

# **PRINCIPI DI ELETTRONICA MEDICALE**



## ***LE CONFIGURAZIONI ELETTRONICHE DEI GENERATORI DI CORRENTE COSTANTE***



**Testo di Marco Montanari**

**[www.fieldsforlife.org](http://www.fieldsforlife.org)**

Copyright © 2009

**LICENZA PUBBLICA GENERICA (GPL) DEL PROGETTO GNU**

# INDICE

**Pag:**

- 3   INTRODUZIONE**
- 5   I GENERATORI DI CORRENTE COSTANTE – TEORIA  
“CONSTANT CURRENT SINK” E “CONSTANT CURRENT SOURCE”**
- 13  I GENERATORI DELLA TENSIONE DI RIFERIMENTO**
- 15  GENERATORI DI CORRENTE COSTANTE IN CONFIGURAZIONE  
CIRCUITALE “CURRENT MIRROR”**
- 16  GENERATORI DI CORRENTE COSTANTE A DUE TERMINALI**
- 19  CONVERTITORI TENSIONE CORRENTE**
- 22  I GENERATORI DI CORRENTE COSTANTE NELLA PRATICA PROGETTUALE  
SCELTA DELLA CONFIGURAZIONE CIRCUITALE**
- 23  ALCUNE APPLICAZIONI PRATICHE  
IL 723 COME GENERATORE DI CORRENTE COSTANTE**

## INTRODUZIONE

Si deve premettere che questa ed altre descrizioni teoriche sono destinate alla formazione culturale dei medici e dei tecnici.

Per il funzionamento di quasi tutte le macchine elettriche di uso quotidiano (radio, computer, lavatrice, automobile, eccetera), si richiede un'alimentazione a tensione costante che sia capace di erogare ad una certa tensione, mantenuta costante, una corrente variabile entro certi limiti che nel tempo esprime la potenza totale dissipata dal carico.

Attualmente, l'impiego dei LED come fonte di illuminazione, ha introdotto nel quotidiano anche il generatore di corrente costante, il cui principio di funzionamento a molti non è ancora noto.

A partire dai primordi delle applicazioni biofisiche della corrente elettrica, in Medicina si ebbe la necessità di impiegare i generatori di corrente costante che diventarono realtà solo con l'impiego delle valvole termoelettroniche (N.d.A: la *valvola termoionica* è uno splendido esempio di beata ovvietà lessicale, in quanto una valvola siffatta non può funzionare, perché si vorrebbe affermare che nel bulbo non c'è il vuoto !).

*Per generatore di corrente costante si intende una particolare disposizione circuitale elettronica che, per relativamente grandi variazioni di carico, mantiene la corrente pressoché costante, vale a dire che rimane tale entro certi limiti accettabili. Questi limiti derivano dalle specifiche esigenze di ogni tipo di applicazione.*

Nella suddetta definizione, l'attento Lettore, avrà colto l'impossibilità tecnica di ricavare con assoluta precisione una corrente costante qualora esistano grandi variazioni del carico. La definizione include la necessaria conoscenza delle tolleranze insite nell'uso scientifico di un certo tipo di generatore di corrente costante per impiego biofisico; in caso contrario sarà garantita la produzione di artefatti e/o sarà resa impossibile una corretta interpretazione ed estrapolazione dei dati.

In pratica, mediante alcuni artifici, è possibile ridurre al minimo ogni rischio di errore tecnico. Tutto ciò è fattibile se il ricercatore intende effettuare esperimenti, rimanendo ancorato a rigorose ipotesi puramente teoriche, ma si deve sottolineare che in biofisica è sempre necessario fare "di necessità virtù" poiché l'interpretazione dei dati deve sempre partire

dall'analisi dettagliata di ciò che offre l'interfaccia biofisica ai tessuti biologici; vale a dire che ciò che in elettronica si può tranquillamente trascurare, in biofisica si deve assolutamente prendere in considerazione.

Nella razionale produzione di apparecchiature medicali si deve osservare l'aspetto biofisico dell'interazione tra ciò che viene generato nell'interfaccia biofisica (corrente e/o campo elettrico o magnetico) e ciò che si produce nei tessuti biologici la cui fenomenologia è sempre molto complessa.

A questo punto l'attento Lettore sarà giunto alla seguente conclusione: “*Un apparecchio di scarso valore o addirittura del tutto insignificante in ambito puramente elettronico, in ambito biofisico potrebbe produrre effetti eccezionali o imprevedibili ?*”.

La risposta è assolutamente affermativa. In biofisica, essere di “*manica larga*”, vale a dire avere un diverso approccio scientifico nei riguardi degli stimoli e in genere delle tolleranze, non è necessariamente un difetto, anzi può essere causa di grandi scoperte, ovvero tutte le **buone intenzioni** non sono necessariamente scientifiche; in altri termini, ciò che viene dato come scontato (ovvietà) in ambito biofisico è sempre foriero di illusione.

Le applicazioni pratiche dei generatori di corrente costante, pubblicate in altri articoli, consentono di distinguere le “*buone intenzioni*” dall'essere di “*manica larga*”.

Dunque, gli apparecchi medicali non si apprezzano per il contenuto elettronico maggiormente sofisticato o teoricamente perfetto (nella dimensione elettronica), ma solo per gli effetti reali e sperimentali (comunque riproducibili) a cui possono dare origine e tutto ciò che non è direttamente causale è solo *compliance*. Purtroppo molti costruttori di apparecchi medicali attribuiscono un ruolo causale a ciò che nella dimensione biofisica è esclusivamente accessorio o scientificamente ignoto. Per concludere questa importante premessa, si può decisamente affermare che la Scienza, intendendo qualunque tipo di autentica conoscenza scientifica, non è per nulla democratica, in quanto l'opinione della maggioranza non ha valore probatorio ma, pur non essendo dispotica, la Scienza non è nemmeno ovvia e, quando alcuni, siano essi scienziati o semplici spettatori, la rendono tale, evocano dalla medesima Scienza un Golem mostruoso che impedisce ogni nuova ed autentica acquisizione soprattutto in ambito biologico e biofisico.

# ***I GENERATORI DI CORRENTE COSTANTE***

## **TEORIA**

Nella suddetta definizione del generatore di corrente costante, non si menziona se detta costante si applica ad una corrente continua o pulsante o alternata; infatti una corrente costante si può attribuire ad una corrente continua o si può associare a qualunque tipo di forma d'onda.

L'analisi e la gestione delle variabili elettriche ed elettroniche di un generatore di corrente costante ne determinano il buon funzionamento e sono:

1. La tensione di alimentazione del generatore.
2. La costanza della tensione di riferimento al variare della temperatura.
3. La linearità e la stabilità nel tempo degli elementi attivi o passivi (resistenze o transistori od altri componenti attivi) in cui fluisce la corrente e che ne impostano il valore da mantenere costante.
4. La velocità e la linearità e dei componenti attivi che controllano che la corrente erogata rimanga realmente costante.

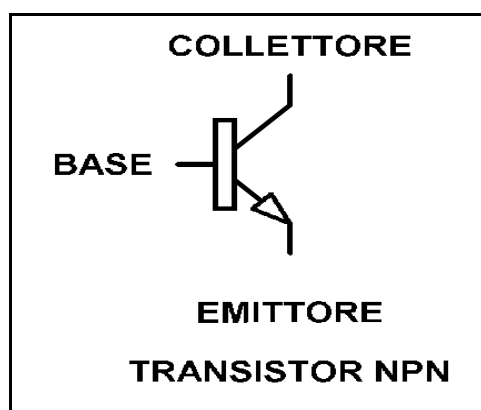
In ambito puramente elettronico i generatori di corrente costante si suddividono in due classi determinate dalla posizione del carico (collegato agli elettrodi) rispetto al circuito erogatore.

- Se il carico è posizionato tra l'alimentazione e il generatore, questa configurazione si chiama: “*constant current sink*”; dissipatore di corrente costante.
- Se il carico è posizionato tra il generatore e la massa del circuito, questa configurazione si chiama: “*constant current source*”; sorgente di corrente costante.

Per ottenere i due effetti è sufficiente usare componenti di opposte polarità, mantenendo invariata la struttura circuitale.

Per le normali applicazioni biofisiche è del tutto indifferente se il generatore di corrente appartenga al tipo *source* o *sink*.

Nella Figura 1 è rappresentato il simbolo di un transistor di tipo NPN.



**Figura 1.** Simbolo schematico del transistor tipo NPN e denominazione dei tre terminali:

(b) Base = terminale di controllo    (c) Collettore = ingresso corrente

(e) Emittore = uscita delle correnti di base e di collettore

Seguono alcuni parametri elettrici fondamentali di un qualunque transistor:

- Tensione tra Base ed Emittore:  $V_{be} = 0,65V$  per i transistor al silicio.
- Tensione massima tra Collettore ed Emittore ( $V_{ce}$ ) che deve essere maggiore di circa il 20% rispetto alla tensione di alimentazione del generatore.
- Guadagno in corrente continua:  $\beta = i_c / i_b$   
La corrente di collettore:  $i_c = i_b * \beta$   
La corrente di base:  $i_b = i_c / \beta$

Il transistor deve essere in grado di condurre senza problemi la corrente che fluisce nel carico; inoltre se la sua temperatura esterna si avvicina a quella massima prevista nel *datasheet*, il transistor si deve dotare di idoneo dissipatore di calore.

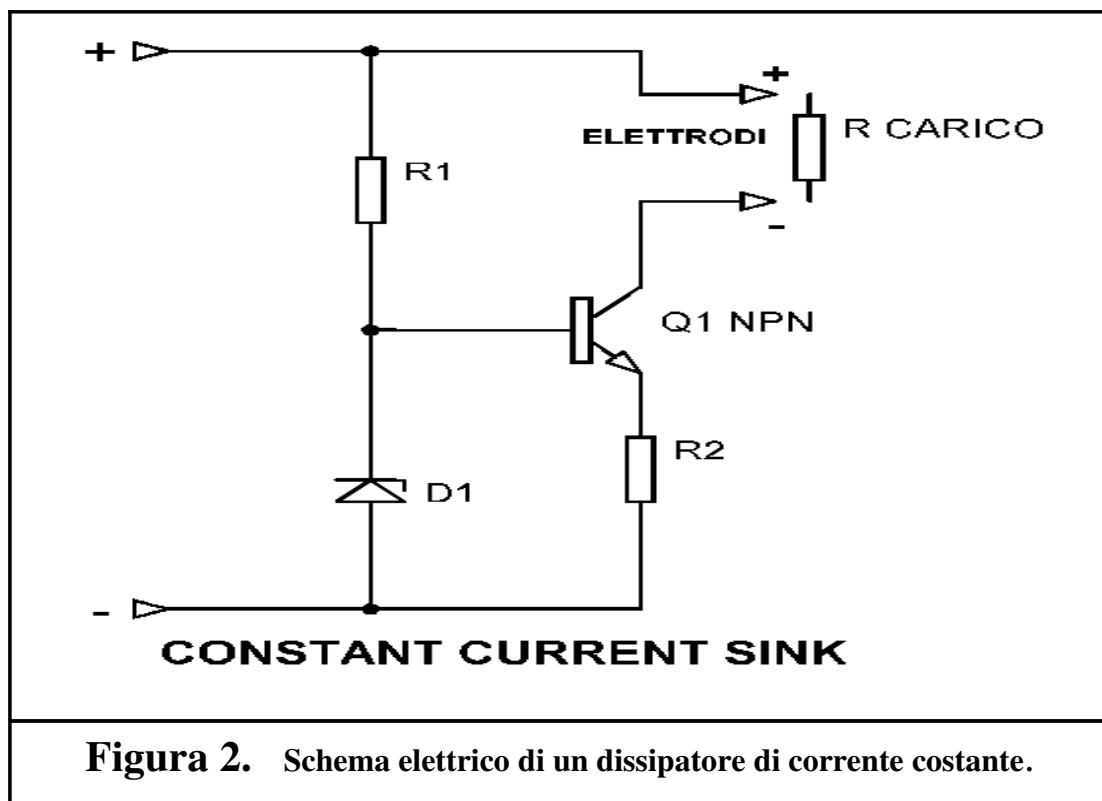
In un transistor al silicio, se la giunzione di Base è polarizzata direttamente, la  $V_{be}$  normalmente diminuisce di circa 2mV per ogni °C, per cui la corrente di collettore tende ad aumentare all'aumentare della temperatura (diminuisce la  $V_{ce}$ ). Questo fenomeno è causa dell'evento distruttivo che all'aumentare della temperatura conduce alla rottura del transistor.

Per ridurre gli effetti della suddetta deriva termica, si opera a temperatura costante oppure si inietta nella base una corrente che deve rimanere costante ad ogni temperatura. Rammentando che  $i_c = i_b * \beta$ , se  $\beta$  è elevato (10.000 e oltre) e se la corrente erogata dal generatore è di uno o alcuni mA ( $i_c$ ), anche le piccole variazioni della temperatura ambiente compromettono la stabilità del generatore per cui, se il progettista lo ritiene necessario, deve prevenire tale evenienza.

