

LaurTec

**Misure elettriche e tecniche di
condizionamento del segnale**

Autore : *Mauro Laurenti*

email: info.laurtec@gmail.com

ID: AN2004-IT

INFORMATIVA

Come prescritto dall'art. 1, comma 1, della legge 21 maggio 2004 n.128, l'autore avvisa di aver assolto, per la seguente opera dell'ingegno, a tutti gli obblighi della legge 22 Aprile del 1941 n. 633, sulla tutela del diritto d'autore.

Tutti i diritti di questa opera sono riservati. Ogni riproduzione ed ogni altra forma di diffusione al pubblico dell'opera, o parte di essa, senza un'autorizzazione scritta dell'autore, rappresenta una violazione della legge che tutela il diritto d'autore, in particolare non ne è consentito un utilizzo per trarne profitto.

La mancata osservanza della legge 22 Aprile del 1941 n. 633 è perseguibile con la reclusione o sanzione pecuniaria, come descritto al Titolo III, Capo III, Sezione II.

A norma dell'art. 70 è comunque consentito, per scopi di critica o discussione, il riassunto e la citazione, accompagnati dalla menzione del titolo dell'opera e dal nome dell'autore.

AVVERTENZE

I progetti presentati non hanno la certificazione CE, quindi non possono essere utilizzati per scopi commerciali nella Comunità Economica Europea.

Chiunque decida di far uso delle nozioni riportate nella seguente opera o decida di realizzare i circuiti proposti, è tenuto pertanto a prestare la massima attenzione in osservanza alle normative in vigore sulla sicurezza.

L'autore declina ogni responsabilità per eventuali danni causati a persone, animali o cose derivante dall'utilizzo diretto o indiretto del materiale, dei dispositivi o del software presentati nella seguente opera.

Si fa inoltre presente che quanto riportato viene fornito così com'è, a solo scopo didattico e formativo, senza garanzia alcuna della sua correttezza.

L'autore ringrazia anticipatamente per la segnalazione di ogni errore.

Tutti i marchi citati in quest'opera sono dei rispettivi proprietari.

Introduzione

Quante volte si vorrebbe misurare la tensione o corrente in uscita ad un sensore e visualizzarla su un display LCD?

In questo Tutorial, dopo una breve introduzione su come misurare tensioni e correnti con un tester digitale si provvederà alla spiegazione di come sia possibile realizzare dei circuiti che leggano il segnale da un sensore, permettendone poi l'opportuna conversione da analogico a digitale per la visualizzazione su un display LCD.

Misure di tensioni e correnti

Non si può non iniziare dicendo che misurare significa confrontare, in particolare vedere quante volte un campione (unità di misura) entra nella grandezza da misurare. Per esempio misurare un tavolo significa vedere quante volte il centimetro (unità campione) entra nella lunghezza del tavolo.

Indipendentemente dal tipo di misura è fondamentale che durante la procedura di misura non venga alterato il sistema sul quale si sta effettuando la misura.

In particolare lo strumento non deve alterare il sistema quando si sta effettuando la misura né tanto meno l'operatore deve in alcun modo interferire con sorgenti esterne che possano alterare il sistema di misura. Se questo dovesse accadere vorrebbe dire che la misura risulterebbe errata.

Nei sistemi elettronici si parla sia di misure elettriche che di misure elettroniche. La differenza tra le due non è tra le grandezze, ovvero non è che la tensione e la corrente rientrano in assoluto tra le possibili misure elettriche mentre la resistenza no.

La distinzione tra misure elettriche ed elettroniche è sull'ampiezza della grandezza stessa. Se il segnale ha un'ampiezza molto maggiore del rumore si parla più propriamente di misure elettriche, mentre se il segnale da misurare è confrontabile con il rumore, allora si parla di misure elettroniche. In questo Tutorial, visto le complicazioni che possono sorgere¹ nelle misure elettroniche si parlerà di misure

elettriche, in particolare di misure di tensioni e correnti.

Supponiamo di dover misurare la tensione ai capi di R1, che forma con R2 un partitore di tensione², come riportato in Figura 1.

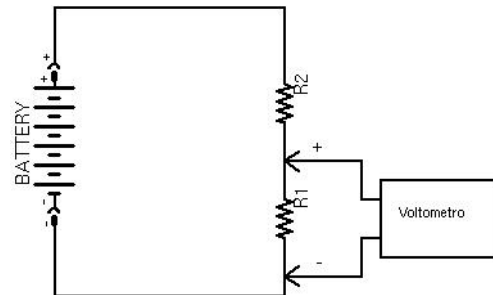


Figura 1: Misura di una tensione

Come detto il nostro sistema di misura deve essere tale da non alterare il sistema da misurare. Il miglior sistema sarebbe non collegare il nostro tester al sistema, ma in questo modo non potremmo misurare nulla!

Nell'esempio in questione si ha a che fare con una tensione continua, ma i tester digitali possono misurare anche tensioni alternate. Il ragionamento che segue è indipendente dal fatto che la tensione sia continua o alternata.

Dovendo misurare una tensione, ovvero una differenza di potenziale, il tester andrà collegato a cavallo con il resistore, ovvero in parallelo.

La tensione ai capi del resistore, per la prima legge di ohm è pari a $V = R \cdot I$. Questo significa che per non alterare il sistema di misura, ovvero la tensione che vogliamo misurare non dobbiamo alterare né R né I. In particolare R, se pur influenzabile dall'esterno, è in generale una caratteristica del componente e il collegamento del tester non potrà influenzarla in alcun modo. La I può essere invece cambiata a causa dell'inserimento del tester, infatti con il collegamento in parallelo si sono creati due nodi, dove la corrente può entrare o uscire. In particolare dal momento che il tester, in modalità voltmetro, è modellizzabile come una resistenza, si ha che il collegamento tra lo strumento e il resistore R1 è un partitore di

¹ Quando si deve gestire il rumore la trattazione matematica dei sistemi diviene più complessa e si fa uso di approcci probabilistici.

² Per ulteriori informazioni in materia si faccia riferimento al Tutorial "Leggi ed applicazioni fondamentali dell'elettrotecnica".

corrente³.

La corrente tenderà a scorrere interamente sul resistore più piccolo, e dal momento che non vogliamo alterare la corrente su R1, vuol dire che la resistenza del tester, in modalità voltmetro, deve essere molto più alta di R1.

