

Parámetros de estabilidad de un regulador de tres terminales

Federico Miyara

1. Introducción

Los fabricantes de reguladores de tres terminales proveen, normalmente, especificaciones relativas a la estabilidad de la tensión de salida que permiten predecir la variación de ésta según diferentes contingencias durante su operación. Por ejemplo, variaciones de la tensión de alimentación, de las condiciones de carga, de la temperatura, o diversas combinaciones entre ellas. En principio podemos plantear que la tensión de salida es función de dichas variables más una pequeña componente aleatoria:¹

$$v_L = f(v_G, i_L, T) + v_{La}, \quad (1)$$

donde v_{La} representa el ruido (es decir, fluctuaciones con componentes frecuenciales dentro de la banda en la que opera el circuito alimentado por el regulador) y las derivas con el tiempo (es decir, fluctuaciones de muy baja frecuencia). Nos proponemos hacer un análisis de los parámetros que describen la estabilidad de la tensión de salida en diversas configuraciones de uso del regulador.

2. Parámetros

Como es habitual, si despreciamos el ruido, la variación total de la tensión de salida puede calcularse mediante la aproximación lineal siguiente:

$$\Delta v_L \cong \frac{\partial v_L}{\partial v_G} \Delta v_G + \frac{\partial v_L}{\partial i_L} \Delta i_L + \frac{\partial v_L}{\partial T} \Delta T \quad (2)$$

Los parámetros $S_V = \partial v_L / \partial v_G$, $S_I = \partial v_L / \partial i_L$, $S_T = \partial v_L / \partial T$, denominados *factores de estabilidad de línea, de carga y de temperatura* respectivamente, se determinan variando de a una variable por vez, a veces recurriendo a elaboradas técnicas instrumentales. Por ejemplo, para evitar que las variaciones de corriente de carga se traduzcan en variaciones de temperatura, se utilizan técnicas de pulsos de bajo ciclo de trabajo, los cuales, debido a la inercia térmica, no alcanzan a incrementar la temperatura significativamente. Estos parámetros no son necesariamente constantes para todo el rango de operación del dispositivo, por lo cual deben especificarse las condiciones de ensayo. Por ejemplo, el factor de estabilidad de carga empeora al aumentar la temperatura o la corriente estática de carga.

Los parámetros que especifican los fabricantes no suelen ser directamente los indicados en la ecuación (2) sino más bien valores expresados de maneras diversas ante diversos rangos de variación de cada parámetro. Así, si tomamos, por ejemplo, el LM317, el fabricante (National Semiconductor) indica, como *regulación de línea*, la variación porcentual por volt de variación de la tensión de alimentación, dando un valor típico de 0,01 %/V y un máximo de 0,04 %/V a 25 °C de temperatura de juntura. Como condiciones de validez indica que la tensión diferencial entrada-salida esté comprendida

¹ Utilizamos minúsculas para las magnitudes variables y mayúsculas para las fijas.

entre 3 V y 40 V, es decir, todo el rango operativo. Traducido a los términos de la ecuación (2), resulta

$$\frac{\partial v_L}{\partial v_G} = 0,0001 \frac{V_L}{1 \text{ V}}$$

El motivo de esto es poder dar un valor independiente de la tensión de salida, especialmente en los dispositivos de tensión ajustable. Así, en un regulador ajustado a 12 V, el factor de estabilidad de línea será:

$$\frac{\partial v_L}{\partial v_G} = 0,0001 \frac{12 \text{ V}}{1 \text{ V}} = 0,0012$$