Qualora si escluda qualunque intervento correttivo, quanto esposto costituisce la base per la progettazione di un preciso termometro analogico in cui il transistor costituisce un ramo di un ponte di Wheatstone.

Le applicazioni elettroterapiche a carattere professionale, si effettuano a temperatura ambiente costante comunque confortevole (24 – 25°C se il paziente è nudo) e il progettista di apparecchiature medicali può usufruire anche di questa condizione.

Nella Figura 2. è rappresentato lo schema di un generatore di corrente costante di tipo *sink*, in quanto il transistor Q1 e la resistenza di emittore R2 dissipano verso massa la corrente che fluisce nel carico (elettrodi).



Il generatore di corrente costante di Figura 2. non è solo un esempio didattico, ma trova ampia applicazione nella realtà progettuale.

Lo **Zener** (D1) è un diodo particolare che, se polarizzato inversamente, ai capi (tra anodo e catodo) presenta una tensione costante ( $V_Z$ ). Quest'ultima si mantiene costante se il componente viene attraversato da una corrente di 5 mA, per gli Zener con dissipazione di  $\frac{1}{2}$  W e di 10 – 15 mA per gli Zener con dissipazione di 1W.

Contrariamente al diodo al silicio, lo Zener presenta una deriva termica positiva simile, ma non identica a quella del diodo al silicio polarizzato direttamente. Se allo Zener si collegano in serie uno o meglio due diodi al silicio polarizzati direttamente, questi ultimi, essendo dotati di una deriva termica negativa possono attuare una relativa compensazione termica che in molti casi si ritiene accettabile. La resistenza R2 ha un ruolo importante nella stabilità elettrica e/o termica del generatore, in quanto all'aumentare della corrente di collettore aumenta anche la tensione ai capi di detta resistenza che introduce una valida retroazione sulla corrente di base, che si oppone al temuto effetto valanga, difetto comune a tutti i transistori a giunzione.

A questo punto, l'attento Lettore potrebbe già scrivere la semplice formula che determina la costanza della corrente del circuito di Figura 2., ricavabile dalla imperitura legge di Ohm:

$$I = V/R$$

$$i_{emittore} = (V_Z - V_{be}) / R_2$$

In cui  $V_Z$  può essere la somma di  $V_Z$  più quella dei due diodi in serie (circa 1,3V). La somma delle cadute di tensione deve essere sempre uguale alla tensione di alimentazione:

$$V_{alimentazione} = V_{Rcarico} + V_{ce} + V_{R2}$$

$$V_{alimentazione} = E$$

$$V_{Rcarico} = i_c * R_c$$

$$V_{R2} = R_2 * (i_c + i_b)$$

$$E = (i_c * R_c) + V_{ce} + R_2 * (i_c + i_b)$$



La corrente di collettore sarà costante finché la resistenza di carico rimarrà inferiore ad un certo valore determinato dalla legge di Ohm.

La massima corrente di collettore  $I_c$  sarà ottenibile nel modo seguente:

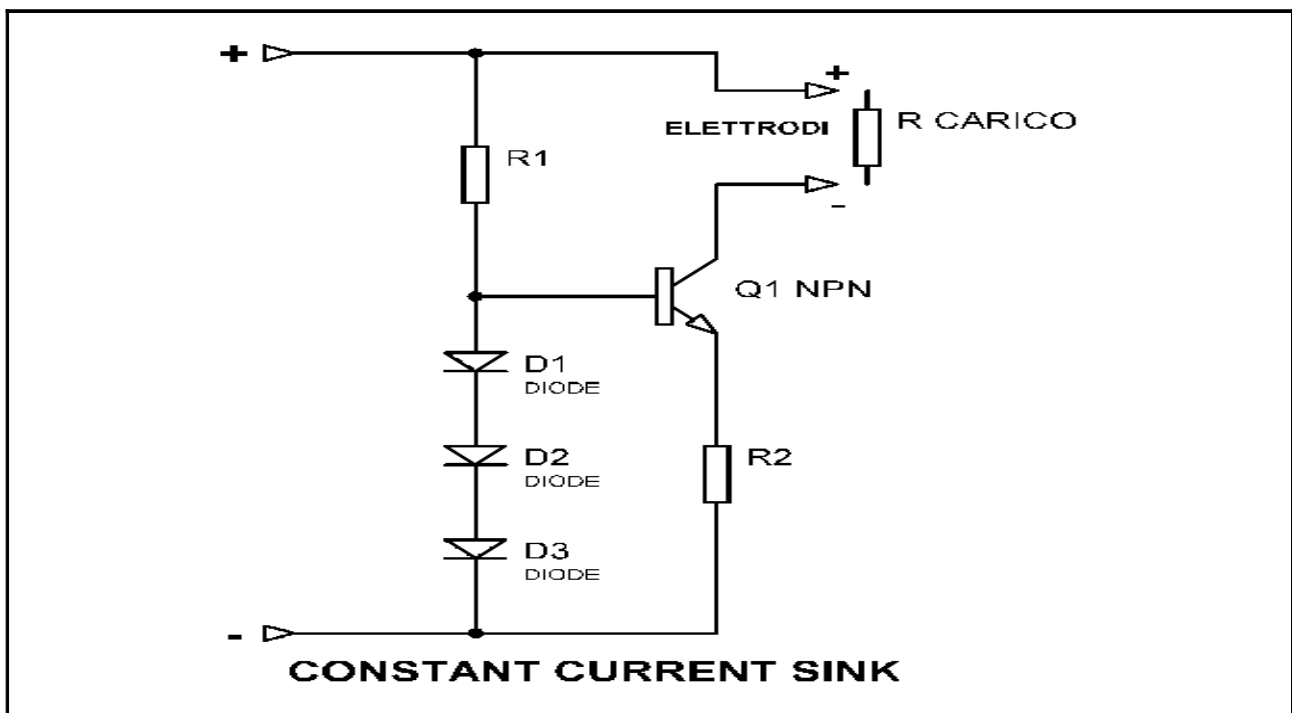
$$I_c = (E - V_{ce} - i_b * R_2) / R_c + R_2$$

Normalmente la corrente di base è molto piccola e possiamo tranquillamente ignorarla, per cui la formula si semplifica e diventa:

$$I_c = E - V_{ce} / R_c + R_2$$

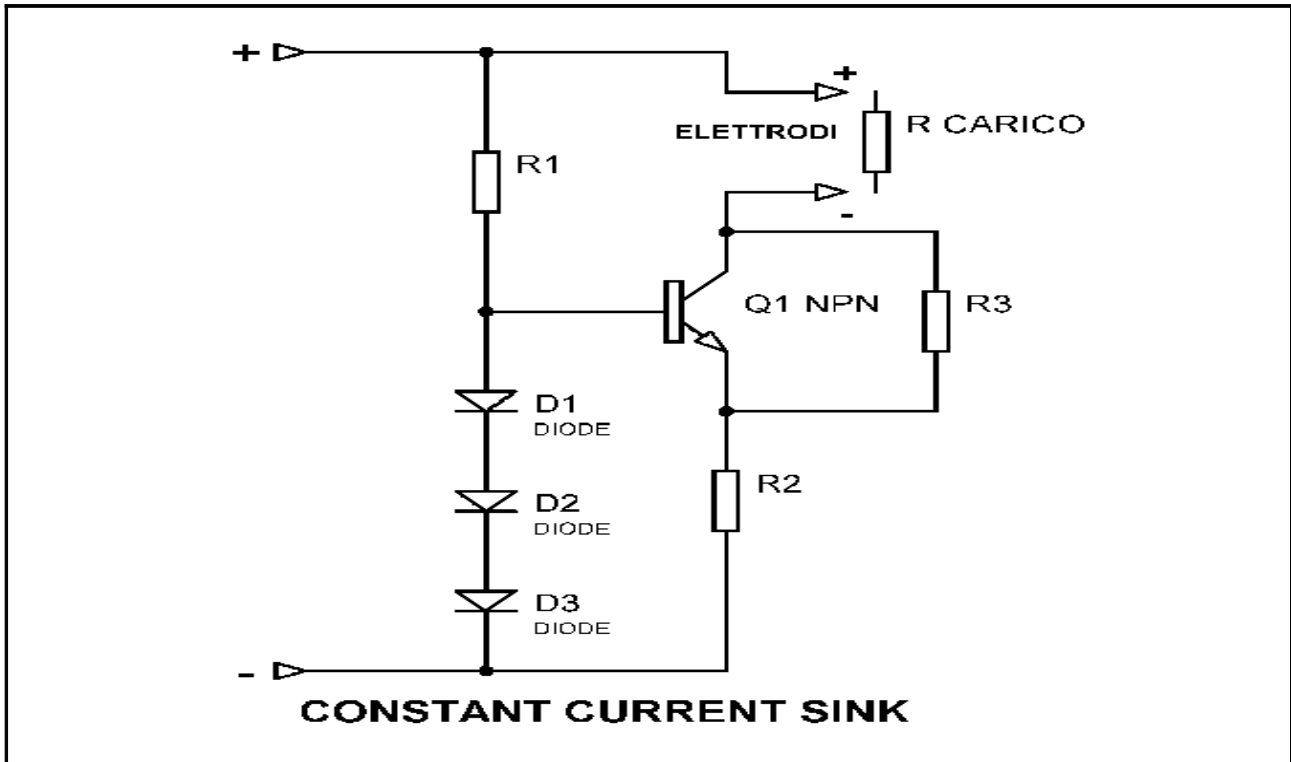
E' del tutto evidente che se il progettista prevede una tensione di alimentazione elevata, il generatore di corrente costante sarà sempre in grado di far fluire nel carico (con valore ohmico elevato) la prevista corrente costante. Un'elevata tensione di alimentazione garantisce una buona linearità quando si usa un generatore di corrente costante come sorgente di alimentazione di un generatore di segnali alternati.

Una variante del circuito di Figura 2 è osservabile nell'immagine seguente:



**Figura 3.** Schema elettrico di un dissipatore di corrente costante in cui la tensione di riferimento è ottenuta con 3 diodi in serie (circa 1,95V).

I tre diodi al silicio (D1, D2,D3) si comportano in modo simile ad uno zener di circa 1,95V ma, come già descritto, la loro deriva termica è negativa, per cui attuano una relativa stabilizzazione della corrente di base. Nel caso in cui si preveda l'impiego di una corrente costante fissa ed eventualmente un'alimentazione non stabilizzata, si può ricorrere al circuito seguente che presenta alcuni vantaggi:



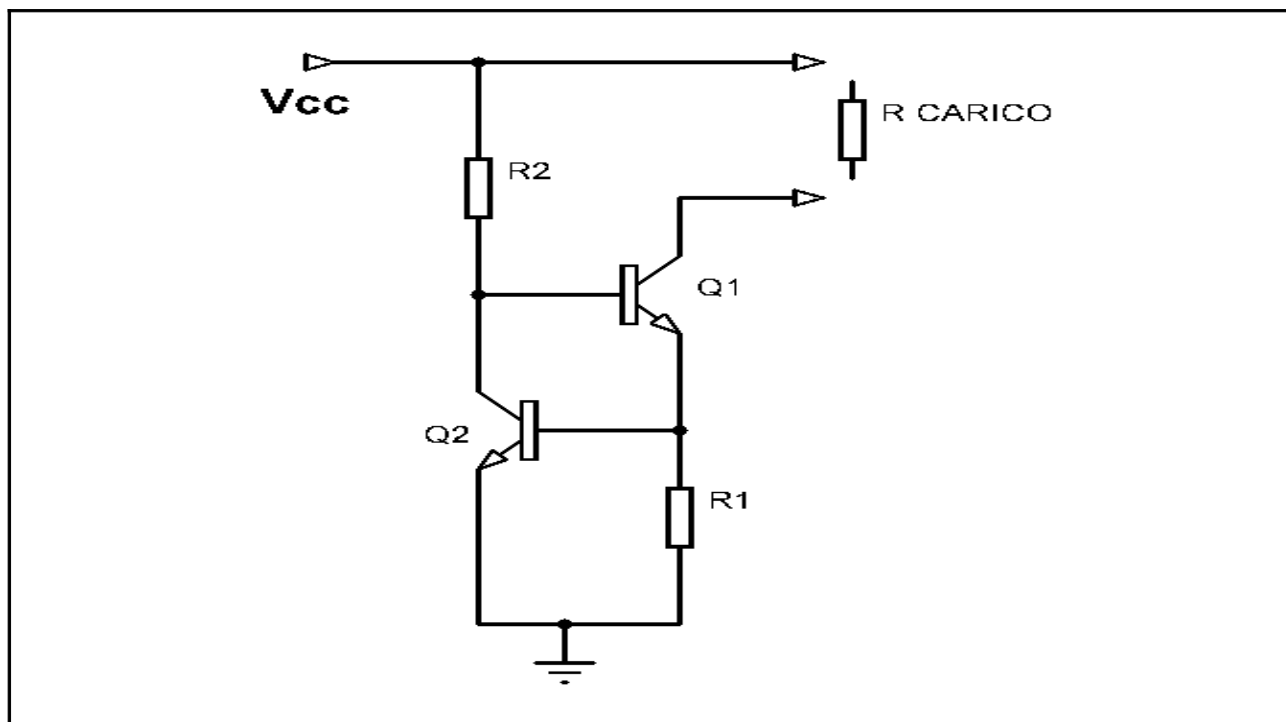
**Figura 4.** Schema elettrico di un dissipatore di corrente costante in cui la resistenza R3 migliora l'indipendenza della corrente di collettore dalle variazioni di tensione e diminuisce la dissipazione termica del transistor.

