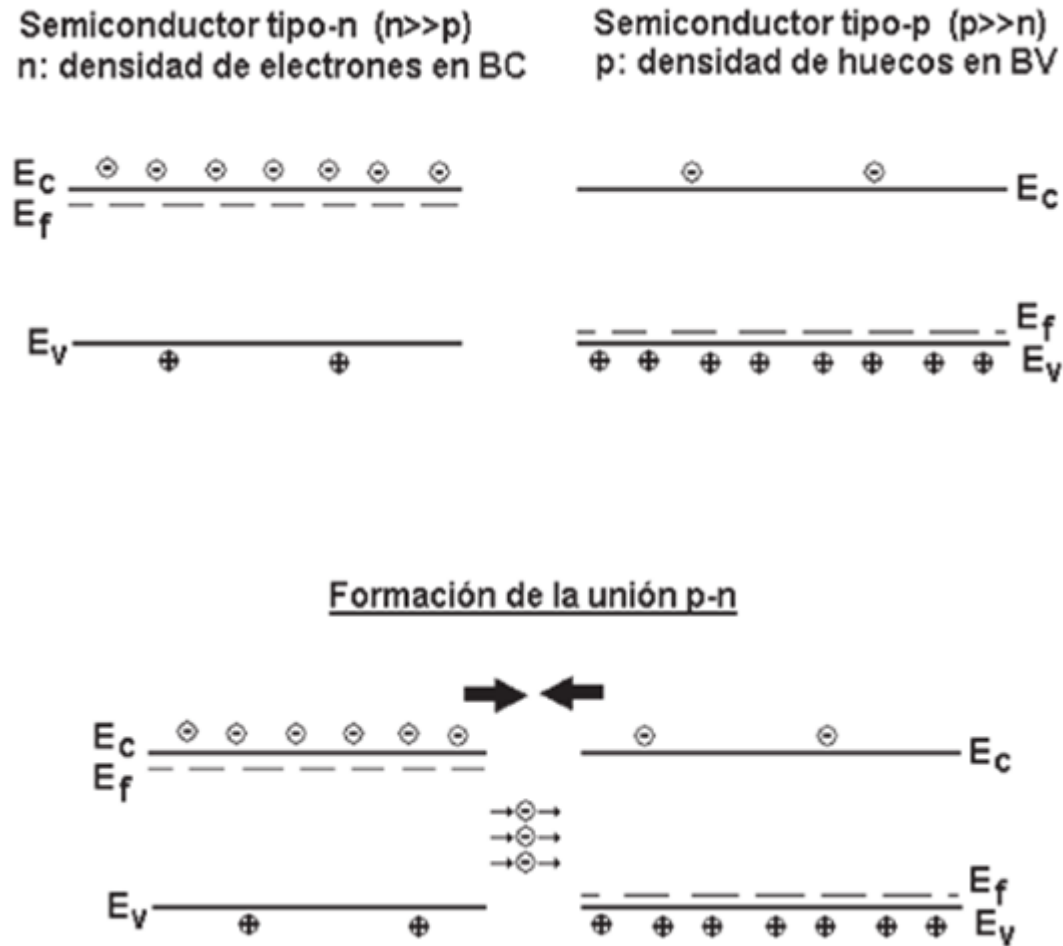


TEMA 4: DIODOS

- 4.1.- Unión p-n. Característica I-V. Modelos lineales
- 4.2.- Análisis de circuitos con diodos
- 4.3.- Circuitos con diodos: recortadores y rectificadores. Filtro con condensador
- 4.4.- Otros diodos: Zener, LED, fotodiodo, células solares