El mismo fabricante da, en cambio, para el LM78L12, un regulador de tensión fija de 12 V y baja potencia, un valor absoluto de *regulación de línea* típico de 30 mV para una variación desde 14,5 V a 27 V de v_G , mientras que si la variación es de sólo 16 V a 27 V, el valor se reduce a 20 mV. Observemos en primer lugar que la información que se nos brinda es, en realidad, el incremento de la tensión de salida y no una magnitud relativa como en el primer caso. Para traducir esto a la notación de la ecuación (2) observemos primero que la variación entre 14,5 V y 16 V es responsable de un incremento de 10 mV en la variación total, por lo tanto en ese rango el factor de estabilidad de línea típico será, en promedio,

$$\frac{\partial v_L}{\partial v_G} = \frac{0,010 \text{ V}}{16 \text{ V} - 14,5 \text{ V}} = 0,0067$$

En el rango entre 16 V y 27 V, en cambio, el promedio se reduce a

$$\frac{\partial v_L}{\partial v_G} = \frac{0,020 \text{ V}}{27 \text{ V} - 16 \text{ V}} = 0,0018$$

La reducción se debe a que en el primer caso el circuito está funcionando con tensión de alimentación muy próxima a la de la carga, por lo cual si bien sigue operando correctamente, su performance se resiente.

Vemos que la denominada *regulación de línea* no es un parámetro definido de manera normalizada, a determinar bajo condiciones uniformes de ensayo, sino una noción general de cuánto varía la tensión de carga ante una variación de la tensión de alimentación. De hecho, en la sección sobre definición de términos, el fabricante expresa que la regulación de línea es “el cambio en la tensión de salida para un cambio en la tensión de entrada”, aclarando a continuación sólo que “la medición se efectúa en condiciones de baja disipación o utilizando técnicas de pulso de modo de no afectar significativamente la temperatura”.

Similares consideraciones se aplican a la *regulación de carga*. Así, para el LM 317, la regulación de carga está dada en forma porcentual ante una variación de la corriente de carga entre el mínimo (10 mA) y el máximo (que, dependiendo del encapsulado puede ser 0,5 A ó 1,5 A). Su valor típico es 0,1 % con una cota máxima de 0,5 %. Traducido a la notación de (2), para el caso del mayor encapsulado,

$$\frac{\partial v_L}{\partial i_L} = -\frac{0,001 V_L}{1,5 \text{ A} - 0,01 \text{ A}} = -\frac{0,00067 V_L}{\text{A}},$$

que, para una fuente ajustada a 12 V, arroja

$$\frac{\partial v_L}{\partial i_L} = -\frac{0,00067 \times 12 \text{ V}}{\text{A}} = -0,008 \Omega.$$

Aunque no se indica el signo, la regulación de corriente es negativa ya que la tensión baja al aumentar la corriente de carga.

Para el LM78L12, nuevamente el fabricante opta por dar la variación de tensión para dos intervalos de variación de la corriente de carga. Entre 1 mA y 40 mA se produce una variación típica de -10 mV , mientras que entre 1 mA y 100 mA la variación típica es de -20 mV . Nuevamente obtendremos dos valores promedio. Para el rango entre 1 mA y 40 mA tendremos

$$\frac{\partial v_L}{\partial i_L} = -\frac{0,010 \text{ V}}{0,040 \text{ A} - 0,001 \text{ A}} = -0,256 \Omega,$$

Para el rango entre 40 mA y 100 mA encontramos una variación típica de -20 mV .

$$\frac{\partial v_L}{\partial i_L} = -\frac{0,020 \text{ V}}{0,100 \text{ A} - 0,040 \text{ A}} = -0,333 \Omega.$$

En cuanto al factor de estabilidad térmica, el fabricante proporciona un valor porcentual (denominado *estabilidad de temperatura*) dentro de todo el rango operativo de temperatura ($T_{\min} < T_j < T_{\max}$), el cual depende del tipo de encapsulado. Por ejemplo, para un encapsulado comercial ($T_{\min} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\max} = 125 \text{ }^\circ\text{C}$), se especifica un valor de 1 %. Sin embargo, no es del todo correcto estimar $\partial v_L / \partial T$ dividiendo dicho valor relativo (o el valor absoluto correspondiente a la tensión de salida de la fuente) por el salto térmico dado que, como muestra la figura 1, la tensión de referencia (de la que depende linealmente la tensión de salida) no sólo dista de ser lineal sino que además posee un máximo local en $25 \text{ }^\circ\text{C}$.²