I tester digitali hanno generalmente uno stadio in ingresso con fet, il che garantisce impedenze di alcuni MΩ, strumenti professionali possono anche raggiungere resistenze dell'ordine di alcuni GΩ⁴ (1GΩ=1000MΩ).

Nel caso di strumenti a indice mobile (o bobina mobile), ovvero di tipo analogico, l'impedenza è generalmente espressa in Ω/V. Un buono strumento deve avere almeno una resistenza di 20.000Ω/V, questo valore è generalmente riportato in uno degli angoli dello schermo dello strumento.

Con una resistenza del voltmetro di 1MΩ è possibile misurare tensioni su resistenze fino a circa 100KΩ. Con questo si vuole dire che se facciamo una misura di tensione ai capi di un resistore fino a 100KΩ il valore di tensione letto sul display è corretto. Per valori di resistenze superiori il valore di tensione che viene riportato è sempre un valore corretto, ovvero è il valore che effettivamente è attualmente presente su resistore, ma non è quello che si aveva prima che venisse collegato il voltmetro. Quello che si è avuto è un'alterazione della grandezza da misurare dovuta all'inserimento dello strumento stesso. In questi casi si parla di errore di inserzione. Conoscendo l'impedenza del voltmetro, del resistore e della tensione con il voltmetro collegato, è possibile risalire alla tensione senza voltmetro.

Da questo primo esempio si capisce che anche uno strumento apparentemente semplice come il voltmetro deve essere usato con attenzione.

Nel caso si voglia misurare una corrente, come riportato in Figura 2, bisogna porre attenzione come nella misura di tensione.

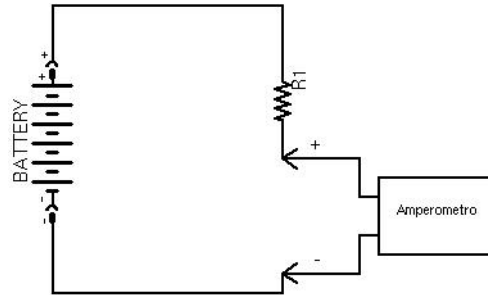


Figura 2: Misura di una corrente

Per poter misurare una corrente il tester deve essere impostato per la lettura della corrente, continua o alternata a seconda dei casi. Generalmente tale impostazione prevede l'utilizzo di altre boccole⁵, la ragione la si capirà a breve.

Per poter misurare una corrente che scorre attraverso un resistore è necessario che la stessa corrente passi per lo strumento affinché possa essere misurata⁶, dunque è necessario un collegamento in serie.

La corrente che circola all'interno del resistore è per la prima legge di Ohm pari a

$$I = \frac{V}{R}$$

Per ragioni analoghe al caso di misure di tensioni, R non sarà alterata in alcun modo⁷. Quello che un buon amperometro deve evitare è di far variare la tensione sul resistore, se questo dovesse accadere verrebbe infatti variata la corrente e dunque quello che misuriamo non è il valore della corrente che scorreva prima del collegamento dell'amperometro.

L'amperometro può essere modellizzato

³ Per ulteriori informazioni in materia si faccia riferimento al Tutorial "Leggi ed applicazioni fondamentali dell'elettrotecnica".

⁴ Per ulteriori informazioni in materia si faccia riferimento al Tutorial "Amplificatori da strumentazione".

⁵ In alcuni tester non bisogna cambiare boccole poiché sono presenti dei commutatori interni che provvedono in automatico.

⁶ Quanto detto non è vero in generale, ma dipende dal tipo di strumento. Le pinze amperometriche sfruttano infatti il principio di induzione magnetica per poter misurare la corrente, dunque non vengono affatto connesse al circuito. In questo caso per fare una misura un solo filo deve essere presente nel loop dello strumento, o quello di andata o quello di ritorno, altrimenti la misura sarà 0A !

⁷ La R totale cambierà, poiché sarà data dalla somma tra la resistenza dell'amperometro e R del resistore.

come un resistore, dunque essendo collegato in serie con R1, si ha che lo strumento e il resistore R1 formano un partitore di tensione⁸.

In un partitore di tensione si avrà la tensione più alta ai capi del resistore con resistenza maggiore. Dal momento che non si vuole alterare la tensione ai capi di R1 si deve fare in modo che l'amperometro abbia una resistenza interna molto inferiore di R1. R1 può anche essere sostituito da un circuito intero, come un amplificatore audio, il ragionamento non cambia. Si parla però più propriamente dicendo che l'amperometro deve avere una resistenza molto più bassa del sistema sotto misura.

Generalmente gli amperometri digitali possono avere resistenze inferiori al decimo di ohm. Questa è la ragione per cui bisogna cambiare boccole allo strumento, la circuiteria dell'amperometro è diversa da quella del voltmetro per quanto riguarda la prima parte, il resto è poi uguale, e nei tester digitali si riconduce quasi sempre a misurare una tensione.

Tecniche di condizionamento del segnale

Il tester digitale rappresenta uno strumento ad hoc per misurare tensioni, correnti ed altro ancora.

Quanto spiegato nel paragrafo precedente, relativamente alle problematiche sulla resistenza dello strumento e su cosa significhi misurare una qualunque grandezza, viene applicato in qualunque progetto elettronico. Si pensi che il transistor, lavora quasi sempre come amplificatore⁹; questo significa che deve leggere, ovvero misurare, il segnale in ingresso ed amplificarlo.

Vediamo ora le problematiche che si vengono ad avere nel caso in cui si debba effettuare uno strumento di misura, ovvero si debba leggere una tensione o una corrente in uscita da un sensore per poter poi riportare su uno strumento di visualizzazione il valore della grandezza misurata.

⁸ Per ulteriori informazioni in materia si faccia riferimento al Tutorial "Leggi ed applicazioni fondamentali dell'elettrotecnica".

⁹ Nei circuiti digitali il transistor lavora come interruttore e dunque in saturazione. Questa affermazione non è vera in assoluto poiché nelle porte logiche veloci, a scapito di elevati consumi, si evita di far lavorare il transistor in saturazione.

