



Cortesia: Alcom Group

# Il convertitore ad approssimazioni successive

Questo complesso strumento di misura vede il suo impiego in una vasta serie di dispositivi: dal moderno TVC al sempre più diffuso DVD. Ecco cosa deve conoscere un tecnico elettronico

a cura di Flavio Criseo - 1ª parte

**C**i eravamo lasciati con la descrizione del convertitore a doppia rampa; abbiamo visto come è possibile risolvere il problema dei disturbi sovrapposti alla tensione da misurare, nonché le principali prestazioni di questo dispositivo.

Come abbiamo già detto, sia il convertitore V/F che il Doppia Rampa non sono molto veloci nella fase di lettura.

Moltissimi strumenti digitali, utilizzati nei laboratori di misura o di service, impiegano anche un altro tipo di circuito: il **convertitore ad approssimazioni successive**.

Questo strumento di rilevamento può essere integrato ad esempio nei microcontrollori dei TVC.

Conoscerne bene il suo utilizzo diviene importante anche per capire i circuiti integrati impiegati in qualsiasi DVD, TVC, o altro dispositivo elettronico.

La caratteristica di maggior rilievo di questo convertitore è l'alta velocità (parametro tipico dei dispositivi digitali) nella misurazione, nonché l'accuratezza nella rilevazione.

Il suo funzionamento è tanto preciso quanto complesso. Maggiore è la sua accuratezza, maggiore sarà la complessità dei circuiti che lo

compongono e, di conseguenza, maggiore sarà la possibilità che il circuito possa divenire critico e impreciso.

Va da se che, quanto più un dispositivo è preciso e veloce, tanto più elevata è la sua complessità di realizzazione, quindi maggiore sarà la possibilità che alcuni problemi possano presentarsi.

Se i dispositivi che lo compongono sono ben architettati e progettati, i problemi più importanti possono essere risolti facilmente. Il convertitore ad approssimazioni successive è un ADC, anche se utilizza al suo interno un circuito chiamato DAC (Digital Analogic Converter).

Sappiamo già come funzionano i circuiti ADC dato che lo abbiamo visto nei numeri precedenti; prima di addentrarci nella descrizione del funzionamento del convertitore ad approssimazioni successive è bene però studiare e capire come funzionano i circuiti DAC e perché sia così necessario il loro impiego.

## Schema base di un generico DAC

Dalla Fig. 1 è possibile notare lo schema logico sul quale si basa un circuito generico DAC.

Tali dispositivi sono importanti perché esprimono l'andamento nel tempo di una certa grandezza (corrente o tensione che sia).

Come si può notare, la figura è composta da due stadi principali che, a loro volta, possono essere composti da molti circuiti.

Innanzitutto è bene sempre avere chiaro cosa si ha e cosa si vuole ottenere; con questo dispositivo vogliamo trasformare il valore numerico binario (digitale) di una tensione (o una corrente) nell'equivalente grandezza analogica a meno di una eventuale amplificazione successiva.

## Facciamo un esempio

Nella Fig. 1 è visibile il primo stadio che legge sul suo ingresso un valore numerico formato da tre bit:  $B_0, B_1, B_2$ . Ammettiamo che questi tre bit abbiano (in un certo istante qualsiasi) i valori 0, 1 e 1 rispettivamente.

Dalla semplice formula riportata in Fig. 1 basterà sostituire il valore 0, 1, 1 al posto di  $B_0, B_1, B_2$ , dopodiché otterremo:

$$X = 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 = 4 + 2 + 0 = 6.$$

Come sappiamo, il massimo numero rappresentato su tre bit è dato dalla configurazione 1, 1, 1 corrispondente al numero 7 (vedi articolo sul TVC Thomson).

