

## 2. Diodos. Circuitos con diodos.

1. El diodo de unión: comportamiento en continua y en baja frecuencia.
  - El diodo ideal. Modelo del diodo ideal.
  - Diodos semiconductores. El modelo exponencial.
  - Modelo por tramos lineales.
  - Análisis gráfico. La recta de carga.
  - Bloques de una fuente estabilizada.
  - El transformador.
  - Circuitos rectificadores.
  - Filtro por condensador.
  - Diodos Zener. Estabilizador de tensión (regulador en derivación).

Docente: Francisco Javier Llopis Cánovas

Docente: Beatriz Rodríguez Mendoza

Docente: Silvestre Rodríguez Pérez

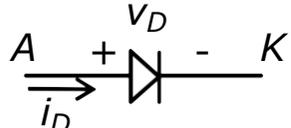
Docente: Julio Francisco Rufo Torres



## 2.1 El diodo de unión: comportamiento en continua y en baja frecuencia.

### El diodo ideal. (Ref. [1])

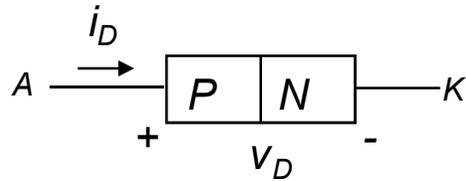
- El diodo es un dispositivo que permite el paso de la corriente en un sentido, bloqueándola en sentido contrario.

- Símbolo:  Terminales: A (ánodo), K (cátodo).

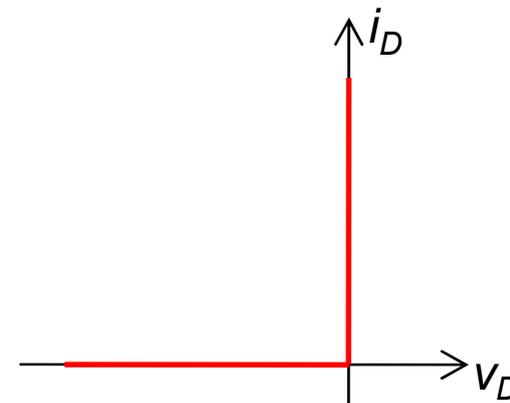
La corriente puede circular con facilidad de ánodo (A) a cátodo (K), pero no en sentido contrario.

- Diodos fabricados con semiconductores:  $i_D$  varía exponencialmente con  $v_D$ . Se trata de dispositivos *no lineales*.

En los diodos semiconductores se crean dos regiones N y P mediante la adición controlada de impurezas. En la región N los portadores de carga mayoritarios son los electrones. Y en la región P los portadores mayoritarios de carga son los *huecos*. Un hueco es una pseudopartícula que se crea cuando un electrón deja de formar parte de un enlace, y a la que se le atribuye una carga positiva.

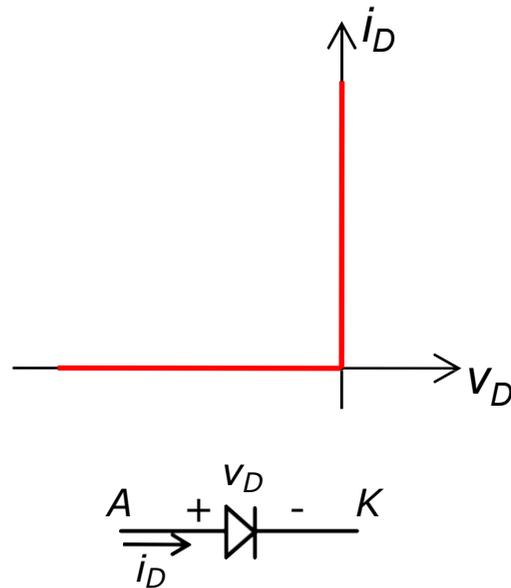


- Idealmente, su comportamiento se puede asimilar al de un interruptor:
  - Con el interruptor cerrado ( $v_D = 0$ ) puede circular corriente ( $i_D > 0$ )
  - El interruptor está abierto ( $i_D = 0$ ) para  $v_D < 0$ .



## Modelo del diodo ideal

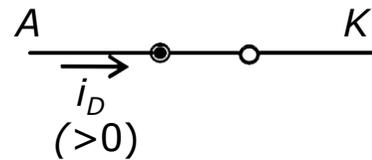
Ref. [1]



- Si el diodo conduce, la corriente va de ánodo a cátodo, sin caída de tensión:

$$i_D > 0, v_D = 0 \rightarrow \text{diodo polarizado en directa.}$$

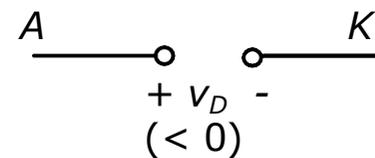
Equivale a un cortocircuito.



- Con A negativo respecto a K se bloquea la corriente:

$$v_D < 0, i_D = 0 \rightarrow \text{diodo polarizado en inversa.}$$

Equivale a un circuito abierto.

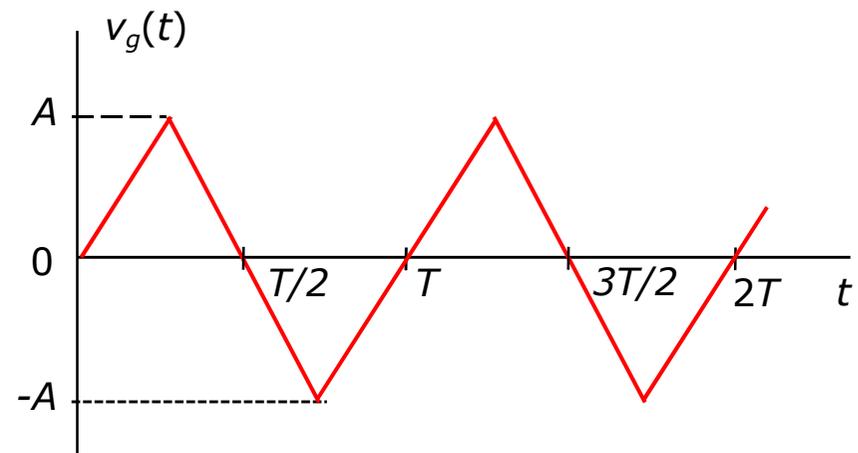
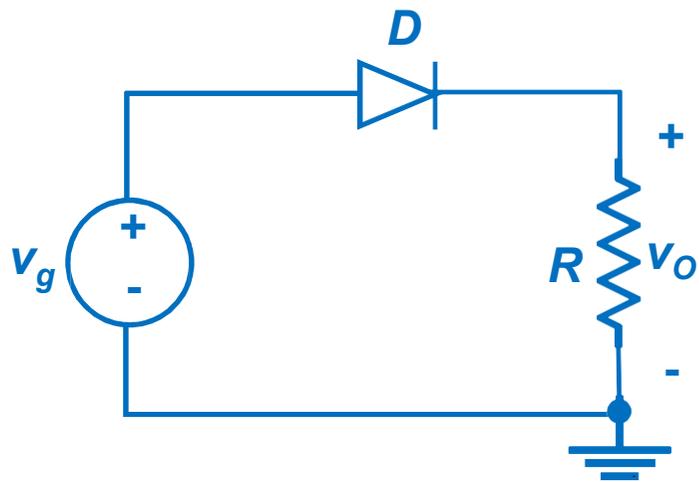


### Ejemplo 1

En el circuito de la figura el diodo se supone ideal.

Deducir la forma de onda de la salida  $v_O$  cuando  $v_g$  es una señal triangular de amplitud  $A$ .

Ref. [1]



En los intervalos de tiempo  $0 - (T/2)$  y  $T - (3T/2)$  la tensión  $v_g$  es positiva y tiende a impulsar una corriente por el diodo en sentido ánodo-cátodo.

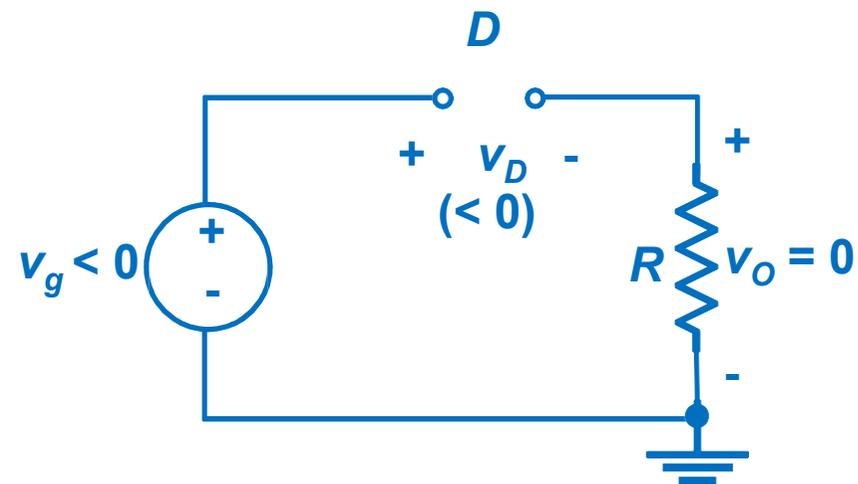
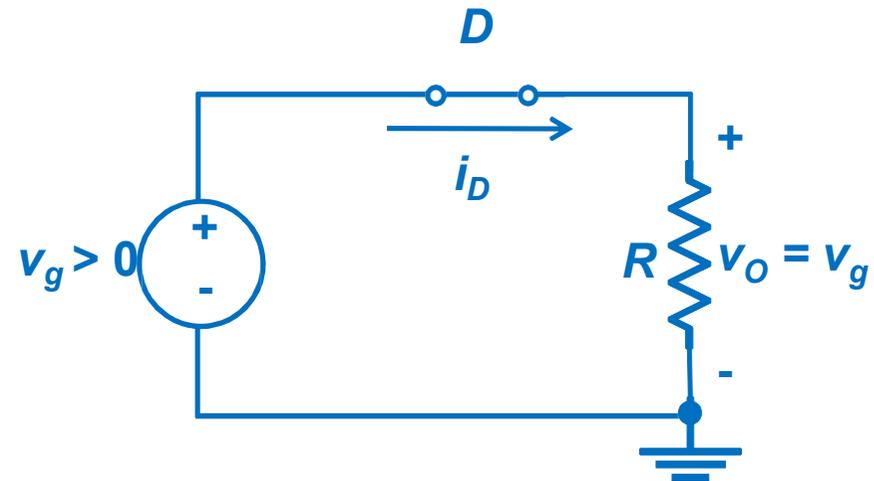
El diodo, polarizado en directa, se comporta como un cortocircuito y  $v_O = v_g$ .

Con  $v_g > 0$  la corriente por el diodo es positiva, como debe ocurrir si está polarizado en directa:

$$i_D = v_g/R > 0.$$

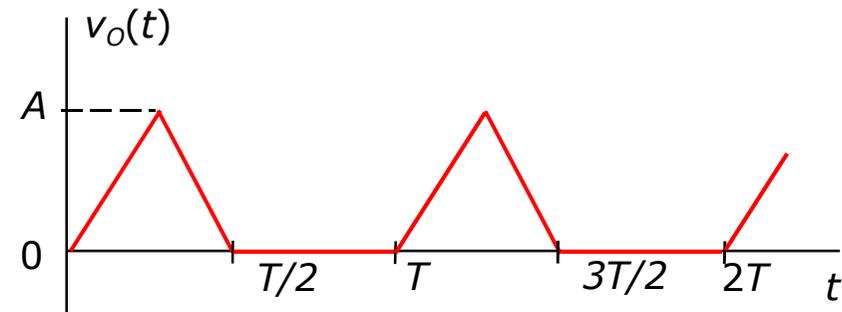
En los otros intervalos el diodo está polarizado en inversa y se comporta como un circuito abierto. La corriente por el diodo es nula y también será nula la tensión de salida:  $v_O = 0$ .

Se comprueba también que la tensión aplicada al diodo coincide con  $v_g$ . Como  $v_g < 0$ , el diodo está polarizado en inversa.



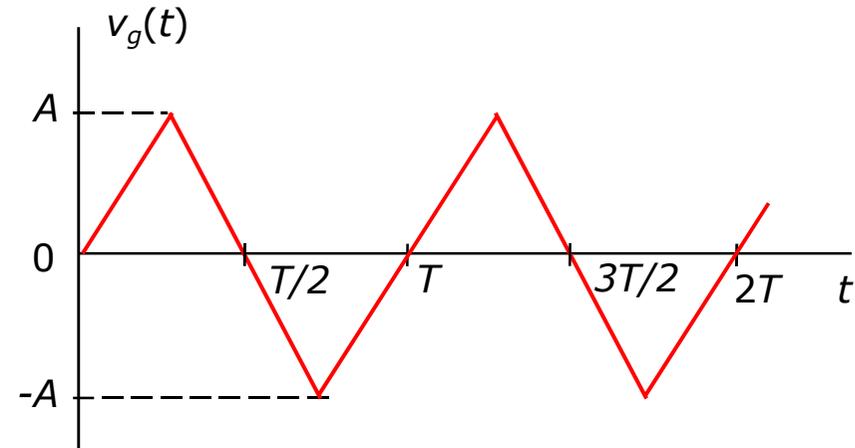
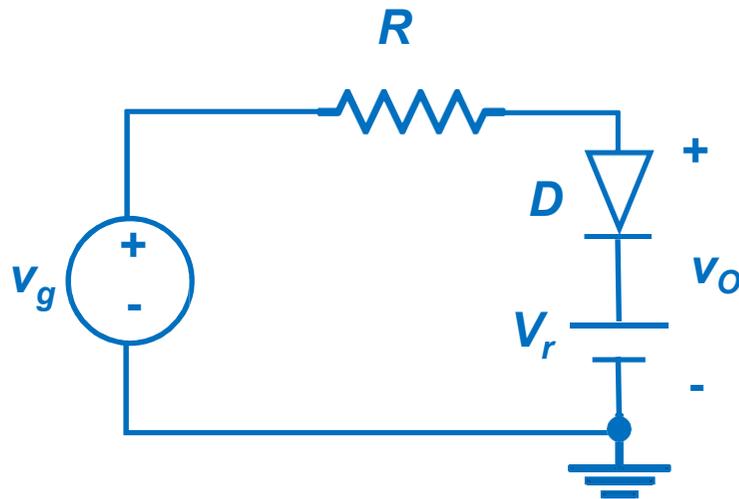
El diodo permite el "paso" de los semiciclos positivos y bloquea los negativos, lo que se conoce como *efecto rectificador*.