Il circuito di Figura 4. trova applicazione nei carica batterie tipo Ni-MH o NiCd che sono ampiamente utilizzati nell'alimentazione di apparecchiature medicali portatili. Con la formula seguente si dimensiona la resistenza R3:

$$R3 = (Vs - Vb + 0,65) / Ic$$

- Vs = massima tensione di alimentazione
- Vb = tensione ai capi dei tre diodi al silicio (circa 1,95V)
- 0,65 = tensione di giunzione Vbe del transistor
- Ic = corrente costante prevista

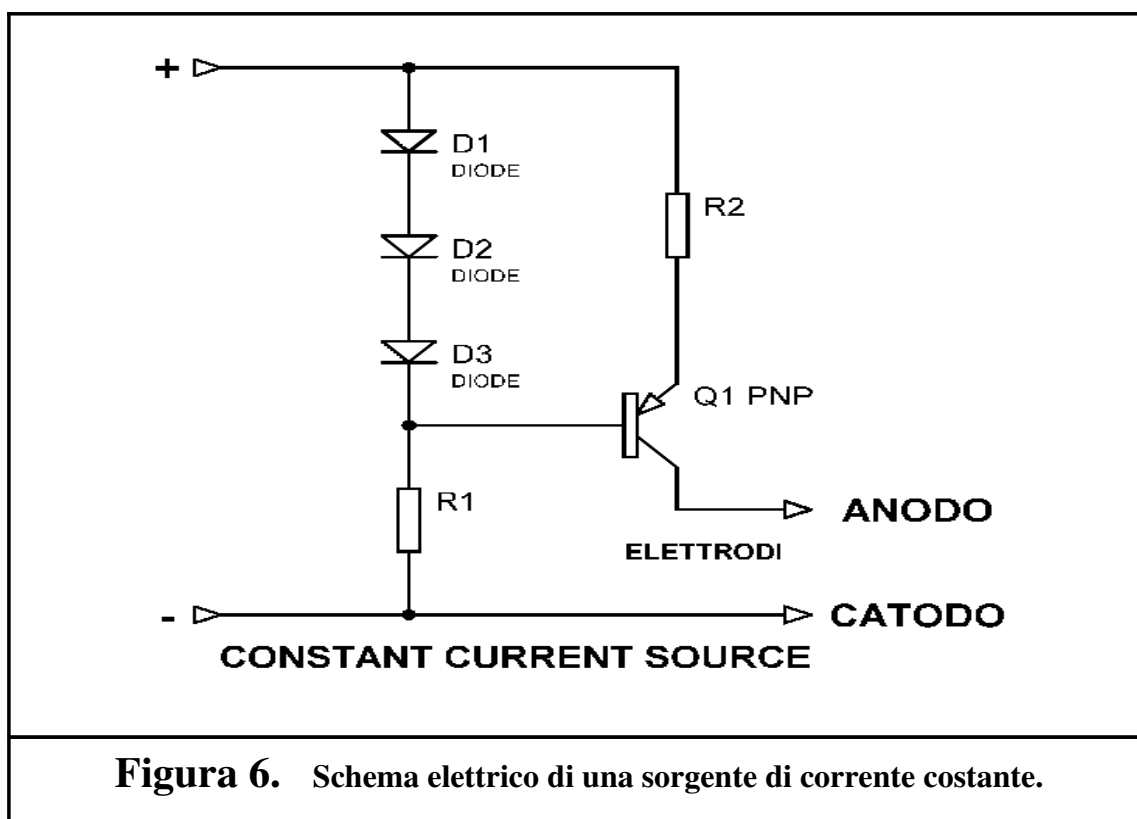
E' del tutto evidente che la resistenza R3 deve essere fisicamente dimensionata in modo da dissipare il calore che la medesima genera. Nella seguente configurazione (Figura 5.) si osserva un dissipatore di corrente costante che trova molti sostenitori, a causa della sua semplicità, versatilità ed efficienza.



**Figura 5.** Schema elettrico di un dissipatore di corrente costante in cui il transistor Q2 genera la tensione di riferimento ( $V_{be} \approx 0,65V$ ); contemporaneamente controlla la corrente di base del transistor Q1 in modo che la corrente che fluisce nel carico rimanga costante.

Quando la tensione ai capi di R1 è di circa 0,65V il transistor Q2 conduce e mantiene costante la corrente di base di Q1, da cui dipende la costanza della corrente di collettore del medesimo transistor. La suddetta configurazione funziona bene anche in regime impulsivo, poiché se R2 viene alimentato da un generatore di impulsi, il carico sarà percorso dagli stessi impulsi, ma in corrente costante. La resistenza R1 si può sostituire con un reostato oppure con un elemento attivo come un transistor oppure un mosfet. Per molte applicazioni la stabilità termica si considera più che accettabile; inoltre, il transistor Q1 si può scegliere tra quelli con  $V_{ce}$  elevata. Con la suddetta configurazione si possono realizzare apparecchi per magnetoterapia a bassa frequenza, ionoforesi e iontoforesi.

La corrente erogata da Q1 è molto prossima alla relazione:  $I_c \approx 0,65 / R1$   
 Nella Figura 6. è rappresentata una sorgente di corrente costante:  
 “constant current source”:



**Figura 6.** Schema elettrico di una sorgente di corrente costante.

Quanto detto per la configurazione “constant current sink” (dissipatore di corrente costante) vale anche per la sorgente di corrente costante: “constant current source”, essendo costruito con un transistor di polarità opposta (PNP).

Il generatore di Figura 6. può essere utilizzato come sorgente di alimentazione di un generatore di segnali impulsivi o alternati o in un amplificatore in classe A.

Al posto dei diodi al silicio si può vantaggiosamente utilizzare un LED la cui accensione segnala visivamente quando il generatore entra in funzione. I LED hanno una tensione di giunzione caratteristica che è anche molto stabile; ad esempio i LED rossi hanno una tipica tensione di circa 1,56V e quelli bianchi di 3V.

Ad esempio se il circuito di Figura 4. si impiega come caricabatteria, senza ulteriori complicazioni, l'accensione del LED rivela lo stato ON / OFF del circuito unitamente al suo corretto funzionamento.

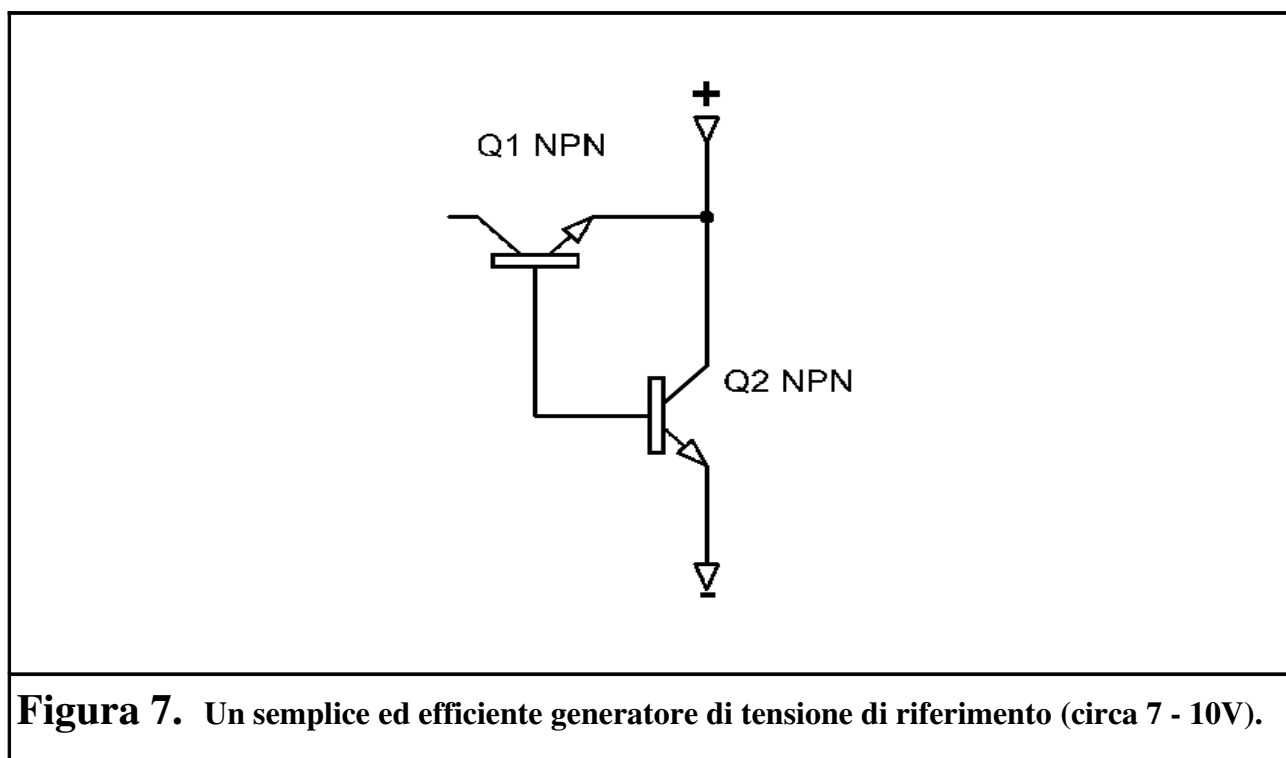
## ***I GENERATORI DELLA TENSIONE DI RIFERIMENTO***

A questo punto l'attento Lettore avrà compreso il ruolo della tensione di alimentazione nei generatori di corrente costante ma, soprattutto, sarà convinto della necessità di mantenere costante la tensione di riferimento al variare della temperatura e si è visto che una valida tensione di riferimento si può ottenere nei seguenti modi:

- Zener (se compensati termicamente con due diodi al silicio).
- Alcuni Diodi al silicio posti in serie.
- La tensione di giunzione **be** di un transistor.
- LED singoli o in serie.

E' però possibile ottenere facilmente degli ottimi generatori di tensione di riferimento e si descrive come produrli.

Nella Figura 6. si osserva un semplicissimo e ottimo generatore di tensione di riferimento:



**Figura 7.** Un semplice ed efficiente generatore di tensione di riferimento (circa 7 - 10V).

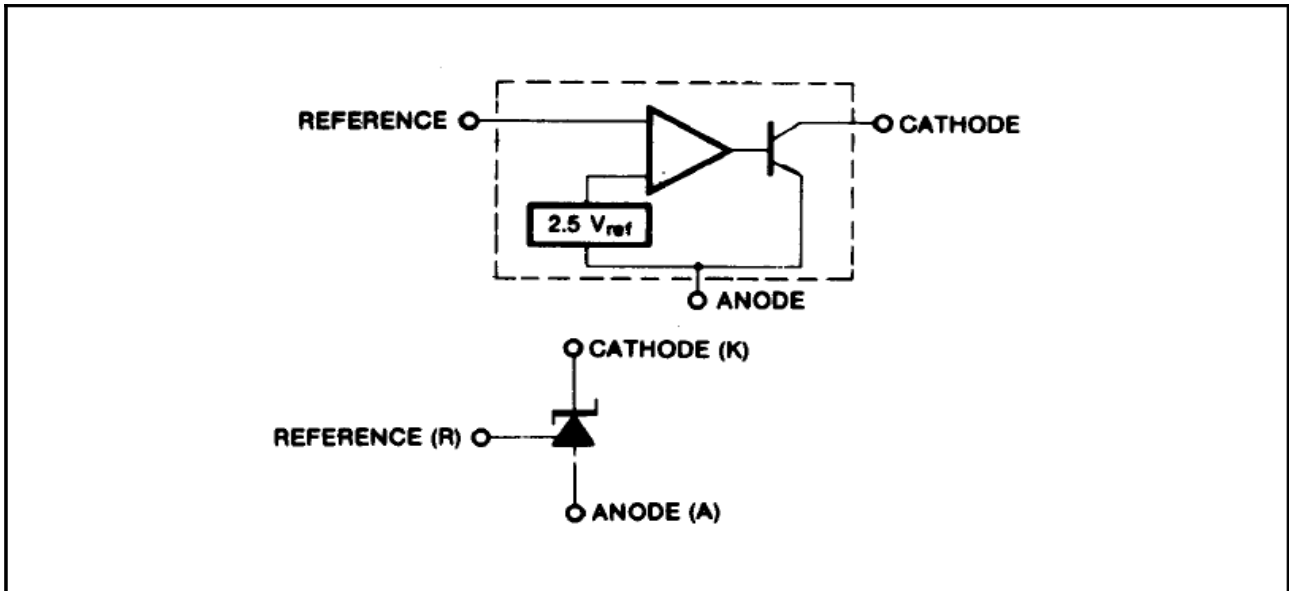
Q1 = BC109 o altro transistor per piccoli segnali.

