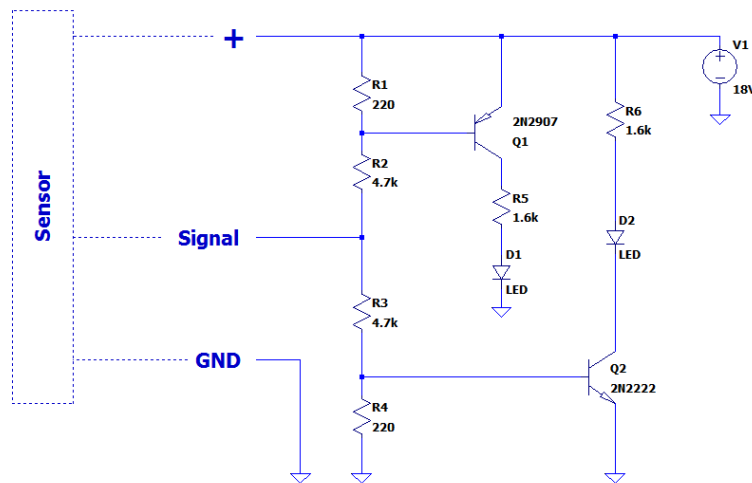


Figura 9: Schema del tester

Supponiamo di collegare al circuito un sensore PNP “NA”. Quando non è attivo, la situazione non cambia. Quando si attiva, invece, la sua uscita viene internamente connessa all'alimentazione. In questa situazione la corrente in R_1 e R_2 è nulla perché sono messe in corto dal sensore, mentre attraverso $R_3 + R_4$ scorre:

$$I = \frac{V_{ALIM}}{R_3 + R_4} = \frac{18V}{4920 \, \Omega} = 3.7 \, \text{mA}$$

Questa corrente, attraversando R_4 , riesce a polarizzare Q_2 portando la $V_{BE,Q2}$ oltre il valore di 0.65V.

Il transistor Q_2 entra così in conduzione e accende il LED D_2 , che segnala l'attivazione del sensore e la sua tipologia PNP.

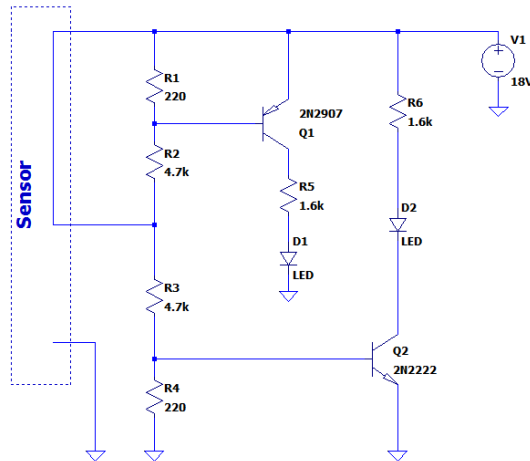


Figura 10: Test di un sensore PNP

Supponiamo ora di collegare un sensore NPN “NA”. Quando il sensore si attiva, il suo stadio di uscita porta il segnale a massa. In questa condizione la corrente attraverso R_3 e R_4 è nulla perché sono messe in corto dal sensore, mentre quella in $R_1 + R_2$ vale (come nel caso precedente):

$$I = \frac{V_{ALIM}}{R_1 + R_2} = \frac{18V}{4920 \Omega} = 3.7mA$$

Questa corrente, attraversando R_1 , porta la $V_{BE,Q1}$ oltre la soglia di 0.65V mandando in conduzione Q_1 e accendendo il LED D_1 indicando, non solo l’attivazione del sensore, ma anche la sua tipologia NPN.

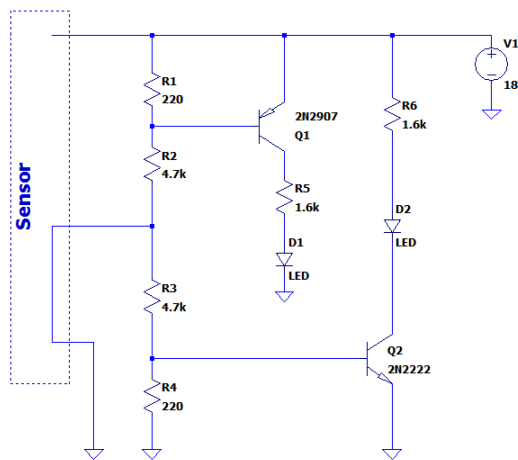
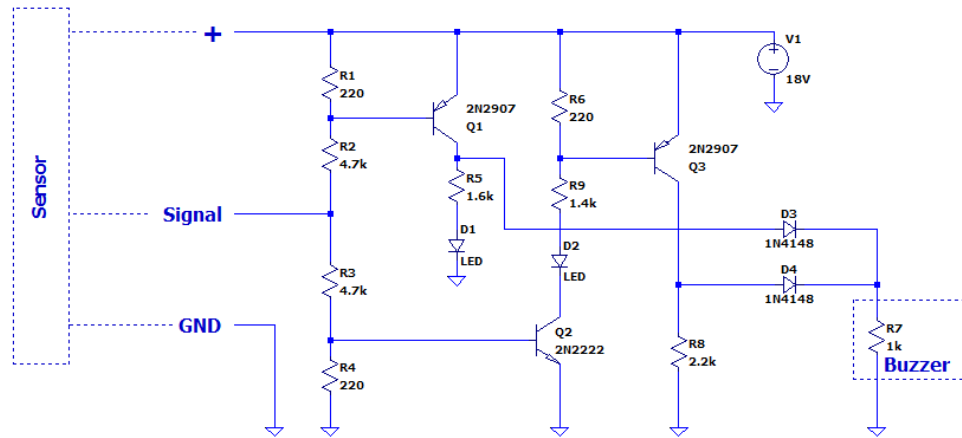


Figura 11: Test di un sensore NPN

Dobbiamo modificare il circuito come mostrato nella figura seguente.



Quando Q_1 è in conduzione e il LED D_1 è acceso, la corrente può fluire anche verso il cicalino (modellato grossolanamente con un carico resistivo R_7) attraverso il diodo D_3 , facendo emettere il suono.

I diodi D₃ e D₄ svolgono la funzione di disaccoppiare i LED D₁ e D₂ dal cicalino: senza di essi, l'attivazione di uno dei LED causerebbe inevitabilmente l'accensione dell'altro.

Mettiamo ora insieme i diversi moduli che abbiamo progettato per ottenere lo schema elettrico finale del tester.

4. Conclusioni

Il progetto presentato non è soltanto un semplice esercizio di elettronica, ma un vero strumento pratico, riproducibile anche con mezzi limitati e in grado di offrire un valido supporto in molte situazioni operative. È un ottimo esempio di come, con componenti discreti e un po' di analisi, sia possibile realizzare circuiti intelligenti, sicuri e funzionali. Il percorso di progettazione qui illustrato dimostra quanto le simulazioni LTspice possano essere di aiuto nell'anticipare problemi, verificare il comportamento in condizioni critiche e affinare le scelte progettuali. Il risultato è un dispositivo affidabile, educativo e utile, che costituisce un punto di partenza ideale per ulteriori sviluppi, ampliamenti o versioni evolute dotate di funzioni aggiuntive.