

***LaurTec***

# **Amplificatori da strumentazione**

**Autore :** *Mauro Laurenti*

**email:** [info.laurtec@gmail.com](mailto:info.laurtec@gmail.com)

**ID:** AN2006-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

Quando bisogna effettuare delle misure di grandezze elettriche e la precisione non ammette compromessi, gli amplificatori da strumentazione possono essere la soluzione del problema. Verranno a breve introdotti questi componenti illustrando le loro potenzialità e applicazioni.

In ultimo, verranno presentati esempi pratici di utilizzo di amplificatori tradizionali e dell'amplificatore da strumentazione AD623.

## Amplificatori da strumentazione, uno sguardo d'insieme

Gli amplificatori da strumentazione chiamati brevemente in-amp (instrumentation amplifier) non devono essere visti come amplificatori operazionali anche se da un punto di vista puramente simbolico utilizzano spesso la stessa rappresentazione. Gli innumerevoli vantaggi che questo dispositivo possiede rispetto all'amplificatore operazionale lo deve porre su un gradino a parte.

Un in-amp possiede un ingresso differenziale e un'uscita single ended<sup>1</sup>. L'impedenza dei due ingressi è bilanciata<sup>2</sup> e ha dei valori caratteristici di  $10^9 \Omega$  (1000 M $\Omega$ ) ed anche di più a seconda dell'implementazione dello stadio d'ingresso.

In funzione della configurazione anche la corrente di polarizzazione in ingresso (ingresso con BJT) o di leakage (ingresso con FET) è variabile da 1nA a 50nA per i primi o da 1pA a 50pA per il secondo tipo di stadio d'ingresso<sup>3</sup>.

A causa della presenza di queste correnti che possono essere sia entranti che uscenti dagli ingressi, si ha la necessità, qualora l'impedenza della sorgente vada ad "infinito" (come per esempio nel caso in cui si disaccoppi la sorgente con una capacità) di un percorso verso massa, questo per evitare che la tensione di modo

comune salga fino a saturare l'in-amp.

La sua impedenza di uscita si aggira a valori nominali del m $\Omega$ , quindi rappresenta un'ottima sorgente di tensione.

Un parametro molto importante che caratterizza gli in-amp è il CMRR (Common Mode Rejection Ratio), questo si aggira a valori che vanno da un minimo di 80dB a 120dB e più.

Queste prime caratteristiche fanno ben intendere che l'amplificatore da strumentazione può essere usato in tutti quei casi in cui il segnale da prelevare è "accompagnato" da tensioni di modo comune che possono essere più grandi di diversi ordini di grandezza<sup>4</sup> del segnale da misurare.

Il CMRR è funzione della frequenza e diminuisce all'aumentare della frequenza, questo però, visto comunque l'elevato CMRR in DC, garantisce comunque elevati CMRR per bande di diverse decine di KHz<sup>5</sup>. Questo garantisce che alle frequenze industriali 50Hz (e seconda armonica) il CMRR è tale da rendere l'in-amp un ottimo dispositivo di misura in ambienti "ostili". Oltre ad avere un ottimo CMRR l'in-amp possiede valori di rumore in ingresso molto bassi dell'ordine di 10 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ , questo è molto importante dal momento che gli in-amp, si trovano a doversi interfacciare con sorgenti i cui livelli di tensione sono dell'ordine anche del  $\mu\text{V}$ .

Un'ulteriore peculiarità dell'in-amp è la facilità con cui è possibile variare il guadagno, ovvero variando una resistenza. Alcuni in-amp possiedono degli appositi ingressi che permettono di decidere il valore del guadagno semplicemente collegando quest'ultimi a massa o a Vcc.

In questo modo si garantiscono migliori prestazioni in termini di stabilità termica del guadagno nonché una maggior prevedibilità del valore stesso.

<sup>1</sup> Per uscita single ended ci si riferisce ad uscita singola. Un'uscita single ended è quella del LM358, LM324 e altri integrati comuni. Questa si distingue dall'uscita differenziale, meno comune in applicazioni di tipo obbiettivo in cui si hanno due uscite sfasate di 180°.

<sup>2</sup> Ovvero uguale

<sup>3</sup> Per mezzo di stadi d'ingresso realizzati a FET si riescono ad ottenere alte impedenze d'ingresso ma il CMRR è più basso e si ha inoltre una maggiore tensione di offset in ingresso e un maggior drift rispetto ai BJT.

