



**Unidad temática 1:
Tema 1**

**FUENTES DE CORRIENTE CONTINUA
NO REGULADAS**

APUNTE TEÓRICO

Profesor: Ing. Santiago Verne
J.T.P.: Ing. Carlos Javier Diaz
Ay. Diplomado: Ing. Alejandro Giordana
Ay. Diplomado: Ing. Pedro Fornaro
Ay. Diplomado: Ing. Adrián Crespi

URL: <http://www.ing.unlp.edu.ar/electrotecnia/electronicos2/>

FUENTES DE CORRIENTE CONTINUA NO REGULADAS

Circuitos rectificadores:

Los circuitos rectificadores se utilizan para “convertir” tensiones (corrientes) alternas (ca), en tensiones (corrientes) continuas (cc). Esto es posible si se cuenta con un elemento “rectificador”, al que se lo define como:

Dispositivo que convierte ca en cc, en virtud de una característica que permite el paso de corriente en un solo sentido.

Como dispositivos rectificadores son utilizados los diodos semiconductores de silicio, cuya característica tensión-corriente se muestra en la figura 1:

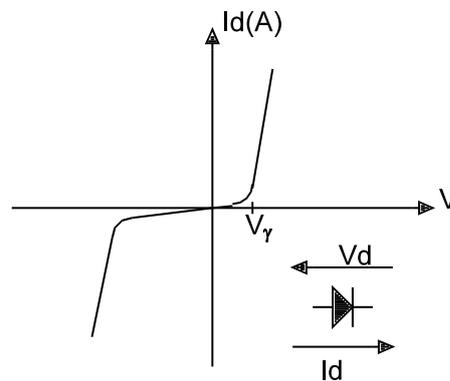


figura 1

Superada la tensión V_γ (que normalmente vale 0,6V a 25° C), la característica directa se hace prácticamente lineal, quedando la corriente limitada a la resistencia directa del diodo (que es del orden de las centésimas de Ohm o menor), y es función de la corriente máxima que circula en la zona directa. En inversa, es decir para valores negativos de V , el rectificador presenta una impedancia muy alta y, por esta razón, sólo fluye una corriente muy pequeña.

En síntesis, un diodo permite el paso de corriente en un solo sentido y concuerda con la definición dada de un rectificador.

CIRCUITOS RECTIFICADORES MONOFASICOS CON CARGA RESISTIVA.

Circuito media onda:

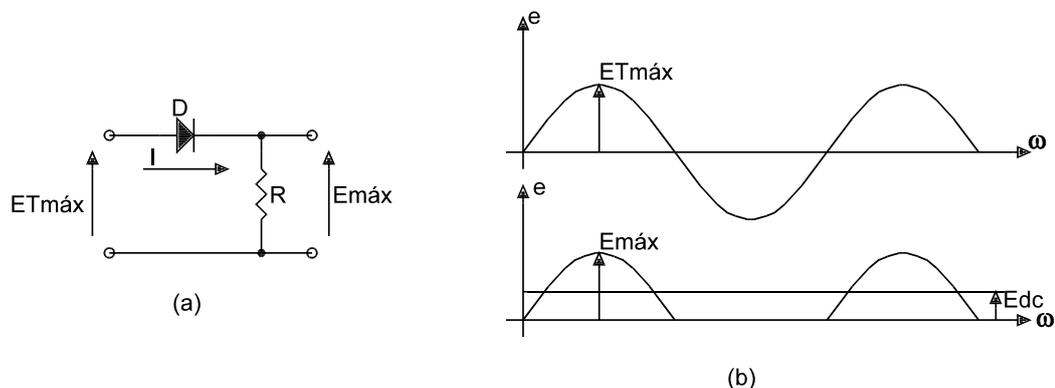


figura 2: 1/2 ONDA

La serie de Fourier de la figura 2-b es:

$$e = \frac{E_{Tm\acute{a}x}}{\pi} + \frac{E_{Tm\acute{a}x}}{2} \cos(\omega t) - 2 \frac{E_{Tm\acute{a}x}}{3\pi} \cos(2\omega t) \dots$$

en la expresión de $e(t)$, el primer término es el valor medio o componente de continua; luego:

$$E_{dc} = \frac{E_{Tm\acute{a}x}}{\pi} \quad e \quad I_d c = \frac{E_{dc}}{Rc} = \frac{E_{Tm\acute{a}x}}{\pi Rc} = \frac{I_{m\acute{a}x}}{\pi}$$