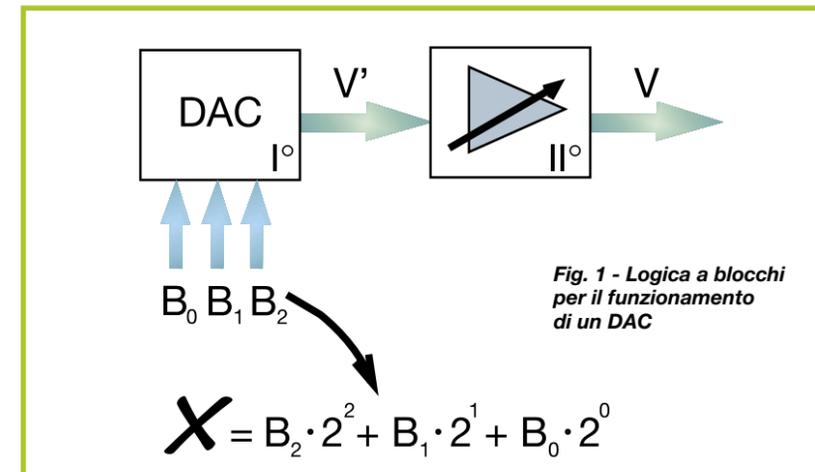


Fig. 1 - Logica a blocchi per il funzionamento di un DAC

Se volessimo rappresentare in modo digitale dei numeri superiori al sette dovremmo utilizzare un numero di bit maggiore, ma il ragionamento non cambierebbe.

Il DAC presente all'interno del primo blocco permette la conversione digitale/analogica dando in uscita una tensione  $V'$  come visibile in Fig. 1.

Il secondo stadio è uno stadio amplificatore che, rilevando la tensione  $V'$  al suo ingresso, lo amplifica restituendo in uscita una tensione  $V$  che sarà maggiore di un certo quantitativo (lo chiameremo  $A_v$ ): ad esempio potrebbe essere pari a 3. Se, come visto in precedenza, il nostro DAC ci fornisce in uscita una tensione  $V' = 6 V$ , il secondo stadio ci darebbe in uscita una tensione pari a:

$$V = A_v \cdot V' = 3 \cdot 6 V = 18 V.$$

Nella pratica può accadere che il quantitativo (che d'ora in avanti chiameremo **guadagno**)  $A_v$  possa essere minore di uno, in tal caso avremmo un circuito attenuatore anziché amplificatore.

Se il nostro guadagno fosse  $A_v = 1$ , il circuito in Fig. 1 ci fornirebbe in uscita una tensione  $V$  pari alla tensione rappresentata dai tre bit digitali in ingresso.

## Andiamo per gradi

Dato che, durante la lettura dei bit da parte del primo stadio, nulla impedisce che questi possano cambiare continuamente, è indispensabile avere uno stadio d'ingresso capace di trasferire i bit al circuito DAC in modo stabile e in un certo tempo stabilito.

Questo ci consentirà di poter convertire i valori numerici  $B_0, B_1, B_2$  e, successivamente, di aggiornare gli stessi in modo da essere sicuri che la conversione sia sempre effettuata sul valore realmente letto e non errato.

A tal proposito si veda la Fig. 2. Invece di inserire direttamente i nostri tre bit al circuito DAC, si è soliti anteporre un dispositivo capace di memorizzare un singolo dato in modo provvisorio e per una durata di tempo stabilita dal DAC stesso.

Quando arrivano i valori sui tre bit  $B_0, B_1, B_2$ , ad esempio 0, 1, 1, questi saranno memorizzati dentro tre celle di memoria costituenti il registro e verranno utilizzati dal DAC per tutto il tempo necessario alla conversione D/A (digitale/analogica).

