

# VARIAS APLICACIONES DE LOS DIODOS RECTIFICADORES

## CIRCUITO DOBLADOR DE VOLTAJE

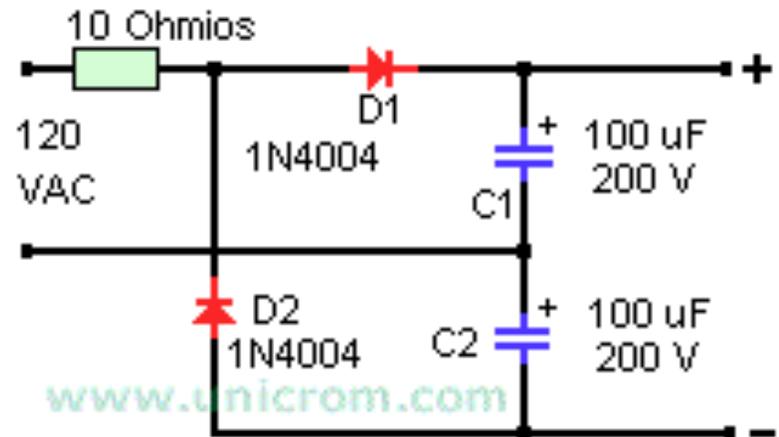
Semiciclo positivo: Conduce D1, se carga C1

Semiciclo negativo: Conduce D2, se carga C2

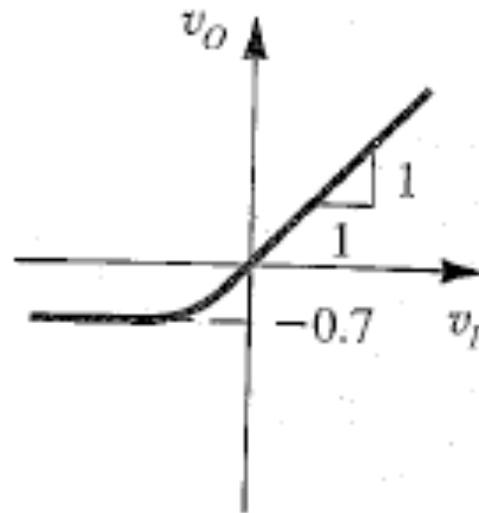
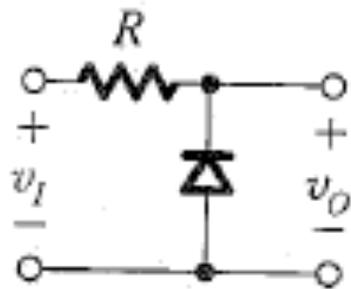
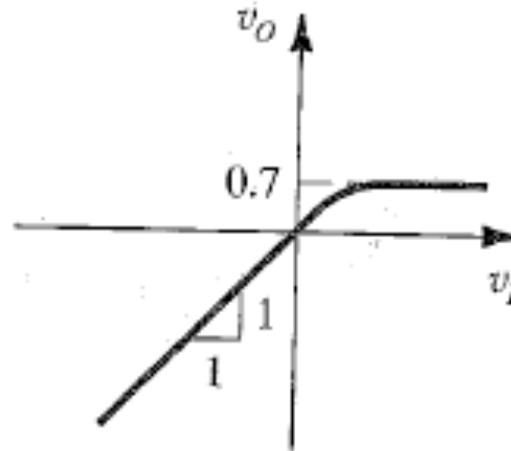
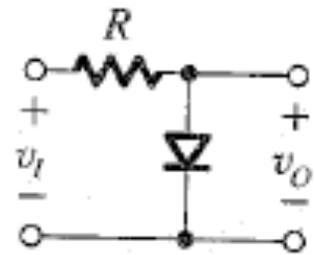
Voltaje de salida: El doble que el voltaje pico de entrada

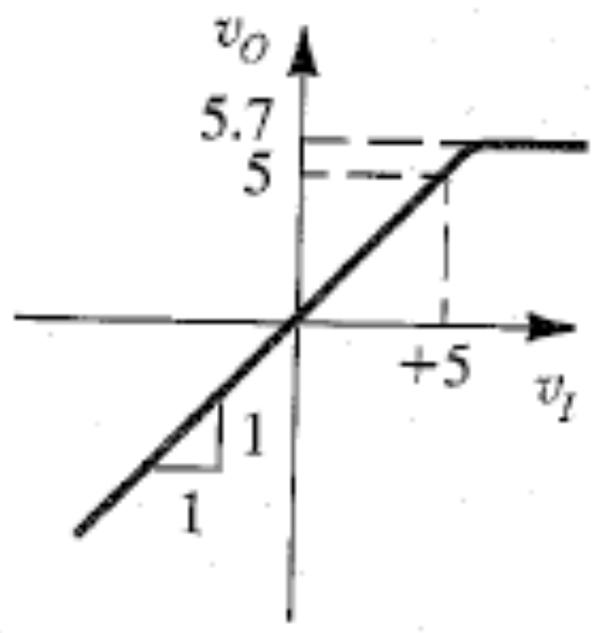
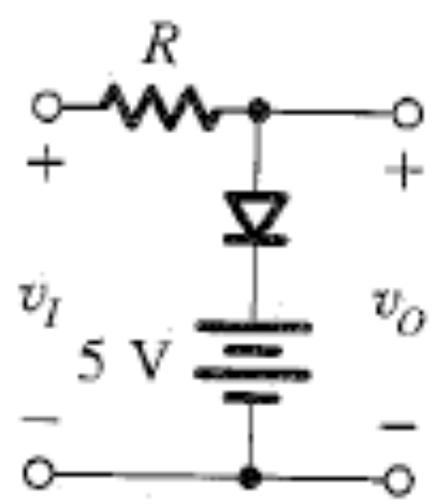
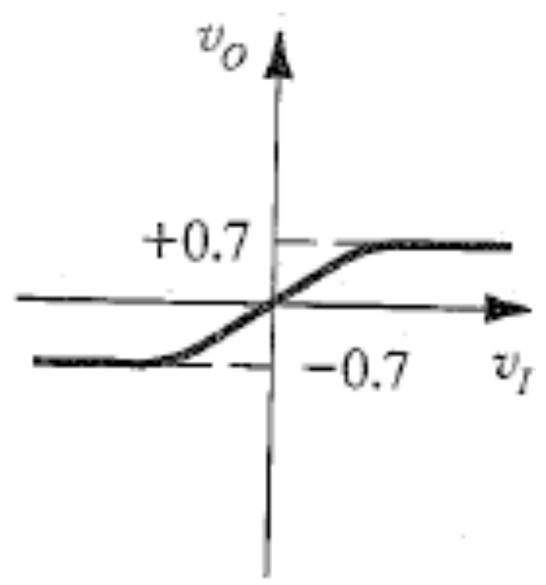
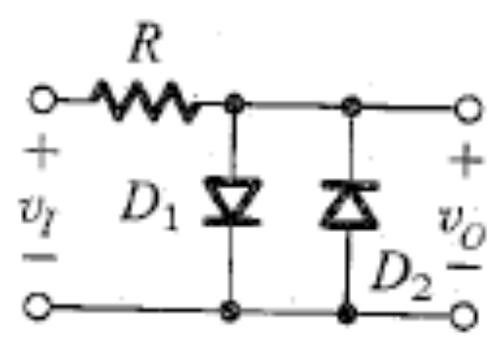
Puede usarse como fuente doble si se conecta tierra en el punto común de los condensadores.

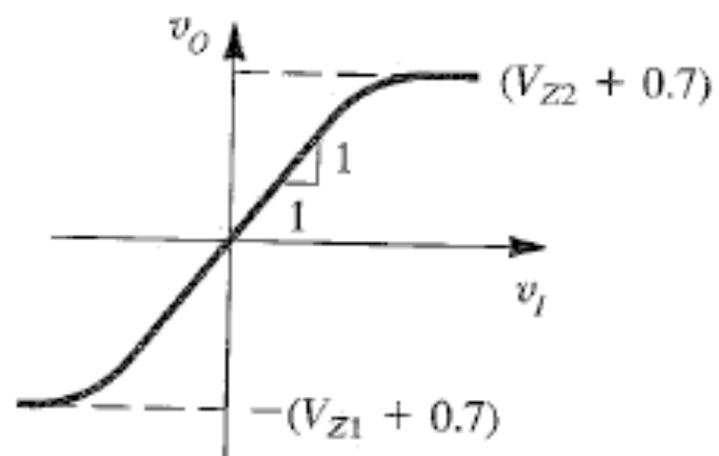
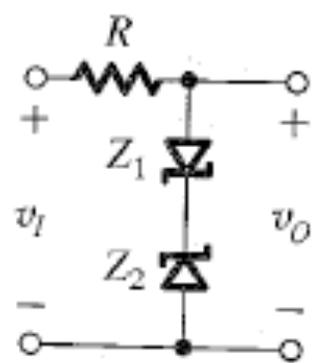
Pero al conectar cargas, se produce rizado.