<sup>4</sup> In un ECG (elettrocardiografo) il segnale ha un'ampiezza minima di 0,5mV (questa è quella che in realtà deve essere rilevabile dall'elettrocardiografo secondo le norme vigenti) ed una tensione di modo comune di 1,5V.

<sup>5</sup> Con gli ultimi sviluppi e necessità di impiego di in-amp per applicazioni RF le bande per il quale vengono garantite le ottime prestazioni di cui sopra si estendono ormai anche al MHz.

**Possibili implementazioni dell'in-amp**

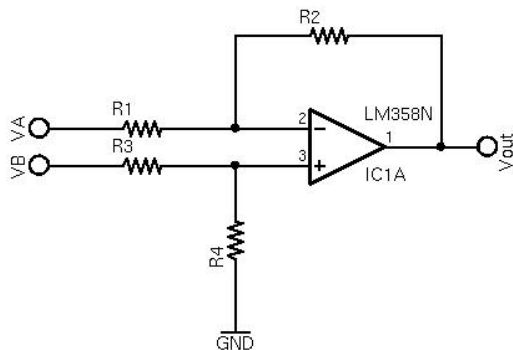
I modi per ottenere il dispositivo precedentemente elogiato sono differenti. Come in ogni problema fisico ci sono infatti più soluzioni, ognuna delle quali ha i suoi pregi e i suoi difetti. Pregi e difetti vanno però opportunamente pesati a seconda dell'applicazione e dei costi.

Il ruolo ricoperto dall'in-amp è quello di amplificatore differenziale di precisione. Questo può essere ottenuto con la nota configurazione a sottrattore dell'amplificatore differenziale di Figura 1, per la quale posto  $R_1=R_3$  e  $R_2=R_4$  si ottiene la seguente funzione di trasferimento<sup>6</sup> (guadagno) :

$$\frac{V_{OUT}}{(V^B - V^A)} = \frac{R2}{R1}$$

dalla quale si ricava che l'uscita dipende dall'ingresso secondo questa legge

$$V_{OUT} = (V^B - V^A) \frac{R2}{R1}$$



**Figura 1: Configurazione sottrattore**

Con questa prima configurazione si è raggiunto lo scopo relativo all'operazione da compiere ma non si riescono a raggiungere le prestazioni precedentemente elencate, che fanno dell'in-amp un dispositivo di "precisione".

La resistenza d'ingresso che si riesce ad ottenere è relativamente bassa, visti i limiti imposti ai valori di  $R_2$ <sup>7</sup> per le correnti di

<sup>6</sup> È possibile calcolarla utilizzando il principio di sovrapposizione degli effetti.

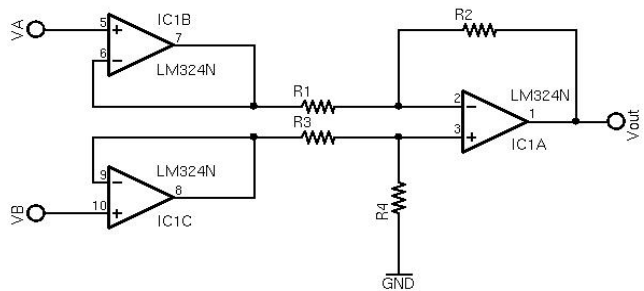
<sup>7</sup>  $R_2$  non può essere troppo grande poiché la corrente di offset scorre al suo interno causando una tensione di

polarizzazione nonché quella di garantire sempre un buon percorso verso massa per le correnti di polarizzazione. Per ottenere un buon guadagno si vorrebbe infatti  $R_2$  alta e  $R_1$  bassa.

Oltretutto le impedenze dei due ingressi differenziali non sono uguali, questo determina un peggioramento del CMRR .

Il guadagno può essere variato giocando sui valori delle resistenze, ma dal momento che la funzione di trasferimento calcolata per il circuito di Figura 1 impone la condizione  $R_1=R_3$  e  $R_2=R_4$ , questa deve essere mantenuta ogni volta che viene variato un valore di una resistenza, ovvero le resistenze vanno variate sempre in coppia; questo rappresenta un disagio per variare il guadagno.