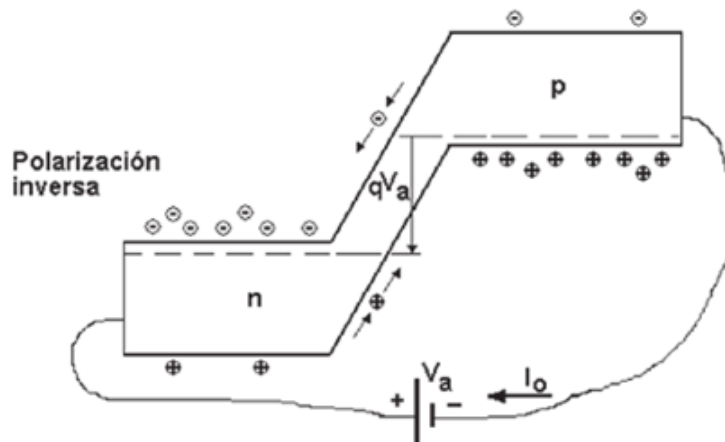
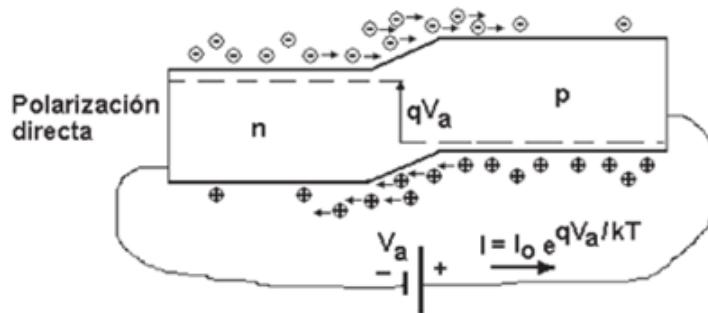
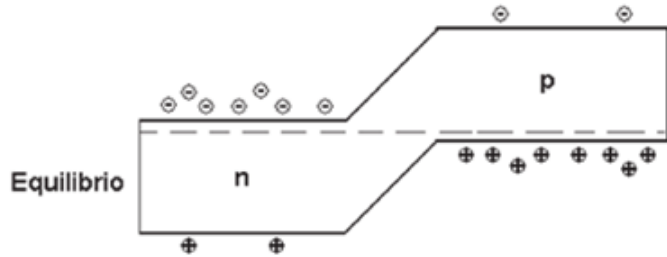
- Unión p-n

Cristal semiconductor único, con una región tipo-p y otra tipo-n



Los niveles de Fermi de ambas regiones se igualan al formarse la unión

TEMA 4: DIODOS. 4.1.- Unión p-n



- Equilibrio ($V = 0$)

Aparece una barrera de energía que evita que más electrones del lado n puedan ir al lado p y recombinarse.

Esa región está vacía de portadores

De forma neta, no hay movimiento de carga, el diodo está en **corte** e $I = 0$.

- Polarización directa ($V_a > 0$; $V(p) - V(n) > 0$)

La barrera decrece y los electrones del lado n podrían alcanzar el lado p. ($qV_a < 0$)

Puede llegar a haber movimiento neto de carga; el diodo puede **conducir** ($I > 0$).

- Polarización inversa ($V_a > 0$; $V(p) - V(n) < 0$)

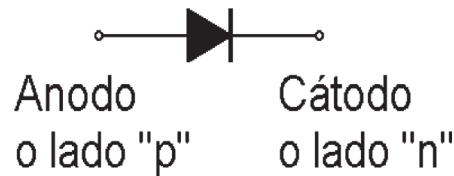
La barrera aumenta y hace más difícil que los electrones del lado n alcancen el lado p.

Los electrones del lado p (que son pocos) son arrastrados al lado n pero esta corriente inversa es muy pequeña ($I \approx 0$).

