

REGULADORES SERIE DE TENSIÓN

El diagrama de bloques funcional básico de un regulador de tensión consta de una referencia estable, cuya tensión de salida es V_{ref} , y un amplificador de error de alta ganancia realimentado negativamente.

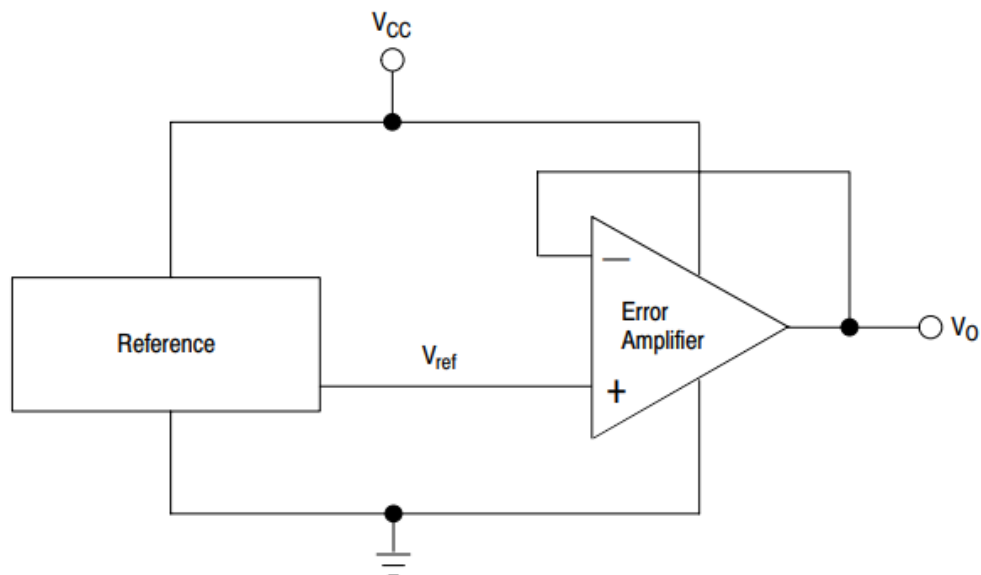


Ilustración 1 Diagrama en bloques de un regulador serie

La salida tensión (V_O), es igual o múltiplo de V_{ref} . El regulador tenderá a mantener constante el V_O detectando cualquier cambios en el V_O , por ejemplo, debido a un consumo mayor de corriente la carga. Por lo tanto, el regulador de tensión ideal podría ser considerada una fuente con una tensión de salida constante.

Sin embargo, para realizar un modelo más real de cualquier regulador de tensión es necesario tener en cuenta la impedancia de salida (Z_o), las variaciones de tensión en la referencia (V_{CC}) y los cambios en la temperatura del circuito (T_j).

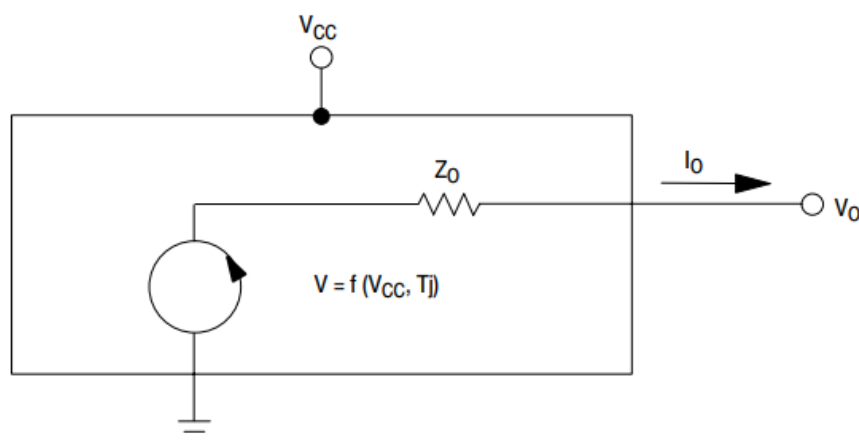


Ilustración 2 Modelo real de un regulador serie

Electrónica Aplicada II

Reguladores serie de tensión

La principal necesidad de cualquier regulador es que sea estable ante variaciones de tensión en la fuente o de temperatura ya sea por cambios en el ambiente o por disipación de energía.

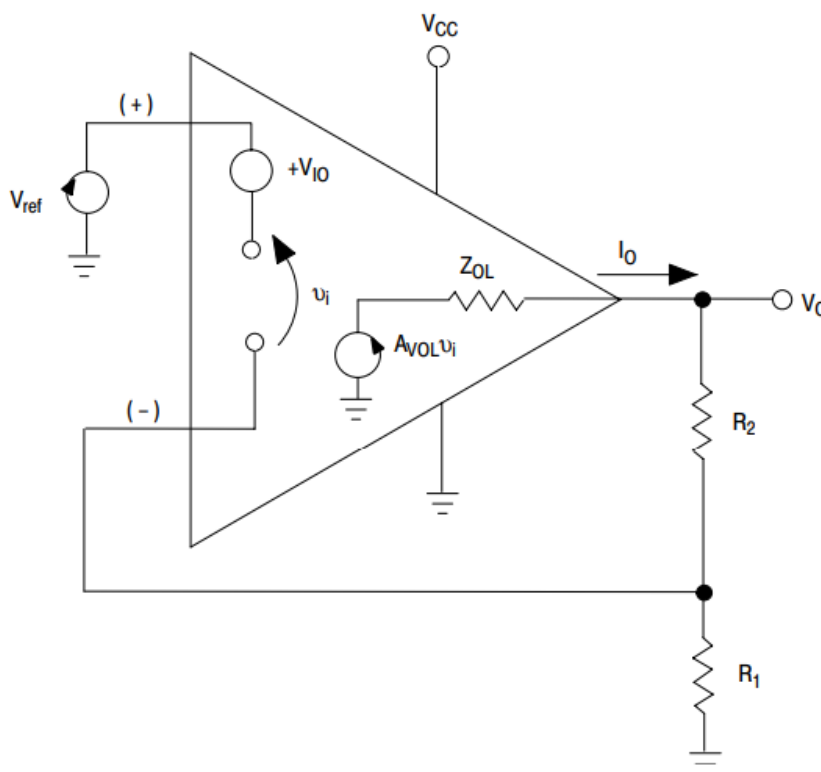
1. Fuente regulada con amplificador operacional