Este efecto se emplea en las fuentes de alimentación para hacer posible la conversión de tensiones alternas en tensiones continuas.



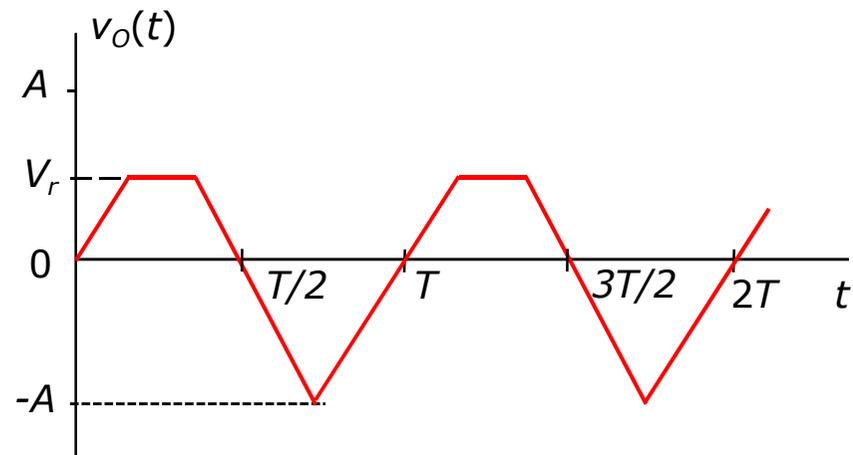
**Ejemplo 2.** Determinar la forma de onda de salida en el circuito de la figura. La tensión de entrada  $v_g$  es la misma del ejemplo 1. Suponer que el diodo se comporta como un interruptor ideal.

Ref. [1]



El cátodo del diodo está a la tensión constante  $V_r$ : solo puede conducir si la tensión de entrada  $v_g$  supera dicho valor.

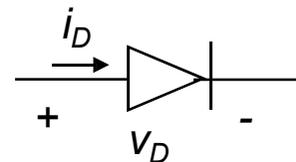
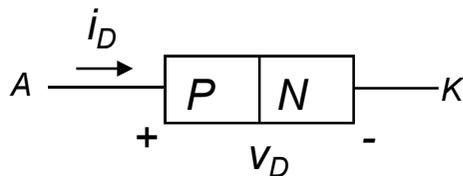
- Si  $v_g > V_r$  el diodo conduce (se comporta como un cortocircuito) y  $v_O = V_r$ . La corriente que circula por el diodo se expresa como  $i_D = (v_g - V_r)/R$  y su valor es positivo ya que  $v_g > V_r$ .
- En caso contrario diodo está bloqueado, comportándose como un circuito abierto. En este caso la salida coincide con la entrada puesto que no circula corriente por la resistencia.
- El circuito se comporta como un *recortador*. Los diodos pueden emplearse en este tipo de aplicaciones cuando se necesita limitar las tensiones de operación de un circuito.



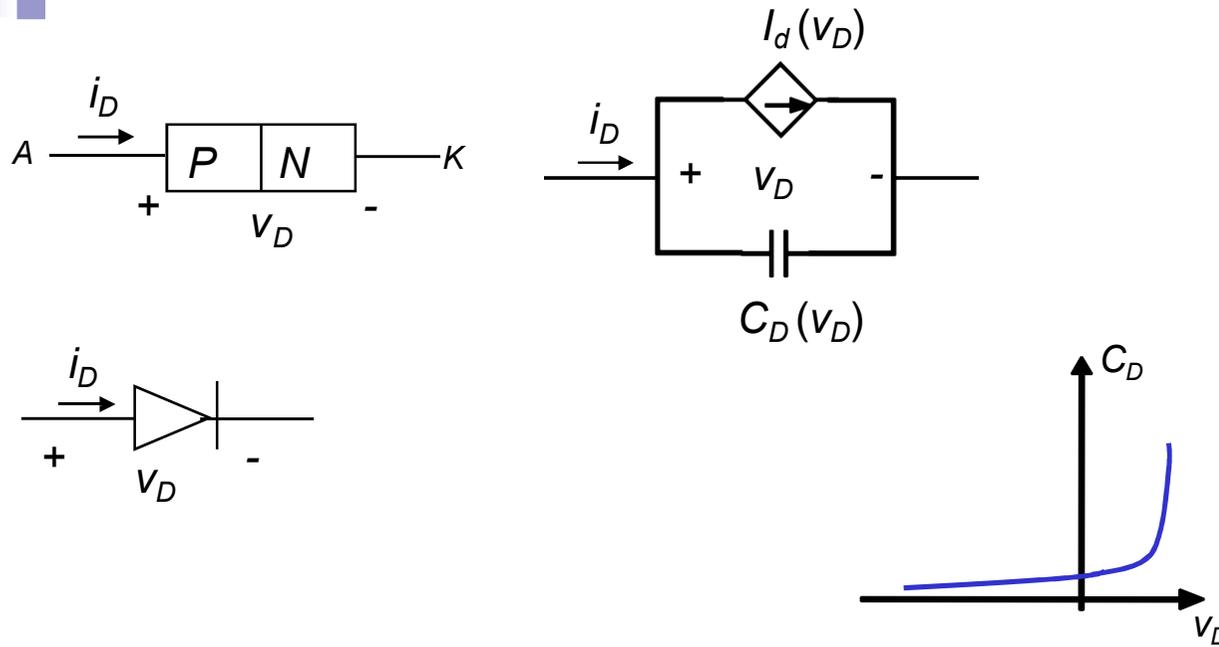
## Diodos semiconductores. El modelo exponencial.

(Ref. [1])

- Actualmente la mayor parte de los diodos empleados en los circuitos electrónicos se fabrican con materiales semiconductores.
- Su estructura se basa en la unión de dos semiconductores, uno de tipo P y otro N.
- En un semiconductor P predominan las cargas móviles positivas, y en uno de tipo N las negativas.
- Aplicando una tensión positiva al terminal P respecto al N circula una corriente en el sentido de P a N, tanto mayor cuanto más elevada sea esta tensión.
- Si se invierte la polaridad de la tensión la corriente circula en sentido contrario pero tiene un valor muy pequeño.
- El terminal conectado a la región P (N) es el ánodo (cátodo) del diodo.
- En la curva característica se distinguen tres regiones:
  - región de polarización directa (tensión positiva, la corriente crece rápidamente con la tensión)
  - región de polarización inversa (tensión negativa, corriente muy débil)
  - región de ruptura o de disrupción (tensión negativa, la corriente crece rápidamente con la tensión)

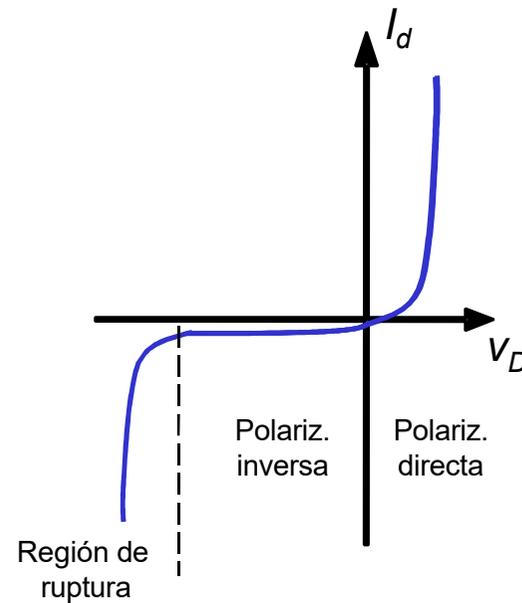


## 2.1 Diodos semiconductores: el modelo exponencial



La capacidad  $C_D$  da cuenta de los efectos de almacenamiento de carga en la unión PN (se ignora en el análisis de circuitos en continua o en baja frecuencia).

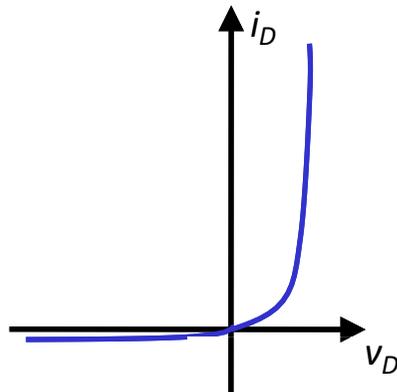
Curva característica



$$I_d = I_s \left( e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right)$$

### Curva característica

En el modelo que se emplea para caracterizar los *diodos rectificadores* no se tiene en cuenta la capacidad  $C_D$ .



$$i_D = I_S \left( e^{\frac{v_D}{\eta V_T}} - 1 \right)$$

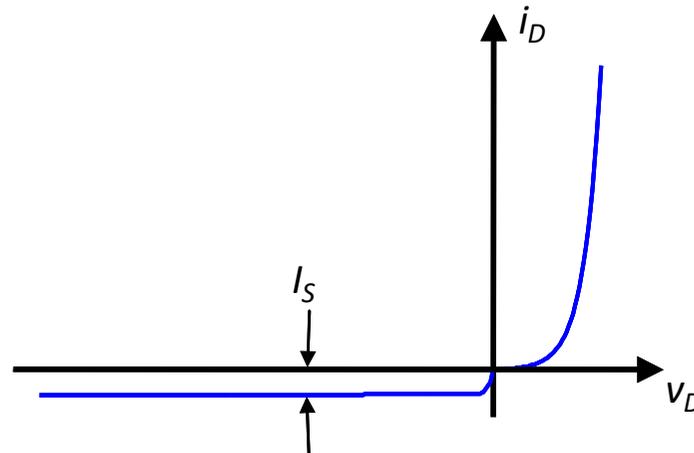
$V_T$ : voltaje térmico, definido como  $V_T = kT/q$ ;  $k$ : constante de Boltzmann;  $T$ : temperatura absoluta;  $q$ : carga del electrón ( $1.6 \times 10^{-19}$  C);  $k = 1.38 \times 10^{-23}$  J/K.

A 20 °C,  $V_T = 25.2$  mV; y a 25 °C,  $V_T = 25.8$  mV. En los cálculos se supone muchas veces un valor aproximado de 25 mV a temperatura ambiente.

$I_S$ : corriente inversa de saturación.

$\eta$ : factor de idealidad (parámetro con valores comprendidos entre 1 y 2).

Curva característica



- Para tensiones  $v_D$  positivas la corriente circula en sentido directo y aumenta exponencialmente con la tensión.
- Con tensiones  $v_D$  negativas (del orden de unas decenas de mV), la corriente será aproximadamente igual a  $-I_S$ . Esto se aprecia mejor ampliando la escala de corrientes negativas.

Pero  $I_S$  tiene un valor muy pequeño, del orden de  $10^{-15}$  A en diodos de silicio de baja potencia (diodos "de señal"), por lo que se suele considerar que en inversa el diodo se comporta como un circuito abierto.

Sin embargo la corriente inversa de saturación aumenta con la temperatura, efecto que debe tenerse en cuenta en los dispositivos de potencia.

- La relación

$$i_D = I_S \left( e^{\frac{v_D}{nV_T}} - 1 \right)$$

puede emplearse para determinar la corriente en las regiones directa e inversa, pero no en la de ruptura.

**Ejemplo 3.** Un diodo semiconductor tiene una corriente inversa de saturación  $I_S = 10^{-14}$  A. Representar la curva característica en el intervalo entre 0 y 0.72 V empleando para las corrientes una escala lineal y otra logarítmica. Suponer  $\eta = 1$  y  $V_T = 26$  mV. Ref. [1]

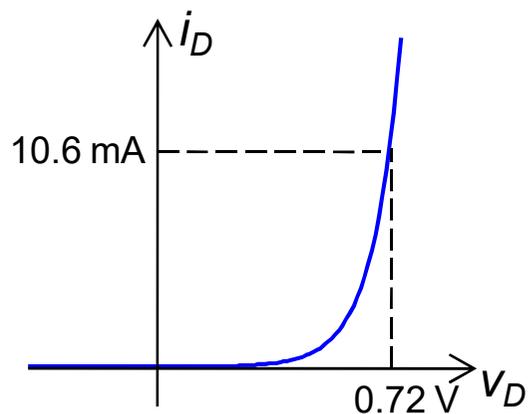
Escala lineal.- Utilizamos la expresión  $i_D = I_S[\exp(v_D/V_T)-1]$ . Si  $v_D = 0$  V, entonces  $i_D = 0$ .  
Para  $v_D = 0.7$  V, sustituyendo valores, se obtiene  $i_D \approx 10.6$  mA

Escala logarítmica.- Consideramos los siguientes valores de corriente: 10 mA, 1 mA, 100  $\mu$ A, 10  $\mu$ A.

