

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.

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.

$V_{O\,REG}$ (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

En promedio, pues, se obtuvo que:

$$\begin{cases} \Delta V_{MIN\,SIM} = 1.28V \\ \Delta V_{MIN\,MED} = 1.3V \end{cases} \quad (1)$$

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 $|T|$:

$$R_O = \frac{R_{OA}}{1 + |T|} \quad (2)$$

En la ecuación 2 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.

El análisis se realizó eligiendo el generador, el amplificador, la re-alimentación de la siguiente manera:

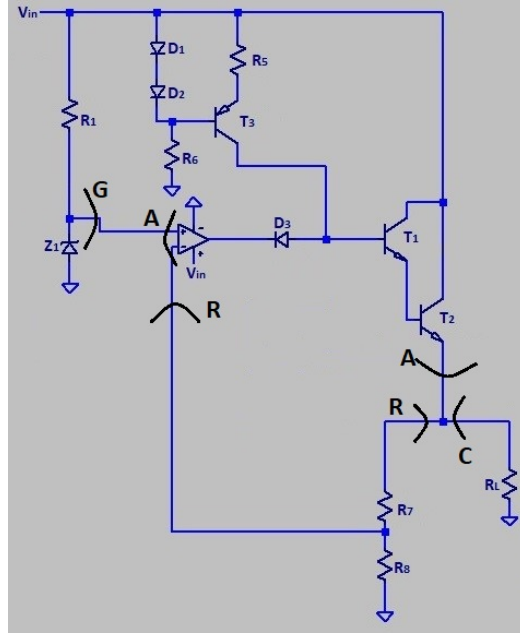


Figura 1: Elección de etapas

A partir de la figura 1 podemos observar que la vamos a tener suma de tensión y muestreo de tensión dando una ganancia de re-alimentación $f = \frac{V_1}{V_2}|_{I_1=0} = \frac{R_8}{R_8+R_7}$. A continuación calculamos la ganancia a lazo abierto con el siguiente circuito:

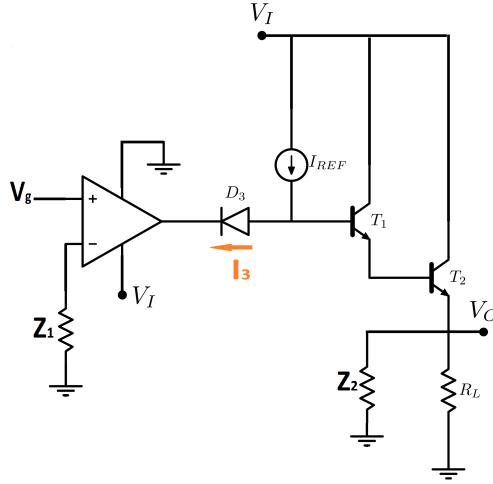


Figura 2: Elección de etapas

En donde reemplazamos el transistor T_3 junto sus correspondientes componentes por una fuente de corriente para simplificar el análisis y reemplazamos el generador por un V_g de forma tal que nos queda lo observado por la figura 2. De la misma podemos observar que la ganancia a lazo abierto

nos va a dar como resultado:

$$a = \frac{V_2}{V_1} = \frac{(\epsilon A_{vol} - V_{D3} - V_{BE1} - V_{BE2} + I_3 R_{out})(Z_2 // R_L)(\beta_1 + 1)(\beta_2 + 1)}{V_g [R_{out} + (\beta_1 + 1)(\beta_2 + 1)(Z_2 // R_L)]}$$

Al cual aproximando $(\epsilon A_{vol} - V_{D3} - V_{BE1} - V_{BE2} + I_3 R_{out})(Z_2 // R_L)(\beta_1 + 1)(\beta_2 + 1) \simeq \epsilon A_{vol}$, dado que todas las demás variables son chicas en comparación a ϵA_{vol} la cual se encuentra multiplicada por la ganancia del amplificador del operacional y ϵ que tiene mayor valor que el resto. Además aproximamos $V_g [R_{out} + (\beta_1 + 1)(\beta_2 + 1)(Z_2 // R_L)] \simeq (\beta_1 + 1)(\beta_2 + 1)(Z_2 // R_L)$ dado que R_{out} va a ser despreciable en comparación a $(\beta_1 + 1)(\beta_2 + 1)(Z_2 // R_L)$ quedando:

$$a = \frac{\epsilon A_{vol}(Z_2 // R_L)(\beta_1 + 1)(\beta_2 + 1)}{V_g (\beta_1 + 1)(\beta_2 + 1)(Z_2 // R_L)} = \frac{\epsilon A_{vol}}{V_g}$$

Dado que $\epsilon = V_g \frac{R_{ent}}{R_{ent} + Z_1}$ tenemos que el valor final va a ser $a = \frac{A_{vol} R_{ent}}{R_{ent} + Z_1}$. Finalmente, dado que $Z_1 = R_8 // R_7$ y $Z_2 = R_8 + R_7$ obtenemos que $a \simeq A_{vol}$ porque $\frac{R_{ent}}{R_{ent} + Z_1} \simeq 1$.

Para obtener la impedancia de salida calculamos la impedancia de salida dada por los transistores T_1 y T_2 los cuales están en una configuración DARLINGTON, utilizando el modelo incremental obtenemos $R_{out} = \frac{r_{\pi 1} + r_{\pi 2}}{1 + \beta_1 + \beta_2}$ y dado que $r_{\pi} = (1 + \beta) \frac{V_T}{I_{cq}}$ estas van a variar acorde a la corriente de polarización y la temperatura a la cual se este usando el transistor.

Finalmente obtuvimos analíticamente que:

$$\begin{cases} |T| \simeq A_{vol} \frac{R_8}{R_7 + R_8} \simeq 99,18 \text{ dB} \\ R_{OA} \simeq R_L // Z_2 // Z_{outCascade} \end{cases} \quad (3)$$

Remitiéndonos nuevamente a la ecuación 2, resulta entonces en el caso típico donde $I_{cq2} = 1,5 \text{ A}$ y estando a temperatura ambiente, que:

$$R_O \simeq 379 \times 10^{-6} \Omega$$

En el peor caso donde $R_{OA} \simeq Z_2$ tenemos que:

$$R_O \simeq 557 \times 10^{-3} \Omega$$

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:

$$R_O = \frac{V_O|_{I_O=0} - V_O|_{I_O=I_{O1}}}{I_{O1}} \quad (4)$$

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