Durante questo tempo (fase di lettura), se i bit  $B_0, B_1, B_2$  dovessero cambiare (ad esempio divenissero 1, 0, 1), il DAC non ne verrà a conoscenza perché le tre memorie costituenti il registro non memorizzeranno eventuali cambiamenti al loro ingresso fintantoché il DAC stesso non impartirà loro il comando

Alcuni numeri fa, studiando il funzionamento di un TVC, abbiamo già spiegato come calcolare e come sia possibile leggere un generico numero formato da più bit (a tal proposito consiglio di rivedere **Il Cinescopio di Maggio 2003** dalla pagina 64 in poi, relativa all'articolo Thomson ICC17 "Un telaio davvero innovativo").

Come ho affermato più volte, per il tecnico dei nostri giorni è di fondamentale importanza conoscere bene dispositivi elettronici che apparentemente possono sembrare totalmente diversi dai circuiti costituenti un TVC.

Non a caso infatti sul Thomson abbiamo avuto a che fare con la decodifica binaria. Qui adesso il problema si ripresenta ma, avendolo studiato bene su un TVC, tutto appare più semplice e immediato nel nostro convertitore digitale.

Va da se che è assolutamente vero anche il contrario!

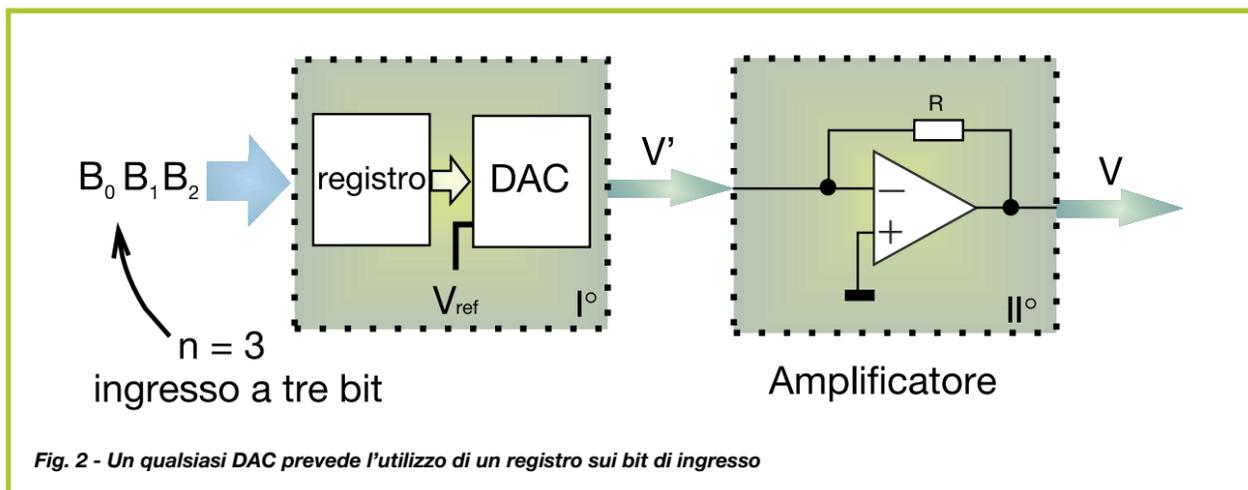


Fig. 2 - Un qualsiasi DAC prevede l'utilizzo di un registro sui bit di ingresso

di lettura (tale "fase" è spesso chiamata "Read" e, d'ora in avanti, la indicheremo con la sigla **Rd**).

Da quanto detto, sappiamo che il DAC riceve sicuramente dei dati corretti e stabili per tutto il tempo necessario alla conversione.

**Due esempi di DAC**

Si osservi la Fig. 3: il circuito proposto è un particolare tipo di DAC, chiamato "A resistenze pesate".

Formato da uno stadio sommatore generale, questo dispositivo presenta tanti ingressi quanti sono i bit digitali che formano la grandezza da decodificare.

Da quanto detto, sappiamo che il DAC riceve sicuramente dei dati corretti e stabili per tutto il tempo necessario alla conversione. Maggiore sarà il numero di bit, maggiore sarà la sua accuratezza nel decodificare la lettura digitale in ingresso. Lo stadio sommatore formato dall'Op-Amp preleva tante tensioni in ingresso quanti sono i bit.

