



Isidoro KZ (IsidoroKZ)

MILLIAMPEROMETRO A LED PER LOOP DI CORRENTE 4mA-20mA

5 January 2015

Introduzione

Il circuito descritto in questo articolo deriva da una richiesta fatta sul forum tanto tempo fa. In modo molto confuso un utente voleva un circuito per realizzare un milliamperometro da usare per monitorare la corrente di un loop 4mA-20mA, consistente in 4 led che si accendessero in cascata a seconda dell'intensità corrente lo attraversava.

L'utente non riusciva a specificare le condizioni di uso e di alimentazione, per cui si è pensato un milliamperometro flottante (due soli fili) e alimentato direttamente dal loop di corrente. Infatti al valore minimo di corrente del loop, 4mA, non si deve accendere nessun led, c'è abbastanza corrente per alimentare un circuito elettronico.

Quando scorre la corrente massima di 20mA si possono accendere 4 led, con 4mA ciascuno, quindi non a piena luminosità, ma usando led ad alta efficienza si riesce a ottenere lo strumento richiesto senza complicarsi troppo la vita.

Parlando un pomeriggio su Skype con [carlo](#), abbiamo cominciato a fare considerazioni varie su come si potesse realizzare un circuito del genere, proponendo soluzioni, cercando migliorie varie... Carlo ha buttato subito sul piatto il circuito per l'alimentazione, e questo ha dato la spinta a proseguire nel progetto.

Come risultato delle nostre chiacchierate abbiamo deciso di fare due versioni del circuito, io mi sarei occupato di una soluzione analogica, mentre Carlo avrebbe sviluppato una soluzione digitale con microcontrollore. In questo articolo racconto la soluzione analogica che garantisce le prestazioni minime richieste, anzi anche qualcosa di più.

Quello che segue sono più o meno i pensieri in libertà che mi sono venuti durante lo sviluppo. Un progetto completo dovrebbe anche considerare altri aspetti, quali ad esempio gli errori (offset e tolleranze), le sensibilità...

Se Carlo ne avrà voglia racconterà la sua, che ha prestazioni spettacolari e utilizza tecniche decisamente sofisticate.

L'articolo presenta una rapida introduzione al loop di corrente, poi passa a descrivere l'alimentazione e il circuito di sense di corrente. Prosegue poi con la descrizione del metodo di

misura, con pilotaggio analogico dei led e relativi problemi. Infine si presentano la simulazione e il risultato sperimentale.

In seguito a una richiesta di [dimaios](#), in una [appendice separata](#) [5] sono presentate le idee di circuiti che sono stati pensati e scartati per vari motivi.

Current Loop

Il loop di corrente 4mA-20mA, introdotto negli anni 50, è uno dei più vecchi sistemi di comunicazione di segnali analogici in ambiente industriale. Con questo metodo è possibile inviare a distanze elevate e in modo abbastanza immune al rumore un segnale analogico codificato con una corrente variabile nell'intervallo 4mA-20mA. Queste caratteristiche hanno fatto sì che sia stato un metodo molto usato per la lettura di sensori remoti e l'attuazione di sistemi, in impianti industriali dove le distanze possono essere dell'ordine delle centinaia di metri e il rumore elettrico presente molto elevato a causa di altri conduttori, commutazione di carichi... Il loop di corrente ha anche una limitata proprietà di diagnostica: se il ricevitore misura una corrente nulla significa che il collegamento è guasto.

Il principio di questa comunicazione è mostrato nella figura 1. Un trasmettitore, ad esempio un sensore di temperatura, manda un segnale codificato da una corrente nell'intervallo 4mA-20mA, dove 4mA rappresenta il fondoscala inferiore, la minima lettura, mentre 20mA rappresenta il fondoscala superiore, la massima lettura.

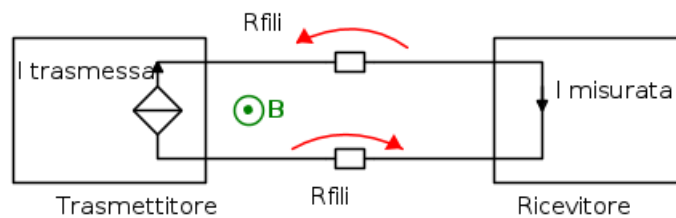


Figura 1 - 4mA-20mA principio

In questa figura semplificata il trasmettitore è rappresentato da un generatore di corrente pilotato e il ricevitore da un "amperometro" ideale che misura la corrente. Nella figura vengono anche mostrati due grandi vantaggi del loop di corrente. La resistenza dei conduttori, che provoca la caduta di tensione rappresentata in rosso, non influenza la corrente ricevuta, fa solo cambiare la tensione ai capi del trasmettitore senza cambiarne la corrente generata. Anche la presenza di un campo magnetico variabile B , in verde, che investe il loop non provoca errori di lettura poiché la tensione indotta cade sul bipolo con impedenza interna più elevata, in questo caso il generatore di corrente.

Uno schema più vicino a un sistema reale include il fatto che il ricevitore molto spesso è costituito da una resistenza che trasforma la corrente in una tensione, più facile da misurare, e il trasmettitore è formato da un generatore di corrente "passivo" dal punto di vista dell'energia.