Q2 = 2N1711 – BC141 – 2N1983

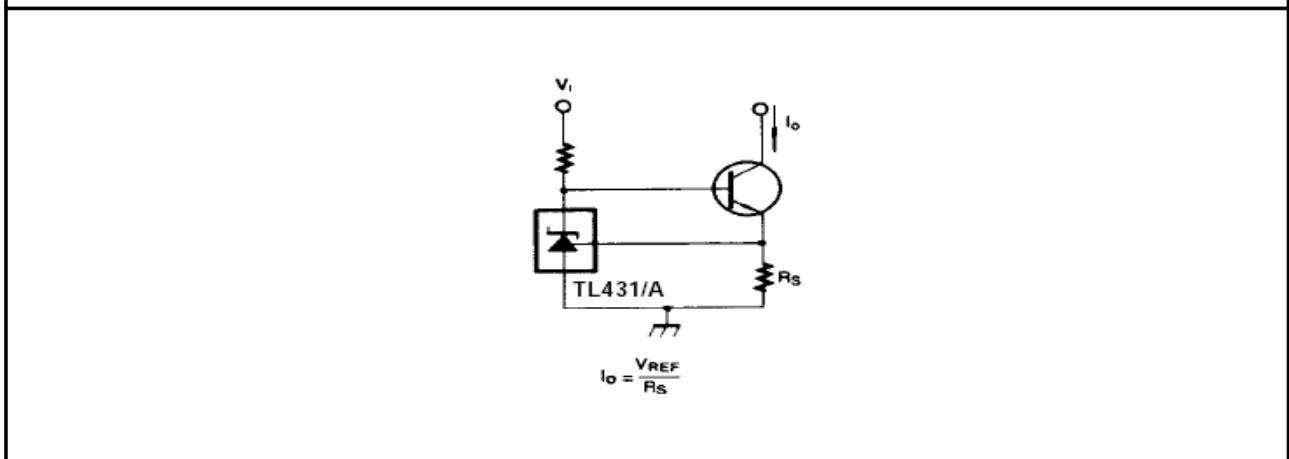
Corrente da applicare: da 10 a 15 mA da trovare sperimentalmente.

Ogni singola realizzazione genera una propria tensione rigorosamente costante compresa tra 7 e 10 V.

Un generatore di corrente costante tipo *sink* è realizzabile impiegando i componenti tipo TL431 (*programmable shunt regulator*) a tre terminali in contenitore TO92:



**Figura 8.** Il TL431 o similari, sono circuiti integrati a tre terminali che rassomigliano ad un transistor. La tensione di riferimento è di 2,495 V, la corrente controllabile va da 300  $\mu$ A a 200 mA, mentre la massima tensione tra catodo e anodo è di 36 V.



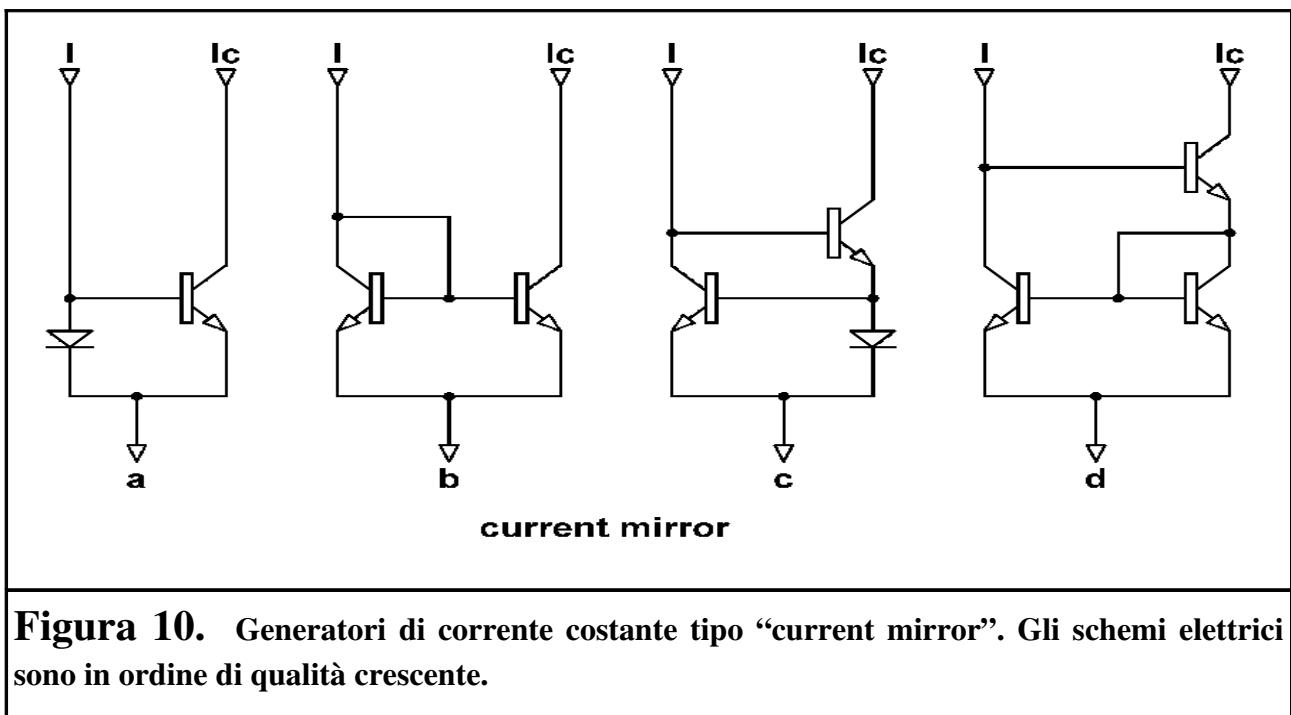
**Figura 9.** Il TL431 controlla la corrente di base di un transistor configurato come dissipatore di corrente costante.

La tensione di riferimento, avendo uno slittamento di soli 30 ppm/ $^{\circ}$ C, si può considerare un riferimento assoluto di tensione per le applicazioni negli apparecchi medicali.

## **GENERATORI DI CORRENTE COSTANTE IN CONFIGURAZIONE CIRCUITALE “CURRENT MIRROR”**

Nei circuiti integrati lineari il generatore di corrente costante costituisce un fondamentale elemento circuitale che viene impiegato con profusione nelle forme dette “*current mirror*”.

Nei generatori di corrente costante a specchio di corrente un ramo del circuito (**I**) determina l'uguaglianza della corrente nel ramo speculare (**I<sub>c</sub>**) nel quale si applica il carico.



Il funzionamento di questi circuiti necessita di componenti con identiche caratteristiche elettriche, ottenibili durante il processo di costruzione dei circuiti integrati. Il “*current mirror*” trova anche applicazione negli amplificatori lineari di segnali e/o di potenza di grande qualità e sovente di notevole complessità circuitale.

Le suddette configurazioni hanno un certo interesse nella costruzione dei modulatori di segnali di semplici apparecchi medicali.

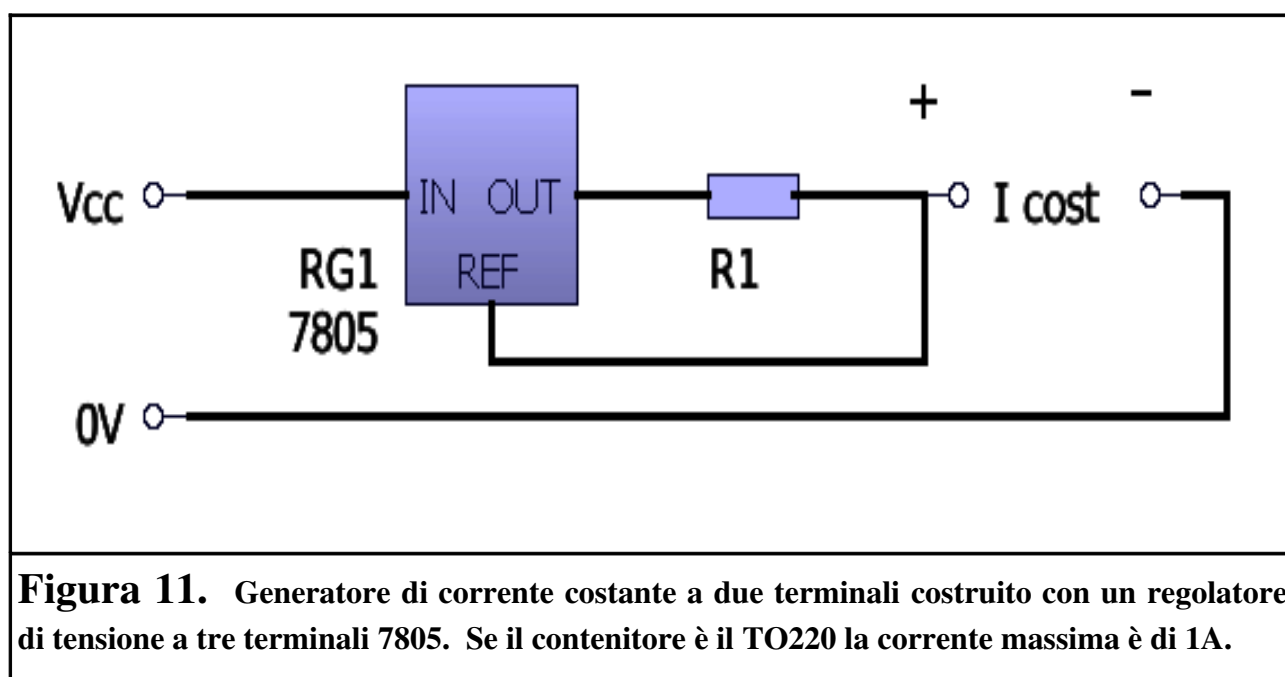
L'industria elettronica produce circuiti integrati composti da due o più transistor, tutti con identiche caratteristiche, normalmente disposti in un singolo contenitore (*case*) plastico.

## GENERATORI DI CORRENTE COSTANTE A DUE TERMINALI

Come declama il titolo di questo capitolo, i generatori di corrente costante a due terminali, non potendo disperdere altrove la corrente, quest'ultima entra costante in un terminale ed esce altrettanto costante da quello di uscita, per cui in base alla posizione del carico nel circuito, tutti i generatori di corrente costante a due terminali sono indifferentemente “*constant current source*” o “*constant current sink*”.

Per il fatto che dal *case* escono solo due conduttori, qualcuno ebbe la pessima idea di chiamare queste configurazioni circuitali “*diodi a corrente costante*” ma, come si può facilmente comprendere, questa denominazione serve solo a generare confusione negli inesperti. Nell'elettronica industriale, questi generatori trovano largo impiego, potendo erogare minuscole, ma rigorose correnti costanti adatte alla corretta polarizzazione dei componenti elettronici o per erogare le elevate correnti elettriche per la galvanotecnica. Il circuito di Figura 11 apre la carrellata; consiste in un'applicazione dell'arcinoto regolatore di tensione 7805 che genera una tensione costante di 5V. La corrente costante si calcola con la formula seguente.