El amplificador operacional tiene problemas constructivos que impiden que se comporte como una fuente regulada ideal.

Podemos escribir la tensión de salida del operacional como $V_o = v_i * Av_{ol} - I_o * Z_{ol}$ y $v_i = V_{ref} \pm V_{io} - V_o * \beta$ en donde V_{ref} es la tensión de referencia, V_{io} la tensión de offset de la entrada y β la realimentación. Pudiendo reescribirse como

$$V_o = \frac{(V_{ref} \pm V_{io}) - \frac{Z_{ol}}{Av_{ol}} * I_o}{\beta + \frac{1}{Av_{ol}}}$$

Es interesante observar de esta ecuación, que la tensión de offset se suma directamente a la tensión de referencia, mientras que la caída de tensión por la resistencia de salida se ve atenuada una cantidad de veces igual a la ganancia a lazo abierto, por lo que resulta necesario tener un amplificador con alta ganancia para disminuir efectos secundarios.



Quedando para un caso ideal de un amplificador de tensión:

$$V_o = V_r * \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

Ilustración 3 Fuente regulada con OPAMP

Electrónica Aplicada II

Reguladores serie de tensión

1.1. Modelización de operacional real

1.1.1. Offset de tensión en la entrada debido a simetría

Los transistores de entrada al operacional usualmente no son idénticos, esto se ve en el circuito como una tensión de offset (V_{io}) en la malla de entrada. A ciertas temperaturas este efecto puede ser anulado ajustando la tensión de referencia (V_{ref}), la malla β o algunos operacionales poseen dos terminales para corregir ese desbalance.

1.1.2. Sensibilidad a las variaciones en la fuente de alimentación

Los cambios en la tensión de salida debido a variaciones en la fuente de alimentación se los puede atribuir a dos parámetros del amplificador: relación de rechazo a la fuente de alimentación (PSRR) y rechazo al modo común (CMRR). En los circuitos integrados el PSSR suelen ser valores muy altos debido a la utilización de fuentes de corriente, haciendo que este efecto sea casi nulo. Sin embargo, cambios en la fuente de alimentación generan variaciones en la entrada como tensiones de modo común, por lo tanto, provocando variaciones en la salida siendo importante en el diseño del amplificador de error que posea un alto CMRR.

1.2. Resistencia de salida

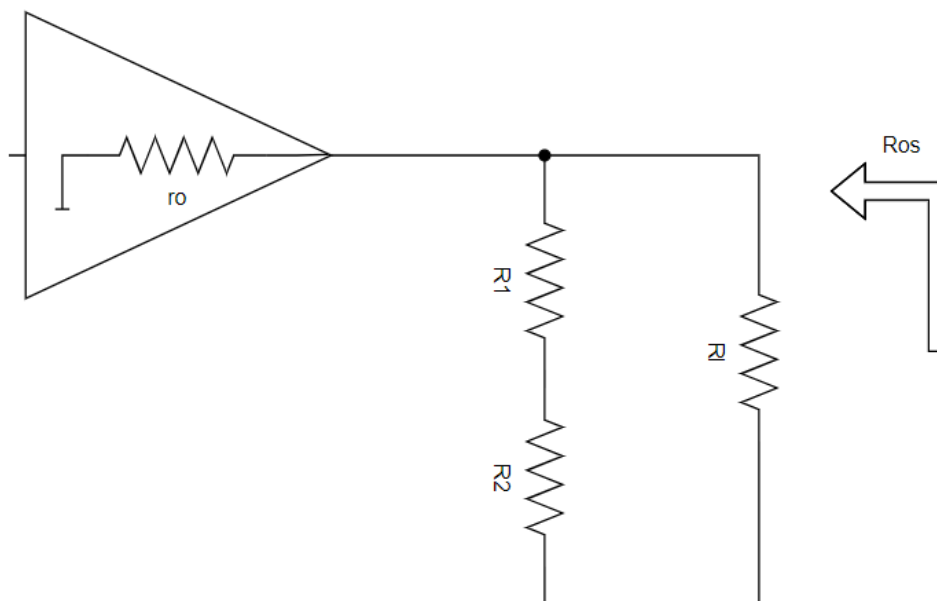


Ilustración 4 Resistencia de salida de un regulador serie con OPAMP

Quedando la resistencia de Salida $R_{os} = R_l // r_o // (R_1 + R_2) \rightarrow R_{osf} = \frac{R_{os}}{D}$

Valores de ejemplo $r_o = 75\Omega$ y $D = 10^4$ se obtienen los siguientes valores

$R_{os} = 75\Omega \rightarrow R_{osf} = 7,5m\Omega$ observándose que la resistencia es muy baja, evitando caídas de tensión en resistencias que no son la carga.