Por otra parte, la tensión eficaz en un rectificador de media onda es:

$$E_{ef}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi E_{Tm\acute{a}x}^2 \cdot \text{sen}^2(\omega t) d\omega t = \frac{E_{Tm\acute{a}x}^2}{2\pi} \int_0^\pi \left(\frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \right) d\omega t$$

$$E_{ef}^2 = \frac{E_{Tm\acute{a}x}^2}{4\pi} \left[\omega t - \frac{\text{sen} 2\omega t}{2} \right]_0^\pi = \frac{E_{Tm\acute{a}x}^2}{4\pi} \pi = \frac{E_{Tm\acute{a}x}^2}{4} \Rightarrow E_{ef} = \frac{E_{Tm\acute{a}x}}{2}$$

Circuitos rectificadores de onda completa:

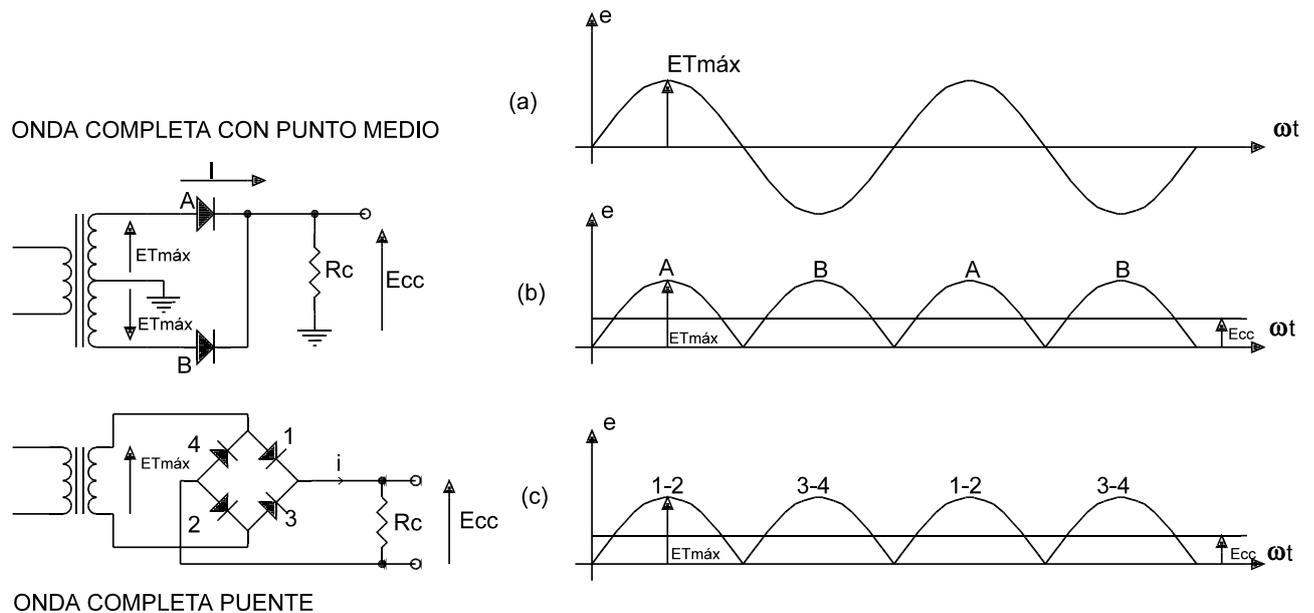


figura 3

$$e(t) = 2 \frac{E_{Tm\acute{a}x}}{\pi} - 4 \frac{E_{Tm\acute{a}x}}{3\pi} \cos(2\omega t) - 4 \frac{E_{Tm\acute{a}x}}{15\pi} \cos(4\omega t) \dots$$

$$E_{dc} = 2 \frac{E_{Tm\acute{a}x}}{\pi} = 0.636 E_{Tm\acute{a}x}$$

Observando la expresión de E_{dc} , notamos que es el doble del valor correspondiente al circuito de media onda; esto se verifica puesto que un circuito de onda completa es la conjunción de dos circuitos de media onda.