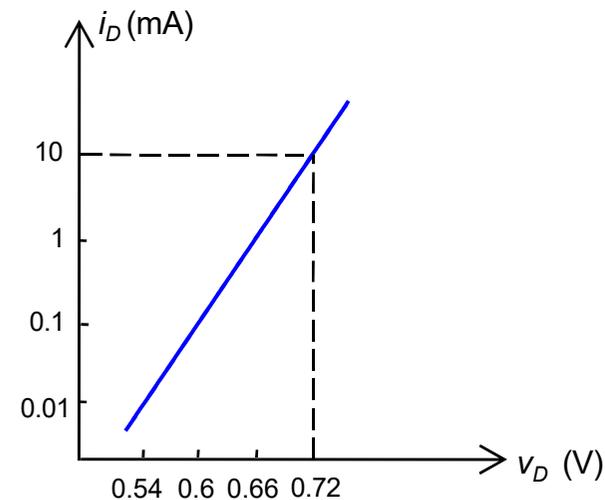
Deducimos los valores de  $v_D$  a partir de la expresión:  $v_D = V_T \ln[(i_D/I_S) + 1]$

$i_D = 10$  mA:  $v_D = 0.7184$  V  $\approx 0.72$  V;  
( $i_D = 10.6$  mA:  $v_D = 0.7199$  V  $\approx 0.72$  V)

$i_D = 1$  mA:  $v_D = 0.659$  V  $\approx 0.66$  V;  $i_D = 100$   $\mu$ A:  $v_D \approx 0.6$  V;  $i_D = 10$   $\mu$ A:  $v_D \approx 0.54$  V



Escala lineal

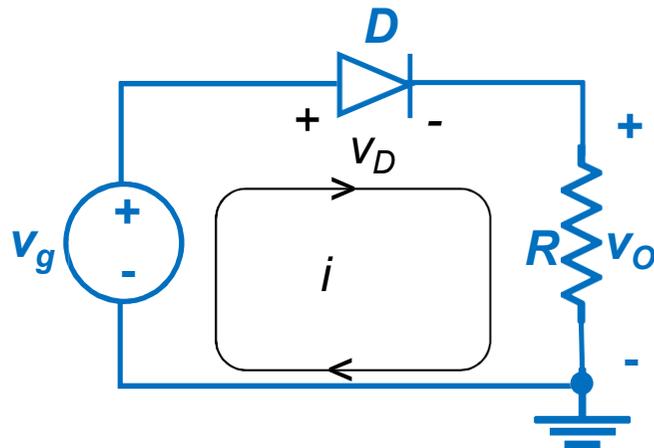


Escala logarítmica

Los diodos como los del ejemplo anterior conducen con corrientes significativas si se les aplica una tensión mínima o tensión umbral ( $V_\gamma$ ). En los diodos de silicio suele considerarse que la tensión umbral es del orden de 0.6 V – 0.7 V para corrientes del orden de miliamperios.

El término "-1" en la relación  $i_D = I_S[\exp(v_D/\eta V_T)-1]$  puede despreciarse si la tensión  $v_D$  es del orden de unas decenas de milivoltios. Como esta relación puede conducir a ecuaciones trascendentes, la solución se determina recurriendo a métodos numéricos.

**Ejemplo 4.** Utilizando el modelo exponencial, calcular la tensión de salida  $v_O$  en el circuito de la figura. Datos:  $v_g = 10$  V,  $I_S = 10^{-14}$  A,  $\eta = 1$ ,  $R = 1$  k $\Omega$ . Ref. [1]



Siendo  $i$  la corriente de la malla, escribimos:  
 - la ecuación de la malla  
 - la relación entre la corriente y la tensión del diodo

$$v_g = v_D + iR$$

$$i \cong I_S e^{v_D / V_T}$$

$$\rightarrow v_g = v_D + R I_S e^{v_D / V_T}$$

En la ecuación anterior no puede despejarse la incógnita  $v_D$  directamente, por lo que deduciremos su valor mediante ensayo y error. Escribimos la ecuación de forma equivalente:

$$v_D = v_g - R I_S e^{v_D/V_T}$$

Introducimos la función  $f(v_D)$  (segundo miembro de la ecuación):  $f(v_D) = v_g - R I_S e^{v_D/V_T}$

Se trata entonces de resolver la ecuación  $v_D = f(v_D)$ . Se indica a continuación el proceso para determinar la solución (desde luego, pueden plantearse otras estrategias):

$v_{D,i}$ , V	$f(v_{D,i})$ , V
0	10
1	-2.36×10 <sup>6</sup>
0.5	9.9
0.75	-9.7
0.625	9.28
0.688	1.05
0.719	-2.09
0.703	-6.3
0.6955	-2.08
...	...
<b>0.689</b>	<b>0.686</b>

Conocida la tensión  $v_D$ , la tensión de salida se deduce de forma inmediata:

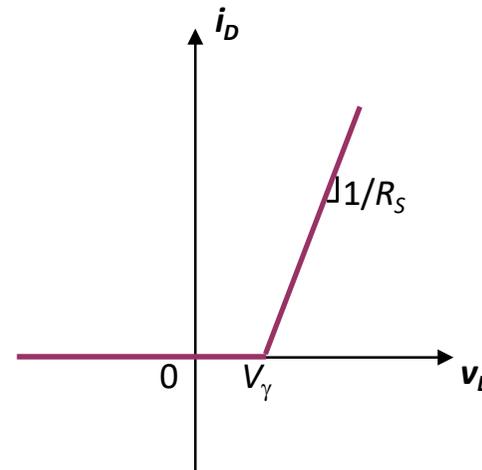
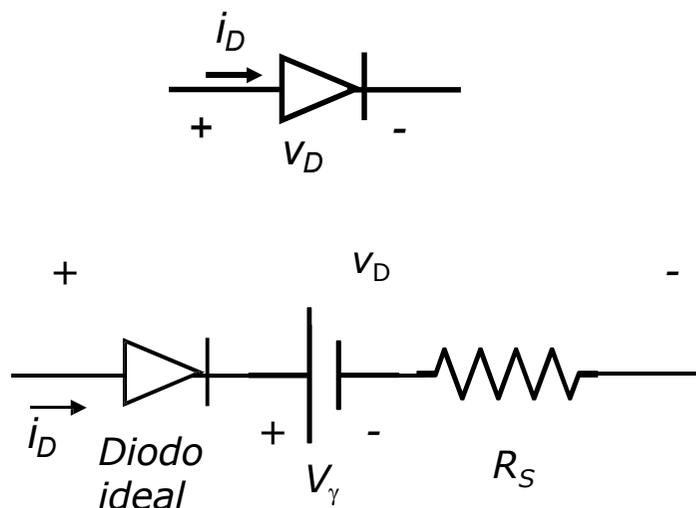
$$v_O = v_g - v_D = 10 - 0.689 = 9.311 \text{ V}$$

## Modelo por tramos lineales

- Al emplear el modelo exponencial se obtienen ecuaciones trascendentes, como en el ejemplo anterior. Pero el cálculo puede hacerse bastante farragoso.
- Como alternativa al modelo exponencial se puede recurrir al modelo de diodo ideal, siempre que no se exija mucha precisión en los cálculos.
- Como solución de compromiso se puede emplear un *modelo por tramos lineales*. Se consideran dos posibles estados para el diodo, uno para  $v_D > V_\gamma$  y el otro para  $v_D < V_\gamma$ , siendo  $V_\gamma$  la tensión umbral:
  - Si el diodo conduce (con  $v_D > V_\gamma$ ) la curva i-v se aproxima por una semirrecta de pendiente  $1/R_S$ ;
  - Cuando no conduce ( $v_D < V_\gamma$ ), se aproxima por una semirrecta horizontal.

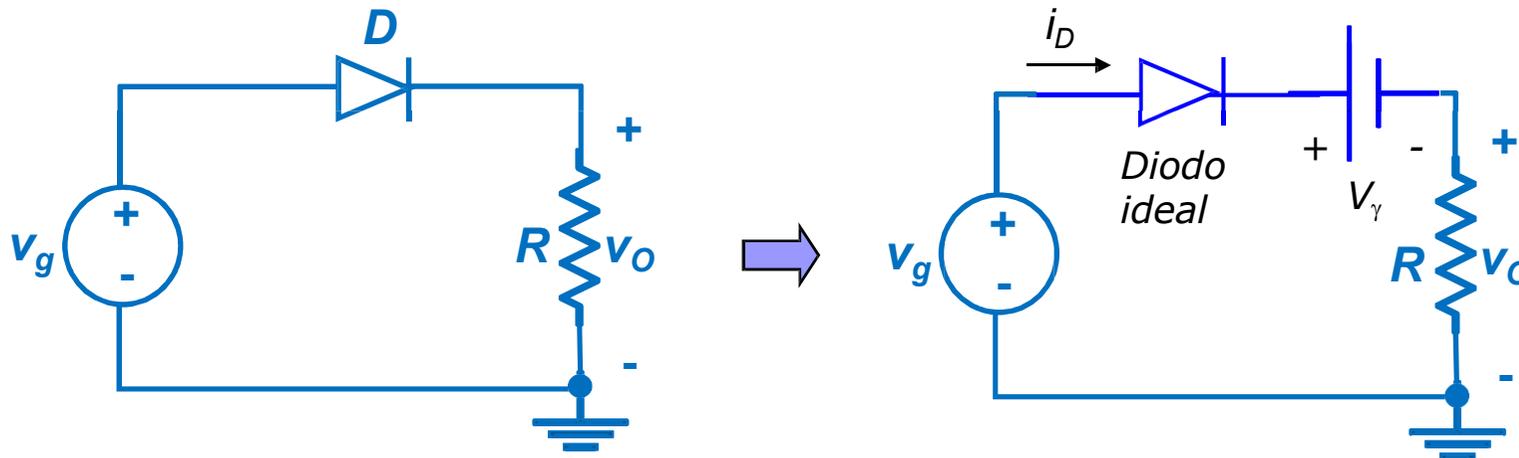
El circuito equivalente del diodo incorpora un diodo ideal en serie con una fuente de tensión  $V_\gamma$  y una resistencia  $R_S$ , que se conoce como la *resistencia serie del diodo*.

En el ejemplo 3 se ha visto que cuando el diodo conduce la tensión entre sus terminales no se desvía mucho de la tensión umbral: al dividir por 10 la corriente la tensión se reduce en 60 mV. Esto justifica en muchos casos simplificar del modelo ignorando la resistencia serie, lo que equivale a sustituir el tramo en la zona de conducción por otro vertical (con pendiente infinita).



**Ejemplo 5.** Calcular la tensión de salida  $v_o$  en el circuito de la figura empleando el modelo por tramos lineales para el diodo. Suponer  $R_S = 0$  y  $V_\gamma = 0.7$  V. Comparar el resultado con el obtenido en el ejemplo 4. Ref [1]

El diodo se reemplaza por el modelo por tramos lineales, pero con  $R_S = 0$ . La tensión de entrada  $v_g = 10$  V es mayor que  $V_\gamma$ , por lo que la corriente por el diodo circula en sentido directo. Luego el diodo ideal se comporta como un cortocircuito, con caída de tensión nula, de forma que  $v_o = 10 - 0.7 = 9.3$  V. Este resultado se desvía muy poco del obtenido en el ejemplo 4.

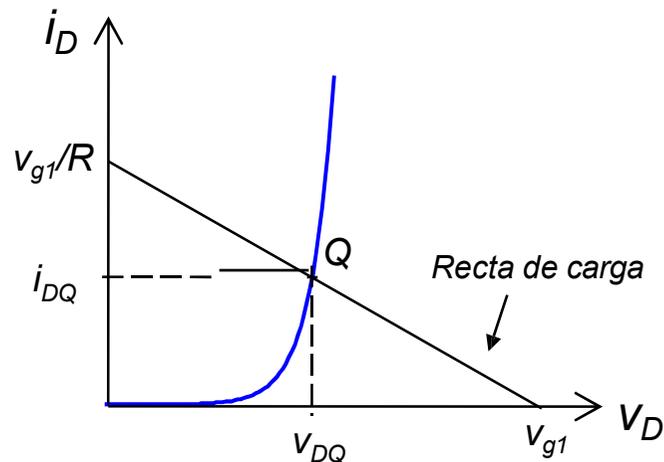


## Análisis gráfico. La recta de carga

- Vamos a considerar otra vez el circuito de los ejemplos 1, 4 y 5. Hemos visto que, conocida la tensión de entrada  $v_g$ , para determinar la tensión de salida se necesita determinar la tensión  $v_D$  en el diodo.
- Un procedimiento para determinar el valor de  $v_D$  (también el de  $i_D$ ) consiste en resolver gráficamente un sistema de ecuaciones:
  - una ecuación corresponde a la curva característica del diodo  $i_D = f(v_D)$
  - la otra ecuación que relaciona  $i_D$  y  $v_D$  se obtiene planteando la ecuación KVL de la malla.
- Dicho de otro modo, se trata de tener en cuenta simultáneamente la curva  $i_D$ - $v_D$  del dispositivo empleado y la restricción que impone el circuito sobre los valores que pueden tomar  $i_D$  y  $v_D$ .
- En el circuito considerado, para un valor particular  $v_{g1}$  de la tensión  $v_g$  del generador, se cumple:

$$v_{g1} = v_D + i_D R$$

Esta ecuación lineal corresponde a una recta, conocida como *recta de carga*. La solución es el punto de intersección de la curva característica y la recta de carga, y que se conoce como *punto de trabajo* (se suele representar con la letra  $Q$ ).



