

# **Test e misure per la caratterizzazione di un regolatore lineare di tensione.**

**Tests and measures for the characterization of a linear voltage regulator.**

**Trevisol Angelo**

*Questa tesi è dedicata in primo luogo ai miei genitori che mi hanno sempre sostenuto e sempre lo faranno.*

*A tutti gli amici che mi hanno aiutato ad andare avanti, anche se alcuni sono rimasti indietro ed altri hanno cambiato strada hanno sempre continuato a starmi vicino.*

*Un ringraziamento a tutti i membri della Infineon Technologies di Padova per avermi permesso di lavorare lì, seguendomi con attenzione ed insegnandomi, per poter realizzare questa tesi.*

# Sommario

- 1 INTRODUZIONE
  - 1.1 BREVE STORIA DELL'ELETTRONICA
  - 1.2 PROBLEMATICHE
- 2 REGOLATORI DI TENSIONE
  - 2.1 FUNZIONAMENTO DEI REGOLATORI LINEARI
    - 2.1.1 Reference Voltage Regulator
    - 2.1.2 Error Amplifier
    - 2.1.3 Pass Element
    - 2.1.4 Feedback
    - 2.1.5 Componenti Extra (TSD, protezioni e controlli)
- 3 PARTE SPERIMENTALE
  - 3.1 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA
    - 3.1.1 Generatore di Tensione Toellner 8952-60
    - 3.1.2 Multimetro Keithley 2000/2001/2400
    - 3.1.3 Generatore di Forme d'Onda Tektronix AFG3102
    - 3.1.4 Oscilloscopio LeCroy 6050°
    - 3.1.5 Analizzatore di Reti Agilent E5061B ENA-Series
    - 3.1.6 Thermostream Thermonics T-2500E
  - 3.2 ESEMPIO DI UN TIPICO DATASHEET
  - 3.3 PANORAMICA DE REGOLATORE TESTATO
    - 3.3.1 Configurazione Tipica
    - 3.3.2 Load Regulation
    - 3.3.3 Line Regulation
    - 3.3.4 PSRR
    - 3.3.5 ESR
    - 3.3.6 Drop Out
    - 3.3.7 Extra
  - 3.4 TABELLE DEI DATI RACCOLTI
- 4 CONCLUSIONE
- 5 TABELLA DELLE COSTANTI FISICHE UTILIZZATE
- 6 BIBLIGRAFIA

# 1 INTRODUZIONE

## 1.1 BREVE STORIA DELL'ELETTRONICA

Sono oramai passati quasi due secoli da quando la corrente elettrica è entrata nelle case delle persone, dalla seconda rivoluzione industriale (avvenuta tra la metà e la fine del XVIII secolo) durante la quale vi fu una massiccia modernizzazione sia delle città, con l'introduzione dell'illuminazione pubblica, sia nella sfera domestica ove fecero la loro comparsa i primi elettrodomestici.

Negli ultimi cinquant'anni si è verificato però un vero e proprio *boom* dell'elettronica: si è difatti passati da elaboratori grandi come intere stanze al personal computer e successivamente all'integrazione di quest'ultimi, o più precisamente di piccoli processori, in una miriade di dispositivi che spaziano dalla versione moderna degli elettrodomestici del XVIII secolo (ovviamente modernizzati) agli *smartphone*.

Questa incredibile integrazione dell'elettronica è stata resa possibile dall'invenzione di due ricercatori dei laboratori Bell Labs: Walter Brattain e John Bardeen del gruppo di ricerca guidato da William Shockley che, nel 1947, inventarono/scoprirono *triode a stato solido* successivamente ribattezzato *transistor*. Da lì a pochi anni (1959) sempre negli stessi laboratori un'altra équipe di ricercatori tra cui Dawon Kahng e Martin Atalla realizzarono un'idea di Julius Edgar Lilienfeld costruendo il primo transistor ad effetto di campo che è stato il vero "mattoncino" per lo sviluppo dell'elettronica digitale (grazie al suo consumo irrisorio di corrente). Questi due dispositivi possono essere utilizzati sia come interruttori che come amplificatori di segnale, indispensabili sia nell'elettronica digitale che analogica.

Grazie a questi balzi tecnologici è stato possibile sostituire le ingombranti e delicatissime valvole a vuoto, procedendo con l'integrazione sempre più spinta di transistor nei chip e conseguentemente aumentando le funzionalità di tutti quei dispositivi *smart* che ci circondano.

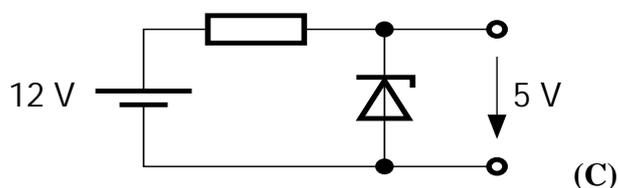
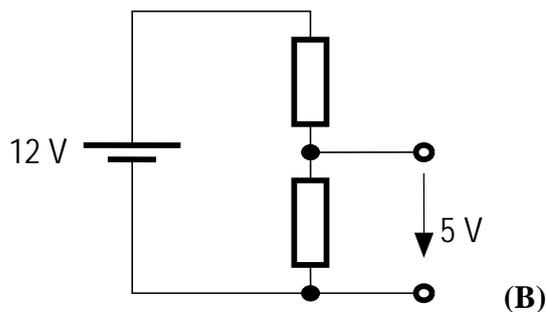
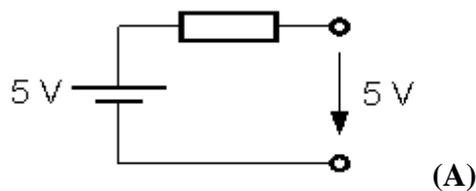
## 1.2 PROBLEMATICHE

Non è però tutto oro ciò che luccica infatti tutta questa quantità di tecnologia presenta un problema fondamentale: l'energia. Risulta infatti necessario alimentare opportunamente tutti questi dispositivi e poiché si tende a realizzare tutti questi dispositivi portatili, la fonte primaria di energia elettrica è costituita dalle batterie. Un altro problema legato all'integrazione di circuiti digitali in ogni oggetto deriva dall'aumento delle velocità di lavoro di ogni singolo micro componente che comporta un brusco incremento delle fluttuazioni di tensione e corrente fra dispositivi connessi.

Come garantire allora una tensione adeguata ad ogni dispositivo?!? L'idea più banale è quella di un generatore al valore richiesto: questa idea però non risolve affatto il problema in quanto bisognerebbe avere un generatore preciso per ogni

tensione richiesta (quindi una batteria per ogni componente del dispositivo) ed ammettere un funzionamento esclusivamente a vuoto, ovviamente impensabile. (Immagine A)

Un'altra idea da scartare è quella di metter in serie al generatore un partitore resistivo che risolve solamente la necessità di un generatore alla tensione "d'uscita" ma non la problematica del lavorare a vuoto. (Immagine B) Infine bisogna scartare anche l'idea di utilizzare un diodo zener poiché, nonostante questa soluzione circuitale risolva sia il problema del funzionamento a vuoto e sia la dipendenza dal generatore, ha il non trascurabile difetto di dissipare una percentuale preponderante dell'energia fornita dal generatore e perciò non si può adottare in dispositivi mobili (la batteria durerebbe drasticamente meno e gli apparecchi elettronici si surriscalderebbero notevolmente). (Immagine C)



## 2 REGOLATORI DI TENSIONE

Proprio per ovviare a questo problema nascono i regolatori di tensione; tali dispositivi, per usare un'espressione tautologica, regolano la tensione ossia garantiscono una tensione d'uscita stabile, entro determinati range di valori, attingendo da fonti assai meno stabili quali ad esempio le batterie delle auto o la rete elettrica.

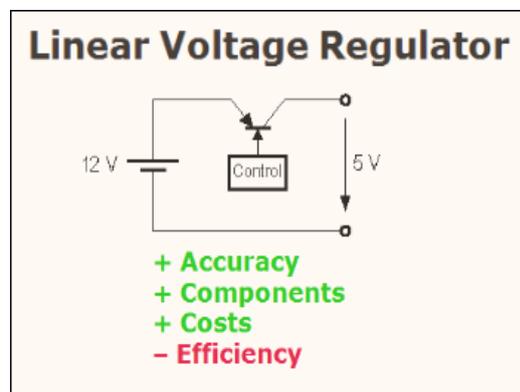
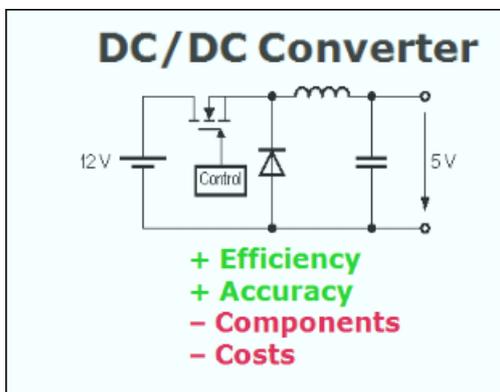
Vi sono due grandi famiglie di regolatori di tensione vale a dire quelli a *switching* e quelli *lineari* o *in serie*: i primi modulano la tensione d'uscita lasciando passare energia dall'ingresso mediante un interruttore ed immagazzinandola quest'ultima in dispositivi reattivi come induttanze e capacità (generalmente un condensatore in parallelo al carico per livellare la tensione ed un'induttanza in serie per la corrente); i regolatori in serie invece modulano la tensione d'uscita mediante il controllo della caduta di drop su uno o più transistor in serie al carico.

I convertitori lineari presentano vantaggi rispetto ai regolatori switching:

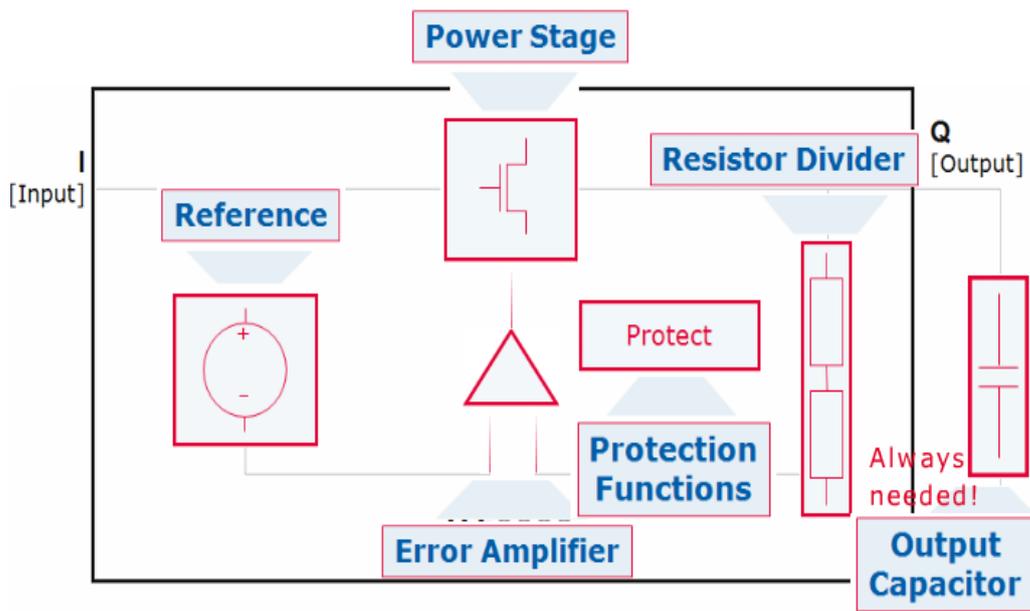
- garantiscono un'uscita non rumorosa.
- garantiscono un'accuratezza della tensione di uscita dell'ordine di qualche percento, generalmente migliore rispetto a quella garantita dagli switching.
- quelli monolitici sono circuiti integrati piccoli che non richiedono componenti esterni a parte condensatori di by-pass (inoltre sono spesso in package con 3 pin,  $V_{in}$ ,  $V_{out}$  e GND).

Generalmente, tuttavia, sono meno flessibili dei regolatori switching e presentano anche alcuni svantaggi:

- la potenza dissipata, quindi l'efficienza, dal circuito dipende dalla tensione di ingresso, in particolare da:  $I_{out} \cdot (V_{in} - V_{out})$ .
- il dropout minimo dipende da temperatura e corrente di uscita.



## 2.1 FUNZIONAMENTO DEI REGOLATORI LINEARI



I regolatori lineari sono idealmente costituiti da quattro elementi fondamentali:

1. Reference voltage regulator: elemento che ha il compito di erogare una tensione ad un prefissato valore indipendentemente dai parametri esterni.
2. Error amplifier: un amplificatore operazionale differenziale con alto guadagno.
3. Pass element: parte preposta a far passare più o meno potenza dall'ingresso all'uscita.
4. Voltage Feedback: che si occupa di dare una retroazione negativa per stabilizzare il passaggio di potenza.

### 2.1.1 Reference voltage regulator

Il Reference voltage regulator è un piccolo regolatore di tensione, progettato in modo tale da erogare sempre una tensione stabile indipendentemente dalla temperatura e dagli altri parametri esterni.

Per realizzare questo elemento molto importante bisogna partire da alcune premesse: la temperatura porta variazioni di tutte le grandezze fisiche e in particolar modo sulle caratteristiche di conducibilità del silicio. Per aggirare questo problema dobbiamo perciò individuare due soluzioni circuitali che presentino dipendenze dalla temperatura contrastanti.

Il primo è un diodo, o un BJT con base e collettore cortocircuitati.