La sua configurazione invertente consente di effettuare la somma in

modo da avere in uscita una tensione totale V. Vediamo come e perché.

Dalla Fig. 3 si trascurino momentaneamente tutti i resistori in ingresso tranne il primo in basso indicato con R<sub>0</sub>; in questo caso il circuito diverrebbe un semplice amplificatore in configurazione invertente (si veda la Fig. 4), dove il resistore R<sub>0</sub> è il resistore d'ingresso, mentre il resistore in retroazione è sempre la R<sub>f</sub> raffigurata.

Se la tensione V<sub>i</sub> presente all'ingresso la indichiamo con V'<sub>0</sub> (vedi Fig. 4), in uscita avremo

$$V = -V'_0 \frac{R_f}{R_0}$$

Come si può vedere, il segno negativo è dato dal fatto che l'Op-Amp è connesso in modo invertente, mentre il guadagno Av è dato dal rapporto dei due resistori.

Si veda adesso la Fig. 5; aggiungendo un ulteriore resistore R<sub>1</sub>, il circuito diviene come quello in figura.

Lo stadio di amplificazione opera nella regione d'alto guadagno, quindi è lecito applicare il principio della sovrapposizione degli effetti e il "cortocircuito virtuale".

La tensione di uscita è data da:

A)  $V_0 = Av \cdot V_d$

dove Av è il guadagno, mentre il termine V<sub>d</sub> è la tensione differenziale data dalla differenza del potenziale al pin non invertente

meno il potenziale sul pin invertente ovvero:

B)  $V_d = V^+ - V^-$

Nel circuito in Fig. 5 si noti come il pin non invertente è connesso a massa! Il suo potenziale sarà quindi 0V.

Il principio di sovrapposizione degli effetti ci permette di calcolare singolarmente le tensioni interessate per poi sommarle insieme.

Nella Fig. 5 immaginiamo per un istante di avere solamente la R<sub>1</sub>. Potremo pertanto scrivere:

C)  $V^- = V_1 \frac{R_f}{R_1 + R_f} + V_0 \frac{R_1}{R_1 + R_f}$

Siccome l'Op-Amp opera in alto guadagno, l'equazione A) la si può scrivere 0 = V<sup>+</sup> - V<sup>-</sup>. Quindi abbiamo che

D)  $V^- = V^+$

Il pin non invertente relativo alla V<sup>+</sup> è posto a massa (0V) quindi la C) diviene: V<sup>-</sup> = 0.

Sostituendo tale valore nella B) possiamo riscrivere l'equazione in questo modo:

E)  $V_0 = -V_1 \frac{R_f}{R_1}$

Guardiamo adesso la Fig. 5. Considerando solamente il resistore R<sub>2</sub> è possibile effettuare nuovamente gli stessi ragionamenti ottenendo:

F)  $V_0 = -V_2 \frac{R_f}{R_2}$

Applicando il principio di sovrapposizione degli effetti abbiamo quindi:

G)  $V_0 = -V_2 \frac{R_f}{R_2} - V_1 \frac{R_f}{R_1}$

se le due resistenze sono uguali possiamo dire che:

H)  $V_0 = - \frac{R_f}{R_1} (V_1 + V_2)$

come si può notare, la A) non è altro che l'equazione H), infatti il termine V<sub>1</sub> + V<sub>2</sub> è la tensione differenziale, mentre il rapporto delle resistenze è il guadagno dato dall'Op-Amp.

Da quanto detto, tornando per un istante alla Fig. 3, possiamo dire che il circuito può darci in uscita una tensione, data dalla somma di più tensioni e amplificata da un ben preciso rapporto di resistenze.