El primer problema que nos encontramos con esta configuración es la corriente máxima que es capaz de entregar el operacional.

Electrónica Aplicada II

Reguladores serie de tensión

2. Fuente regulada con amplificador operacional y transistor de paso

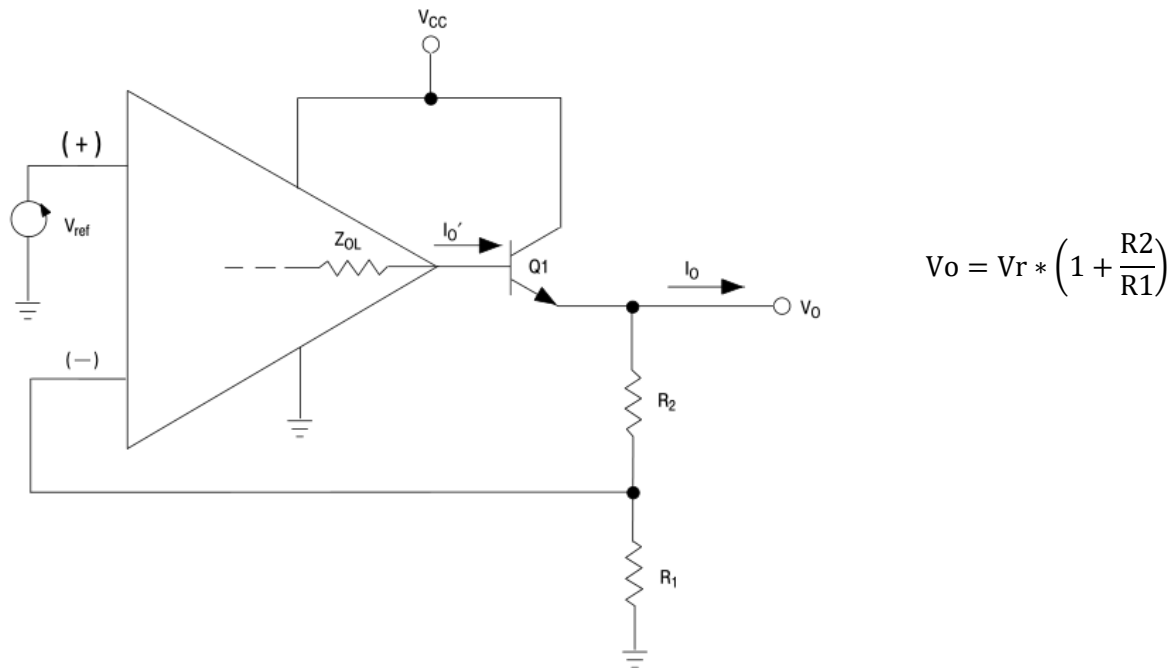


Ilustración 5 Regulador serie con OPAMP + Transistor de salida

Al colocar un transistor en la salida el problema de la corriente ya no se ve presente. La caída de tensión base-emisor (V_{be}) del transistor no afecta al circuito, ya que la tensión de salida está siendo censada en la carga y no en la salida del operacional.