Sappiamo che la corrente che fluisce attraverso il diodo è

$$I = I_s \cdot \left( e^{\frac{V_d}{V_T}} - 1 \right) \Rightarrow V_d = V_T \cdot \ln \left( 1 + \frac{I}{I_s} \right)$$

$I$ : corrente che fluisce dal diodo

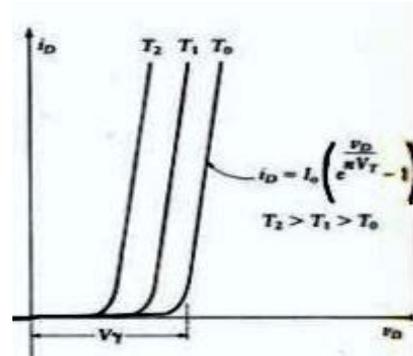
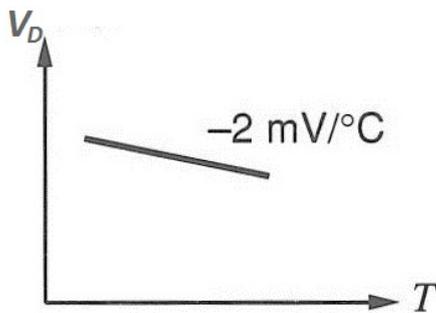
$I_s$ : corrente di saturazione del diodo

$V_d$ : Tensione di polarizzazione del diodo

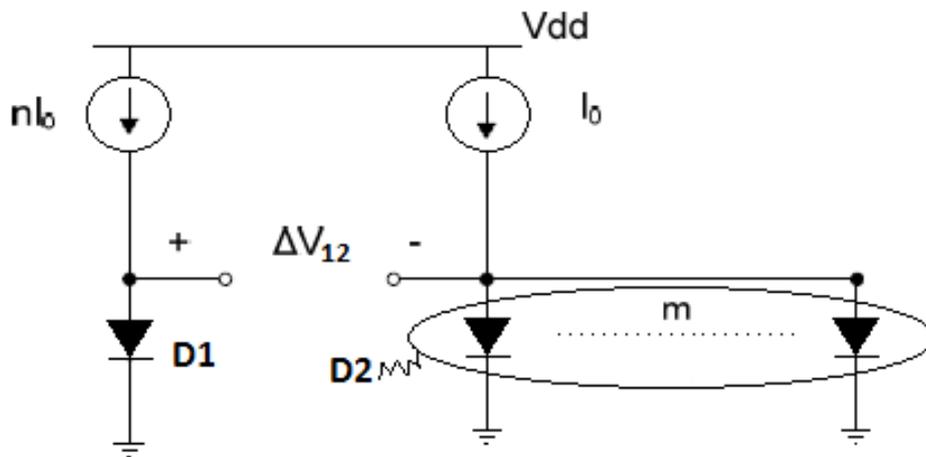
Dalla relazione di  $V_d$  in funzione delle correnti  $I_s$  e  $I$  si può ricavare il suo andamento in funzione della temperatura, eseguendo l'operazione di derivazione. Per rendere più semplice la trattazione, consideriamo costante la corrente  $I$  in funzione della temperatura.

Otteniamo quindi

$$\frac{dV}{dT} \cong \frac{V_d - \frac{E_G}{q} - 3V_T}{T} = -\frac{1,82mV}{K}$$



Serve ora selezionare un circuito con una costante di temperatura positiva.



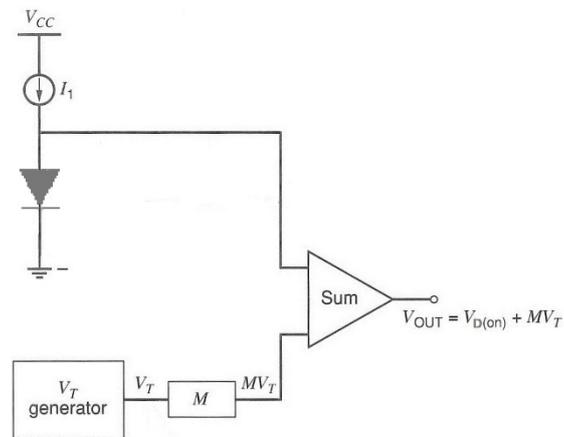
Se si pone che la corrente che passa per  $D_1$  sia  $n$  volte la corrente  $I_2$  e che al posto di un singolo diodo come  $D_2$  ve ne siano  $m$  in parallelo tutti uguali.

$$\Delta V_{12} = V_1 - V_2 = V_T \cdot \left( \ln \left( \frac{n \cdot I}{I_s} \right) - \ln \left( \frac{I}{m \cdot I_s} \right) \right) = V_T \cdot \ln(n \cdot m)$$

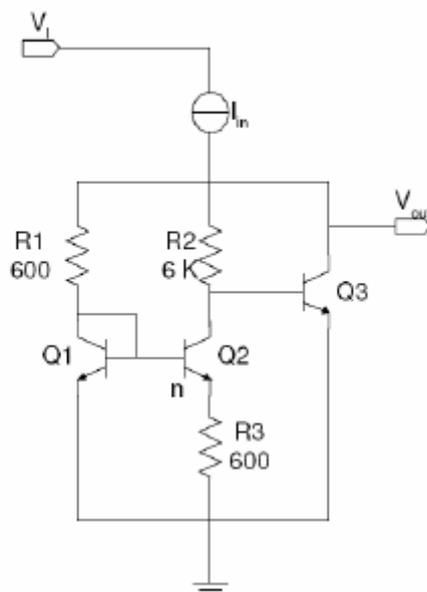
Derivando anche quest'ultima otteniamo

$$\frac{dV_{12}}{dT} = \frac{k}{q} \cdot \ln(n \cdot m) \cong 0,087 \cdot \ln(n \cdot m) \text{ mV/K}$$

Sfruttando le precedenti considerazioni è possibile creare un circuito che bilanci l'effetto della temperatura per mantenendo il più stabile possibile la tensione d'uscita, per far ciò è sufficiente sommare assieme i due contributi, i quali, avendo comportamenti opposti, opportunamente pesati dovrebbero bilanciarsi perfettamente.



Una possibile implementazione dell'unione delle soluzioni parziali trovate è rappresentata dal bandgap di Widlar



In questo schema il transistor Q1 si trova nella configurazione da diodo ed è, strutturalmente, uguale al Q3. Sulla resistenza di emettitore di Q2 è presente una differenza di potenziale pari a quella fra Q1 e Q2.

$$V_{R3} = \Delta V_{be} = V_{be1} - V_{be2}$$

Ciò comporta una corrente di emettitore

$$I_{R3} = \frac{V_{R3}}{R_3} = \beta \cdot I_{b2} = \frac{\beta + 1}{\beta} \cdot I_{c2}$$

$\beta$ : guadagno in corrente del BJT

Fatte queste considerazioni è facile verificare che ai capi di  $R_1$  cade una tensione proporzionale a  $\Delta V_{be}$

$$V_{R2} = I_c \cdot R_2 = \frac{\beta}{\beta + 1} \cdot \frac{R_2}{R_3} \cdot \Delta V_{be}$$

La tensione di uscita è perciò la somma fra la tensione  $V_{be3}$  e la tensione  $V_{R2}$

$$V_o = V_{be3} + V_{R1} = V_{be} + \vartheta \cdot \Delta V_{be}$$

Con  $\vartheta$  uguale a  $\frac{\beta}{\beta+1} \cdot \frac{R_2}{R_3}$

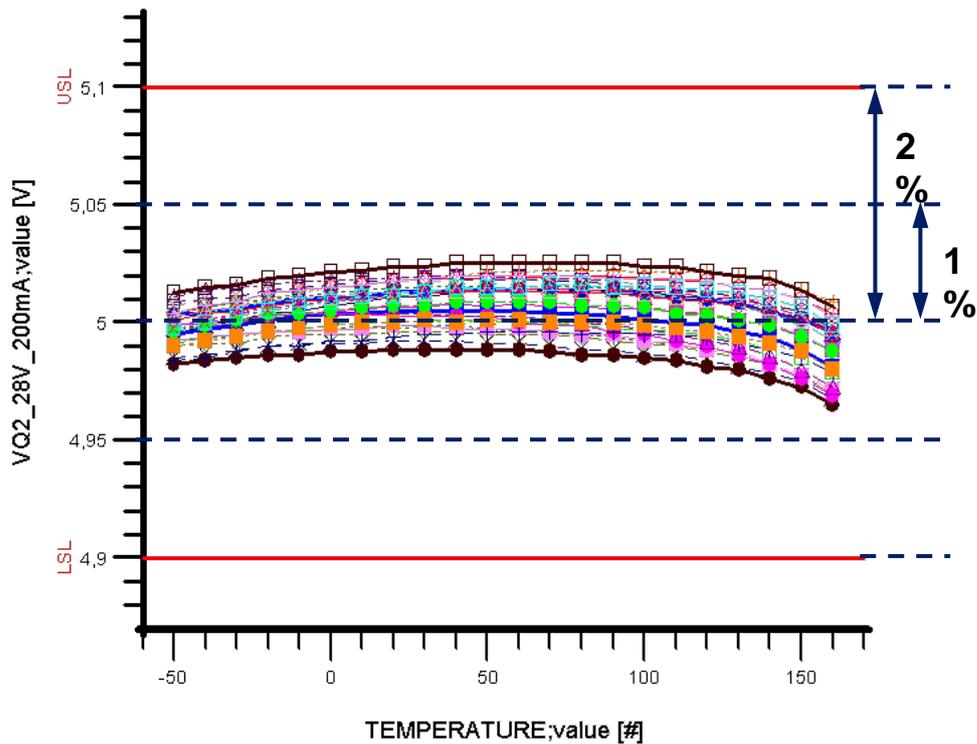
Poiché si vuole che la dipendenza dalla temperatura sia nulla, bisogna porre la derivata rispetto alla temperatura del termine a destra pari a zero, ottenendo:

$$dV_{be} + d(\vartheta \cdot \Delta V_{be}) = 0$$

$$\vartheta = \frac{dV_{be}}{d\Delta V_{be}} \simeq 22,53$$

Per semplicità si è supposto che il termine logaritmico nel calcolo della derivata di  $\Delta V_{be}$  sia pressoché unitario.

Con queste correzioni si riesce ad ottenere una tensione indipendente dalla temperatura.



### 2.1.2 Error Amplifier

L'error amplifier, come si può osservare nello schema, altro non è che un amplificatore operazionale invertente che ha il ruolo di regolare, mediante la retroazione, l'uscita alla tensione desiderata.

In base alle considerazioni espresse poc'anzi, è possibile considerare la  $V_{ref}$  sempre costante, in questo modo la tensione d'uscita sarà quindi eguale a  $V_{ref}$  moltiplicata per il guadagno ad anello aperto e divisa per quello del loop introdotto dalle resistenze del partitore.

$$V_o = \frac{V_{ref} \cdot A}{1 + \alpha \cdot A}$$

$$\alpha = \frac{R_1}{R_2 + R_1}$$

La tensione d'uscita, a meno di una qualche compensazione, segue quella di riferimento, e se si ipotizza l'amplificatore operazionale ideale con guadagno infinito, si può esprimere la tensione d'uscita con le formule tipiche di uno stadio non invertente

$$V_o = V_{ref} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

Tutte queste approssimazioni rimangono valide fintanto che il guadagno di tutto il sistema risulta essere molto elevato, ed anche tenendo conto della non idealità della

parte che regola direttamente la tensione d'uscita, viene introdotto al più un fattore d'attenuazione, che risulta trascurabile rispetto al guadagno stesso.

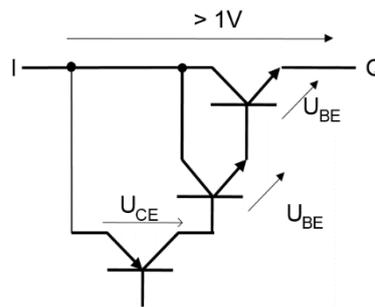
### 2.1.3 Pass element

Il pass element è la porzione del circuito che, pilotata dall'error amplifier, regola la tensione d'uscita mediante la caduta di tensione su uno o più transistor di potenza.

Esso è pilotato dall'error amplifier mediante un primo transistor che funge da "rubinetto" per la corrente che va verso massa, la quale controlla il secondo pezzo del regolatore.

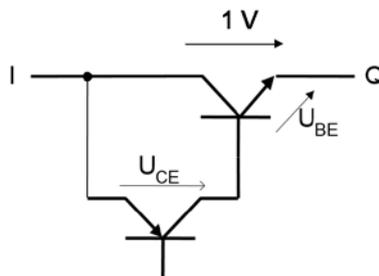
Vi sono, principalmente, tre tipologie di regolatori: *standard*, *quasi low-drop* e *low-drop*.

La soluzione standard prevede l'utilizzo di due BJT npn ed uno pnp. La tensione d'uscita è quindi pari alla tensione d'ingresso meno la caduta fra emettitore-collettore del pnp e le due base-emettitore degli npn. Purtroppo questa soluzione presenta come svantaggio l'elevato dropout.

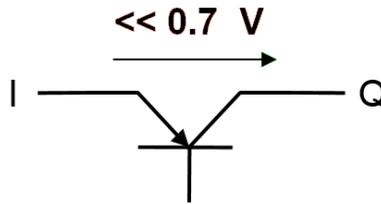


Facendo dei rapidi calcoli si nota che la corrente d'uscita è uguale a quella di emettitore sull'ultimo npn quindi la corrente di base (che è anche quella di emettitore del precedente) è  $\beta$  più piccola e perciò quella che va verso massa dev'essere  $\beta^3$  volte inferiore rispetto a quella erogata al carico.

La soluzione *quasi low-drop* prevede l'utilizzo di soli due BJT uno per tipologia, qui la caduta di tensione fra ingresso ed uscita si è ridotta di circa sei o sette decimi di volt, ma di contro la corrente che fluisce verso massa è  $\beta$  maggiore rispetto alla soluzione precedentemente esposta.



Per rispondere alla necessità di una maggior durata della regolazione, ossia di un drop-out inferiore, si può optare per una soluzione low-drop utilizzando un solo pnp. Con questo circuito la differenza minima fra ingresso ed uscita risulta di solo mezzo volt ma, come nel caso precedente, abbiamo un ulteriore aumento della corrente verso massa.



