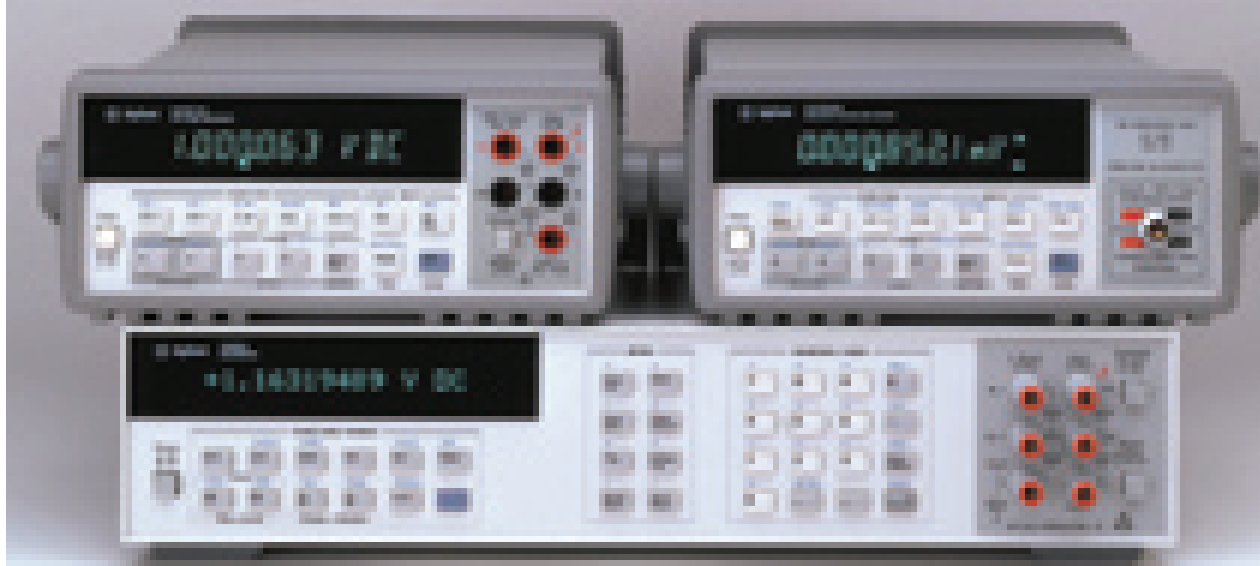


Il convertitore tensione/frequenza



Cortesia Agilent Technologies

Per il tecnico dei giorni nostri diventa sempre più importante la conoscenza approfondita di circuiti che, anche se apparentemente non importanti, aiutano a comprendere la complessità degli schemi elettronici

a cura di Flavio Criseo

Leggendo le richieste di aiuto pervenute in Redazione, ci siamo accorti che a molti sfugge il corretto funzionamento di alcuni dispositivi importanti del nostro lavoro.

Si tenga presente che un ingegnere progettista alle prese con la realizzazione di un TVC o un VCR deve conoscere e saper progettare tutti i dispositivi impiegati nelle strumentazioni elettroniche. A maggior ragione, un tecnico TVC deve conoscerne almeno il loro funzionamento, dato che non basta avere un'idea di cosa faccia un certo circuito, bisogna conoscerlo bene e si deve sapere perché si è

adottata una determinata scelta e non un'altra soluzione.

In questo numero studieremo approfonditamente un dispositivo importantissimo impiegato frequentemente per realizzare strumentazione elettronica di misura, cioè il convertitore tensione/frequenza.

Questo articolo sarà seguito da una serie di altri approfondimenti, che permetteranno di capire e riconoscere circuiti, dispositivi, stadi elettronici sempre più spesso presenti nel moderno TVC dei giorni nostri, come i convertitori a doppia rampa, i frequenzimetri, i convertitori ad approssimazioni successive, ecc.

Il convertitore tensione/frequenza

Un primo tipo di convertitore, realizzato per la misura di grandezze continue, è stato il convertitore a rampa semplice.

Da questo convertitore si è partiti per lo studio e la ricerca di nuovi dispositivi e nuove soluzioni, allo scopo di risolvere i problemi che affliggevano questo dispositivo.