Un modo naturale per eliminare i disagi relativi all'impedenza d'ingresso è quella di introdurre dei buffer in ingresso in modo da disaccoppiare lo stadio sottrattore dalla sorgente, come riportato in Figura 2.



**Figura 2: Configurazione sottrattore con buffer in ingresso**

Con questa nuova configurazione si è passati a tre operazionali e si è mantenuto il disagio del dover variare il guadagno intervenendo su due valori di resistenza.

Facendo uso di tre operazionali è possibile ottenere una configurazione più snella, che a scapito della maggior complessità, permette di raggiungere tutti i pregi precedentemente elencati per un in-amp. In Figura 3 è riportata tale configurazione la cui funzione di trasferimento<sup>8</sup> è :

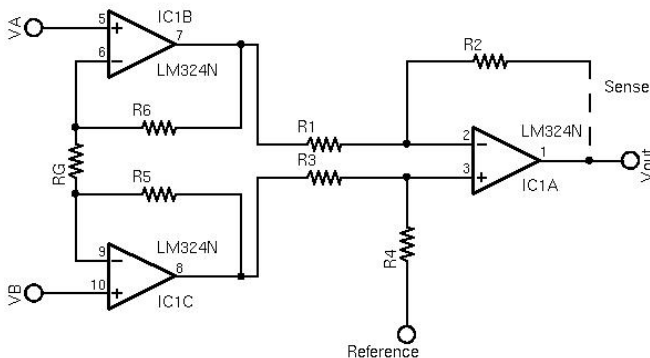
offset in uscita.

<sup>8</sup> Si considera ancora valida la condizione usata nel calcolo della funzione di trasferimento della configurazione in Figura 1.

$$\frac{V_{OUT}}{(V^B - V^A)} = \frac{R2}{R1} \left( 1 + \frac{R6}{R_G} \right)$$

dalla quale si ottiene che la tensione di uscita è

$$V_{OUT} = (V^B - V^A) \frac{R2}{R1} \left( 1 + \frac{R6}{R_G} \right)$$



**Figura 3: Configurazione di un amplificatore da strumentazione**

Questa configurazione, come d'altronde pure le altre, possono essere implementate sia con componenti discreti che in forma integrata. Con la tecnologia monolitica è attualmente possibile effettuare un settaggio dei resistori per mezzo di laser (laser trimming), ottenendo una accuratezza dello 0,01%.

L'utilizzo di IC, risulta essere una scelta più economica che implementare in-amp con componenti discreti e utilizzare resistori con tolleranze dell'1%. Tali precisioni si rendono necessarie per evitare sbilanciamenti dello stadio sottrattore.

La soluzione integrata permette inoltre di evitare, o meglio limitare, variazioni termiche tra i vari resistori permettendo dunque di ottenere CMRR di valori elevati. Come visibile dalla Figura 3 l'impedenza dei due ingressi è uguale ed inoltre il guadagno dello stadio front end e quindi dell'in-amp<sup>9</sup> è regolabile variando il solo valore di  $R_G$ .

Oltre a quanto esposto, la particolare

<sup>9</sup> I valori delle resistenze dello stadio sottrattore sono regolate in sede di fabbricazione quindi hanno un valore fisso.

configurazione dello stadio d'ingresso è tale che una tensione di modo comune applicata agli ingressi differenziali si presenta inalterata ai capi di  $R_G$ , per cui la d.d.p. ai sui capi è nulla. Ciò comporta che la tensione di modo comune si ritrova inalterata alle uscite dei due operazionali d'ingresso ma verrà poi eliminata<sup>10</sup> dallo stadio successivo.

Questo significa che se si applicasse un segnale differenziale più uno di modo comune all'ingresso differenziale, questo verrebbe amplificato di un fattore determinato da  $R_G$  mentre il segnale di modo comune non verrebbe amplificato. Questo si traduce nell'importante proprietà che il CMRR aumenta all'aumentare del guadagno del front end. Tale caratteristica non era presente nelle configurazioni analizzate precedentemente.

All'ingresso Reference è possibile applicare un offset che permettere per esempio di avere la tensione d'uscita variabile intorno ad un valore di riferimento.