È quindi necessario inserire nel loop una alimentazione che fornisca energia al loop, mentre il trasmettitore diventa un semplice "rubinetto" che fa passare più o meno corrente. In figura 2 vengono evidenziati questi punti.

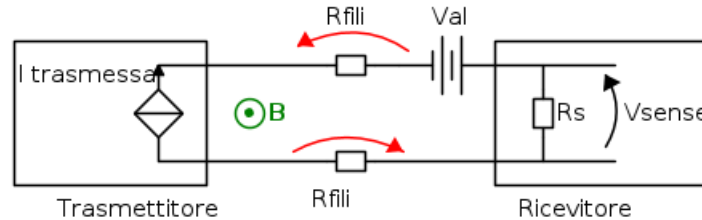


Figura 2 - 4mA-20mA Modello reale

La resistenza di sense R_s trasforma la corrente ricevuta in tensione V_{sense} , se si usa, come spesso accade, $R_s = 100 \Omega$ la tensione V_{sense} è di 2V con corrente massima di 20mA.

I vantaggi indicati prima permangono, ma lo schema mostra però anche le possibili limitazioni. La tensione di alimentazione deve essere in grado di far scorrere 20mA malgrado tutte le resistenze presenti, e deve inoltre garantire una tensione minima ai capi del trasmettitore che spesso è alimentato dal loop stesso. Le cadute di tensione e i disturbi indotti possono sottrarsi alla tensione V_{al} dell'alimentazione che potrebbe non riuscire a far scorrere i 20mA massimi. Ci sono anche problemi di rumore di modo comune e connessioni rispetto a terra, ma esulano da questo articolo.

Quando la corrente diminuisce la tensione ai capi del trasmettitore aumenta, ma non deve salire troppo (ad esempio minore di 40V) per non danneggiare il trasmettitore.

Molto spesso, se il trasmettitore è un semplice trasduttore, l'alimentazione è ricavata direttamente dal loop (self powered sensor) e viene quindi richiesta una tensione minima (ad esempio 12V) ai capi del trasmettitore per avere il suo corretto funzionamento. Il milliamperometro descritto in questo articolo ricava la sua alimentazione direttamente dal loop come nei sensori self powered.

Circuito di alimentazione

L'idea per alimentare il circuito è stata proposta da Carlo. Per ricavare l'alimentazione del milliamperometro direttamente dal loop si può usare uno zener, come in figura 3. Per avere una tensione stabile e precisa si usa un TL431 [3], che presenta anche il vantaggio di richiedere solo circa 0.5mA per il suo funzionamento.

La corrente disponibile per alimentare il circuito è quindi pari a quella che circola nel loop meno 0.5mA

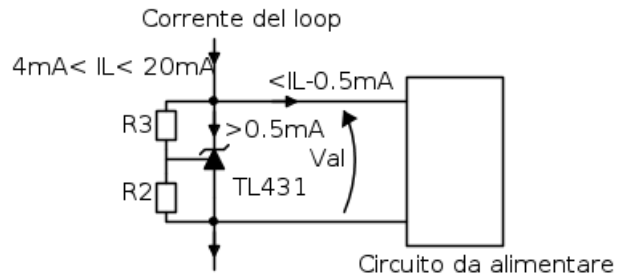


Figura 3 - Alimentazione

Quando la corrente è al livello minimo, 4mA, la corrente assorbita dal circuito deve essere minore di 3.5mA per garantire la regolazione del TL431. Quando la corrente di loop aumenta, la corrente disponibile per il circuito di misura aumenta anch'essa, e viene usata per accendere i led. Al massimo devono essere accesi 4 led, con una corrente massima di 4mA ciascuno.

La tensione di alimentazione Val deve essere sufficientemente elevata per consentire il funzionamento del circuito elettronico e di accendere i led, ma non troppo elevata per non disturbare il funzionamento del circuito, togliendo troppa tensione al trasmettitore. D'altra parte volendo usare componenti normali facilmente reperibili sul mercato, non si possono usare operazionali molto particolari, rail to rail con correnti di uscita di svariati milliampere e tensioni di alimentazioni molto basse.

Un comune operazionale a singola alimentazione, con uscita che può raggiungere gli 0V ha bisogno di circa 3V-5V per un funzionamento corretto. Il diodo da accendere è opportuno che sia rosso, con tensione massima di circa 1.9V, in serie al quale ci sarà una resistenza per la limitazione e il sense della corrente. La corrente massima del diodo è di circa 4mA. Si può assumere inizialmente di alimentare il circuito con una tensione di 4V, sufficiente per l'operazionale e per un diodo rosso con una resistenza di controllo della corrente.

Il TL431 sarà quindi montato con due resistori in modo da fornire 4V circa.

Oltre alla tensione stabile, usata sia per l'alimentazione che come tensione di riferimento, è necessario avere anche una tensione variabile con la corrente. Questa viene ottenuta con una resistenza di sense in serie al TL431. La tensione di sense deve essere abbastanza grande da non essere troppo influenzata dagli offset del circuito, e neanche troppo grande per non generare una caduta di tensione elevata nel loop di corrente. Una scelta ragionevole potrebbe essere di circa 1V, in modo da tenere la caduta di tensione totale inferiore a 5V. Lo schema del circuito di alimentazione è in figura 4.