# CIRCUITOS LIMITADORES CON DIODOS







## PROBLEMA: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA CON DIODOS

Considerar diodos ideales

Semiciclo positivo:

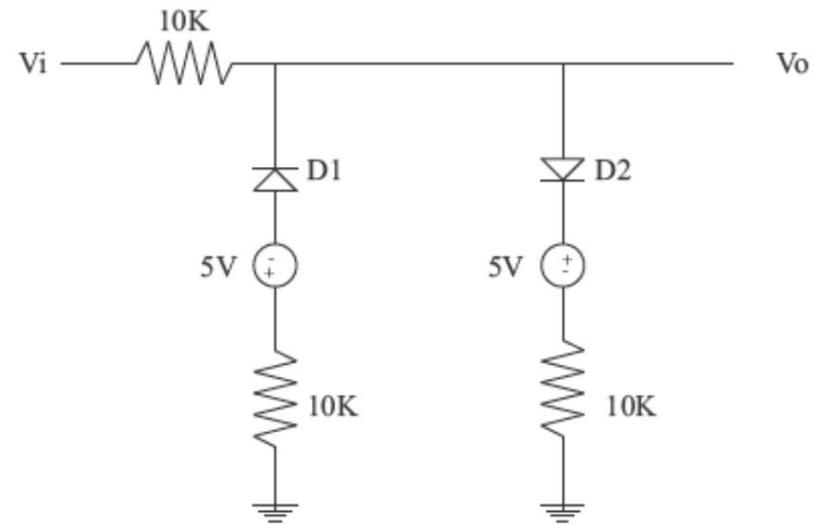
Circuito formado por  $v_i$ ,  $10k\Omega$ , D2,  $5V$  y  $10k\Omega$

El diodo D2 no puede conducir hasta que  $V_i$  no alcance los  $5V$ .

A partir de ese voltaje:

$$I^+ = \frac{V_i - 5V}{20k\Omega}$$

$$V_o = 5V + 10k\Omega \frac{V_i - 5V}{20k\Omega} = 5V + 0,5V_i - 2,5V = 0,5V_i + 2,5V$$



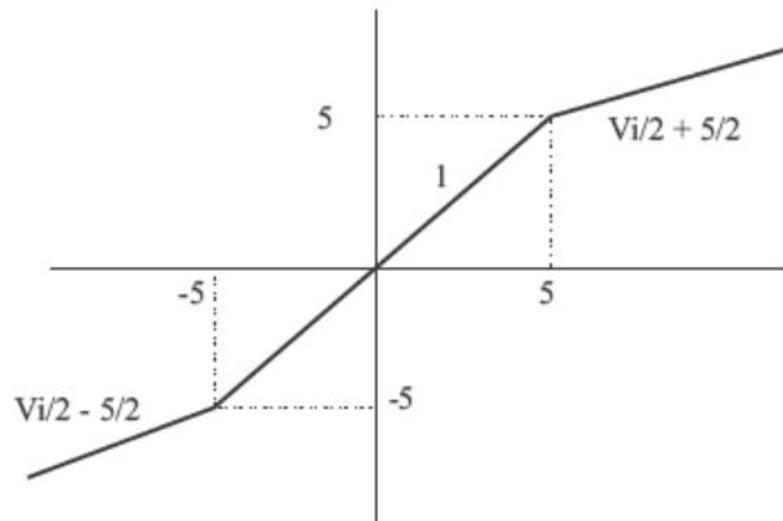
**Semiciclo negativo: Circuito formado por  $v_i$ ,  $10k\Omega$ , D1,  $5V$  y  $10k\Omega$**

El diodo D1 no puede conducir hasta que  $V_i$  no alcance los  $-5V$ .

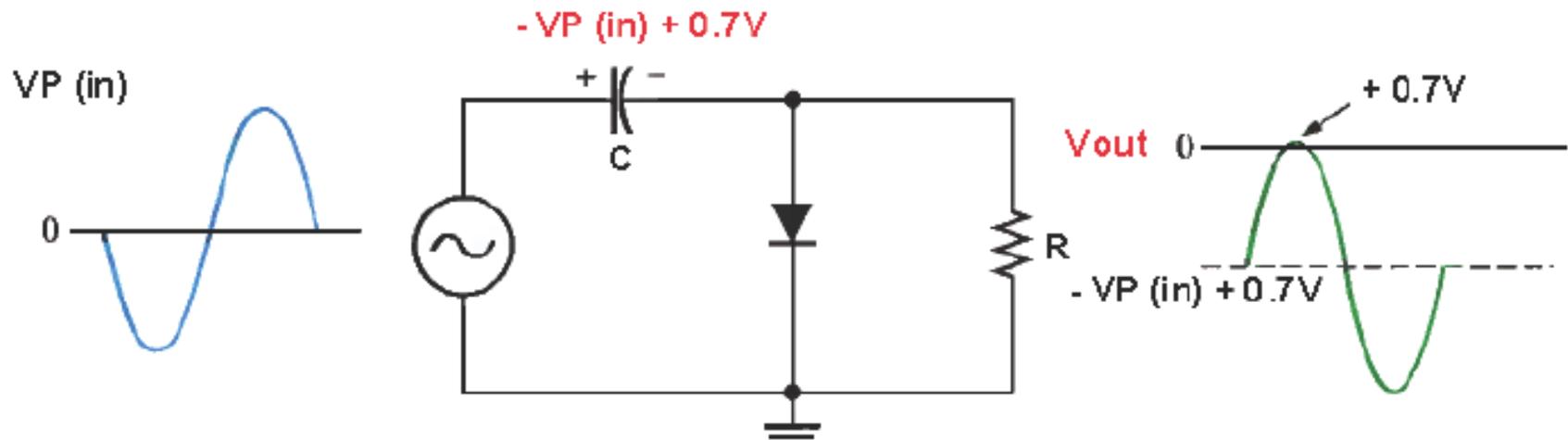
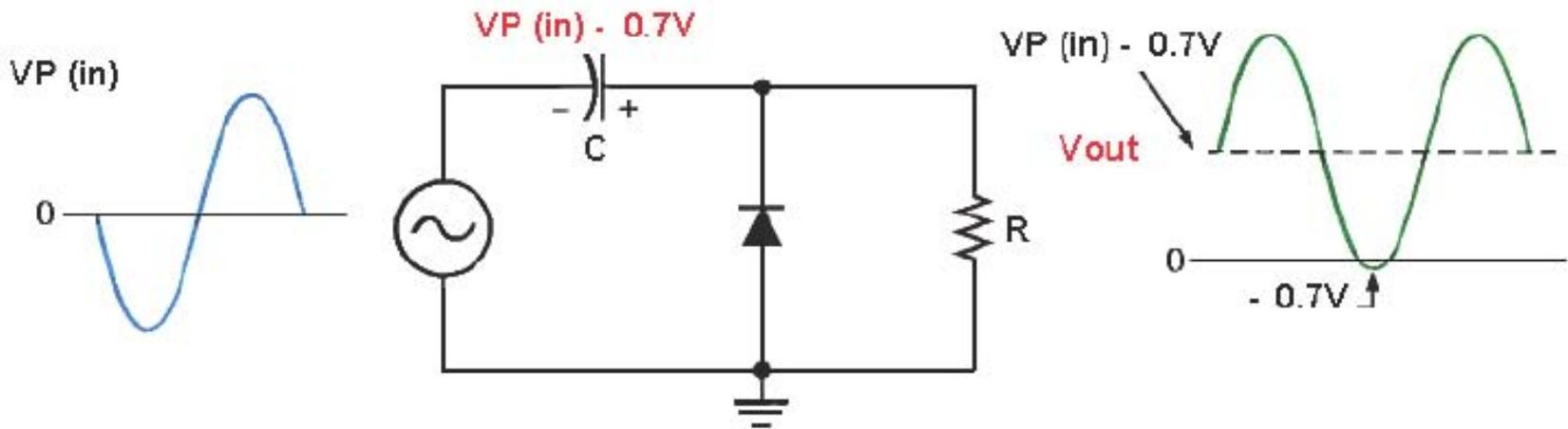
A partir de ese voltaje:

$$I^- = \frac{V_i - 5V}{20k\Omega}$$

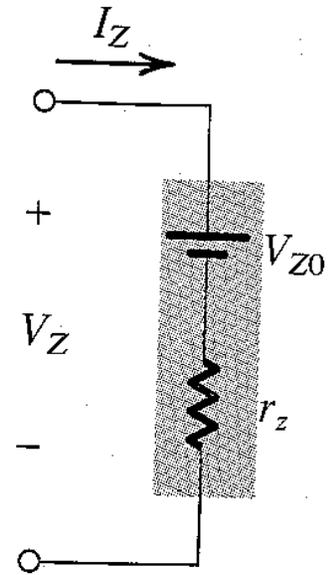
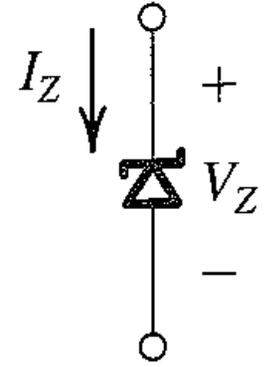
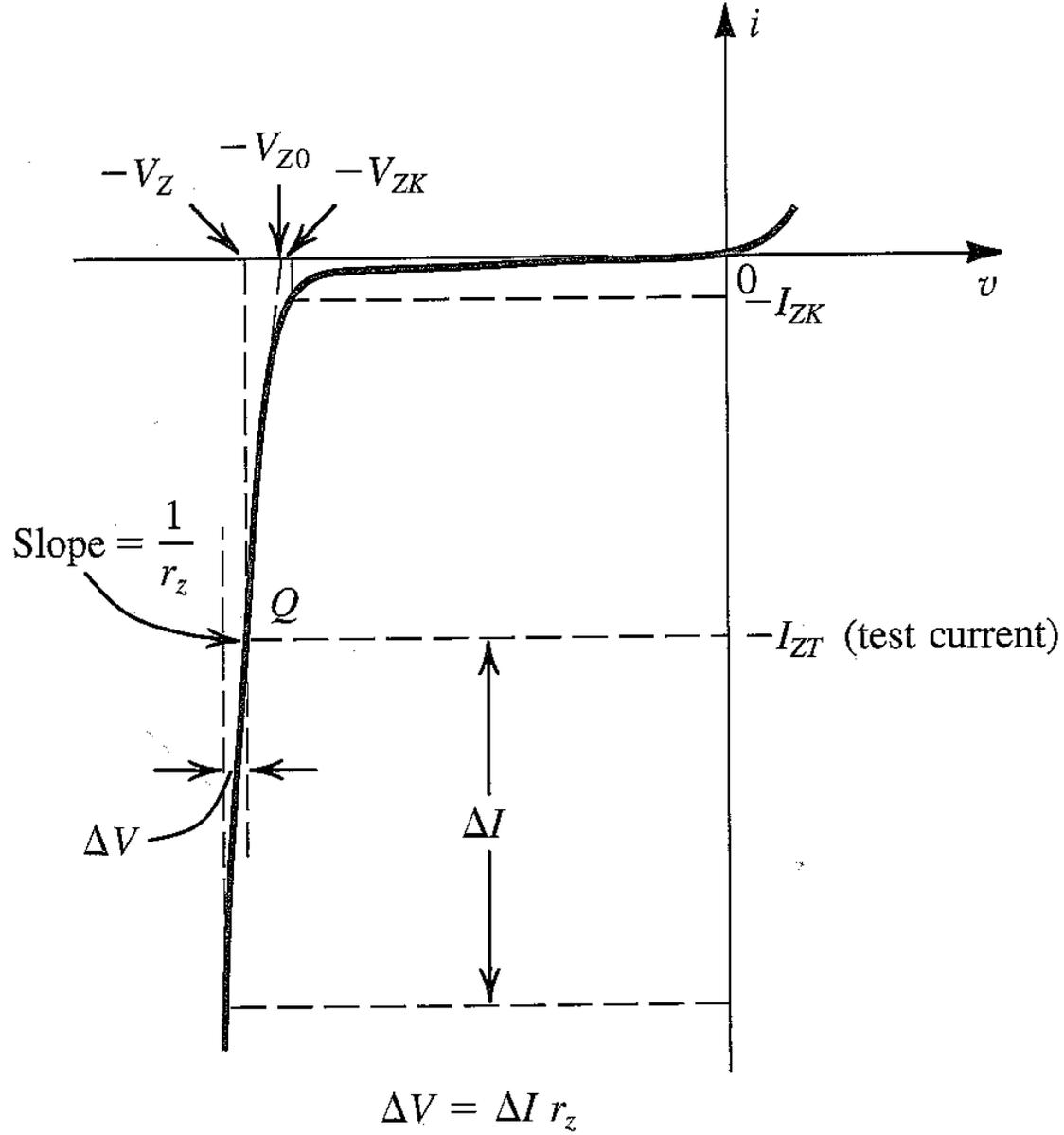
$$V_o = -5V - 10k\Omega \frac{V_i - 5V}{20k\Omega} = -5V - 0,5V_i + 2,5V = -0,5V_i - 2,5V$$



## CIRCUITOS CAMBIADORES DE NIVEL



# EL DIODO ZENER



## PARAMETROS DEL DIODO ZENER

$V_{Z0}$ : Fuente de voltaje en el modelo del zener.

$V_{ZK} - I_{ZK}$  : El fabricante especifica un valor de voltaje del zener identificado como el voltaje de rodilla para una corriente dada.

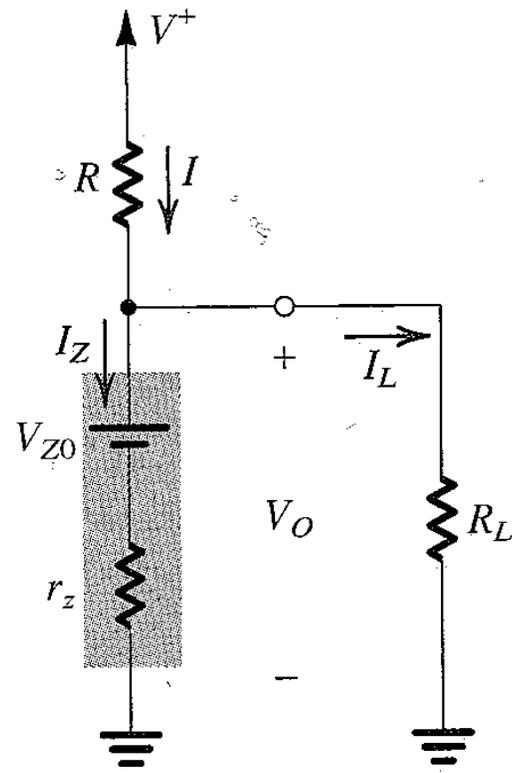
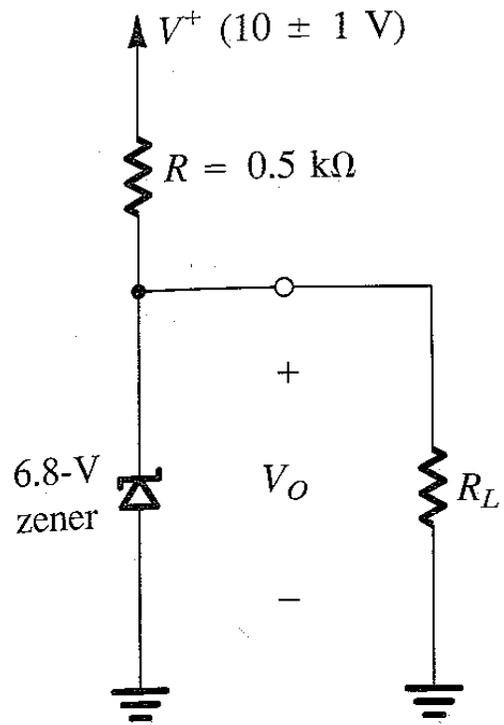
$V_Z - I_{ZT}$  : El fabricante especifica un voltaje de zener donde el dispositivo ya está operativo en la región de zener para una corriente dada  $I_{ZT}$ . Los valores  $V_Z - I_{ZT}$  definen el punto Q en la gráfica.

$r_z$ : Resistencia dinámica o resistencia incremental del zener en el punto de operación Q. Se cumple que  $\Delta V = r_z \Delta I$

$P_z \text{ max}$  : El fabricante especifica la potencia máxima que determina la corriente máxima que puede circular por el dispositivo.

Si  $V_{Z0}$  es el punto en el cual la línea recta definida por  $1/r_z$  intersecta el eje horizontal, el zener se puede modelar con una fuente de voltaje  $V_{Z0}$  en serie con una resistencia  $r_z$ .  $V_Z = V_{Z0} + r_z I_Z$ .

# REGULACIÓN CON EL DIODO ZENER



## EJEMPLO DE REGULACIÓN CON EL DIODO ZENER

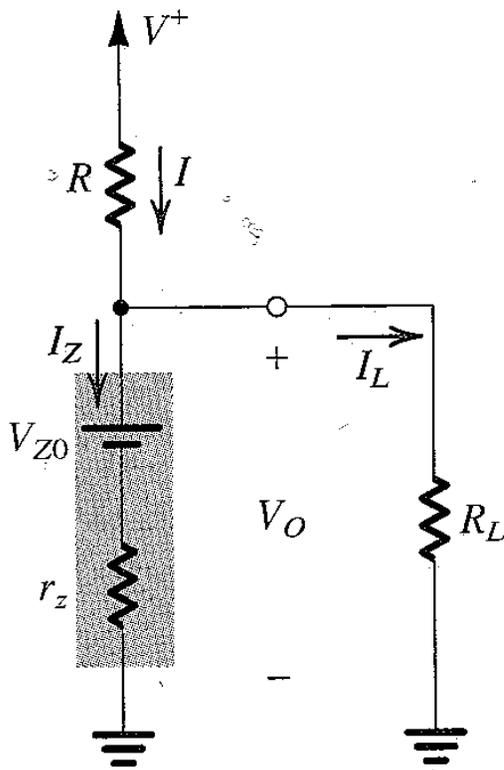
En el circuito, las especificaciones del zener son:

$$V_Z = 6,8V \text{ a } I_Z = 5 \text{ mA}; r_z = 20\Omega; I_{ZK} = 0,2 \text{ mA}$$