### 2.1.4 Feedback

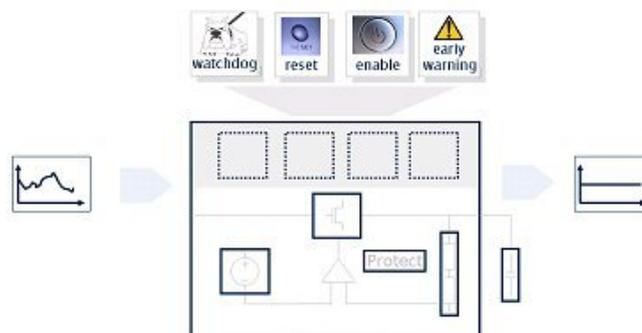
Come è stato accennato nelle righe sovrastanti il loop di controllo ha bisogno di avere una controreazione dall'uscita, questa è garantita dal partitore  $R_1 R_2$

$$V_{ref-} = V_{out} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Sempre considerando un ambiente ideale  $V_{ref-} = V_{ref+}$  quindi la tensione d'uscita è determinata, nel caso in cui il regolatore sia variabile, dalle resistenze poste fra l'uscita, l'*adjust* e la massa. Nei regolatori con un unico valore della tensione d'uscita questo partitore è stato predeterminato dal costruttore ed integrato all'interno del *package*.

### 2.1.5 Componenti extra (TSD, protezioni e controlli)

Come si può evincere dall'immagine sottostante, un regolatore reale di tensione ha molta circuiteria in più di quella descritta finora. Ciò è dovuto alla necessità d'avere altre "funzioni" aggiuntive rispetto a quelle immediatamente deducibili dal nome dell'oggetto.

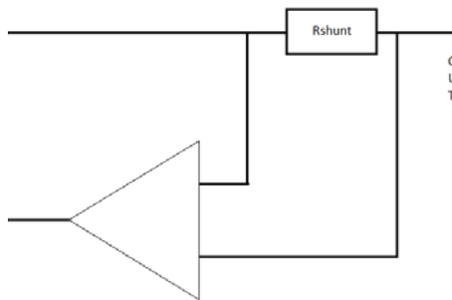


Nelle applicazioni pratiche di un regolatore è indispensabile che quest'ultimo garantisca la propria integrità anche in caso di errore da parte dell'utente e che preservi ciò che c'è a valle da eventuali sovratensioni o sovracorrenti.

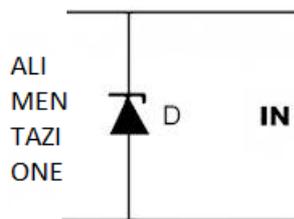
Per andare incontro a suddette esigenze, normalmente, l'error amplifier è affiancato da un circuito che limiti le sovracorrenti e da uno che arresti il dispositivo se quest'ultimo sta andando incontro a danni irreversibili causati dall'eccessiva temperatura.

Oltre a tali misure di sicurezza ve ne sono alcune che dovrebbero prevenire la più comune causa di danni: la disattenzione dell'utente. Per tentare di arginare questi danni sono presenti anche un circuito per proteggere dalla polarizzazione inversa ed uno per intervenire in caso di eccessiva sovratensione in ingresso.

Sovracorrente in uscita: il circuito di protezione per la corrente in uscita è essenzialmente costituito da una resistenza in serie al carico, a monte dello stesso. Se la corrente che scorre attraverso suddetta resistenza risulta troppo elevata, la tensione ai suoi capi fa in modo che il circuito si interrompa salvaguardando la circuiteria a valle del regolatore.

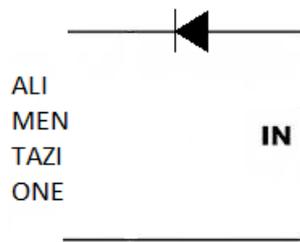


Sovratensione in ingresso: si può facilmente arginare mettendo un diodo zener con anodo a massa e catodo all'ingresso cosicché in caso di brevi superamenti del range d'operatività del regolatore, quest'ultimo non si danneggi (va tenuto in considerazione l'aggettivo "brevi" poiché questa soluzione ha il difetto di dissipare l'energia sotto forma di calore, il che potrebbe danneggiare ugualmente il dispositivo se la condizione permane nel tempo).

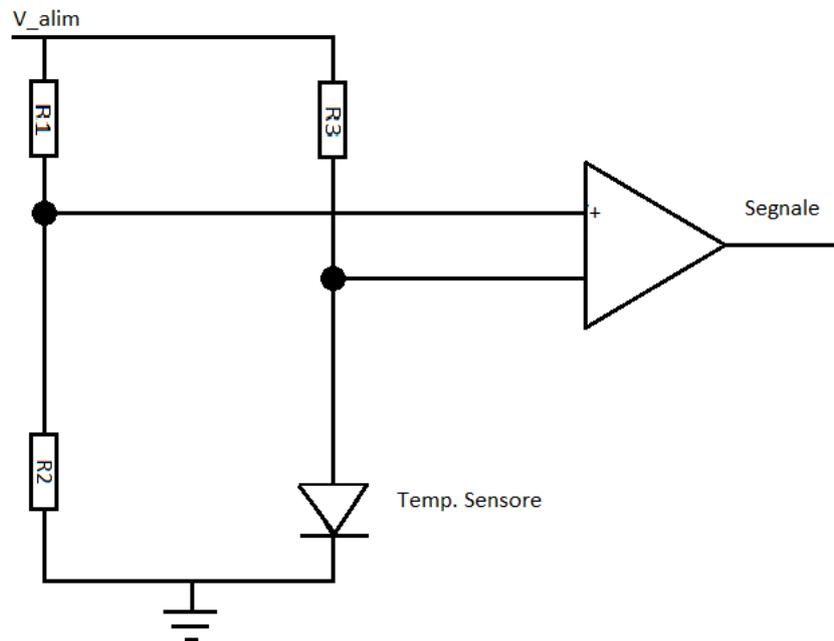


Polarizzazione inversa: per ovviare a questa possibile disattenzione da parte dell'utente si tende a mettere un diodo in modo tale che la corrente possa fluire solo nel e mai dal regolatore cioè solo se il dispositivo è correttamente polarizzato.

Non sempre questa soluzione comporta un incremento della spesa da parte dell'utente o del produttore difatti, se come pass transistor si utilizza un low-drop pnp, la giunzione *pn* è già di per se un diodo che ovvia il problema.



Temperatura: il dispositivo che regola il Thermal Shutdown (TSD) è il più complesso fra quelli qui menzionati, sfrutta nuovamente la caratteristica diminuzione di tensione ai capi di un diodo:



$$V_+ = \frac{R_2(T)}{R_1(T) + R_2(T)} V_{alim}$$

Consuete formule di un partitore di tensione. Com'è poi noto delle leggi di Ohm la resistenza di un resistore è una funzione lineare alla temperatura

$$R(T) = \frac{L}{S} \cdot \rho \cdot (1 + \alpha T)$$

L: lunghezza del resistore lungo la direzione del passaggio della corrente.

S: superficie del resistore trasversa alla direzione della corrente.

$\rho$ : resistività del materiale.

$\alpha$ : coefficiente di temperatura del materiale.

Quindi al variare della temperatura la tensione al nodo  $V_+$  rimane praticamente invariata mentre  $V_-$  cala, facendo ad un certo scattare il *trigger*.

È stato in tal modo ottenuto un circuito “termometro” che, in caso di surriscaldamento del CI, provvederà a spegnerlo nel tentativo di salvaguardarlo.

## 3 PARTE SPERIMENTALE

### 3.1 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

La strumentazione utilizzata durante la caratterizzazione del regolatore di tensione è stata:

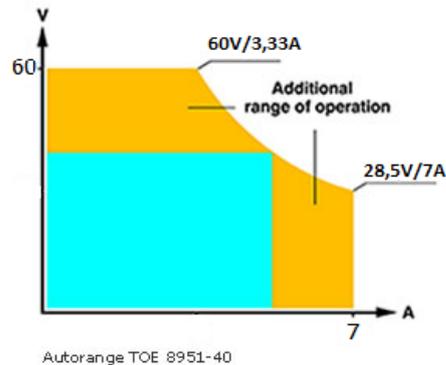
1. Generatore di tensione Toellner TOE 8952
2. Multimetro Keithley 2000/2001/2400
3. Generatore di forme d'onda Tektronix AFG3102
4. Oscilloscopio LeCroy 6050A
5. Analizzatore di reti Agilent E5061B ENA-Series
6. Termostream Thermonics T-2500E

#### 3.1.1 Generatore di tensione Toellner 8952-60



Il generatore di tensione e/o corrente adoperato per queste misure è il Toellner 8952-60, presenta un'interfaccia intuitiva e funzionale con possibilità di inserire i connettori sia sul pannello frontale che su quello posteriore. Le grandezze si regolano agevolmente con una “vite senza fine” e vi è la possibilità di scegliere su che cifra operare la variazione. Presenta due canali separati ognuno dei quali può erogare duecento watt massimi di potenza continua.

Nell'immagine si può osservare il range di tensioni e correnti effettivamente utilizzabili con tale massima potenza (la potenza attiva si calcola facendo il prodotto fra tensione e corrente, ma nella realtà quotidiana è impensabile riuscire ad avere ogni valore di tensione e corrente per i quali questo prodotto è valido: non è verosimile, infatti, avere valori infinitesimali di tensione/corrente e contemporaneamente valori pantagruelici dell'altra grandezza). Risulta in conclusione un range effettivo di sette ampere e sessanta volt, con una risoluzione di un milliamperere e dieci millivolt ed una precisione di dell'uno per cento più trenta millivolt e dello zero virgola due più sette milliamperere.



Ogni canale ha a disposizione quattro fili (due di *force* e due di *sensing*) se si opta per utilizzarne solo due il generatore regola la tensione in uscita ma senza poter compensare eventuali cadute della stessa dovute ai cablaggi non ideali; nel caso si decida invece di utilizzare tutti i connettori disponibili due di questi funzionano da voltmetro e servono a fornire maggior precisione sulla tensione erogata al carico (se il *sensing* fosse attivo vi sarebbe un led acceso nel pannello frontale vicino al relativo canale).

Codesto generatore offre inoltre la possibilità di settare un limite massimo sia di tensione che di corrente nel caso in cui si voglia salvaguardare il circuito alimentato da sovratensioni e/o sovracorrenti.

### 3.1.2 Multimetro Keithley 2000/2001/2400

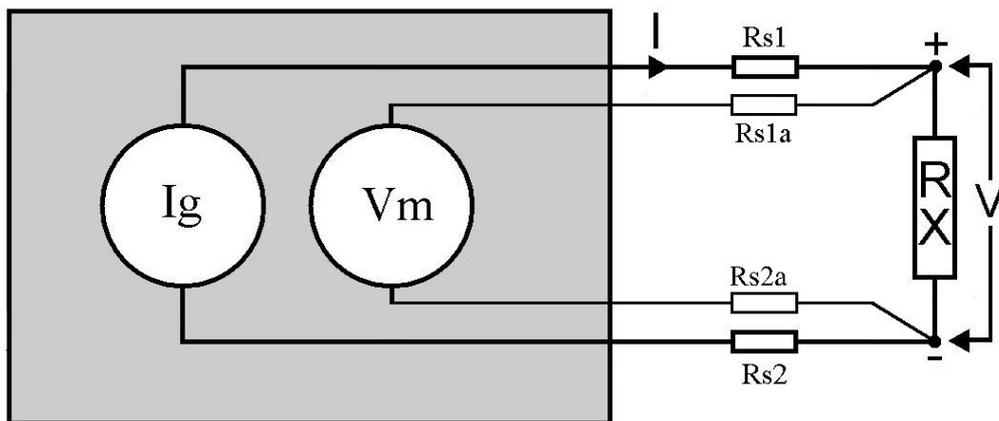


Oltre al sopracitato generatore, per la caratterizzazione del regolatore, sono stati adoperati anche diversi multimetri digitali. Questi strumenti hanno un range operativo estremamente ampio e possono misurare tensioni che variano dai microvolt fino ai duecento volt, analogamente sono in grado di misurare correnti dalle decine di picoampère a un ampere. Lo schermo permette una risoluzione a quattro digit e mezzo.

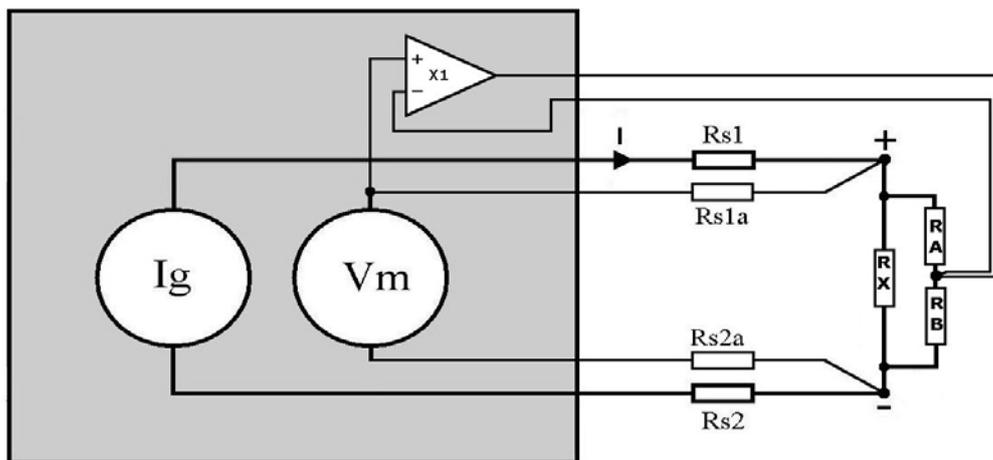
Ciascuno dei tre i modelli permette di misurare correnti e/o tensioni continue ed alternate (anche se in quest'ultimo caso solo RMS) ma anche di effettuare misure a

quattro fili di resistenze, funzionalità utilizzata successivamente nel calcolo del tunnel ESR.

La misura di una resistenza a quattro fili risulta necessaria quando il è particolarmente piccolo e quindi le resistenze parassite dei fili risultano confrontabili con quella in esame; si ricorre perciò all'iniezione di corrente nota sulla resistenza incognita e si misura la differenza di potenziale ai suoi capi mediante un voltmetro (che avendo teoricamente resistenza infinita non induce errori significativi), il valore misurato è quindi dato dal rapporto delle due grandezze elettriche.



Generalmente se la resistenza in oggetto fosse collegata al resto del circuito anche questa misura non sarebbe corretta e necessiterebbe di una soluzione a sei fili, ma poiché come si spiegherà meglio nel capitolo relativo all'ESR la resistenza può essere considerata in serie ad un aperto, questa soluzione non si è dimostrata necessaria.