Un'ultima nota merita "l'ingresso" Sense, non sempre presente nelle versioni integrate degli amplificatori da strumentazioni. Questo permette di variare il guadagno dell'ultimo stadio ma cosa ancor più importante permette di "racchiudere" nell'anello di reazione, con i benefici da esso derivante, l'eventuale circuiteria esterna che potrebbe rendersi necessaria per esempio per pilotare carichi di potenza. Questo ingresso risulta normalmente collegato all'uscita dell'ultimo stadio per chiudere l'anello di reazione.

## Specifiche degli in-amp

Al fine di utilizzare in maniera efficiente ed opportuna gli in-amp è necessaria una comprensione delle principali specifiche del dispositivo. L'utilizzo improprio va visto non come un errore di progetto bensì uno spreco di risorse, nonostante siano ormai presenti sul mercato anche in-amp più economici.

## Gain

Il guadagno è legato alla funzione di trasferimento e viene quindi a dipendere dalla

<sup>10</sup> A meno del fattore di guadagno di modo comune.

configurazione utilizzata per l'implementazione dell'in-amp. Il costruttore fornisce l'equazione del guadagno che è funzione della  $R_G$  di cui si è parlato. Il guadagno  $G$  deve trovarsi nell'intervallo specificato dal costruttore e generalmente va da 1 a 1000 anche se è possibile ottenere guadagni di 10 000.

Il guadagno massimo può effettivamente essere utilizzato, ma il costruttore generalmente non garantisce le buone prestazioni dell'in-amp. Sono presenti dispositivi il cui guadagno è fissato a valori discreti dal costruttore (Es. o 10 o 100) selezionabili dal progettista. L'utilizzo di questo tipo di in-amp è consigliato nei casi in cui sia abbia l'esigenza di un basso rumore in ingresso e di una stabilità del guadagno al variare della temperatura. Questo è ottenibile poiché il guadagno è fissato da resistori che possono essere regolati con il laser ottenendo un'accuratezza dello 0,01%.

Da quanto detto si capisce che l'equazione del guadagno è soggetta ad un errore dovuto alla tolleranza con cui sono noti i valori dei resistori. Qualora il guadagno sia determinato da valori di resistenze interne all'integrato si capisce che tale errore sarà relativamente piccolo rispetto a quello ottenuto con resistenze esterne con tolleranze dell'1%<sup>11</sup>. L'errore che si ha sul guadagno può essere compensato in quei sistemi in cui il segnale in uscita dall'in-amp venga elaborato, dopo opportuna conversione analogico-digitale, da un microcontrollore o altro dispositivo di elaborazione digitale.

### Settling time

Rappresenta l'intervallo di tempo necessario all'uscita per raggiungere il valore finale entro una certa tolleranza<sup>12</sup>.

<sup>11</sup> Sono presenti anche resistenze con tolleranze inferiori ma il costo può divenire addirittura superiore a quello di un'amplificatore da strumentazione.

<sup>12</sup> L'in-amp come molti dispositivi può essere modellizzato come un sistema del secondo ordine, ovvero descritto da un'equazione differenziale del secondo ordine; quindi l'uscita nel raggiungere il valore finale oscillerà con un'ampiezza via via decrescente (esponenzialmente) intorno al valore finale.

### Tensione di offset

Questo parametro viene spesso considerato come una delle figure di merito<sup>13</sup> principali. Bisogna fare subito una distinzione tra la tensione di offset in ingresso e quella di uscita. La prima, risulta essere di ampiezza inferiore alla seconda, ma il suo effetto in uscita viene a dipendere dal guadagno. Quindi la tensione di uscita dovuta al solo contributo della tensione di offset in ingresso è pari a tale tensione moltiplicata per il guadagno. Si capisce quindi che a seconda del guadagno predominerà uno dei due offset. La natura degli offset è legata alle dissimmetrie dei vari componenti siano essi attivi che passivi. Nel caso di utilizzo di sistemi di controllo "intelligenti" è possibile eliminare il contributo dei due effetti sia esso di segno positivo che negativo.

Nonostante questo accorgimento non è possibile comunque eliminare la variazione (drift) dell'offset legato alle variazioni ambientali intorno al dispositivo.

### Correnti di polarizzazione

L'input bias currents rappresentano le correnti di polarizzazione necessarie a polarizzare lo stadio differenziale in ingresso. I FET possiedono correnti di polarizzazione molto basse se paragonate a quelle necessarie per uno stadio differenziale a BJT ma hanno il problema di aumentare notevolmente con la temperatura (raddoppiano ogni 11 °C).