2.1. Resistencia de salida

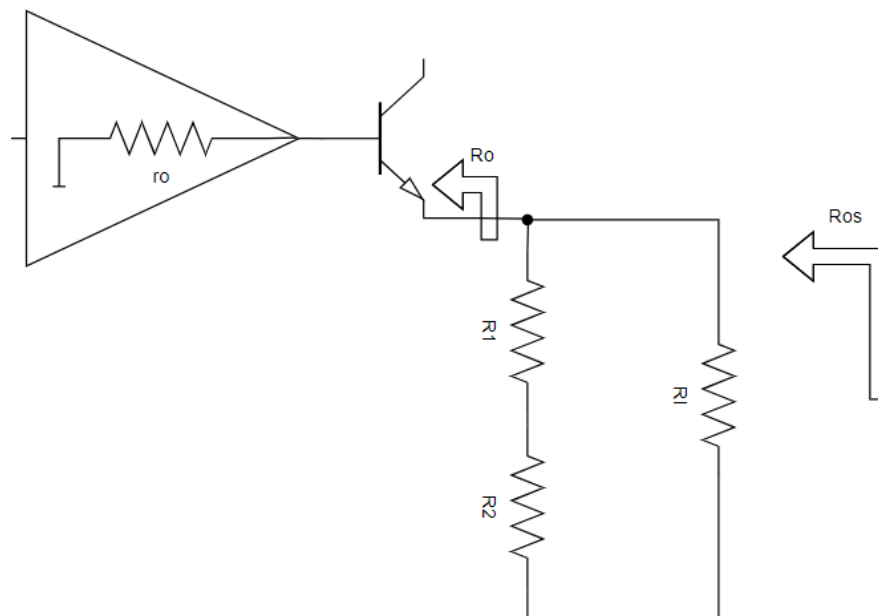


Ilustración 6 R_o regulador serie con OPAMP + transistor de salida

Electrónica Aplicada II

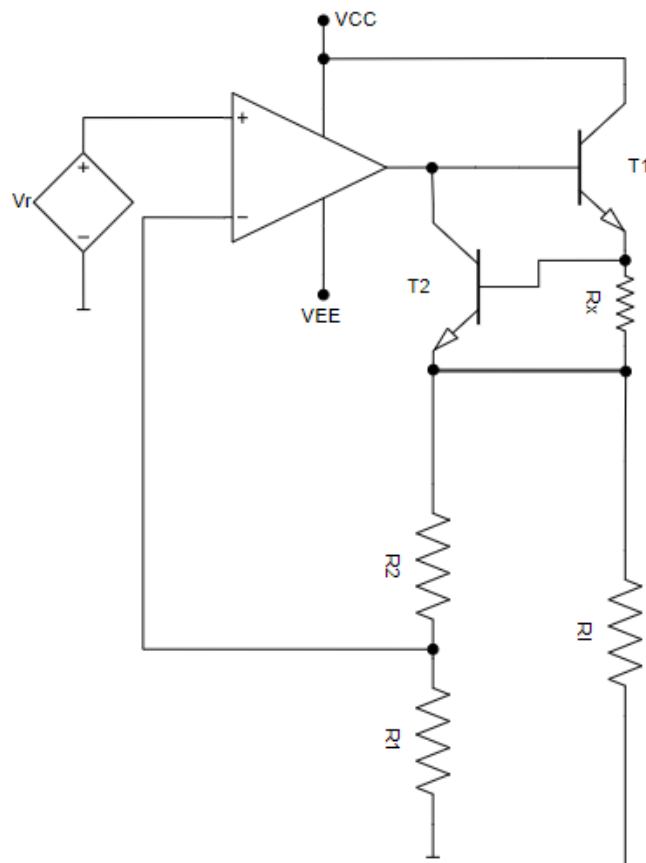
Reguladores serie de tensión

Para el cálculo de la resistencia de salida ahora debemos tener en cuenta la resistencia de salida del transistor, que al ser un colector común es $R_o = h_{ib} + \frac{r_o}{1+h_{fe}} \rightarrow R_{os} = R_o // (R_1 + R_2) // R_l$ quedando $R_{osf} = \frac{R_{os}}{D}$

Valores de ejemplo para una corriente de 1A por el transistor, $h_{ie} = 25m\Omega$, $h_{fe} = 100$, $r_o = 75\Omega$ y $D = 10^4$ se obtienen los siguientes valores $R_o = 7,5\Omega \rightarrow R_{osf} = 750 \mu\Omega$ observándose que la resistencia es despreciable.

Una mejora que es posible hacer en este circuito es proteger la carga y la fuente contra excesos de corriente.

3. Fuente regulada con OPAMP, transistor de paso y limitador de corriente



$$V_o = V_r * \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

$$I_{max} = \frac{V_{BE_{T2}}}{R_x}$$

Ilustración 7 Regulador serie con OPAMP + Transistor de salida y limitador de corriente

La corriente máxima que se desea tener en la carga se define a través de R_x y la caída de tensión V_{BE} , si $V_{R_x} > 0,6V$ entonces el transistor T_2 se satura quitándole la corriente de base al T_1 .

3.1. Resistencia de salida

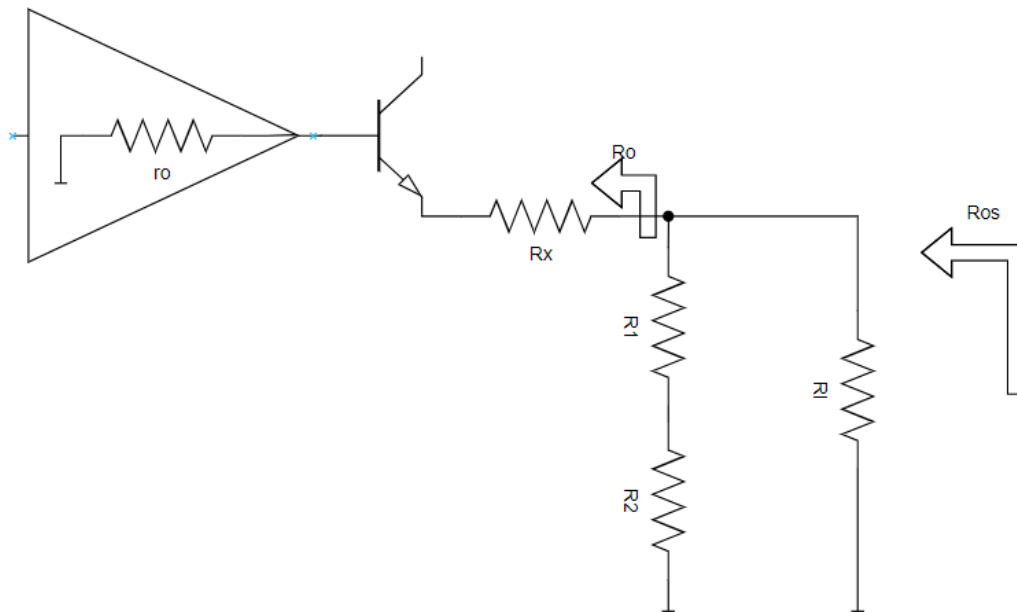


Ilustración 8 Ro regulador serie con OPAMP + transistor de salida y limitador de corriente

Para el cálculo de la resistencia de salida ahora debemos tener en cuenta la resistencia de salida del transistor, que al ser un colector común es $R_o = R_x + h_{ie} + \frac{r_o}{1+h_{fe}} \rightarrow R_{os} = R_o // (R_1 + R_2) // R_L$ quedando $R_{osf} = \frac{R_{os}}{D}$

Valores de ejemplo para una corriente de 1A por el transistor, $h_{ie} = 25m\Omega$, $h_{fe} = 100$, $r_o = 75\Omega$, $R_x = 0,47\Omega$ y $D = 10^4$ se obtienen los siguientes valores $R_o = 8\Omega \rightarrow R_{osf} = 800 \mu\Omega$ observándose que la resistencia sigue siendo despreciable.