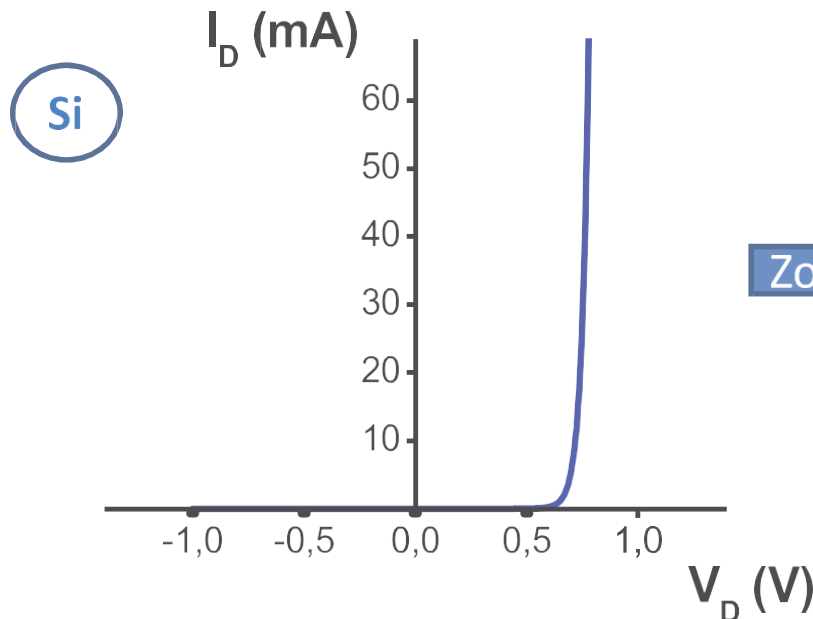
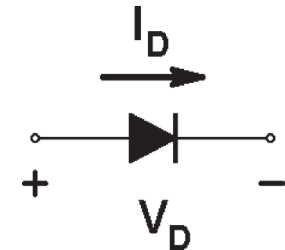
El diodo está en **corte**.

El **diodo de unión o diodo p-n** es un dispositivo semiconductor de dos terminales, de comportamiento no lineal, que conduce en un único sentido. Debido a esta propiedad se dice que el diodo tiene carácter “rectificador”. Se construye a partir de la unión de dos tipos de semiconductores de diferente comportamiento eléctrico, llamados “p” y “n”.

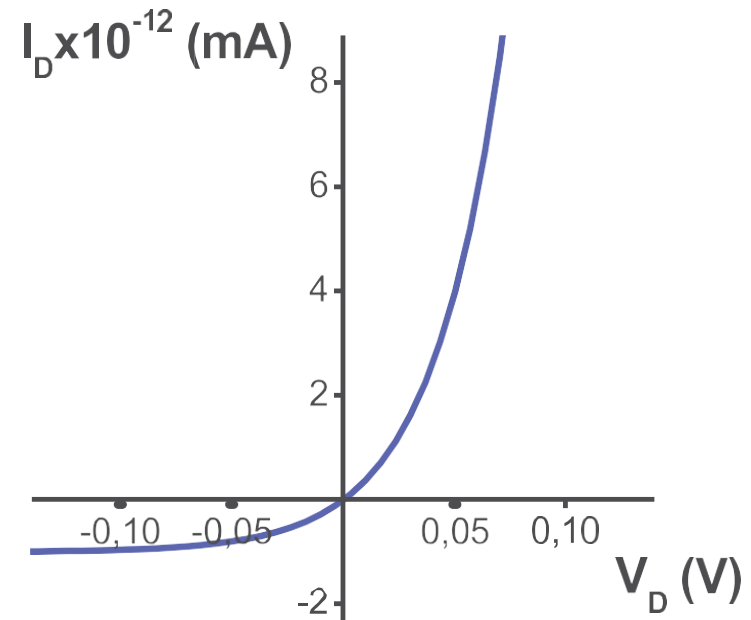
- **Símbolo, terminales y curva característica del diodo p-n**



Convenio de tensiones y corrientes:



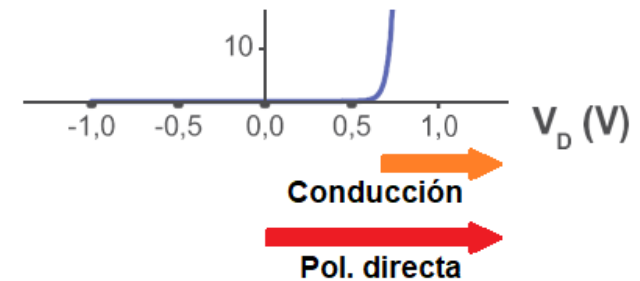
Zoom



TEMA 4: DIODOS. 4.1.- Característica I-V

- La característica I-V del diodo de Si muestra que este solo conduce corrientes apreciables ($\sim \text{mA}$) cuando la tensión entre sus terminales es $V_D \approx 0,5\text{-}0,7\text{V}$ (**conducción**), comportándose como un circuito abierto para tensiones inferiores (**corte**).