Para carga resistiva la forma de onda de la corriente de salida es igual a la forma de onda de tensión, por lo que se puede escribir:

$$I_{dc} = 2 \frac{E_{Tm\acute{a}x}}{\pi R c} = 2 \frac{I_{m\acute{a}x}}{\pi} = 0.636 I_{m\acute{a}x}$$

La corriente instantánea en la carga, son pulsos de la forma mostrada en la figura 3-c, por lo que el valor eficaz de la tensión y la corriente en la carga es:

$$E_{ef}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} E_{Tm\acute{a}x}^2 \cdot \text{sen}^2(\omega t) d\omega t = \frac{E_{Tm\acute{a}x}^2}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left(\frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \right) d\omega t$$

$$E_{ef}^2 = \frac{E_{Tm\acute{a}x}^2}{4\pi} \left[\omega t - \frac{\text{sen} 2\omega t}{2} \right]_0^{2\pi} = \frac{E_{Tm\acute{a}x}^2}{4\pi} 2\pi = \frac{E_{Tm\acute{a}x}^2}{2} \Rightarrow E_{ef} = \frac{E_{Tm\acute{a}x}}{\sqrt{2}}$$

Además:

$$E_{ef} = \frac{E_{Tm\acute{a}x}}{\sqrt{2}} \Rightarrow E_{dc} = 0,636 \cdot E_{Tm\acute{a}x} = 0,636 \cdot \sqrt{2} \cdot E_{ef} = 0,9 \cdot E_{ef}$$

$$E_{dc} = 0,9 \cdot E_{ef}$$

$$I_{dc} = 0,9 \cdot \frac{E_{ef}}{R c} = 0,9 \cdot I_{ef} \Rightarrow I_{ef} = \frac{1}{0,9} I_{dc} = 1,11 I_{dc}$$

En los circuitos rectificadores de onda completa se cumple que la corriente continua de salida (en la carga), es el doble de la corriente por diodo o por rama, según sea onda completa con punto medio o circuito puente; por lo tanto:

$$I_{diodo} = I_d = \frac{I_{dc}}{2}$$

La corriente instantánea de salida es la suma de las corrientes instantáneas de los dos diodos (o ramas), por lo que escribimos:

$$i(t) = id_1(t) + id_2(t)$$

$$I_{ef}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T [id_1(t) + id_2(t)] dt$$

$$I_{ef}^2 = 2 \cdot I_{ef_D}^2 \Rightarrow I_{ef_D} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_{ef} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{I_{dc}}{0,9} = 0,786 I_{dc}$$

Valores importantes a la hora de seleccionar un diodo rectificador, son:

- la corriente pico por diodo (o por rama); la que resulta:

$$I_{dc} = 0.636 I_{m\acute{a}x} \Rightarrow I_{FRM} = \frac{I_{dc}}{0.636} = 1.57 I_{dc}$$

- y la tensión pico inversa (Peak Repetitive Reverse Voltage), que es la máxima tensión que soporta el diodo durante el período de no conducción. En el caso de media onda, el diodo soporta el pico de tensión del transformador al igual que en el circuito puente; en

cambio para onda completa con punto medio, dicha tensión es el doble de la tensión máxima del transformador por rama.

Para media onda y onda completa puente:

$$V_{RRM} = 1.41 E_{ef II} = E_{Tmáx}$$

Para onda completa con punto medio:

$$V_{RRM} = 2.81 E_{ef II} = 2 E_{Tmáx}$$

Factor de forma de la corriente en la carga

Se define como factor de forma de la corriente (o de la tensión), al cociente entre el valor eficaz total (componentes de alterna y de continua), y el valor de continua:

$$F = \frac{I_{ef}}{I_{cc}}$$

Para media onda:

$$F = \frac{\frac{\hat{I}}{2}}{\frac{\hat{I}}{\pi}} = \frac{\pi}{2} = 1,57$$

Para onda completa:

$$F = \frac{\frac{\hat{I}}{\sqrt{2}}}{\frac{2\hat{I}}{\pi}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11$$

Factor de zumbido (ripple)

El factor de ripple "r" es la relación entre el valor eficaz de las componentes de alterna y el valor de continua en la carga, ya sea de tensión o de corriente:

$$r = \frac{I_{ef_{ca}}}{I_{dc}} = \frac{E_{ef_{ca}}}{E_{dc}}$$

En un circuito rectificador, por la carga circulan corriente continua (I_{cc}) y corriente alterna (I_{ca}). En media onda, la componente de corriente alterna es de la frecuencia de línea; en onda completa, es de dos veces la frecuencia de línea. Esta corriente alterna constituye el zumbido en la carga.