Un problema da risolvere di importanza principale era il Ripple presente in qualsiasi tensione continua (ogni dispositivo che raddrizzi la tensione di rete darà sempre in uscita un Ripple

sovraposto); la misura di tensioni continue provenienti da dispositivi stabili, ad esempio le batterie, non era un grosso problema.

Diveniva pertanto di vitale importanza la presenza del Ripple sovrapposto su qualsiasi tensione continua proveniente dal convertitore AC/DC cioè del cosiddetto il Ponte di Graetz.

Per risolvere il problema del Ripple si è dunque realizzato un dispositivo chiamato **convertitore tensione/frequenza**.

Il suo scopo principale consiste nel misurare la tensione continua presente al suo ingresso ignorando il Ripple sovrapposto. La sua azione si basa sul calcolo del valore medio della tensione. Questo valore lo si rileva grazie all'azione di un circuito importante presente all'ingresso: il **circuito integratore**.

Si veda la **Fig. 1**: in essa è rappresentato lo schema principale del convertitore. L'operazionale presente in ingresso ha un condensatore C collegato fra la sua uscita e il pin invertente. Sullo stesso pin è presente anche R_1 che connette il dispositivo con l'ingresso dello strumento.

Sul piedino invertente è ancora presente un altro resistore, R_2 , che connette il pin suddetto con l'uscita di un blocco funzionale M (questo blocco funzionale è normalmente un monostabile).

All'uscita dell'Op-Amp abbiamo una tensione V_u che entra all'ingresso invertente di un secondo Op-Amp. Questo Op-Amp, però, non svolge la stessa funzione del precedente; la sua funzione è quella di comparare la tensione al pin invertente con una tensione presente (in modo stabile) al pin Non invertente (indicata in figura come $-E$).

L'uscita del secondo Op-Amp è connessa a due dispositivi importanti: il Gate e il monostabile di cui si è accennato in precedenza.

Come si vede nella **Fig. 1**, il gate è una porta AND.

Si tenga presente che una porta logica AND ha la funzione di effettuare una moltiplicazione logica (prodotto logico) fra due valori che possono essere alto (H) oppure basso (L), si veda la **Fig. 2**.

Da quanto detto si intuisce che i valori logici che il gate vedrà al suo ingresso saranno sempre 1 oppure 0.

Matematicamente, il prodotto logico da i seguenti risultati: $1 \cdot 0 = 0$, $0 \cdot 1 = 0$, $0 \cdot 0 = 0$, $1 \cdot 1 = 1$.

Si intuisce che **solamente** quando agli ingressi dell'AND abbiamo $1 \cdot 1$, l'uscita della porta darà valore logico 1, mentre in tutti gli altri casi avremo sempre 0.

L'uscita del gate AND è connessa a un circuito che svolge la funzione di conteggio (è un contatore binario).

Funzionamento: procediamo a ritroso

Quando il gate si pone al livello logico 1 (questo si verifica quando ai suoi ingressi abbiamo entrambi i pin a valore logico 1), il contatore è abilitato a effettuare l'operazione di conteggio. Il conteggio consiste nell'incrementare in modo sequenziale il numero precedente, naturalmente, sempre in forma binaria.

Lo scopo di questo convertitore è quello di contare per un certo tempo τ_0 a seconda della tensione V_i in ingresso (questa tensione è la tensione che vogliamo misurare).

Questo tempo τ_0 sarà tanto più grande quanto maggiore sarà la tensione V_i .