Trazado de la recta de carga:

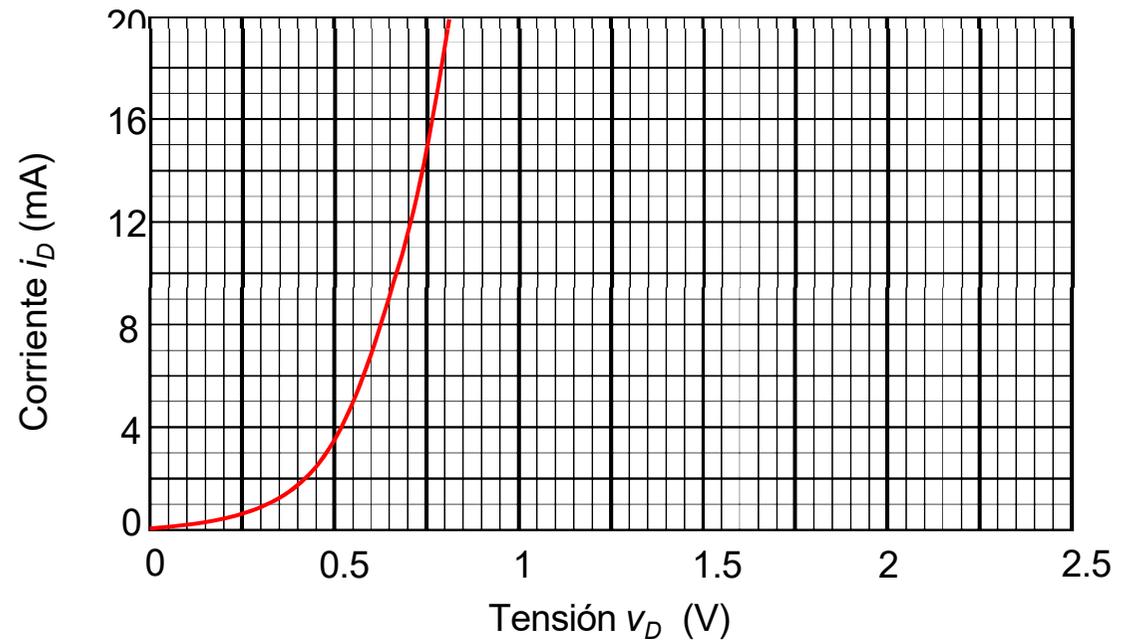
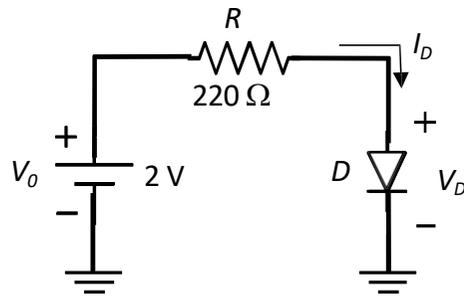
- Conocidos  $v_{g1}$  y  $R$ , se pueden determinar dos puntos de la recta simplemente dando valores a  $v_D$  y despejando  $i_D$ .
- Estos dos puntos pueden corresponder a las intersecciones de la recta con los ejes:  $(v_{g1}, 0)$  y  $(0, v_{g1}/R)$
- Si  $v_g$  varía en el tiempo, la recta de carga se irá desplazando y también el punto  $Q$ .

**Ejemplo 6.** En el circuito de la figura el diodo está polarizado en directa con una fuente de tensión constante. También se facilita la curva característica del diodo.

- (a) Obtener gráficamente el punto de operación (punto  $Q$ ) del diodo.
- (b) A la tensión  $V_0$  se le superpone una señal senoidal. Ahora el punto de operación se desplaza a lo largo de la curva característica. Indicar los puntos extremos del recorrido cuando la amplitud de dicha señal es:

- (i)  $0.5 V_p$                       (ii)  $1.5 V_p$

- (c) Sin modificar la tensión de la fuente, ¿qué valor debe tener  $R$  para que la caída tensión en el diodo sea  $V_D = 0.75 V$ ?

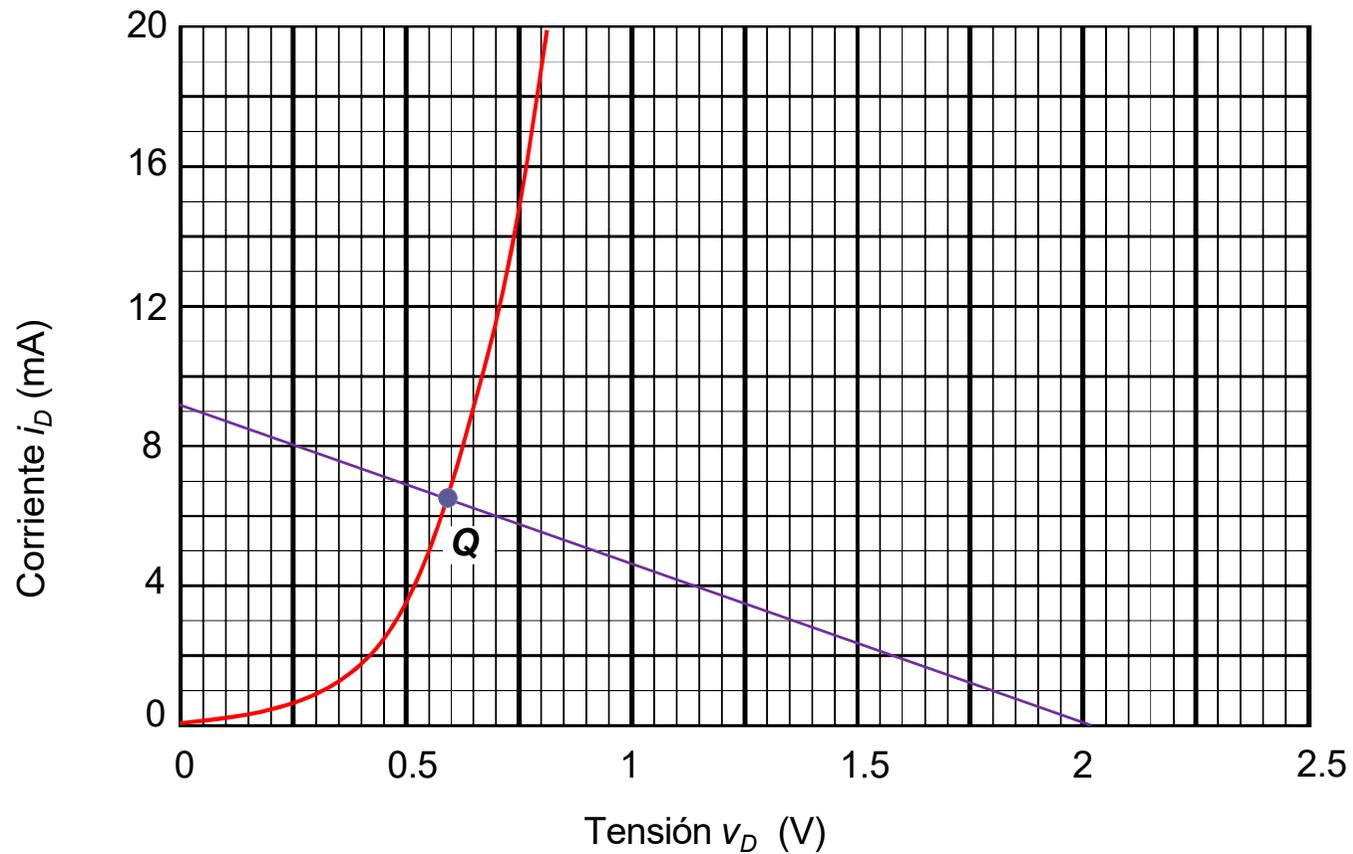


(a) Escribimos la ecuación de la recta de carga:  $V_0 = v_D + i_D R$

Determinamos los puntos de corte con los ejes:  $v_D = 0 \rightarrow i_D = V_0/R = 2 \text{ V}/220 \ \Omega = 9.09 \text{ mA} \text{ --- } (0, 9.09 \text{ mA})$

$$i_D = 0 \rightarrow v_D = V_0 = 2 \text{ V} \text{ --- } (2 \text{ V}, 0)$$

Trazando la recta de carga se obtiene la intersección con la curva característica o punto de trabajo (Q).  
Obtenemos los valores aproximados de las coordenadas: (0.57 V, 6.5 mA)

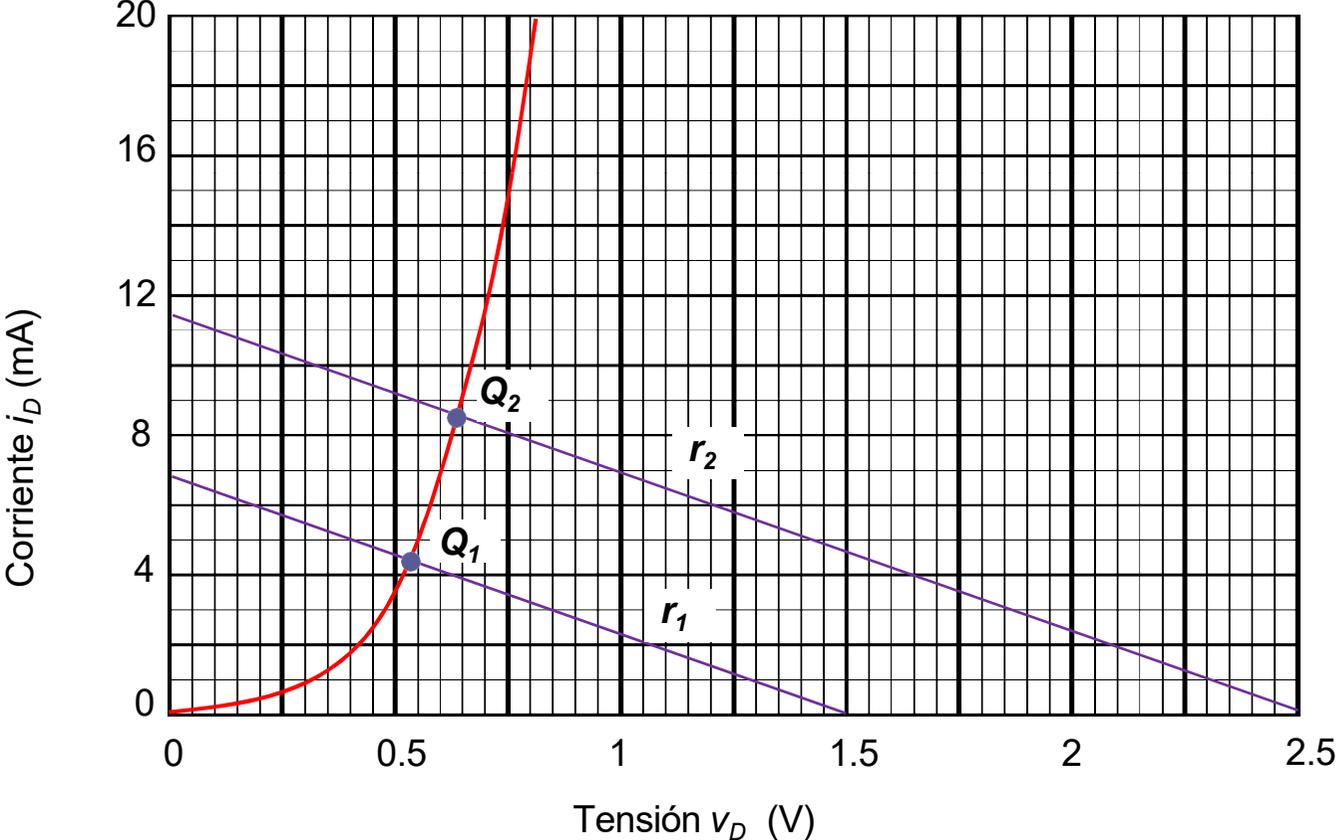


(b) Si a  $V_0$  se le superpone una señal senoidal de  $0.5 V_p$  la tensión aplicada varía entre  $2 - 0.5 = 1.5 V$  y  $2 + 0.5 = 2.5 V$ . Las rectas de carga en los casos extremos tienen por ecuaciones:  $r_1: 1.5 = v_D + 220i_D$  ;  $r_2: 2.5 = v_D + 220i_D$

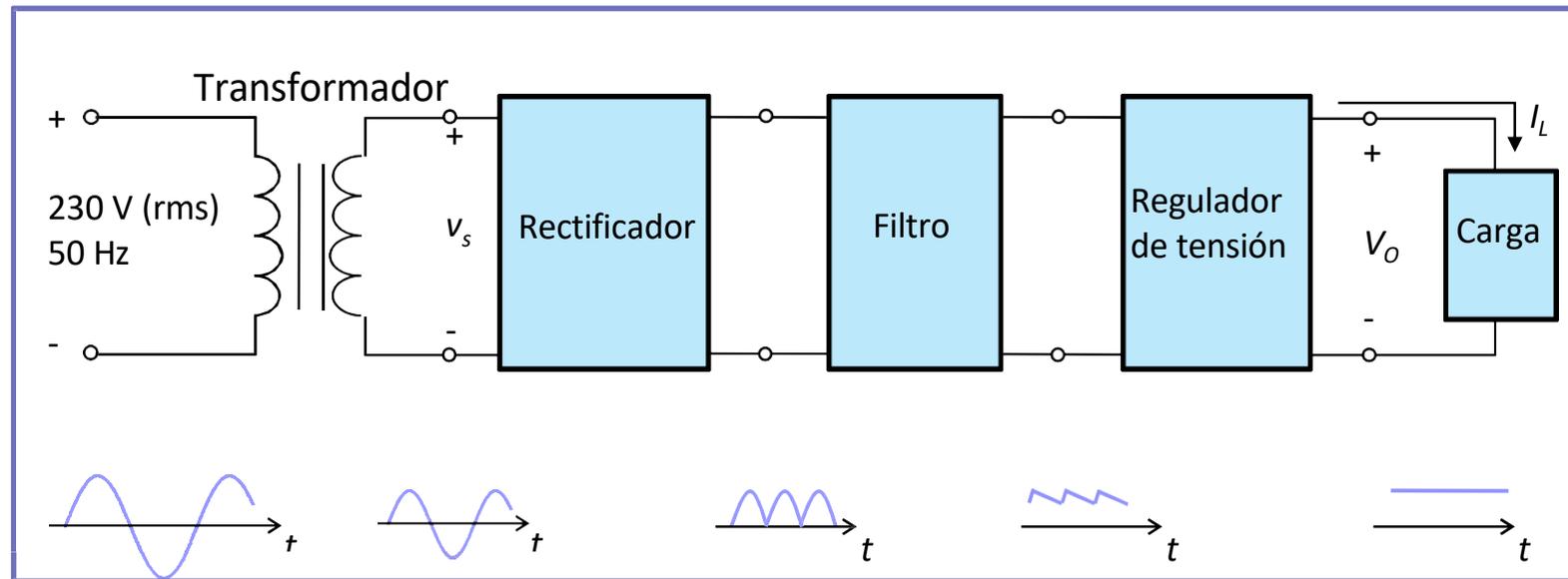
Los puntos de corte de  $r_1$  con los ejes son:  $(1.5 V, 0)$ ,  $(0, 6.8 mA)$ ; y con  $r_2$ :  $(2.5 V, 0)$ ,  $(0, 11.4 mA)$

El punto de intersección de la curva  $I-V$  con  $r_1$  es:  $Q_1(0.53 V, 4.3 mA)$ ; y con  $r_2$ :  $Q_2(0.64 V, 8.5 mA)$

(c) Observando la curva  $I-V$ , si  $v_D = 0.75 V$  debe ser  $i_D = 14.5 mA$ . Sustituyendo valores en la ecuación  $V_0 = v_D + i_D R$ , y despejando, se obtiene  $R = 86 \Omega$ .