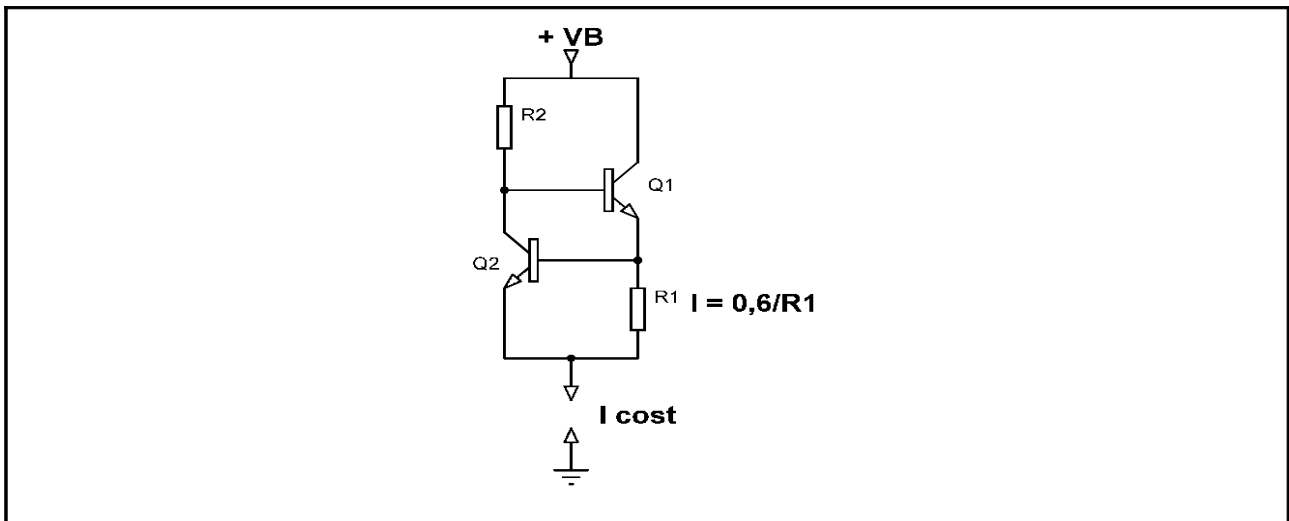
$$I = 5/R1 + i_{REF} \quad i_{REF} \approx 1,5 \text{ mA}$$



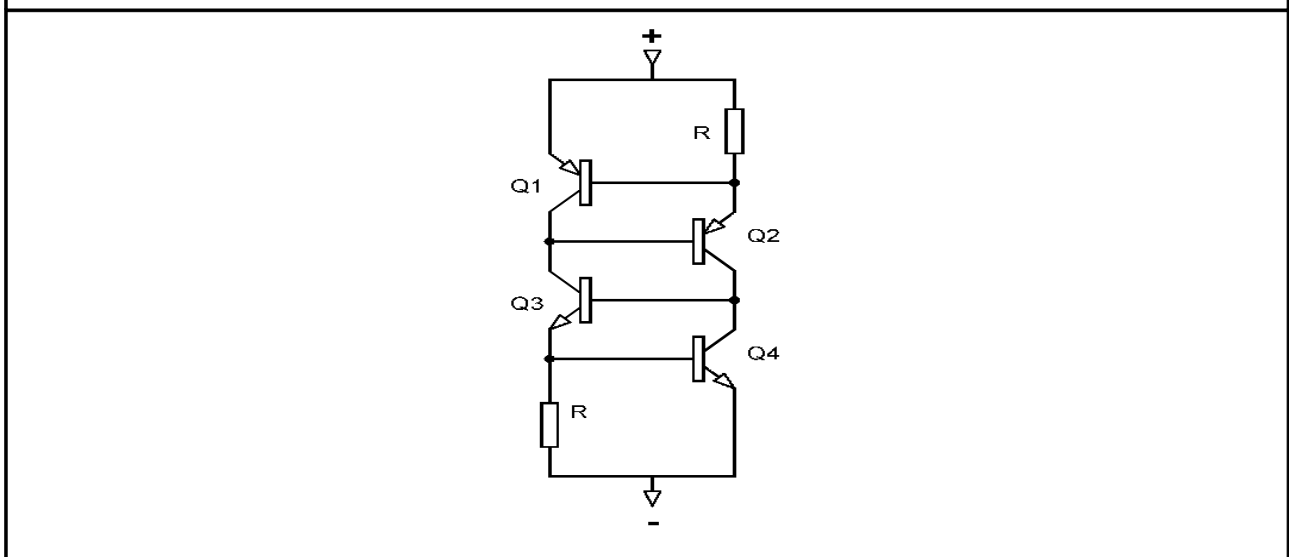
**Figura 11.** Generatore di corrente costante a due terminali costruito con un regolatore di tensione a tre terminali 7805. Se il contenitore è il TO220 la corrente massima è di 1A.



La principale applicazione di questo generatore è come caricabatteria. La tensione ottimale di alimentazione è di 12 – 15V, è quindi necessario contenere le variazioni del carico, in caso contrario non è in grado di mantenere costante la corrente. Le seguenti configurazioni derivano da quella illustrata nella Figura 5:



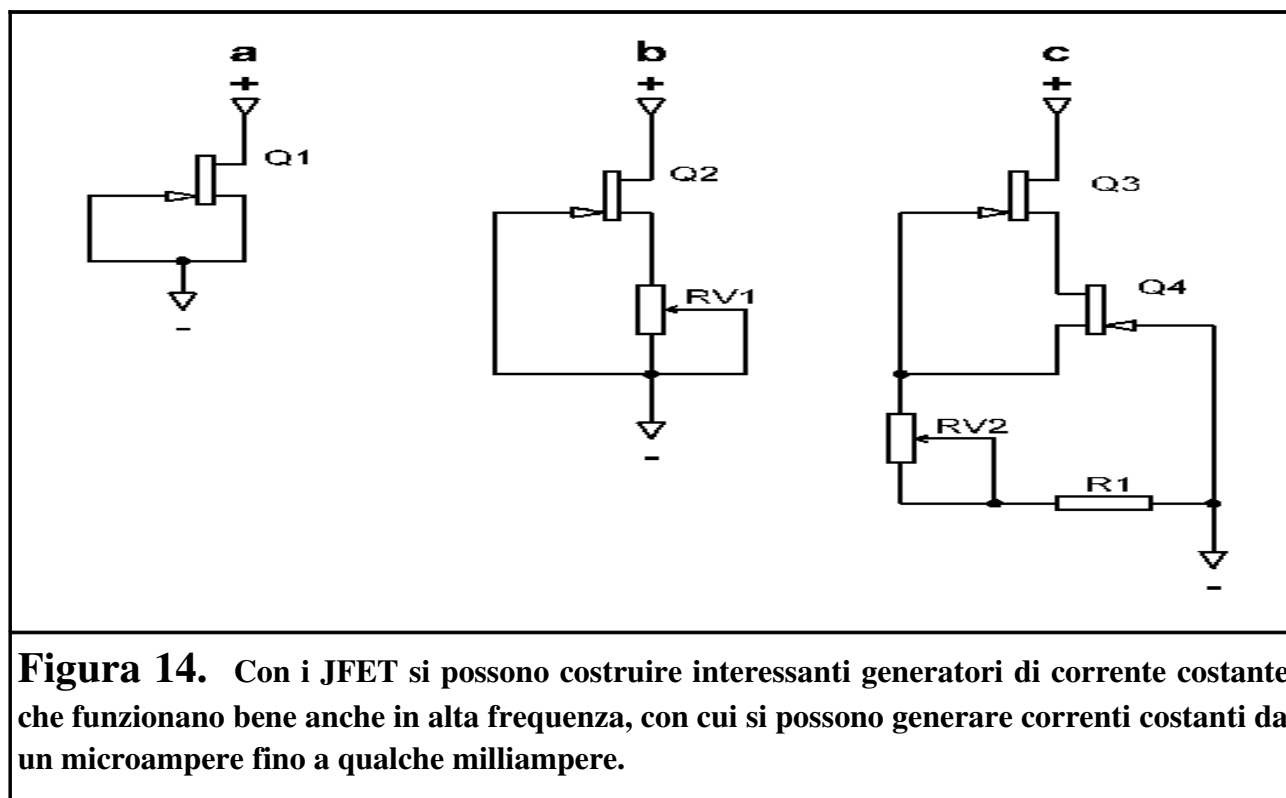
**Figura 12.** Generatore di corrente costante a due terminali. Con la formula riportata non si ricava con sufficiente precisione il valore della corrente. Una maggiore precisione si ottiene in fase di taratura se R1 è composta da una resistenza fissa (massima corrente erogabile) posta in serie ad una variabile (minima corrente erogabile).



**Figura 13.** Stabile generatore di corrente costante a due terminali. Il miglioramento è evidente rispetto al generatore precedente ed è ottenuto combinando due generatori standard, ma di polarità opposta. R sono due resistenze di uguale valore.

$$I = 2V_{be} / R$$

Nella Figura 14 si osservano tre configurazioni di generatori di corrente che utilizzano dei N-Channel JFET.



- Configurazione (a): il JFET ha il terminale di *gate* collegato col *source* per cui lavora in saturazione. Nella regione di saturazione la corrente, non potendo aumentare ulteriormente, rimane costante e il suo valore dipende dal tipo di JFET utilizzato. Per rendere la corrente regolabile, si deve ricorrere alle configurazioni (b e c).
- Configurazione (b): se Q2 è un 2N3819 – BF244 e simili, RV1 è una resistenza variabile da 2 M, la corrente costante erogata potrà variare tra 5 microampere a circa 2 milliampere.
- Configurazione (c): se Q3 e Q4 sono 2N3819 – BF244 e simili, RV2 è una resistenza variabile da 1 M e R1 è una resistenza da 100 ohm, la corrente costante erogabile potrà variare da 2 microampere a 1 milliampere.

Correnti costanti stabili si ottengono anche con i generatori di Figura 12 e 13 se i transistor sono identici come nei duali (due transistor in un unico contenitore; ad esempio il 2C415 o 1Y8996 e similari).

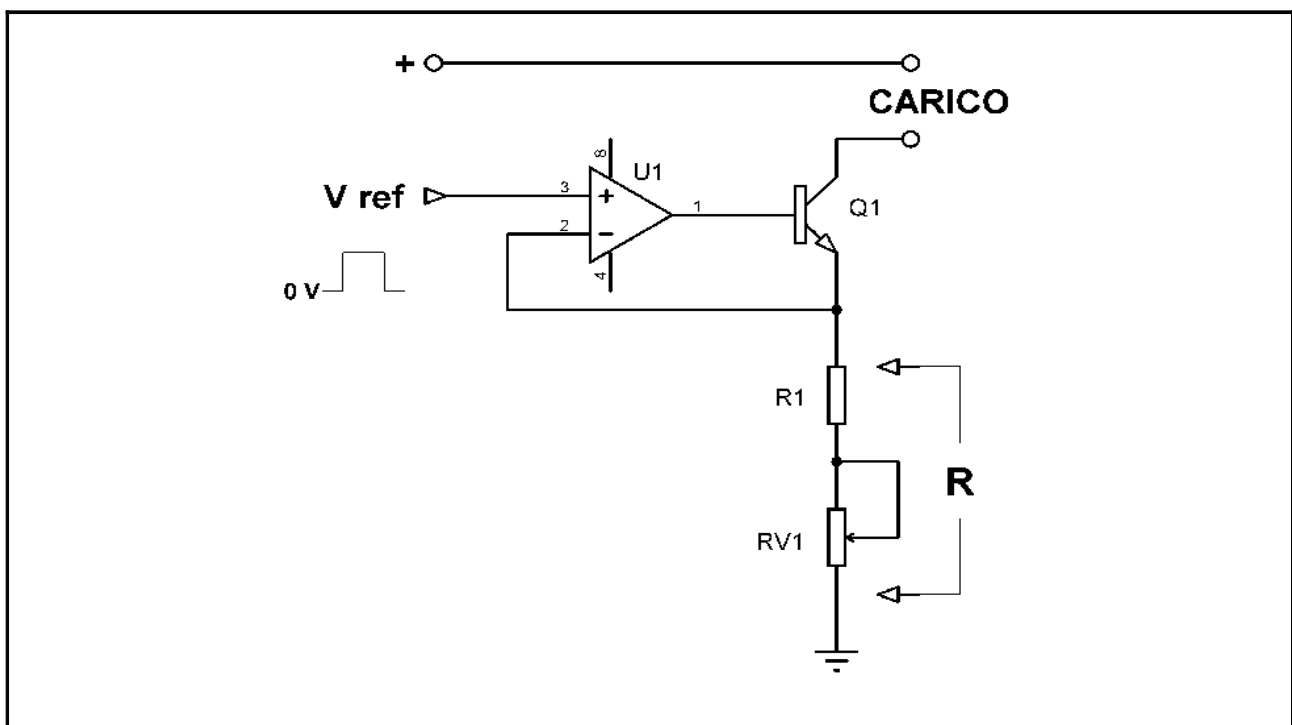
## CONVERTITORI TENSIONE CORRENTE

Mediante opportuni circuiti elettrici, da tutte le configurazioni di generatori di corrente costante si potrebbero ricavare dei convertitori tensione-corrente, ma detti convertitori si ottengono semplicemente e “*naturalmente*” mediante gli amplificatori operazionali utilizzati come comparatori di tensione. Detti convertitori consentono di ottenere tutti i possibili segnali elettrici di interesse biofisico, potendo erogare correnti galvaniche pure o modulate e correnti alternate di tutti i tipi.

L'unico limite potrebbe essere l'estensione in frequenza.

I seguenti schemi elettrici di principio rappresentano la necessaria base di riferimento per la progettazione dei convertitori tensione-corrente.

Come i precedenti generatori di corrente costante, anche quelli in oggetto possono essere configurati come “*constant current source*” o “*constant current sink*”.