Iniziamo dicendo che il sensore rappresenta un trasduttore che ha il compito di trasformare una grandezza non elettrica in una elettrica. Si pensi ai sensori termici che trasformano una variazione di temperatura in una variazione di tensione o corrente. Sono presenti anche trasduttori che compiono operazioni inverse, ovvero trasformano una grandezza elettrica in una non elettrica, questi vengono più propriamente chiamati attuatori. L'altoparlante è per esempio un attuatore, che trasforma un segnale elettrico in un segnale acustico.

Un sistema di misura è costituito da vari blocchi¹⁰ come riportato in Figura 3.

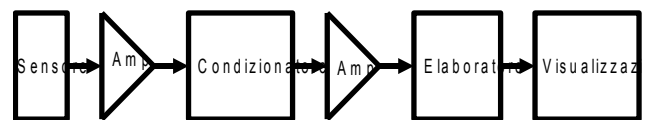


Figura 3: Rappresentazione a blocchi di un sistema di misura

Il primo blocco è rappresentato dal sensore. Questo viene collegato ad un amplificatore che provvede ad amplificarlo in modo da renderlo adatto allo stadio di condizionamento. La presenza di questo amplificatore può non essere necessaria. Lo stadio di condizionamento provvede a cambiare alcune proprietà del segnale che gli viene applicato in ingresso adattandolo alle specifiche dell'elaboratore.

Un tipico condizionamento è rappresentato dalla conversione corrente tensione o dalla sottrazione di un valore costante. Dopo lo stadio di condizionamento è presente un amplificatore che rende il segnale adatto allo stadio di ingresso dell'elaboratore. Questo non è sempre necessario ed in particolare, come anche per il primo amplificatore può essere inglobato nello stadio di condizionamento.

Lo stadio di elaborazione permette l'analisi del segnale elaborandolo in tutti i modi

¹⁰ L'alimentatore se pur non citato sarà sempre presente in un qualunque sistema elaboratore. Qualunque sistema elettronico o meno per compiere delle operazioni diverse dallo stare ferme necessitano di energia, in alcuni casi anche per stare fermi c'è però bisogno di energia!

possibili. In particolare in questo stadio è generalmente presente un convertitore analogico digitale¹¹ (ADC) che permette di operare una trasformazione del segnale da analogico in digitale, ovvero numerica, permettendo in questo modo di elaborare numericamente il segnale.

Ogni sistema, sia esso di misura o meno, deve avere una qualche forma di output che permetta di visualizzare, trasmettere o quant'altro, il risultato dell'elaborazione. Nel caso di uno strumento di misura sarà presente un display LCD o un ago a bobina mobile che permetterà la visualizzazione della grandezza misurata.

Concettualmente saranno presenti sempre tutti questi blocchi, ma nei casi più semplici potrebbero essere dei semplici fili. Il filo può essere inteso sia come amplificatore a guadagno unitario che come elaboratore nullafacente!

Prima di procedere con un esempio completo è bene richiamare le principali configurazioni di operazionali utilizzati in veste di amplificatori o "condizionatori".

Consideriamo in primo luogo l'amplificatore invertente. La configurazione è riportata in Figura 4, in particolare l'ingresso non invertente (+), in applicazioni in cui è richiesta una maggior precisione, può essere collegato a massa tramite un resistore di valore pari al parallelo delle resistenze R1 e R2, piuttosto che collegarla direttamente a massa.

Il guadagno di questa struttura è pari a $-\frac{R2}{R1}$, quindi la tensione V_{OUT} si calcola nel seguente modo $V_{OUT} = -\frac{R2}{R1} \cdot V_{IN}$. Da questa relazione si capisce che si ha con un amplificatore di tensione.

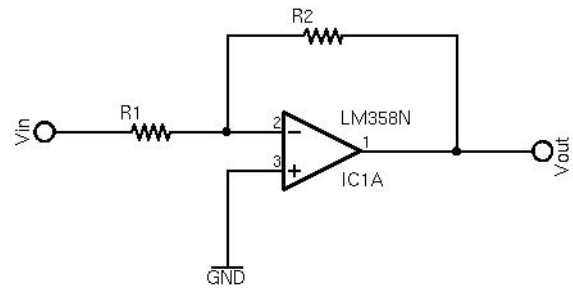


Figura 4: Amplificatore invertente

Un'altra importante configurazione è data dall'amplificatore di tensione non invertente, questa è riportata in Figura 5.

La tensione in uscita, in funzione della tensione in ingresso, viene calcolata per mezzo della seguente relazione $V_{OUT} = \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) \cdot V_{IN}$

E' possibile subito osservare che in questa configurazione non è possibile ottenere guadagni inferiori ad 1.

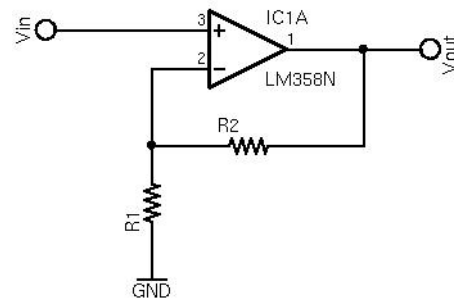


Figura 5: Amplificatore non invertente

Per ottenere un guadagno pari ad 1 bisogna porre la resistenza $R2=0\Omega$, ovvero sostituirla con un cortocircuito, in Figura 6 è riportata la modifica necessaria. Per le caratteristiche degli ingressi dell'operazionale, su R1 non scorrerà alcuna corrente, perciò può essere eliminata.

La nuova configurazione che si ottiene è sempre a guadagno unitario ma è quella che comunemente viene chiamata buffer o inseguitore di tensione, in Figura 7 ne è riportata la configurazione.

Il nominativo inseguitore di tensione discende dal fatto che la tensione in uscita è

¹¹ Il convertitore che fa l'operazione inversa, ovvero da digitale ad analogica viene detto DAC (Digital to Analog Converter).

uguale a quella in ingresso. Cerchiamo con un esempio di comprendere come e quando utilizzare una configurazione piuttosto che un'altra. Si supponga di dover realizzare un guadagno pari a -1000 per amplificare una tensione su un resistore da $10\text{K}\Omega$.