a) Calcule  $V_0$  sin carga y con  $V^+ = 10 \text{ V}$

b) Determine el cambio en  $V_0$  cuando  $V^+ = \pm 1V$

c) Determine el cambio en  $V_0$  cuando  $R_L = 2 \text{ k}\Omega$



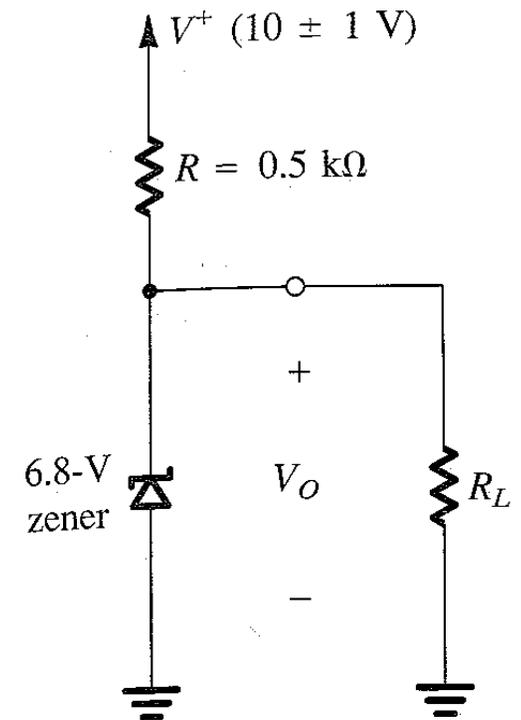
$$V_Z = V_{Z0} + r_z I_Z$$

$$V_{Z0} = V_Z - r_z I_Z = 6,7V$$

a) Cuando no hay carga:

$$I_z = I = \frac{V^+ - V_{z0}}{R + r_z} = \frac{10V - 6,7V}{0,5k\Omega + 0,02k\Omega} = 6,35mA$$

$$V_z = V_{z0} + r_z I_z = 6,7V + 0,02k\Omega \times 6,35mA = 6,83V$$



b) Cuando  $V^+ = \pm 1V$ : 
$$\Delta V_0 = \Delta V \frac{r_z}{R + r_z} = \pm 1V \frac{20\Omega}{500\Omega + 20\Omega} = \pm 38,5mV$$

Esto también puede hacerse realizando los siguientes cálculos:

Cuando la fuente es igual a 9V:

$$I_z = I = \frac{V^+ - V_{z0}}{R + r_z} = \frac{9V - 6,7V}{0,5k\Omega + 0,02k\Omega} = 4,42mA$$

$$V_z = V_{z0} + r_z I_z = 6,7V + 0,02k\Omega \times 4,42mA = 6,79V$$

Cuando la fuente es igual a 11V:

$$I_z = I = \frac{V^+ - V_{z0}}{R + r_z} = \frac{11V - 6,7V}{0,5k\Omega + 0,02k\Omega} = 8,27mA$$

$$V_z = V_{z0} + r_z I_z = 6,7V + 0,02k\Omega \times 8,27mA = 6,87V$$

$$\Delta V = 6,87V - 6,79V = 76,92mV \quad \text{o también} \quad \Delta V = \pm 38,46mV$$

c) Cuando  $R_L = 2 \text{ k}\Omega$

Circuito Thevenin equivalente entre los terminales de R:

Voltaje de Thevenin: Voltaje en el zener sin carga

Resistencia de Thevenin:  $R // r_z = 500\Omega // 20\Omega = 19,23\Omega$

Para 10 V :  $I_L = 6,83\text{V}/2,02\text{k}\Omega = 3,38\text{mA}$       $V_O = 2\text{k}\Omega \times 3,38\text{mA} = 6,76\text{V} = V_Z$

$$I_z = \frac{6,76\text{V} - 6,7\text{V}}{0,02\text{k}\Omega} = 3\text{mA}$$

Para 9 V :  $I_L = 6,79\text{V}/2,02\text{k}\Omega = 3,36\text{mA}$       $V_O = 2\text{k}\Omega \times 3,36\text{mA} = 6,72\text{V} = V_Z$

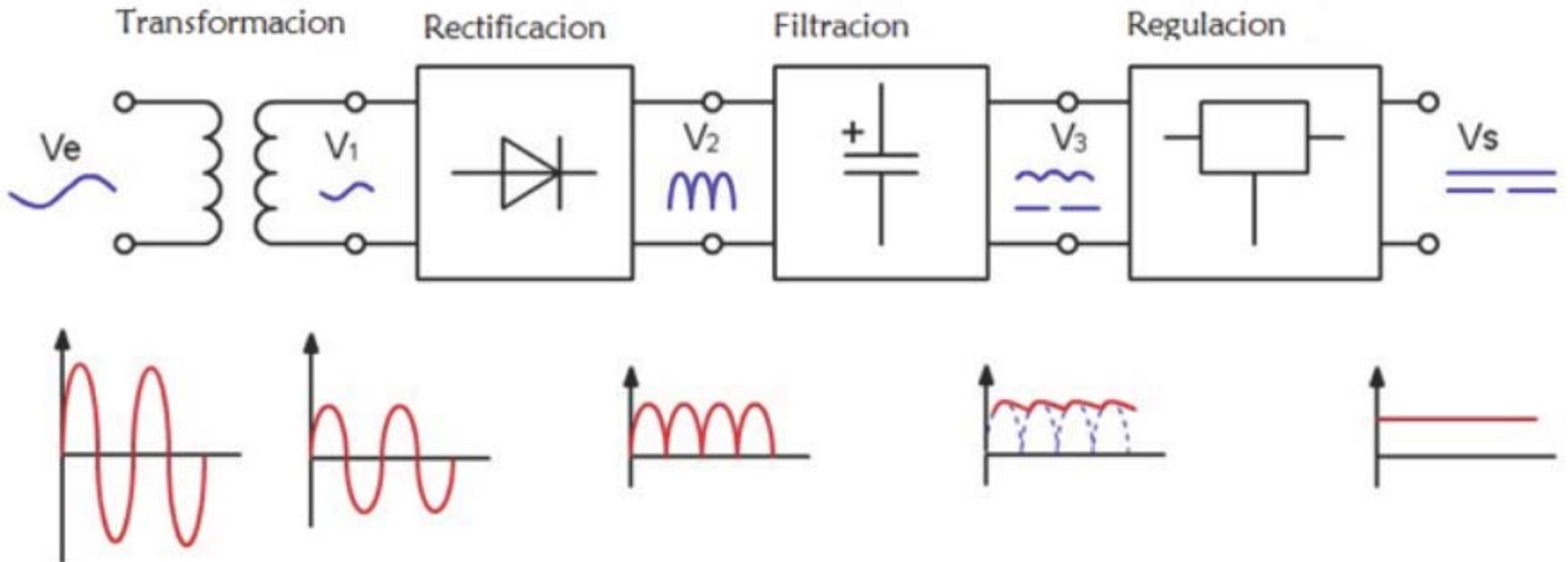
$$I_z = \frac{6,72\text{V} - 6,7\text{V}}{0,02\text{k}\Omega} = 1,14\text{mA}$$

Para 11 V :  $I_L = 6,87\text{V}/2,02\text{k}\Omega = 3,40\text{mA}$       $V_O = 2\text{k}\Omega \times 3,40\text{mA} = 6,80\text{V} = V_Z$

$$I_z = \frac{6,80\text{V} - 6,7\text{V}}{0,02\text{k}\Omega} = 5,10\text{mA}$$

$$\Delta V = 6,80\text{V} - 6,72\text{V} = 80\text{mV}$$

# PRINCIPIOS DE REGULACIÓN FUENTE REGULADA



# PARÁMETROS DE LAS FUENTES DE VOLTAJE DC REGULADAS

## Regulación de Carga

Es una medida de la capacidad de la Fuente de Voltaje DC de mantener constante su voltaje de salida ante las variaciones de la carga conectada a ella, es decir, ante las variaciones de la cantidad de corriente que debe proporcionarle al circuito que está alimentando.

$$R_C = \frac{V_{O_{Imax}} - V_{O_{SC}}}{V_{O_{Imax}}} \times 100\%$$

$V_{O_{Imax}}$  = Voltaje de salida a plena carga (corriente máxima) con voltaje de entrada máximo.

$V_{O_{SC}}$  = Voltaje de salida sin carga (corriente cero) con voltaje de entrada máximo.

Cuanto mejor es la calidad del regulador de la Fuente de Voltaje, menor es la Regulación de Carga.