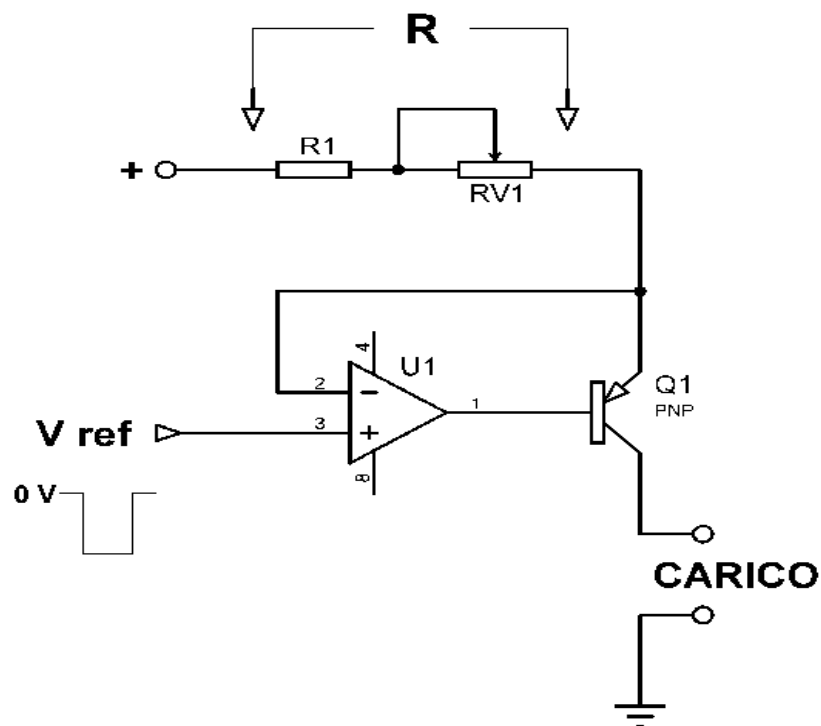


**Figura 15.** Convertitore tensione corrente in configurazione “*constant current sink*”.

$I_c$  = corrente di collettore di Q1 -  $I_b$  = corrente di base di Q1

$V_{ref}$  maggiore o uguale a zero

$$V_{ref} = R (I_c + I_b)$$



**Figura 16.** Convertitore tensione corrente in configurazione “constant current source”.

$I_c$  = corrente di collettore di Q1 -  $I_b$  = corrente di base di Q1

$V_{ref}$  minore o uguale a zero

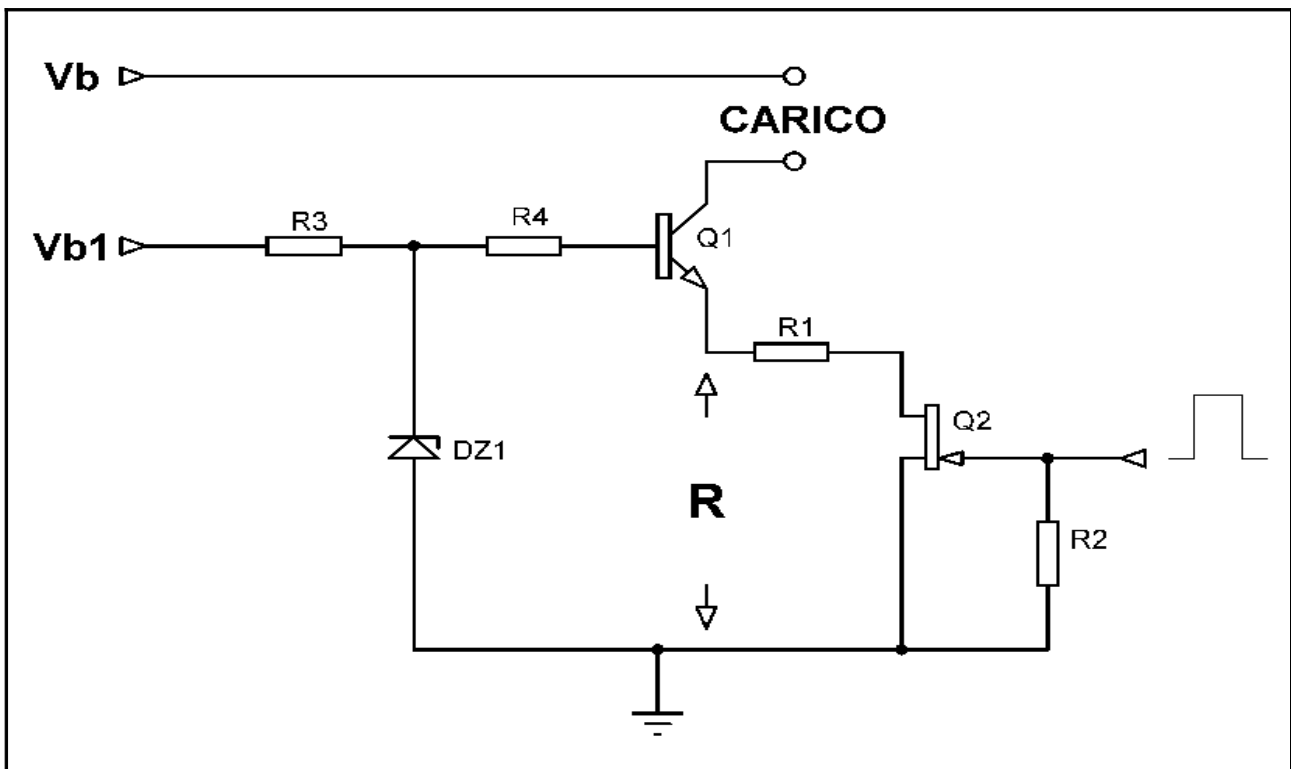
$$V_{ref} = -R (I_c + I_b)$$

In ambedue le configurazioni la corrente costante si ottiene in due modi:

1.  $V_{ref}$  variabile ed  $R$  costante.
2.  $V_{ref}$  costante ed  $R$  variabile.

Negli schemi delle Figure 15 e 16, la resistenza  $R$  appare scomposta in  $R1$  e  $RV1$ , indicando la possibilità di regolare la corrente mediante  $RV1$  qualora esista una stabile tensione di riferimento ( $V_{ref}$ ) che determina il livello minimo di corrente erogabile, come è previsto nel secondo caso.

In molte applicazioni si può ignorare la corrente di base ( $I_b$ ), quando la corrente erogata da Q1 (darlington) è uguale o superiore a 10 milliampere. La seguente configurazione (Figura 17) descrive la possibilità di regolare e/o modulare la corrente che fluisce nel carico, utilizzando pochi ed elementari componenti discreti tra cui un N-JFET in funzione di modulatore.



**Figura 17.** Semplice e versatile convertitore tensione-corrente in grado di funzionare anche a frequenze elevate. Q2, se opportunamente configurato, può modulare segnali in corrente continua o in alternata.

$$I_{\text{carico}} = (V_{\text{dz1}} - 0,6) / R$$

Nello schema soprastante, R3, R4 e DZ1 rappresentano una qualunque sorgente di tensione costante a cui si annette anche la funzione di *strobe* o di generatore di rampa che abilitano il funzionamento del circuito in oggetto (gradualmente o in modalità *on-off*). La resistenza R2 polarizza il *gate* di Q2 in modo che Q1 eroghi nel carico la massima corrente prevista, mentre il segnale positivo ne modula l'intensità e la forma.

L'insieme della resistenza R1 e il JFET Q2, stabilizzano termicamente Q1. Quest'ultimo dovrà comunque essere munito di un eccellente dissipatore di calore. Uno dei problemi che il progettista di apparecchi elettroterapici deve prevedere e risolvere è la ricerca della minima dimensione dell'interfaccia biofisica (minima area degli elettrodi conduttori di seconda specie) in grado di non modificare la corrente di spostamento e la relativa forma d'onda del segnale bioelettrico. Sovente è necessaria una elevata tensione di alimentazione ( $V_b$  da 60 a 110 V) che può comportare una energica dissipazione termica di Q1.

# I GENERATORI DI CORRENTE COSTANTE NELLA PRATICA PROGETTUALE

## *SCelta DELLA CONFIGURAZIONE CIRCUITALE*

L'Autore ha descritto (in forma teorica ed essenziale) i generatori di corrente costante che trovano innumerevoli applicazioni pratiche in ambito elettromedicale, soprattutto per attuare tutte le forme di elettroterapia le cui interfacce biofisiche sono costituite da elettrodi conduttori di seconda specie.

Tutti gli esempi schematici che sono stati presentati sono espressione della grande e imperitura famiglia dei circuiti lineari. Al pari degli alimentatori a tensione costante, anche i generatori di corrente costante si possono realizzare utilizzando la tecnologia della commutazione (*switching*) con cui si rendono disponibili elevate correnti costanti (molti ampere), ma con ridottissima dissipazione termica dei componenti attivi di potenza.

In ambito elettromedicale la massima corrente erogabile non supera il valore di picco di 200 mA, generata in forma impulsiva rapida o lenta (rampa o DdS), quest'ultima della durata massima di alcuni secondi, (diagnostica della denervazione muscolare e terapia riabilitativa) mentre, nella normale pratica terapeutica, di norma non si superano i 50 mA.

Attualmente (*a.d. Gennaio 2010*), da parte dell'Autore e di altri ricercatori, lo studio verte sugli effetti terapeutici delle cosiddette *microcorrenti* il cui livello massimo è solo di 1 milliampere. In particolare la ricerca scientifica si concentra sull'azione biofisica di correnti impulsive di alcuni microampere (vengono ancora chiamate "*correnti russe*"); è quindi del tutto evidente che i circuiti lineari sono in grado di erogare, con elevata precisione e con trascurabile dissipazione termica, le correnti, le forme d'onda e le frequenze necessarie per la sperimentazione biofisica.

Esiste una sola eccezione: l'elettroterapia antinfiammatoria ad alta tensione (da 50 a 1200 V con impulsi di circa 100 microsecondi alla frequenza di circa 100/200 Hz ) detta **HVPC** (**H**igt **V**oltage **P**ulsed **C**urrent) con cui si possono veicolare correnti impulsive di alcuni ampere di picco. La HVPC non va confusa con le applicazioni terapeutiche degli impulsi faradici anche ad alta tensione (da 3 a 15 KV).