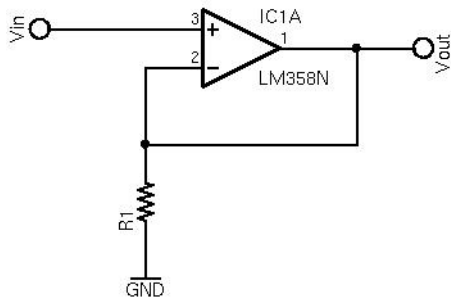


Figura 6: Configurazione a guadagno unitario

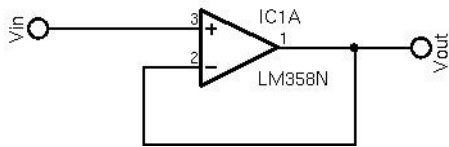


Figura 7: Buffer o inseguitore di tensione

Dal momento che è presente un segno meno, sicuramente bisognerà far uso di almeno un amplificatore invertente. Come altra informazione si sa che la tensione che bisogna amplificare è prelevata da una resistenza da $10\text{K}\Omega$, questo, per quanto detto per le misure in tensione, significa che il nostro strumento, ovvero amplificatore, dovrà avere un'impedenza in ingresso molto maggiore di $10\text{K}\Omega$. Generalmente in ingegneria per molto maggiore si intende di un fattore 10, ma questo dipende comunque dalle applicazioni e dalle scelte che vuole fare il progettista. L'impedenza d'ingresso dell'operazionale in configurazione invertente è pari ad R_1 , dunque volendo un guadagno pari a -1000 e una resistenza in ingresso di $100\text{K}\Omega$, bisognerebbe utilizzare $R_1=100\text{K}\Omega$ e $R_2=10.000\text{K}\Omega$ ovvero di $10\text{M}\Omega$. Resistenze così grandi sono prossime ad un circuito aperto e a causa delle correnti di polarizzazione

dell'operazionale possono causare tensioni di offset in uscita non accettabili. In particolare bisogna evitare l'utilizzo di valori ohmici per R_2 prossimi al $\text{M}\Omega$. Questo significa che con un solo operazionale non è possibile raggiungere il guadagno richiesto ed una elevata impedenza di uscita. Continuando ad utilizzare operazionali in configurazione invertente, saranno necessari tre stadi al fine di non perdere il segno meno. Quello che si può ottenere, considerando un guadagno pari -1 per il primo stadio, -100 per il secondo e -10 per il terzo, è riportato in Figura 8.

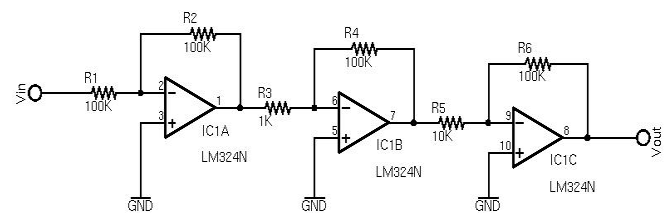


Figura 8: Amplificatore con guadagno -1000

L'utilizzo di tre operazionali comporta l'uso di un integrato che ne contiene 4. Se si riuscisse ad evitare l'uso di un operazionale si potrebbe usare un integrato che contiene solo due operazionali, abbassando in questo modo sia i costi che le dimensioni¹² del circuito.

Ricordando che in configurazione non invertente l'operazionale presenta un'impedenza in ingresso dell'ordine del $\text{M}\Omega$ ($1\text{M}\Omega=1000\text{K}\Omega$), si capisce che ben si presta come primo stadio¹³ per amplificare la tensione ai capi del resistore da $10\text{K}\Omega$, infatti la sua impedenza in ingresso è più di cento volte superiore!

In particolare è possibile porre un buffer guadagno unitario come primo stadio e come

¹² Questo è valido per i package PDIP, per alcuni package conviene, per risparmiare spazio, utilizzare integrati a singolo operazionale piuttosto che con operazionali multipli, facendo però un compromesso con i costi.

¹³ Per mezzo di amplificatori ad hoc è possibile raggiungere impedenze dell'ordine del $\text{G}\Omega$ ($1\text{G}\Omega=1000\text{M}\Omega$). Per ulteriori informazioni a riguardo si faccia riferimento al Tutorial "Amplificatori da strumentazione".

secondo stadio un amplificatore di tensione invertente con guadagno pari a -1000.

Poiché l'uscita di un operazionale è a bassa impedenza (dell'ordine del decimo di Ω) è possibile prendere R1 anche di soli 100 Ω , evitando di prendere valori troppo elevati per R2; in Figura 9 è riportato il nuovo schema dell'amplificatore a guadagno -1000.

Con la nuova soluzione si può ora utilizzare un integrato con due operazionali, permettendo di ridurre anche i consumi. La soluzione presentata permette anche una migliore lettura della tensione vista l'elevata impedenza in ingresso. Ciò nonostante il circuito presentato non è ancora ottimale per tutte le applicazioni. In particolare se la tensione da misurare non fosse continua ma alternata e alla frequenza di 2MHz, questa configurazione non andrebbe sicuramente bene se si vuole spendere pochi soldi!

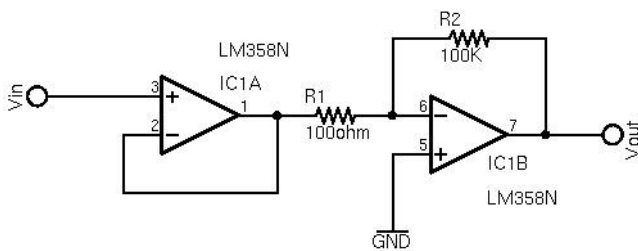


Figura 9: Nuovo amplificatore a guadagno -1000

In generale è sempre bene distribuire il guadagno tra i vari stadi, evitando che qualche stadio lavori a guadagni eccessivi. Il problema che si viene ad avere con gli amplificatori operazionali è che la banda passante diminuisce con l'aumentare del guadagno. In un sistema a più stadi amplificatori è lo stadio a minor banda passante a determinare la banda passante del sistema.

Sui data sheet il costruttore fornisce il valore della banda del proprio operazionale a guadagno unitario (inseguitore di tensione). Quando lo stadio amplificatore ha un guadagno maggiore di 1, per calcolare la nuova banda passante bisogna dividere la banda a guadagno unitario per il guadagno dello stadio amplificatore.

