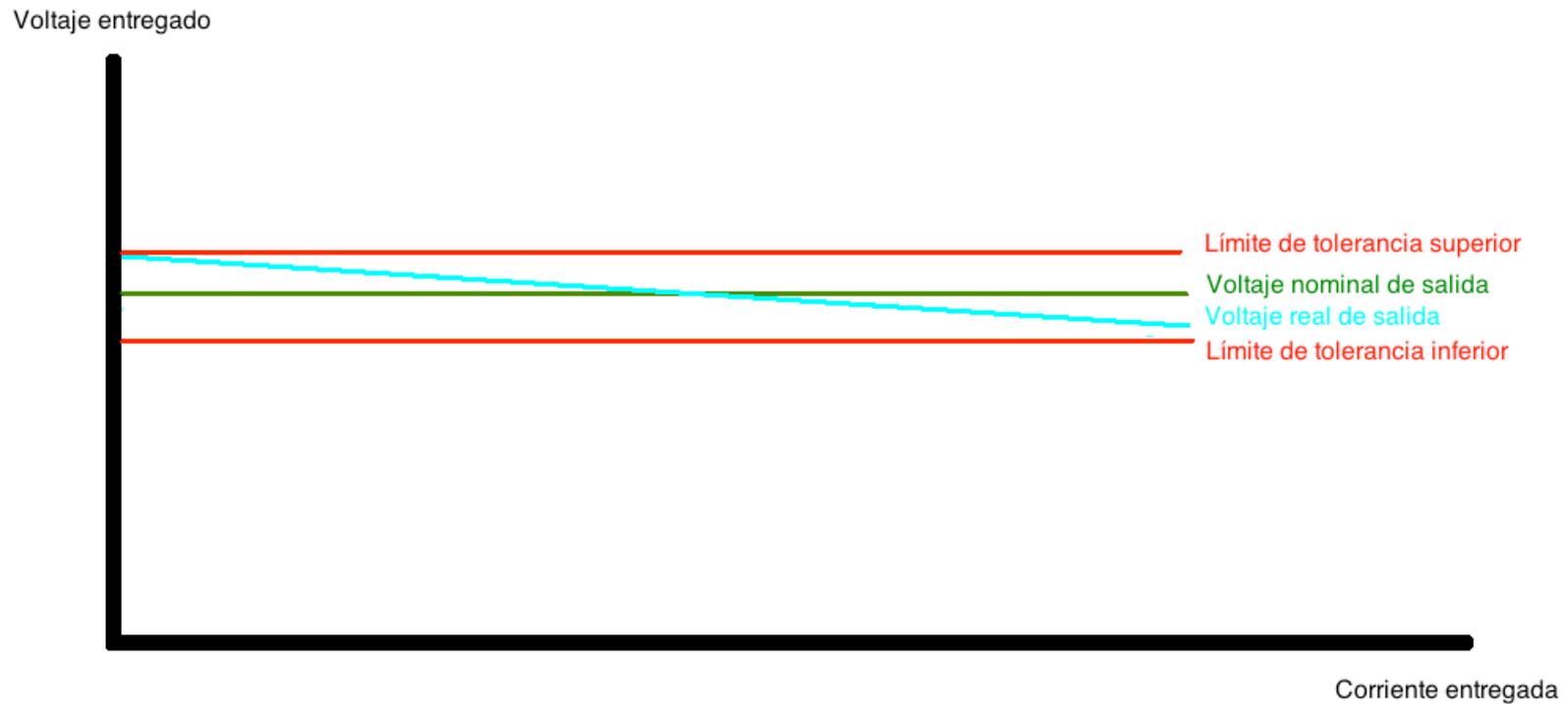


Fuente de alimentación regulada

Es un equipo formado por una serie de circuitos de acople, regulación y protección que proporcionan a una carga externa (o conjunto de cargas externas) la energía eléctrica necesaria para su operación, a un nivel de tensión (o corriente) prefijado y constante dentro de unos límites de regulación, mientras la energía demandada por la carga sea menor o igual al valor prefijado.

En el estado actual de la tecnología la mayoría de las fuentes de alimentación regulada son del tipo "fuente de tensión".



Fuente de tensión regulada
Característica ideal (verde) y real por regulación con
carga (turquesa).

Rojo: Límites de regulación permitidos.

Circuitos de acople: relacionan al resto de los elementos con una fuente de energía externa no directamente compatible (AC en vez de DC, de distinto nivel de tensión, etc.).

Circuitos de regulación: Generan la salida de tensión con las características requeridas por la carga, dentro de los márgenes de regulación definidos.

Circuitos de protección: Dentro de lo posible, evitan que la fuente regulada y la carga sufran daños cuando se producen situaciones fuera de las previstas para la operación normal (sobretensiones a la entrada, sobrecargas a la salida, etc.).

Límites de regulación.

En condiciones normales el valor de la tensión de salida deseado variará ligeramente cuando cambien condiciones de operación tales como la tensión de entrada, la corriente de salida ("corriente de carga") y la temperatura de operación.

El rango aceptable de la variación de la tensión de salida ante variaciones de cada uno de estos parámetros se expresa mediante el correspondiente valor de regulación.

Las regulaciones se expresan como un porcentaje de variación.

1.- Regulación de entrada: Establece el valor máximo del cambio de tensión de salida que se puede permitir como resultado de un cambio de amplitud determinada en la tensión de entrada (llamada también tensión de alimentación), cuando la fuente opera con una corriente de carga determinada y fija. Usualmente la corriente de prueba es la máxima corriente nominal. Las demás condiciones de operación también deben permanecer en su valor nominal durante la prueba.

En el caso de las fuentes de tensión reguladas cuya alimentación es la línea AC esta regulación suele llamarse "regulación de línea".

$$\%V_{Ri} = \frac{V_{o|iMax} - V_{o|imin}}{V_{o|inom}}$$

$\%V_{Ri}$ es la regulación del voltaje de salida ante variaciones de la tensión de alimentación.

$V_{o/jMax}$ es el voltaje de salida cuando la tensión de alimentación está en su valor máximo

$V_{o/min}$ es el voltaje de salida cuando la tensión de alimentación está en su valor mínimo.

$V_{o/inom}$ es el voltaje de salida cuando la tensión de alimentación está en su valor nominal.

Para definir la condición mas estricta de regulación, esta prueba debe hacerse con la fuente entregando la corriente de carga máxima.

2.- Regulación de carga: Establece el valor máximo del cambio de tensión de salida que se puede permitir como resultado de un cambio de valor determinado en la corriente de carga, cuando la fuente opera con un valor de tensión de alimentación determinado y fijo. Usualmente el valor de referencia es el valor de tensión de salida sin carga. Las demás condiciones de operación también deben permanecer en su valor nominal durante la prueba.

$$\%V_{Rc} = \frac{V_{o|sc} - V_{o|cMc}}{V_{o|cMc}}$$

donde:

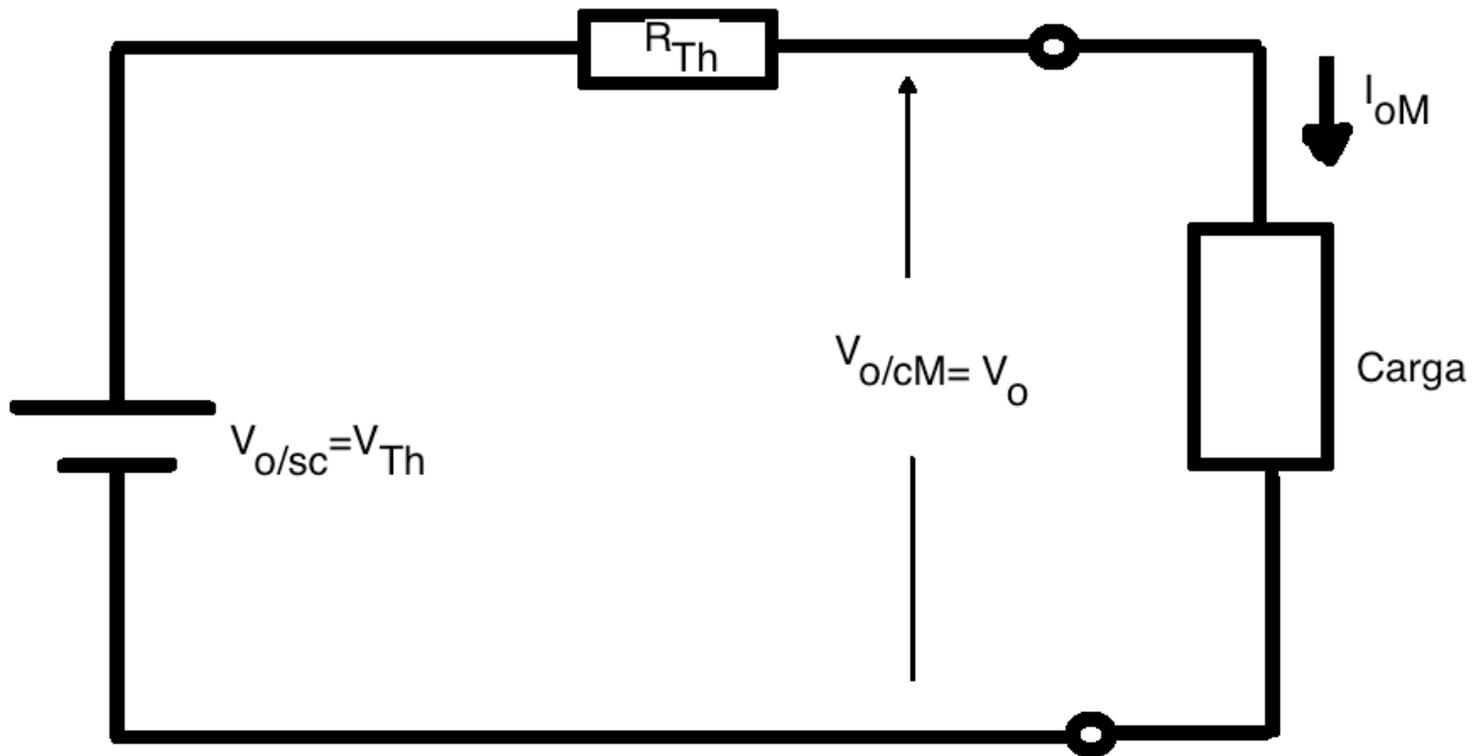
$\%V_{Rc}$ es la regulación del voltaje de salida ante variaciones de la corriente de carga (Regulación con Carga)

$V_{o/sc}$ es el voltaje de salida sin corriente de carga (o con la corriente de carga mínima, si es distinta de cero).

$V_{o/cM}$ es el voltaje de salida con la corriente de carga máxima.

Para definir la condición mas estricta de regulación, esta prueba debe hacerse con la fuente operando con el voltaje de alimentación mínimo, aunque en muchos casos se realiza con el voltaje de alimentación nominal.

La regulación con carga está directamente relacionada con el modelo Thèvenin de la fuente.



Relación entre la regulación con carga y el modelo Thèvenin de la Fuente.

3.- Regulación de temperatura: Establece el valor máximo del cambio de tensión de salida que se puede permitir como resultado de un cambio de valor determinado en temperatura de operación, cuando la fuente opera con valores de tensión de alimentación y de corriente de carga determinados y fijos.

Esta regulación es menos usada que las dos anteriores, pero puede ser muy importante en ciertas aplicaciones de instrumentación de precisión.

Dado que la fuente regulada no es un generador de energía, para operar debe estar conectada a una fuente primaria de energía eléctrica.

En el estado actual de la tecnología la mayoría de las fuentes reguladas reciben la energía eléctrica de la línea AC, y un número menor reciben la energía eléctrica desde una fuente DC, que puede ser una batería o un generador DC, fotovoltaico ("panel solar"), electromecánico ("dinamo") o electroquímico ("celda de combustible").

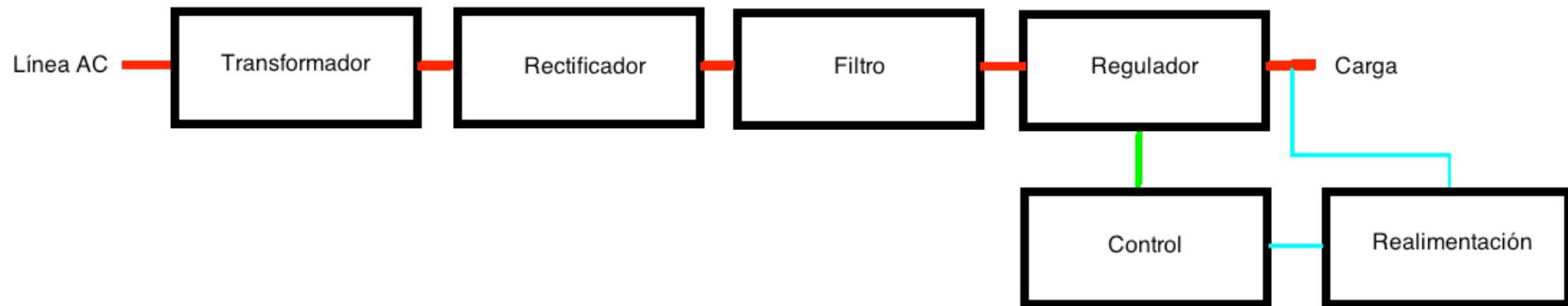


Diagrama de bloques básico de una fuente DC regulada alimentada desde la línea AC.

Los bloques "Transformador", "Rectificador" y "Filtro" realizan funciones de pre-procesamiento de energía, necesarias para la operación de la Fuente.