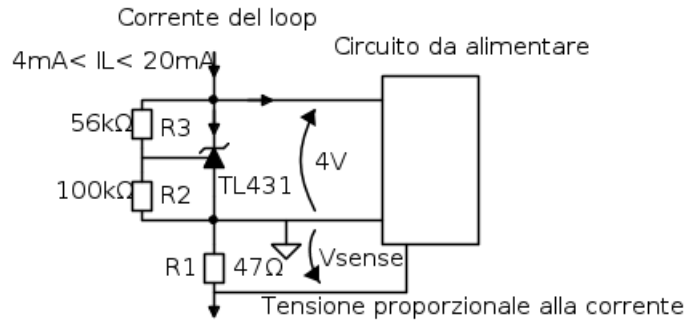


Figura 4 - Alimentazione e sense

La tensione di sense è negativa e dovrà essere alzata per portarla entro l'intervallo di modo comune degli operazionali. Se si fosse messa la resistenza di sense sul lato positivo si sarebbe dovuto abbassare comunque la tensione, che sarebbe stata più positiva dell'alimentazione positiva. Dato che gli operazionali a singola alimentazione, a meno che non siano rail-to-rail, lavorano meglio vicino al potenziale negativo sia in ingresso che in uscita, si è deciso di usare questo lato dello zener per il sense.

Circuito di misura

Il circuito di misura inizialmente richiesto doveva accendere i led al superamento di 4 soglie di corrente. Dalle solite chiacchierate con Carlo è venuta l'idea di accendere gradualmente i led, il primo fra 4mA e 8mA, facendo sì che cominciasse ad accendersi a 4mA e fosse a piena luminosità a 8mA, il secondo da 8mA a 12mA, il terzo da 12mA a 16mA e infine l'ultimo da 16mA a 20mA.

Questa soluzione comporta l'uso di 4 convertitori tensione-corrente, con un offset iniziale che cambia per ogni convertitore e corrente massima del led di 4mA, da non superare altrimenti si ruba corrente agli altri led, e la corrente disponibile è limitata.

Per realizzare questo blocco è necessario portare la tensione V_{sense} in un intervallo positivo, poi realizzare i 4 convertitori tensione corrente con le specifiche indicate sopra.

Scalamto della tensione misurata

La tensione di sense generata dalla resistenza da 47Ω è negativa, va da $-188mV$ a $-940mV$ e deve essere riportata in un intervallo positivo per dar modo agli operazionali di lavorare correttamente. Non sembra opportuno usare un operazionale per questa traslazione, poiché servirebbero già 4 operazionali per pilotare i led, e si punta ad usare un solo IC che al massimo contiene 4 operazionali.

Un semplice partitore di tensione che sfrutta la stabilità della tensione di alimentazione provvede allo scalamento della tensione di ingresso, senza perdere troppo segnale, come mostrato in figura 5.

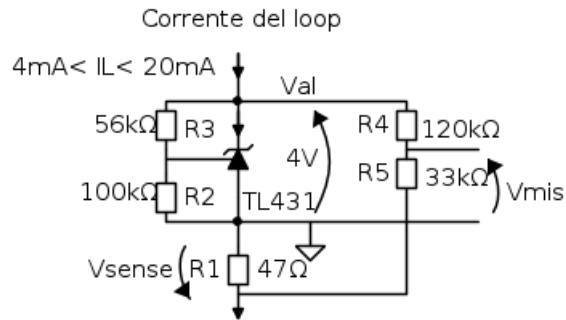


Figura 5 - Scalamento tensione

Le resistenze R_4 ed R_5 sono state scelte in modo da non caricare la resistenza di sense, e da mappare l'intervallo di misura -188mV -940mV in un intervallo positivo. Scrivendo l'espressione del partitore

$$V_{mis} = V_{al} \frac{R_5}{R_4 + R_5} + V_{sense} \frac{R_4}{R_4 + R_5}$$

Considerando il caso di ingresso più negativo e imponendo che la tensione di uscita sia 0V, si ha

$$V_{mis} = 0 \text{ V} = 4 \text{ V} \frac{R_5}{R_4 + R_5} - 940 \text{ mV} \frac{R_4}{R_4 + R_5} \text{ da cui si ottiene } \frac{R_5}{R_4} = \frac{4 \text{ V}}{940 \text{ mV}} = 4.26$$

Scegliendo per R_5 il valore di 33kΩ si ottiene $R_4 = 140 \text{ k}\Omega$. Questo non è un valore normalizzato nella serie E12, per cui si sceglie il valore inferiore, 120kΩ, in modo che l'intervallo della tensione V_{mis} sia sicuramente positivo, malgrado le tolleranze dei resistori.

Il segnale V_{mis} diminuisce all'aumentare della corrente, e con i valori nominali indicati passa da 715mV per corrente di 4mA a 125mV per corrente di loop di 20mA, come mostrato in tabella 1.

Corrente di loop (mA) Tensione scalata Vmis (mV)

4	715.3
8	567.8
12	420.4
16	272.9
20	125.5

Tabella
1.