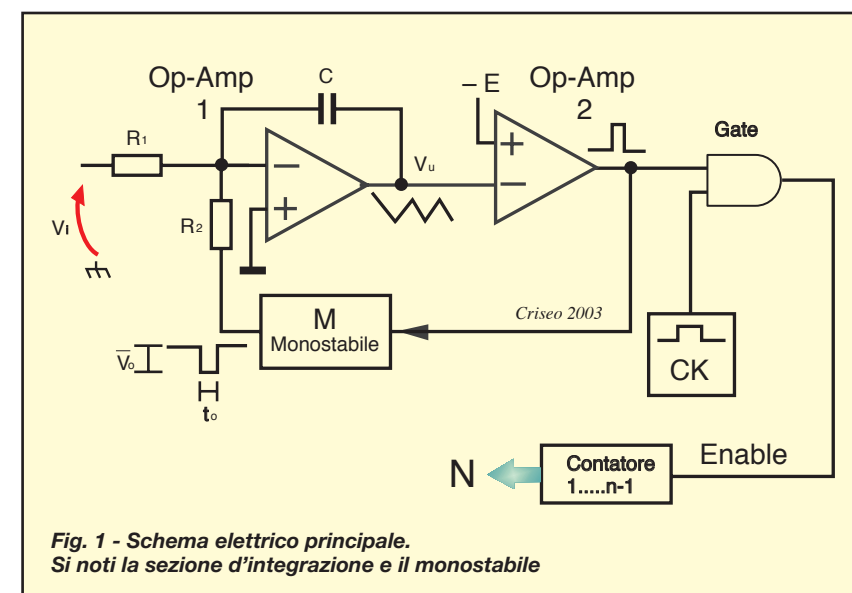
Il contatore conterà quindi un certo numero di volte "N", relativo al tempo τ_0 e dipendente dalla tensione V_i . La **Fig. 1** mostra come un ingresso del gate è connesso a un altro dispositivo che dà in uscita un segnale di clock. Questo tempo τ è un multiplo della frequenza di rete (si ricordi che il ripple che si vuole eliminare è dato proprio dalla frequenza di rete).

Solamente quando il livello alto di questo clock giunge sul pin del gate, la porta AND abilita il conteggio del contatore, in tutti gli altri casi no.

Se, ad esempio, avessimo livello alto in uscita dal comparatore operativo, ma il livello sul pin CK del gate fosse basso, avremmo sempre $1 \cdot 0 = 0$ e il conteggio non sarebbe attivato finché il gate non riceva livello 1 sul pin CK.

In questo modo, possiamo dare uno start e uno stop al conteggio. Siccome la frequenza di rete è molto stabile (tipicamente 50/60 Hz) il tempo τ corrispondente sarà ben preciso. Questo ci consentirà di dare livello 1 in ingresso al contatore (naturalmente se arriva livello 1 anche sul pin connesso all'uscita del secondo operazionale), sempre per un tempo massimo τ dopodiché il conteggio si arresterà.

In definitiva, **il termine τ stabilisce il tempo massimo di lettura, mentre il tempo τ_0 stabilisce l'entità della tensione da misurare.**



Per ogni numero digitale di conteggio in uscita al contatore avremo una certa tensione in ingresso. Basterà pilotare un display elettronico per leggere correttamente la misura effettuata.

Vediamo come funziona il resto

Il monostabile presente in retroazione ha lo scopo di cambiare la pendenza della rampa di integrazione generata dall'integratore presente in ingresso.

Sappiamo che un circuito, affinché si possa definire monostabile, deve avere un solo punto di stabilità su tutta la sua caratteristica di funzionamento. Quando il monostabile non riceve nessun comando in ingresso, si porta sul suo punto di stabilità e vi permane finché nessun impulso arriva al suo ingresso. Nel momento in cui un impulso (di intensità adeguata) arriva in ingresso, i transistori che lo compongono cambiano punto di lavoro.

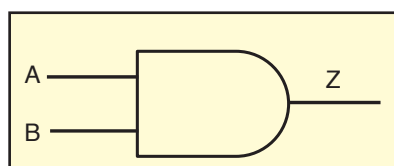
Questo cambiamento fa sì che la polarizzazione si sganci dal punto stabile di quiete e cominci a fluttuare attraverso tutta la Trans-Caratteristica del circuito finché non viene nuovamente raggiunto l'unico punto di stabilità (ovvero il punto in cui tutto si ferma e i transistori smettono di far variare le tensioni e le correnti in gioco).

In definitiva, all'arrivo dell'impulso dato dall'Op-Amp comparatore, il monostabile si attiva dando in uscita un impulso negativo che chiameremo $\bar{V}_0$.