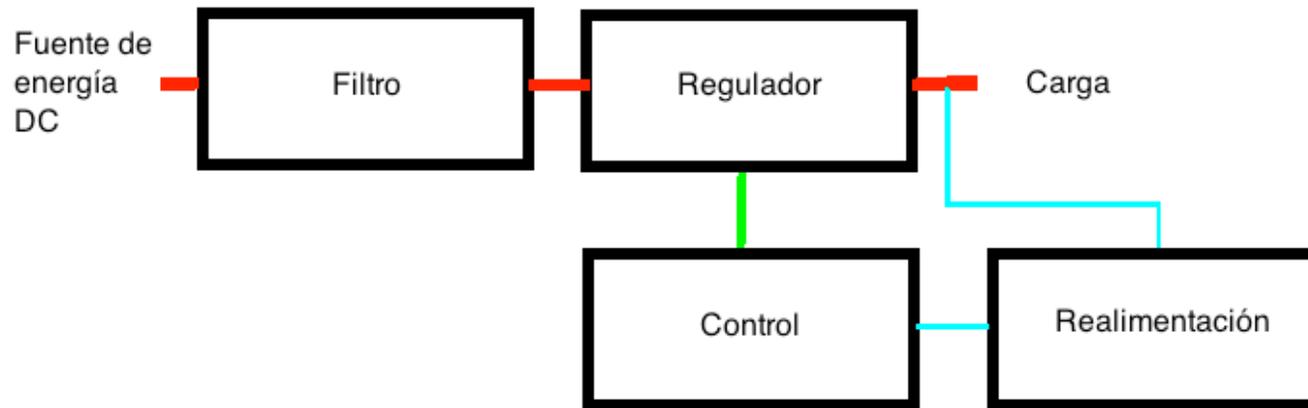


Diagrama de bloques básico de una fuente DC regulada alimentada desde un generador DC genérico.

El bloque de pre-procesamiento de energía "Filtro" deberá ser ajustado al tipo de generador DC empleado, y puede no ser necesario si la alimentación DC proviene de baterías, celdas electroquímicas o paneles fotovoltaicos.

Los bloques "Regulador", "Realimentación" y "Control" son independientes de la fuente de energía eléctrica empleada, y son comunes a los dos casos.

La función de regulación puede cumplirse de dos formas:

A.- Regulación continua: El elemento regulador, usualmente un transistor bipolar conectado en configuración "seguidor de emisor", opera siempre en la zona activa, y su función reguladora es equivalente a la acción de una resistencia variable conectada en serie con la carga. La tensión de salida entregada a la carga es siempre menor en a la tensión de entrada al regulador y de la misma polaridad. La potencia disipada puede ser muy elevada y la eficiencia es en general reducida.

B.- Regulación por conmutación: El elemento regulador (pueden ser varios) opera siempre como un conmutador, en modo "encendido-apagado", y su función reguladora se logra variando la relación entre los tiempos de encendido y apagado (modulación por ancho de pulso, PWM). Dependiendo de la topología del circuito de regulación, la tensión de salida entregada a la carga puede ser menor o mayor que la tensión de entrada al regulador, puede tener polaridad igual o contraria a la de entrada y puede estar o no aislada galvánicamente de la entrada. La potencia disipada es reducida y la eficiencia es en general elevada.

Consideraciones sobre los bloques pre-reguladores de una fuente DC regulada alimentada con energía AC.

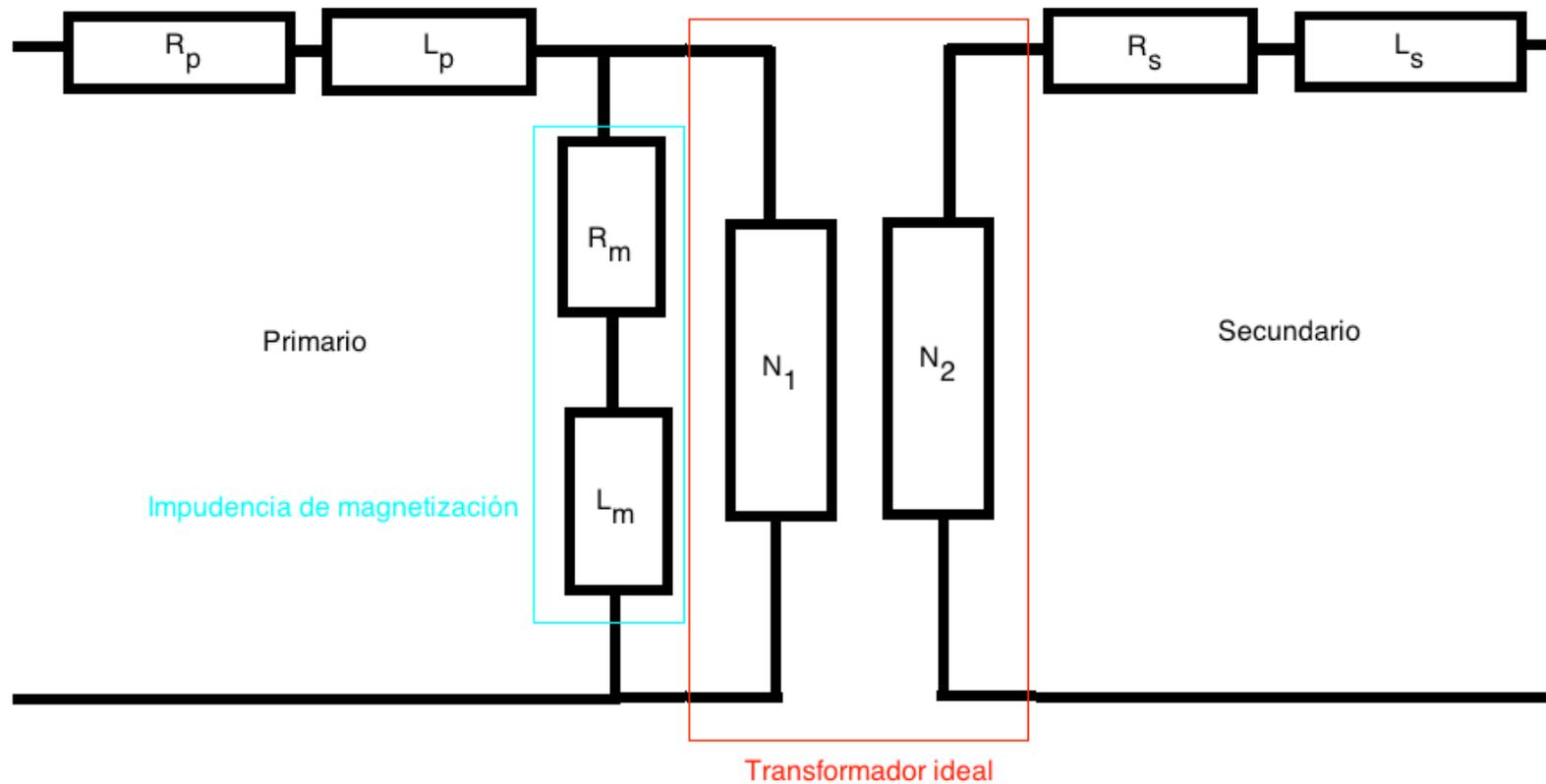
I.- Transformador.

Componente electromagnético formado por:

A.- El núcleo magnético, que forma un circuito magnético usualmente cerrado en el cual se confinan los campos magnéticos generados por los otros dos componentes. Para aplicaciones a frecuencia de línea (60Hz) el núcleo magnético está formado por un arreglo de chapas de aleación Fe-Si, material que se selecciona por ser el que tiene las mejores características de permeabilidad magnética vs. pérdidas a bajas frecuencias.

B.- Los bobinados: son los arreglos de bobinas que conducen las corrientes que interaccionan en el transformador.

En un transformador monofásico del tipo empleado en aplicaciones de baja potencia el transformador tiene dos bobinados: el "primario", conectado a la entrada y el "secundario", que es la salida.



Modelo circuital del transformador monofásico de baja frecuencia.

R_p : resistencia del alambre del bobinado primario.

L_p : Inductancia de dispersión del bobinado primario, genera el flujo del primario que se dispersa fuera del núcleo y no interviene en la interacción.

R_s : resistencia del alambre del bobinado secundario.

L_s : Inductancia de dispersión del bobinado secundario, genera el flujo del secundario que se dispersa fuera del núcleo y no interviene en la interacción.

L_m : Inductancia de magnetización, genera el flujo magnético en el núcleo que produce la interacción.

R_m : Resistencia de magnetización, representa las pérdidas producidas en el núcleo por las variaciones del flujo magnético.

La corriente que circula en el primario, i_1 , induce un flujo magnético en el núcleo proporcional a su valor y al número de vueltas en el bobinado primario, N_1 . En primera aproximación (transformador ideal), con un acople ideal en el flujo, el flujo magnético en el núcleo induce una tensión en el bobinado secundario que es proporcional al valor del flujo y al número de vueltas del bobinado secundario, N_2 .

En el caso ideal se tiene:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

$$P_1 = P_2$$

$$P_1 = V_1 I_1$$

$$P_2 = V_2 I_2$$

$$V_1 I_1 = V_2 I_2$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

En primera aproximación, para definir el bloque transformador de una fuente se trabaja con el modelo ideal; en base a la tensión de alimentación primaria, usualmente 120Vrms, 60Hz (nominal) y la tensión deseada en la carga se calcula el valor de la relación ideal de transformación, N_1/N_2 y, dada la corriente de entrada que requiere el regulador, que será la corriente del secundario del transformador, I_2 , se calcula la corriente en el primario y la potencia nominal del transformador que se desea, datos a emplear en el diseño detallado del mismo.

El diseño detallado del transformador debe considerar el modelo real y es un trabajo especializado.

Una vez construido el transformador, se puede medir el valor de los componentes no ideales, los cuales producen una caída de tensión que debe ser tomada en cuenta para ajustar el diseño final de la fuente empleando el modelo exacto.

Ajuste de la relación del número de vueltas.

La definición de los números de vueltas de los bobinados puede requerir de varias iteraciones, y el valor inicial asignado a uno de los dos bobinados es relativamente arbitrario.

Por ejemplo, si se inicia con 100 vueltas en el primario (N1), y una tensión nominal de entrada de 120Vrms, y se desea una tensión nominal de 12,6Vrms en el secundario (relación de transformación de 10/1), el primer cálculo resulta:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{V_2}{V_1} \Rightarrow N_2 = \frac{(12,6)(100)}{120} = 10,5$$

Por razones evidentes un valor fraccionario en el número de vueltas no es aceptable, por lo que hay que considerar alternativas:

a) Redondear hacia abajo el número de vueltas ($N_{2a}=10$), calcular el valor de la tensión de salida obtenida con el mismo número de vueltas en el primario:

$$V_{2a} = \frac{N_{2a}V_1}{N_1} = \frac{(10)(120)}{100} = 12V_{rms}$$

b) Redondear hacia arriba el número de vueltas ($N_{2b}=11$), calcular el valor de la tensión de salida obtenida con el mismo número de vueltas en el primario:

$$V_{2b} = \frac{N_{2b}V_1}{N_1} = \frac{(11)(120)}{100} = 13,2V_{rms}$$

c) Dejar fijo el número de vueltas del secundario, por ejemplo en 10 ($N_{2c}=10$) y calcular el número de vueltas en el primario (N_{1c}) necesario para obtener la tensión de salida deseada, 12,6Vrms.

$$N_{1c} = \frac{N_{2c}V_1}{V_2} = 95,24$$

d) Redondear el último valor hacia abajo ($N_{1d}=95$), y calcular el voltaje de salida con N_{2c} .

$$V_{2d} = \frac{N_{2d}V_1}{N_{1d}} = \frac{(10)(120)}{95} = 12,63V_{rms}$$

valor muy cercano al deseado.

en todo caso, antes de dedicar un esfuerzo excesivo tratando de obtener el valor exacto, hay que recordar que se están dejando de considerar por lo menos dos fuentes de error significativas:

a) La regulación propia del sistema de alimentación AC, que es por lo menos igual al 10% en sitios "bien regulados", lo que hace que la tensión nominal de 120Vrms en realidad pueda ser cualquier cosa dentro de los límites:

$$108 \leq V_{rms} \leq 132$$

factor que debe ser tomado en cuenta para el resto del diseño.

b) La salida del transformador debe ser modelada con el modelo equivalente de Thèvenin, en la cual la tensión calculada arriba, con el modelo ideal es el valor nominal de la tensión de Thèvenin, y la impedancia de Thèvenin es la impedancia del secundario del transformador (R_s en serie con L_s), lo que produce una caída de tensión función de la corriente de carga.

II.-Rectificador.