La corriente total i en la carga es:

$$i_T(t) = I_{cc} + I_{ca} \quad \Rightarrow \quad I_{ca} = i_T(t) - I_{cc}$$

$$I_{ef_{ca}}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (i_T - I_{cc})^2 d\omega t = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_T^2 d\omega t - 2 \int_0^{2\pi} i_T \cdot I_{cc} d\omega t + \int_0^{2\pi} I_{cc}^2 d\omega t$$
$$I_{ef_{ca}}^2 = I_{ef}^2 - I_{cc}^2 \quad \Rightarrow \quad \frac{I_{ef_{ca}}}{I_{cc}} = \frac{\sqrt{I_{ef}^2 - I_{cc}^2}}{I_{cc}} = \sqrt{\left(\frac{I_{ef}}{I_{cc}}\right)^2 - 1} = \sqrt{F^2 - 1}$$

Habiendo definido al factor de ripple como:

$$r = \frac{I_{ef_{ca}}}{I_{dc}} = \frac{E_{ef_{ca}}}{E_{dc}} \quad \Rightarrow \quad \boxed{r = \sqrt{F^2 - 1}}$$

Para media onda, resulta:

$$F = 1,57 \quad \Rightarrow \quad r = 1,21 = 121\%$$

Y para onda completa:

$$F = 1,11 \quad \Rightarrow \quad r = 0,48 = 48\%$$

Notar que un valor de $r = 121\%$ para un circuito de media onda significa que el valor eficaz de alterna es mayor que el de continua. Una sensible mejora se obtiene con los circuitos de onda completa, en los que $r = 48\%$.

Rendimiento de rectificación

Se define rendimiento de rectificación como:

$$\eta = \frac{P_{cc}}{P_{ca}} = \frac{I_{cc}^2 R}{I_{ef}^2 R} = \frac{1}{F^2}$$

Para media onda:

$$\eta_{\text{MEDIA ONDA}} = \eta_{MO} = \frac{1}{1,57^2} = 40,1\%$$

Para onda completa:

$$\eta_{\text{ONDA COMPLETA}} = \eta_{OC} = \frac{1}{1,11^2} = 81,1\%$$

CIRCUITOS RECTIFICADORES CON FILTRO A CAPACITOR DE ENTRADA.

Atento a los valores del ripple (zumbido) en los circuitos hasta ahora vistos, se hace necesario disminuir sensiblemente las componentes de alterna en la salida y para ello se utilizan filtros.

Una manera simple de implementar un filtro es conectando un capacitor en paralelo con la resistencia de carga. La introducción del condensador modifica considerablemente el comportamiento del circuito; ya que para el análisis no podrá considerárselo como un circuito lineal, dando como resultado métodos de análisis largos y complejos.

El análisis gráfico realizado por SHADE conduce a resultados suficientemente precisos y es el procedimiento de diseño más simple y eficaz generalmente utilizado. El conjunto de curvas de Shade tiene como parámetro la relación: R_s/R_c ; la resistencia serie R_s incluye la resistencia del secundario y del diodo, y limita la corriente que circula por el rectificador cuando se produce el encendido, pues en ese momento el capacitor se hallará descargado y la carga que presentará al rectificador será realmente un cortocircuito.

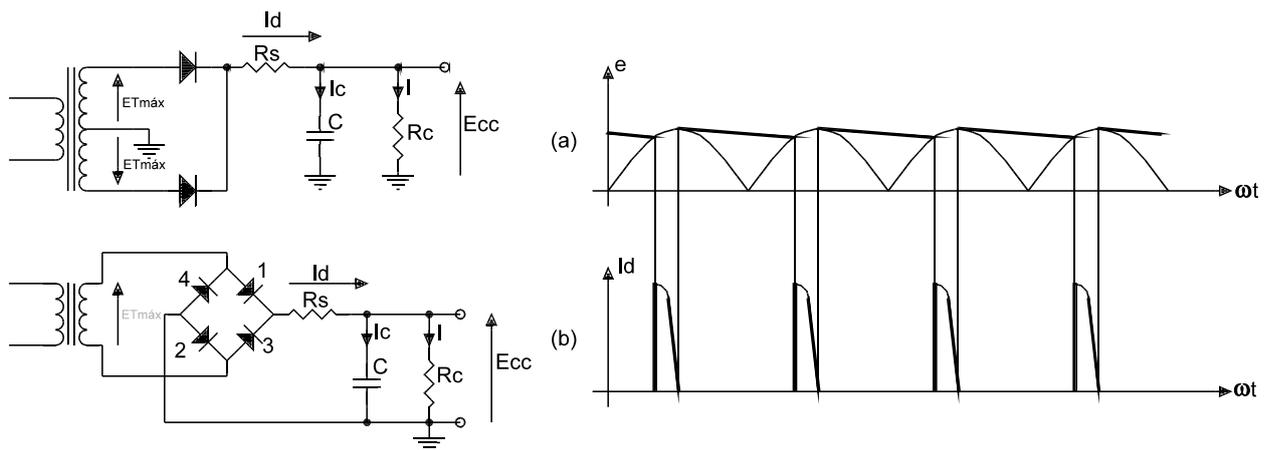


figura 4

En el diseño de fuentes de cc con filtro a capacitor de entrada, los datos a cumplir serán:

1. V_{dc} : tensión continua de salida
2. I_{dc} : corriente continua en la carga
3. $r\%$: ripple o zumbido máximo permitido
4. $R\%$: regulación por variación de la corriente de carga

y se deberá determinar:

1. El circuito rectificador más adecuado
2. El capacitor de filtro, teniendo en cuenta lo siguiente:
 - Valor de la capacidad y tensión nominal de trabajo (V_{dc})
 - Tolerancia (%)
 - Corriente eficaz (ripple) a través del capacitor, que para circuitos de onda completa vale:

$$I_{ef_{cap}} = \sqrt{2 \cdot I_{ef_d}^2 - I_{dc}^2} = \sqrt{I_{ef_T}^2 - I_{cc}^2}$$

(I_{ef_T} : corriente eficaz en el secundario del transformador)

3. Los diodos rectificadores, con los siguientes datos:
 - Corriente nominal que circula a través del rectificador (I_{FAV})
 - Corriente pico repetitiva (I_{FRM})
 - Corriente pico inicial o de encendido (I_{FSM})
 - Tensión de pico inverso (V_{RRM})
4. El transformador considerando:
 - Corriente eficaz a través del secundario ($I_{ef_T} = \sqrt{2} I_{ef_D}$)
 - Tensión eficaz del secundario ($E_{ef_T} = E_{T_{m\acute{a}x}}/\sqrt{2}$)
 - Régimen de VA (Volt-Ampere) del secundario

$$VA_{II} = E_{ef_T} \cdot I_{ef_T}$$

Regulación:

Una buena fuente de corriente continua es aquella que no modifica sustancialmente la tensión de salida (V_{dc}) cuando hay variaciones en las condiciones de carga, por ejemplo, mantiene aproximadamente constante la tensión de salida frente al aumento de la corriente de carga (I_{dc}).

En los circuitos de onda completa con filtro a capacitor, la expresión de la tensión de salida está dada por:

$$V_{dc} = \frac{E_{Tmáx}}{\pi} \sqrt{1 + (\omega C R_c)^2} [1 - \cos(\omega t_2 - \omega t_1)]$$

Como puede observarse. V_{dc} es función de la constante de tiempo $C.R_c$; luego, si R_c disminuye (aumento de I_{dc}), V_{dc} disminuirá a no ser que C sea infinito. Este efecto puede apreciarse en la figura 5.

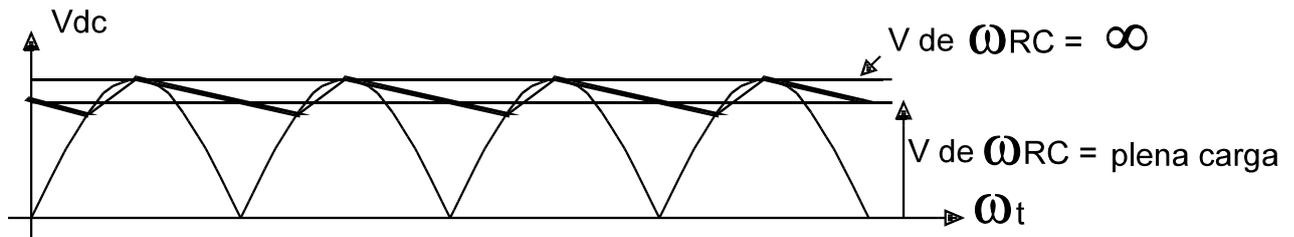


figura 5

En las condiciones, en que se ha venido analizando el comportamiento de los rectificadores, esta variación de V_{CC} con I_{CC} es lineal, y puede expresarse por medio de una expresión como:

$$V_{CC} = V_{CCmáx} - I_{CC} \sum r_{CC}$$

En la que $V_{CCmáx}$ es el valor de V_{CC} en vacío y $\sum r_{CC}$ representa la resistencia interna, que presenta el rectificador en continua, y que es la suma de las que poseen los distintos elementos situados en serie.