- Observación: polarización directa \Rightarrow Conducción:



- La ecuación matemática que mejor describe la característica I-V del diodo es una expresión exponencial llamada **ecuación de Shockley**:

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

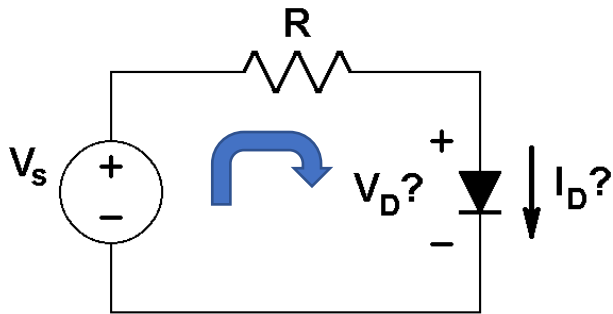
I_S : Corriente inversa de saturación ($\approx 10^{-15}\text{ A}$ en Si)

n : Coeficiente de idealidad ($1 < n < 2$)

$V_T \equiv kT/q_e$: Tensión equivalente a temperatura

TEMA 4: DIODOS. 4.1.- Característica I-V

- Polarización del diodo: valores de I_D y V_D en un circuito con fuentes de corriente continua**



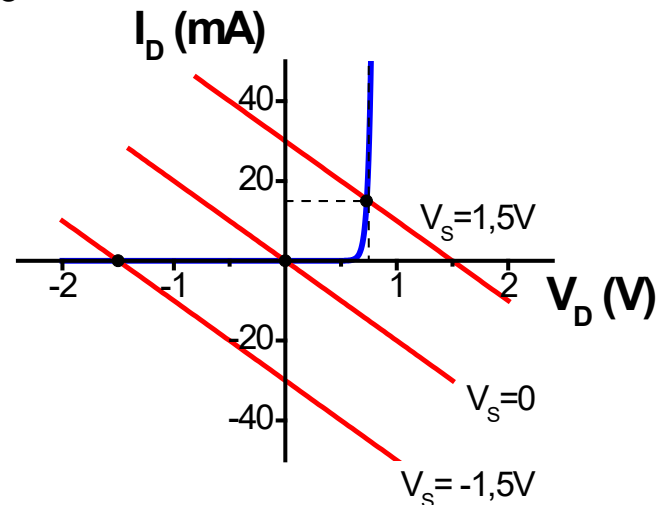
Polarización directa: $V_s > 0$

Polarización inversa: $V_s < 0$

LKM:
$$-V_s + I_D R + V_D = 0$$



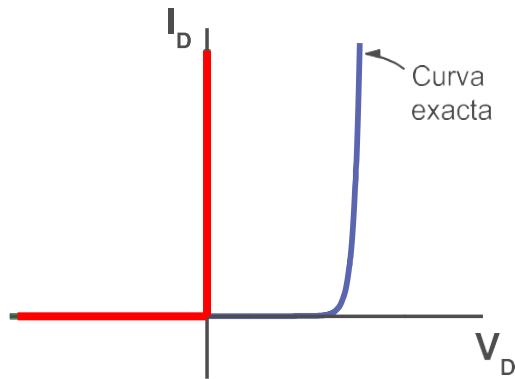
“Recta de carga”:
$$I_D = \frac{V_s}{R} - \frac{1}{R} V_D$$





- El diodo solo puede conducir con polarización directa suficiente ($V_s \approx 0,6 \text{ V}$).
- Si la tensión aplicada es inferior a la del codo de la exponencial, $I_D \approx 0$, $V_D \approx V_s$.
- Si la tensión aplicada es superior a la del codo, I_D y V_D se pueden determinar gráficamente o bien resolviendo un sistema de ecuaciones trascendente.
- Circuitos de polarización más complejos o con mayor número de diodos: necesidad de utilizar un modelo aproximado (no exponencial) para el diodo.