## Bloques de una fuente estabilizada



Fuente: A. Sedra, K.C. Smith, 'Circuitos Microelectrónicos', Oxford University Press, 2004.

- **Transformador:**

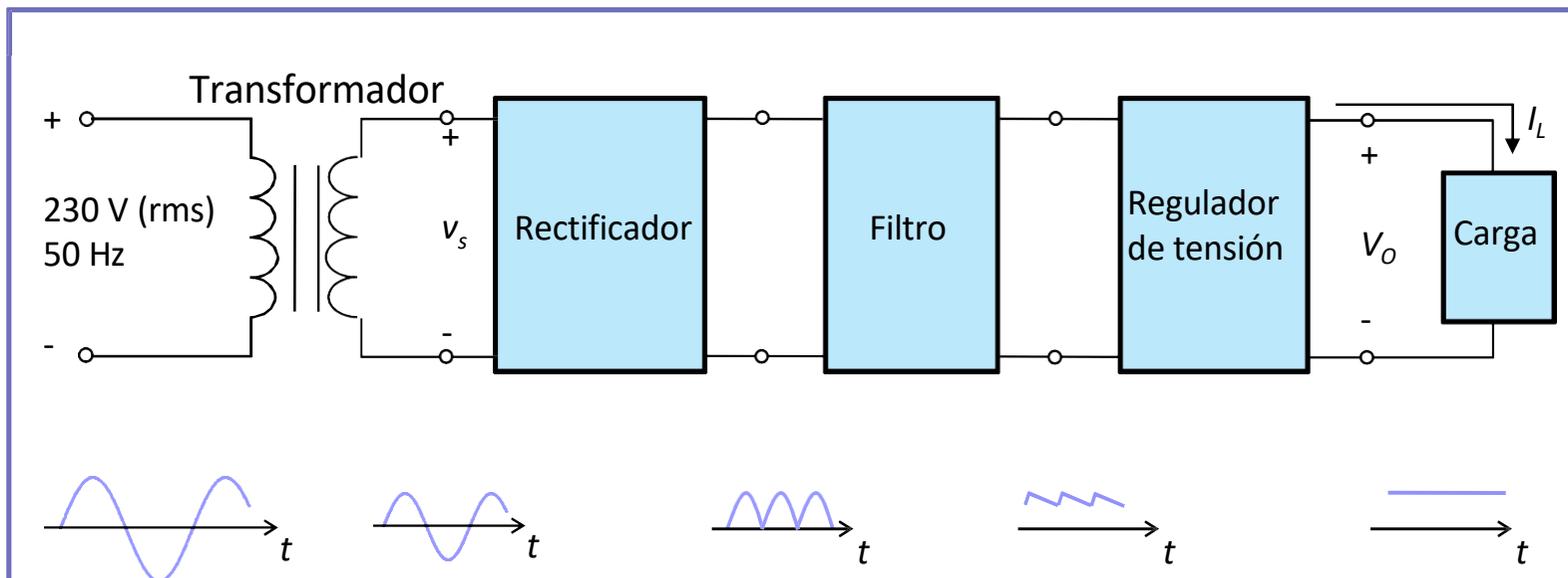
- adapta la amplitud de la tensión a la tensión requerida por los equipos (muchos sistemas operan con tensiones inferiores a la de la red eléctrica, como ocurre con los equipos electrónicos de consumo)
- proporciona aislamiento galvánico entre el equipo y la red (protección de los usuarios)

- **Rectificador:**

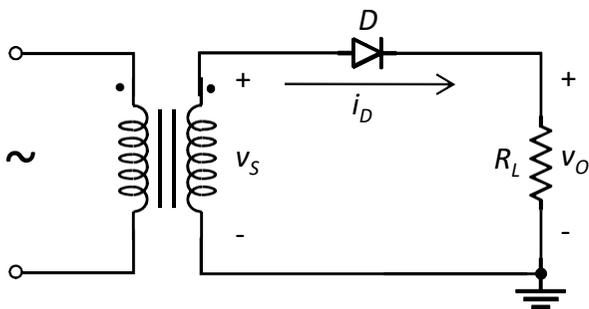
- convierte la señal  $v_s$  en una tensión unipolar con una componente DC.
- salida: forma de onda pulsante, no adecuada para alimentar equipos en continua.

## 2.1 Bloques de una fuente estabilizada

- Salida del rectificador: componente DC + componentes de señal (armónicos)
  - El *filtro* ayuda a rechazar los armónicos
  - Salida del filtro: nivel de continua + oscilación (*rizado*)
- Regulador:
  - Para eliminar el rizado (puede variar la tensión de entrada del regulador, pero  $V_o$  se mantiene estable)
  - También  $V_o$  debe mantenerse estable si varía la corriente de carga



## Rectificador de media onda



En los circuitos rectificadores, cuando los diodos operan en la región directa permiten el paso de uno ciclos. Cuando entran en inversa bloquean los otros ciclos. Los diodos que se emplean también se conocen como *diodos rectificadores* (por ejemplo, el diodo 1N4007, que se utilizará en las prácticas). Debe evitarse que estos diodos operen en la región de ruptura para evitar su deterioro.

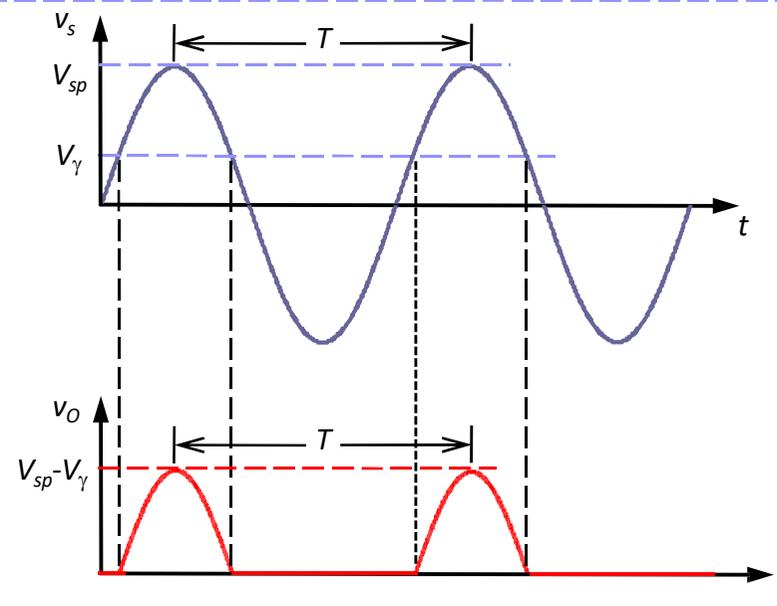
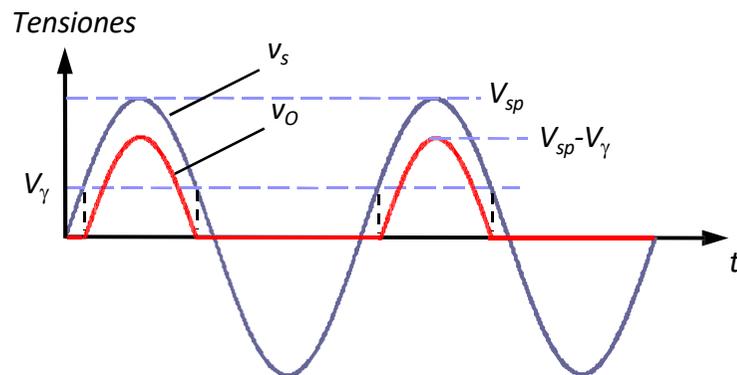
El rectificador más simple es el *rectificador de media onda*: solo emplea un diodo. Ya se ha introducido al principio del tema tratando al diodo  $D$  como un interruptor ideal. Vamos a caracterizar el diodo con el modelo lineal por tramos (con resistencia serie nula).

El rectificador va conectado al secundario del transformador. Recordemos que los puntos señalados indican los terminales con igual polaridad: si en el primario el terminal marcado con un punto es positivo respecto al otro, lo mismo ocurre en el secundario.

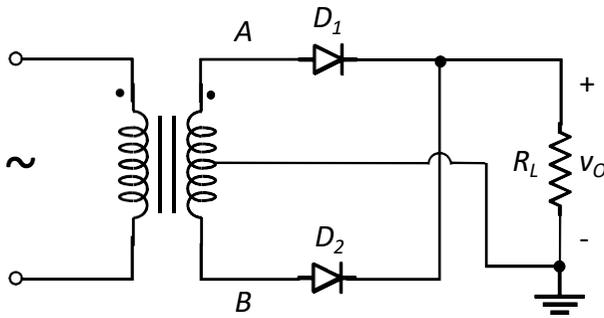
Durante el semiciclo positivo la tensión  $v_s$  tiende a impulsar una corriente en el sentido indicado en el esquema. Se comprueba fácilmente que  $D$  conduce si la tensión  $v_s$  del secundario está por encima de la tensión umbral  $V_\gamma$ . En caso contrario  $D$  está bloqueado. Es decir:

- $v_s > V_\gamma \rightarrow D$  en conducción:  $v_o = v_s - V_\gamma$  [ $i_D = (v_s - V_\gamma) / R_L > 0$  porque  $v_s > V_\gamma$ ]
- $v_s < V_\gamma \rightarrow D$  bloqueado:  $v_o = 0$

Por tanto, el circuito deja pasar los semiciclos positivos y bloquea los negativos. Además, la tensión de salida tiene el mismo periodo que la señal en el secundario. Podemos comparar  $v_s$  y  $v_o$  de las dos formas indicadas.

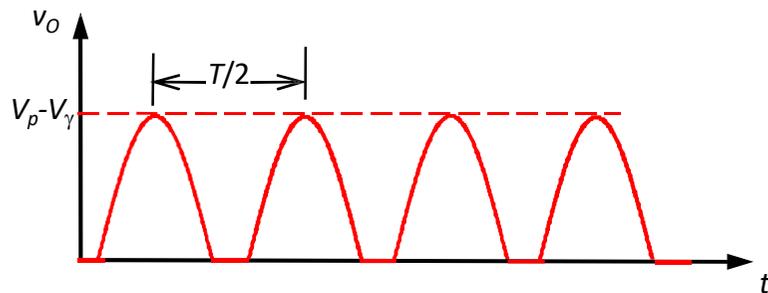


## Rectificador de onda completa con transformador de toma intermedia



A este rectificador también se le da el nombre de rectificador de doble onda. Vamos a analizar su funcionamiento:

- Cuando la señal en el primario del transformador pasa por el semiciclo positivo, la tensión entre el punto A del secundario y la toma intermedia es positiva. En cambio, la tensión entre el terminal B y la toma intermedia es negativa. Siendo positiva la tensión en el punto A, por el diodo  $D_1$  tiende a circular una tensión en sentido directo, cosa que sucede si dicha tensión es superior al valor umbral  $V_\gamma$ . La tensión que aparece en la salida será  $v_A - V_\gamma$ . Al ser negativa, la tensión en B intenta que la corriente atraviese el diodo  $D_2$  en sentido inverso, de manera que este diodo está bloqueado.



- En el semiciclo negativo ocurre al contrario: la tensión en A respecto a la toma intermedia es negativa, de modo que  $D_1$  está bloqueado. Y ahora la tensión en B respecto a la toma intermedia es positiva, de modo que circulará corriente por  $D_2$  en sentido directo cuando  $v_B$  supere la tensión umbral  $V_\gamma$ . En la salida, por tanto se reproduce la tensión  $v_B - V_\gamma$ , con la misma polaridad que en el semiciclo positivo.

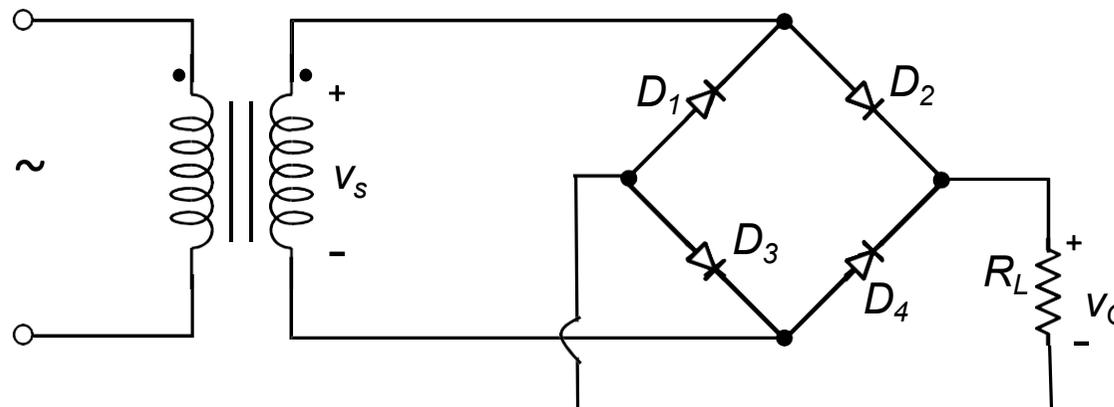
- En la gráfica se representa la forma de onda en la salida. Si  $V_p$  representa la amplitud de  $v_A$  y  $v_B$  la tensión máxima en la salida tiene como valor  $V_p - V_\gamma$ . El periodo de la señal rectificada en doble onda es la mitad que en el primario.