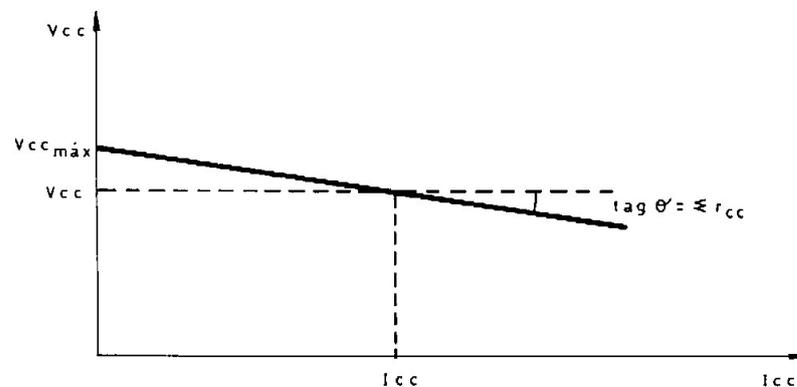


Figura 6: Curva de regulación

La representación de V_{CC} en función de I_{CC} da lugar a la llamada curva de regulación del rectificador que, en la práctica, no es una recta debido a la no constancia de las características de los elementos que determinan $\sum r_{CC}$. Cuanto menor es la pendiente de esta curva, más constante es la tensión de salida, y más se aproxima el rectificador a su modelo ideal: el generador de tensión continua.

Para valorar esto se ha definido el porcentaje de regulación, dado por la expresión:

$$R\% = \frac{V_{CC(vacio)} - V_{CC(carga)}}{V_{CC(carga)}}$$

En la Figura 6, se muestra la forma general de la curva de regulación y en ella puede apreciarse como su pendiente mide, en cada punto, la resistencia interna $\sum r_{CC}$ antes citada

Al aplicar estos conceptos a los distintos tipos de rectificadores con filtro, aparecen curvas típicas de regulación como la que se muestra en la Figura 7.

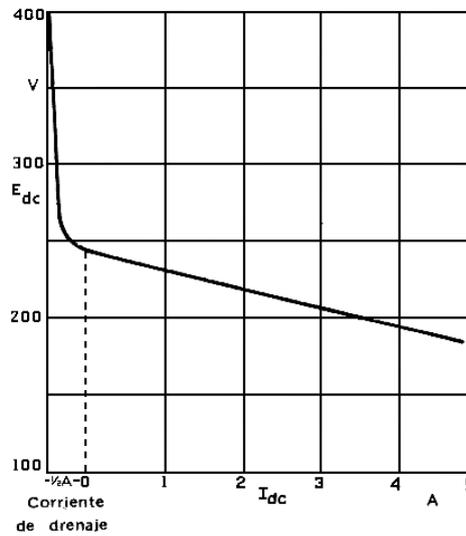


Figura 7: Regulación de tensión del circuito puente monofásico de onda completa con filtro de entrada a choque y capacitor

Al disminuir I_{CC} la tensión continua de salida tiende hacia su valor máximo (400 V en este ejemplo), como ocurre en todos los filtros que contienen condensadores en paralelo. Por el contrario, si I_{CC} es mayor que el valor crítico (corriente de salida mayor que la de drenaje), el filtro actúa conforme a lo que se ha supuesto en su cálculo y la expresión de la curva de regulación, será:

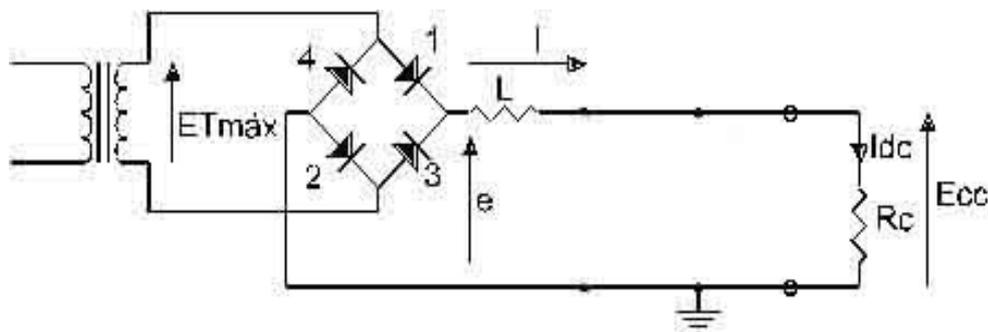
$$V_{CC} = \frac{2V_m}{\pi} - I_{CC} (R_{(transf)} + r_d + r_b)$$

en la que r_b representa la resistencia en corriente continua de la bobina.

CIRCUITOS RECTIFICADORES MONOFASICOS CON INDUCTOR DE ENTRADA.