Il modello 2400 offre inoltre la possibilità di funzionare contemporaneamente sia come multimetro sia come generatore, caratteristica ampiamente sfruttata nelle misure ove era necessario avere una corrente, uscente dal regolatore, fissa e contemporaneamente misurare la tensione d'uscita. Va tenuto in considerazione che

a differenza del generatore descritto in precedenza quest'apparecchio ha una potenza massima di soli venti watt.

### 3.1.3 Generatore di forme d'onda Tektronix AFG3102



Il generatore di forme d'onda della Tektronix permette di generare onde sinusoidali, quadre, impulsi, onde triangolari e rampe su ciascuno dei due canali d'uscita. Spazza frequenze che vanno dal microhertz ai cento megahertz (per le onde quadre anche centoventi megahertz). Il tempo minimo di salita e discesa è di cinque nanosecondi.

Dispone inoltre di una comoda funzione *burst*.

Si possono modificare i vari parametri sia utilizzando un tastierino numerico sia con una vite senza fine ed appositi tasti per la navigazione.

Sul display è visualizzato, graficamente, il parametro che si sta andando a settare dell'onda e la forma della stessa.

### 3.1.4 Oscilloscopio LeCroy 6050A



Oscilloscopio digitale touchscreen a quattro canali con massa comune (il che comporta la necessità prestare attenzione a non porre i vari morsetti di massa delle sonde a potenziali diversi, per evitare di danneggiare lo strumento). La risoluzione massima dello strumento è di due millivolt per ogni divisione, nonostante questo sia possibile solamente con delle apposite sonde ed in questo caso la banda dello strumento si riduce a soli trecentocinquanta megahertz. L'offset massimo è di cento volt.

Per la base dei tempi si può raggiungere una definizione massima di dieci picosecondi per ogni divisione e, con dieci divisioni a display, la finestra temporale osservabile è di cento picosecondi.

Essendo un oscilloscopio digitale permette di utilizzare diversi programmi ed un sistema operativo, offrendo l'opportunità di avere a display diversi marcatori, etichette e misure eseguite direttamente dallo strumento sgravando così l'utilizzatore da questi compiti. La presenza di un sistema operativo mette inoltre a disposizione dell'utente la possibilità di acquisire degli screenshot della schermata per poterli consultare in seguito.

Come ormai tutti gli oscilloscopi, anche quello utilizzato permette di avere un segnale di trigger interno od esterno.

### **3.1.5 Analizzatore di reti Agilent E5061B ENA-Series**



L'analizzatore di reti utilizzato in questa caratterizzazione ha un range di frequenze che spazza dai cinque hertz ai tre gigahertz, dispone di due modalità di acquisizione: porte T/R basate su ponte resistivo e S-pot basate su accoppiatori direzionali.

Permette di effettuare automaticamente la media di più acquisizioni successive.

### 3.1.6 Thermostream Thermonics T-2500E



Il thermostream è un dispositivo per forzare, ovvero imporre, una temperatura a volte assai diversa da quella ambiente ad un componente sotto test.

Esso raffredda l'aria in uno scambiatore di calore fino a portarla alla temperatura di circa cento gradi celsius sotto lo zero, convogliandola poi alla testa del dispositivo che è posta sul componente da analizzare e riscaldandola alla temperatura desiderata, mediante delle resistenze, poco prima di emetterla.

La temperatura è misurata o mediante un sensore interno alla testa del macchinario oppure sfruttando una termocoppia, che viene posta molto vicina al circuito da forzare in temperatura, in modo da ottenere una misura più corretta.

Il menù del thermostream permette di visualizzare la temperatura dello scambiatore di calore, le temperature misurate dai due termometri sopra descritti e visualizzare queste ultime due misure in un grafico in funzione del tempo.

## 3.2 ESEMPIO DI UN TIPICO DATASHEET



TLE 4275

Table 4 Characteristics

$V_I = 13.5 \text{ V}$ ;  $-40 \text{ }^\circ\text{C} < T_j < 150 \text{ }^\circ\text{C}$  (unless otherwise specified)

Parameter	Symbol	Limit Values			Unit	Measuring Condition
		Min.	Typ.	Max.		
<b>Output</b>						
Output voltage	$V_Q$	4.9	5.0	5.1	V	$5 \text{ mA} < I_Q < 400 \text{ mA}$ $6 \text{ V} < V_I < 28 \text{ V}$
Output voltage	$V_Q$	4.9	5.0	5.1	V	$5 \text{ mA} < I_Q < 200 \text{ mA}$ $6 \text{ V} < V_I < 40 \text{ V}$
Output current limitation <sup>1)</sup>	$I_Q$	450	700	–	mA	–
Current consumption; $I_q = I_I - I_Q$	$I_q$	–	150	200	$\mu\text{A}$	$I_Q = 1 \text{ mA}$ ; $T_j = 25 \text{ }^\circ\text{C}$
Current consumption; $I_q = I_I - I_Q$	$I_q$	–	150	220	$\mu\text{A}$	$I_Q = 1 \text{ mA}$ ; $T_j \leq 85 \text{ }^\circ\text{C}$
Current consumption; $I_q = I_I - I_Q$	$I_q$	–	5	10	mA	$I_Q = 250 \text{ mA}$
Current consumption; $I_q = I_I - I_Q$	$I_q$	–	12	22	mA	$I_Q = 400 \text{ mA}$
Drop voltage <sup>1)</sup>	$V_{dr}$	–	250	500	mV	$I_Q = 300 \text{ mA}$ ; $V_{dr} = V_I - V_Q$
Load regulation	$\Delta V_Q$	–	15	30	mV	$I_Q = 5 \text{ mA to } 400 \text{ mA}$
Line regulation	$\Delta V_Q$	-15	5	15	mV	$\Delta V_I = 8 \text{ V to } 32 \text{ V}$ $I_Q = 5 \text{ mA}$
Power supply ripple rejection	$PSRR$	–	60	–	dB	$f_r = 100 \text{ Hz}$ ; $V_r = 0.5 \text{ Vpp}$
Temperature output voltage drift	$dV_Q/dT$	–	0.5	–	mV/K	–

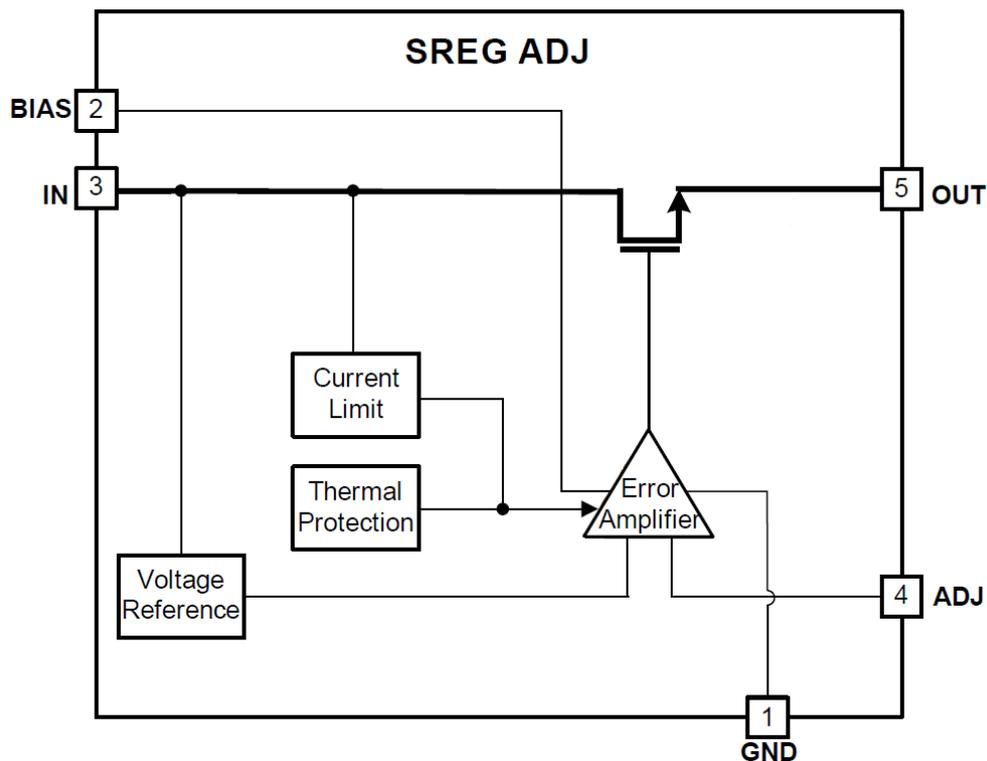
Questo è un estratto dal datasheet del TLE4275, un altro regolatore di tensione in commercio della Infineon Technologies.

Vengono riportati i valori di riferimento e confronto del componente e quelli da tenere in considerazione durante la scelta di un componente in base alle necessità del caso.

I vari parametri verranno definiti in seguito durante il capitolo sulle misure svolte.

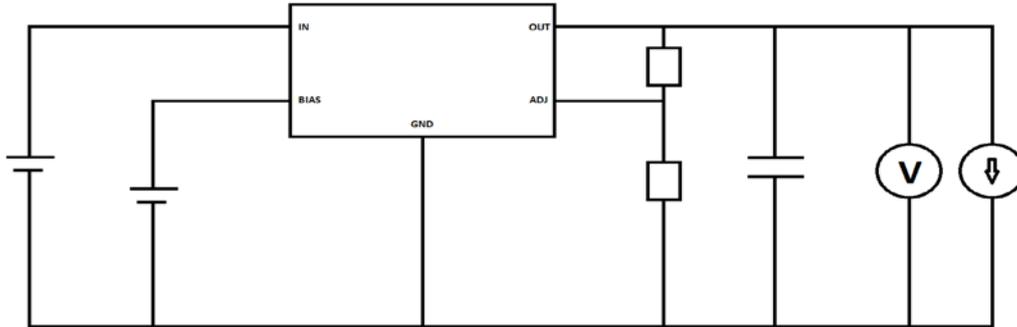
### 3.3 PANORAMICA DEL REGOLATORE TESTATO

Il regolatore di tensione testato è un dispositivo non ancora sul mercato, che in base alle simulazioni progettuali dovrebbe sopportare un ampio range di tensioni e di correnti, funzionare con una capacità d'uscita molto ridotta ed essere operativo a partire da temperature molto fredde, arrivando a quelle limite per la tecnologia a semiconduttori a silicio (circa centocinquanta gradi celsius). Si presenta in un package a cinque pin della forma di un quadrato di circa mezzo centimetro di lato.



Si possono riconoscere nello schema a blocchi tutti i componenti tipici di un regolatore di tensione, fatta eccezione per il partitore resistivo che, essendo questa una versione a tensione variabile, dev'essere deciso dall'utente in base alle esigenze applicative. Il pin del BIAS può in caso essere utilizzato anche come *enable*.

### 3.1.1 Configurazione tipica



In linea generale (nel caso di setup che divergano da questa premessa verrà opportunamente indicato) le misure vengono effettuate con il generatore di tensione posto come  $V_{IN}$  in modalità a quattro cavi ovvero con la funzione di *sense* abilitata. È stata fatta questa scelta per avere un valore effettivo di  $V_{IN}$  ai morsetti del generatore in caso contrario la caduta di tensione lungo i cavi avrebbe potuto non essere trascurabile: infatti, nonostante la resistenza del cavo sia bassa, le correnti che vi possono passare sono sufficientemente grandi da falsare le misure, e quindi richiedono questa configurazione. I cavi di *force* e *sense* sono fra loro intrecciati in modo da ridurre al minimo la possibilità di concatenare maglie che li renderebbe soggetti a disturbi di tipo magnetico.

Il generatore preposto ad alimentare il BIAS non segue la precedente linea guida poiché non alimenta l'amplificatore in corrente ma in tensione, perciò le correnti che passano attraverso questo cavo sono irrilevanti.

Il carico del setup è generalmente ottenuto utilizzando il multimetro Keithley 2400 sia per prelevare la corrente necessaria per le varie misure, sia con la funzione di voltmetro; va tenuto in considerazione che a differenza di un carico passivo, l'utilizzo di un generatore impone una corrente in uscita costante, non soggetta alle fluttuazioni tipiche di un resistore, nel caso di una variazione di tensione ai suoi capi.

In quasi tutte le misure seguenti è stato applicato un condensatore in uscita di cento nanofarad ed un partitore con le due resistenze da duemiladuecento e seicentoventi ohm in modo da ottenere una tensione d'uscita di circa cinque volt (valore tipico richiesto da molti dispositivi, ad esempio porte USB).

Per rendere la consultazione più agevole e scorrevole, le tabelle numeriche coi valori raccolti durante le fasi dei test, vengono raggruppate al termine del capitolo.

### 3.3.2 Load Regulation

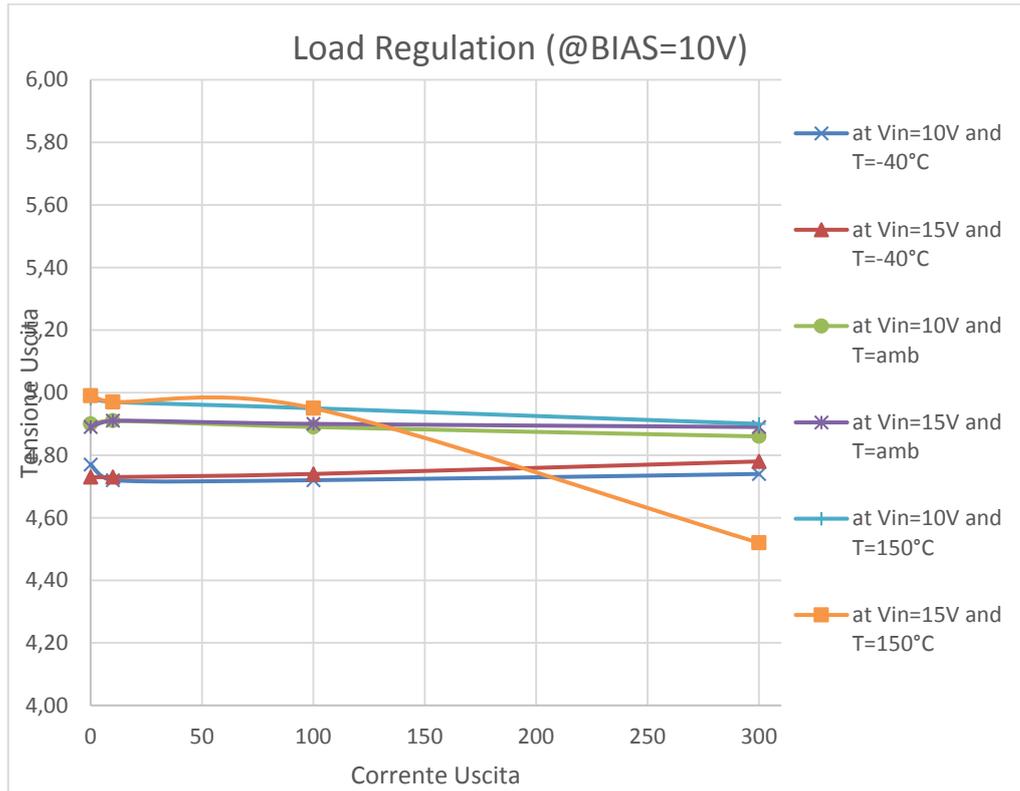
La load regulation è la capacità del regolatore di mantenere stabile la tensione d'uscita indipendentemente dal carico ad esso applicato.