La corrente di offset rappresenta la differenza delle correnti di bias presenti ai due ingressi. Queste correnti danno origine ad una nuova tensione di offset dal momento che andranno a scorrere sulla resistenza della sorgente. Questa si sommerà con la tensione di offset in ingresso dell'in-amp.

Nel caso in cui le eventuali resistenze di protezione agli ingressi dell'in-amp non siano uguali, e questo sarà sempre vero, la differenza delle impedenze, a causa delle correnti di polarizzazione, genererà un segnale non di modo comune che può compromettere eventuali misure di precisione.

Si ricorda anche che le correnti di

<sup>13</sup> Una figura di merito rappresenta una grandezza presa come riferimento per poter caratterizzare un dispositivo o sistema elettronico.



polarizzazione possono circolare sulla resistenza di reazione determinando una tensione di offset in uscita.

Dal momento che l'ampiezza e segno di tali correnti non è a nota priori, anche gli offset in tensione derivanti da queste correnti non sono note.

### Common Mode Rejection

Il CMR è dato dal rapporto del guadagno differenziale e il guadagno di modo comune. Il CMRR rappresenta invece la scrittura in forma logaritmica (base 10) del CMR. Valori tipici per un in-amp si aggirano da 80dB a 120dB. In molte configurazioni con cui vengono implementati gli in-amp il CMRR aumenta con il guadagno per le ragioni precedentemente viste. Aumentare il CMRR in questa maniera determina però una diminuzione della banda passante. Il valore del CMRR ha una forte dipendenza dalla frequenza in particolare diminuisce con il suo aumentare, un tipico andamento è riportato in Figura 4.

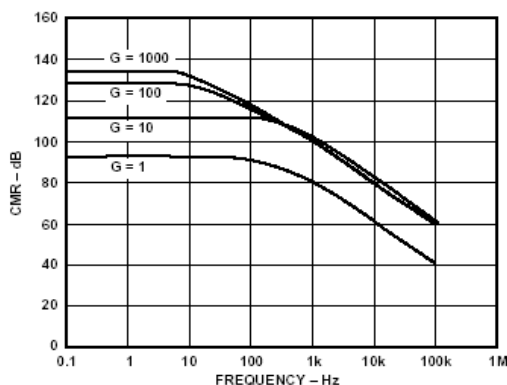


Figura 4: Andamento del CMRR in funzione della frequenza e del guadagno

### Considerazioni per l'utilizzo degli in-amp

Una particolare attenzione deve essere posta alle correnti di polarizzazione che devono avere un proprio cammino verso massa. Questo deve essere "fornito" qualora la sorgente possieda un'impedenza tale da impedire lo scorrere della corrente necessaria.

In diverse applicazioni si ha la necessità di proteggere gli ingressi dell'in-amp oltre i livelli

garantiti dal costruttore. Nel caso per esempio di un elettrocardiografo vi è la possibilità che sul paziente venga applicata una scarica ad alta tensione e breve durata (scarica del defibrillatore) e si abbia poi la necessità di sapere le ripercussioni sull'attività elettrica del miocardio dopo la scarica, si presume quindi che l'elettrocardiografo non si sia danneggiato.

Un modo standard per aumentare il livello di protezione è quello di introdurre, in serie ad ogni ingresso, una resistenza di valore opportuno. Tale valore, nonché la tolleranza dei componenti, va scelta in funzione delle specifiche di progetto. Infatti l'inserimento di resistori in ingresso comporta un degrado delle prestazioni del primo stadio.

Un primo parametro che subisce un degrado è il CMRR, un secondo è legato al rumore termico (rumore Johnson) che andrà ad aggiungersi al rumore introdotto dall'in-amp. Le tolleranze dei componenti causeranno anche una tensione di offset aggiuntiva dal momento che su di esse scorreranno le correnti di polarizzazione.

Un'altra tensione di offset che può sommarsi a quella già menzionata, può derivare anche da variazioni della resistenza in funzione della temperatura differente per i vari resistori di protezione<sup>14</sup>. Il rumore introdotto in ingresso da un resistore di 1K $\Omega$  è di circa 4 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ <sup>15</sup>.

Dal momento che i resistori di protezione vanno introdotti su i due ingressi il rumore in realtà sarà maggiore<sup>16</sup>.