FILTRO L (sólo inductor)

Cuando los valores de la corriente de salida son elevados o la resistencia de carga es variable (con lo cual I_{dc} no es constante), las fuentes de cc con filtro a capacitor no dan una buena regulación. Esto obliga al estudio de otros tipos de filtros, como ser los que utilizan un inductor de entrada:



La corriente continua en la carga está dada por:

$$I_{cc} = \frac{2E_{Tm\acute{a}x}}{\pi R_c}$$

El módulo de la corriente eficaz es:

$$|I_{ef_{ca}}| = \frac{|E_{ef_{ca}}|}{|Z_c|} = \frac{4 \frac{E_{Tm\acute{a}x}}{3\pi\sqrt{2}}}{\sqrt{R_c^2 + X_L^2}} = \frac{4E_{Tm\acute{a}x}}{3\pi\sqrt{2}\sqrt{R_c^2 + X_L^2}}$$

Esto nos da un ripple de:

$$r = \frac{I_{ef_{ca}}}{I_{cc}} = \frac{\frac{4E_{Tm\acute{a}x}}{3\pi\sqrt{2}\sqrt{R_c^2 + X_L^2}}}{\frac{2E_{Tm\acute{a}x}}{\pi R_c}} = \frac{2R_c}{3\sqrt{2}\sqrt{R_c^2 + X_L^2}} = \left(\frac{2}{3\sqrt{2}}\right) \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\omega L}{R_c}\right)^2}}$$

$$\text{Si: } 2\omega L \gg R_c \Rightarrow r = \frac{\sqrt{2} R_c}{6 \omega L}$$

Se puede apreciar en la expresión de r que cuanto menor sea la resistencia de carga, menor será el ripple.

FILTRO L (L y C)

Otros tipo de filtro muy usado es el que utiliza un inductor de entrada asociado con un capacitor en paralelo con la carga, llamado filtro "L".

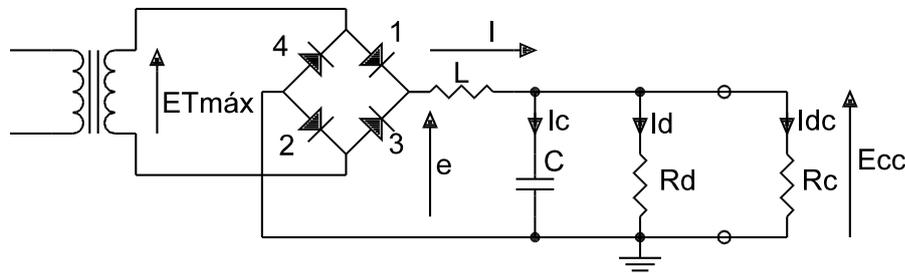


figura 7

Si el valor de L es tal que cumple con la condición de que la corriente nunca se anule, el análisis, a diferencia de los circuitos con capacitor, puede encontrarse a través de las técnicas de los circuitos lineales y su desarrollo es extremadamente más simple.

Se admite que la tensión de entrada al filtro es:

$$e(t) \cong 2 \frac{E_{Tm\acute{a}x}}{\pi} - 4 \frac{E_{Tm\acute{a}x}}{3\pi} \cos(2\omega t)$$

además: $X_c \ll R_c$ y $X_L \gg R_b$ (resistencia óhmica del inductor)

luego, el filtro tendrá una gran impedancia serie y una baja impedancia paralelo; por ende, visto desde los bornes de entrada el filtro se comporta como inductivo, por lo tanto:

$$I_{ef} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{4}{3\pi} E_{Tm\acute{a}x} \frac{1}{X_L} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{4}{3\pi} \frac{\pi}{2} V_{dc} \frac{1}{X_L} = \frac{\sqrt{2}}{3} V_{dc} \frac{1}{X_L}$$

Admitiendo que:

$$E_{ef} = I_{ef} \cdot X_c = \frac{\sqrt{2}}{3} V_{dc} \frac{X_c}{X_L} = \frac{\sqrt{2}}{3} V_{dc} \frac{1}{4\omega^2 LC}$$

Recordando que esta expresión de ω depende de la frecuencia de la señal rectificada (es decir, del doble de la frecuencia de línea), resulta un ripple:

$$r = \frac{E_{ef}}{V_{dc}} = \frac{\sqrt{2}}{3} \frac{1}{4\omega^2 LC} \quad (\text{con } \omega = 2\pi f; f = 50 \text{ Hz})$$

La figura 8 muestra el zumbido en función de $\omega^2 LC$ y está graficada en manuales de diseño, como ser Landee 15-6; puede observarse que con la utilización de un filtro L se logra independizar el ripple de la corriente de carga.