En principio existen tres alternativas para obtener la tensión rectificadora que requiere el resto de la fuente:

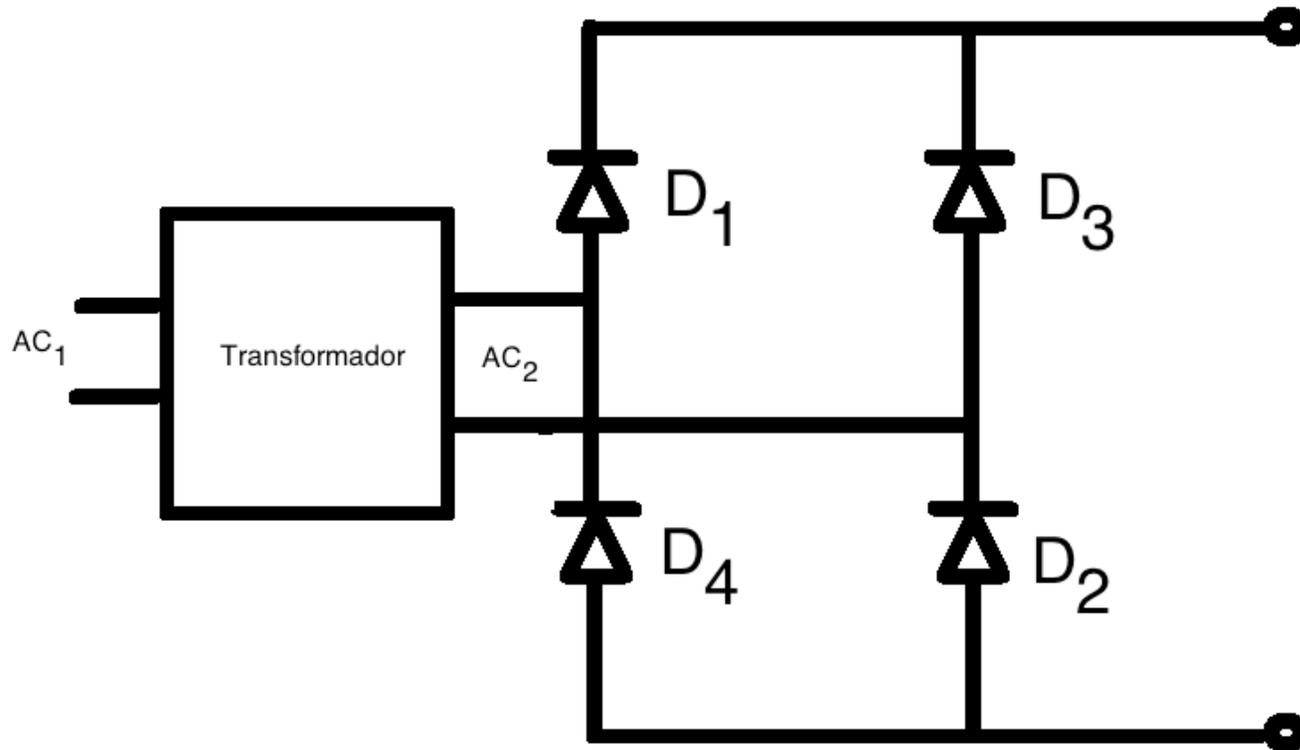
- 1.- Rectificador de media onda con un transformador convencional (un primario y un secundario) y un solo diodo.
- 2.- Rectificador de onda completa con dos diodos y un transformador especial con dos secundarios conectados en configuración toma central.
- 3.- Rectificador de onda completa con 4 diodos en configuración puente y un transformador convencional.

La primer configuración es la aparentemente mas simple y barata, pero tiene dos desventajas graves:

a.- Durante todo un semiciclo la salida no recibe energía, lo que obliga a usar un filtro con una capacidad de almacenamiento de energía mucho mayor a la necesaria en las otras dos configuraciones, y por lo tanto mucho mas caro.

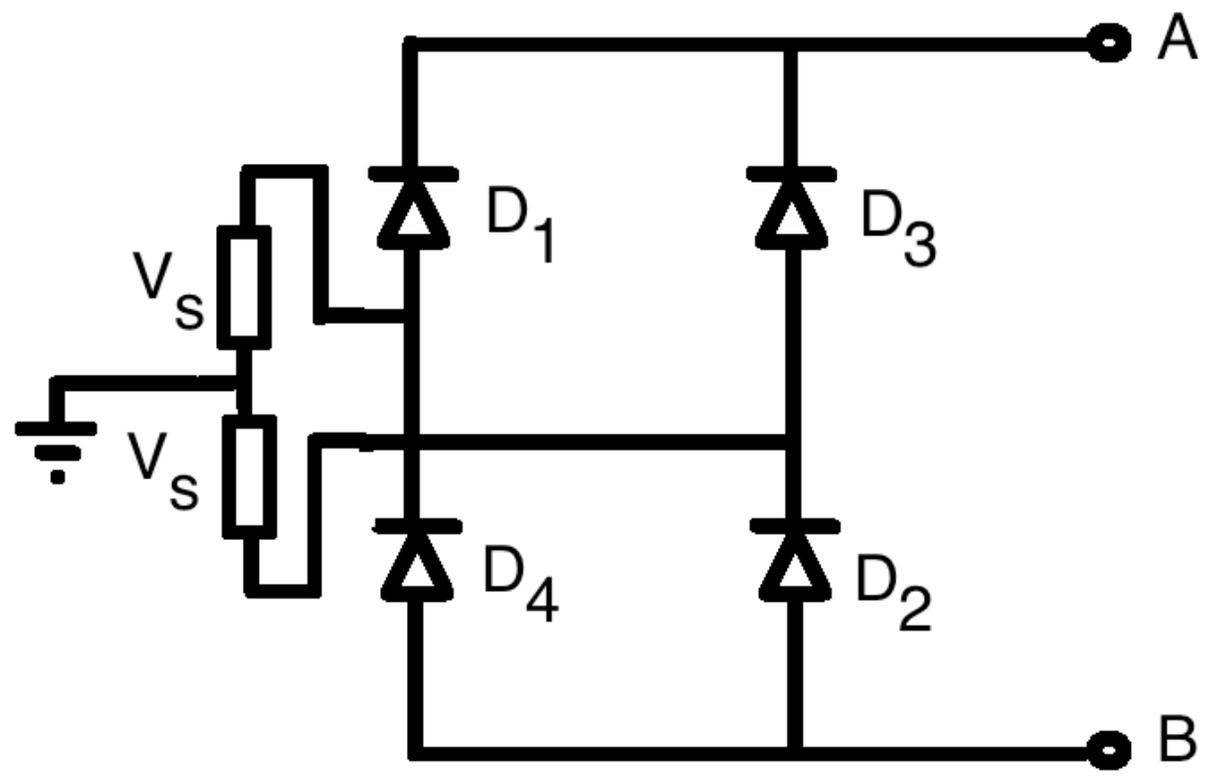
b.-Circula una componente de corriente DC por el secundario del transformador, lo que puede causar problemas de saturación magnética en el núcleo y afectar la operación del mismo.

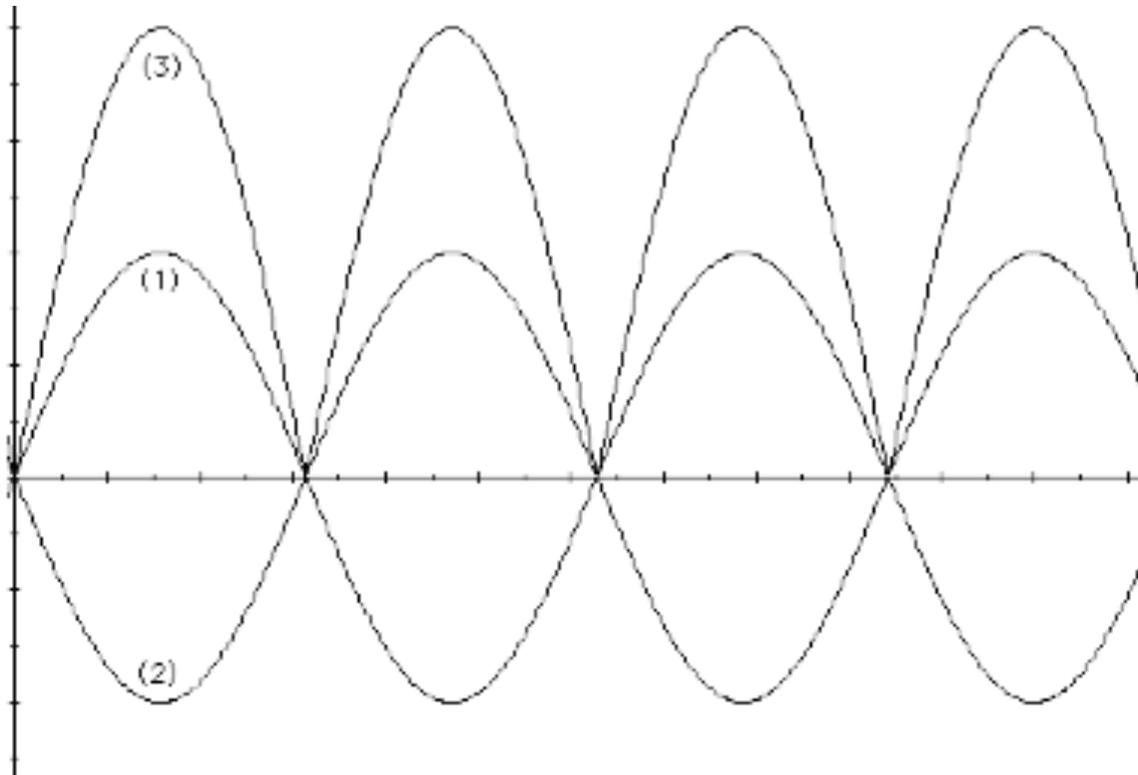
La segunda configuración requiere el uso de un transformador especial de doble secundario, el cual puede ser significativamente mas costoso que el "normal" de un solo secundario; dado el estado actual de la tecnología la diferencia de costo entre los dos transformadores casi seguramente superará el costo de dos diodos, por lo que la selección mas racional es la tercera alternativa, el rectificador de onda completa tipo puente.



Rectificador monofásico puente no controlado (puente con diodos)

Para visualizar la forma de onda del rectificador puente se puede hacer un experimento virtual considerando que el puente está conectado a la salida de un transformador toma central y referir cada una de las dos barras de salida a la toma central de transformador.





Tensiones en un conversor puente monofásico

(1): Tensión A-tierra, V_A .

(2): Tensión B-tierra, V_B .

(3): Tensión de salida, V_{AB} , en las barras DC, tomando como referencia la barra de ánodos (barra inferior).

El valor de la tensión de salida en este caso sería $2V_s$, el doble de la tensión obtenible con el transformador toma central y el rectificador de onda completa de dos diodos; e general, como el puente se alimenta con un transformador de un solo bobinado secundario, si el valor de la tensión de ese secundario es también V_s , la tensión obtenida con el puente será V_s , tensión que se obtiene en este caso con un número de vueltas en el secundario igual a la mitad de las que serían necesarias en el transformador toma central, lo que no solo ahorra el 50% del material de cableado, sino que al ocupar un espacio menor al 50% (no se requiere el acceso a la toma central), permite también emplear un núcleo mas pequeño y menos pesado.

Por supuesto la desventaja es que se requiere el doble de diodos, lo que aumenta el conteo de componentes y eleva el costo.

Sin embargo, dada la tendencia a la baja en el costo de los semiconductores, el aumento de costo tiende a ser poco importante; además la tendencia general es no emplear diodos individuales sino puentes integrados (4 diodos en un encapsulado común), lo que en vez de aumentar el número de componentes individuales tiende a reducirlo (también existen parejas de diodos en un solo encapsulado).

Selección de los diodos.

1.- Voltaje de bloqueo:

Los diodos del puente deben ser capaces como mínimo de bloquear la tensión pico del secundario del transformador, $\sqrt{2}V_s$.

2.- Corriente promedio:

Los diodos del puente deben ser capaces como mínimo de soportar una corriente promedio igual al valor de la máxima corriente DC que pueda ser demandada por el bloque regulador. Esa corriente en general será mayor que la corriente entregada a la carga de la fuente, dado que en general todos los circuitos de la fuente se alimentan a partir del rectificador.

3.- Corriente pico.

Los diodos del puente deben ser capaces como mínimo de soportar la corriente pico requerida para cargar el condensador de filtrado.

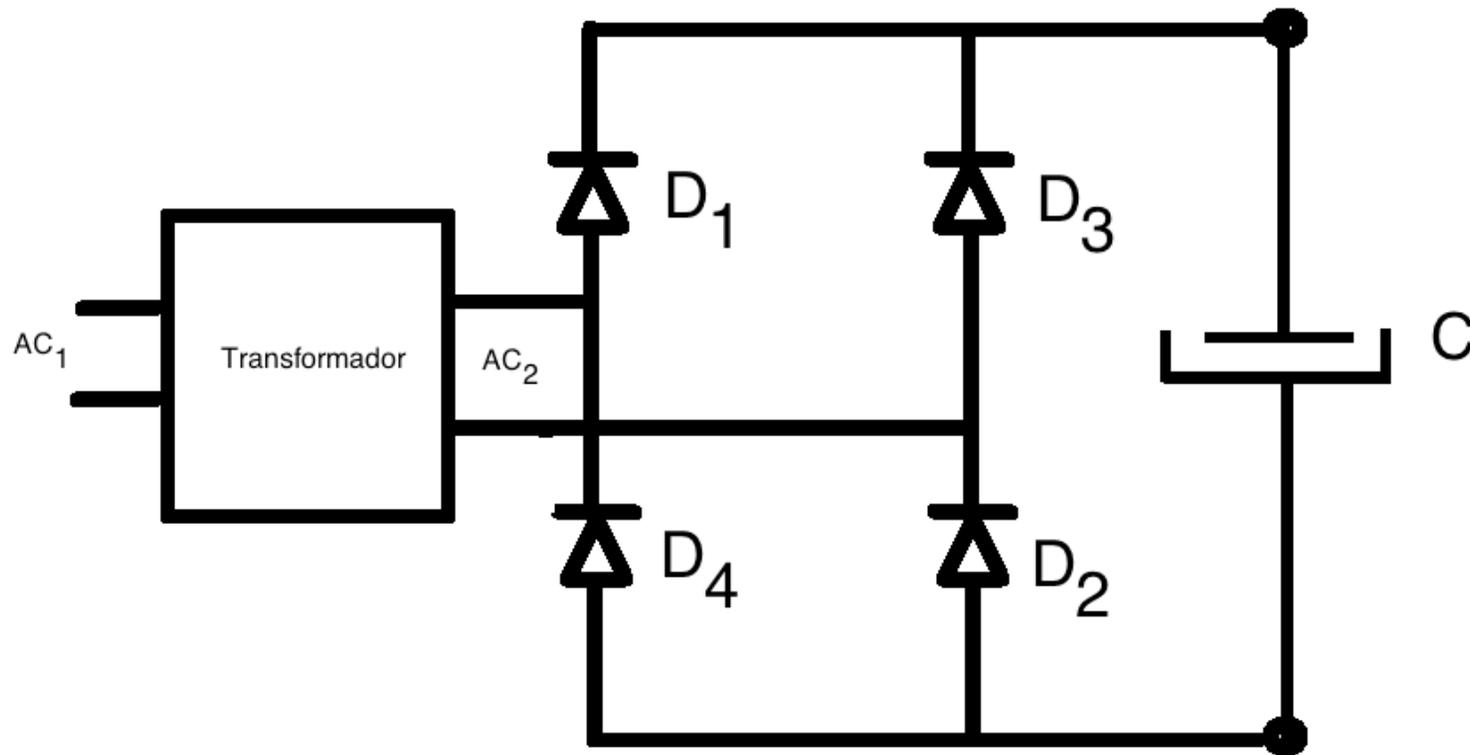
4.- Corriente rms

Los diodos del puente deben ser capaces como mínimo de soportar la corriente rms requerida para cargar el condensador de filtrado.