## Regulación de Línea

Es una medida de la capacidad de la Fuente de Voltaje DC de mantener constante su voltaje de salida cuando varía el valor del voltaje AC aplicado a la entrada del rectificador.

$$R_L = \frac{V_{O_{V_{I_{max}}} - V_{O_{V_{I_{min}}}}}{V_{O_{V_{I_{nom}}}}} \times 100\%$$

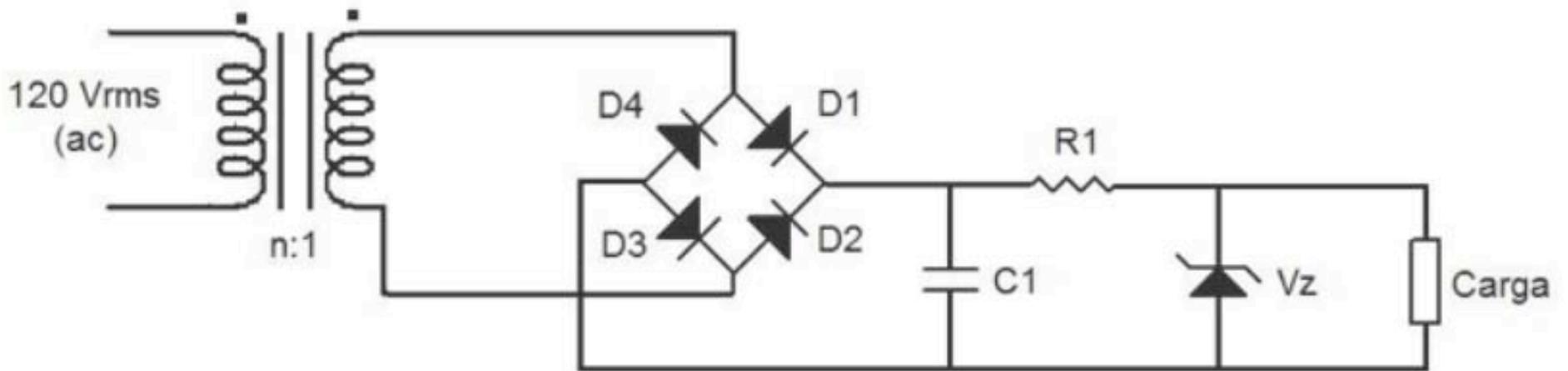
$V_{O_{V_{I_{max}}}}$  = Voltaje de salida a plena carga cuando el voltaje de entrada AC es máximo

$V_{O_{V_{I_{min}}}}$  = Voltaje de salida a plena carga cuando el voltaje de entrada AC es mínimo

$V_{O_{V_{I_{nom}}}}$  = Voltaje de salida a plena carga cuando el voltaje de entrada AC es el nominal

La calidad del Regulador es mejor a menor Regulación de Línea.

# FUENTE DE VOLTAJE DC REGULADA CON DIODO ZENER



## EJERCICIO 1

Se tiene una fuente regulada en la que el voltaje en el condensador varía entre  $V_{C_{\max}} = 15,57V$  y  $V_{C_{\min}} = 13,46V$ .

Resistencia R1:  $27\Omega$ . Resistencia de carga:  $240\Omega$   $I_{\text{carga}} = 50 \text{ mA}$

Parámetros zener:  $V_Z = 12V$ ;  $r_Z = 20\Omega$ ;  $I_Z = 10\text{mA}$ ;  $I_{Z_{\min}} = 0,5\text{mA}$ ;  $P_Z = 2W$

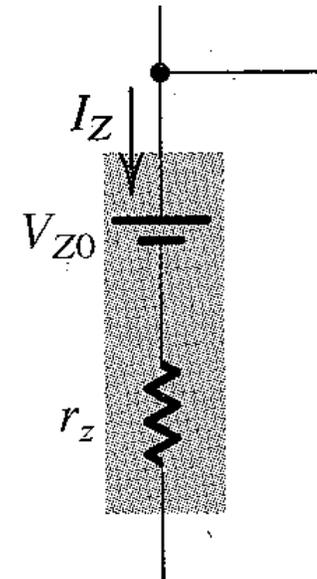
De los datos:  $I_L = 12V / 240\Omega = 50\text{mA}$

**a) Determine si el zener está siempre en su región de regulación y dentro del rango de potencia que puede disipar.**

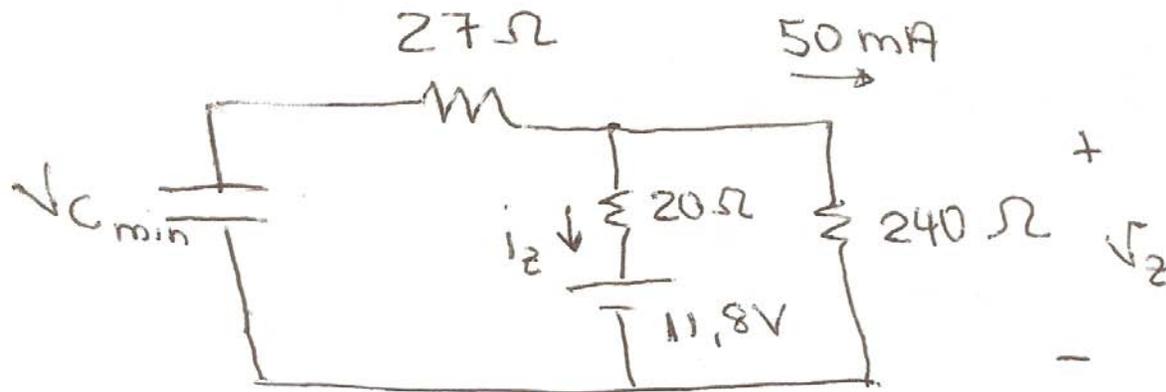
Se calcula el modelo del zener

$$V_Z = V_{Z0} + r_Z I_Z$$

$$V_{Z0} = 12V - 20\Omega \times 10\text{mA} = 11,8V$$



La corriente por el zener es mínima cuando el voltaje de entrada es mínimo y la corriente por la carga es máxima.

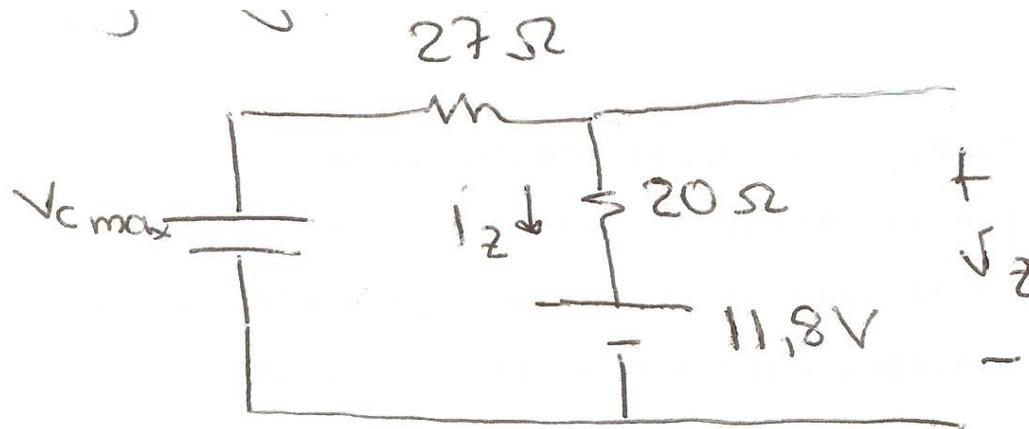


Del circuito:  $V_{C\min} = 27\ \Omega (i_z + 50\text{mA}) + 12\text{V}$

$$i_z = \frac{V_{C\min} - 12\text{V}}{0,027\text{k}\Omega} - 50\text{mA} = \frac{13,46\text{V} - 12\text{V}}{0,027\text{k}\Omega} - 50\text{mA} = 4,07\text{mA}$$

Dado que la corriente mínima es  $0,5\text{mA}$  el zener permanece en su región de regulación.

El zener disipa la mayor potencia cuando se desconecta la carga y el voltaje en el condensador es máximo ( $V_{C_{max}}$ ).



$$i_{z_{max}} = \frac{V_{C_{max}} - V_{z0}}{R_1 + r_Z} = \frac{15,57V - 11,8V}{27\Omega + 20\Omega} = 88,21mA$$

$$V_{z_{max}} = V_{z0} + i_{z_{max}} r_Z = 11,8V + 88,21mA \times 20\Omega = 13,56V$$

$$P_{z \max} = V_{z \max} i_{z \max} = 13,56V \times 88,21mA = 1,2W$$

**El zener es de 2W, por lo tanto está siempre en su región de regulación y dentro del rango de potencia que puede disipar.**

**b) Para el mismo circuito determine el factor de rizado en el zener y en el condensador.**

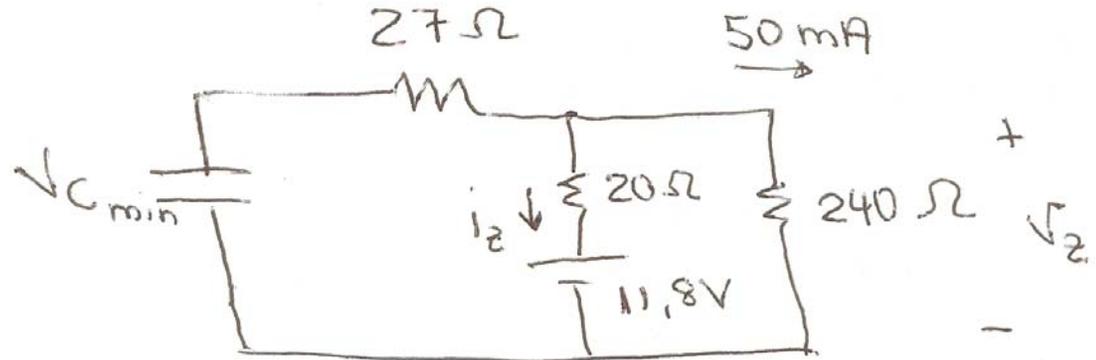
$$F_r = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\max}} \times 100\%$$