### Rectificador de onda completa con puente de diodos

El esquema del rectificador en puente se muestra más abajo.

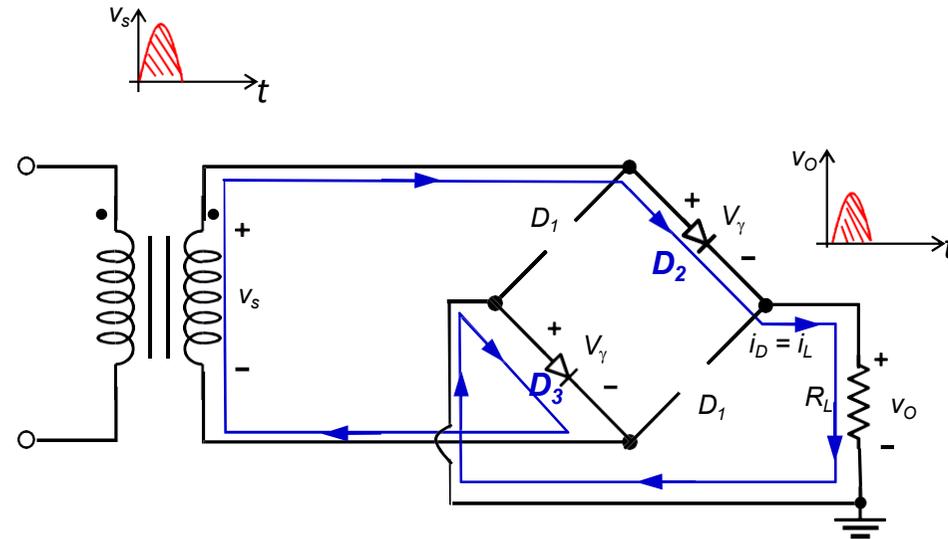
Funcionamiento:

- Supongamos que la señal del secundario pasa por el semiciclo positivo ( $v_s > 0$ ). En este caso, un voltaje  $v_s$  positivo tiende a hacer que la corriente se cierre siguiendo el camino formado por  $D_2$ ,  $R_L$ ,  $D_3$  y el secundario, estando  $D_1$  y  $D_4$  bloqueados. Pero la corriente empezará a circular si  $v_s$  es mayor que  $2V_\gamma$ , porque debe atravesar dos diodos en serie. Cuando esto ocurra la tensión  $v_o$  será igual a  $v_s - 2V_\gamma$ , por lo que tendremos en la salida un 'reflejo' de la tensión del secundario.
- En el semiciclo negativo la corriente se cerrará a través de los diodos  $D_4$  y  $D_1$ , con  $D_2$  y  $D_3$  bloqueados. La corriente por  $R_L$  circula en el mismo que en el semiciclo positivo, es decir, en el sentido que va de la marca '+' a la marca '-'. Por este motivo la forma de onda reproducida en la salida es idéntica a la del semiciclo positivo.



En la página siguiente se van a representar los caminos de conducción en los dos semiciclos. Planteando las leyes de Kirchoff para las tensiones (KVL) se puede llegar a las mismas conclusiones.

### Rectificador de onda completa con puente de diodos (cont.)

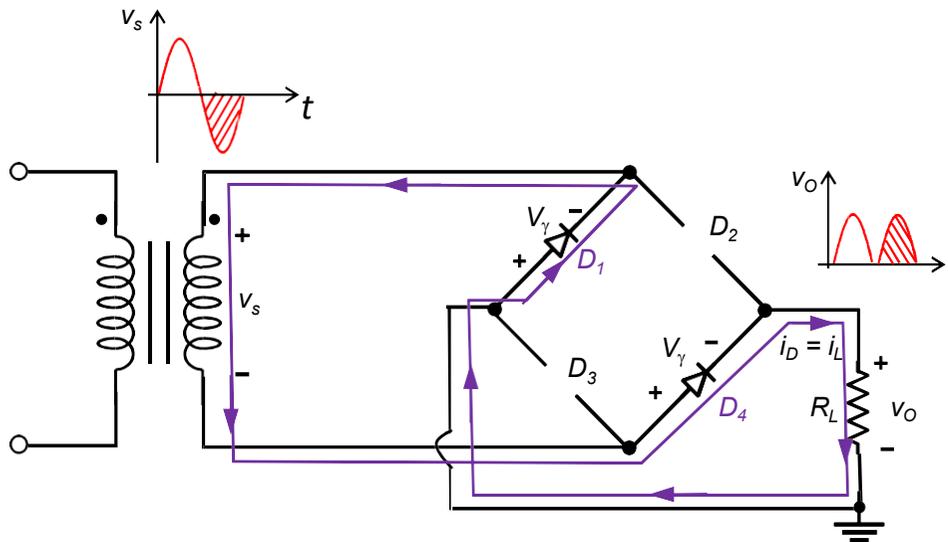


Semiciclo positivo: conducen  $D_2$  y  $D_3$ , con  $D_1$  y  $D_4$  bloqueados. Aplicando la ley KVL, podemos también determinar la tensión de salida y la corriente por los diodos como se indica a continuación:

$$v_s - V_\gamma - v_o - V_\gamma = 0 \rightarrow v_o = v_s - 2V_\gamma$$

$$\rightarrow i_D = i_L = \frac{v_o}{R_L} = \frac{v_s - 2V_\gamma}{R_L}$$

Por tanto, para que los diodos conduzcan ( $i_D > 0$ ) debe cumplirse la condición:  $v_s > 2V_\gamma$ .



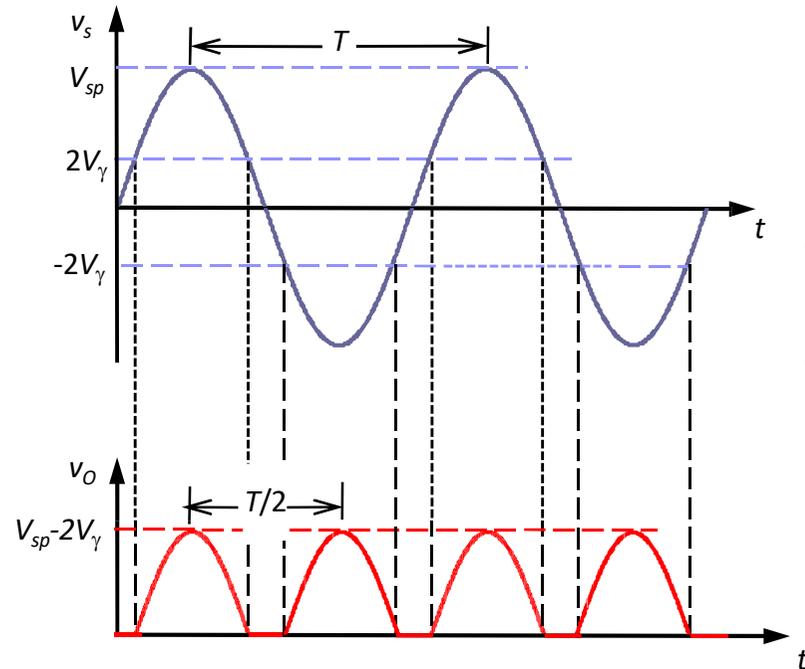
Semiciclo negativo: conducen  $D_1$  y  $D_4$ , con  $D_2$  y  $D_3$  bloqueados. De la misma forma que antes :

$$-v_s - V_\gamma - v_o - V_\gamma = 0 \rightarrow v_o = -v_s - 2V_\gamma$$

$$\rightarrow i_D = i_L = \frac{v_o}{R_L} = \frac{-v_s - 2V_\gamma}{R_L}$$

El cambio de signo en  $v_s$  nos indica que los semiciclos negativos se convierten en positivos. Ahora, para que se verifique  $i_D > 0$  debe cumplirse la condición:  $-v_s > 2V_\gamma$  ( $v_s < -2V_\gamma$ ).

## Rectificador de onda completa con puente de diodos (cont.)



En la gráfica se comparan las formas de onda en el secundario y en la salida.

- La tensión máxima en la salida es igual a la amplitud en el secundario menos  $2V_\gamma$  porque, como hemos visto, en cada semiciclo conduce una pareja de diodos.
- Este rectificador deja pasar los semiciclos positivos en el secundario y convierte los semiciclos negativos en positivos. La forma de onda en la salida tiene un periodo igual a la mitad del periodo en el secundario.

## Valores medios de las tensiones rectificadas

Recordemos que el valor medio de una función periódica se calcula integrando la función en un periodo y dividiendo por el periodo. Se puede comprobar entonces que:

- Una señal de tensión senoidal rectificada en media onda tiene como valor medio  $V_M/\pi$ , siendo  $V_M$  la tensión máxima.
- El valor medio es  $2V_M/\pi$  en el caso de una señal senoidal rectificada en doble onda.

## Filtro por condensador

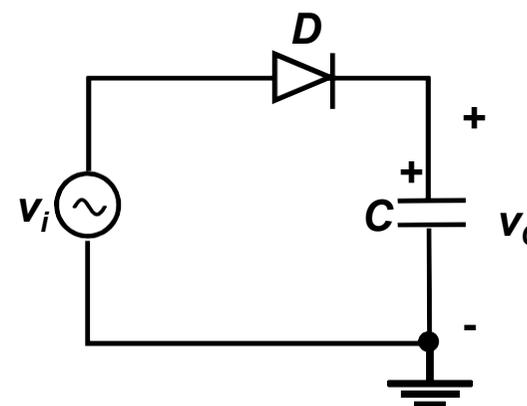
Refs. [1], [2] y [4].

Con los circuitos rectificadores se consigue convertir la tensión alterna en una tensión con una única polaridad, pero que no se puede considerar como una tensión continua. Empleando un condensador como filtro, veremos que se puede obtener una tensión con un nivel de continua al que se le superpone una señal alterna o *rizado*.

Supondremos que la entrada es senoidal Para entender el funcionamiento del circuito empezaremos considerando por simplicidad el caso ideal:

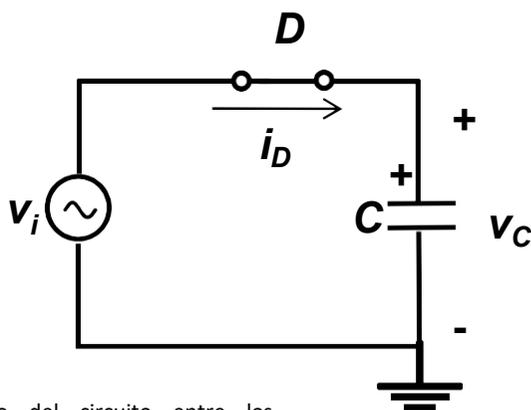
- (1) no se conecta una carga a la salida.
- (2) el diodo  $D$  se considera ideal: cuando conduce, la caída de tensión es 0.

También suponemos al condensador inicialmente descargado (en  $t = 0$  tenemos  $v_C = 0$ ).

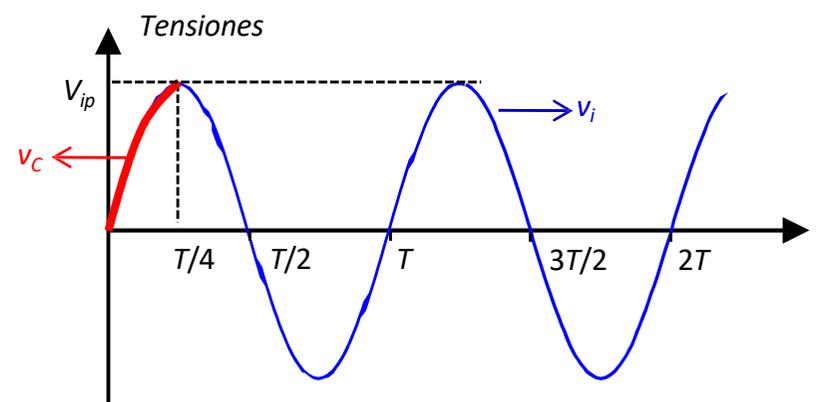


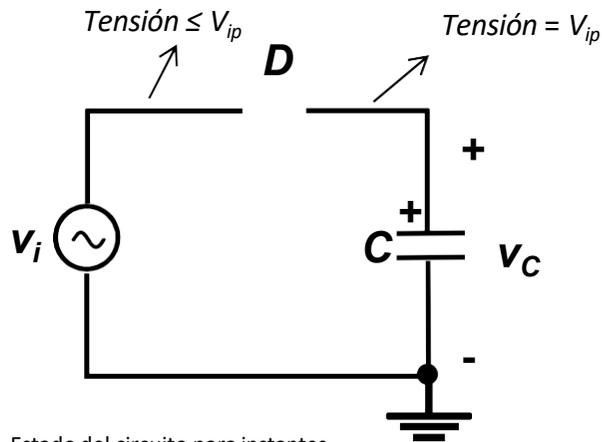
- Entre los instantes  $t = 0$  y  $t = T/4$ , como la tensión  $v_i$  es positiva, el diodo  $D$  está en conducción, permitiendo la carga del condensador.

De esta forma, tenemos  $v_C = v_i$  durante este intervalo y la corriente por el diodo es la corriente de carga del condensador.



Estado del circuito entre los instantes  $t = 0$  y  $t = T/4$ .