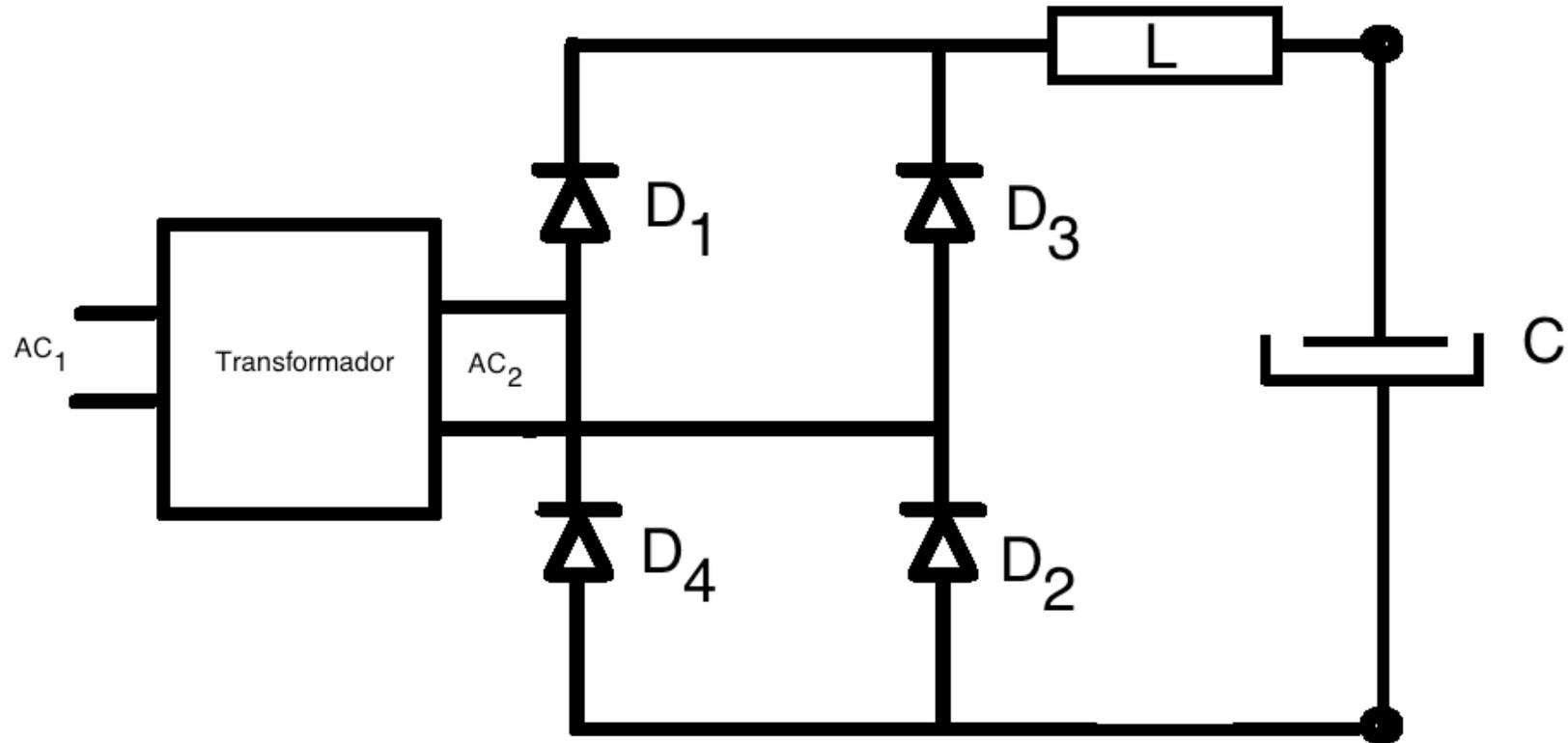
III:- Filtrado.

La forma de onda de salida del rectificador es pulsante y llega a cero en cada semiciclo de la línea; para poder mantener una salida constante regulada es necesario agregar un elemento (o conjunto de elementos) que sea capaz de almacenar energía o, en términos de la estructura armónica de la salida del rectificador, filtre el componente alterno e, idealmente, deje pasar solo el componente DC de la señal.

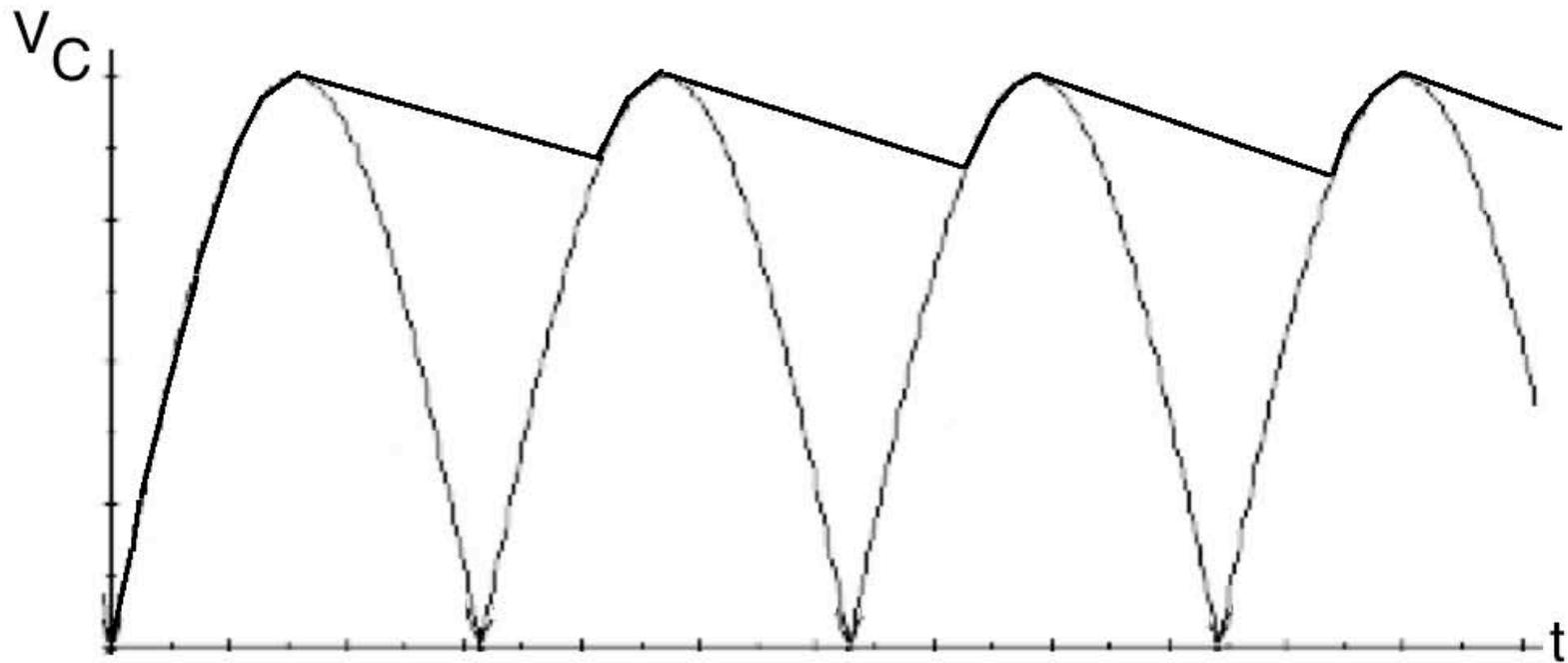
En fuentes de baja potencia el filtro DC esta formado generalmente por un condensador (o un arreglo de condensadores para obtener el valor de capacidad necesario).

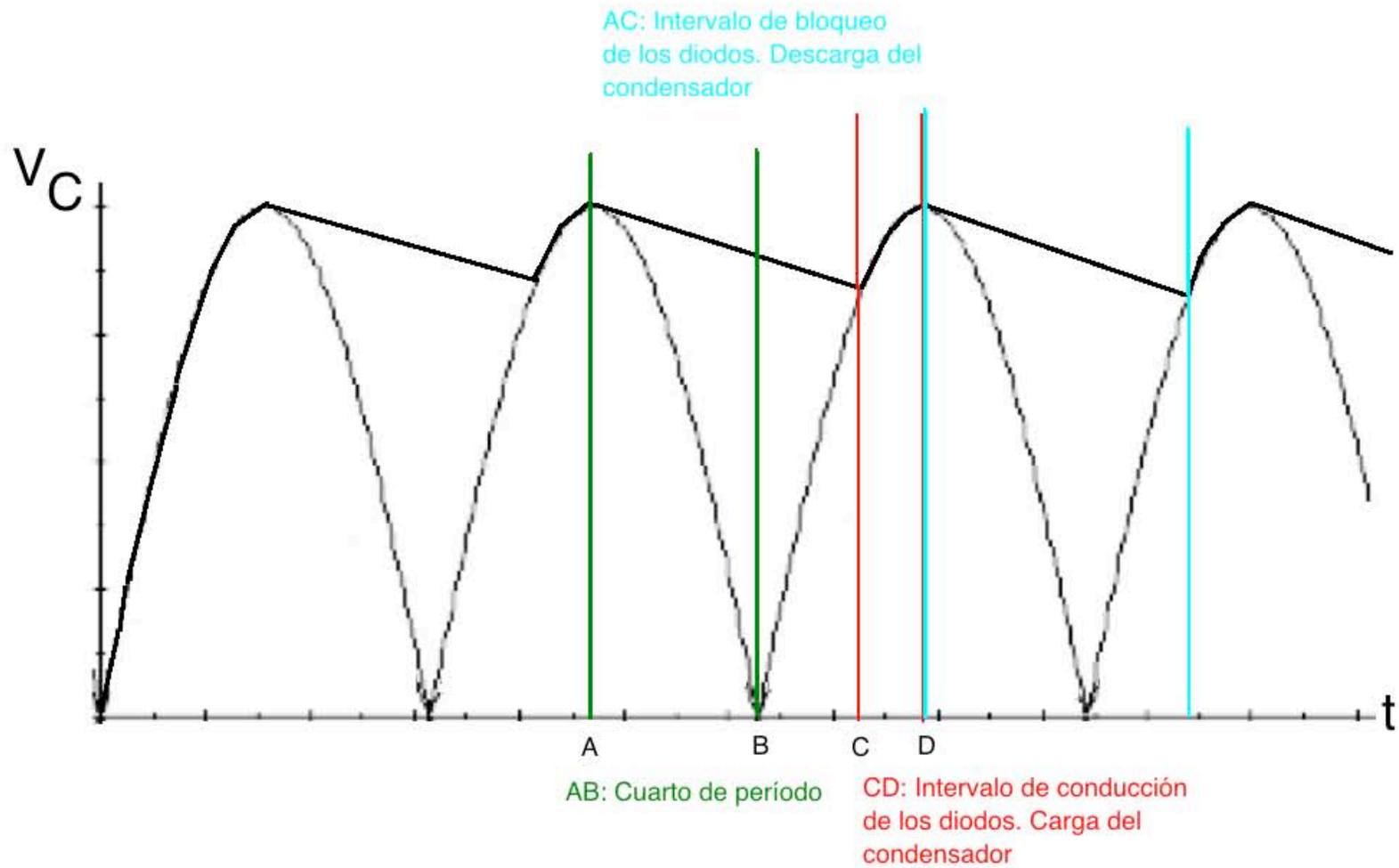


En las fuentes monofásicas de mayor potencia se pueden encontrar filtros de dos elementos , L y C, para reducir el tamaño del condensador.



Considerando el efecto de la corriente que es consumida por el regulador, la forma de onda de la tensión en el condensador es:





En el instante A:

$$V_C = V_{CMax} = V_{spico} - 2V_{AK}$$

Y los dos diodos correspondientes en el puente están conduciendo y el condensador se está cargando.