Per tutto il resto del tempo, il monostabile non interverrà sul funzionamento del circuito.

La sezione di integrazione

Si veda la sezione d'ingresso di Fig. 1: ammettiamo che non vi sia tensione all'ingresso e che quindi l'integratore non "integri" nessuna grandezza (vedremo più avanti in cosa consiste e cosa significa "integrazione"). Se all'ingresso abbiamo 0 V in uscita avremo 0 V.



A	B	Z
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Fig. 2 - Gate di comando elettronico: tabella logica della verità relativa al prodotto logico

Diversamente, quando immettiamo una tensione V_i all'ingresso (si consideri momentaneamente la tensione V_i come tensione positiva) il piedino invertente dell'Op-Amp avrà un potenziale più alto rispetto al pin Non invertente. In tal caso, avremo una tensione differenziale negativa.

L'Op-Amp effettuerà l'operazione d'integrazione spostandosi verso valori di tensione negativa.

Si ricordi che, se l'Op-Amp è polarizzato in modo duale, possiamo avere in uscita tensioni Sat+ e tensioni Sat-. Come accennato poc'anzi, se la tensione differenziale all'ingresso è pari a 0V, l'uscita sarà 0V, vedi Fig. 3.

In questa figura, è possibile vedere come si comporta un Op-Amp quando è polarizzato con una tensione duale; se la tensione sull'ingresso invertente è maggiore del potenziale di riferimento posto sul pin Non invertente (zero volt), in uscita leggeremo $-V_{cc}$.

Quando la tensione all'ingresso sarà minore di zero volt (tensione negativa) in uscita avremo $+V_{cc}$.

Se non vi fosse la presenza del condensatore C, l'uscita dell'Op-Amp arriverebbe immediatamente alla tensione Sat- (con il termine Sat-, intendiamo la tensione di saturazione negativa possibile).

Grazie al condensatore, l'uscita tenderà a raggiungere la Sat- impiegando un certo intervallo dato dalla costante di tempo RC.

Funzionamento complessivo

Guardiamo ora la Fig. 4 e vediamo di capirci meglio: ammettiamo di avere in ingresso una tensione positiva V_i sulla quale è sovrapposto un certo Ripple.

Nel momento in cui la tensione in ingresso si presenta sul pin Invertente dell'Op-Amp1, il resistore R_1 permette che il condensatore si carichi lentamente verso valori di tensione negative.

La tensione di carica del condensatore è negativa perché il pin Non invertente dell'Op-Amp1 è connesso a potenziale zero. Tale connessione provoca una tensione differenziale negativa all'ingresso dell'Op-Amp.

L'Operazionale è spinto ad andare verso la zona di saturazione negativa (vedi Fig. 3: quando la V_{in} è positiva la V_u è $-V_{cc}$, viceversa nel caso contrario).

In realtà, l'andamento di carica del condensatore non è una retta, come visibile in Fig. 4, ma una leggera parabola.

Quando il tempo di carica è molto piccolo e il valore capacitivo di C è abbastanza grande, non è un errore considerare l'andamento della tensione di carica simile a una retta.

La tensione negativa in uscita all'Op-Amp1 tende a raggiungere la $-V_{cc}$. Però, siccome la V_u è connessa all'Op-Amp2, quando il valore di V_u diviene confrontabile con la tensione di riferimento $-E$, il secondo Op-Amp "scatta" velocemente portandosi immediatamente in zona SAT+.

A questo punto, all'uscita di Op-Amp2 avremo una tensione positiva che farà sganciare il monostabile. Nel momento in cui il monostabile si sgancia dal suo punto di riposo, viene generato un impulso ad onda quadra negativo. Questo impulso, visibile in Fig. 4 e di ampiezza $\bar{V}_0$, porta il potenziale invertente dell'Op-Amp1 a una tensione negativa rispetto alla massa (si ricordi che, contemporaneamente, è presente anche la V_{in}).

In questo modo la tensione differenziale dell'Op-Amp1 diviene positiva (e non più negativa come nel caso in cui era presente in ingresso solo la V_{in}), portando Op-Amp1 verso la SAT+.