Viene definita come:

$$Load\ regulation = \frac{\Delta V_{OUT}}{\Delta I_{OUT}} = \frac{V_{MAX} - V_{MIN}}{I_{MAX} - I_{MIN}}$$

Procedimento per determinare la Load Regulation

La misura non presenta particolari problematiche: è sufficiente tenere fissa la tensione in ingresso, quella del BIAS e far variare la corrente di uscita, misurando quindi la tensione sul carico.



Il grafico riporta il comportamento del dispositivo attorno all'area di operatività tipica (tensione d'ingresso di circa dodici volt) e in tutta l'escursione di temperature nelle quali deve funzionare. Nella zona garantita il regolatore si comporta bene: solamente a centocinquanta gradi inizia a far variare la tensione in maniera dipendente dalla corrente.

$$Load\ Regulation \leq 1,567\ V/A$$

### 3.3.3 Line Regulation

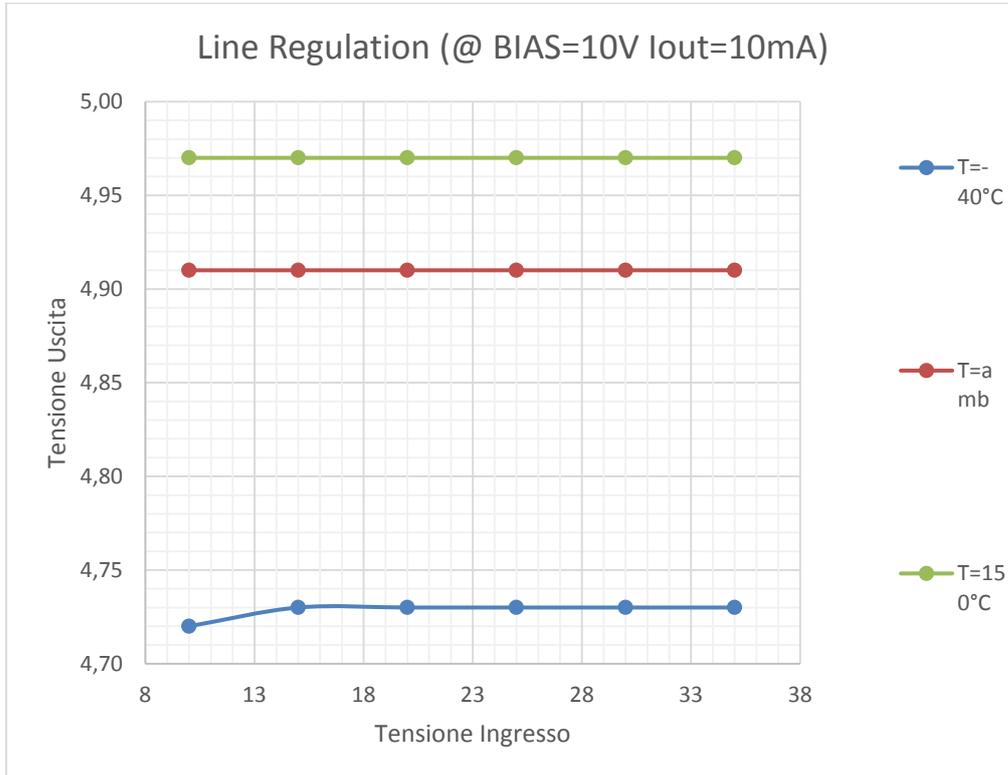
La Line Regulation è la capacità del regolatore di tenere stabile la tensione in uscita indipendentemente dalle variazioni di quella di alimentazione.

Similmente alla Load Regulation è definita come:

$$Line\ Regulation = \frac{\Delta V_{OUT}}{\Delta V_{IN}} = \frac{V_{OMAX} - V_{OMIN}}{V_{IMAX} - V_{IMIN}}$$

Procedimento per determinare la Line Regulation

Come visto in precedenza per la Load Regulation è sufficiente variare la grandezza indipendente, cioè la  $V_{IN}$ , osservando i cambiamenti di quella dipendente che come prima è la  $V_{OUT}$



Il grafico mette in evidenza la capacità del dispositivo di stabilizzare la tensione sul carico indipendentemente da quella di ingresso, e contemporaneamente permette di notare la non idealità dello stesso rispetto alla temperatura.

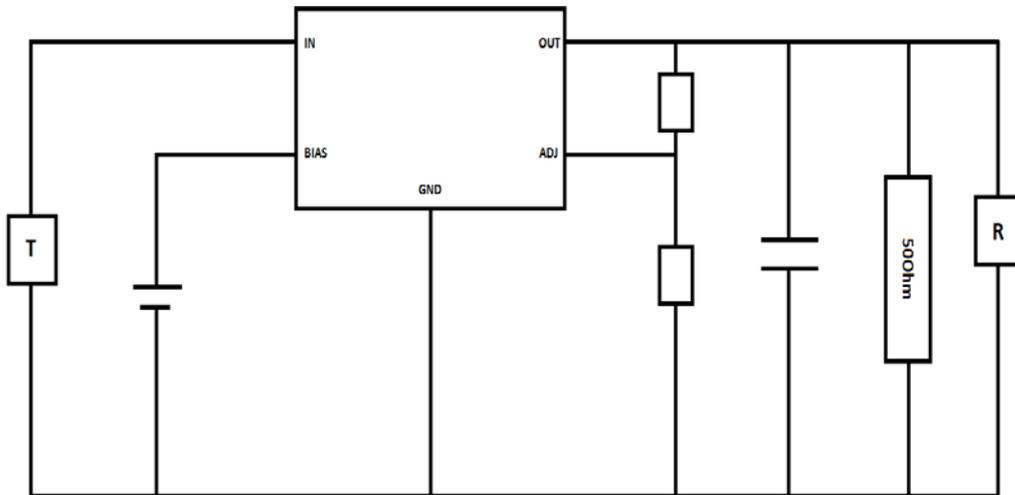
Se si effettua il calcolo della Line Regulation con i valori numerici della tabella prima tabella del paragrafo 3.4 otteniamo un valore molto basso, indice di buone prestazioni.

$$Line\ Regulation \leq 0,0004$$

### 3.3.4 PSRR

La PSRR (Power Supply Rejection Ratio) è la capacità del regolatore di “ignorare” i segnali ad alta frequenza sovrapposti a quelli continui nell'alimentazione.

A differenza della Line Regulation, nella quale la variazione della tensione d'ingresso era molto lenta e quindi nel momento della misura della tensione d'uscita si considerava come se avesse avuto un tempo infinito di transizione, in questa misura le variazioni sono molto più rapide e perciò si osservano delle fluttuazioni anche nella tensione d'uscita.



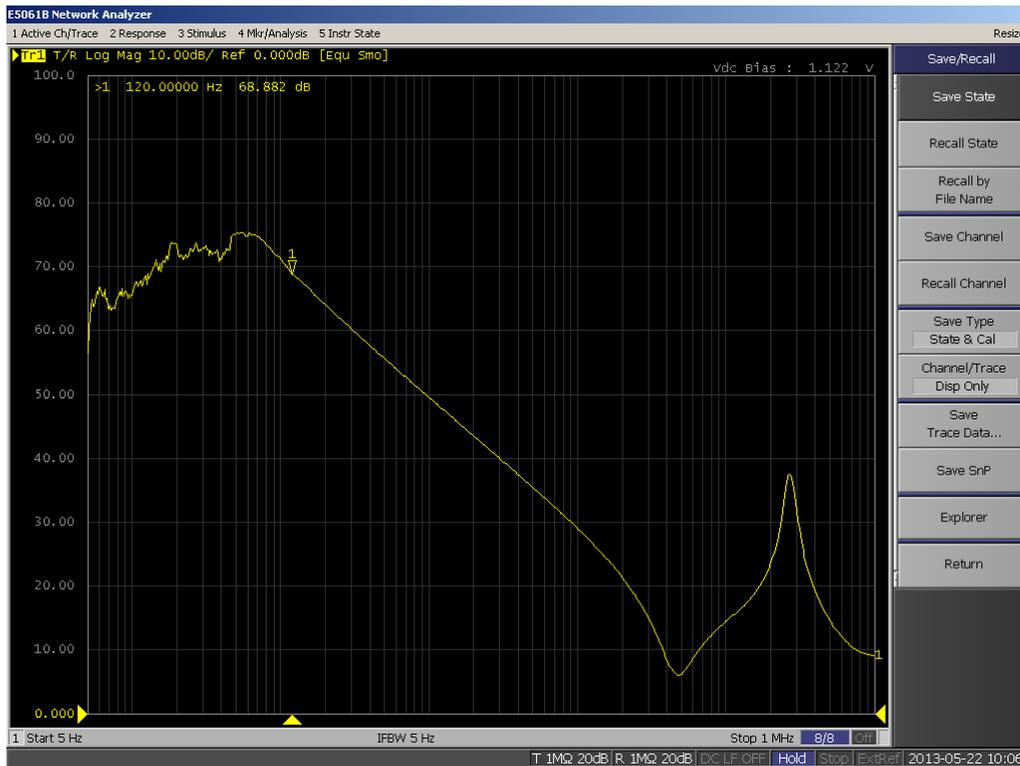
Il valore di PSRR è definito come:

$$PSRR = \frac{\Delta V_{in}}{\Delta V_{out}}$$

Procedimento per determinare il PSRR

Questa misura si discosta dal setup “standard” definito all’inizio del capitolo: il multimetro viene utilizzato solamente come voltmetro, quindi il carico non è più attivo ma passivo (una pura resistenza da cinquanta ohm).

A differenza delle misure precedenti questa è molto più automatizzata e si serve di un analizzatore di reti che, una volta impostata la banda di frequenze sulla quale effettuare la misura e gli step da effettuare, stimola il circuito ed elabora il segnale di uscita. Il risultato è il grafico sottostante.



Il valore della PSRR si legge direttamente sullo schermo dello strumento: nel punto interessante per le misure, centoventi hertz, vale 68,882dB.

Si può notare che esso ha un massimo locale verso i settanta hertz mentre è praticamente zero attorno ai cinquantamila hertz, questo perché per valori inferiori ai settanta hertz il loop ha il tempo di compensare le variazioni d'ingresso mentre oltre tale frequenza le variazioni iniziano ad essere talmente veloci che non si riescono più a distinguere. È interessante notare come oltre i cinquantamila hertz il grafico torni a crescere per poi tonare a livelli minimi: questo comportamento è dovuto, principalmente, a fenomeni di non idealità e parassiti propri dei componenti utilizzati per realizzare la board di prova.

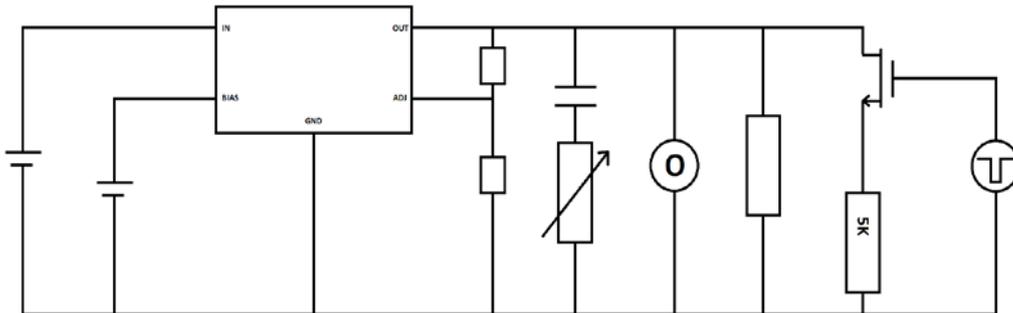
### 3.3.5 ESR

L'ESR (Equivalent Series Resistance) è un parametro che serve ad aumentare, ed in alcuni casi ad introdurre, un comportamento stabile in un regolatore di tensione. Alcuni tipi di regolatori, per loro natura, presentano un comportamento instabile: ossia al presentarsi di una perturbazione sull'uscita reagiscono con un tentativo di compensazione che in realtà ha l'effetto di squilibrare maggiormente il sistema portandolo a divergere sempre più dallo stato di quiete e ad oscillare indefinitamente.