Un instante después la tensión en los diodos es menor que en el condensador, el puente se bloquea y el condensador entra en el ciclo de descarga, entregando toda la corriente requerida por el circuito de regulación, I_L .

Asumiendo que I_L permanece constante durante el intervalo de descarga, la caída de tensión en el condensador es lineal:

$$v_C(t) = V_{CMax} - \Delta V_C = V_{CMax} - \frac{I_L t}{C}$$

en este caso se usa como referencia de inicio del tiempo el punto de máximo de la onda de voltaje, que ocurre $T/4$ después del cruce por cero.

El ciclo de descarga del condensador termina cuando la tensión de salida del puente inversor alcanza el valor de la tensión en el condensador en el instante C y los diodos vuelven a entrar en conducción.

En ese momento se cumple:

$$V_{\text{rectificador}}(t_C) = V_s(t_C) - 2V_{AK}$$

$$V_C(t) = V_{CMax} - \frac{I_L \Delta t}{C}$$

El tiempo t_C se mide desde el cruce por cero de la tensión:

$$\Delta t = \frac{T}{4} + t_C$$

$$V_S(t_C) - 2V_{AK} = V_{CMax} - \frac{I_L \Delta t}{C} = V_{CMax} - \frac{I_L \left(\frac{T}{4} + t_C \right)}{C}$$

$$V_S = E \sin \omega t$$

$$E \sin(\omega t_C) - 2V_{AK} = (E - 2V_{AK}) - \frac{I_L \left(\frac{T}{4} + t_C \right)}{C}$$

$$\sin \omega t_C = \frac{1}{E} \left[E - \frac{I_L \left(\frac{T}{4} + t_C \right)}{C} \right]$$

Esta es una ecuación trascendente que debe ser resuelta por métodos numéricos.

Pero en este caso se tiene un elemento adicional, resultado de la estructura del circuito:

El valor mínimo del voltaje en el condensador no es un parámetro libre, ya que corresponde con el de la mínima tensión de entrada considerada aceptable e el diseño del regulador.

Por lo tanto ΔV_C debe ser conocido para poder diseñar el filtro. En general el diseño de la fuente debe ser ejecutado "desde la carga a la línea".

En este caso:

$$E \operatorname{sen}(\omega t_C) - 2V_{AK} = (E - 2V_{AK}) - \Delta V_C$$

$$\operatorname{sen} \omega t_c = \frac{E - \Delta V_C}{E}$$

$$\omega t_C = \operatorname{arcsen} \left(\frac{E - \Delta V_C}{E} \right)$$

$$t_C = \frac{1}{\omega} \operatorname{arcsen} \left(\frac{E - \Delta V_C}{E} \right)$$

Conocido t_C , el valor del condensador se calcula como:

$$\Delta V_C = \frac{I_L \left(t_C + \frac{T}{4} \right)}{C}$$

$$C = \frac{I_L \left(t_C + \frac{T}{4} \right)}{\Delta V_C}$$

Los diodos conducen desde el instante t_C hasta que concluye el cuarto de ciclo correspondiente.

El tiempo de conducción de los diodos, t_d , es:

$$t_d = \frac{T}{4} - t_C = \frac{T}{4} - \frac{1}{\omega} \arcsen\left(\frac{E - \Delta V_C}{E}\right)$$

Durante este tiempo de conducción la corriente en los diodos es la suma de la corriente de entrada en el regulador, I_L , mas la corriente de recarga del condensador, $i_{Cr}(t)$, donde:

$$i_{Cr}(t) = C \frac{dv_C(t)}{dt}$$

Por conexión, durante el intervalo de conducción de los diodos la tensión en el condensador es exactamente la tensión de salida del rectificador, luego:

$$v_C(t) = E \sin \omega t - 2V_{AK}$$

$$i_{Cr}(t) = C \left[\frac{d}{dt} (E \sin \omega t - 2V_{AK}) \right] = C \omega E \cos \omega t$$

$$i_d(t) = I_L + C \omega E \cos \omega t$$

Y la corriente máxima en los diodos, i_{dMax} , resulta:

$$i_{dMax} = I_L + C\omega E \cos \omega t_c$$

Conocida la ecuación de la corriente en los diodos y el tiempo de conducción de los mismos, se puede proceder al cálculo de los valores promedio y rms de dicha corriente para completar de definir las características de los componentes que deben ser empleados en el rectificador.

Dado que el objetivo es dimensionar los componentes y que es tolerable un cierto nivel de sobre-dimensionamiento, estos cálculos se pueden simplificar aproximando el pulso de conducción de los diodos a un pulso rectangular cuya altura es el valor pico de la corriente en los diodos, y su duración t_d .

Con esta simplificación:

$$\bar{i}_d = \frac{1}{T} \int_0^T i_d(t) dt = \frac{1}{T} i_{dMax} t_d$$

El valor promedio aproximado de la corriente en los diodos resulta:

$$\bar{i}_d = \frac{1}{T} \int_0^T i_d(t) dt = \frac{i_{dMax} t_d}{T}$$

Y la corriente rms aproximada:

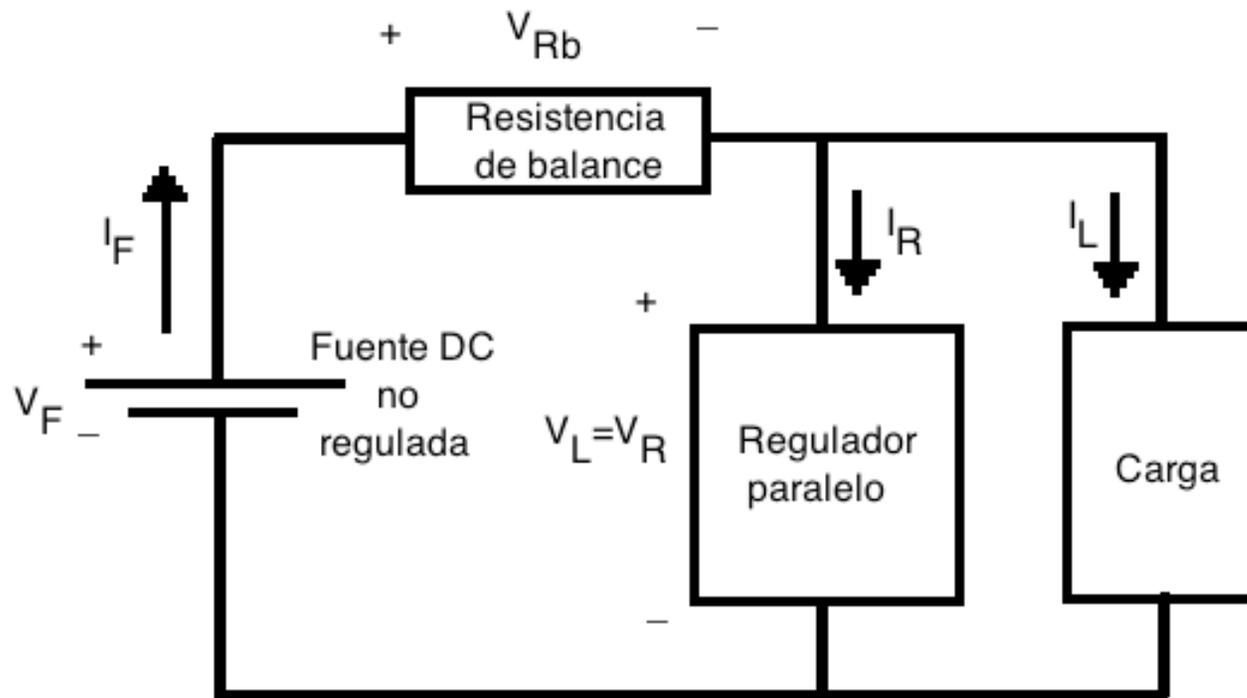
$$i_{drms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (i_d(t))^2 dt} = i_{dMax} \sqrt{\frac{t_d}{T}}$$

IV. Regulador.

La regulación continua se puede realizar con dos topologías:

A.- Regulación Paralela.

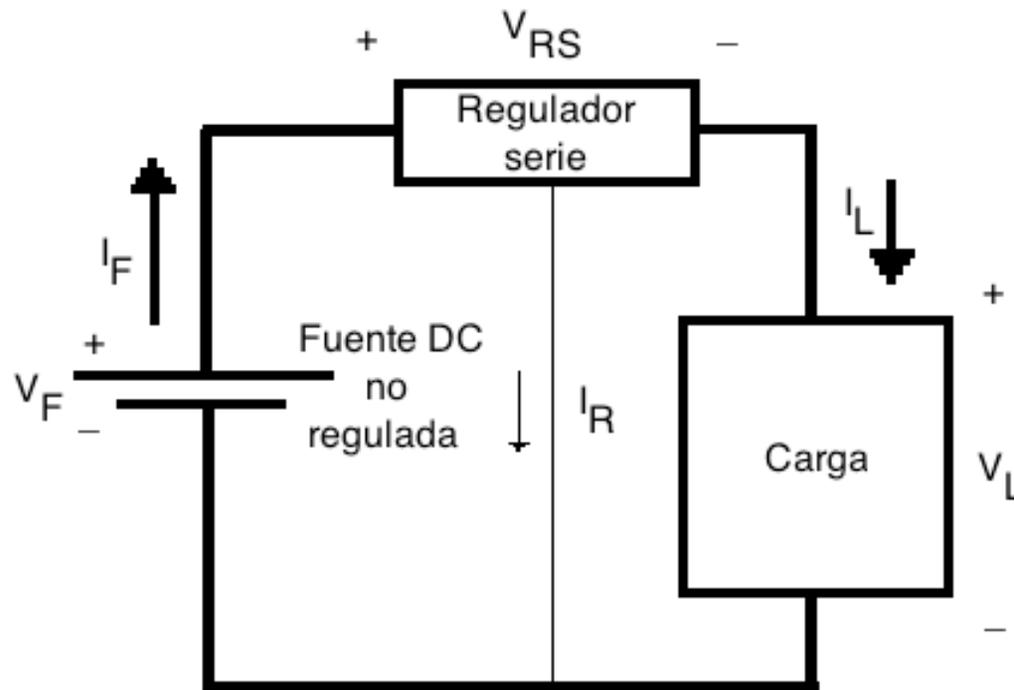
B.- Regulación Serie



$$V_F = V_{Rb} + V_R = V_{Rb} + V_L$$

$$I_F = I_R + I_L$$

Topología de la Regulación Paralela

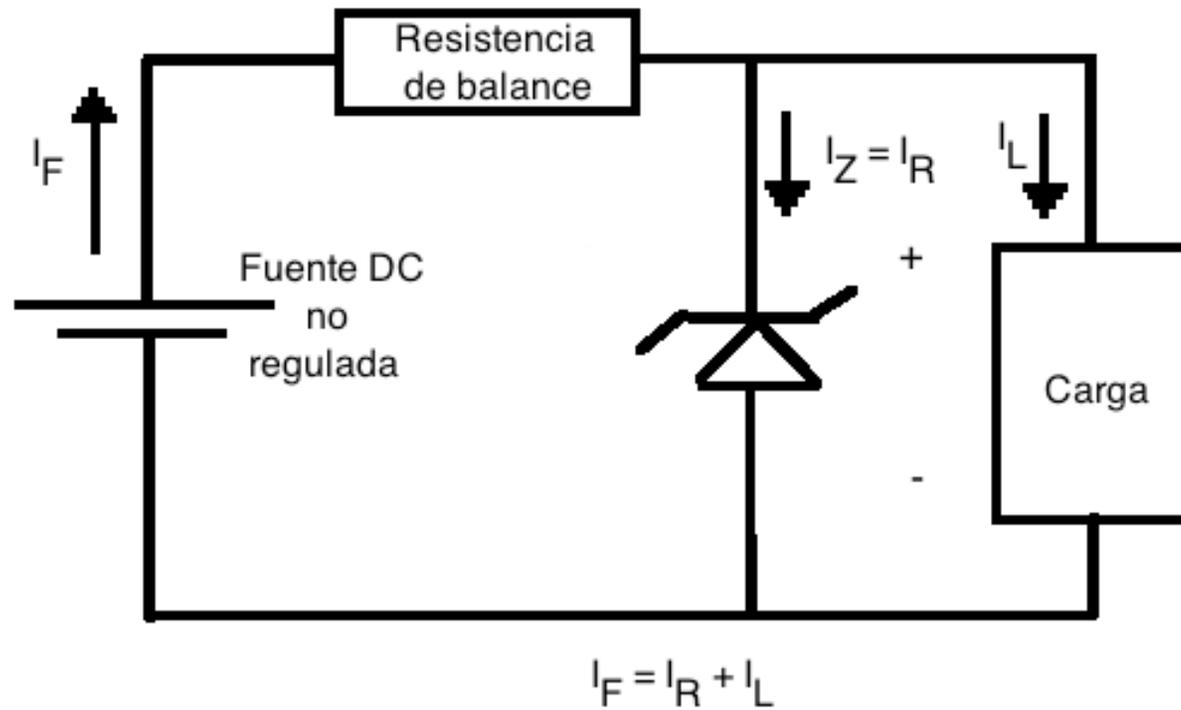


$$V_F = V_{Rs} + V_L$$

$$I_F = I_L + I_R \quad (I_R \ll I_L \rightarrow I_L \approx I_F)$$

Topología de la Regulación Serie

La regulación paralela es inherentemente menos eficiente que la regulación serie, y por lo tanto se usa en aplicaciones especiales de baja potencia en donde la sencillez que ofrece un regulador paralelo en base a un diodo Zener es una ventaja significativa, en aplicaciones de muy baja corriente (miliamperios), usualmente como generadores de una referencia de tensión para otros circuitos (principalmente fuentes de alimentación).