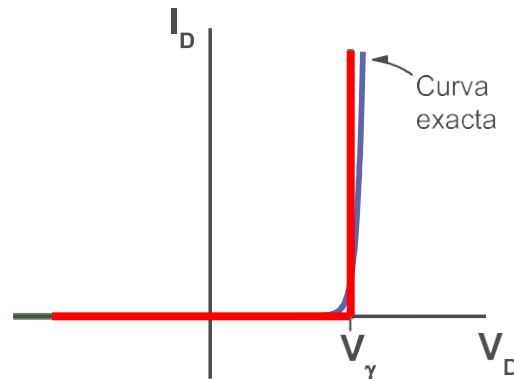
- Modelos lineales (aproximados)**


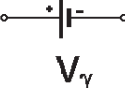
Interruptor



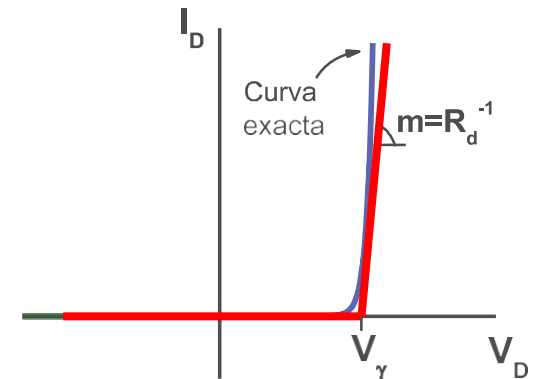
Corte: $I_D = 0, V_D < 0$ 
 Cond: $I_D > 0, V_D = 0$ 



De la tensión umbral



Corte: $I_D = 0, V_D < V_\gamma$ 
 Cond: $I_D > 0, V_D = V_\gamma$ 
 V_γ

De la resistencia dinámica



Corte: $I_D = 0, V_D < V_\gamma$ 
 Cond: $I_D > 0, V_D > V_\gamma$ 
 V_γ R_d

- La tensión umbral y la resistencia dinámica del diodo (V_γ y R_d) son parámetros que dependen del rango de corrientes que circulan por él.
- Sus valores pueden ser obtenidos experimentalmente a partir de la pendiente de la recta tangente a la curva en un cierto punto y su corte con el eje de tensiones.
- Es frecuente que se nos proporcionen los valores de los parámetros del modelo lineal a considerar.

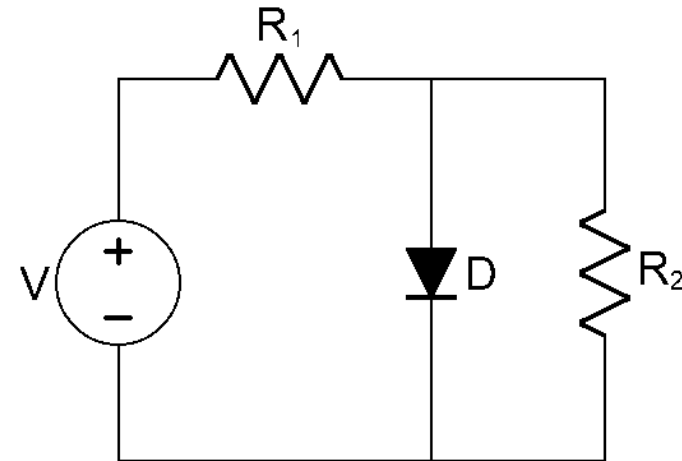
TEMA 4: DIODOS. 4.2.- Análisis de circuitos con diodos