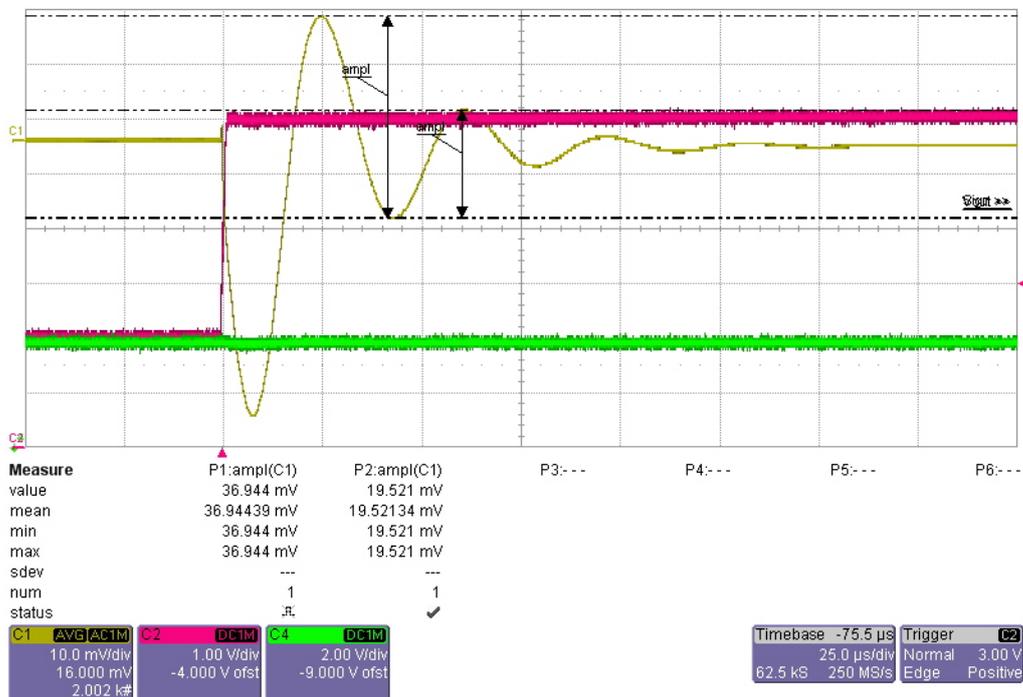
Poiché il risultato di questa misura è un gap di valori ammessi/non ammessi per i quali il circuito risulta stabile si parla di ESR-tunnel facendo riferimento ad una regione di un grafico per la quale, i valori in essa contenuti, determinano un comportamento stabile del regolatore.

## Procedimento per determinare l'ESR-tunnel

Per determinare l'ESR-tunnel bisogna, come nella misura precedente, scostarsi dalla linea guida inizialmente posta ed utilizzare anche in questo caso un carico passivo; un'altra modifica necessaria è l'aggiunta al condensatore d'uscita di un *trimmer* da dieci ohm posto in serie ad esso. Una volta fissati i parametri d'ingresso si procederà a turbare l'uscita con una variazione della corrente, utilizzando un generatore di forme d'onda che controlla un interruttore a mosfet (non è purtroppo possibile utilizzare solamente il generatore di forme d'onda poiché quest'ultimo non è in grado di erogare/assorbire grandi potenze e si rischierebbe di danneggiare lo strumento).



Una volta settati gli ingressi e l'uscita in una condizione di stabilità si aziona il generatore che, introducendo una perturbazione, causa un'oscillazione della tensione d'uscita osservabile chiaramente con oscilloscopio.

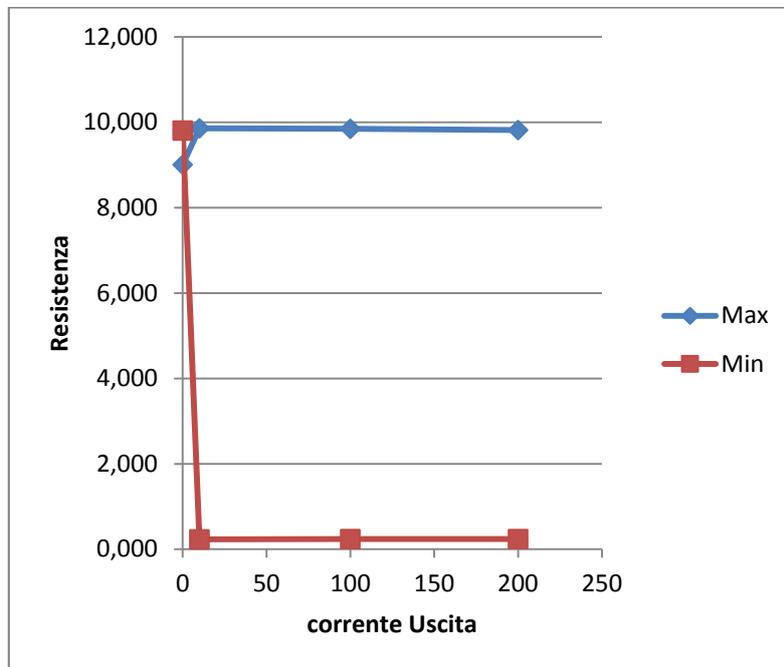


Per stabilire se un dato valore del trimmer induce o meno ad un comportamento stabile, come si può osservare nell'immagine, si considerano i primi due picchi; se il rapporto fra la parte decrescente del primo e quella crescente del secondo, ammesso che sia almeno di cinque millivolt, è approssimativamente due l'oscillazione è ritenuta stabile. Se la seconda oscillazione risulta inferiore ai cinque

millivolt picco-picco e la quarta minore di due millivolt è ancora stabile altrimenti viene considerata instabile.

Aspetto fondamentale di questa misura, come si può evincere dalla procedura per determinare la zona di stabilità, è la forte soggettività, elemento che inevitabilmente caratterizza l'interpretazione delle oscillazioni osservabili all'uscita del dispositivo. Non vi è difatti un range di valori prefissati per i quali deve risultare un rapporto di circa due; è d'altronde assai difficoltoso da parte del produttore indicare esattamente il valore della resistenza serie presente, in maniera parassita, su ciascun condensatore venduto.

Come accennato nel paragrafo 3.1.2 la misura del valore del trimmer deve essere effettuata a quattro fili per evitare d'introdurre errori significativi, è altresì vero che una misura a 6 fili in questo specifico caso sarebbe superflua poiché il condensatore si può considerare un aperto nel momento della misura (il valore viene misurato in continua).



### 3.3.6 DROP OUT

Il dropout è la minima differenza fra la tensione d'ingresso e quella d'uscita.

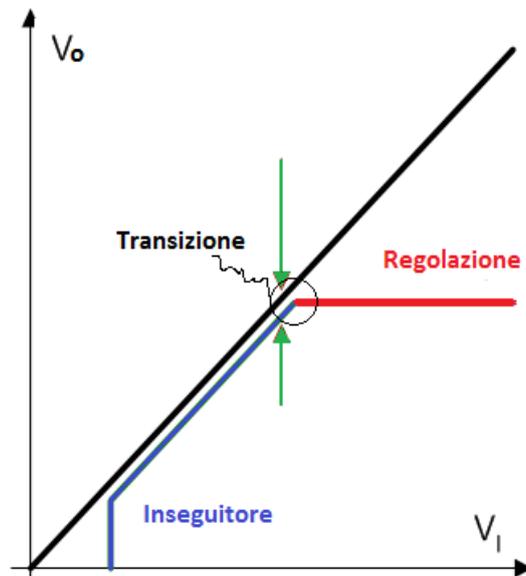
Questo particolare tipo di dispositivi presenta il “difetto” di regolare la tensione mediante dissipazione di quella in eccesso; vi è quindi, praticamente, una quantità minima della stessa che viene persa nell'attraversamento del componente. Minore è il valore della tensione di dropout e maggiore saranno l'efficienza del regolatore, la durata delle batterie e, ovviamente, quella dei dispositivi connessi a monte dello stesso.

Procedura per determinare il valore di dropout

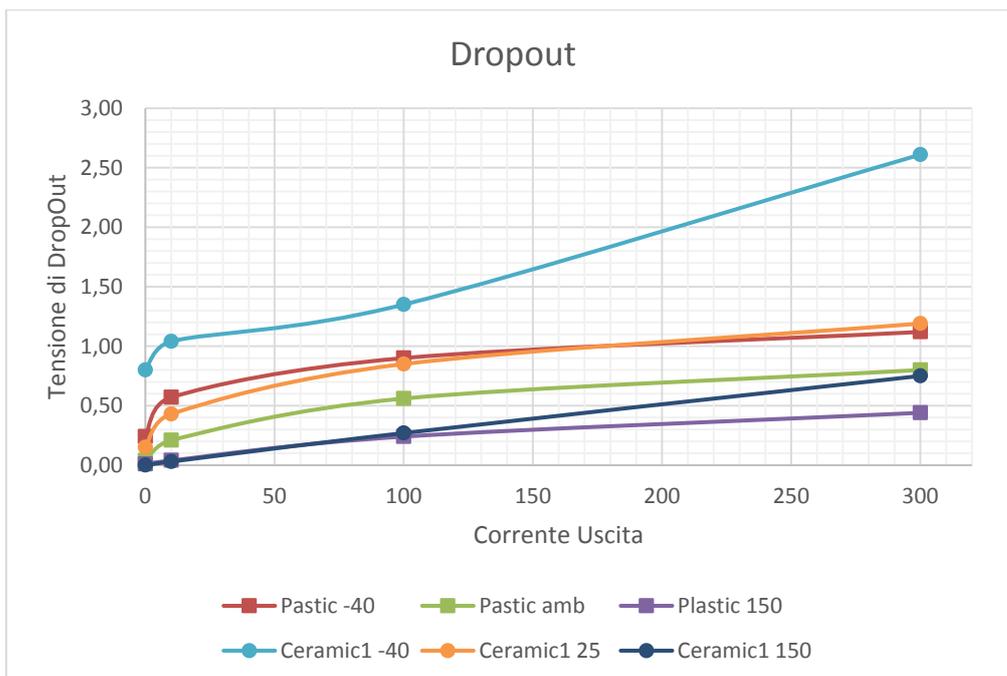
Per determinare il valore del dropout bisogna polarizzare il regolatore nella zona di inseguitore di tensione, cioè quella fase nella quale è attivo ma non può regolare la tensione al valore finale in quanto la tensione d'ingresso è minore o uguale della somma fra la tensione finale e quella di drop:

$$V_{in} \leq V_{out} + V_{drop}$$

La configurazione circuitale è quella definita all'inizio del capitolo. Dopo che il regolatore è entrato in funzione ed è stato stabilizzato sulla tensione d'uscita prefissata, si diminuisce gradualmente la tensione di ingresso fintanto che quella d'uscita non cala di cento millivolt (così facendo si oltrepassa il valore di ginocchio della transizione fra regolatore ed inseguitore).

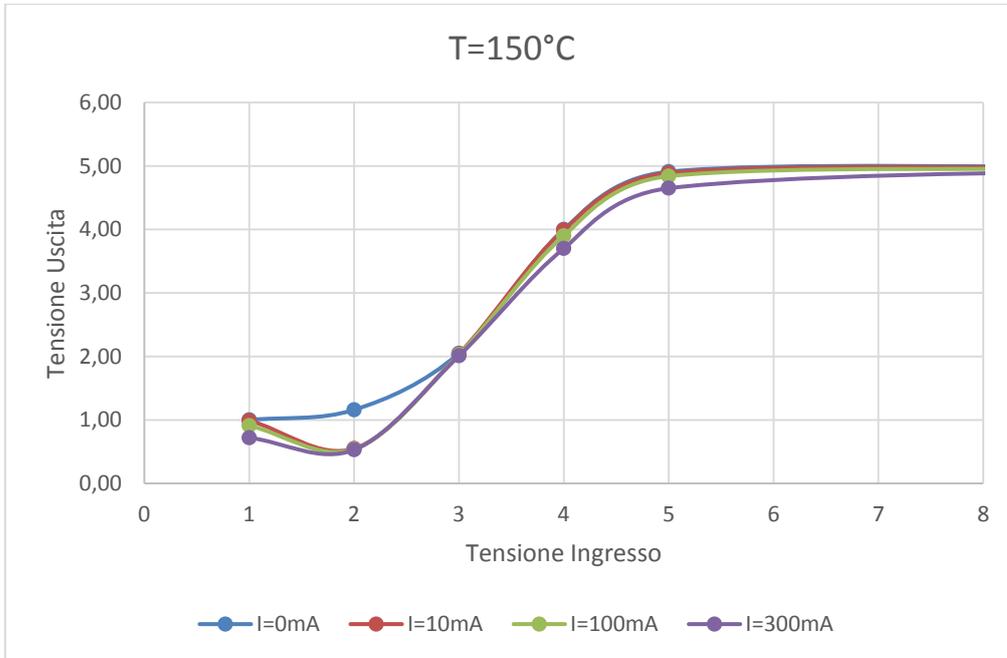


La differenza fra la tensione di ingresso e quella d'uscita è il parametro cercato.

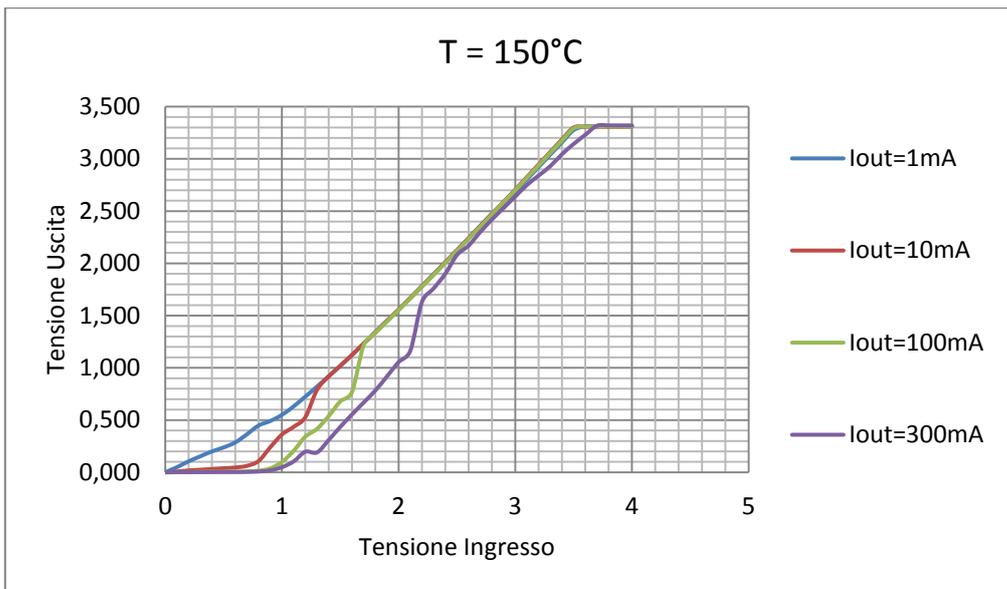


Si può notare che la tensione di dropout non è stabile ne' al variare della temperatura ne' al variare della corrente d'uscita.