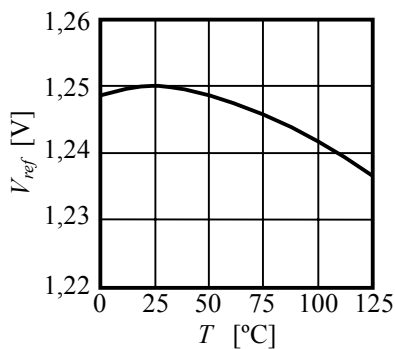


Figura 1. Deriva térmica típica de la tensión de referencia del regulador de tres terminales LM317.

² De hecho, este regulador se ha diseñado para tener la mínima deriva térmica a temperaturas próximas a la temperatura ambiente.

Si utilizamos este regulador entre 25 °C y 50 °C, vemos que la variación relativa es del orden de $0,002/1,25 = 0,0016$, por lo cual, para una tensión de salida de 12 V como en los casos anteriores tendremos

$$\Delta v_L = 0,0016 \times 12 \text{ V} = 0,0192 \text{ V},$$

de donde podemos obtener un valor promedio de

$$\frac{\partial v_L}{\partial T} = \frac{0,0192 \text{ V}}{25 \text{ }^\circ\text{C}} = 0,768 \text{ mV}/^\circ\text{C}.$$

Si se hubiera obtenido el promedio en todo el rango, se habría obtenido $0,96 \text{ mV}/^\circ\text{C}$.

3. Extrapolación de parámetros en un regulador con ampliación de corriente

En la figura 2 se muestra un circuito típico de regulador con ampliación de la capacidad de corriente de carga mediante un transistor, donde se han indicado las tensiones y corrientes incrementales en diversos puntos. Nos planteamos ahora determinar si los parámetros obtenidos de las especificaciones son extrapolables directamente a este circuito de aplicación

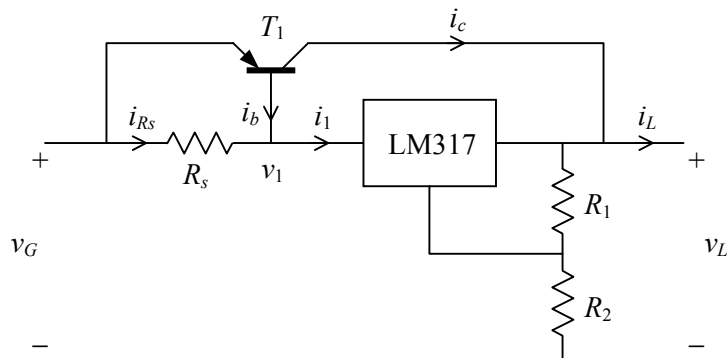


Figura 2. Circuito de una fuente de tensión con ampliación de corriente utilizando un regulador de tres terminales LM317 y un transistor. Las variables indicadas son incrementales.

3.1. Regulación de línea

Para hallar la regulación de línea es necesario suponer que la corriente de carga se mantiene constante, por lo cual la corriente incremental de carga es nula:

$$i_L = 0. \quad (3)$$

Consideraremos, además, que

$$v_L \ll v_G, \quad (4)$$

ya que suponemos que el regulador cumple razonablemente bien su función de estabilizar la tensión de salida.

En primera aproximación podríamos pensar que las variaciones de tensión de la entrada se trasladan directamente al regulador, por lo cual el circuito completo heredaría el factor de estabilidad del regulador integrado. Sin embargo, un examen más atento revela que, como consecuencia de la variación de tensión de entrada, varía la tensión emisor-colector

$$v_{ec} = v_G. \quad (5)$$

Dado que la corriente de colector tiene dos componentes

$$i_c = h_{fe} i_b + v_{ec} h_{oe}, \quad (6)$$

al variar la segunda, como i_c es esencialmente constante, debe variar la primera en forma opuesta, por lo cual varía la corriente de base:

$$i_b = \frac{i_c - v_G h_{oe}}{h_{fe}} \quad (7)$$

Esta variación provoca a su vez una variación de la tensión emisor-base,

$$v_{eb} = \frac{i_c - v_G h_{oe}}{h_{fe}} h_{ie} \quad (8)$$

por lo que la variación de la tensión en el regulador, v_1 , no es exactamente igual a la de entrada.