All'interno dell'in-amp è comunque presente una protezione ed è generalmente rappresentata da due diodi (per ogni ingresso) e da resistori in serie alle basi dei transistor d'ingresso, questi proteggono da eventuali ESD (Electro Static Discharge) ovvero scariche elettrostatiche. L'utilizzo di diodi esterni per aumentare il

<sup>14</sup> Al fine di evitare gradienti termici anche sul singolo resistore è bene che venga saldato orizzontalmente al PCB e non verticalmente. Un'altra accortezza utilizzata nella progettazione dei circuiti integrati ma utilizzabile anche per circuiti discreti è quella di saldare i resistori, che devono mantenere la proprietà di matched, paralleli tra loro e alle linee di flusso termico, in modo da limitare il gradiente termico tra i due resistori.

<sup>15</sup> Per una banda di 800KHz.

<sup>16</sup> Il rumore totale è data dalla radice quadrata della somma dei quadrati dei singoli rumori.

livello di protezione degli ingressi permette di utilizzare valori di resistenze più basse.

Il problema introdotto da questo tipo di protezione è legato alle correnti di leakage<sup>17</sup> (di perdita) dei diodi e all'aumento esponenziale di quest'ultime con la temperatura; questo introduce ulteriore tensione di offset. Tale problema rende inutilizzabile questo tipo di protezione nei casi in cui la sorgente da misurare è ad alta impedenza.

Nei dispositivi di misura che devono lavorare parallelamente ad un defibrillatore tale protezione assieme a valori di resistenze di un 100K $\Omega$  risultano indispensabili. Sul mercato sono presenti diodi Schottky con correnti di leakage di alcuni mA e diodi di tipo fast Schottky con correnti di leakage di 200nA max.

L'utilizzo di componenti esterni come anche la R<sub>G</sub> tende a degradare le prestazioni dell'in-amp.

In particolare a causa della presenza di R<sub>G</sub> l'accuratezza del guadagno tende a peggiorare notevolmente tanto da dipendere interamente dalla tolleranza con cui viene scelto il resistore e dalla sua dipendenza con temperatura. Se si utilizzasse un resistore a film metallico con tolleranza 1% 100ppm/°C ovvero con una variazione da temperatura dello 0,01% e il sistema subisse una variazione termica di 10°C si avrebbe una variazione dello 0,1% del valore nominale.

Un altro problema che può determinare una variazione del guadagno, che può in molti casi essere trascurato, è l'effetto termocoppia che si genera quando due metalli di tipo diverso sono connessi tra loro (Es. saldature- reofori componenti).

Dalle ultime problematiche esposte, si capisce che la tolleranza del resistore R<sub>G</sub> è di notevole importanza. Sul mercato sono presenti resistori con tolleranze 0.1% 25ppm/°C che possono essere utilizzate nei casi in cui non si può far uso di amplificatori da strumentazione a guadagno fisso.

L'uscita dell'in-amp è tipicamente in grado di pilotare carichi di 2 K $\Omega$  con tensioni di uscita di  $\pm 10V$ . Qualora si abbia la necessità di

pilotare un carico che assorbe correnti superiori a quelle che caratterizzano lo stadio di uscita dell'in-amp, si rende necessario un buffer di corrente. Per limitare il degrado delle caratteristiche di uscita, quali una bassa resistenza e la non linearità introdotta dal buffer, si può utilizzare l'ingresso sense<sup>18</sup> (se disponibile) per comprendere nel loop di uscita anche il buffer.

### Applicazione d'esempio

Come possibile applicazione verrà illustrato un tipico circuito in cui si fa uso di un AD623. Questo operazionale da strumentazione rappresenta uno dei più economici presenti sul mercato ed è prodotto dall'Analog Devices.

Tra le principali caratteristiche si ricordano :  
Alimentazione singola o duale (+3.. +12V)  
Uscita Rail to Rail<sup>19</sup>  
Bassa potenza 575  $\mu A$  max.  
Guadagno ottenuto con resistenza esterna  
Guadagno compreso tra 1 e 1000  
Tensione di offset in ingresso 200  $\mu V$   
Larghezza di Banda 800KHz (Guadagno = 1)  
Protezione degli ingressi per mezzo di diodi

In Figura 5 è riportata la piedinaura dell'integrato AD623.