La scelta effettuata è solo a "buon senso", ed è possibile che contrasti con altre esigenze che possono emergere in seguito.

Convertitore tensione corrente

Il segnale V_{mis} viene applicato a 4 convertitori tensione corrente che devono presentare la transcaratteristica di figura 6, ciascuno con una diversa soglia di accensione.

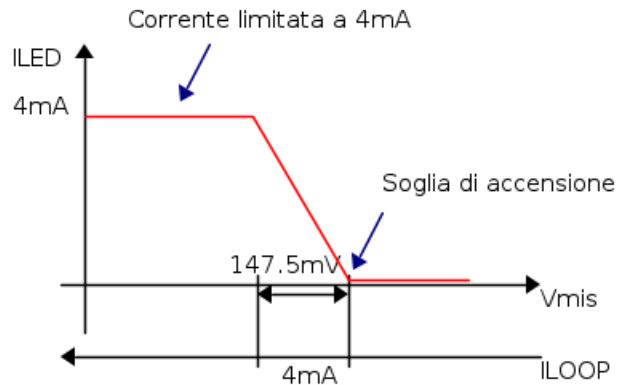


Figura 6 - Transcaratteristica

Il guadagno del circuito in zona lineare deve essere pari a $\frac{4 \text{ mA}}{-147.5 \text{ mV}} = -27.1 \text{ mS}$, le soglie devono essere scalate di 147.5mV che corrispondono a 4mA di corrente nel loop.

Mentre la soglia di accensione è facile da ottenere, perché anche se ci fosse una polarizzazione negativa il led non si accenderebbe, la saturazione a 4mA deve essere ottenuta basandosi sulla saturazione dell'operazionale e controllando la corrente con una resistenza.

Lo schema di base per riuscire ad avere i limiti di corrente voluti è mostrato nella figura 7. Se l'uscita dell'operazionale sale sopra i 2V circa il led è spento, mentre se satura verso il basso la corrente è comunque limitata da R_6 . Da notare che per spegnere il led non è necessario un operazionale rail-to-rail.

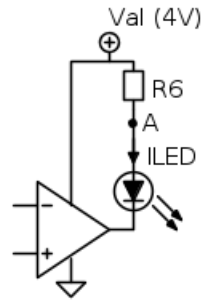


Figura 7 - Convertitore - Topologia potenza

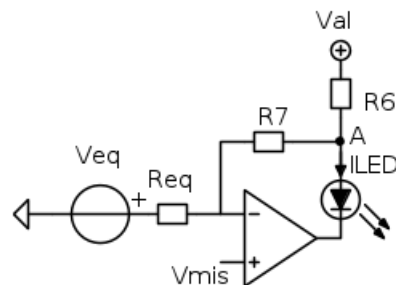
La scelta della configurazione, in particolare il carico con la resistenza di conversione riferiti al positivo, è dovuto al fatto di voler utilizzare anche degli operazionali normali a singola alimentazione, senza che siano necessariamente rail to rail.

La resistenza R_6 , oltre a limitare la corrente massima, serve anche per misurare la corrente del led e controllarne così la corrente di accensione. Se si controlla la tensione del punto A si controlla anche la corrente che scorre nel led. Per fare questo è necessario prelevare un segnale di retroazione da questo nodo e riportarlo in ingresso all'operazionale. In questo modo il led risulta dentro l'anello di retroazione, con prelievo in serie e quindi con impedenza di pilotaggio molto elevata.

Lo schema di principio di ciascuno dei convertitori è in figura 8. L'ingresso è sul morsetto non invertente, ad alta impedenza, in questo modo non si disturba il segnale V_{mis} .

Il guadagno ottenuto di transconduttanza è negativo, anche se si entra sul morsetto non invertente perché il carico è riferito all'alimentazione positiva. Il circuito funziona correttamente solo se la tensione di alimentazione è precisa e stabile, come in questo caso. Il circuito in pratica si comporta come un amplificatore di tensione che comanda la tensione del nodo A, e di conseguenza anche la corrente attraverso il led.

Per ottenere una soglia variabile si può introdurre una continua sull'ingresso negativo, rappresentata con un equivalente Thevenin in figura 8

Figura 8 - Convertitore $V \rightarrow I$

La tensione del morsetto A, riferita a ground, vale $V_A = -V_{eq} \frac{R_7}{R_{eq}} + V_{mis} \left(1 + \frac{R_7}{R_{eq}}\right)$ e di conseguenza la corrente che attraversa il led, trascurando la corrente di R_7 , vale $I_{LED} = \frac{V_{AL} - V_A}{R_6}$. La transconduttanza del circuito, che deve valere -27.1mS è data da $G_m = \frac{dI_{LED}}{dV_{mis}} = \frac{1}{R_6} \left(1 + \frac{R_7}{R_{eq}}\right)$ da cui si ricava il rapporto $\frac{R_7}{R_{eq}} = 12.82$.