Se tutti i resistori presenti all'ingresso dell'Op-Amp differissero di un fattore 2 (ovvero se la

$$R_1 = \frac{R_0}{2^1}$$

$$R_2 = \frac{R_0}{2^2}$$

e così via per tutti gli altri) avremmo i seguenti valori:

$$R_1 = \frac{R_0}{2}$$

$$R_2 = \frac{R_0}{4}$$

$$R_3 = \frac{R_0}{8}$$

I)  $\dots$

$$R_{n-1} = \frac{R_0}{2^{n-1}}$$

} = R\_1 = \frac{R\_0}{2^i}

dove tutti i denominatori delle frazioni sono dei multipli di due.

Si noti che nella Fig. 5 le due tensioni V<sub>1</sub> e V<sub>2</sub> in ingresso sono diverse. Guardiamo la Fig. 3.

Le tensioni della Fig. 5 non sono altro che le tensioni V'<sub>0</sub>, V'<sub>1</sub>, ecc. nella Fig. 3.

L'ingresso di ogni resistore è connesso a un commutatore elettronico capace di connettere il resistore stesso alla tensione di riferimento -V<sub>ref</sub> oppure a massa.

Le tensioni ai capi dei singoli resistori avranno solamente questi due valori, pertanto la V<sup>-</sup> sarà una frazione della V<sub>ref</sub>.