In particolare se si conosce la banda del

segnale che verrà posto in ingresso allo stadio amplificatore e il guadagno dello stesso, si può calcolare la banda a guadagno unitario necessaria moltiplicando la massima frequenza del segnale per il guadagno stesso¹⁴. Nel nostro caso avendo un segnale a 2MHz e un guadagno nel secondo stadio pari a 1000 (non si considera il segno) sarà necessario un operazionale con una banda a guadagno unitario pari a 2GHz (2000MHz), vi posso assicurare che è difficile da trovare e non costa poco!

Per evitare questo problema si può dividere il guadagno tra il primo stadio non invertente e il secondo invertente in parti uguali, minimizzando così la banda a guadagno unitario.

Ponendo dunque il guadagno dei singoli stadi pari a 31.6 per il primo e -31.6 per il secondo si avrà bisogno di un operazionale con banda a guadagno unitario pari ad almeno a 66MHz. Anche questo valore non è piccolo ma sicuramente è il migliore che si può ottenere con due operazionali.

Con un problema di questo tipo è bene riaumentare il numero di stadi amplificatori, continuando a distribuire il guadagno.

Con questo piccolo esempio si sono messe in evidenza alcune problematiche progettuali e i compromessi da fare per ottenere in maniera più economica possibile un progetto che soddisfi le specifiche¹⁵.

Vediamo ora due configurazioni circuitali, con operazionali, utilizzate nel blocco di condizionamento.

In Figura 10 è riportato un convertitore tensione corrente, in cui il sensore che fornisce la corrente da misurare è rappresentato dal diodo agli infrarossi BPW34. Come è possibile osservare il diodo è collegato in modo da lavorare in polarizzazione inversa. Infatti quello che viene ad essere convertita è la corrente di polarizzazione inversa del diodo¹⁶, che aumenta

¹⁴ Il prodotto guadagno banda è un valore costante, ed è uguale al valore della banda a guadagno unitario.

¹⁵ In questo esempio si sono introdotte le specifiche di progetto durante l'esempio stesso. In un progetto le specifiche sono note a priori e in quantità superiori all'esempio svolto, nel quale sono stati volutamente trascurati altri aspetti.

¹⁶ Il verso della corrente di polarizzazione inversa del diodo è opposto a quella del simbolo che rappresenta il verso della corrente in polarizzazione diretta.

all'aumentare delle radiazioni infrarosse che investono il sensore.

Dunque il convertitore corrente tensione è rappresentato dal solo resistore $R1$ e l'operazionale¹⁷. La conversione avviene secondo la seguente legge $V_{OUT} = R1 \cdot I_{IN}$.

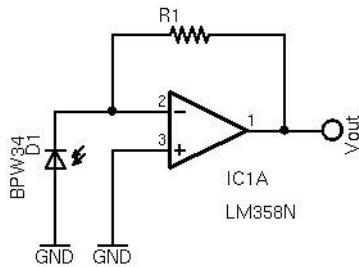


Figura 10: Convertitore corrente tensione

Un'altra configurazione importante è rappresentata dal sottrattore¹⁸ riportato in Figura 11. Questo permette di sottrarre un segnale costante e noto che viaggia insieme all'informazione, in particolare si ha che

$$V_{OUT} = (V_B - V_A) \cdot \frac{R2}{R1}, \text{ con la condizione che}$$

$R1=R3$ e $R2=R4$.

L'utilità di questa operazione la si può avere nel caso in cui ci si debba interfacciare con l'ingresso di un convertitore analogico digitale presente nello stadio elaboratore.

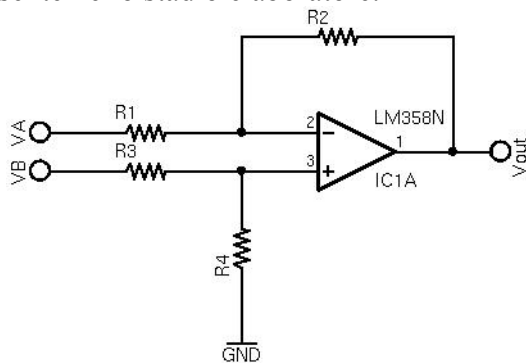


Figura 11: Configurazione a sottrattore

¹⁷ Come per la configurazione invertente anche in questo caso, in applicazioni in cui è richiesta una maggior precisione, l'ingresso non invertente (+) si collega a massa tramite un resistore di valore uguale a $R1$.

¹⁸ Per ulteriori configurazioni a sottrattore e chiarimenti in materia si faccia riferimento al Tutorial "Amplificatori da strumentazione".

analogico da convertire e un certo numero di linee di uscite su cui viene riportato il valore numerico, in forma binaria, della conversione da analogico digitale.

Lo stadio di ingresso è caratterizzato da una dinamica, ovvero da un valore minimo e massimo di tensione che è possibile applicare.

Il numero di linee di uscita rappresenta il numero di bit di conversione, il PIC16F876 ha per esempio un ADC a dieci bit con dinamica tra 0V e 5V¹⁹.

Per mezzo del numero di bit e della dinamica si calcola il quanto, ovvero la più piccola quantità rilevabile dall'ADC. Nel caso di ADC a 10 bit si ha che il numero di livelli con cui viene discretizzata la dinamica è 1024, quindi per una dinamica pari a 5V si ha che il quanto è di circa 5mV.

Descritto in linee generali un ADC, vediamo perché può risultare utile sottrarre un valore costante al segnale prima di effettuare la conversione.

Supponiamo di avere un segnale continuo di 4.5V al quale viene sommato un segnale che abbiamo interesse misurare che abbia un valore compreso tra 0V e 0.5V. Nel caso si abbia un ADC con dinamica in ingresso di 5V niente di più bello, possiamo porre il segnale direttamente all'ingresso.

Naturalmente le cose belle devono sempre insospettire, il problema è che gran parte dei quanti disponibili per la conversione vengono utilizzati per convertire un segnale noto da 4.5V, mentre solo 100 quanti dei 1024 vengono utilizzati per la conversione dell'informazione vera è propria. Come detto il quanto è di 5mV, dunque la risoluzione che si ottiene per leggere il segnale che avrà un'ampiezza massima di 0.5V sarà di 5mV. Se questa risoluzione è sufficiente per l'applicazione, non si ha nessun problema e la cosa che si pensava fosse bella è realmente bella. Qualora sia necessaria una risoluzione di almeno 0.8mV bisogna trovare una soluzione. La soluzione più semplice è utilizzare un ADC con un numero di bit maggiore, ovvero un quanto più piccolo. Questa soluzione non è delle migliori poiché i costi aumentano abbastanza velocemente

¹⁹ Il PIC16F876, come altri, ha la possibilità di cambiare la propria dinamica impostandola ponendo dei riferimenti in tensione sugli ingressi V_{REF} .

all'aumentare della risoluzione.