Per poter aggiungere l'offset di accensione si può realizzare l'equivalente Thevenin con un partitore collegato fra alimentazione e ground, come mostrato in figura 9

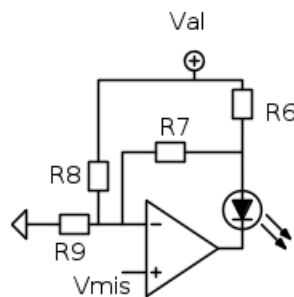


Figura 9 - Convertitore reale $V \rightarrow I$

Il valore di R_7 deve essere abbastanza grande da non disturbare la corrente del led. Essendo questo un circuito non di precisione, non dovendo tener conto (troppo) degli offset, in particolare delle correnti di bias e offset, si può scegliere per R_7 un valore elevato, ad esempio $220\text{k}\Omega$, e quindi si ha che $R_8 // R_9 = \frac{R_7}{12.82} = \frac{220\text{k}\Omega}{12.82} = 17.16\text{k}\Omega$

Per stabilire i valori di R_8 ed R_9 bisogna calcolare la tensione V_{mis} corrispondente alla soglia di accensione, e trovare il corrispondente valore V_{eq} . Ad esempio il primo LED deve accendersi con $I_{loop}=4\text{mA}$, che corrispondono a $V_{mis} = 715\text{mV}$. Con questi valori si ha $V_A = 4\text{V} = -V_{eq} \times 12.82 + V_{mis} \times 13.82 = -V_{eq} \times 12.82 + 715\text{mV} \times 13.82$ da cui si ottiene $V_{eq} = 459\text{mV}$. I risultati per i 4 convertitori, calcolati in modo analogo, sono presentati in tabella 2, dove sono ripresi i dati di tabella 1.

Tabella 2.

Corrente Loop (mA)	Tensione Vmis (mV)	Veq (mV)	Note
4	715.3	459.1	
8	567.8	300.1	
12	420.4	141.2	
16	272.9	-17.8	OOPS!

Malgrado lo scalamento effettuato per portare V_{mis} a valori positivi, l'offset richiesto dal convertitore con soglia di 16mA risulta negativo.

Situazioni di questo genere si verificano abbastanza spesso in un progetto. Si fanno delle assunzioni ritenute ragionevoli e poi si scopre che non sono accettabili. A questo punto sono possibili due o tre soluzioni illustrate nella prossima sezione.

Risolviamo le magagne

Per risolvere il problema della tensione equivalente negativa, che deriva da una scelta non corretta dello scalamento della tensione V_{mis} ci sono alcune soluzioni, dal "facciamo finta di nulla" a "ricominciamo da capo". Nel seguito vengono analizzate queste soluzioni.

Facciamo finta di niente

Questa "soluzione" è opportunistica, nel senso che casualmente il valore della tensione equivalente richiesta per l'ultimo convertitore è così piccola, -17 mV che lo si potrebbe ignorare ed approssimare a zero. invertendo le equazioni scritte in precedenza, si ricava che la soglia di accensione dell'ultimo LED risulta di 15.5 mA . Un errore così piccolo in uno strumento che dà indicazioni essenzialmente qualitative potrebbe essere accettabile. In questo caso lo schema dell'ultimo convertitore diventa quello mostrato in figura 10.

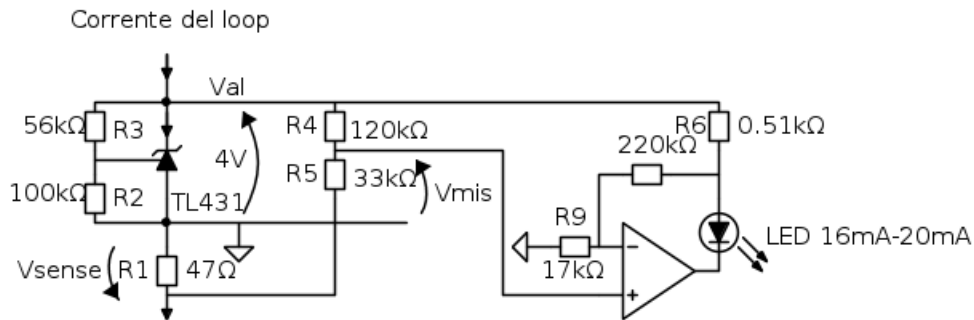


Figura 10 - Soluzione approssimata

L'ultimo convertitore ha una resistenza in meno nel partitore di base e comincia ad accendersi con una corrente di loop leggermente inferiore a quella richiesta.

Mettiamoci una toppa

La seconda possibile soluzione consiste nel modificare l'ultimo convertitore in modo che la sua transcaratteristica cominci ad accendersi al valore corretto. Nel circuito è presente una tensione

negativa, quella ai capi della resistenza di sense R_1 . È possibile usare questa tensione per avere la soglia desiderata notando però che la tensione di sense non è costante, e quindi bisogna ricalcolare lo stadio dato che la R_{eq} non è più quella precedente poiché questo stadio riceve due segnali proporzionali alla corrente misurata. Lo schema di questa topologia è in figura 11.