Más aún, la corriente por el regulador integrado, i_1 , tampoco permanece constante, ya que

$$i_1 = i_{Rs} + i_b \quad (9)$$

y ambas componentes experimentan variaciones, por lo cual será preciso considerar también el efecto de la regulación de carga del regulador.

A fin de completar el análisis tengamos en cuenta que

$$\begin{aligned} i_c + i_1 &= i_L = 0, \\ i_c + i_{Rs} + i_b &= 0, \\ i_c + \frac{v_{eb}}{R_s} + \frac{i_c - v_G h_{oe}}{h_{fe}} &= 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Reemplazando v_{eb} según (7) y operando se llega a

$$i_c = \frac{h_{oe} \left(1 + \frac{h_{ie}}{R_s} \right)}{1 + h_{fe} + \frac{h_{ie}}{R_s}} v_G \quad (11)$$

Determinemos ahora v_1 :

$$v_1 = v_G - i_b h_{ie} = v_G - \frac{i_c - v_G h_{oe}}{h_{fe}} h_{ie}$$

Reemplazando i_c según (11)

$$v_1 = v_G - \frac{h_{oe} \left(1 + \frac{h_{ie}}{R_s} \right)}{1 + h_{fe} + \frac{h_{ie}}{R_s}} v_G \frac{h_{ie}}{h_{fe}} + v_G h_{oe} \frac{h_{ie}}{h_{fe}}$$

de donde

$$v_1 = \left(1 + \frac{h_{oe} h_{ie}}{1 + h_{fe} + \frac{h_{ie}}{R_s}} \right) v_G \quad (12)$$

Análogamente, v_G ocasiona un incremento de corriente i_1 opuesto a i_c , dado por

$$i_1 = - \frac{h_{oe} \left(1 + \frac{h_{ie}}{R_s} \right)}{1 + h_{fe} + \frac{h_{ie}}{R_s}} v_G \quad (13)$$

El factor de estabilidad de línea se obtiene sumando las consecuencias de estos dos efectos:

$$S_V = \frac{v_L}{v_G} = \frac{S_{V_0} v_1 + S_{I_0} i_1}{v_G} \quad (14)$$

donde S_{V_0} y S_{I_0} son los factores de estabilidad de línea y de carga propios del regulador integrado en conexión simple (sin ampliación de corriente). Resulta

$$S_V = \left(1 + \frac{h_{oe} h_{ie}}{1 + h_{fe} + \frac{h_{ie}}{R_s}} \right) S_{V_0} - \frac{h_{oe} \left(1 + \frac{h_{ie}}{R_s} \right)}{1 + h_{fe} + \frac{h_{ie}}{R_s}} S_{I_0}. \quad (15)$$

NOTA: Debe recordarse que $S_{I_0} < 0$.

Ejemplo 1: Obtener la regulación de línea de un LM317 ampliado en corriente con un transistor cuyos datos son $h_{fe} = 20$, $h_{oe} = 0,005 \text{ S}$, $h_{ie} = 14 \Omega$, siendo la resistencia $R_s = 60 \Omega$.