Valori così diversi l'uno dall'altro e soprattutto così elevati della tensione di dropout, pur con gli stessi parametri di contorno, fanno presupporre che il regolatore non si comporti come dovrebbe nella zona di inseguire; per averne un'ulteriore conferma si può vedere come varia la tensione d'uscita al variare di quella di ingresso nella zona di inseguire.



Viene riportata in seguito la medesima misura di caratterizzazione ma eseguita su un componente diverso (TLE4275) per avere un riferimento a dei valori di ingresso-uscita più tipici.



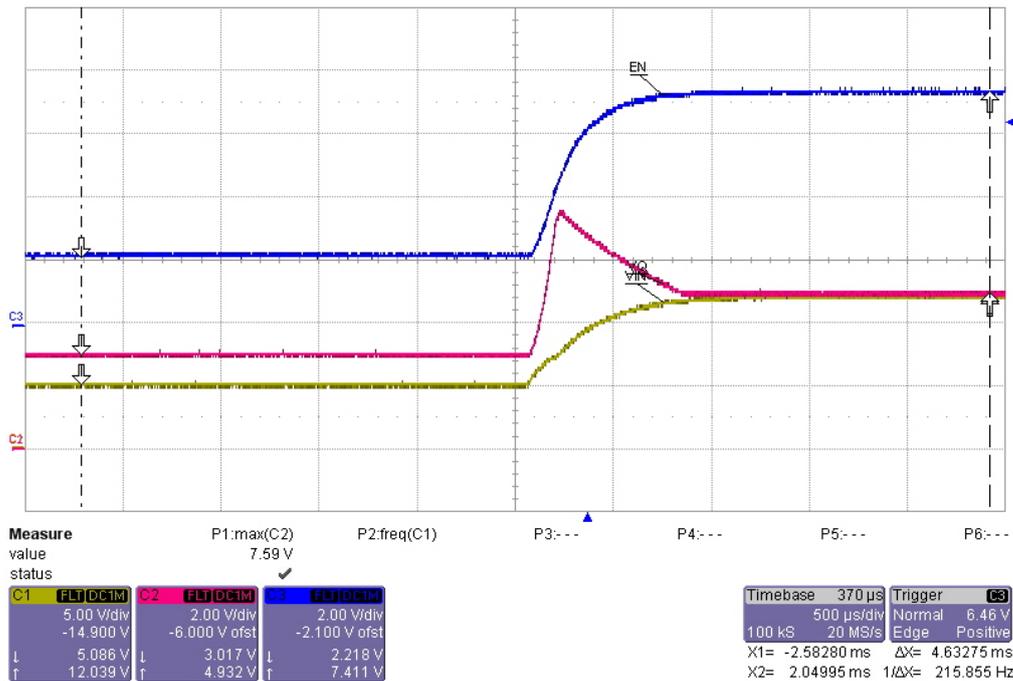
Si può riconoscere in maniera più intuitiva la zona nella quale la tensione d'uscita insegue quella di ingresso a meno di un valore costante, quale la tensione di dropout.

### 3.3.7 EXTRA

La zona operativa di inseguitore è una zona relativamente delicata e potenzialmente instabile: può essere vista come una diga, la quale, in presenza di poca acqua, presenta le paratie delle chiuse completamente aperte; in tale condizione, un improvviso aumento del flusso d'acqua potrebbe causare un'inondazione a valle a causa del ritardo nel chiudere le chiuse stesse.

Analogamente una transizione dalla zona di inseguitore a quella di regolatore provoca, generalmente, un picco di tensione che può in alcuni casi essere "fatale" per i dispositivi a valle.

Per verificare se il regolatore può avere un comportamento pericoloso nell'eventualità di repentini passaggi da un modo di funzionamento all'altro, lo si polarizza in modo di inseguitore e poi lo si sollecita con rapidi cambi della tensione di ingresso e/o di BIAS e si osserva la sovra elongazione della tensione d'uscita utilizzando l'oscilloscopio invece del multimetro.



Ripetendo la misura variando i valori di tensione, la durata delle rampe di salita e le temperature è possibile estrapolare una tabella, come la seguente, che metta in evidenza le situazioni in cui il dispositivo ha un comportamento sicuro.

## Results on sample1



VIN step from 5.5 to 12V  
INH step from 3 to 10V

	5ms	10ms	50ms	100ms	200ms	300ms	400ms	500ms	700ms	1ms	2ms	3ms	4ms	5ms
1us	qq105 6.5V	qq102 6.8V	qq104 7V	qq106 7.5V	qq108 8V	qq111 8.5V	qq115 9.3V	qq120 9.5V	qq123 9.8V	qq125 9.8V	Ok	Ok	Ok	Ok
100us	qq101 5.8V	qq103 5.8V	qq105 6.1V	qq107 6.8V	qq109 6V	qq112 5.8V	qq116 5.8V	qq121 5.8V	qq124 5.8V	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
500us	Ok	Ok	Ok	Ok	qq110 5.5V	qq113 5.7V	qq117 5.8V	qq122 5.5V	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
920us	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	qq114 5.5V	qq118 5.8V	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
700us	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	qq119 7.5V	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
820us	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok									
900us	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok									
1ms	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok									
1.1ms	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok									
1.2ms	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok									
1.3ms	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok									
1.4ms	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok									
1.5ms	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok									

See data

Confidential

Copyright © Infineon Technologies 2011. All rights reserved.

Page 15

## 3.4 TABELLE DEI DATI RACCOLTI

Come indicato precedentemente si riportano ora le tabelle coi dati numerici raccolti.

La seguente tabella è stata compilata usando la configurazione standard del circuito di test: i dati in essa raccolti sono utilizzati per determinare la Line Regulation, la Load Regulation e l'andamento della tensione d'uscita in zona di inseguire.

Temp	Vin	Sample	Vout (V)			
			lout	4,90 nominal		
			0	10	100	300
-40	1	1	nn	nn	nn	nn
	2	1	nn	nn	nn	nn
	3	1	1,82	1,81	1,81	1,83
	4	1	3,89	3,63	3,34	3,15
	5	1	4,65	4,51	4,24	4,06
	10	1	4,77	4,72	4,72	4,74
	15	1	4,73	4,73	4,74	4,78
	20	1	4,73	4,73	4,75	4,81
	25	1	4,73	4,73	4,76	4,84
	30	1	4,73	4,73	4,78	4,86
	35	1	4,73	4,73	4,79	4,89
	50	1				
60	1					

150	1	1
	2	1
	3	1
	4	1
	5	1
	10	1
	15	1
	20	1
	25	1
	30	1
	35	1
	50	1
60	1	

1,00	0,99	0,91	0,72
1,16	0,55	0,54	0,53
2,05	2,04	2,03	2,01
4,00	3,99	3,90	3,70
4,91	4,89	4,84	4,65
4,98	4,97	4,95	4,90
4,99	4,97	4,95	4,52
4,98	4,97	4,94	3,90
4,98	4,97	4,93	3,22
4,98	4,97	4,89	2,67
4,98	4,97	4,73	2,43

amb	1	1
		2
	2	1
		2
	3	1
		2
	4	1
		2
	5	1
		2
	10	1
		2
	15	1
		2
	20	1
		2
	25	1
		2
	30	1
		2
	35(only 1st time 40)	1
		2
	50	1
		2
60	1	
	2	

0,51	nn	nn	nn
	nn	nn	
0,64	nn	nn	nn
	0,02	0,09	
2,47	2,44	2,42	2,41
	2,39	2,40	
4,00	3,97	3,72	3,51
	3,91	3,63	
4,81	4,78	4,65	4,45
	4,33	4,30	
4,90	4,91	4,89	4,86
	4,43	4,42	
4,89	4,91	4,90	4,89
	4,43	4,43	
4,89	4,91	4,91	4,91
	4,44	4,45	
4,89	4,91	4,93	4,92
	4,44	4,46	
4,89	4,91	4,94	4,91
	4,44	4,47	
4,89	4,91	4,95	4,90
	4,45	4,47	
	4,45	4,47	

■: misura che ha determinato la rottura del componente o misura non eseguita a causa della rottura stessa.

■: misure pericolose per l'integrità del componente.

Il componente #2 si è rotto prima di poter raccogliere tutti i dati, per tale ragione i range dei test sono stati ridotti, non superando i trentacinque volt di tensione d'ingresso.

La tabella successiva è relativa al calcolo della tensione di Dropout, anche in questo caso sono dapprima stati adoperati più componenti ma a causa del danno è stato deciso di limitare i range delle misure. In questa tabella è possibile confrontare il comportamento di componenti con package ceramico e con package plastico.

		BIAS (Vout + X)	2						
			Iout (mA)	0	10	100	300	500	1000
Sample 1	Vout(V)	-40	4,60	4,56	4,42	4,35			
		amb	4,73	4,72	4,70	4,64			
		150	4,84	4,81	4,46	3,87			
	Vin (V)	-40	4,90	5,17	5,34	6,50			
		amb	4,75	4,89	5,22	5,47			
		150	4,84	4,83	4,63	4,28			
	Vdr(mV)	-40	0,30	0,61	0,92	2,15			
		amb	0,02	0,17	0,52	0,83			
		150	0,00	0,02	0,17	0,41			
Ceramic Sample 1	Vout(V)	-40	4,61	4,38	4,17	4,10			
		25	5,17	4,72	4,89	4,65			
		150	4,78	4,61	3,88	2,60			
	Vin (V)	-40	5,33	5,35	5,49	7,70			
		25	5,33	5,18	5,71	6,90			
		150	4,78	4,63	4,13	nn1			
	Vdr(mV)	-40	0,72	0,97	1,32	3,60			
		25	0,16	0,46	0,82	2,25			
		150	0,00	0,02	0,25	nn			
Ceramic Sample 2	Vout(V)	-40	4,69	4,49	4,27	4,27	4,34	4,45	
		25	5,15	4,99	4,78	4,72	4,69	1,15	
		150	4,63	4,50	3,42	1,73	0,96	3,98	
	Vin (V)	-40	5,36	5,39	5,58	8,39	8,94	8,85	
		25	5,29	5,39	5,59	7,47	8,00	2,44	
		150	4,63	4,52	3,63	nn2	crazy	9,89	
	Vdr(mV)	-40	0,67	0,90	1,31	4,12	4,60	4,40	
		25	0,14	0,40	0,81	2,75	3,31	1,29	
		150	0,00	0,02	0,21	nn	nn	5,91	
Ceramic Sample 3	Vout(V)	-40	4,65	4,41	4,18	4,12			
		25	5,00	4,96	4,71	4,61			
		150	4,65	4,60	4,11	3,21			
	Vin (V)	-40	5,32	5,34	5,47	7,62			
		25	5,36	5,40	5,56	6,75			
		150	4,66	4,62	4,37	<7,00 crazy			
	Vdr(mV)	-40	0,67	0,93	1,29	3,50			
		25	0,36	0,44	0,85	2,14			
		150	0,01	0,02	0,26	nn			

		BIAS (Vout + X)		3					
		Iout (mA)		0	10	100	300	500	1000
		Temp (°C)							
Sample 1	Vout(V)	-40	4,64	4,63	4,63	4,64			
		amb	4,76	4,75	4,74	4,70			
		150	4,87	4,86	4,82	4,73			
	Vin (V)	-40	4,88	5,20	5,53	5,76			
		amb	4,80	4,96	5,30	5,50			
		150	4,88	4,90	5,06	5,17			
	Vdr(mV)	-40	0,24	0,57	0,90	1,12			
		amb	0,04	0,21	0,56	0,80			
		150	0,01	0,04	0,24	0,44			
Ceramic Sample 1	Vout(V)	-40	5,27	5,22	5,06	4,99			
		25	5,39	5,37	5,36	5,36			
		150	5,44	5,42	4,93	3,70			
	Vin (V)	-40	6,07	6,26	6,41	7,60			
		25	5,54	5,80	6,21	6,55			
		150	5,44	5,45	5,20	4,45			
	Vdr(mV)	-40	0,80	1,04	1,35	2,61			
		25	0,15	0,43	0,85	1,19			
		150	0,00	0,03	0,27	0,75			
Ceramic Sample 2	Vout(V)	-40	5,49	5,39	5,19	5,16	5,19	5,31	
		25	5,61	5,60	5,58	5,56	5,55	3,25	
		150	5,57	5,39	4,48	3,10	1,63	3,97	
	Vin (V)	-40	6,20	6,35	6,48	8,24	8,80	9,24	
		25	5,70	5,98	6,41	6,86	8,06	4,44	
		150	5,57	5,41	4,70	3,54	<7.30V crazy	9,91	
	Vdr(mV)	-40	0,71	0,96	1,29	3,08	3,61	3,93	
		25	0,09	0,38	0,83	1,30	2,51	1,19	
		150	0,00	0,02	0,22	0,44	nn	5,94	
Ceramic Sample 3	Vout(V)	-40	5,27	5,23	5,08	5,01			
		25	5,38	5,38	5,36	5,35			
		150	5,57	5,54	4,97	4,35			
	Vin (V)	-40	5,99	6,24	6,42	7,40			
		25	5,70	5,79	6,22	6,57			
		150	5,59	5,57	5,25	4,92			
	Vdr(mV)	-40	0,72	1,01	1,34	2,39			
		25	0,32	0,41	0,86	1,22			
		150	0,02	0,03	0,28	0,57			