La soluzione comunemente utilizzata è eliminare il segnale che non porta informazione, in questo caso i 4.5V ed amplificare il segnale utile rimanente in maniera da coprire la dinamica dell'ADC. Nel nostro caso si deve dunque sottrarre 4.5V e moltiplicare per 10. In questo modo il quanto del nostro ADC è sempre 5mV, ma dal momento che in ingresso ho un segnale che è dieci volte maggiore ai 0.5V originali, si ha che la risoluzione è in realtà di 0.5mV. In questo modo aggiungendo qualche componente esterno si è aumentata la risoluzione di un fattore 10. Dal momento che era richiesta una risoluzione di almeno 0.8mV si è soddisfatta la specifica. Per ottenere un simile risultato con un aumento di bit dell'ADC avrebbe richiesto un aumento di 4 bit²⁰, ovvero l'utilizzo di un ADC a 14bit che è improponibile!

Vediamo ora un esempio completo per comprendere come procedere nell'analisi e dimensionamento di un circuito in cui sia richiesto applicare quanto esposto fino ad esso. Si supponga di dover realizzare un termometro digitale che misuri la temperatura tra 35°C e 45°C e la visualizzi su un display LCD. Si faccia uso di un sensore termico che fornisce una tensione in uscita proporzionale alla temperatura e la cui variazione sia lineare nel range d'interesse e aumenti di 1mV/°C ovvero che abbia un aumento di 1mV per ogni aumento della temperatura di 1°C.

Una possibile soluzione è presentata in Figura 12.

E' possibile subito osservare che l'alimentazione è ottenuta per mezzo di una batteria da 9V ma la tensione viene poi stabilizzata dal regolatore di tensione 7805; questa è la tipica tensione dei circuiti digitali²¹.

Consideriamo ora il circuito partendo dal sensore. Dal momento che si è interessati a misurare una temperatura tra 35°C e 45°C, e si ha una variazione della tensione di uscita di 1mV/°C, la tensione che si dovrà misurare sarà

compresa tra 35mV e 45mV.

Si capisce che tensioni inferiori a 35mV non sono di nostro interesse, quindi per quanto detto relativamente alla dinamica dell'ADC è bene eliminare i 35mV con un sottrattore. Visto che può essere complicato ottenere 35mV stabili, si può provvedere ad una prima amplificazione. Il guadagno del primo stadio è pari a 100, ed è ottenuto con un amplificatore non invertente, questo ci garantisce un'elevata impedenza in ingresso²².

La nostra tensione è ora dunque compresa tra 3.5V e 4.5V. L'ultimo valore è molto prossimo ai 5V ed in particolare non può essere raggiunto dai classici operazionali, per questo è necessario che l'uscita sia rail to rail, ovvero possa raggiungere i valori di alimentazione, nel nostro caso i 5V. E' comunque possibile utilizzare un operazionale con uscita non rail to rail, come ad esempio LM358, provvedendo però ad alimentarlo prima del regolatore 7805, ovvero direttamente dalla batteria da 9V. Dopo il primo stadio di amplificazione si ha che la tensione da eliminare è di 3.5V. Per mezzo della configurazione a sottrattore si pone all'ingresso invertente la tensione da sottrarre, mentre all'ingresso non invertente la tensione in uscita dal primo stadio amplificatore. Dal momento che la tensione è singola, quando si sottrae 3.5V ad una tensione inferiore (equivale a dire che la temperatura è inferiore a 35°C) in uscita si avranno 0V.

La tensione di riferimento è ottenuta per mezzo di un trimmer in configurazione partitore di tensione, questo deve essere regolato affinché la tensione sul suo piedino centrale sia 3.5V. Per ridurre i consumi dovuti alla corrente che circola sempre nel trimmer, è stato scelto un valore di 10KΩ. Per poter leggere la tensione sul trimmer in modo corretto, per mezzo del sottrattore, è necessario che R4 sia molto maggiore, ed è per questo che è stata posta a 100KΩ. Inoltre dal momento che con la sottrazione di 3.5V la nostra informazione avrà una dinamica massima di 1V (4.5V-3.5V) sarà necessario un guadagno pari a 5. Questo impone

²⁰ In realtà con un aumento di 4 bit si migliora la risoluzione di un fattore 16, mentre con un aumento di 3 bit si aumenta di un fattore 8.

²¹ Le nuove tecnologie hanno ormai abbassato questo valore a 3.3V e stanno convergendo verso gli 1.8V.

²² La necessità di impedenze più o meno elevate viene a dipendere dall'impedenza di uscita del sensore che in questo caso non è data. Un utilizzo di un amplificatore invertente richiederebbe un'alimentazione duale o un riferimento a metà tensione per emularla.

che R3 sia pari a $500K\Omega$ ²³.

Questo valore non è certo tra i più felici ma rappresenta un problema derivante dal fatto che si è voluta realizzare l'applicazione con due soli operazionali. Infatti se la sorgente di tensione venisse ottenuta come riportato in Figura 13,

la potenza e anche il rumore derivante dall'operazionale non usato è bene non lasciarlo fluttuante.