Questo effetto fa sì che il condensatore cominci a caricarsi, **ma con andamento positivo**.

La Fig. 4 mostra come, quando la rampa raggiunge la tensione $-E$, inverte subito la sua pendenza.

Il tempo t_0 , che determina la durata di inversione della pendenza, è stabilito dall'impulso negativo generato dal monostabile.

Quando cessa l'impulso t_0 , all'ingresso dell'Op-Amp1 si presenta solamente al V_i che, come nel caso precedente, comincia a ricaricare C verso valori di tensioni negative.

Il funzionamento appena descritto non è vincolato dalla presenza del Gate e dal contatore. In pratica, il dente di sega generato in uscita dell'Op-Amp1 si ripete all'infinito, o fintanto che all'ingresso è presente una tensione V_i .

Se il gate riceve un segnale di clock della durata τ , sull'altro piedino d'ingresso permetterà, per tutto questo periodo, di far commutare il gate per tutto il tempo in cui Op-Amp2 è saturo.

Vi sarà un certo intervallo di tempo in cui entrambi i piedini d'ingresso del gate saranno a valore logico 1 e un certo intervallo in cui almeno un piedino avrà valore logico 0.

Questo lo si può vedere anche in Fig. 2 ove è rappresentata la tabella di funzionamento del gate e i suoi contatti ingresso/uscita.

Quando avremo valore logico 1 agli ingressi, il gate darà valore logico 1 in uscita.

Il pin d'ingresso del contatore è relativo all'enable.

Questo pin permette di far partire il conteggio del dispositivo per tutto il tempo in cui permane livello logico alto.

Il numero di conteggi "N" effettuati dal contatore sarà dato quindi da: $N \cdot t_0 = \tau$.

Dove t è il tempo del clock CK visibile in Fig. 4 e in Fig. 1.

Perché leggendo N impulsi conosciamo la V_i d'ingresso?

Se cominciassimo a contare il tempo partendo da un certo istante t_0 fino ad arrivare ad un tempo t possiamo dire di effettuare la lettura della tensione per un tempo che va da t_0 fino ad un tempo $t_0 + \tau$.

La definizione matematica del valor medio di una tensione in ingresso dice che:

$$V_{imedia} = \int_{t_0}^{t_0 + \tau} \frac{V_i(t)}{R_1 \cdot C} dt$$

quindi la V_u avrà due valori: uno all'inizio del tempo t_0 , l'altro alla fine, ovvero al tempo $t_0 + \tau$.

Siccome oltre alla V_i è presente anche l'impulso negativo di durata t_0 ed intensità $\bar{V}_0$ (vedi Fig. 4) avremo un termine che si sottrarrà al termine:

$$\int_{t_0}^{t_0 + \tau} \frac{V_i(t)}{R_1 \cdot C} dt$$

e che sarà legato a una nuova costante di tempo (guardando la Fig. 1 si noti come il monostabile carica il condensatore attraverso la resistenza R_2 che sarà di diverso valore rispetto alla R_1 d'ingresso).

Avremo pertanto:

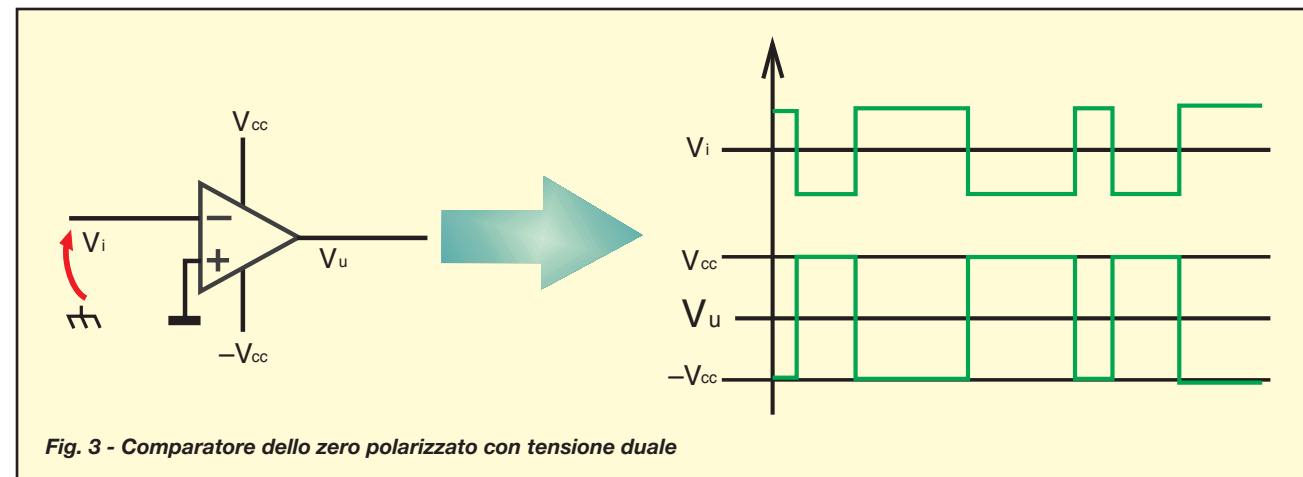
$$V_u(t_0 + \tau) - V_u(t_0) = \int_{t_0}^{t_0 + \tau} \frac{V_i(t)}{R_1 \cdot C} dt - \int_{t_0}^{t_0 + \tau} \frac{\bar{V}_0}{R_2 \cdot C} dt$$

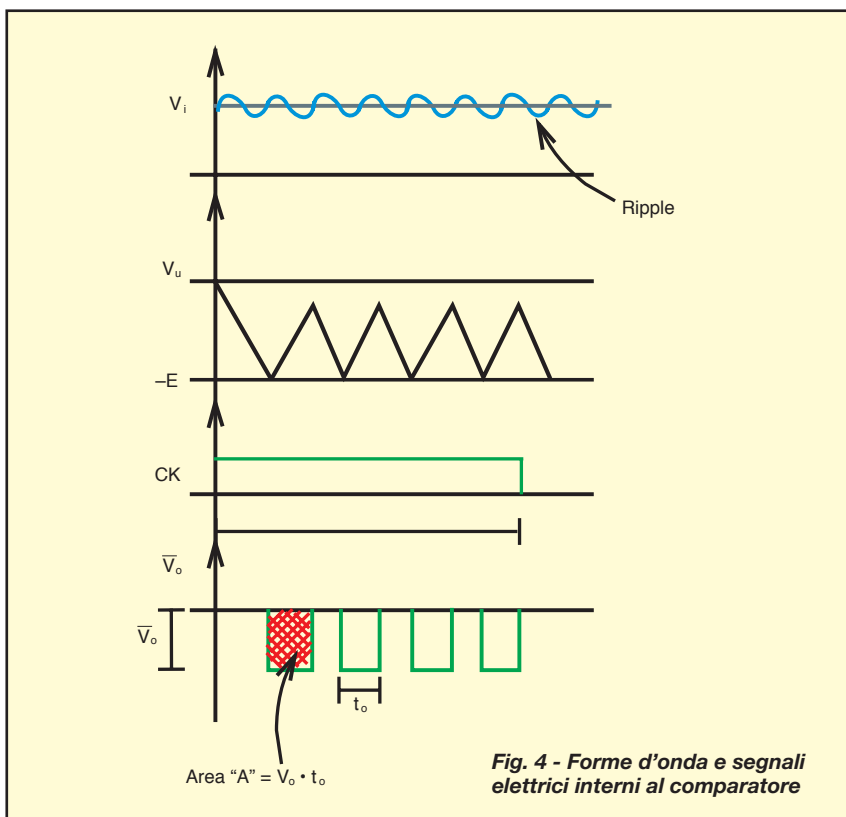
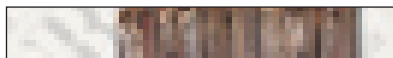
Risolvendo avremo che:

$$V_u(t_0 + \tau) - V_u(t_0) = \frac{V_i(t) \cdot \tau}{R_1 \cdot C} - \frac{\bar{V}_0 \cdot \tau}{R_2 \cdot C}$$