Para poder realizar estos circuitos es necesario tener una fuente de tensión estable (V_r) como lo puede ser una fuente Bandgap. Hay circuitos integrados que poseen todos estos bloques dentro de un mismo chip permitiendo alta escalabilidad.

4. Regulador serie de tres terminales

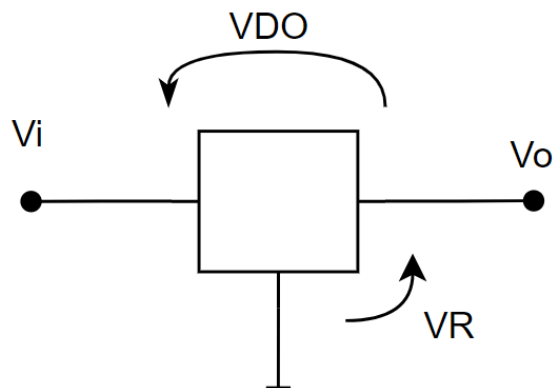


Ilustración 9 Regulador serie de 3 terminales

Los reguladores serie de 3 terminales pueden ser de tensiones positivas, negativas, con tensiones constantes o variables de salida. A pesar de la variedad el principio de funcionamiento para todos ellos es el mismo, tener una diferencia de potencial constante en V_R definida por el regulador.

Algunos de los parámetros a prestar atención a la hora de seleccionar un regulador serie son:

- I_{omax} : Corriente máxima de salida del regulador.
- V_{inmax} : Tensión máxima de entrada del regulador.
- PD: Potencia máxima capaz de disipar.
- Dropout Voltage (V_d): Es la mínima tensión VDO que debe caer entre la salida y entrada del regulador.
- Load regulation: Caída de tensión en la salida debido a la carga.

Si deseo tener un regulador variable debo modificar la tensión de referencia

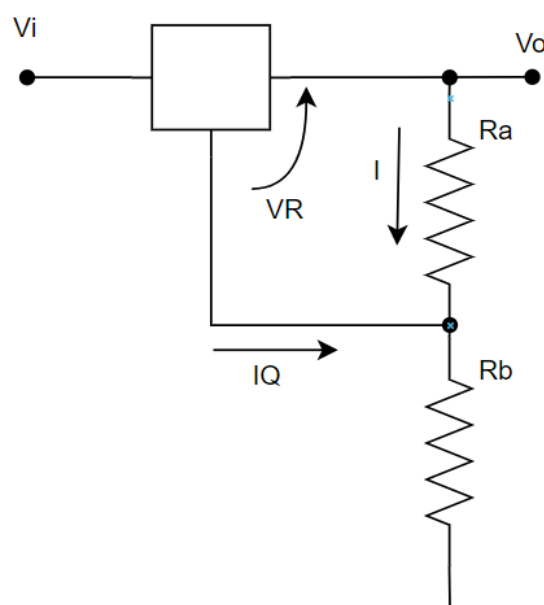


Ilustración 10 Regulador serie de 3 terminales con tensión de salida ajustable

Electrónica Aplicada II

Reguladores serie de tensión

Tomando la consideración de que $I \gg I_Q$ las ecuaciones del regulador quedan $I = \frac{VR}{RA} \rightarrow V_o = I * (RA + RB) = VR * \left(1 + \frac{RA}{RB}\right)$, la misma que para un regulador serie con OPAMP.

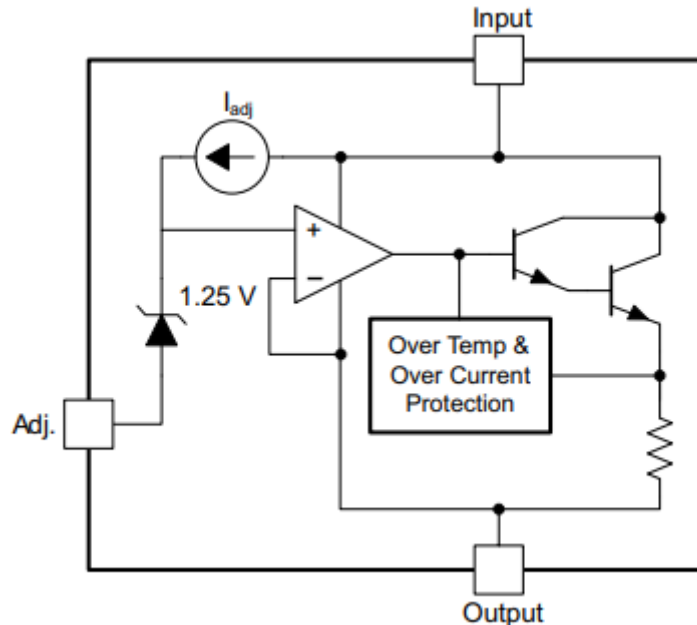


Ilustración 11 Diagrama en bloques del regulador serie LM317

En reguladores con tensiones fijas la I se la denomina I_Q , mientras que los reguladores con tensiones variables I se la denomina I_{adj} . Para generar una tensión variable a la salida es necesario modificar el valor de R_B .