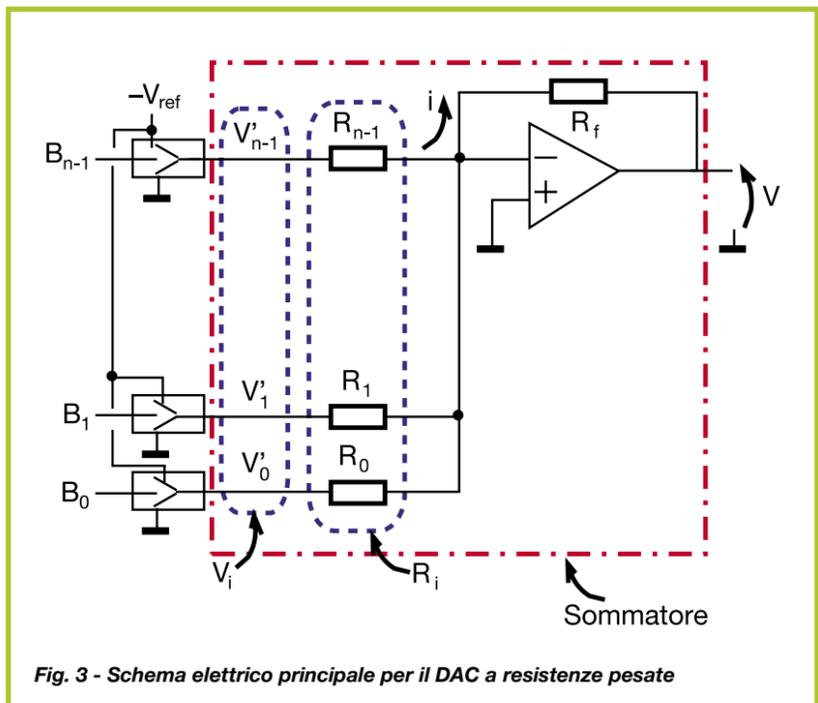


Fig. 3 - Schema elettrico principale per il DAC a resistenze pesate

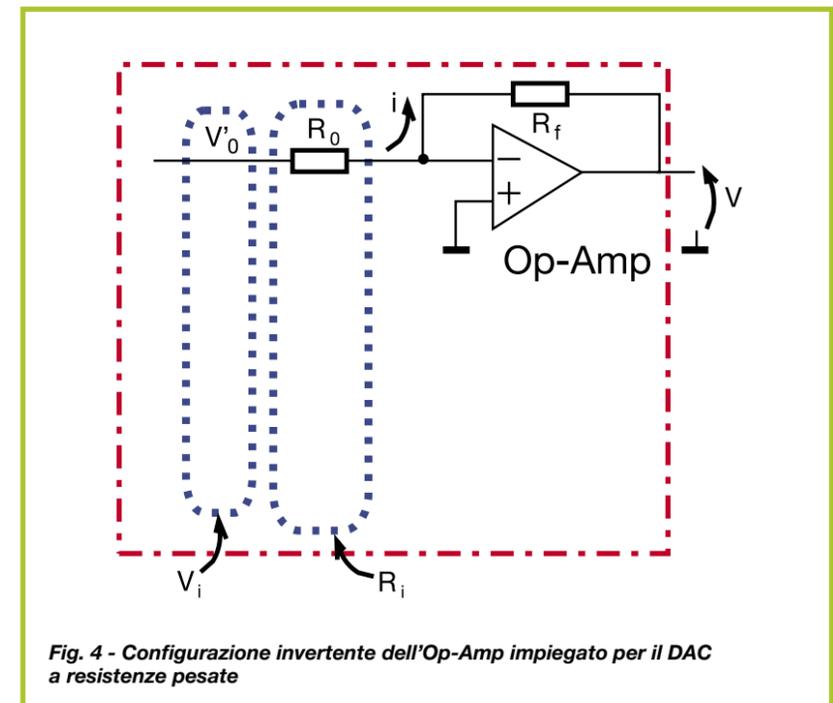


Fig. 4 - Configurazione invertente dell'Op-Amp impiegato per il DAC a resistenze pesate

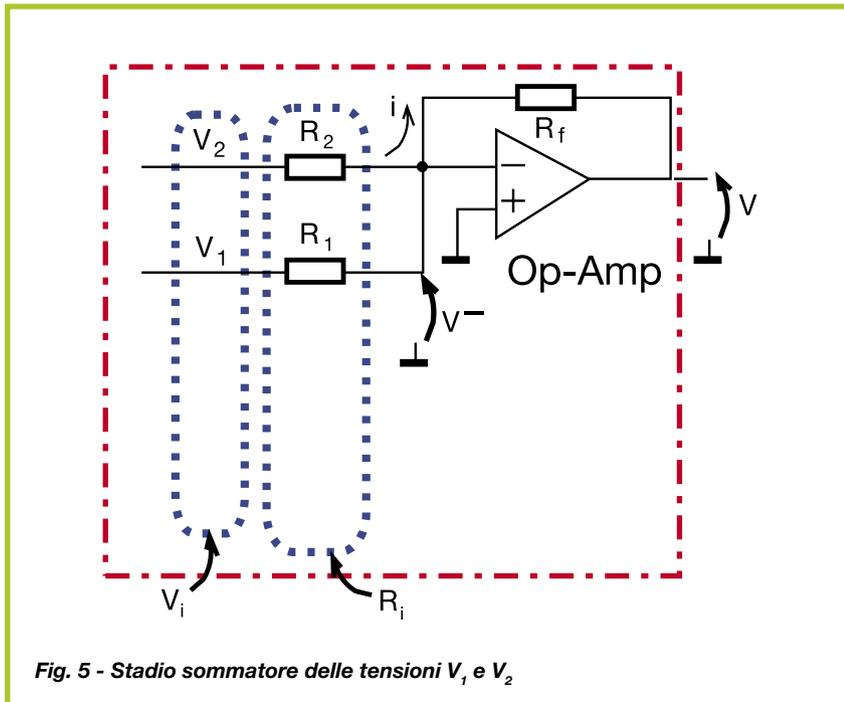


Fig. 5 - Stadio sommatore delle tensioni  $V_1$  e  $V_2$

Siccome le resistenze differiscono di un fattore 2 e ogni resistore è relativo a un solo bit dalla **I** e dalla **G**), possiamo scrivere in generale:

$$I) V = \frac{R_f}{R_0} V_{ref} (2^{n-1} \cdot B_{n-1} + \dots + 2 \cdot B_1 + B_0)$$

Sappiamo che i numeri in base due possono assumere valore 1 oppure 0 perchè sono dei bit, quindi la tensione  $V$  in uscita sarà data dalla somma di tutti i termini.