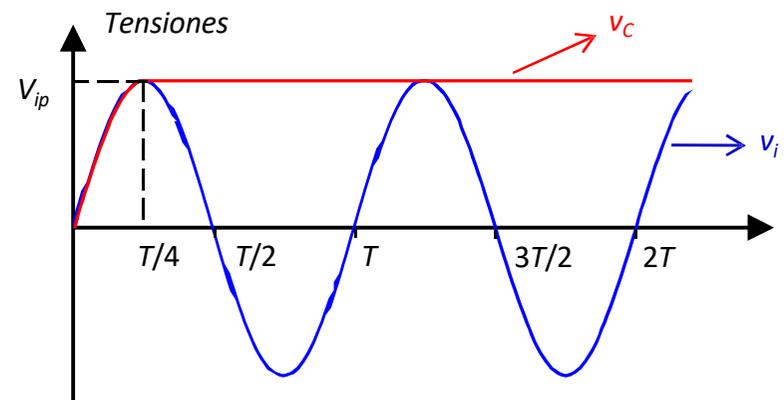
Estado del circuito para instantes posteriores a  $t = T/4$

- En el instante  $t = T/4$  el condensador se ha cargado a la tensión máxima,  $V_{ip}$ . En instantes posteriores a  $t = T/4$  la tensión de entrada disminuye por debajo de este valor, por lo que el diodo pasa a estar bloqueado.

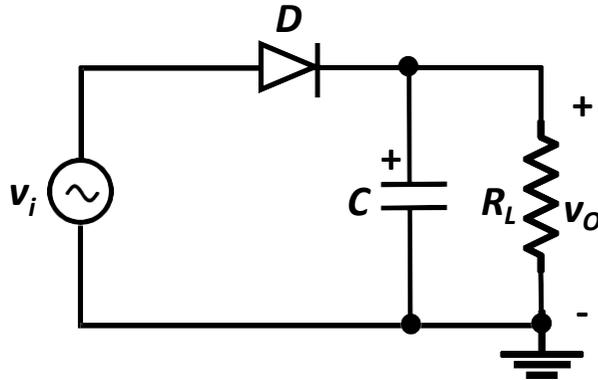
Por tanto el condensador se queda cargado a la tensión  $V_{ip}$ . Y no tiene ningún camino a través del cual descargarse, porque el diodo equivale a un circuito abierto.

[Incluso cuando por un instante la entrada  $v_i$  alcanza otra vez el valor  $V_{ip}$  (en  $t = 5T/4$ ), el condensador sigue cargado a esa tensión. Como luego  $v_i$  vuelve a disminuir por debajo de  $V_{ip}$ , el diodo sigue bloqueado].

Por tanto, esta situación se prolonga indefinidamente y la tensión de salida se mantiene constante.



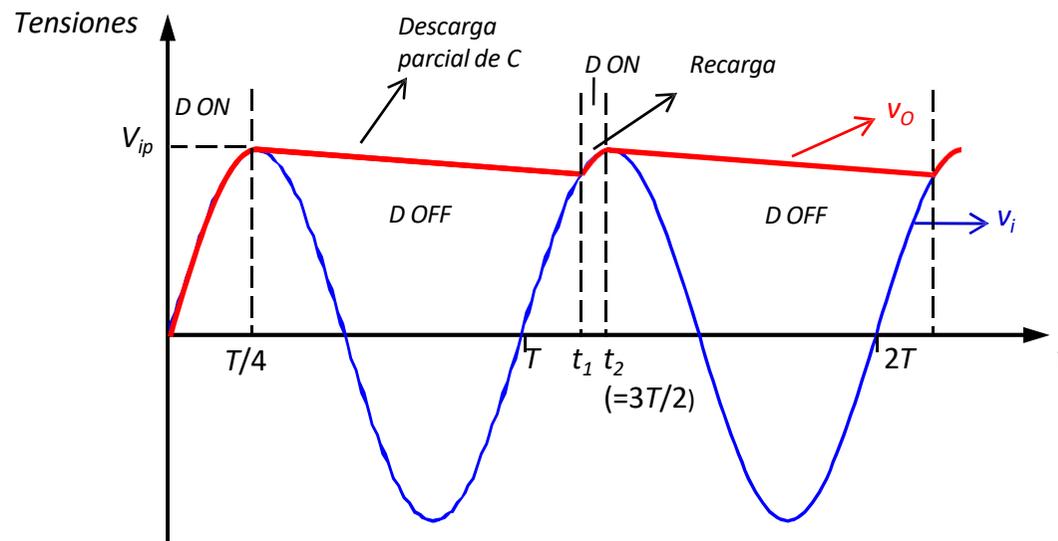
## 2.1 Filtro por condensador



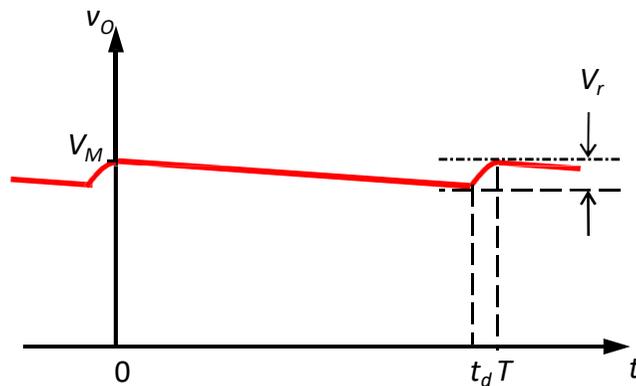
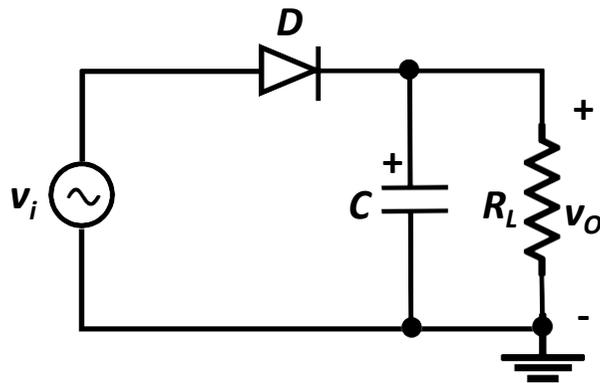
Pero realmente la situación que tiene valor práctico se da cuando el circuito alimenta una carga  $R_L$ . El diodo  $D$  del circuito lo consideramos también ideal.

Como ocurría antes, el condensador se carga a la tensión de pico  $V_{ip}$  entre los instantes  $t = 0$  y  $t = T/4$ . Cuando la tensión de entrada empieza a disminuir el diodo se bloquea, pero ahora el condensador puede descargarse parcialmente a través de la resistencia  $R_L$ . La descarga se produce prácticamente durante un ciclo de la señal de entrada y finaliza cuando la tensión  $v_i$  vuelve a ser igual a la del condensador (en el instante  $t_1$ ). En ese instante el diodo vuelve a conducir permitiendo nuevamente la carga del condensador a la tensión  $V_{ip}$ .

El proceso de descarga y recarga se repite indefinidamente. Como resultado, se obtiene en la salida una tensión de un valor cercano a  $V_{ip}$  pero con un cierto rizado. Para que la amplitud del rizado no sea muy alta (y no disminuya demasiado la tensión) la capacidad  $C$  debe tener un valor tal que la constante de tiempo  $R_L C$  sea mucho mayor que la duración de la descarga.



## 2.1 Filtro por condensador



Vamos a estimar la amplitud del rizado en la tensión de salida. Podemos suponer que el diodo ya no es ideal, de forma que la tensión máxima de salida se calcula como  $V_M = V_{ip} - V_\gamma$ . El periodo de esta forma de onda sigue siendo  $T$ , aunque la duración de la descarga ( $t_d$ ) tendrá un valor muy próximo a  $T$  si la constante de tiempo  $R_L C$  es mucho mayor.

Supondremos también que en el instante  $t = 0$  la salida pasa por el valor máximo,  $V_M$ . Entre los instantes  $t = 0$  y  $t = t_d$  el condensador se descarga a través de  $R_L$ . La tensión  $v_o$  se expresa por tanto como:

$$v_o(t) = V_M e^{-\frac{t}{R_L C}}$$

La descarga finaliza en el instante  $t = t_d$ . Como el rizado (pico a pico) se corresponde con la disminución de tensión producida al finalizar la descarga, basta con calcular la diferencia entre los valores de tensión en  $t = 0$  y  $t = t_d$ :

$$V_r = v_o(t=0) - v_o(t=t_d) = V_M - V_M e^{-\frac{t_d}{R_L C}} = V_M \left( 1 - e^{-\frac{t_d}{R_L C}} \right)$$

Si  $t_d \ll R_L C$ , podemos poner:  $e^{-\frac{t_d}{R_L C}} \cong 1 - \frac{t_d}{R_L C}$ . Por tanto:  $V_r = V_M \left[ 1 - \left( 1 - \frac{t_d}{R_L C} \right) \right] = \frac{V_M t_d}{R_L C} \cong \frac{V_M T}{R_L C} = \frac{V_M}{f R_L C}$

En un rectificador de onda completa con puente de diodos se tendría:  $V_r \cong \frac{V_M (T/2)}{R_L C} = \frac{V_M}{2 f R_L C} \quad \left( V_M = V_{ip} - 2V_\gamma \right)$

**Ejemplo 7** (ref. [1]).- Se construye una fuente de alimentación constituida por los siguientes elementos:

- un transformador con relación de transformación 1/6
- un puente rectificador de diodos
- un condensador de 5 mF (filtro)
- una resistencia de carga de 50  $\Omega$ .

Se conecta esta fuente de alimentación a la red de energía eléctrica (220 V<sub>rms</sub>, 50 Hz). Calcular el valore medio de la tensión de salida y la amplitud del rizado.

Solución.- La amplitud de la tensión en el secundario del transformador será de  $220/6 = 36.67$  V<sub>rms</sub>

El valor de pico de dicha tensión será por tanto:  $V_{sp} = V_{s(rms)} \sqrt{2} = 36.67 \sqrt{2} = 51.86$  V

En la salida del puente rectificador la tensión máxima vale  $V_M = V_{sp} - 2V_\gamma = 51.86$  V -  $2V_\gamma = 50.46$  V.

Durante la descarga del condensador empleado como filtro se tiene:  $v_o(t) = V_M e^{-\frac{t}{R_L C}}$

En nuestro caso la constante de tiempo tiene por valor:  $R_L C = (50 \Omega)(5 \text{ mF}) = 0.25$  s.

Supongamos que la descarga se produce durante un tiempo igual a  $T/2 = 10$  ms. Podemos calcular el mínimo valor de la tensión de salida sustituyendo valores:

$$v_{O(\min)} = (50.46) e^{-\frac{0.01}{0.25}} = 48.48 \text{ V}$$

El valor medio de la tensión de salida será  $(50.46 + 48.48) / 2 = 49.47$  V  $\approx$  49.5 V. Y la amplitud del rizado,

$$50.46 - 48.48 = 1.98 \text{ V}_{pp} \approx 2 \text{ V}_{pp}$$

La amplitud se puede calcular también a partir de la expresión deducida antes:

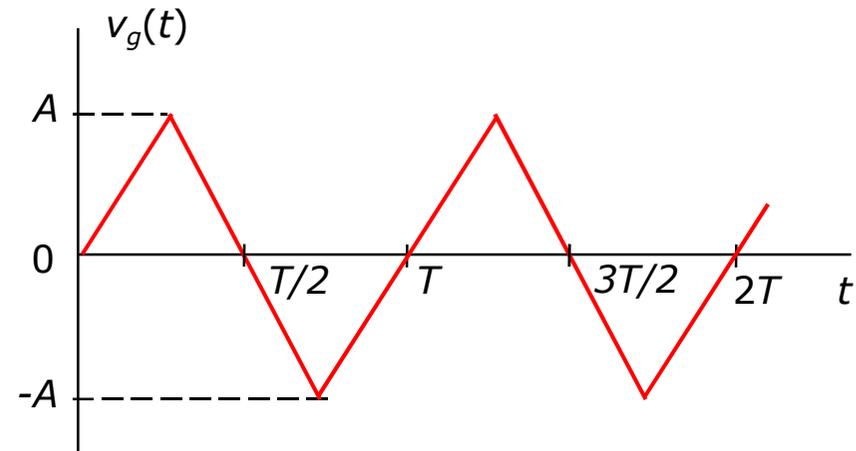
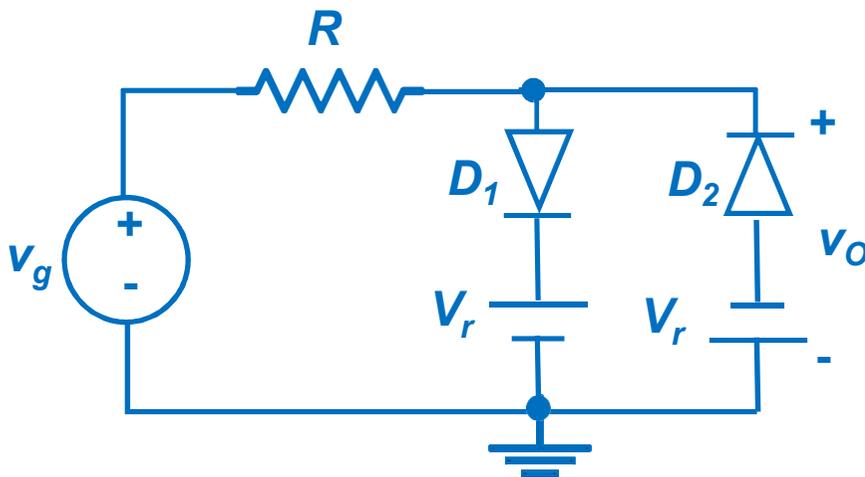
$$V_r \cong \frac{V_M}{2fR_L C} = \frac{50.46}{(2)(50)(50)(5 \cdot 10^{-3})} = 2.018 \text{ V}_{pp}$$

## Circuito recortador (limitador)

Con el circuito mostrado más abajo se puede “recortar” o limitar la tensión a un valor inferior al existente en la entrada  $v_g$ .