Regulador paralelo básico con diodo Zener.

Rango de regulación, ΔI_R :

$$\Delta I_R = \Delta I_Z = I_{ZM} - I_{Zm}$$

donde I_{ZM} , máximo valor de la corriente de Zener es:

$$I_{ZM} = \frac{P_{ZM}}{V_{ZM}}$$

Donde P_{ZM} es la máxima potencia que puede disipar el diodo Zener y V_{ZM} es el valor del voltaje Zener en esas condiciones.

I_{Zm} es el valor mínimo de la corriente necesario para mantener la operación en el modo Zener.

Regulación serie

Los reguladores continuos serie son mucho mas usados que los reguladores paralelo, y la potencia entregada puede estar alcanzar valores del orden de los centenares de vatios (o incluso kW en algunas aplicaciones especiales).

Su estructura es mas compleja, y por su forma de operación se pueden considerar dos tipos básicos:

a.- Reguladores en lazo abierto: No existe realimentación, y los cambios en el valor de salida debidos a cambios en la carga, alimentación o cualquier otro factor no son compensados.

La regulación es por lo tanto pobre, y este tipo esta relegado a fuentes de muy baja potencia en aplicaciones poco críticas y, usualmente, de carga constante.

b.- Reguladores en lazo cerrado: El valor de la tensión de salida se realimenta al sistema de control, para buscar compensar automáticamente las alteraciones del voltaje de salida debidas a cambios en la carga, la tensión de alimentación, la temperatura de operación, tolerancias en los componentes y otros factores.

Su regulación es mucho mejor y, si se acepta la complejidad asociada, la precisión puede ser muy elevada y los errores de regulación totalmente marginales.

Este tipo de fuentes, que dominó el mercado general de fuentes antes del desarrollo de las fuentes de regulación por conmutación, energéticamente mas eficientes, aún es el preferido en aplicaciones de instrumentación de laboratorio.

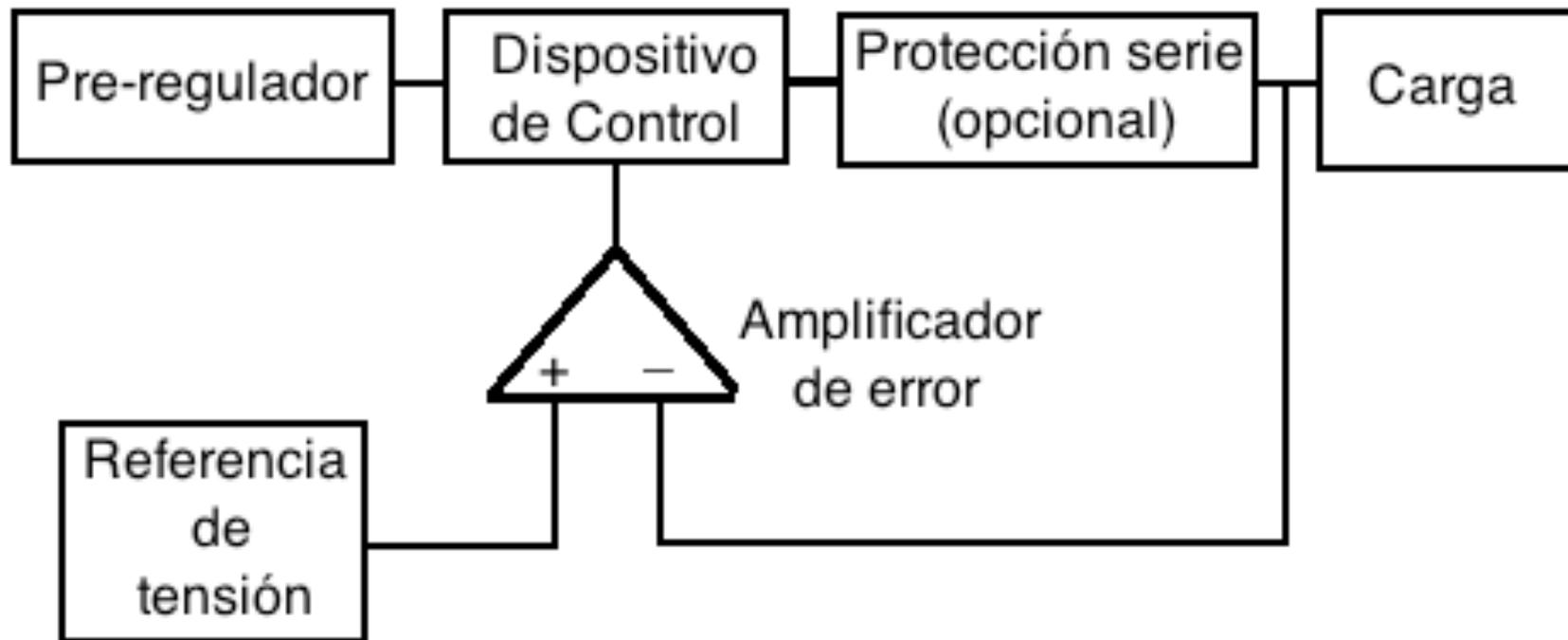
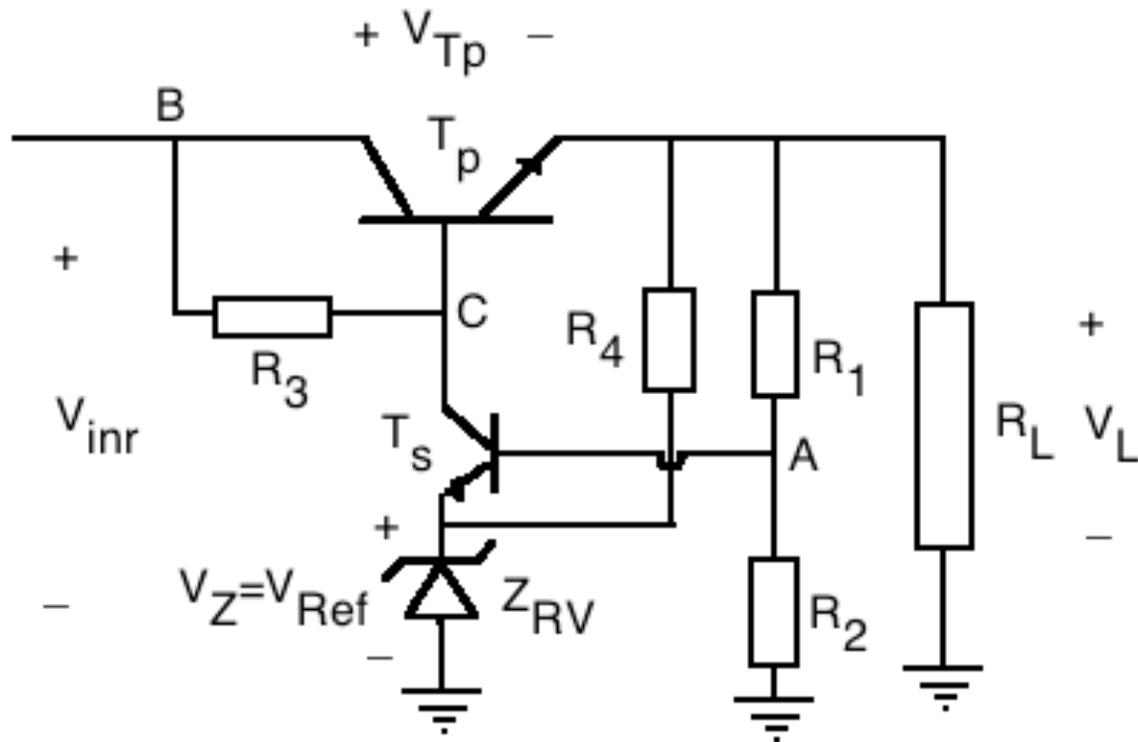


Diagrama de bloques genérico de una fuente de tensión regulada serie con realimentación del voltaje de salida.

El diagrama de bloques anterior se puede implementar con un circuito muy simple, que cumple con las funciones básicas, pero cuyo comportamiento no es óptimo.



En este circuito básico V_{inr} es la tensión de entrada no regulada que viene del sistema pre-regulador (transformador, rectificador y filtro), el transistor T_p es el dispositivo de control de la tensión de salida regulada, V_L , el transistor T_s es el amplificador de error, el diodo Zener y su resistencia de polarización, R_4 , generan la referencia de voltaje, las resistencias R_1 y R_2 forman el divisor de tensión que toma la muestra del voltaje de salida, V_L , para realimentarla al amplificador de error y R_3 es el camino de alimentación de T_p .

El circuito puede operar también si R_4 se conecta directamente a V_{inr} , pero la regulación es menor.

Asumiendo que el circuito regulador esta operando en la zona lineal y que por lo tanto todos los componentes semiconductores están polarizados en su zona activa, se cumple:

$$V_A = I_{R2}R_2$$

$$I_{R1} = I_{R2} + I_{beTs}$$

$$V_A = V_Z + V_{beTs}$$

$$V_A = V_L - I_{R1}R_1$$

$$V_L = V_A + I_{R1}R_1 = V_Z + V_{beTs} + I_{R1}R_1$$

Nótese que la serie de ecuaciones anteriores son ciertas y no incluyen aproximaciones.

Si ahora se impone como condición a cumplir en el diseño que:

$$I_{bTs} \ll I_{R2}$$

se puede aproximar:

$$I_{R1} \approx I_{R2} V_A \approx V_L \frac{R_2}{R_1 + R_2} \rightarrow V_L \approx V_A \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

Si se define:

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

$$V_L \approx \frac{V_A}{\beta}$$

$$V_A = \frac{V_Z + V_{beTs}}{\beta}$$

Por su parte, en el circuito del Zener:

$$I_Z = I_{eTs} + I_{R4}$$

$$V_Z = V'_Z + I_Z r_Z = V'_Z + r_Z (I_{eTs} + I_{R4})$$

donde V'_Z es la tensión nominal de rodilla del Zener.

Acción de regulación del circuito:

I.-Frente a variaciones de carga:

Si, con el regulador operando, en el instante $t=0$ se produce una variación en la resistencia equivalente de carga de valor ΔR_L , mientras todos los demás parámetros se mantienen constantes, la secuencia de cambios es la siguiente:

1.- El cambio en el valor de la carga produce un cambio en la tensión sobre la carga (la tensión de salida de la fuente):

$$\pm\Delta V_L = \pm\Delta R_L I_L (0^-)$$

2.- Esto produce un cambio en la tensión de realimentación:

$$\pm\Delta V_A = \pm\Delta V_L \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

3.- En estas condiciones, si $\Delta R_L > 0$:

$$\Delta V_L > 0$$

$$\Delta V_A > 0$$

$$\Delta V_{beTs} > 0$$

4.-El incremento en la tensión base-emisor del transistor T_s fuerza un incremento en la corriente colector-emisor de dicho transistor;

$$\Delta I_{ceT_s} > 0$$

y, por supuesto:

$$\Delta I_{cT_s} > 0$$

5.-A nivel del nodo C el incremento en la corriente de colector de T_s cambia el equilibrio de corrientes:

$$I_{R3} = I_{cTs} + I_{bTp}$$

En primera aproximación se cumple:

$$\Delta I_{cTs} = -\Delta I_{bTp}$$

6.-La reducción en la corriente de base del transistor T_p produce una reducción en la corriente colector-emisor de dicho transistor:

$$|\Delta I_{ceTp}| = \beta_{Tp} |\Delta I_{ceTp}| = |\Delta I_L|$$

7.-La reducción en la corriente de carga tiende a compensar el efecto en la reducción en la resistencia equivalente de carga, haciendo que el voltaje en la carga vuelva al valor deseado.

Por supuesto, si el cambio en la resistencia equivalente de carga es de signo contrario, el proceso de regulación ocurre en forma similar, pero cambiando todos los signos de los incrementos considerados en este análisis.

II.-Frente a variaciones en la tensión de alimentación no regulada, V_{inr} .

Si, con el regulador operando, en el instante $t=0$ se produce una variación en la tensión de alimentación no regulada de valor ΔV_{inr} , mientras todos los demás parámetros se mantienen constantes, la secuencia de cambios es la siguiente;

1.- 1.- En primera aproximación, el cambio en el valor de la tensión de entrada produce un cambio en la tensión sobre la carga (la tensión de salida de la fuente):

$$\pm\Delta V_{inr} = \pm\Delta V_L (0^-)$$

2.- Esto, como en el caso anterior, produce un cambio en la tensión de realimentación:

$$\pm\Delta V_A = \pm\Delta V_L \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Y, por supuesto, de aquí en adelante el proceso de ajuste en el circuito del regulador sigue los mismos pasos hasta lograr compensar el cambio producido en la tensión de salida.

Límite intrínseco de la acción de regulación:

Para cualquiera de las cuatro perturbaciones consideradas ($\pm\Delta R_L$ $\pm\Delta V_{inr}$) el efecto de regulación depende básicamente del control de la corriente de base del transistor de paso, T_p , lo que significa que los límites del rango de regulación de la fuente están definidos por el rango de regulación posible sobre la corriente de base del transistor de paso.

Estos límites están determinados por las condiciones extremas de operación de la fuente.

I.- Operación sin carga.