Es posible obtener una tensión variable a partir de un regulador con tensión fija, la gran desventaja es la corriente que circula por el terminal de ajuste, la cual es mayor en un regulador de tensión fija que uno variable (5 mA LM78xx vs 50 uA LM317) la topología de diseño es la misma para ambos casos.

5. Cálculo de potencia

Supongamos que tenemos una tensión de entrada que varía entre $\pm 10\%$.

Para los cálculos de factibilidad de regulación es necesario tener en cuenta la $V_{i_{min}}$, por lo tanto $V_{i_{min}} > V_{do} + V_o$.

En cambio, para conocer si el dispositivo es capaz de disipar la potencia, se debe tomar la $V_{i_{max}}$, siendo la potencia disipada $P_d = (V_o - V_{i_{max}}) * I_o$.

6. Técnicas de limitación de corriente

Existen diferentes técnicas para limitar una corriente de salida, en particular nosotros nos centraremos en dos básicas, limitación a corriente constante y limitación foldback. También puede utilizarse una combinación de ambas en serie para obtener mejor aprovechamiento de la zona de operación del transistor.

Electrónica Aplicada II

Reguladores serie de tensión

Los transistores bipolares poseen una zona de operación segura (SOA) en donde dentro de esa zona el transistor puede funcionar sin destruirse, fuera de esa zona el mismo se destruye sea por superar la corriente máxima, la potencia máxima, por embalaje térmico (Segundo rompimiento) o superar la tensión colector-emisor máxima.

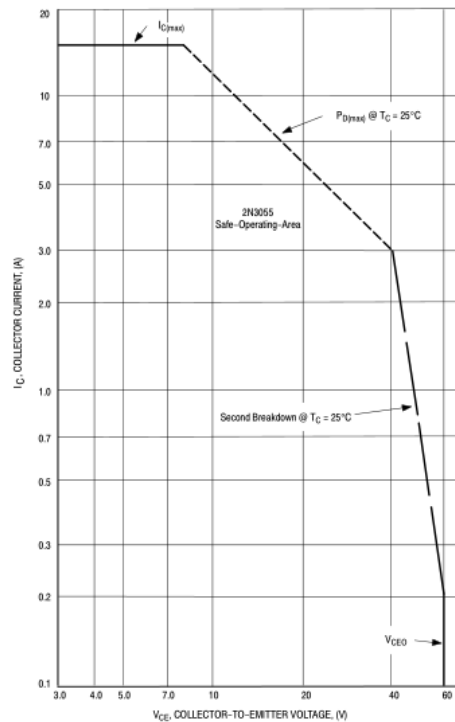


Ilustración 12 Ejemplo SOA 2N3055

6.1. Limitación a corriente constante

El método más sencillo es limitar la corriente para que la misma nunca supere el valor que se encuentre dentro de la SOA y sea menor a la tensión colector-emisor máxima de mi circuito. A la corriente de limitación se la llama corriente de cortocircuito (I_{sc}).

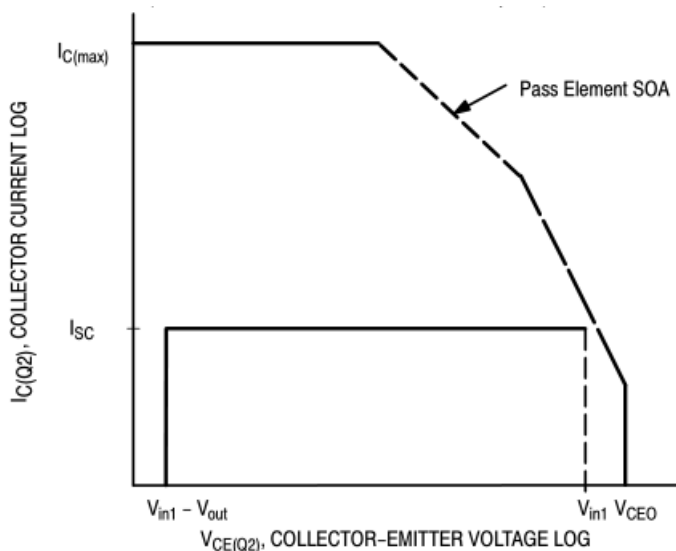
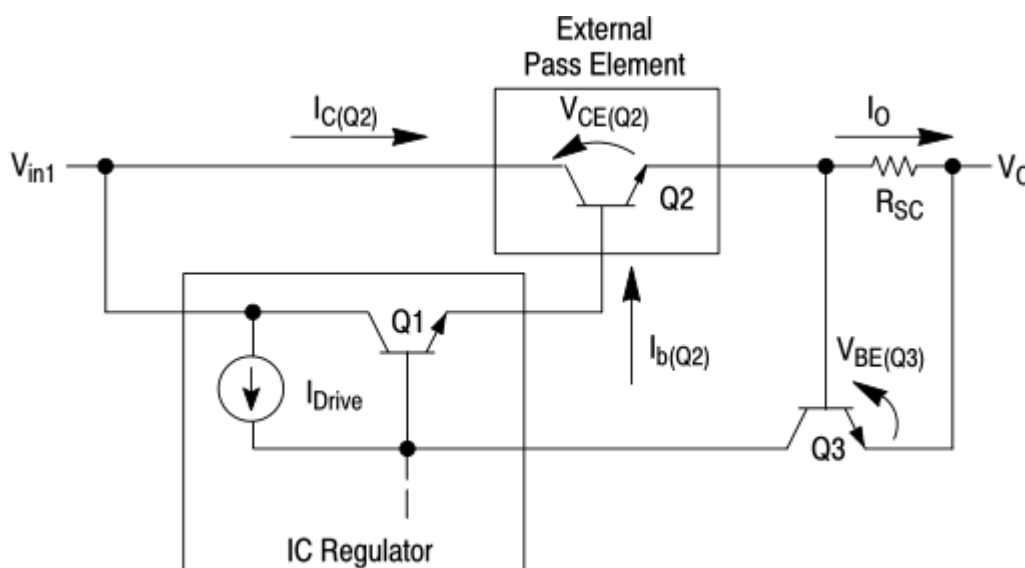


