

1. Rendimiento

Un parámetro fundamental de una fuente de tensión regulada es el rango de tensiones de entrada en el cual la salida se encuentra en regulación. Idealmente, con cualquier tensión igual o superior a la de salida se podría obtener $V_{O\ REG}$, pero la necesidad de llevar a los transistores del circuito a un punto de trabajo apropiado hace que haya una diferencia de tensión mínima entre la entrada y la salida.

Partiendo desde la salida, la tensión en el nodo común a las resistencias R_4 y R_7 es igual a V_o . Despreciando la tensión que cae en la resistencia R_4 , puesto que es muy pequeña, asumimos que en el colector del transistor T2 obtenemos la tensión V_o . Sabemos por la hoja de datos del fabricante, que para que el transistor T2 no entre en saturación es de $1V$ como máximo para las condiciones de nuestro circuito, por lo que vamos a asumir que el valor de $V_{ce} = 1V$; ahora, al igual que para T2, la hoja de datos del transistor T1 nos indica que $V_{ce_{sat}} = 600mV$ como valor máximo. Ahora, planteando mallas entre los transistores del par darlington, vemos que:

$$V_{ce_{T1}} = V_{ce_{T2}} - V_{BE_{on}}$$

Como $V_{ce_{T1}} = 0.6V$, $V_{BE_{on}} = 0.7V$ despejando obtenemos que $V_{ce_{T2}} = 1.4V$, valor admisible dentro del rango del transistor T2. Finalmente, V_{in} puede expresarse como:

$$V_{in} = V_{ce_{T2}} + V_o$$

siendo $V_{ce_{T2}} = 1.4V$.

Cabe destacar que los fabricantes proporcionan una $V_{ce_{sat}}$ mínima, por ende, el valor final puede ser mas bajo. Si se tienen en cuenta los valores mínimos, $V_{ce_{T1}} = 0.2V$ y $V_{ce_{T2}} = 0.1V$, lo que hace que $V_{in} = 0.8V + V_o$.

Por otro lado, hay que verificar también que la fuente de corriente se polarice correctamente. Recorriendo la rama que une la entrada, los diodos de la fuente y T_3 , y yendo desde la salida hasta el colector de T_3 (despreciando nuevamente la caída en R_4), se obtiene:

$$\begin{cases} V_{E_3} = V_o + V_{BE_1} + V_{BE_2} \\ V_{C_3} = V_I - 2V_D + V_{BE_3} \end{cases} \Rightarrow V_{EC_3} = V_I - V_o + 2V_D + V_{BE_1} + V_{BE_2} - V_{BE_3} \quad (1)$$

Por lo tanto, si no queremos que T_3 sature, debe cumplirse que:

$$V_I - V_o > V_{EC_3SAT} + 2V_D + V_{BE_1} + V_{BE_2} - V_{BE_3} \quad (2)$$

Si asumimos que todas las V_{BE} y V_D son $0.7V$, tomando los $0.3V$ de la hoja de datos del BC557 como V_{CE_3SAT} , se obtiene que $V_I - V_o > 2.4V$. Sin embargo, empíricamente se verifica que todas estas tensiones son inferiores a $0.7V$, y por lo tanto el circuito funciona correctamente para diferencias inferiores.

Tomando como criterio que el circuito está regulando correctamente si la tensión de salida es un 99% o más de la que se tiene sin carga, se obtuvieron los datos de la tabla 1.

En promedio, pues, se obtuvo que:

$$\begin{cases} \Delta V_{MIN\ SIM} = 1.28V \\ \Delta V_{MIN\ MED} = 1.3V \end{cases} \quad (3)$$

$V_{O\text{REG}}$ (V)	$V_I - V_O$ simulada (V)	$V_I - V_O$ medida (V)
9	1.263	1.37
10	1.273	1.37
11	1.281	1.5
12	1.286	1.18
13	1.290	1.29
14	1.293	1.26
15	1.295	1.13

Tabla 1: Rendimiento medido y simulado para distintas tensiones de regulación

2. Impedancia de salida

Una característica de una fuente de tensión regulada ideal es que posee impedancia de salida cero, lo cual resultaría en regulación de carga ideal, es decir: la tensión de salida es la misma para cualquier valor de R_L . Desde ya, en la práctica esto es imposible de obtener, pero la realimentación negativa de este tipo de fuentes permite obtener un valor de R_O lo suficientemente pequeño como para que sea despreciable en la mayoría de los casos.

Analíticamente, el valor de R_O se obtiene a partir de la impedancia de salida del circuito amplificador básico R_{OA} y la ganancia de lazo $|T|$:

$$R_O = \frac{R_{OA}}{1 + |T|} \quad (4)$$

En la ecuación 4 resulta muy claro por qué la realimentación negativa mejora esta característica del circuito: en lugar de ver directamente la impedancia de salida del circuito amplificador básico, la carga ve a esta impedancia reducida $1 + |T|$ veces.

un poco de desarrollo matemático sobre esto

Se obtiene analíticamente entonces que:

$$\begin{cases} |T| \simeq \dots \\ R_{OA} \simeq \dots \end{cases} \quad (5)$$

completar modT, Roa

Remitiéndonos nuevamente a la ecuación 4, resulta entonces que:

$$R_O \simeq 4 \times 10^{-6} \Omega \quad (6)$$

Para simular y medir este valor, se estudió la regulación de carga del circuito. Si la impedancia de salida fuese cero, debería cumplirse que tanto para corriente 0 como para cualquier valor de I_O , la tensión de salida es la misma. A medida que R_O aumenta, más cae la tensión a medida que aumenta la corriente. Se decidió pues calcular R_O a partir de:

$$R_O = \frac{V_O|_{I_O=0} - V_O|_{I_O=I_{O1}}}{I_{O1}} \quad (7)$$

Si bien, en principio, esta ecuación es válida para cualquier par de valores de ΔV_O y ΔI_O , se decidió utilizar $I_{O1}=1\text{A}$, debido a que los valores de ΔV_O en regulación son muy pequeños, y por lo tanto difíciles de medir con precisión con el instrumental que se tenía disponible, lo cual incurre en

un gran error porcentual en la determinación del mismo, que se propaga proporcionalmente a R_O . A pesar de que esta forma se ignora el hecho de que la impedancia de salida cambia con la carga, dado que cambia la polarización de todos los diodos y transistores del circuito, se consideró que se incurriría así en menos error que tratando de medir las variaciones de unos pocos mV (o inferiores) que ocurren en valores similares de corriente.

$V_{O\ REG}$ (V)	R_O simulada (Ω)	R_O medida (Ω)
9	3×10^{-6}	6×10^{-2}
15	2×10^{-6}	2×10^{-2}

Tabla 2: Valores simulados y medidos para la impedancia de salida