Si $I_L=0$, la corriente I_{eTp} es mínima y resulta:

$$I_{eTcm} = I_{R1} + I_4 = I_A + I_4$$

Luego:

$$I_{bTpm} = \frac{I_4 + I_A}{\beta_{Tp}}$$

En estas condiciones la corriente de colector del transistor T_s debe estar en su valor máximo:

$$I_{cTsM} = I_{R3} - I_{bTpm}$$

Y, por lo tanto la corriente en el Zener también estará en su máximo valor, I_{ZM} :

$$I_{ZM} \approx I_{I_{cTsM}} + I_{R4}$$

(despreciando la corriente de base)

En estas condiciones, para que el circuito opere sin destruirse, es preciso asegurar que el valor máximo calculado para la corriente de Zener, I_{ZM} sea menor, o en el peor caso igual al valor máximo del Zener impuesto por el límite de la potencia que se puede disipar, I_{ZPM} .

Esto es:

$$I_{ZM} < I_{ZPM} \quad \text{o, en peor caso} \quad I_{ZM} = I_{ZPM}$$

II.-Operación con carga máxima:

Si $I_L = I_{LM}$, la corriente I_{eTp} es máxima y resulta:

$$I_{eTcM} = I_{R1} + I_4 + I_{LM} = I_A + I_4 + I_{LM}$$

Luego:

$$I_{bTpM} = \frac{I_A + I_4 + I_{LM}}{\beta_{Tp}}$$

En estas condiciones la corriente de colector del transistor T_s debe estar en su valor mínimo, pero aún dentro de su región activa:

$$I_{cTsm} = I_{R3} - I_{bTpM}$$

Y, por lo tanto la corriente en el Zener también estará en su mínimo valor, I_{ZM} , que debe estar en su zona activa de Zener

$$I_{Zm} \approx I_{I_{cTsm}} + I_{R4}$$

(despreciando la corriente de base)

En estas condiciones, para que el circuito opere, es preciso asegurar que el valor mínimo calculado para la corriente de Zener, I_{Zm} sea mayor, o en el peor caso igual al valor la corriente de rodilla del Zener, I_{Zr} .

Esto es:

$$I_{Zm} > I_{Zr} \quad \text{o, en peor caso} \quad I_{Zm} = I_{Zr}$$

Cambiar la posición de la resistencia R_4 a la entrada del circuito no soluciona los problemas considerados en estos dos casos, e introduce el problema adicional de que la corriente del Zener pasa a ser modulada directamente también por el rizado en V_{inr} .

"Falta de β "

Los problemas relacionados con la amplitud de la variación de la corriente en el Zener cuando la corriente de carga pasa de un extremo al otro se relaciona directamente con el valor de la ganancia de corriente β del transistor T_c , y es menos importante a medida que β es mayor, por lo que suele denominarse el "problema de falta de β ".

En principio este "problema" puede mejorarse buscando el transistor de mas alta β que sea compatible con los valores máximos de corriente y voltaje que deben manejarse en el regulador.

Si no es posible encontrar un transistor de la β deseada, se debe recurrir a una configuración tipo Darlington de dos o mas etapas amplificadoras.

Adicionalmente, el rango de cambio permisible en la corriente del Zener no solo impone límites absolutos al rango de operación de la fuente regulada, sino que introducen un factor de error que no puede ser corregido por la acción del regulador, ya que al cumplirse que:

$$V_Z = f(I_Z)$$

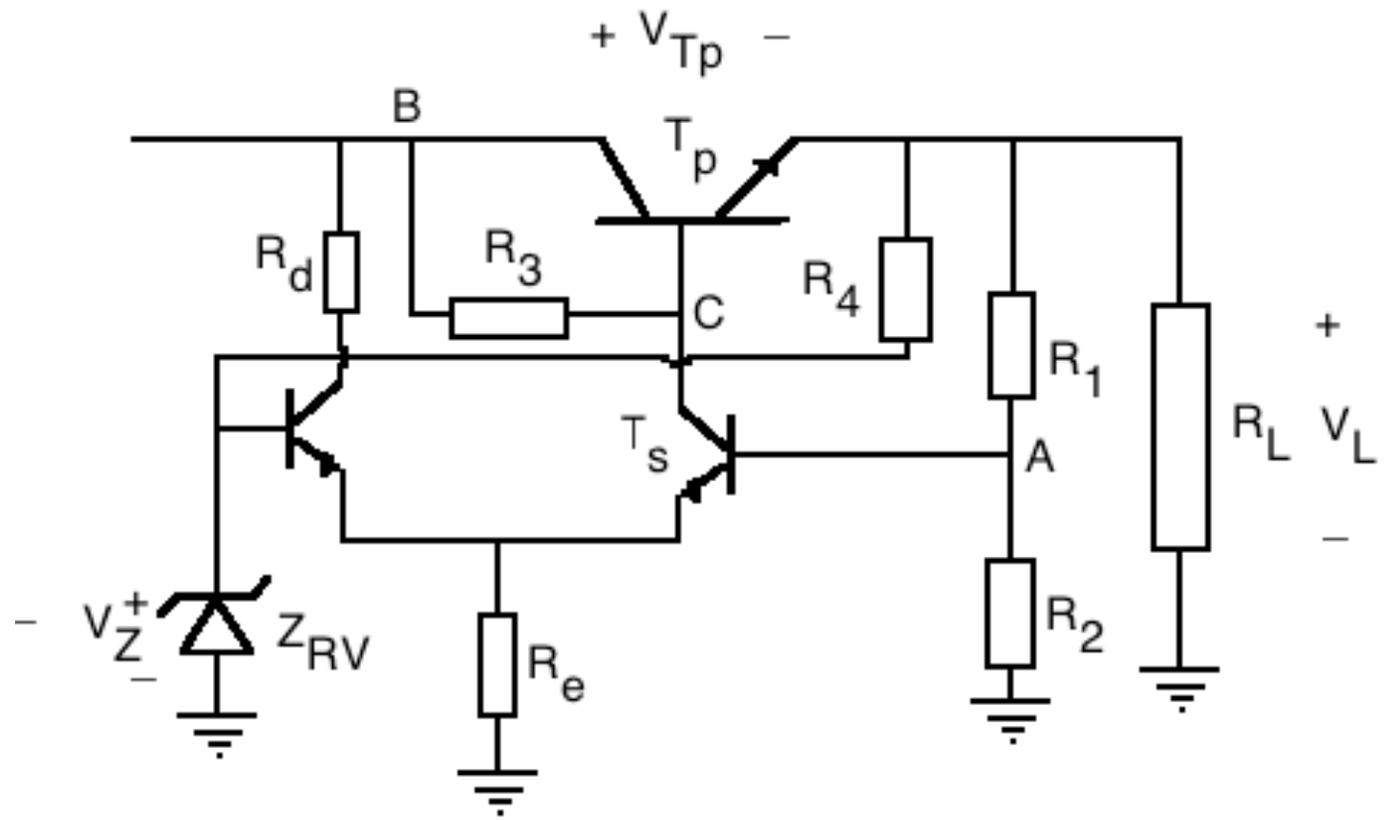
cualquier cambio en la corriente del Zener causa un cambio en la tensión de referencia del circuito y, por lo tanto, un cambio en la tensión de salida:

$$V_L = V_Z + V_{beTs} + I_{R1}R_1$$

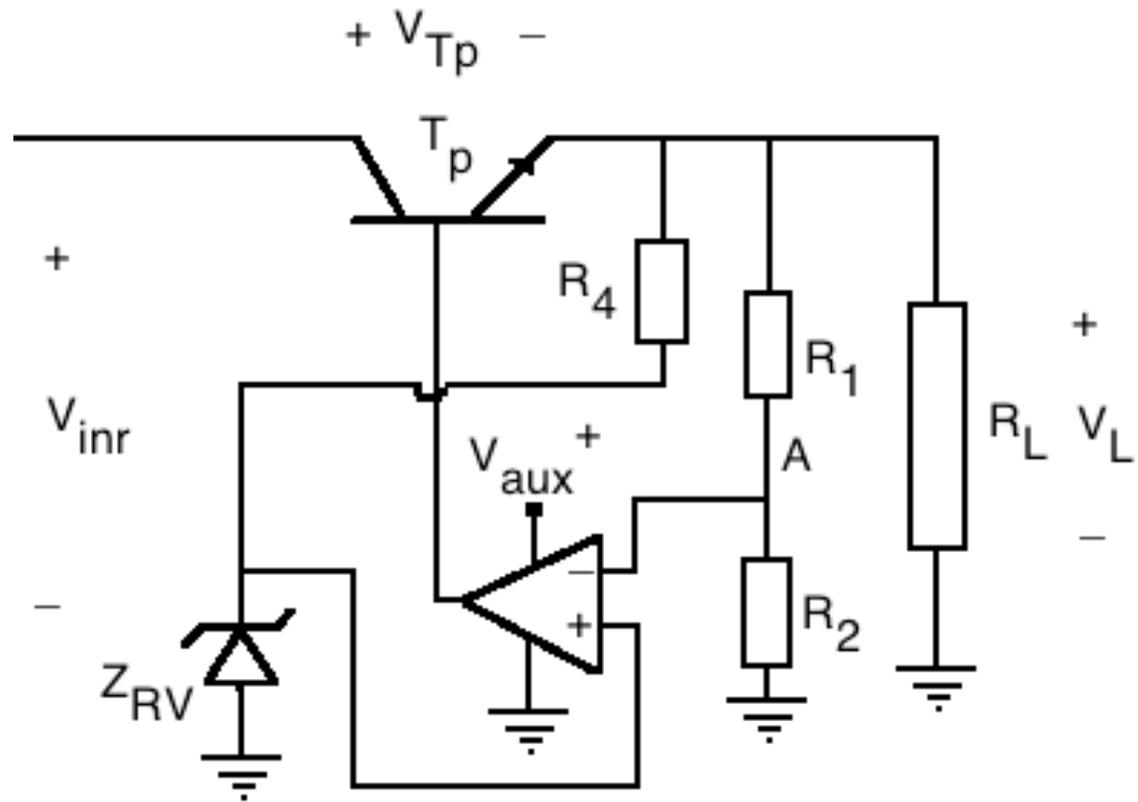
La solución al problema causado porque la acción de regulación de la fuente afecta a la corriente en el Zener que genera la referencia de corriente requiere que la corriente en el Zener sea independiente de la corriente del transistor T_s .

Solucionar este problema requiere introducir un elemento circuital que ofrezca una entrada tipo amplificador diferencial.

Esto se puede implementar con un par diferencial discreto, o incluyendo un Amplificador Operacional (OPAM) en el regulador.



Regulador con par diferencial discreto.



Regulador con amplificador operacional.

La implementación con amplificador operacional ofrece potencialmente altas prestaciones, pero requiere una fuente de alimentación parcialmente regulada adicional para el OPAM, que aumenta la complejidad del circuito.

Modulación de I_{R3} .

En el análisis anterior del proceso de regulación se asumió que el valor de la corriente I_{R3} permanecía constante.

Esto es cierto en general frente a cambios en la carga, pero los cambios en la tensión de alimentación no regulada, V_{inr} , además del efecto directo sobre la salida ya considerado produce un efecto adicional al cambiar también en valor de la corriente I_{R3} . Dado que en general los cambios en V_{inr} son cíclicos, debidos al rizado de salida del filtro, su efecto suele llamarse "modulación de la corriente I_{R3} ".

$$I_{R3} = \frac{V_{R3}}{R_3} = \frac{V_{inr} - V_C}{R_3} = \frac{V_{inr} - (V_L + V_{beTc})}{R_3}$$