Ilustración 13 Limitación a corriente constante en gráfico de SOA

El circuito de aplicación es muy sencillo, se muestrea la corriente de salida mediante un resistor y si el mismo supera la tensión base-emisor de Q3 comienza a conducir, quitándole corriente al regulador serie. Si la corriente de salida disminuye, el transistor Q3 conduce menos, provocando una mayor corriente de salida, llegando a un punto de equilibrio I_{sc} el cual se puede aproximar a $I_{sc} = \frac{V_{be3}}{R_{sc}}$.



Esta configuración tiene como contra que la potencia disipada por el elemento serie aumenta a medida que disminuye la tensión de salida, provocando que, si deseo que el mismo funcione ante un cortocircuito, debo dimensionar mi disipador para que sea capaz de disipar la potencia del transistor en el peor caso que es $P = V_{in} * I_{sc}$.

6.2. Limitación de corriente foldback

Una opción para aprovechar la SOA del transistor sin aumentar la potencia disipada a medida que aumenta la tensión de dropout, es la configuración foldback.

Electrónica Aplicada II

Reguladores serie de tensión

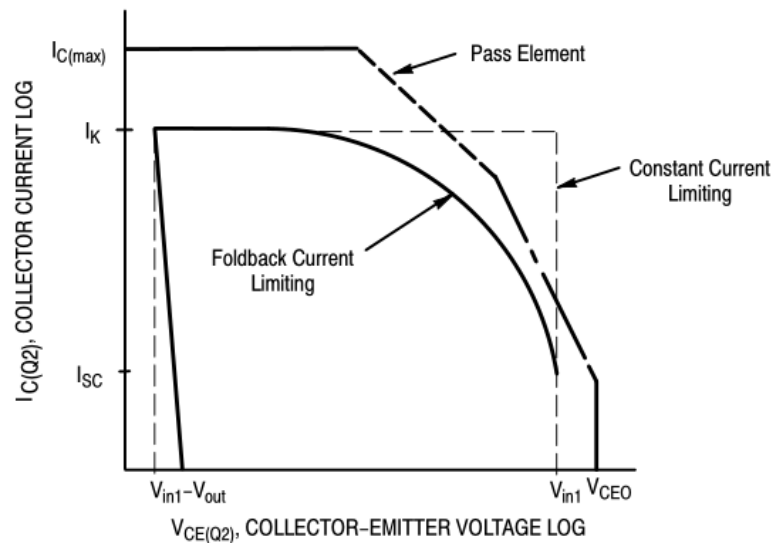


Ilustración 14 Comparación de limitación foldback y corriente constante con respecto a SOA

A diferencia del caso de corriente constante, para la limitación foldback hay una corriente de rodilla (I_k) en donde la tensión de dropout es mínima, y una corriente de cortocircuito (I_{sc}) para la cual la tensión de dropout es máxima, de esta forma la potencia máxima en el transistor de paso es menor si la comparamos con el caso de corriente constante.

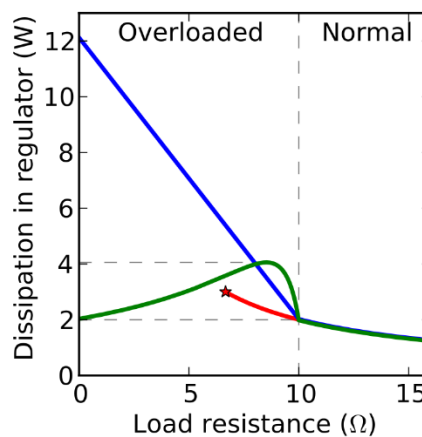


Ilustración 15 Potencia disipada por el transistor de paso para una misma I_{sc} , en azul limitador constante, en verde limitador foldback $V_{in} = 12\text{ V}$, $V_{OC} = 10\text{ V}$, $I_{max} = 1\text{ A}$, $I_{sc\text{ foldback}} = 0.17\text{ A}$

La implementación de este limitador es muy similar al de corriente constante con la diferencia que la activación de Q3 se realiza con una tensión proporcional a V_a , dada por el divisor resistivo R1 y R2, y la caída de tensión de R_{sc} , siendo la ecuación para que se active el mismo: $V_a * \frac{R_2}{R_1 + R_2} + V_{be_{3on}} = V_a + I_{sc} * R_{sc}$.