Esto puede ser útil cuando la tensión aplicada a un circuito no debe sobrepasar unos ciertos valores límite.

Supondremos que la señal de entrada es triangular. Para estudiar el funcionamiento del circuito consideraremos las cuatro posibilidades que existen para los estados de los diodos.

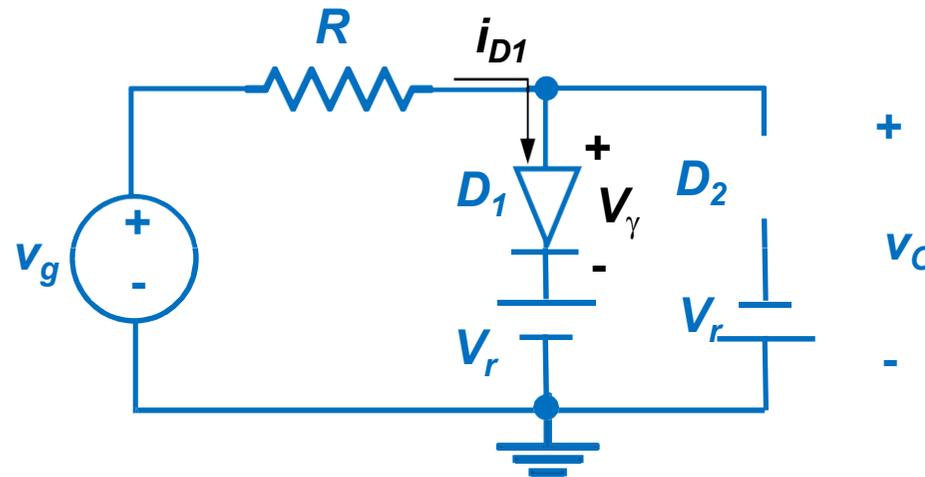


## 2.1 Circuito recortador

- Los diodos  $D_1$  y  $D_2$  no pueden conducir simultáneamente. Si esto ocurriera, en el circuito aparecerían dos fuentes de tensión de valores distintos conectadas en paralelo ( $V_r + V_\gamma$  y  $-V_r - V_\gamma$ ), lo que es un contrasentido.

- Si  $D_1$  conduce y  $D_2$  está bloqueado se tiene  $v_O = V_r + V_\gamma$ . La corriente por  $D_1$  se expresa como:  $i_{D1} = [v_g - (V_r + V_\gamma)] / R$

Esta corriente solo es positiva para  $v_g > V_r + V_\gamma$ .

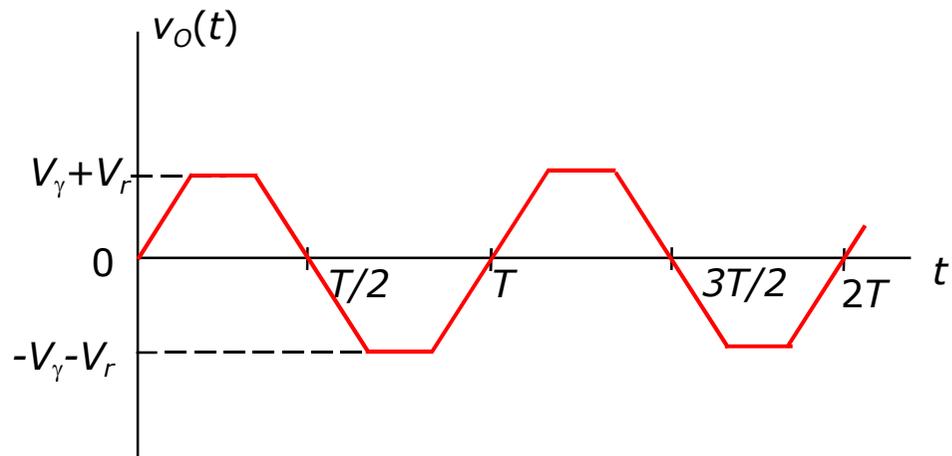


- Si  $D_1$  está bloqueado y  $D_2$  conduce,  $v_O = -V_r - V_\gamma$ . Razonando como en el caso anterior, se comprueba que para que la corriente por  $D_2$  circule en sentido directo se debe cumplir la condición  $v_g < -V_r - V_\gamma$ .

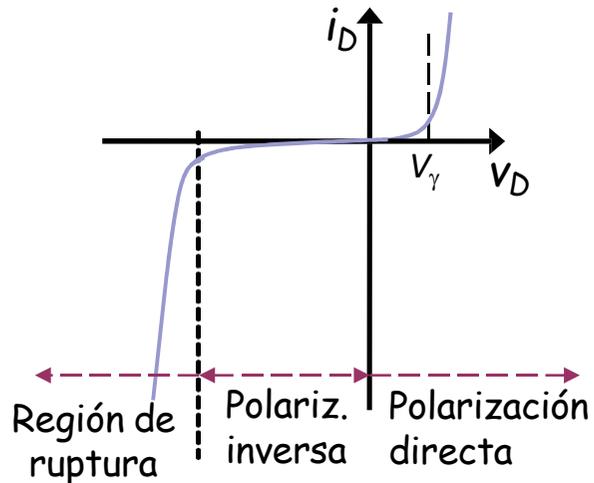
- Si los dos diodos están bloqueados se tiene  $v_O = v_g$ . Debe cumplirse la condición:  $-V_r - V_\gamma < v_g < V_r + V_\gamma$ .

Resumiendo:

$$v_o = \begin{cases} -V_r - V_\gamma, & v_g < -V_r - V_\gamma \\ v_g, & -V_r - V_\gamma < v_g < V_r + V_\gamma \\ V_r + V_\gamma, & v_g > V_r + V_\gamma \end{cases}$$



## 2.2 Diodos zener. Estabilizadores de tensión (regulador en derivación).



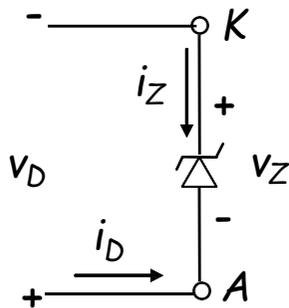
Diodos rectificadores o de señal:

- **En directa:**  $i_D$  crece rápidamente con  $v_D$  si  $v_D \geq V_\gamma$  ( $V_\gamma$  tensión umbral - tensión del 'codo' en la curva  $I-V$ ).
- Simplificación: si no se considera la resist. serie,  $v_D$  se supone cte. ( $v_D = V_\gamma$ )
- **En inversa:**  $i_D$  muy pequeña (diodo  $\approx$  circuito abierto)

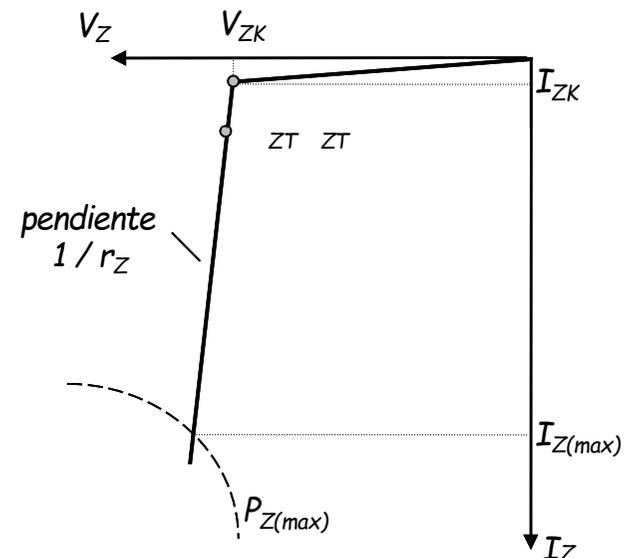
**Región de ruptura** (disrupción):  $i_D (<0)$  crece rápidamente con  $v_D (<0)$

**Diodos zener:** pueden operar en esta zona (dentro de ciertos márgenes)

Simplificación (caso ideal,  $r_z \approx 0$ ): tensión casi constante



Indicación de tensión y corriente en un diodo zener



Aproximación por tramos lineales en regiones inversa y en disrupción.

Nota: ( $V_{ZK}, I_{ZK}$ ): la K se refiere a *knee* (rodilla)

( $V_{ZT}, I_{ZT}$ ): la T se refiere a *test* - valores indicados en las hojas de datos.

La potencia y la corriente no deben sobrepasar los valores  $P_{Z(max)}$  o  $I_{Z(max)}$  indicados por el fabricante: en caso contrario el dispositivo se acabaría destruyendo.

## 2.2 Diodos zener. Estabilizador de tensión (regulador en derivación).

- El circuito más sencillo con el que se puede estabilizar la tensión se representa más abajo. Se trata de un regulador *en derivación* (regulador paralelo). El zener permite fijar **la tensión de salida** a un valor **casi constante aunque varíen  $V_G$  o  $I_L$** .
- Para que el circuito funcione correctamente la corriente por el zener no debe ser inferior a un valor límite  $I_{Z(min)}$  (que puede corresponder a  $I_{ZK}$ ) ni superior a  $I_{Z(max)}$ . Es decir, debe imponerse la condición:  $I_{Z(min)} < I_Z < I_{Z(max)}$ . Así el zener: (i) no se polariza en inversa; (ii) disipa una potencia inferior a la máxima indicada por el fabricante.

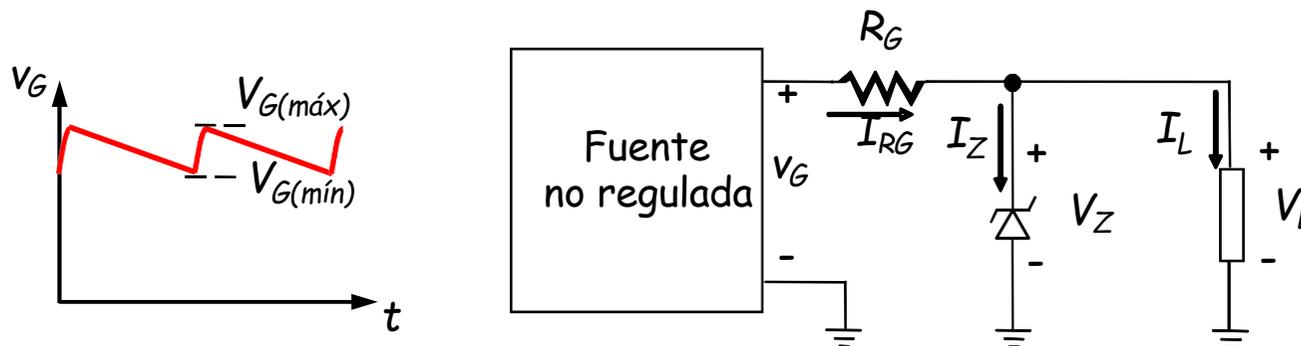
En el circuito se cumple:  $I_{RG} = I_Z + I_L$ . Además, la corriente por  $R_G$  se expresa como:  $I_{RG} = (V_G - V_Z) / R_G$ .

Veamos cómo se puede calcular  $R_G$ . Supongamos que el zener se va a polarizar con una corriente igual a  $I_{Z(min)}$  o ligeramente superior.  $I_Z$  será mínima cuando  $I_L$  sea máxima y  $I_{RG}$  mínima, lo cual ocurre cuando  $V_G$  es mínima. Así:

$$I_{G(min)} = I_{Z(min)} + I_{L(max)} \rightarrow \frac{V_{G(min)} - V_Z}{R_G} = I_{Z(min)} + I_{L(max)} \rightarrow R_G = \frac{V_{G(min)} - V_Z}{I_{Z(min)} + I_{L(max)}}$$

En la práctica, eligiendo para  $R_G$  un valor algo inferior, la corriente estaría ligeramente por encima de  $I_{Z(min)}$ .

[Considerando el caso en que  $I_Z$  es máxima e  $I_L$  mínima podríamos obtener otro valor para  $R_G$ . El problema es que el dispositivo disiparía mucha más potencia. Conviene que  $R_G$  esté más cerca del valor calculado antes: disipa menos potencia si opera cerca de la "rodilla" de la curva I-V, se evita un calentamiento excesivo y aumenta su vida útil].



**Ejemplo.** Diseñar el regulador en derivación de acuerdo con las especificaciones:

Tensión de entrada:  $V_G = 16 \pm 2 \text{ V}$ ;

Tensión de salida:  $V_L = 12 \text{ V}$

Corriente máxima de salida:  $I_{L(max)} = 90 \text{ mA}$ ;

Tensión zener:  $V_Z = 12 \text{ V}$  para  $I_{Z(min)} = 10 \text{ mA}$

Indicar las potencias máximas disipadas por el zener y la resistencia (en funcionamiento normal, es decir, sin cortocircuitos a la salida).

F. Montilla (y otros): *Fuentes de alimentación*, Universidad Politécnica de Valencia (Servicio de Publicaciones), 1997.

Solución.- Sustituyendo valores: 
$$R_G = \frac{V_{G(min)} - V_Z}{I_{Z(min)} + I_{L(max)}} = \frac{14\text{V} - 12\text{V}}{10\text{mA} + 90\text{mA}} = 20\Omega$$

Con la carga desconectada y máxima tensión de entrada: 
$$I_{RG(max)} = I_{Z(max)} = \frac{V_{I(max)} - V_Z}{R_G} = \frac{18\text{V} - 12\text{V}}{20\Omega} = 0.3\text{A}$$

$$P_{RG(max)} = I_{RG(max)}^2 R = 0.3^2 \times 20 = 1.8\text{W}$$

$$P_{Z(max)} = I_{Z(max)} V_Z = 0.3 \times 12 = 3.6\text{W}$$

→ se eligen componentes con potencias nominales mayores