Para el condensador

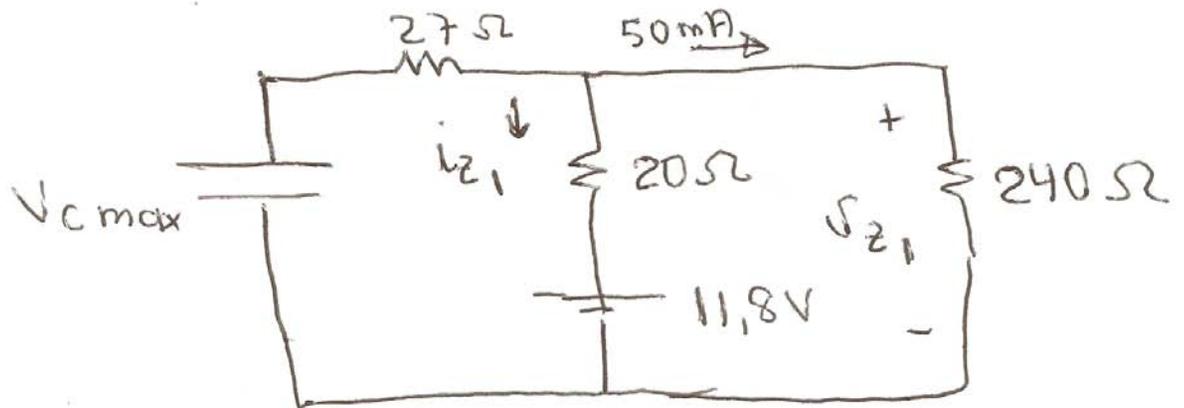
$$F_{r-\text{condensador}} = \frac{V_{C \max} - V_{C \min}}{V_{C \max}} \times 100\% = \frac{15,57 - 13,46}{15,57} \times 100\% = 13,55\%$$

Para el zener

Cuando el voltaje de entrada es  $V_{Cmin}$  y la corriente de carga es 50mA, consideramos que el voltaje del zener es 12V (fórmula inicial).



Cuando el zener está alimentando la carga de forma que por ella circule 50 mA, por la resistencia de  $27\Omega$  está circulando la corriente de zener mas la corriente de carga de 50mA.



$$V_{C \max} = R_1(i_z + 50mA) + 20\Omega i_z + 11,8V$$

$$i_{z1} = \frac{V_{C \max} - 11,8V - 27\Omega \times 50mA}{27\Omega + 20\Omega} = 51,49mA$$

$$V_{z1} = 11,8V + 51,49mA \times 20\Omega = 12,83V$$

$$Fr_{zener} = \frac{12,83V - 12V}{12,83V} \times 100\% = 6,47\%$$

El factor de rizado en el condensador es de 13,55% y en el zener es de 6,47%.

## EJERCICIO 2

$$R = 300 \Omega$$

$$V_z = 12V @ 20mA, r_z = 10 \Omega$$

$$I_{zmin} = 1mA, P_{zmax} = 1W$$

Hallar C para  $F_r = 15\%$

Seleccionar C comercial

Calcular: Nuevo  $F_r$

Corriente pico diodos

Tiempo de conducción

Corriente promedio y Potencia promedio diodos

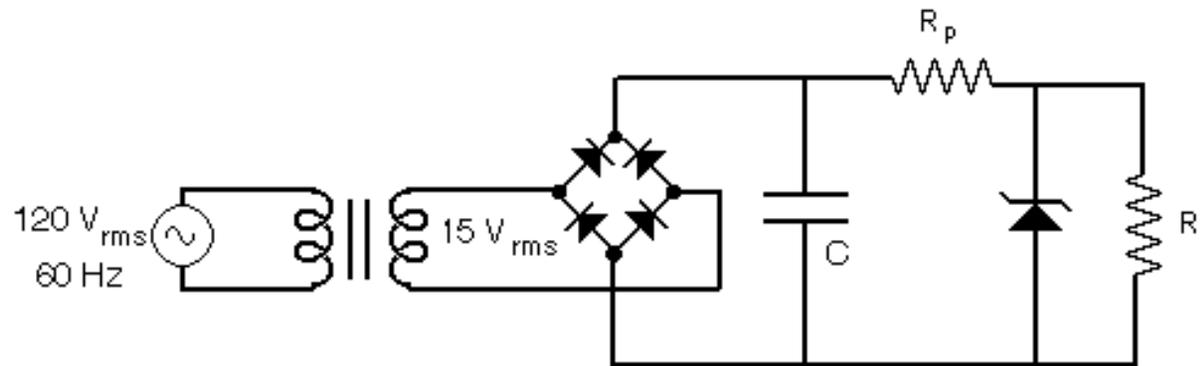
Voltaje inverso diodos

Potencia promedio en la resistencia

Potencia aparente en el transformador

Seleccionar un valor de  $R_p$  que permita el correcto funcionamiento del regulador. (¿El zener puede operar cuando se desconecta la carga?)

Determinar la regulación de carga y la regulación de línea cuando la entrada varía 2% alrededor de su valor nominal.



En el secundario del transformador  $V_{pico} = 15\sqrt{2} = 21,21V$

En el condensador  $V_{max} = 21,21V - 1,4V = 19,81V$

Factor de rizado  $F_r = \frac{V_r}{V_{max}} = 0,15 \Rightarrow V_r = 2,97V \Rightarrow V_{min} = 16,84V$

$$V_{min} = V_{max} \text{sen} \omega t_o \Rightarrow \omega t_o = \text{arcsen} \frac{V_{min}}{V_{max}} = 1,02 \text{rad} \Rightarrow t_o = \frac{1,02}{2\pi 60 \text{Hz}} = 2,69 \text{ms}$$

$$T = \frac{1}{60 \text{Hz}} = 16,67 \text{ms} \Rightarrow \frac{T}{2} = 8,33 \text{ms} \Rightarrow \frac{T}{4} = 4,17 \text{ms} \Rightarrow \frac{T}{4} + t_o = 6,86 \text{ms}$$

Para calcular C aplicamos la ecuación:

Falta determinar  $I_C$

$$I_C = C \frac{V_r}{\frac{T}{4} + t_o} \Rightarrow C = \frac{I_C \left( \frac{T}{4} + t_o \right)}{V_r}$$

El condensador va a suministrar corriente a la resistencia de carga y al zener a través de la resistencia Rp. Considerando valores nominales, la corriente por R es  $I_R = 12V/300\Omega = 40 \text{ mA}$ . Dado que  $I_{zmin} = 1\text{mA}$ , vamos a considerar que cuando está regulando, por el zener circulan unos 5 mA. Por lo tanto  $I_C=45 \text{ mA}$ . Con este valor:

$$C = \frac{I_C \left( \frac{T}{4} + t_o \right)}{V_r} = \frac{45\text{mA} \times 6,86\text{ms}}{2,97\text{V}} = 103,9\mu\text{F}$$

El valor es próximo a **100μF**, por lo que escogemos este valor. Pero esto va a dar un Factor de Rizado ligeramente mayor. Si se quiere un Factor de Rizado menor que el indicado, hay que seleccionar un valor de condensador mayor que el obtenido mediante los cálculos. Para conocer el nuevo Factor de Rizado hay que calcular de nuevo  $t_o$  con la ecuación:

$$I_C = C \frac{V_r}{\frac{T}{4} + t_o} = \frac{V_{\max}(1 - \text{sen}\omega t_o)}{\frac{T}{4} + t_o}$$

Esta ecuación tiene que resolverse por aproximaciones sucesivas.

$$I_C = C \frac{V_r}{\frac{T}{4} + t_o} = C \frac{V_{\max}(1 - \text{sen}\omega t_o)}{\frac{T}{4} + t_o} \Rightarrow \frac{I_C}{CV_{\max}} \left( \frac{T}{4} + t_o \right) = 1 - \text{sen}\omega t_o$$

Con los datos del problema

$$K = \frac{I_C}{CV_{\max}} = \frac{45\text{mA}}{100\mu\text{F} \times 19,81\text{V}} = 0,02272 \text{ (} t_o \text{ en ms)}$$

$$0,02272 \left( \frac{T}{4} + t_o \right) = 1 - \text{sen}\omega t_o$$

$$A = 0,02272 \left( \frac{T}{4} + t_o \right)$$

$$B = 1 - \text{sen}\omega t_o$$

Aproximaciones sucesivas comenzando desde el valor  $t_0$  conocido

$t_0$	A	B	Diferencia
2,69	0,15584	0,15098	0,00486
2,68	0,15563	0,15298	0,00265
2,67	0,15540	0,15499	0,00041
2,66	0,15518	0,157	-0,00182
2,665	0,15529	0,156	-0,00071
2,668	0,15536	0,15539	-0,00003

Por lo tanto  **$t_0 = 2,668\text{ms}$**      **$V_{\min} = 19,81 \text{ sen } \omega t_0 = 16,73\text{V}$**

Cálculo del nuevo factor de rizado

$$F_r = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\max}} \times 100\% = \frac{19,81\text{V} - 16,73\text{V}}{19,81\text{V}} = 15,54\%$$

Es mayor que el solicitado inicialmente

Cálculo de la corriente pico en los diodos:

$$I_{dmax} = C \omega V_{max} \cos \omega t_0 + I_{Rmax}$$

$$I_{dmax} = 100\mu F \times 377 \text{ rad} \times 19,81V \cos(377 \times 0,002668) + 0,045A = 0,44A$$

La corriente pico es de 440mA mientras que la de la carga es 40 mA.