- Los circuitos con diodos en los que todas las fuentes son constantes se denominan **circuitos de polarización**.
- Para conocer los valores del **punto de polarización del diodo** (valores de I_D y de V_D) en estos circuitos:
 1. Se plantean hipótesis sobre el estado de cada uno de los diodos (conducción o corte).
 2. Se sustituye cada diodo por el modelo lineal que se esté utilizando.
 3. Se resuelve el circuito y se obtienen los valores de I_D y de V_D para cada diodo.
 4. Se verifica la hipótesis sobre los estados de los diodos a partir de los valores obtenidos de corrientes y tensiones en ellos:
 - a) $V_D < V_\gamma$ para los diodos en corte
 - b) $I_D > 0$ para los diodos en conducción
 5. En caso de que no se correspondan los valores obtenidos con los estados considerados, repetir desde el punto 1.

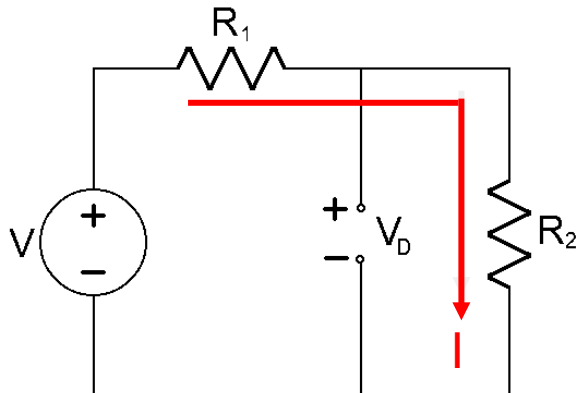
- ♣ **Ejemplo 1:** Obtener el punto de polarización del diodo del circuito, siendo $V = 2V$, $R_1 = 1k\Omega$ y $R_2 = 3k\Omega$.
Datos: suponer el modelo de la tensión umbral con $V_\gamma = 0,6V$.

¿Estado de conducción de D?

Hay 2 posibilidades. Supondremos una de ellas, hallaremos las tensiones y corrientes en el circuito y verificaremos la hipótesis (“reducción al absurdo”).



- 1) Suponemos que D está en corte ($I_D = 0$) \Rightarrow Verificar que $V_D < V_\gamma$

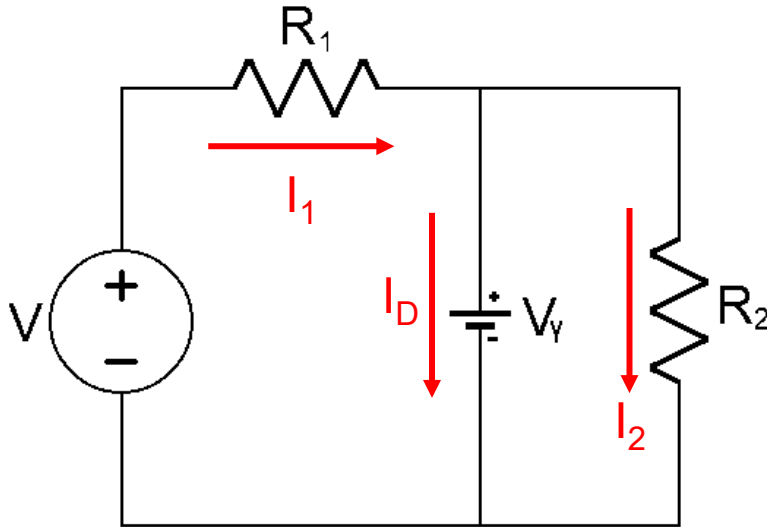


$$\text{Malla: } I = \frac{V}{R_1 + R_2} = 0,5\text{mA}$$

$$V_D = IR_2 = 1,5V > V_\gamma$$

Como el resultado no es compatible con la hipótesis \Rightarrow **hipótesis falsa**