Gli ingressi degli operazionali non utilizzati devono essere posti ad un valore di tensione compreso nel valore di modo comune

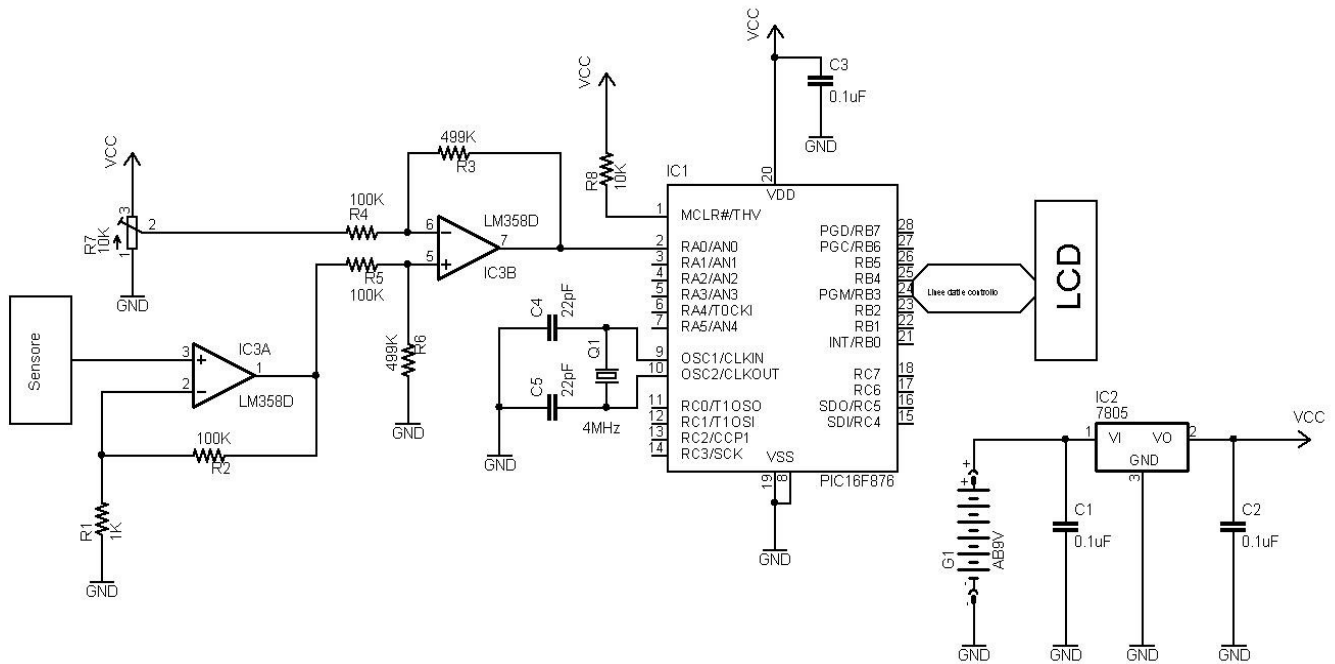


Figura 12: Soluzione circuitale del termometro digitale

l'uscita dell'operazionale avrebbe una resistenza tanto bassa che R4 potrebbe essere tranquillamente anche di 100Ω . Per ragioni legate ai consumi è comunque bene porre R4 pari a $10K\Omega$ e porre R3 pari a $50K\Omega$.

In ambedue le soluzioni proposte si deve porre $R5=R4$ e $R6=R3$.

Nel caso si utilizzi quest'ultima soluzione si dovrà utilizzare un integrato con 4 operazionali di cui uno rimarrà inutilizzato. Per poter ridurre

dell'operazionale stesso, mentre l'uscita deve variare nell'intervallo ammesso dall'uscita stessa.

Una possibile soluzione su come collegare un operazionale non utilizzato è riportato in Figura 14, questa configurazione è praticamente uguale a quella utilizzata per generare il riferimento di tensione. Nel caso in cui l'alimentazione sia duale è possibile collegare l'ingresso non invertente direttamente a massa.

Qualora si stia utilizzando un valore di tensione pari alla metà della tensione di alimentazione, in maniera da emulare un'alimentazione duale²⁴, è possibile usare

²³ Il valore commerciale più prossimo va ricercato tra i resistori di precisione ed è $499K\Omega$. I costi di questi resistori è elevato e può dunque convenire porre un trimmer in maniera da raggiungere il valore opportuno di resistenza. Si ricorda che R3 deve essere uguale a R6.

²⁴ Per un esempio di questo tipo si guardi gli esempi

questo riferimento.

Nel caso della nostra applicazione si ha il riferimento a 3.5V che può comunque andare bene. Dal momento che la configurazione di Figura 14 è un buffer, la sua impedenza di ingresso è molto elevata e può dunque essere collegata direttamente sul trimmer di Figura 12, senza timori di alterare la sorgente di riferimento.

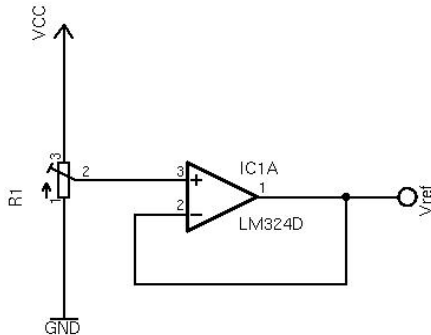


Figura 13: Riferimento di tensione

Con il guadagno uguale a 5, in uscita al sottrattore sarà presente una tensione che varierà tra 0V e 5V come richiesto dalla dinamica d'ingresso dell'ADC del PIC16F876.

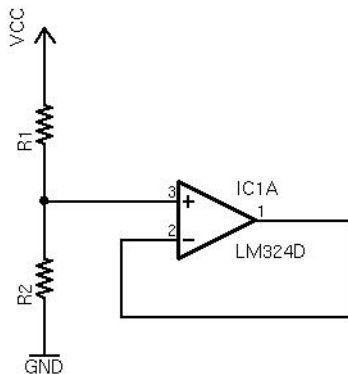


Figura 14: Configurazione da utilizzare per il collegamento di operazionali non utilizzati

Vediamo le risoluzioni che si avrebbero nei vari stadi. Se si collegasse direttamente il sensore all'ingresso dell'ADC si avrebbe che i 10mV che indicherebbero la variazione di 10°C tra 35°C e 45°C, verrebbero discretizzati con un quanto di 5mV dunque con una risoluzione di

5°C. Con tale risoluzione si potrebbe affermare che una persona gode di ottima salute anche quando ha una febbre da cavallo!

Se collegassimo l'uscita del primo amplificatore direttamente all'ingresso dell'ADC si avrebbe che i nostri 10°C verrebbero rappresentati da 1V, dunque discretizzati con 200 quanti da 5mV. In questo caso si avrebbe una risoluzione di 0.05°C e la cosa potrebbe essere più che accettabile per un termometro per la febbre.