		BIAS (Vout + X)	5						
			Iout (mA)	0	10	100	300	500	1000
Sample 1	Vout(V)	-40	4,67	4,66	4,67	4,69			
		amb	4,79	4,79	4,78	4,74			
		150	4,91	4,90	4,87	4,82			
	Vin (V)	-40	5,05	5,25	5,60	5,90			
		amb	5,17	5,38	5,67	5,90			
		150	5,10	5,20	5,46	5,70			
	Vdr(mV)	-40	0,38	0,59	0,93	1,21			
		amb	0,38	0,59	0,89	1,16			
		150	0,19	0,30	0,59	0,88			
Ceramic Sample 1	Vout(V)	-40	5,32	5,31	5,32	5,34			
		25	5,43	5,42	5,42	5,42			
		150	5,50	5,49	5,46	5,44			
	Vin (V)	-40	6,04	6,26	6,63	6,87			
		25	5,56	5,78	6,20	6,52			
		150	5,51	5,53	7,01	7,75			
	Vdr(mV)	-40	0,72	0,95	1,31	1,53			
		25	0,13	0,36	0,78	1,10			
		150	0,01	0,04	1,55	2,31			
Ceramic Sample 2	Vout(V)	-40	5,56	5,56	5,56	5,58	5,60	5,63	
		25	5,61	5,65	5,65	5,66	5,66	5,67	
		150	5,73	5,72	5,69	5,57	4,43	3,83	
	Vin (V)	-40	6,18	6,45	6,79	7,03	7,19	7,44	
		25	5,69	5,97	6,39	5,71	6,86	7,13	
		150	5,73	5,76	7,24	7,86	7,12	9,91	
	Vdr(mV)	-40	0,62	0,89	1,23	1,45	1,59	1,81	
		25	0,08	0,32	0,74	0,05	1,20	1,46	
		150	0,00	0,04	1,55	2,29	2,69	6,08	
Ceramic Sample 3	Vout(V)	-40	5,32	5,32	5,32	5,34			
		25	5,43	5,43	5,43	5,44			
		150	5,78	5,77	5,76	5,80			
	Vin (V)	-40	5,97	6,25	6,59	6,88			
		25	5,79	5,86	6,27	6,64			
		150	7,37	7,36	7,87	8,60			
	Vdr(mV)	-40	0,65	0,93	1,27	1,54			
		25	0,36	0,43	0,84	1,20			
		150	1,59	1,59	2,11	2,80			

		BIAS (Vout + X)	8						
			Iout (mA)	0	10	100	300	500	1000
Sample 1	Vout(V)	-40	4,68	4,67	4,68	4,70			
		amb	4,81	4,80	4,79	4,76			
		150	4,93	4,92	4,89	4,70			
	Vin (V)	-40	5,13	5,26	5,60	5,90			
		amb	5,40	5,50	5,77	6,00			
		150	5,40	5,49	5,60	5,02			
	Vdr(mV)	-40	0,45	0,59	0,92	1,20			
		amb	0,59	0,70	0,98	1,24			
		150	0,47	0,57	0,71	0,32			
Ceramic Sample 1	Vout(V)	-40	5,33	5,33	5,34	5,36			
		25	5,45	5,44	5,44	5,44			
		150	5,51	5,51	5,49	5,48			
	Vin (V)	-40	5,99	6,22	6,57	6,81			
		25	5,66	5,80	6,20	6,52			
		150	5,51	5,70	7,00	7,69			
	Vdr(mV)	-40	0,66	0,89	1,23	1,45			
		25	0,21	0,36	0,76	1,08			
		150	0,00	0,19	1,51	2,21			
Ceramic Sample 2	Vout(V)	-40	5,58	5,58	5,58	5,60	5,62	5,66	
		25	5,67	5,67	5,67	5,68	5,68	5,69	
		150	5,75	5,74	5,73	5,72	5,69	2,79	
	Vin (V)	-40	6,15	6,42	6,76	7,02	7,23	7,70	
		25	5,75	5,99	6,40	6,75	6,90	7,20	
		150	5,75	5,79	7,23	7,95	8,68	9,89	
	Vdr(mV)	-40	0,57	0,84	1,18	1,42	1,61	2,04	
		25	0,08	0,32	0,73	1,07	1,22	1,51	
		150	0,00	0,05	1,50	2,23	2,99	7,10	
Ceramic Sample 3	Vout(V)	-40	5,34	5,33	5,34	5,36			
		25	5,45	5,45	5,45	5,46			
		150	5,83	5,83	5,83	5,89			
	Vin (V)	-40	5,96	6,21	6,57	6,88			
		25	5,90	5,98	6,35	6,76			
		150	8,00	8,09	8,50	9,08			
	Vdr(mV)	-40	0,62	0,88	1,23	1,52			
		25	0,45	0,53	0,90	1,30			
		150	2,17	2,26	2,67	3,19			

mn: il valore di Drop Out non può essere calcolato

■: comportamento anomalo del dispositivo.

■: misura che ha determinato la rottura del dispositivo.

Viene allegata anche la tabella di dropout del TLE4275.

	Iout	1mA	10	100	300
Temp	Vin	Vout	Vout	Vout	Vout
25	0	0,001	0,000	0,000	0,000
	0,1	0,042	0,007	0,001	0,000
	0,2	0,083	0,015	0,002	0,001
	0,3	0,125	0,022	0,003	0,001
	0,4	0,166	0,029	0,040	0,002
	0,5	0,207	0,036	0,050	0,002
	0,6	0,248	0,044	0,060	0,003
	0,7	0,290	0,051	0,006	0,003
	0,8	0,332	0,058	0,006	0,004
	0,9	0,372	0,065	0,007	0,004
	1	0,413	0,073	0,008	0,005
	1,1	0,455	0,080	0,009	0,005
	1,2	0,496	0,087	0,011	0,005
	1,3	0,536	0,094	0,012	0,006
	1,4	0,595	0,106	0,013	0,006
	1,5	0,631	0,139	0,018	0,01
	1,6	0,663	0,251	0,032	0,02
	1,7	0,694	0,382	0,058	0,03
	1,8	0,750	0,545	0,081	0,04
	1,9	0,938	0,692	0,174	0,09
	2	1,068	0,809	0,425	0,11
	2,1	1,190	1,173	0,658	0,25
	2,2	1,300	1,295	0,819	0,48
	2,3	1,411	1,408	1,096	0,74
	2,4	1,524	1,519	1,517	0,89
	2,5	1,633	1,629	1,627	1,01
	2,6	1,740	1,739	1,739	1,21
	2,7	1,852	1,852	1,851	1,46
	2,8	1,967	1,967	1,964	1,8
	2,9	2,083	2,083	2,080	2,07
	3	2,199	2,199	2,197	2,19
	3,1	2,318	2,318	2,315	2,31
	3,2	2,437	2,437	2,434	2,43
	3,3	2,557	2,557	2,554	2,55
	3,4	2,676	2,676	2,673	2,67
	3,5	2,798	2,798	2,794	2,79
	3,6	2,921	2,920	2,916	2,91
	3,7	3,034	3,038	3,033	3,03
	3,8	3,162	3,161	3,157	3,15
	3,9	3,284	3,282	3,279	3,27
4	3,310	3,310	3,310	3,32	

	Iout	1mA	10	100	300
Temp	Vin	Vout	Vout	Vout	Vout
-40	0	0,001	0,000	0,000	0,000
	0,1	0,040	0,010	0,001	0,000
	0,2	0,080	0,020	0,002	0,001
	0,3	0,120	0,030	0,003	0,001
	0,4	0,160	0,040	0,004	0,002
	0,5	0,199	0,049	0,004	0,002
	0,6	0,239	0,060	0,005	0,003
	0,7	0,287	0,070	0,006	0,003
	0,8	0,318	0,081	0,007	0,004
	0,9	0,358	0,091	0,008	0,004
	1	0,397	0,100	0,009	0,004
	1,1	0,437	0,110	0,010	0,005
	1,2	0,477	0,119	0,011	0,005
	1,3	0,516	0,128	0,012	0,006
	1,4	0,556	0,137	0,012	0,006
	1,5	0,595	0,157	0,013	0,007
	1,6	0,635	0,168	0,014	0,007
	1,7	0,674	0,178	0,015	0,007
	1,8	0,713	0,188	0,016	0,008
	1,9	0,752	0,199	0,017	0,008
	2	0,808	0,230	0,020	0,100
	2,1	0,826	0,394	0,034	0,017
	2,2	0,864	0,688	0,084	0,041
	2,3	0,946	0,866	0,146	0,073
	2,4	1,204	0,985	0,361	0,121
	2,5	1,326	1,320	0,828	0,337
	2,6	1,450	1,447	1,002	0,700
	2,7	1,574	1,571	1,571	0,952
	2,8	1,697	1,695	1,696	1,080
	2,9	1,816	1,814	1,815	1,219
	3	1,930	1,929	1,930	1,526
	3,1	2,044	2,044	2,045	1,842
	3,2	2,160	2,159	2,160	2,140
	3,3	2,278	2,277	2,276	2,277
	3,4	2,395	2,394	2,393	2,394
	3,5	2,516	2,515	2,514	2,514
	3,6	2,637	2,636	2,634	2,636
	3,7	2,759	2,758	2,757	2,758
	3,8	2,883	2,882	2,881	2,881
	3,9	3,004	3,002	3,001	3,001
4	3,128	3,126	3,125	3,124	

	Iout	1mA	10	100	300
Temp	Vin	Vout	Vout	Vout	Vout
150	0	0,001	0,000	0,000	0,000
	0,1	0,049	0,008	0,001	0,001
	0,2	0,105	0,018	0,003	0,001
	0,3	0,153	0,025	0,004	0,002
	0,4	0,200	0,032	0,005	0,002
	0,5	0,238	0,039	0,005	0,003
	0,6	0,286	0,046	0,006	0,003
	0,7	0,364	0,062	0,009	0,004
	0,8	0,448	0,108	0,015	0,008
	0,9	0,491	0,240	0,038	0,018
	1	0,550	0,362	0,099	0,049
	1,1	0,631	0,435	0,205	0,104
	1,2	0,724	0,527	0,341	0,197
	1,3	0,820	0,788	0,415	0,190
	1,4	0,919	0,917	0,537	0,308
	1,5	1,018	1,020	0,679	0,435
	1,6	1,122	1,124	0,767	0,553
	1,7	1,233	1,231	1,214	0,667
	1,8	1,340	1,339	1,333	0,782
	1,9	1,450	1,449	1,443	0,917
	2	1,558	1,557	1,552	1,055
	2,1	1,669	1,669	1,664	1,162
	2,2	1,782	1,782	1,777	1,63
	2,3	1,896	1,894	1,890	1,76
	2,4	2,011	2,009	2,004	1,9
	2,5	2,125	2,124	2,119	2,08
	2,6	2,242	2,240	2,234	2,17
	2,7	2,358	2,357	2,351	2,3
	2,8	2,476	2,474	2,468	2,42
	2,9	2,576	2,589	2,585	2,53
	3	2,686	2,706	2,700	2,64
	3,1	2,804	2,826	2,819	2,75
	3,2	2,922	2,946	2,937	2,84
	3,3	3,041	3,066	3,057	2,93
	3,4	3,158	3,185	3,175	3,044
	3,5	3,275	3,300	3,292	3,142
	3,6	3,310	3,308	3,308	3,23
	3,7	3,310	3,308	3,309	3,317
	3,8	3,310	3,308	3,309	3,32
	3,9	3,310	3,308	3,309	3,32
4	3,311	3,308	3,309	3,32	

Infine quella dell'ESR-tunnel.

ESR Max CQ=100nF					
IQ load	dIQ	VI (V)			Min Value [Ω]
		12,5			
		-40°C	amb	150	
0	1mA	9,050	9,810	9,010	<b>9,010</b>
10		9,900	9,870	9,860	<b>9,860</b>
100		9,860	9,860	9,850	<b>9,850</b>
200		9,890	9,820	9,870	<b>9,820</b>

ESR Min CQ=100nF					
IQ load	dIQ	VI (V)			Max Value [Ω]
		12,5			
		-40°C	amb	150	
0	1mA	6,000	9,810	3,000	<b>9,810</b>
10		0,180	0,200	0,230	<b>0,230</b>
100		0,180	0,200	0,240	<b>0,240</b>
200		0,180	0,190	0,240	<b>0,240</b>

## 4 CONCLUSIONE

Le misure effettuate hanno permesso una buona caratterizzazione dei parametri necessari per definire il corretto funzionamento di un regolatore lineare di tensione; dai dati raccolti è possibile affermare che il componente si comporta bene nelle aree di utilizzo tipiche: presenta una buona line regulation così come una discreta load regulation.

Di contro è stato possibile accertare la mancanza della protezione nel caso di overtemperature, cioè il TSD non risponde come indicato nelle note progettuali note progettuali, è altresì stata riscontrata una “fragilità” del componente stesso in condizioni “estreme” (da notare come per valori di tensione in ingresso moderatamente elevati si siano verificate delle rotture e comportamenti anomali per correnti d’uscita oltre i quattrocento milliampere). Va inoltre prestata particolare attenzione per funzionamenti a correnti d’uscita vicine allo zero poiché può insorgere un comportamento oscillatorio.

In conclusione il dispositivo funziona bene nel range d’operatività degli altri regolatori ma presenta numerosi problemi nei range per i quali era stato progettato: l’implementazione non permette, ancora, il suo utilizzo per applicazioni di potenza.

## 5 Tabella dei Simboli e Costanti Fisiche

$E_G$ : Elettron Gap del Silicio (se non diversamente specificato).

$k$ : costante di Boltzmann  $1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K

$q$ : carica della particella elementare  $1,602\ 176\ 53 \cdot 10^{-19}$  C

$T$ : Temperatura espressa in gradi Kelvin

$V_T$ : potenziale termico, equivale a  $kT/q$

## 6 Bibliografia

Richard C. Jaeger, Travis N. Blalock. "Microelettronica" 3ed. McGraw-Hill. Trad. Paolo Spirito.

L. Benetazzo. Dispense varie. Libreria Progetto. 2010

Infineon Technologies, AA. VV.. Vari testi e documenti. In particolar modo "BASICS (Building Blocks), VREG Applications & Customers, Competence centers" di Daniele Dario, novembre 2011.

Le immagini degli schemi delle misure a quattro e a sei fili sono state prese da: <http://www.grix.it/UserFiles/roderick/>

Le immagini di tutta la strumentazione utilizzata, compreso il grafico della zona di operatività del generatore, sono state prese dai siti delle relative aziende.

Le restanti immagini sono da attribuire all'Infineon Technologies s.r.l.: [http://www.infineon.com/cms/media/eLearning/Automotive/Voltage\\_Regulator/LinearVoltageRegulators\\_FINAL\\_EDITED.htm](http://www.infineon.com/cms/media/eLearning/Automotive/Voltage_Regulator/LinearVoltageRegulators_FINAL_EDITED.htm)

Le varie immagini ed i relativi diritti sono proprietà dei relativi autori; sono state qui adoperate solamente a scopo esplicativo e senza volersene attribuire il merito.