Una tipica applicazione è rappresentata dal prelevamento della tensione differenziale presente ai capi di un ponte di Wheatstone<sup>20</sup>, uno schema di principio è riportato in Figura 6.

<sup>18</sup> Normalmente tale ingresso è collegato direttamente all'uscita dell'operazionale in modo da chiudere il loop dello stadio differenziale d'uscita.

<sup>19</sup> Con uscita Rail to Rail si intende il fatto che il valore di tensione che è possibile ottenere in uscita è pari a quella dell'alimentazione (molto prossima).

Questo non è generalmente ottenuto nei normali operazionali, in cui l'uscita può raggiungere valori pari a quelli dell'alimentazione meno 1.2V-2V.

<sup>20</sup> Il ponte di Wheatstone è ottenuto con 4 impedenze (in particolare possono essere resistori) e permette di effettuare misure di precisione su una delle 4 mantenuta incognita o variabile, come ad esempio un sensore.

<sup>17</sup> La corrente di leakage rappresenta la corrente che scorre in un diodo anche quando si trova in polarizzazione inversa.



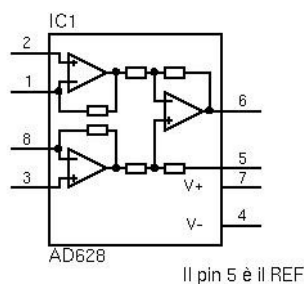


Figura 5: Piedinatura del AD623

Dal momento che l'alimentazione è singola e lo sbilanciamento del ponte può essere sia positivo che negativo è necessario porre l'ingresso REF ad un valore di riferimento pari alla metà della tensione di alimentazione. Il riferimento può comunque essere differente da tale valore ma deve permettere lo swing necessario.

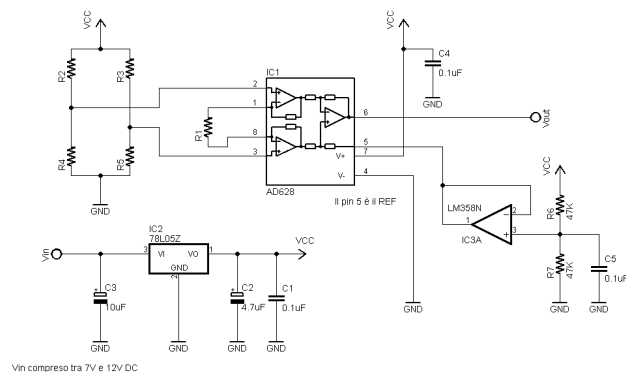


Figura 6: Lettura di una tensione differenziale da un ponte di Wheatstone

In particolare se si volesse eliminare l'offset di tensione presente sul ponte è possibile variare il riferimento in maniera che sia l'uscita a posizionarsi su metà dell'alimentazione e non il riferimento.

Per ottenere questo basta far uso di un trimmer piuttosto che di due resistori di valore uguale posti come partitore di tensione<sup>21</sup>.

Se il ponte risulta per esempio sbilanciato con un'uscita 3mV (offset del ponte), con un'alimentazione di 5V e un guadagno pari a

100, per eliminare tale offset, che si presenta in uscita 100 volte più grande ed avere quindi un'uscita fissata a 2.5V, basta porre il riferimento a 2.2V.

Nel caso in cui l'uscita dell'in-amp venga collegata ad un'unità di controllo digitale, dopo opportuna conversione analogico-digitale, è possibile eliminare l'offset per via software mantenendo quindi l'ingresso REF dell'in-amp fisso a 2.5V. Questa soluzione, se da un lato evita l'utilizzo di un trimmer, più costoso di due resistenze, dall'altro determina uno spreco di risoluzione dell'ADC, in cui parte della dinamica viene sprecata per misurare un offset in tensione, al quale in generale non è associata.

## Bibliografia

[www.LaurTec.com](http://www.LaurTec.com) : sito di elettronica dove poter scaricare gli altri articoli menzionati, aggiornamenti e progetti.

[www.analog.com](http://www.analog.com) : sito della casa produttrice dell'AD623.

<sup>21</sup> Si fa notare che si è fatto uso di un buffer in modo da fornire una sorgente di tensione a bassa resistenza. Il condensatore C5 in parallelo ad R7 permette di limitare il rumore termico introdotto dal partitore di tensione.