Ora, se come abbiamo detto precedentemente il numero di conteggio del contatore è legato dalla seguente espressione $N \cdot t_0 = \tau$, possiamo scrivere anche:

$$V_u(t_0 + \tau) - V_u(t_0) = \frac{V_i(t) \cdot \tau}{R_1 \cdot C} - \frac{\bar{V}_0 \cdot N \cdot t_0}{R_2 \cdot C}$$





Se il clock del contatore è elevato, avremo un numero di conteggio molto elevato. Se questo è vero, possiamo trascurare il primo termine dell'ultima espressione scritta e quindi possiamo scrivere:

$$\frac{V_i(t) \cdot \tau}{R_1 \cdot C} = \frac{\bar{V}_o \cdot N \cdot t_o}{R_2 \cdot C}$$

si noti il termine:

$$\bar{V}_o \cdot t_o$$

e si guardi la Fig. 4. Il prodotto in questione non è altro che l'area del rettangolo tratteggiato in rosso, base per altezza! ovvero:

$$t_o \cdot \bar{V}_o$$

Dato che il tempo t_o e il valore di tensione negativa $\bar{V}_o$ sono a noi noti, sappiamo quant'è l'area di questo rettangolo. Se chiamiamo tale area:

$$A = t_o \cdot \bar{V}_o$$

possiamo scrivere il tutto in questa forma:

$$\frac{V_i(t) \cdot \tau}{R_1 \cdot C} = \frac{A \cdot N}{R_2 \cdot C}$$

Da questa espressione ricaviamo la nostra V_i ovvero:

$$V_{imedia} = A \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{N}{\tau}$$

$$\text{il termine } \frac{N}{\tau}$$

lo conosciamo perché è la frequenza degli impulsi nel tempo t , quindi conosciamo la V_{imedia} in ingresso.

Abbiamo letto una tensione contando un numero N d'impulsi $\Rightarrow$ gli impulsi non sono altro che una frequenza, quindi abbiamo convertito una **tensione** in ingresso in una **frequenza** in uscita.

Nella pratica, molti strumenti a basso costo impiegano questo convertitore; non è raro quindi utilizzare strumentazioni da laboratorio ove, al loro interno, siano presenti convertitori di questo genere.

Pregi e difetti

Non esiste strumento elettronico con soli pregi o con soli difetti.

Si deve riuscire a trovare un buon compromesso fra le due facce della medaglia.

- 1) In questo convertitore si riesce a risolvere il problema del Ripple (proprio perché si effettua una misura di valore medio della tensione e non di picco!).
- 2) Dato che il periodo della tensione di rete è di 20 msec, abbiamo che:

$$\frac{1}{20 \cdot 10^{-3}} = 50 \text{ Hz}$$

quindi non si possono fare più di 50 conversioni al secondo in fase di lettura (è un po' lento!).

- 3) C'è sempre l'incertezza data dalla precisione Clock, nonché quella data dalla deriva termica del condensatore C.
- 4) Si può avere un'incertezza sulla stabilità della tensione $-E$ (soprattutto con il passare degli anni).
- 5) L'off-set dell'Op-Amp può essere pericoloso se interviene nella fase di carica/scarica del condensatore.
- 6) L'azione del monostabile non è quasi mai perfetta.
- 7) Può essere veramente economico e allo stesso tempo abbastanza preciso. □

Bibliografia consigliata

- Luigi Benettazzo - *Misure Elettroniche* - Ed. Clueb
- Sartori-Azzi - *La misura di grandezze fisiche* - Ed. Paravia
- *The Measurement, Instrumentation and Sensor Handbook* - Webster - IEEE Press
- Dispense del corso di "Misure Elettroniche per Ing. Electr. Inf. Telec." - Prof. M. Rinaldi - Prof. G. Pasini (D.I.E. - Univ. di Bologna)
- Zsolt Kovács - Vajna - *Introduzione all'elettronica analogica* - Ed. Patron
- Roberto Laschi - *Reti Logiche* - Ed. Progetto Leonardo
- Appunti sul corso di "Reti Logiche" - Prof. Laschi (D.E.I.S. Univ. di Bologna)