Dopo il sottrattore si ha che la tensione viene moltiplicata per 5, coprendo l'intera dinamica dell'ADC. In questo caso la risoluzione che si ottiene è 5 volte migliore della precedente ovvero 0.01°C²⁵.

L'analisi appena esposta va in realtà fatta all'inizio, infatti la risoluzione sarà sicuramente una delle specifiche di progetto. Nel caso in cui si venga incaricati del progetto con delle specifiche su un pezzo di carta, la risoluzione sarà sicuramente presente. Nel caso in cui il progetto sia vago sarà compito del progettista capire quale sarà la risoluzione richiesta.

Da quanto esposto si può capire che alcune volte, se non è richiesta un'elevata risoluzione si può evitare l'utilizzo del sottrattore per coprire l'intera dinamica dell'ADC.

Una volta che il segnale è stato convertito in digitale lo si può elaborare in qualunque modo per mezzo del microcontrollore. Si può per esempio calcolare il valore medio della temperatura giornaliera o i valori massimi e minimi, nonché l'orario in cui i valori di massimo e minimo sono avvenuti. Naturalmente dopo l'elaborazione ci deve essere un mezzo per poter leggere i risultati, infatti l'informazione ha ragione di esistere se può essere trasmessa!

Attualmente si fa sempre più uso di display LCD, in particolare si potrebbe usare un display 16x2 (16 caratteri per riga e due righe).

Se la temperatura potesse accidentalmente raggiungere anche temperature superiori a 45°C si potrebbero avere o meno dei problemi a seconda delle scelte fatte.

Nel caso in cui si sia utilizzato un amplificatore rail to rail la tensione di uscita non sarà mai al di sopra dei 5V poiché c'è il vincolo dell'alimentazione a 5V. In questo modo però

riportati nel Tutorial "Sensori di campo magnetico ad effetto Hall e magnetoresistivi".

²⁵ Questo sarà vero solo se la sensibilità del sensore sarà idonea.

ogni temperatura superiore a 45°C verrebbe interpretata come 45°C impedendo di riconoscere i 45°C. Per evitare di perdere l'informazione di 45°C e al tempo stesso avere la possibilità di riconoscere se la temperatura è oltre il range richiesto dalle specifiche, si potrebbe dimensionare il tutto per una temperatura massima di poco superiore a 45°C, come per esempio 45.5°C. Con tale artificio potremmo riconoscere i 45°C e quando la temperatura sale oltre i 45°C potremmo dire che si è in over flow o over range (oltre portata).

Dunque nel caso in cui si faccia uso di un operazionale rail to rail bisogna solo ritoccare i valori delle resistenze, in particolare R3 e per conseguenza R6²⁶.

Nel caso si scelga di usare un operazionale con uscita non rail to rail le considerazioni appena svolte è bene comunque prenderle in considerazione in modo da riconoscere una situazione di over range, però sussiste anche un altro problema. Questa volta il vincolo dell'alimentazione di 5V non è più presente visto che si preleva l'alimentazione dalla batteria da 9V. Ciò comporta che per temperature superiori a 45.5°C si possono avere tensioni superiori a 5V, ovvero si può andare oltre la dinamica dell'ADC causandone la rottura. Per evitare questo è bene mettere un diodo di protezione²⁷ sull'ingresso dell'ADC come riportato in Figura 15.

Il diodo, nelle condizioni operative tra 35°C e 45°C, è normalmente interdetto, poiché la tensione sull'anodo è minore di quella sul catodo posto a +5V.

Quando la tensione dovesse salire oltre a +5V per una quantità pari a circa 0.3V il diodo entra in conduzione cortocircuitando a Vcc l'ingresso dell'ADC. In questo modo si protegge il PIC16F876 ma si stressa l'uscita dell'operazionale²⁸. Per tale ragione è bene

scegliere un operazionale che abbia un uscita protetta dai corto circuiti.

Tali analisi andrebbero fatte nella fase preliminare di progetto, ovvero quando si cerca di capire con cosa si ha a che fare.

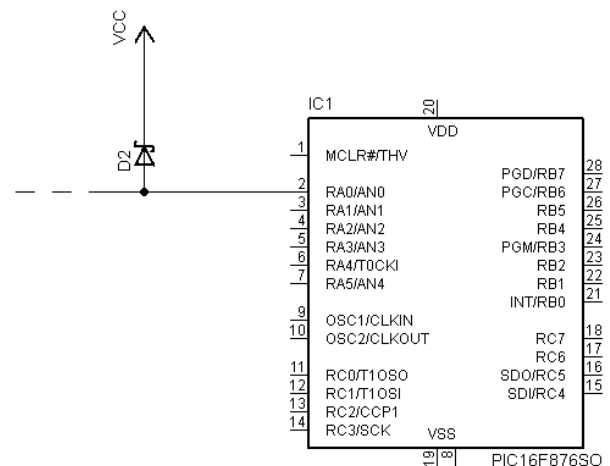


Figura 15: Collegamento del diodo di protezione all'ingresso dell'ADC (gli altri collegamenti non sono visualizzati)

Anche in questo esempio, come nel caso dell'amplificatore con guadagno -1000, si sono dovuti accettare alcuni compromessi, sta al progettista decidere se accettare o meno un compromesso a seconda delle specifiche richieste.

La cosa più importante è raggiungere lo scopo con il minor sforzo possibile ma non si avrà mai la moglie ubriaca e la botte piena!

Bibliografia

www.LaurTec.com : sito di elettronica dove poter scaricare gli altri articoli menzionati, aggiornamenti e progetti.

www.microchip.com : sito dove scaricare il datasheet del PIC16F876.

www.national.com : sito dove scaricare i datasheet degli operazionali LM358 e LM324.

²⁶ In alternativa si può ritoccare R4 e R5.

²⁷ Nei casi di alimentazione duale si fa uso di un secondo diodo collegato con il catodo all'ingresso dell'ADC e l'anodo a $-V_{REF}$ del PIC (in alcuni casi anche a massa), ovvero il valore minimo della dinamica. Diodi con questa connessione sono generalmente presenti anche all'interno degli integrati CMOS per proteggere gli ingressi da scariche elettrostatiche accidentali.

²⁸ Si fa notare che il diodo di protezione è di tipo schottky. Questo permette di garantire che la protezione da sovratensioni avvenga prima delle

protezioni interne al microcontrollore stesso.