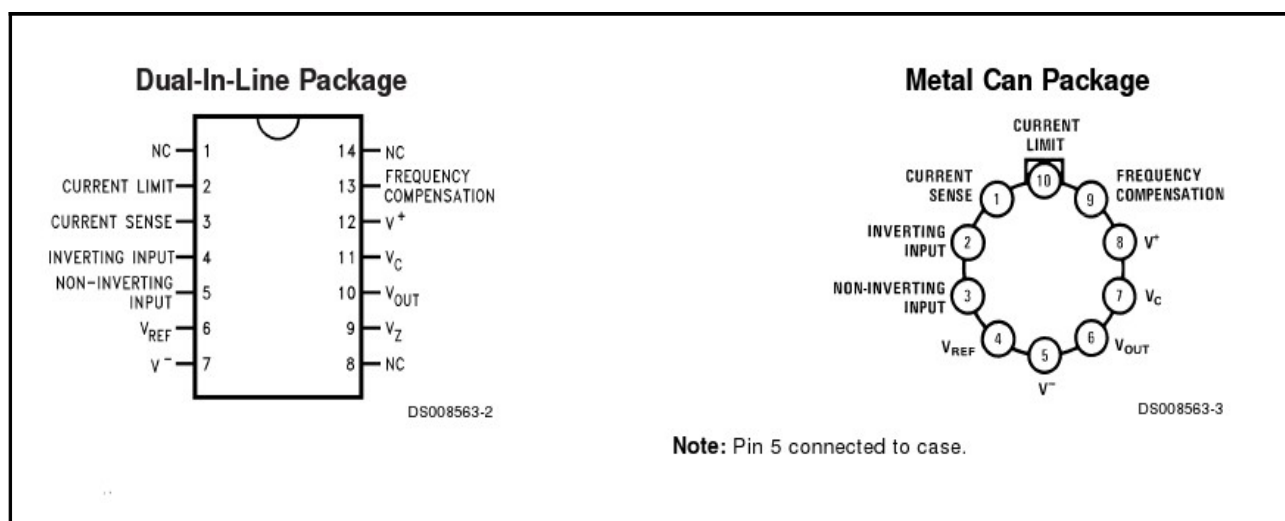
## ALCUNE APPLICAZIONI PRATICHE

### IL 723 COME GENERATORE DI CORRENTE COSTANTE

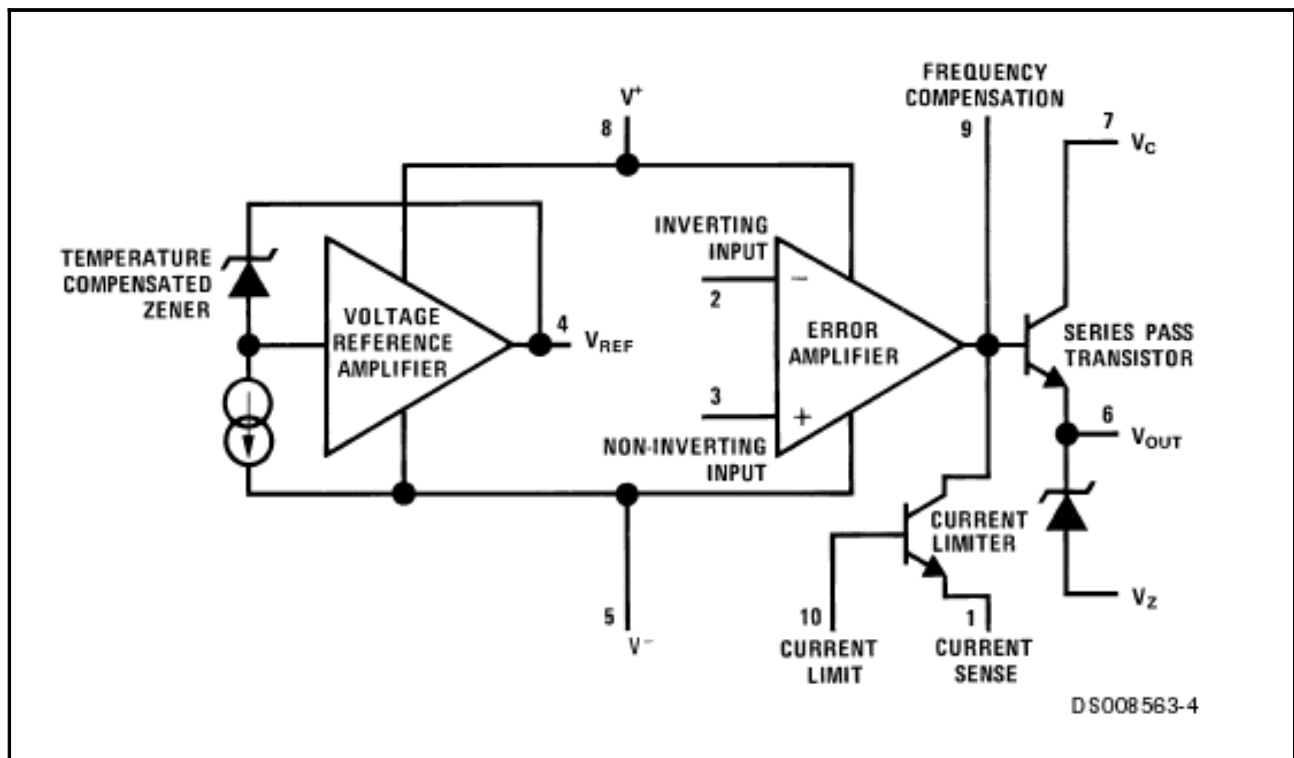
A prima vista sembrerebbe anacronistico riparlare del famoso  $\mu A723$  o LM723 o TBA281, ma se si pensa che nel *chip* è integrato un buon generatore di tensione di riferimento compensato in temperatura ( $7,5V \pm 5\%$ ) accessibile dall'esterno (al pin 4 nella versione in contenitore metallico o al pin 6 nella versione *Dual-in-line*), con la possibilità di applicare agli ingressi dell'amplificatore d'errore una tensione di riferimento ottenibile mediante un semplice partitore resistivo.

Le uscite consentono di realizzare, in qualunque configurazione, gli alimentatori di tensione costante e, analogamente, sono ugualmente fattibili validissime sorgenti di corrente costante (vedi oltre); unitamente al fatto che l'integrato si può alimentare in sicurezza fino a 37V con una dissipazione massima di 0,8W; inoltre, rammentando quanto è stato detto sugli elettromedicali elettroterapici, in particolare nei riguardi dell'intensità di corrente, rapidamente si deduce che il 723, obsoleto come regolatore di tensione, certamente rinasce a nuova vita come sorgente di corrente costante.

Nello spazio di qualche centimetro cubo, senza dover ricorrere a componenti SMD e solo col concorso di alcuni componenti passivi, è possibile realizzare un classico e validissimo apparecchio miniaturizzato per ionoforesi galvanica. Quest'ultima forma di elettroterapia è suscettibile di nuove e imprevedibili applicazioni.



La figura precedente mostra la disposizione dei *pin* del 723 nei *case* plastico e metallico visti dall'alto.



**Figura 18.** Schema a blocchi del 723 National (la numerazione dei *pin* è riferita alla versione metallica) LM723H – LM723H/883 – LM723CH

L'applicazione più semplice del 723 è quella di dare origine ad un generatore di corrente costante nella configurazione “*constant current sink*”. L'uscita del 723 è un *emitter follower* e in ( $V_{out}$ ) è disponibile una tensione regolabile da 2 a 37V. Seguendo lo schema di principio di Figura 15 e osservando la Figura 18, chiunque può disporre i pochi componenti necessari nel modo corretto.

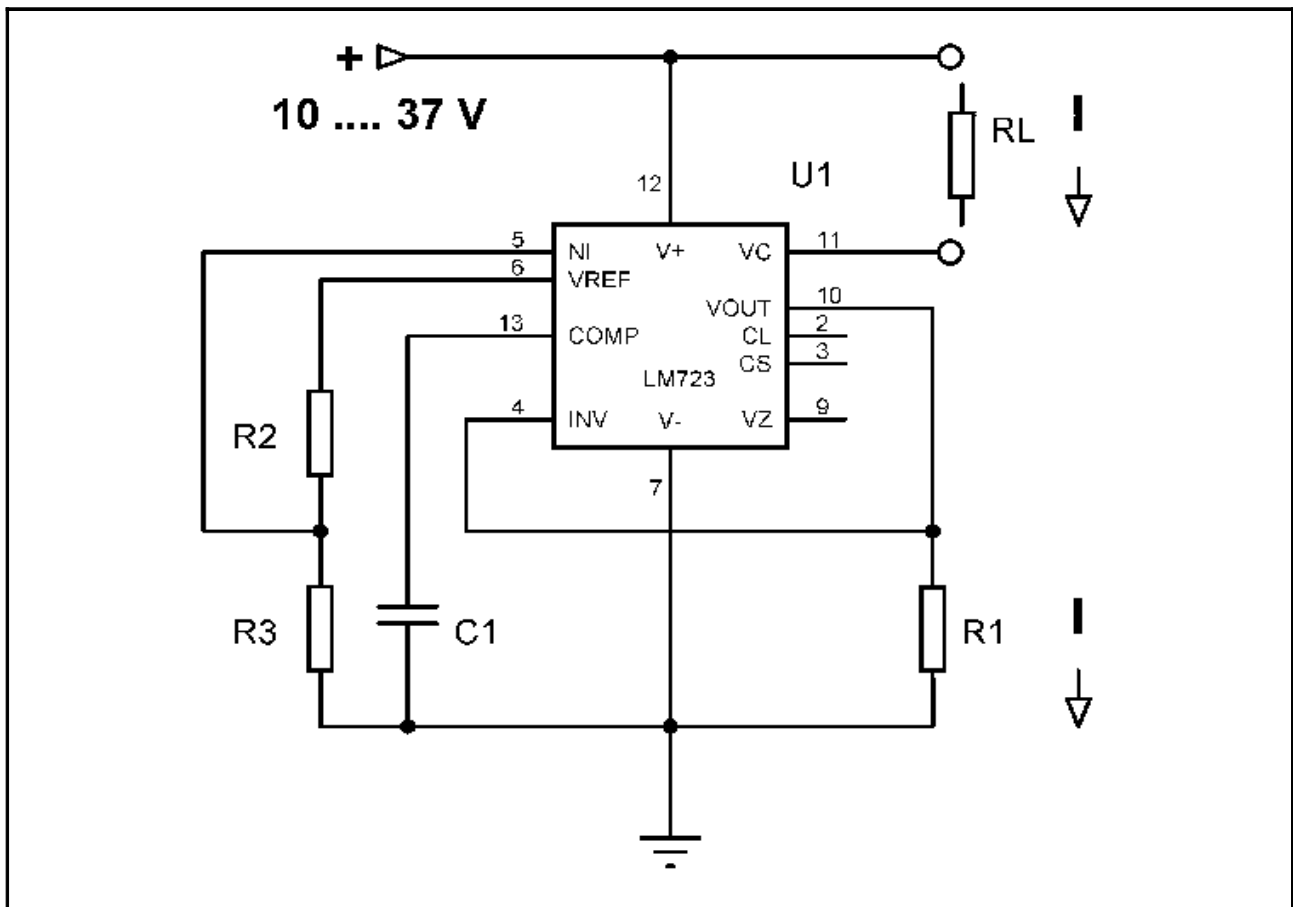
- A ( $V_{ref}$ ) fa capo un partitore di tensione ( $R_2/R_3$ ) che applica all'ingresso non invertente dell'amplificatore d'errore un potenziale di circa 2,2 V.
- Tra l'uscita ( $V_{out}$ ) e la massa si collega la resistenza  $R_1$  che determina il riferimento di corrente; ciò avviene collegando a ( $V_{out}$ ) l'ingresso invertente dell'amplificatore d'errore.

Tra il ramo positivo dell'alimentazione e ( $V_c$ ) è subito disponibile la corrente costante:



$$I = 2,2 / R1$$

Come nella Figura 15, anche la resistenza R1 si può rendere regolabile mediante un idoneo potenziometro.



**Figura 19.** LM723 (DIL) montato come generatore di corrente costante tipo *sink*.

$R2 = 2,7K - R3 = 1,2K - C1 = 100 \text{ pF} - RL = \text{carico} - R1 = \text{resistenza di riferimento}$

La corrente costante che fluisce in R1 scorre anche in RL (carico).

Il massimo valore di RL che consente il corretto funzionamento del circuito è dato da :

$$RL = Ub - 2,2 / I$$

Ub è la tensione di alimentazione del circuito.

La potenza dissipata dall'integrato è data da:

$$P = (Ub - 2,2) * I$$

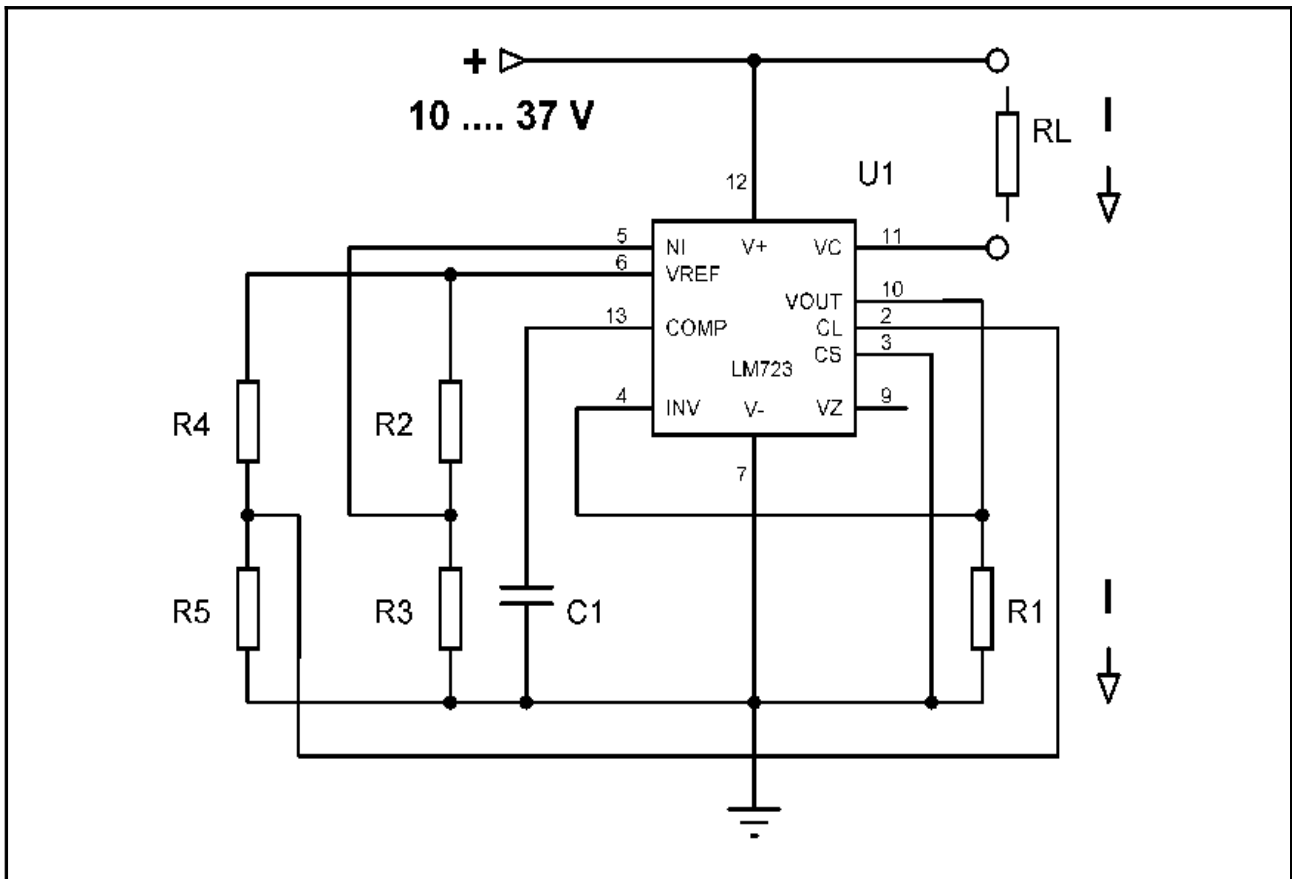
Sapendo che la massima corrente d'uscita del 723 è di 150 mA e la massima dissipazione è di 0,8 W, con la formula seguente si ricava la massima corrente erogabile al carico ad una data tensione di alimentazione (corrente di corto circuito) :

$$I_{max} = 0,8 / U_b - 2,2$$

- Se  $U_b$  è di 10V la massima corrente erogabile sarà di circa 100 mA.
- Se  $U_b$  è di 37V (massima tensione di alimentazione) la corrente erogabile di corto circuito scenderà a circa 23 mA.