Tiempo de conducción de los diodos  $t_c = \frac{T}{4} - t_o = 1,5ms$

Corriente promedio en los diodos  $I_{dprom} = \frac{I_{dmax} t_c}{T} = \frac{440mA \times 1,5ms}{16,67ms} = 39,6mA$

Potencia promedio en los diodos  $P_{dprom} = \frac{I_{dmax} V_d t_c}{T} = 27,7mW$

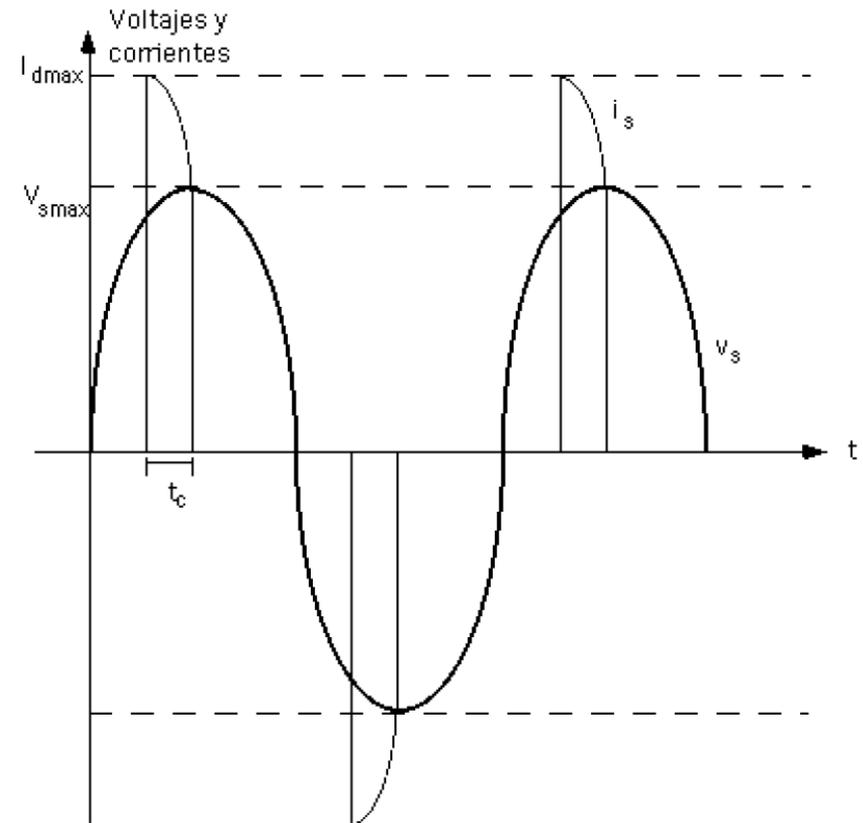
Voltaje pico inverso en los diodos  $PIV = 21,21V$

Potencia aparente en el transformador:

$$P_{aparente} = V_{rms} I_{rms}$$

Forma de onda de la corriente y el voltaje en el secundario del transformador

Aproximamos la corriente a un nivel constante igual a  $I_{dmax}$  durante el tiempo de conducción correspondiente.



$$I_{rms_d} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{t_c} (I_{dmax})^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} 2(I_{dmax})^2 t_c} = \sqrt{\frac{2 \times (0,44 A)^2 \times 1,5 ms}{16,67 ms}} = 0,19 A_{rms}$$

Por lo tanto

$$P_{aparente} = V_{rms_{sec}} I_{rms_d} = 15 V_{rms} \times 0,19 A_{rms} = 2,8 VA$$

## Cálculos del regulador con zener

Cálculo de  $V_{z0}$  para el modelo del zener  $12V@20mA$ ,  $r_z=10\ \Omega$

$$V_z = V_{z0} + i_z r_z \Rightarrow V_{z0} = V_z - i_z r_z = 12V - 20mA \times 0,01k\Omega = 11,8V$$

El valor de  $R_p$  debe ser tal que, cuando el voltaje en el condensador sea mínimo, circule la corriente requerida por la carga  $R$  más una cierta cantidad de corriente por el zener para que se mantenga en la zona de regulación.

Seleccionamos una corriente de  $5mA$  para el zener cuando se tiene la carga de  $300\ \Omega$ . Para esta corriente el voltaje del zener es:

$$V_{z1} = V_{z0} + i_z r_z = 11,8V + 5mA \times 0,01k\Omega = 11,85V$$

Corriente por la carga

$$I_R = \frac{11,85V}{0,3k\Omega} = 39,5mA$$

Corriente total por Rp:  $I_{Rp} = 39,5mA + 5mA = 44,5mA$

Por lo tanto la consideración de 45 mA con la que realizamos los cálculos iniciales es adecuada.

Valor de Rp:  $R_p = \frac{V_{\min} - V_{z1}}{I_{Rp}} = \frac{16,73V - 11,85V}{45mA} = 110,89\Omega$

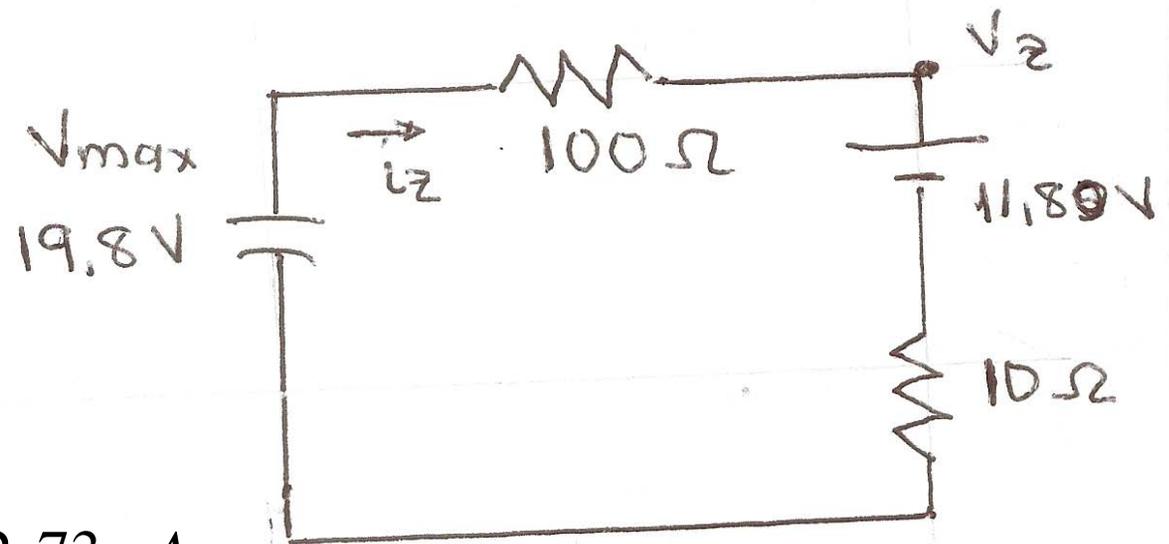
Tenemos que seleccionar un valor menor que el obtenido. **Rp=100Ω**

Potencia en Rp :  $P_{Rp} = I_{Rp}^2 R_p = (0,045A)^2 \times 100\Omega = 0,2W$

Puede seleccionarse una resistencia de 100Ω, 0,5W

Para calcular la potencia máxima en el zener: Por el zener circula la máxima corriente cuando el voltaje en el condensador es máximo y se desconecta la carga.

El circuito equivalente es



$$i_z = \frac{19,8V - 11,8V}{110\Omega} = 72,73mA$$

$$V_z = 11,8V + 72,73mA \times 0,01k\Omega = 12,53V$$

$$P_z = V_z i_z = 12,53V \times 72,73mA = 911mW = 0,91W$$

El zener va a estar disipando 0,91W. Es un zener de 1W, por lo que está dentro de rango, pero el margen es muy pequeño. Es preferible seleccionar un zener de mayor potencia.