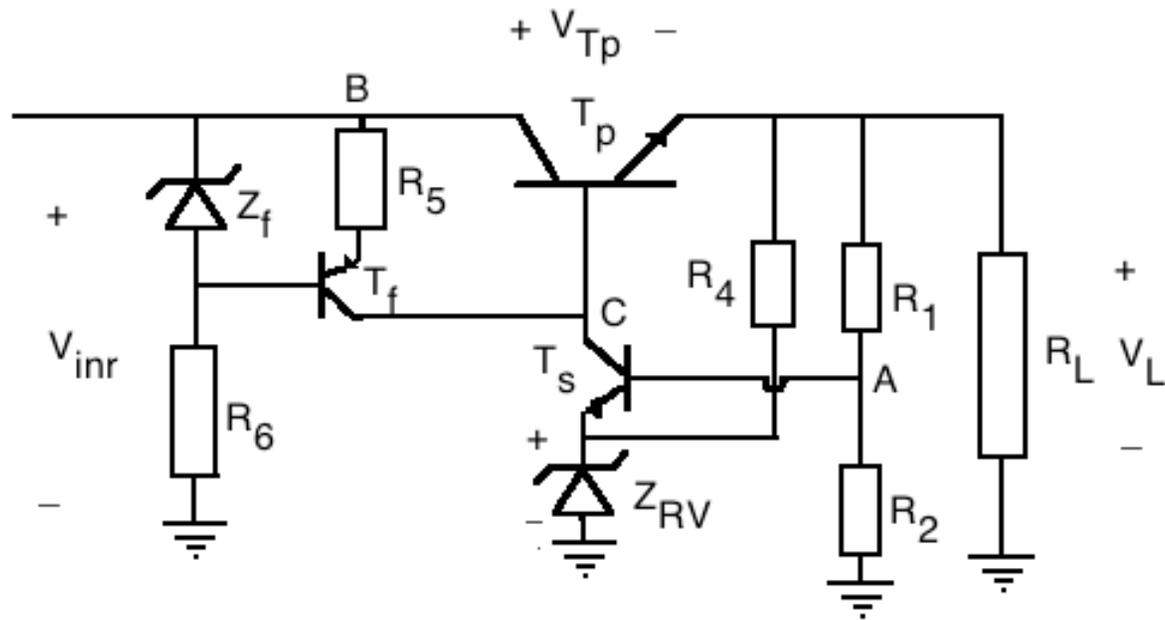
Asumiendo V_C constante para analizar el efecto de la modulación de V_{inr} :

$$I_{R3} = \frac{V_{R3}}{R_3} = \frac{V_{inr} - K}{R_3}$$

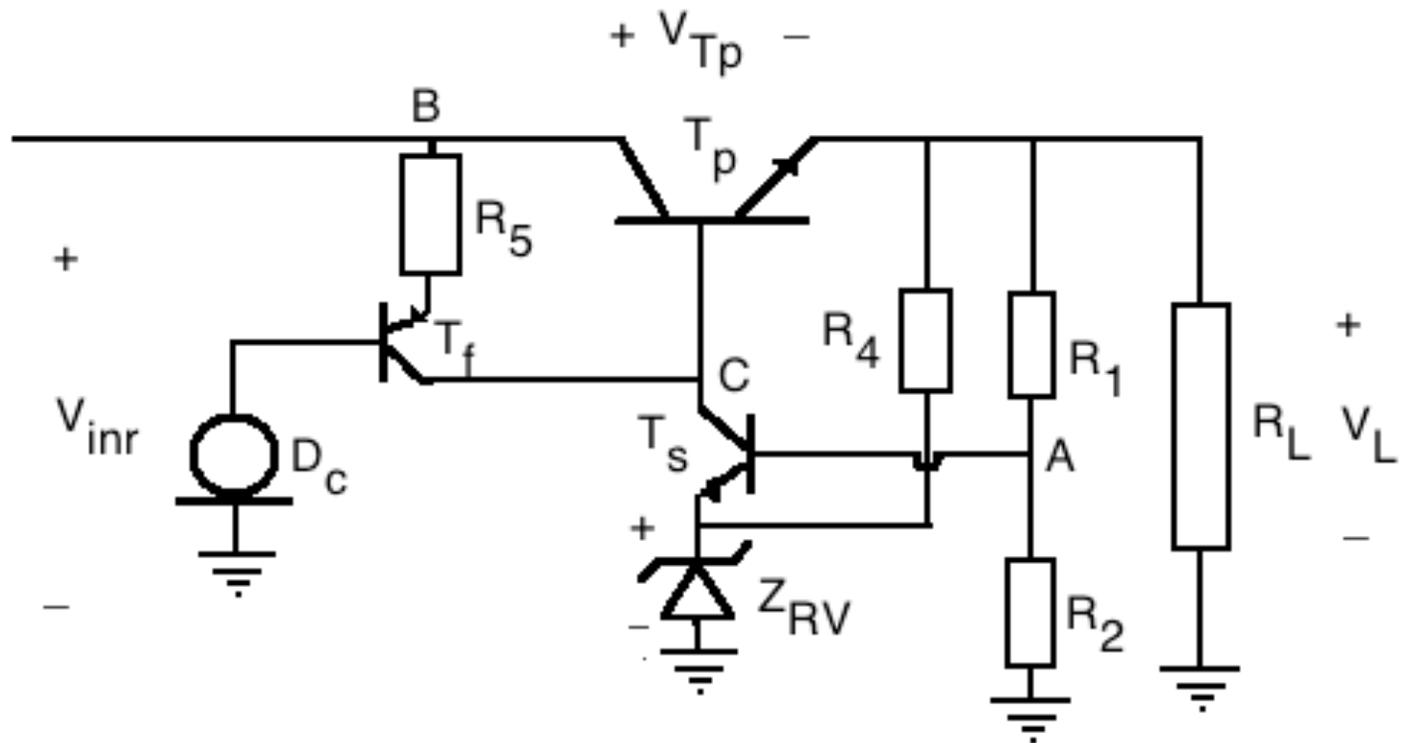
$$\Delta I_{R3} = \frac{\Delta V_{inr} - K}{R_3} \rightarrow \Delta I_{R3} = f\left(\frac{\Delta V_{inr}}{R_3}\right)$$

Para reducir el efecto de la modulación de I_{R_3} es necesario aumentar el valor de R_3 , pero esto reduce la corriente de base disponible para T_p , y el rango de corriente disponible para el mecanismo de regulación, lo cual no necesariamente es posible.

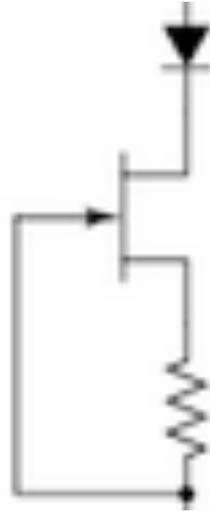
La solución a este problema sin afectar el resto del diseño es reemplazar R_3 con una fuente de corriente.



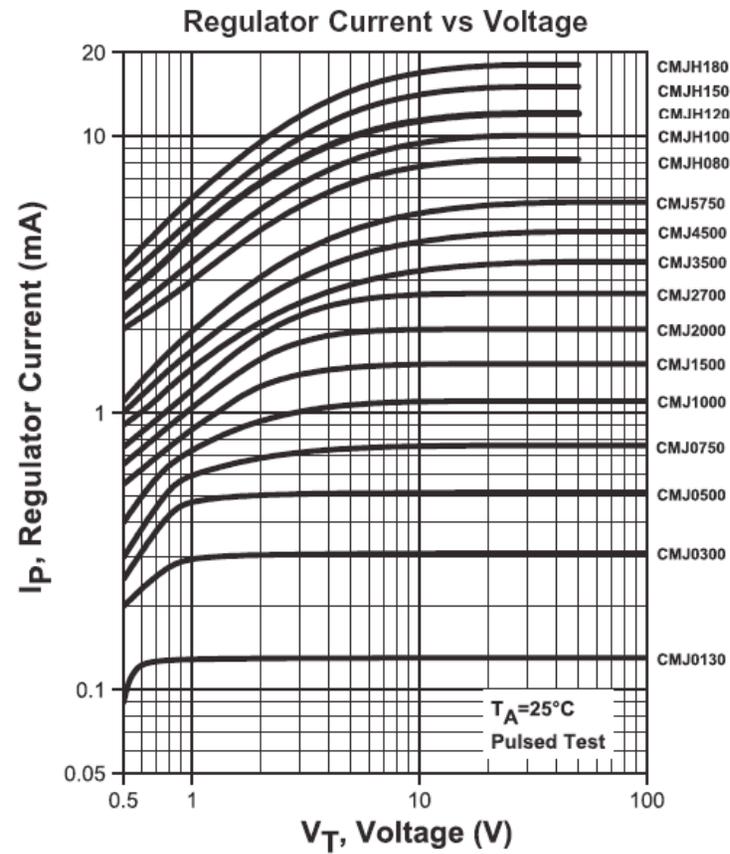
Regulador con fuente de corriente discreta para limitar la "modulación de I_{R3} "



Regulador con fuente de corriente polarizada con diodo de corriente para limitar la "modulación de I_{R3} ".



Circuito equivalente del diodo de corriente

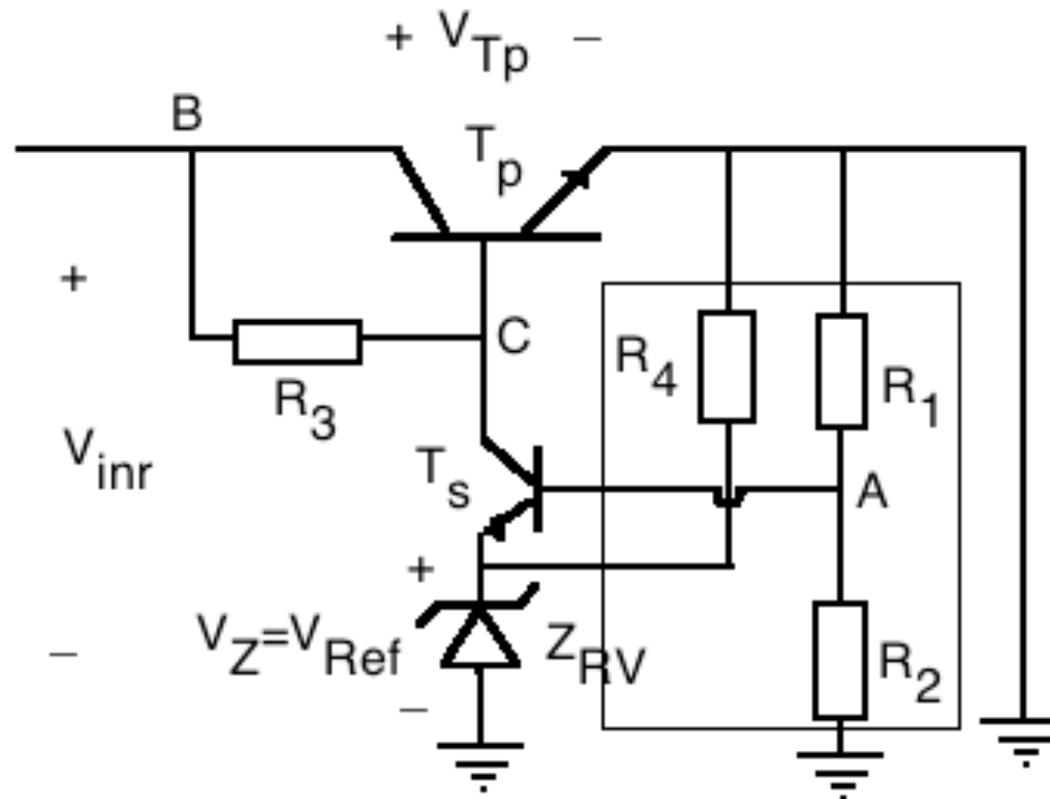


Curvas características de una familia de diodos de corriente comerciales.

Por supuesto las mejoras consideradas pueden incluirse simultáneamente para aumentar aún más el rendimiento de la fuente, pero aceptando el aumento de complejidad del circuito.

Corriente de cortocircuito

Dada la configuración básica de la fuente regulada serie, la condición de corto circuito es sumamente grave, ya que el sistema de regulación queda imposibilitado de funcionar y la corriente de salida es potencialmente muy elevada.



Fuente en condición de corto circuito a la salida.

Los componentes dentro del rectángulo quedan conectados a tierra por la barra de salida de la fuente.

T_s se corta y Z_{VR} queda sin alimentación.

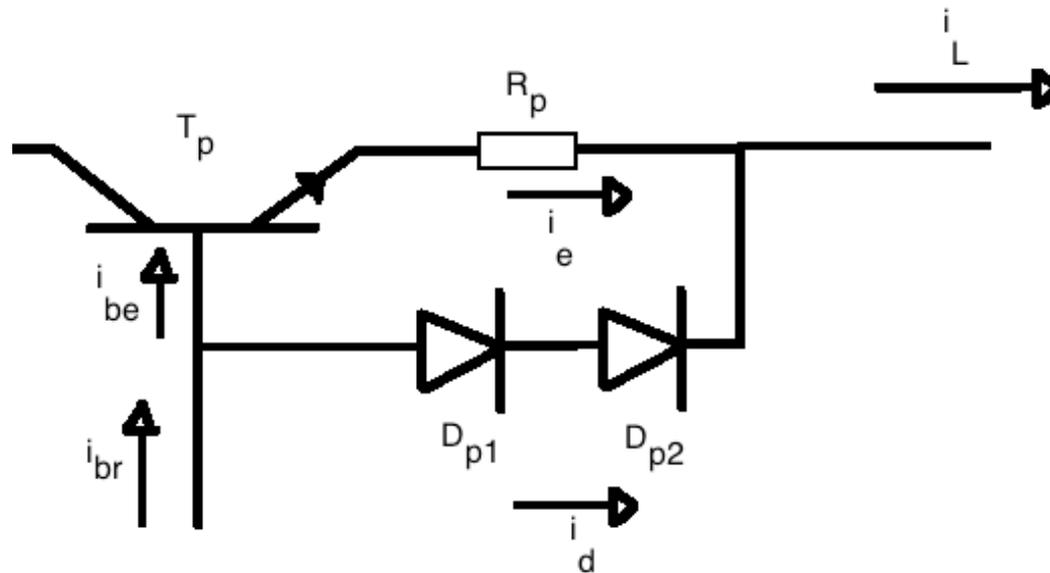
$$V_{Tp} = V_{inr}$$

$$I_{bTp} = \frac{V_{inr} - V_{beTp}}{R_3}$$

El transistor T_p opera en condiciones de máxima disipación de potencia (V_{ce} máximo y corriente muy elevada) y seguramente quedará destruido en un tiempo muy corto.

El circuito de protección de sobre corriente debe actuar en forma automática y limitar el valor de la corriente de corto circuito a un valor seguro.

La configuración básica es la siguiente:



Por conexión:

$$2V_{AK} = V_{beTp} + I_e R_p$$

En condiciones normales la caída en la resistencia de protección no es suficiente para polarizar a los diodos en conducción, por lo que:

$$i_d \approx 0 \rightarrow i_{be} \approx i_{br}$$

esto es la corriente en la base del transistor de paso es básicamente la entregada por el circuito regulador y la fuente opera normalmente.

Si la corriente de emisor se hace muy alta, los diodos entran en conducción, parte de la corriente entregada por el circuito de regulación no pasa por la base del transistor y esto limita el valor posible de la corriente de carga.