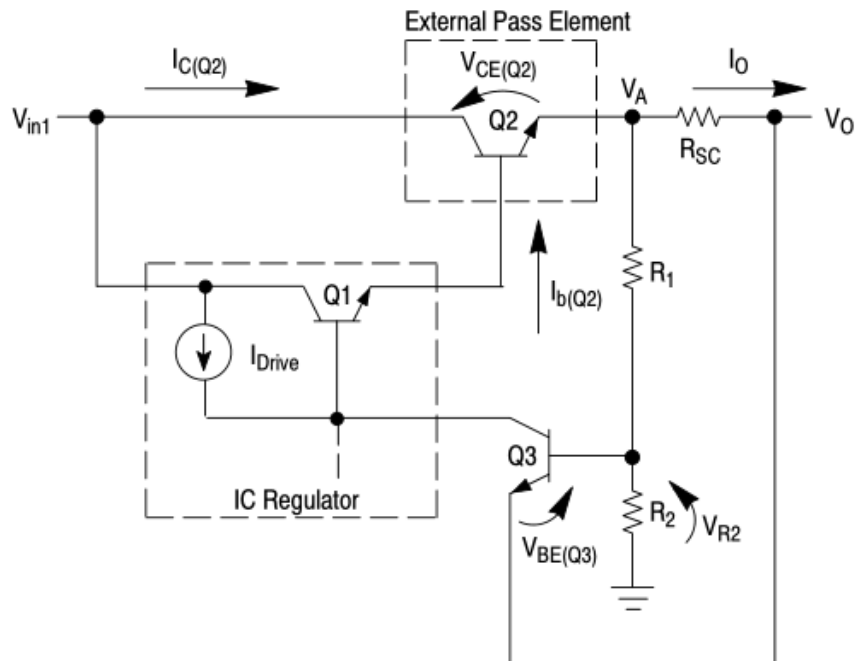


Ilustración 16 Implementación fuente Foldback

Para obtener valores coherentes de resistencia serie se suelen utilizar relaciones de 2 a 3 veces entre las corrientes de rodilla y cortocircuito, además se debe verificar que las resistencias sean menor a la resistencia presentada por la tensión de salida y la corriente de conducción del transistor de paso.

$$R_{SC} = \frac{V_{out}/I_{SC}}{\left(1 + \frac{V_{out}}{V_{BEon}(Q3)}\right) - \frac{I_K}{I_{SC}}}$$

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{V_{BEon}(Q3)}{I_{SC} R_{SC}}$$

and, $R_1 + R_2 \leq \frac{V_{out}}{I_{Drive}}$

Ilustración 17 Ecuaciones de diseño limitador foldback

Contenido

1.	Fuente regulada con amplificador operacional	2
1.1.	Modelización de operacional real	3
1.1.1.	Offset de tensión en la entrada debido a simetría.....	3
1.1.2.	Sensibilidad a las variaciones en la fuente de alimentación.....	3
1.2.	Resistencia de salida	3



2. Fuente regulada con amplificador operacional y transistor de paso	4
2.1. Resistencia de salida	4
3. Fuente regulada con OPAMP, transistor de paso y limitador de corriente	5
3.1. Resistencia de salida	6
4. Regulador serie de tres terminales	7
5. Cálculo de potencia	8
6. Técnicas de limitación de corriente.....	8
6.1. Limitación a corriente constante.....	9
6.2. Limitación de corriente foldback.....	10
Tabla de ilustraciones.....	13

Tabla de ilustraciones

ILUSTRACIÓN 1 DIAGRAMA EN BLOQUES DE UN REGULADOR SERIE.....	1
ILUSTRACIÓN 2 MODELO REAL DE UN REGULADOR SERIE.....	1
ILUSTRACIÓN 3 FUENTE REGULADA CON OPAMP	2
ILUSTRACIÓN 4 RESISTENCIA DE SALIDA DE UN REGULADOR SERIE CON OPAMP	3
ILUSTRACIÓN 5 REGULADOR SERIE CON OPAMP + TRANSISTOR DE SALIDA.....	4
ILUSTRACIÓN 6 RO REGULADOR SERIE CON OPAMP + TRANSISTOR DE SALIDA.....	4
ILUSTRACIÓN 7 REGULADOR SERIE CON OPAMP + TRANSISTOR DE SALIDA Y LIMITADOR DE CORRIENTE	5
ILUSTRACIÓN 8 RO REGULADOR SERIE CON OPAMP + TRANSISTOR DE SALIDA Y LIMITADOR DE CORRIENTE	6
ILUSTRACIÓN 9 REGULADOR SERIE DE 3 TERMINALES	7
ILUSTRACIÓN 10 REGULADOR SERIE DE 3 TERMINALES CON TENSIÓN DE SALIDA AJUSTABLE	7
ILUSTRACIÓN 11 DIAGRAMA EN BLOQUES DEL REGULADOR SERIE LM317	8
ILUSTRACIÓN 12 EJEMPLO SOA 2N3055	9
ILUSTRACIÓN 13 LIMITACIÓN A CORRIENTE CONSTANTE EN GRÁFICO DE SOA	10
ILUSTRACIÓN 14 COMPARACIÓN DE LIMITACIÓN FOLDBACK Y CORRIENTE CONSTANTE CON RESPECTO A SOA.....	11
ILUSTRACIÓN 15 POTENCIA DISIPADA POR EL TRANSISTOR DE PASO PARA UNA MISMA ISC, EN AZUL LIMITADOR CONSTANTE, EN VERDE LIMITADOR FOLDBACK $V_{IN} = 12\text{ V}$, $V_{OC} = 10\text{ V}$, $I_{MAX} = 1\text{ A}$, $I_{SC\text{ FOLDBACK}} = 0.17\text{ A}$	11
ILUSTRACIÓN 16 IMPLEMENTACIÓN FUENTE FOLDBACK.....	12
ILUSTRACIÓN 17 ECUACIONES DE DISEÑO LIMITADOR FOLDBACK	12