## Regulación de carga

$$R_C = \frac{V_{O_{Imax}} - V_{O_{SC}}}{V_{O_{Imax}}} \times 100\%$$

Voltaje del zener sin carga: 12,53V

Voltaje del zener a plena carga: 11,85V

$$R_C = \frac{12,53 - 11,85}{11,85} \times 100\% = 5,74\%$$

## Regulación de línea

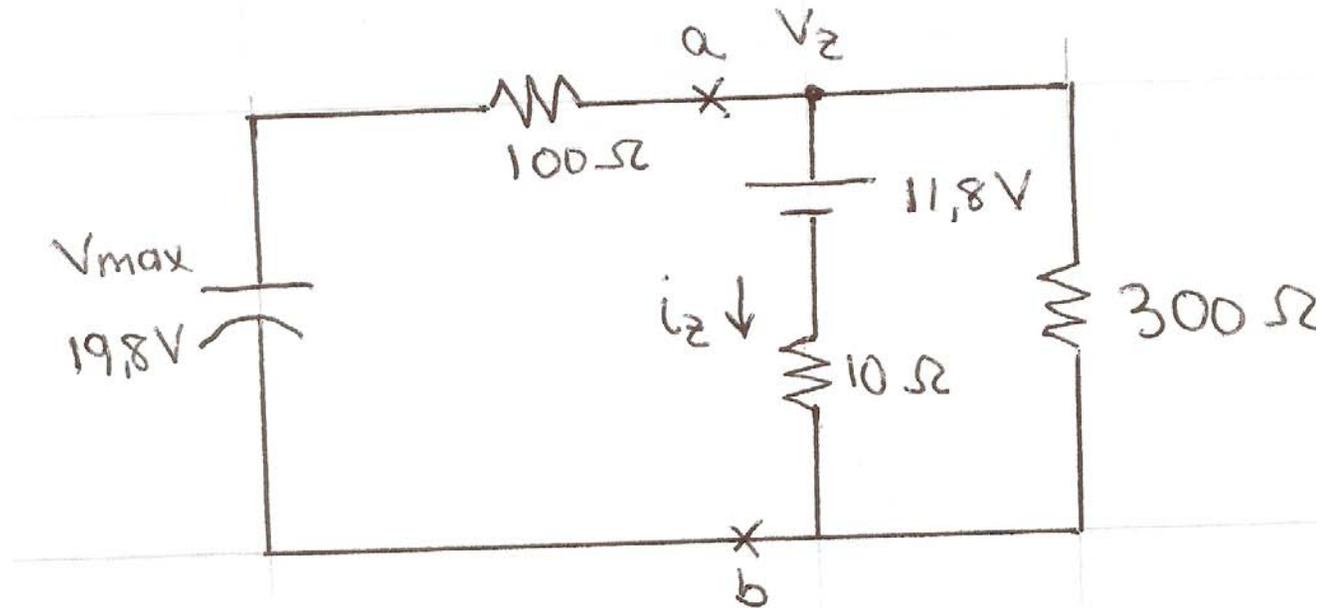
Hay que calcular el voltaje de salida ( $V_z$ ) cuando el voltaje de entrada es el máximo nominal, cuando está 2% por encima del valor nominal y cuando está 2% por debajo del valor nominal.

$$V_{max_{nom}} = 19,81V$$

$$V_{max_{+2\%}} = 15V \sqrt{2} \times 1,02 - 1,4V = 20,24V$$

$$V_{max_{-2\%}} = 15V \sqrt{2} \times 0,98 - 1,4V = 19,39V$$

Circuito cuando el voltaje de entrada es el máximo nominal

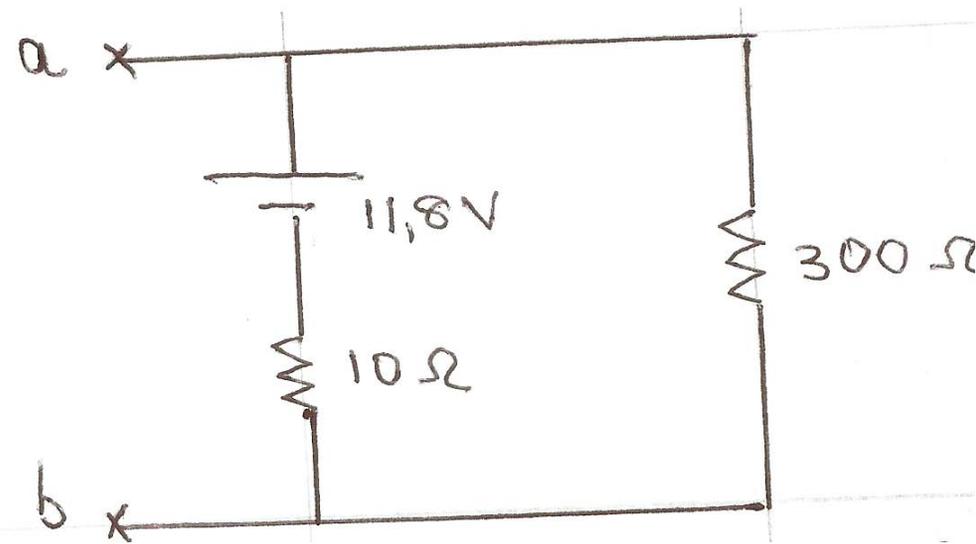


Thevenin entre a y b

$$i = \frac{11,8V}{310\Omega} = 38,06mA$$

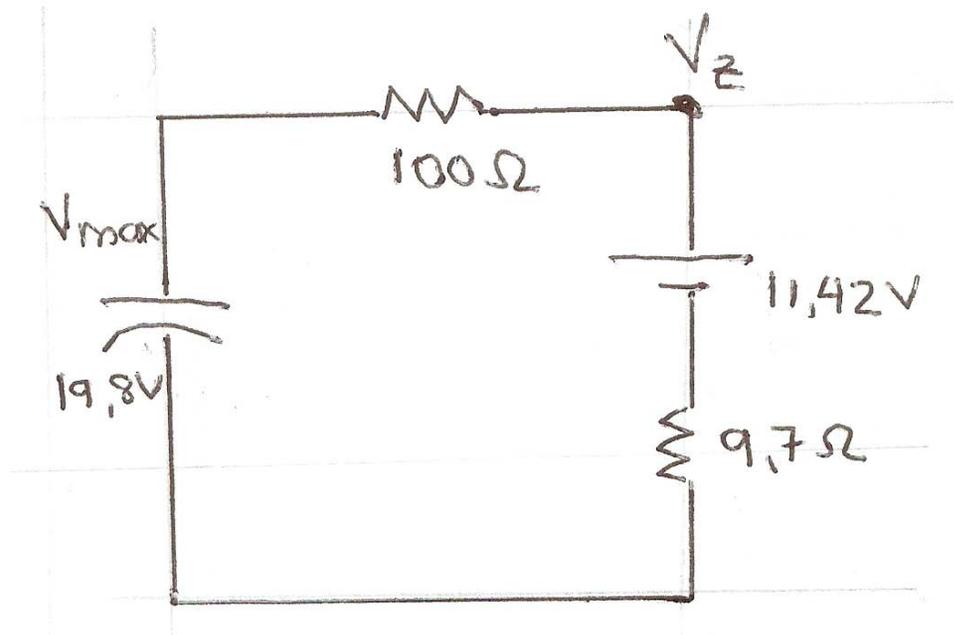
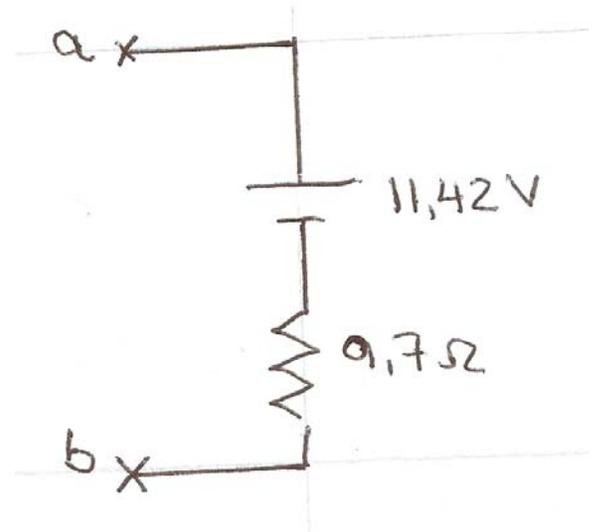
$$V_{TH} = 11,8V - 0,01k\Omega \cdot i = 11,42V$$

$$R_{TH} = 300\Omega // 10\Omega = 9,7\Omega$$



## Equivalente Thevenin

Con este equivalente calculamos el voltaje  $V_z$  a plena carga con estrada nominal



$$i_{Rp} = \frac{19,8V - 11,42V}{0,1097k\Omega} = 76,4mA$$

$$V_{z_{nom}} = 11,42V + 0,0097k\Omega \times 76,4mA = 12,16V$$

Cuando el voltaje de entrada está 2% sobre el valor nominal:

$$i_{Rp} = \frac{20,24V - 11,42V}{0,1097k\Omega} = 80,4mA$$

$$V_{z_{+2\%}} = 11,42V + 0,0097k\Omega \times 80,4mA = 12,2V$$

Cuando el voltaje de entrada está 2% por debajo del valor nominal:

$$i_{Rp} = \frac{19,39V - 11,42V}{0,1097k\Omega} = 72,7mA$$

$$V_{z_{-2\%}} = 11,42V + 0,0097k\Omega \times 72,7mA = 12,13V$$

Regulación de línea

$$R_C = \frac{12,2V - 12,13V}{12,16V} \times 100\% = 0,58\%$$

## Potencia máxima en la carga

Se calcula cuando el voltaje en el condensador es máximo y la carga está conectada, para voltaje de entrada nominal.

$$P_{RC} = \frac{(12,16V)^2}{300\Omega} = 0,49W$$

Es conveniente que la resistencia de  $300\Omega$  sea capaz de disipar por lo menos  $1W$ .