El LM317 declara una regulación de línea máxima de 0,04 %/V, es decir,

$$S_{V_o} = \frac{0,0004}{V} V_L$$

y una regulación de carga máxima de 0,5 % ante una variación de 1,5 A, es decir,

$$S_{I_o} = -\frac{0,005 V_L}{1,5 \text{ A}} = -\frac{0,0033}{\text{A}} V_L.$$

De (15)

$$\begin{aligned} S_V &= \left(1 + \frac{0,005 \times 14}{1 + 20 + \frac{14}{60}} \right) \frac{0,0004}{V} V_L + \frac{0,005 \left(1 + \frac{14}{60} \right)}{1 + 20 + \frac{14}{60}} \frac{0,0033}{V} V_L = \\ &= 1,0033 \times \frac{0,0004}{V} V_L + 0,0029 \times \frac{0,0033}{V} V_L = \frac{0,00041}{V} V_L \end{aligned}$$

Vemos que la alteración debida a los efectos considerados no es significativa, es decir,

$$S_V \cong S_{V_o}.$$

3.2. Regulación de carga

Para hallar la regulación de carga debemos suponer ahora que la tensión de alimentación es constante, por lo cual la tensión incremental es nula:

$$v_G = 0. \quad (16)$$

También suponemos que la tensión de carga es aproximadamente constante, por lo que

$$v_L \cong 0. \quad (17)$$

Si se suscita un incremento de corriente de carga i_L , resulta

$$i_c + i_l = i_L, \quad (18)$$

$$i_c + i_{R_s} + i_b = i_L,$$

$$i_c + \frac{i_b h_{ie}}{R_s} + i_b = i_L.$$

En este caso no hay variación de corriente por h_{oe} , ya que la tensión emisor-colector se mantiene constante (es decir, es nula en señal) por lo que

$$i_b = \frac{i_c}{h_{fe}}$$

Resulta, entonces,

$$i_c \left(1 + \frac{h_{ie}}{h_{fe} R_s} + \frac{1}{h_{fe}} \right) = i_L,$$

de donde

$$i_c = \frac{h_{fe}}{h_{fe} + 1 + \frac{h_{ie}}{R_s}} i_L. \quad (19)$$

Reemplazando en (18) podemos despejar i_1 :

$$i_1 = \frac{1 + \frac{h_{ie}}{R_s}}{h_{fe} + 1 + \frac{h_{ie}}{R_s}} i_L. \quad (20)$$

A su vez,

$$v_1 + i_b h_{ie} = v_G - v_L = 0,$$

$$v_1 = -i_b h_{ie} = -i_c \frac{h_{ie}}{h_{fe}}$$

por lo cual, de (19),

$$v_1 = -\frac{h_{ie}}{h_{fe} + 1 + \frac{h_{ie}}{R_s}} i_L. \quad (21)$$

Resulta negativo pues un aumento de corriente de carga conduce a un aumento de la tensión emisor-base, y la tensión de entrada se ha supuesto constante.

Por último, podemos calcular el factor de estabilidad de carga como

$$S_I = \frac{v_L}{i_L} = \frac{S_{V_0} v_1 + S_{I_0} i_1}{i_L}, \quad (22)$$

es decir,

$$S_I = -\frac{h_{ie}}{h_{fe} + 1 + \frac{h_{ie}}{R_s}} S_{V_0} + \frac{1 + \frac{h_{ie}}{R_s}}{h_{fe} + 1 + \frac{h_{ie}}{R_s}} S_{I_0}. \quad (23)$$

Ejemplo 2: Obtener la regulación de línea en el regulador del ejemplo anterior.

Utilizando los valores ya calculados para S_{v_0} e S_{I_0} en la ecuación (23)

$$\begin{aligned} S_I &= -\frac{14}{20 + 1 + \frac{14}{60}} \frac{0,0004}{A} V_L + \frac{1 + \frac{14_{ie}}{60}}{20 + 1 + \frac{14}{60}} \frac{-0,0033}{A} V_L = \\ &= -0,659 \times \frac{0,0004}{A} V_L - 0,0581 \times \frac{0,0033}{A} V_L = -\frac{0,00046}{A} V_L \end{aligned}$$

En este caso el factor de estabilidad de carga ha mejorado (se ha reducido) aproximadamente 7 veces.