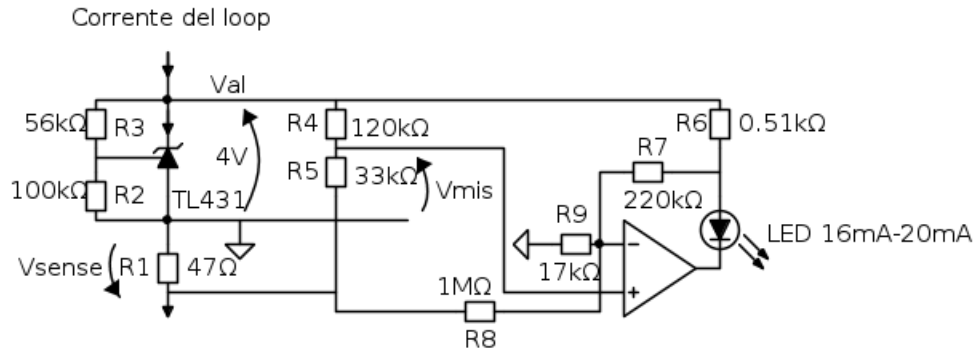


Figura 11 - Soluzione con topologia

la correzione inserita, R_9 , è di valore elevato perché l'errore da correggere è molto piccolo. Altre versioni dello stesso progetto richiedevano una correzione di entità maggiore.

Ricominciamo da capo

Quest'ultima dovrebbe essere la soluzione più corretta. Avendo visto che il progetto del convertitore tensione corrente è interdipendente con il circuito di scalamento, si devono risolvere contemporaneamente le equazioni dei due circuiti, aggiungendo i vincoli del circuito che sono resistenza di sense $R_1 = 47\Omega$ poiché non si vuole far salire troppo la caduta di tensione sul milliamperometro, resistenza del led $R_6 = 510\Omega$ perché si vuole avere una corrente di LED di 4 mA quando l'operazionale satura, tensione di alimentazione $V_{al} = 4\text{ V}$ sempre per contenere la tensione sul milliamperometro. Ultima condizione da imporre nel progetto è che la tensione equivalente dei vari convertitori deve essere positiva.

I valori da calcolare sono le resistenze del circuito di scalamento, R_2 e R_3 e i valori delle resistenze di guadagno del convertitore, R_7 ed R_{eq} . Le equazioni disponibili per determinare queste incognite sono che la corrente di led deve essere nulla quando la corrente di loop è al suo valore di soglia, e il guadagno differenziale del circuito, $A = \frac{dI_{LED}}{dI_{Loop}}$ deve essere unitario in modo che tutta la corrente che arriva in più oltre la soglia venga usata dal led, dando così la massima variazione di luminosità.

Anche qui, come spesso capita, ci sono 4 incognite e 2 equazioni. La ragione è che sono i rapporti ad essere importanti, non il valore delle resistenze, che si suppongono abbastanza grandi da non disturbare la tensione generata dalla resistenza di sense e la corrente che circola nel LED.

Il progetto parte imponendo $V_{eq} = 0\text{ V}$ per il convertitore dei 16 mA che si è visto essere il più critico. Tralasciando tutti i conti, che sono solo algebra noiosa, si ottiene $\frac{R_4}{R_5} = 3.57$ e $\frac{R_7}{R_{eq}} = 12.89$. Se si mantiene $R_5 = 33\text{ k}\Omega$ si ha $R_4 = 117.8\text{ k}\Omega$ che spiega perché l'errore trovato, avendo assunto $R_4 = 120\text{ k}\Omega$, fosse così piccolo. Si può ridurre R_4 a un valore normalizzato conveniente, e in questo caso bisogna poi ricalcolare il rapporto $\frac{R_7}{R_{eq}}$, anche qui andando su valori normalizzati. Si trovano poi le tensioni equivalenti e i valori necessari di R_8 ed R_9 che diano le soglie e le resistenze equivalenti richieste.

Progetto e simulazione

Il progetto del circuito, se si rimane a livello hobbistico-qualitativo, è abbastanza semplice. Si fanno i conti come spiegato nella sezione precedente e si usano i resistori di valori normalizzati più vicini. I led devono essere rossi, per avere bassa caduta di tensione e ad alta luminosità, in quanto la loro corrente massima è solo di 4 mA . Avendo la possibilità di fare cadere più tensione sul milliamperometro, ad esempio 10 V , e complicando abbastanza il circuito, si può riuscire ad arrivare a circa 10 mA o più su ogni led, ma probabilmente la complessità del progetto è troppo elevata per un circuito del genere.

Con la configurazione scelta l'operazionale può essere un singola alimentazione quadruplo. Gli ingressi e le uscite devono poter lavorare molto vicine all'alimentazione negativa. Come già evidenziato in precedenza, non è necessario usare un rail-to-rail. In fase di scelta componenti si sono analizzati alcuni possibili candidati, fra cui un promettente LMV924 con bassa tensione di alimentazione, basso consumo ed elevata capacità di pilotare carichi, tensione di offset un po' alta. La simulazione è stata fatta con LT1014, non avendo il modello del 924, mentre il prototipo è stato realizzato con un vecchio e sempre disponibile LM324.