Lo stadio Op-Amp è un sommatore (non a caso abbiamo delle somme nella formula finale).

Dallo schema appena considerato abbiamo notato che: se gli ingressi digitali (ovvero il numero di bit che compongono la parola digitale) sono un numero generico "n", in uscita avremo una tensione che sarà data dalla somma di tutti i contributi dei singoli bit.

Ogni contributo sarà diverso dagli altri perchè connesso a un resistore di ingresso che numericamente è diverso da tutti gli altri.

Quando il bit generico sarà settato a 1, il contributo della tensione corrispondente darà il suo apporto alla  $V$  finale; quando il bit generico sarà settato a 0, la sua presenza

darà contributo nullo. Torniamo adesso alla Fig. 2.

Siamo di fronte a un DAC a tre bit di ingresso, pertanto la formula **L**) diverrà la seguente:

$$M) V = \frac{R_f}{R_0} V_{ref} (4 \cdot B_2 + 2 \cdot B_1 + B_0)$$

Se, come nell'esempio precedente, abbiamo i tre bit con tali valori logici  $B_0 = 0$ ,  $B_1 = 1$  e  $B_2 = 1$ , la tensione  $V$  sarà uguale a:

$$N) V = 6 \frac{R_f}{R_0} V_{ref}$$

Per trovare i due resistori  $R_f$  e  $R_0$  basterà stabilire di quanto si vuole amplificare la tensione di uscita  $V$ ; basterà fissare una tensione massima di riferimento per avere la  $V_{ref}$  (questa tensione fissa il fondo scala dello strumento) e tutto funzionerà a dovere.

#### A proposito della $V_{ref}$

Per la  $V_{ref}$ , facciamo presente che essa deve essere una tensione molto stabile e, possibilmente, insensibile alle variazioni della temperatura.

La tensione  $V$  in uscita è legata direttamente alla precisione della  $V_{ref}$ ; affinché il generatore della  $V_{ref}$  non scaldi, è bene che i resistori abbiano un valore ohmico non troppo piccolo. È importante quindi impiegare il resistore più piccolo (ovvero la  $R_{n-1}$ ) con almeno un valore  $\geq 1 \text{ k}\Omega$ .

Conseguentemente, tutti gli altri resistori saranno grandi di un fattore 2 come specificato in precedenza.

#### Stabilità e prestazioni

In questo convertitore abbiamo dei pregi e dei difetti (come in tutti i circuiti elettronici):

- tutti i resistori hanno valori fra loro differenti (inoltre devono essere molto precisi => tolleranza ammessa fra lo 0,5% e l'1%);
- le correnti che percorrono i resistori sono diverse fra loro (conseguentemente scaldano a temperature differenti);
- se tutti i resistori sono entro un circuito integrato, oppure sono posti vicini fra loro, la temperatura sarà la stessa per tutti e, nonostante l'inevitabile fenomeno della deriva termica, i loro valori varieranno di uno stesso quantitativo rendendo il funzionamento molto preciso e stabile;
- la  $V_{ref}$  può essere sia positiva sia negativa; nel nostro caso abbiamo impiegato una  $V_{ref}$  negativa perchè, essendo l'Op-Amp connesso in configurazione invertente, possiamo ottenere una tensione  $V$  di uscita positiva;
- la  $V_{ref}$  deve essere sempre stabile in qualsiasi condizione di funzionamento (richiesta di corrente e variazione di temperatura);
- l'Op-Amp deve avere SR (Slave Rate) il più alto possibile, in modo da rispondere velocemente all'arrivo della tensione in ingresso.

- continua -