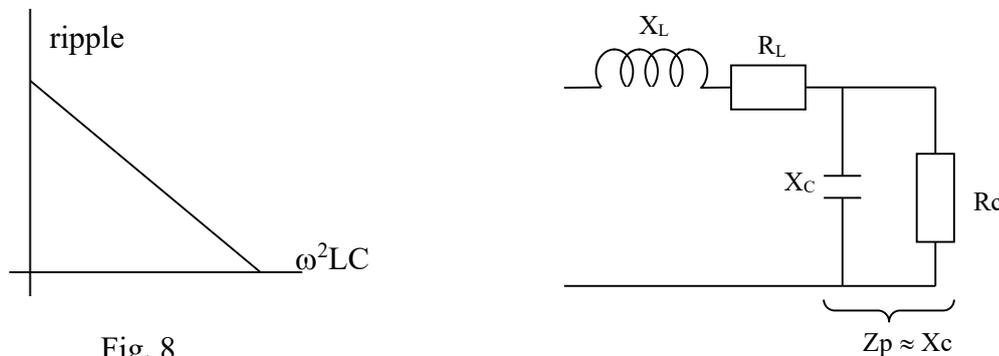


Fig. 8

Otra forma de enfocar el diseño del filtro consiste en definir un factor de atenuación **K**, como: “la relación entre la impedancia de entrada total del circuito a la impedancia de la combinación del paralelo de capacitor y resistencia de carga”. Teniendo presente las consideraciones simplificadoras anteriores, podemos escribir que:

$$K \cong \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{\frac{1}{\omega C}} \cong 4\pi^2 f^2 LC - 1 \cong 4\pi^2 f^2 LC = \omega^2 LC$$

$$K = \frac{r\% \text{ a la entrada}}{r\% \text{ a la salida}} = \frac{47\%}{r\%} \Rightarrow r\% = \frac{0,47}{K} \approx \frac{47}{\omega^2 LC}$$

y para $f_{\text{RIPPLE}} = 100 \text{ Hz}$:

$$\boxed{r\% = \frac{119,2}{LC}} \quad (\text{con } C \text{ en } \mu\text{F} \text{ y } L \text{ en } \text{Hy})$$

Notar que: el ripple es independiente de la carga.

Inductancia crítica (Lc)

Se advirtió en el análisis de este filtro, que se realizaba considerando que la corriente en el circuito no se cortaba nunca. Para que ello suceda deberá asegurarse un valor mínimo de L, llamado “inductancia crítica”.

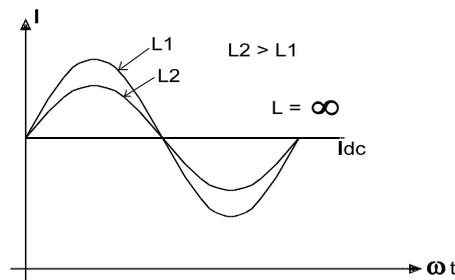


figura 9

Si tenemos presente el circuito de la figura 7, la corriente i estará compuesta por un valor medio junto a componentes de ripple; se observa en la figura 9 que hay un valor "crítico" de L donde puede cortarse la corriente y es cuando el *máximo* pico negativo del zumbido coincide con el valor *mínimo* de la corriente I_{dc} ; luego, se debe cumplir que:

$$R_c = 1.5 \left(2\omega L - \frac{1}{2\omega C} \right) = 1.5 \cdot 2\omega L \quad y \quad L_c = \frac{R_{c_{máx}}}{943}$$

En la práctica, el valor de capacidad mínimo es:

$$X_c \leq \frac{R_{c_{mín}}}{5} \quad \text{luego:} \quad C \geq \frac{796000}{f R_{c_{mín}}}$$

La corriente eficaz que circulará por el capacitor será:

$$I_{ef_{cap}} = 4 \frac{E_{T_{máx}}}{3\pi} \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{X_L} = \frac{\sqrt{2}}{3} V_{dc} \frac{1}{X_L}$$

Resistencia de drenaje:

Se conecta una resistencia de drenaje de valor adecuado en paralelo con el capacitor, a fin de mantener la corriente mínima que satisface la condición de inductancia crítica, aún cuando la carga esté desconectada. Esto garantiza que, en ausencia de carga, la tensión de salida no adopte el valor pico de la tensión aplicada.

BIBLIOGRAFIA:

1. ELECTRÓNICA: FUNDAMENTOS Y APLICACIONES, John Ryder, Aguilar 2ª Edición, Madrid 1972.
2. RECTIFICACION DE POTENCIA CON DIODOS DE SILICIO - Boletín de FAPESA Año XXI - Nº 3. Tercer bimestre 1975.