Essendo un progetto fatto per un prototipo, non sono state fatte le analisi di sensitivity [4] e neppure si è tentata una cost reduction. Ad esempio i partitori che forniscono le tensioni equivalenti per le soglie usano in totale 7 o 8 resistori. Nel caso di produzione in grande serie potrebbe essere interessante usare una stringa di 5 resistenze per fornire le tensioni e le resistenze equivalenti necessarie.

Un tentativo di realizzare questa riduzione di componenti ha dato origine a un sistema di equazioni particolarmente intrattabile, per cui, anche con il consiglio e la benedizione di [Pietro Baima](#) ho lasciato perdere. Due resistenze in più su un prototipo non sono un grosso guaio.

Il circuito simulato con LTspice è mostrato nella figura 12

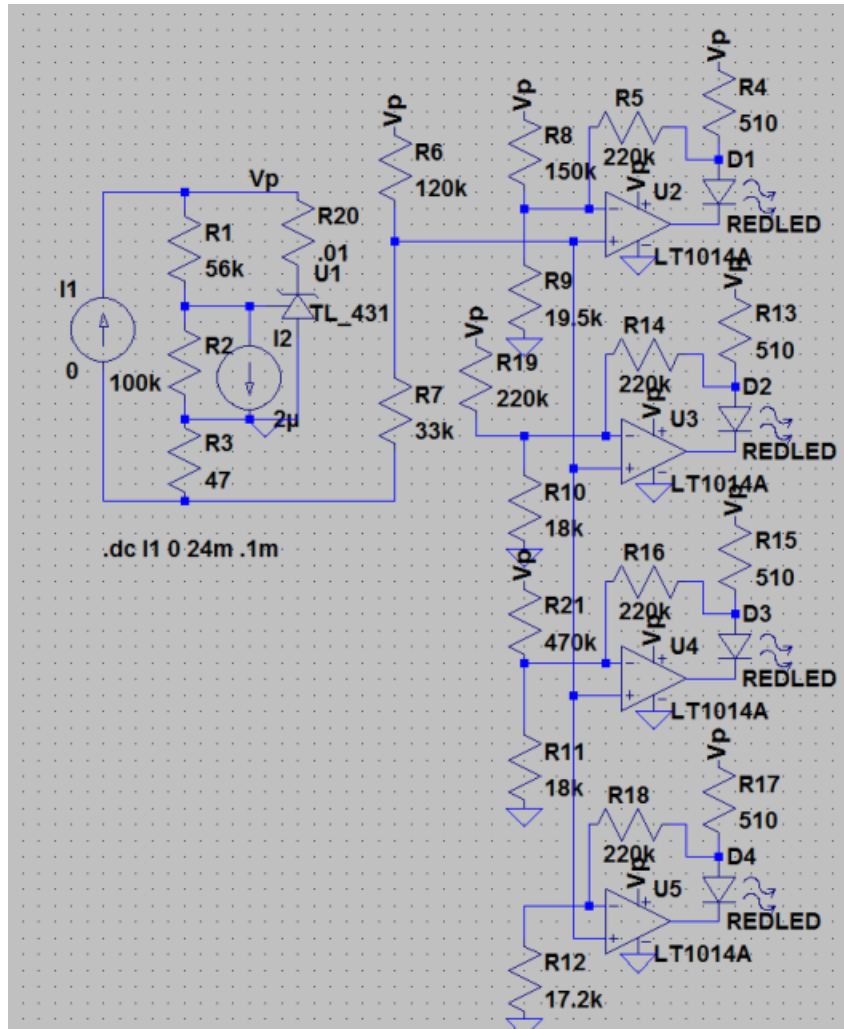


Figura 12 - Circuito simulato, versione approssimata

Il generatore di corrente da 2 μ A sul TL431 è stato messo per modellare la corrente del piedino ADJ. Il modello spice utilizzato mi pare non la rappresenta correttamente. La resistenza in serie al regolatore serve per poter visualizzare la corrente del TL431.

Nella figura 13 sono mostrate le correnti dei 4 led all'aumentare della corrente di loop da 0mA a 24mA. Si vede che le specifiche sono rispettate, i led cominciano ad accendersi alla loro soglia e vanno in saturazione con una corrente massima di quasi 4mA.

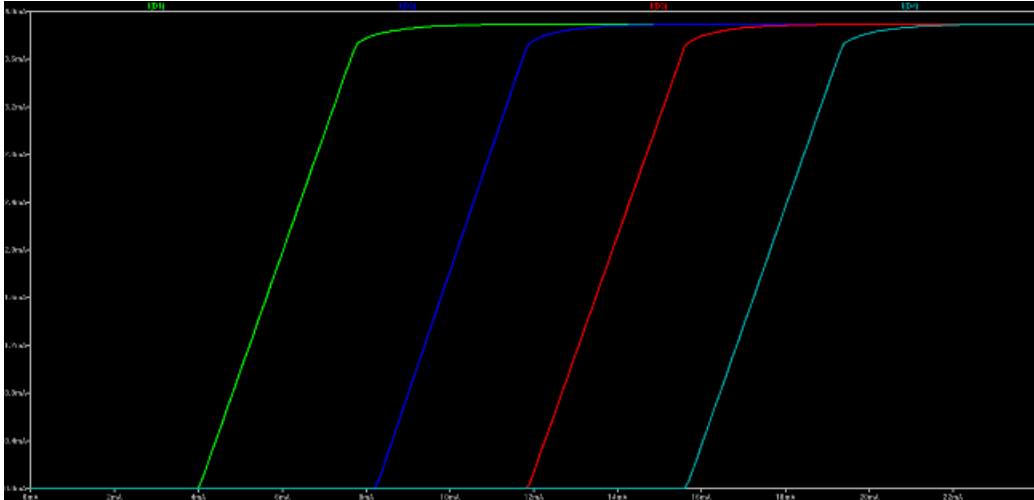


Figura 13 - Correnti dei LED

L'ultima simulazione mostrata è la corrente attraverso il regolatore TL431 e la tensione di alimentazione del circuito.