Differente è il caso in cui, con una tensione di alimentazione di 37V, si intenda erogare una corrente costante di 2 mA, l'interfaccia biofisica potrà operare correttamente fino ad una resistenza massima di circa 17.400 ohm. Le interfacce biofisiche di circa 60 o 90 cm<sup>2</sup> possono tranquillamente ridurre la resistenza (RL) al valore massimo di circa 1 o 2 K (iniziali), per cui, il circuito del generatore di corrente costante realizzabile col 723, qualora venga costruito seguendo lo schema elettrico di Figura 19 e dotato di idonea interfaccia biofisica, può essere realmente impiegato come apparecchio elettromedicale per elettroterapia galvanica, altrimenti detta ionoforesi. In questo caso, il minimo valore di R1 sarà di circa 1100 ohm e la dissipazione totale sarà di circa 0,07 W.

In base a quanto premesso, se la tensione di alimentazione è di 37V, la massima corrente erogabile è di 23 mA a cui corrisponde un carico (RL) massimo di circa 1500 ohm con una dissipazione di 0,8 W. E' sufficiente scendere a 20 mA per riuscire ad alimentare un carico di circa 1700 ohm sufficiente per le interfacce biofisiche di 60 cm<sup>2</sup>. In quest'ultimo caso, il minimo valore di R1 è di 110 ohm e la dissipazione totale scende a circa 0,7 W. Gli esempi riportati dimostrano che è molto facile raggiungere e superare il massimo valore di dissipazione che è di 0,8 W, ma il 723 può essere protetto dal surriscaldamento per mezzo di un dispositivo che si ottiene utilizzando il transistor limitatore di corrente, sia come sensore termico sia come attuatore. Il suddetto transistor ha un "ginocchio" di conduzione che è di circa 0,65V che scende a 0,5V a 120°C. Nello schema elettrico seguente (Figura 20) si descrive come viene utilizzata la suddetta caratteristica.

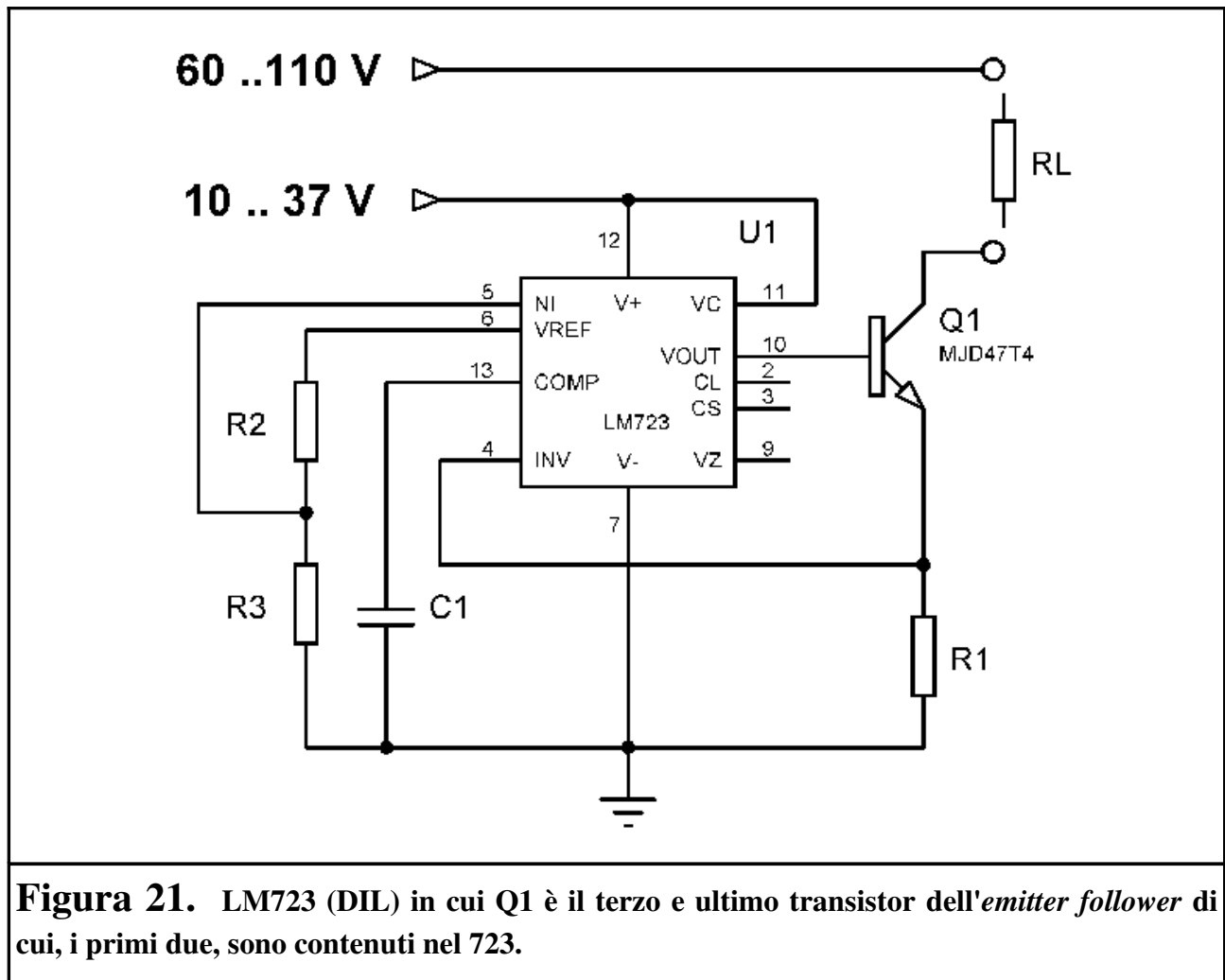


**Figura 20.** LM723 (DIL) montato come generatore di corrente costante tipo *sink* protetto dal surriscaldamento; mediante il partitore R4 – R5 si polarizza (CL = base) con una tensione di 0,5V e (CS = emittore) va a massa. A 120°C scatta la protezione.

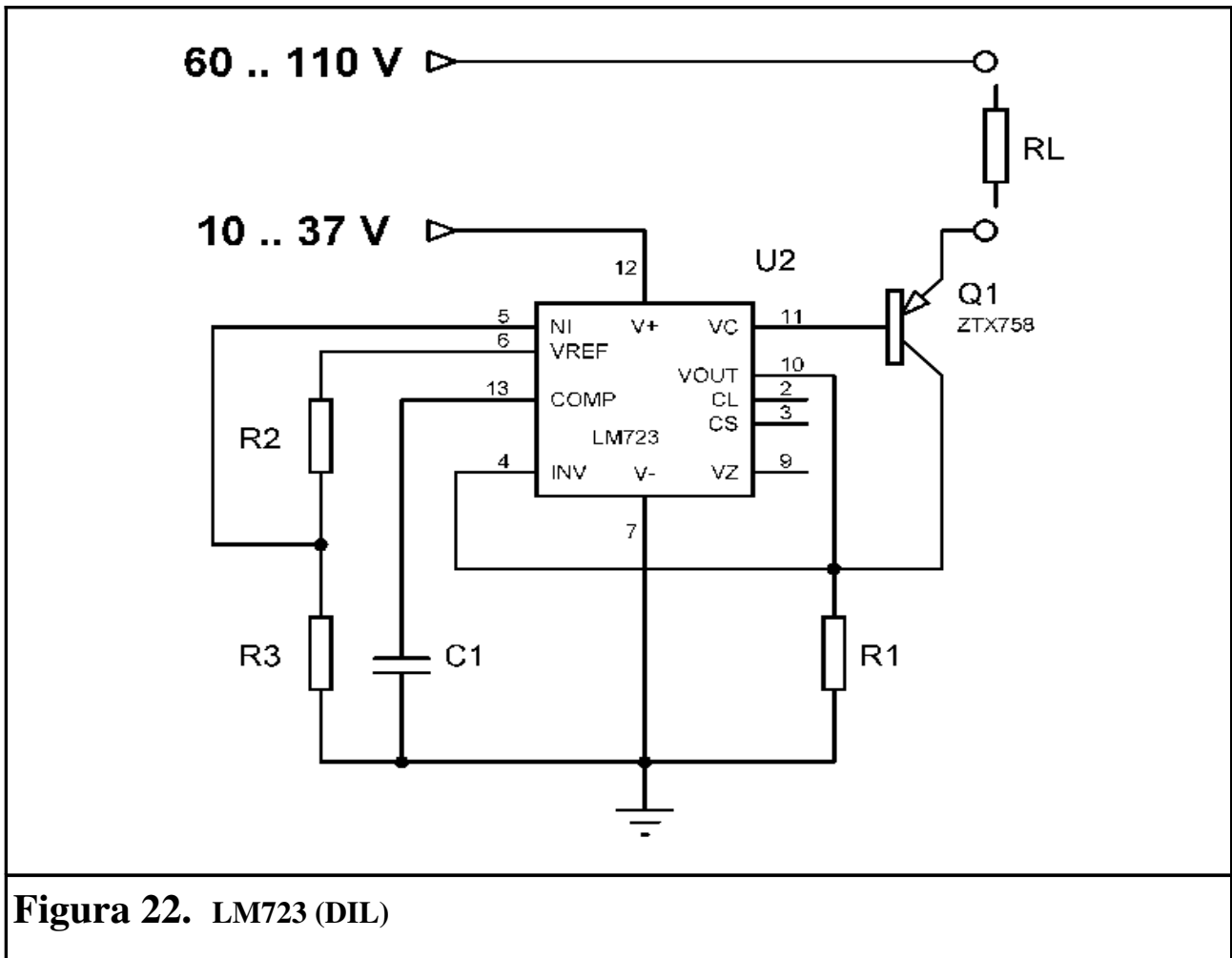
Mediante il partitore composto da R4(18K) ed R5(1,5K), si polarizza (CL = base) con una tensione di 0,5V e (CS = emittore) va a massa. A 120°C scatta la protezione perché il transistor limitatore di corrente inizia a condurre, diminuendo la corrente in uscita dell'amplificatore d'errore e quindi la dissipazione dell'*emitter follower*, al cui collettore (VC) è collegato il carico.

Quando si progetta un alimentatore a tensione costante tipo “*serie*”, l'integrato regolatore di tensione può controllare uno o più transistor esterni con lo scopo di erogare senza problemi la massima corrente prevista che normalmente scorre in un carico a basso valore ohmico di norma dotato di ridotta variabilità per cui, per ridurre al minimo la dissipazione termica, quasi sempre ci si affida ad un circuito regolatore di tensione in grado di funzionare con un esiguo “*drop out*”. Al contrario, i generatori di corrente costante per impiego biofisico sono connessi ad un

carico (RL) dotato di grande variabilità ohmica e, pur dovendo erogare piccole correnti continue, i transistor esterni si devono alimentare con una tensione molto più alta di quella necessaria ad un generatore di tensione costante. Gli esempi seguenti vanno “letti” tenendo sempre presente quanto appena detto.



**Figura 21.** LM723 (DIL) in cui Q1 è il terzo e ultimo transistor dell'*emitter follower* di cui, i primi due, sono contenuti nel 723.



**Figura 22.** LM723 (DIL)

CONTINUA

ARTICOLO INCOMPLETO IN FASE DI COMPLETAMENTO

Articolo pubblicato in forma incompleta il 13 gennaio 2010  
 Articolo ripubblicato in forma incompleta il 15 gennaio 2010  
 Articolo ripubblicato in forma incompleta il 19 gennaio 2010  
 Articolo ripubblicato in forma incompleta il 21 gennaio 2010  
 Articolo ripubblicato in forma incompleta il 25 gennaio 2010  
 Articolo ripubblicato in forma incompleta il 28 gennaio 2010