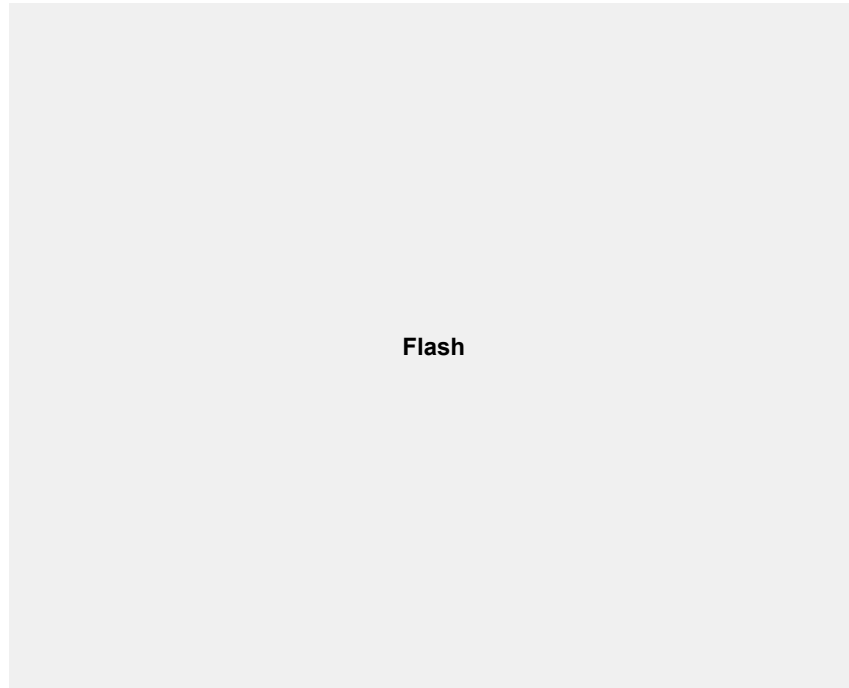
Figura 14 - Tensione di alimentazione e corrente del TL431

Si vede che la corrente del regolatore è abbastanza stabile intorno ai 3mA, dato che l'operazionale è a basso consumo. Solo dopo i 20mA la corrente nel regolatore sale, dato che non ci sono altri led da accendere. La tensione è stabile intorno a 4V, con una variazione di 1mV circa nell'intervallo 4mA-20mA.

Realizzazione e risultati

Il circuito è stato montato su una breadboard, usando come operazionale un LM324. Il filmato mostra il comportamento dei 4 LED con la corrente (misurata dal multimetro in alto) che sale da

0A a 26mA circa e poi torna a 0A. Il voltmetro (strumento in basso) misura la tensione complessiva ai capi del milliamperometro, che rimane entro i 5V per corrente di 20mA. La ripresa fatta con un telefonino non permette di vedere la variazione della luminosità del led quando si avvicina al suo massimo, sembra che saturi molto prima dell'accensione del successivo. Inoltre c'è anche il problema che non è stata fatta la gamma correction della luminosità.



Ringraziamenti

Ringraziamenti doverosi a [carlo](#) che ha fornito idee e spunti e mi faceva notare errori e incongruenze. Altrettanto doverosi ringraziamenti a [PietroBaima](#) che mi ha sopportato e aiutato nei miei tentativi di risolvere un sistema complicato di equazioni per cercare di risparmiare due resistenze! Un ringraziamento un po' meno doveroso all'original poster che con la sua domanda ha scatenato tutto questo progetto. Non ha voluto o saputo dare le informazioni richieste, non ha avuto pazienza... peccato la soluzione arriva 2 anni dopo :) Aspettiamo ora al varco Carlo con la sua versione lussuosa a microcontrollore.

Bibliografia

- [1] Murata - [4-20mA Current Loop Primer](#), Application note DMS-AN-20
- [2] National Instruments - [Fundamentals, System Design, and Setup for the 4 to 20 mA Current Loop](#), White paper, Oct 2012.
- [3] Texas Instruments - [TL431 Data Sheet](#)
- [4] IsidoroKZ - [Sensitivity I - Definizioni e applicazioni](#), ElectroYou Nov. 2010

[5] IsidoroKZ - [Appendice al milliamperometro a led](#), ElectroYou Gen. 2015

Estratto da "<https://www.electroyou.it/mediawiki/index.php?title=UsersPages:Isidorokz:milliamperometro-a-led-per-loop-4ma-20ma>"