2) Suponemos que D está en conducción ($V_D = V_\gamma$) \Rightarrow Verificar que $I_D > 0$



$$I_1 - I_D - I_2 = 0 ;$$

$$I_D = \frac{V - V_\gamma}{R_1} - \frac{V_\gamma}{R_2} = 1,2\text{mA} > 0$$

Como $I_D > 0 \Rightarrow$ **Punto de polarización: $(V_D, I_D) = (0,6\text{V} , 1,2\text{mA})$**

- **Ejercicio:** Repetir el problema permutando los valores de las resistencias

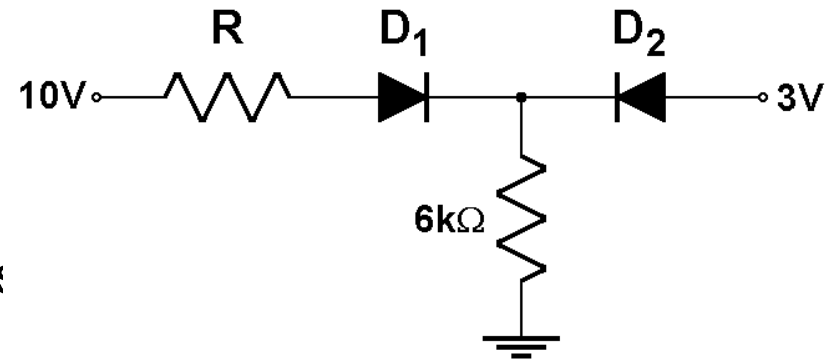
♣ **Ejemplo 2:** Determinar del punto de polarización de los diodos del circuito, siendo **a)** $R = 19\text{k}\Omega$; **b)** $R = 4\text{k}\Omega$.

Datos: Suponer para ambos diodos $V_\gamma = 0,6\text{V}$.

¿Estado de conducción de D_1 y D_2 ?

⇒ Hay 4 posibilidades

⇒ Conviene observar el circuito y razonar cuáles son las más probables



Observación: Si D_1 y D_2 estuvieran en serie, solo existirían 2 posibilidades.

Puesto que $10\text{V} > 3\text{V}$, parece lógico suponer que D_1 conduce y que D_2 está en corte (hipótesis).

- $V_{D1} = V_\gamma$. Verificar que $I_{D1} > 0$
- $I_{D2} = 0$. Verificar que $V_{D2} < V_\gamma$

* ¡¡Ambas desigualdades deben cumplirse simultáneamente!!

TEMA 4: DIODOS. 4.2.-Análisis de circuitos con diodos

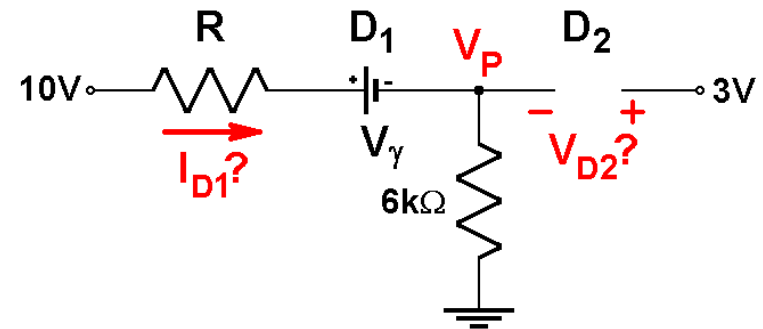
Sustituimos los diodos por los modelos correspondientes y resolvemos el circuito resultante mediante las técnicas de resolución de circuitos estudiadas:

$$-10V + RI_{D1} + V_\gamma + 6k\Omega I_{D1} = 0 \Rightarrow I_{D1} = \frac{10V - 0,6V}{R + 6k};$$

$$V_{D2} = 3V - V_p = 3V - 6k\Omega I_{D1};$$

a) $I_{D1} = 0,376\text{mA}$; $V_{D2} = 0,744\text{V}$

b) $I_{D1} = 0,94\text{mA}$; $V_{D2} = -2,64\text{V}$



Analizamos los resultados en ambos casos:

a) $V_{D2} > V_\gamma \Rightarrow$ inconsistente si D_2 en corte \Rightarrow **hipótesis falsa**

b) $V_{D2} < V_\gamma \Rightarrow$ consistente con D_2 en corte

$I_{D1} > 0 \Rightarrow$ consistente con D_1 en conducción

} \Rightarrow **Hipótesis verdadera**

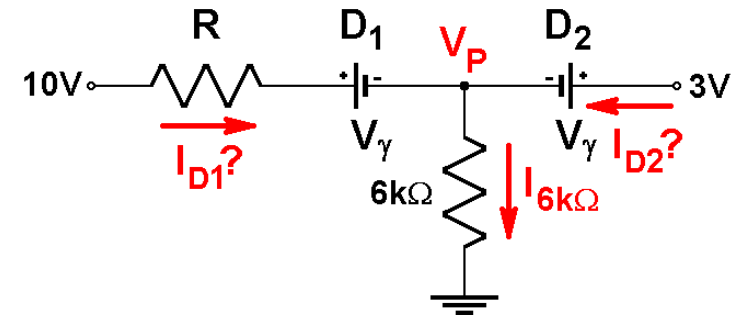
\Rightarrow **Puntos de polarización para $R = 4\text{ k}\Omega$: $(V_{D1}, I_{D1}) = (0,6\text{V}, 0,94\text{mA})$
 $(V_{D2}, I_{D2}) = (-2,64\text{V}, 0\text{mA})$**

Planteamos una nueva hipótesis para el caso **a)**: Suponemos que D_1 y D_2 están en conducción:

$$V_p = 3V - V_\gamma = 2,4V$$

$$I_{D1} = \frac{10V - (V_p + V_\gamma)}{R} = \frac{7V}{19k\Omega} = 0,368mA > 0$$

$$I_{D2} = I_{6k} - I_{D1} = \frac{V_p}{6k\Omega} - 0,368mA = 0,032mA > 0$$



Ambos resultados son consistentes con que D_1 y D_2 estén en conducción.

⇒ **Puntos de polarización para $R = 19k\Omega$: $(V_{D1}, I_{D1}) = (0,6V, 0,368mA)$
 $(V_{D2}, I_{D2}) = (0,6V, 0,032mA)$**

- **Circuitos de diodos con fuentes de tensión alterna**

Si en un circuito con diodos existe alguna fuente de tensión alterna, estos podrían modificar su estado de conducción con el tiempo.

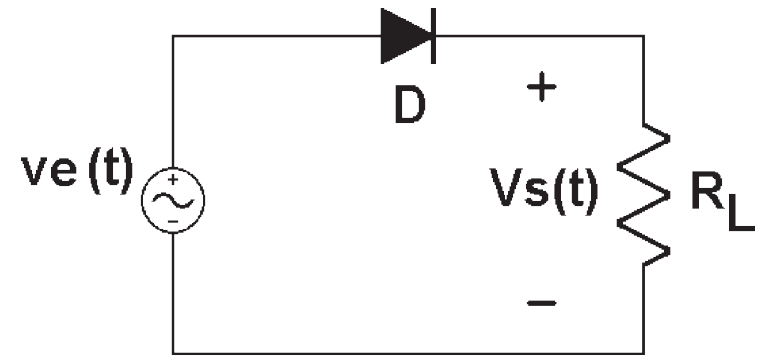
Para estudiar estos circuitos:

1. Consideramos que son posibles ambos estados para el diodo y resolvemos los circuitos correspondientes
 2. Buscamos la condición que tiene que cumplir el valor de la fuente de tensión alterna para que el diodo esté en cada estado
- Algunos de estos circuitos se utilizan para la fabricación de fuentes de alimentación y reciben el nombre de **circuitos rectificadores**
 - Suele interesar conocer el voltaje en función del tiempo en una resistencia u otra parte del circuito
 - Son circuitos que modifican la forma de la tensión alterna

♣ **Ejemplo 3:** Consideremos el siguiente circuito y el modelo de la tensión umbral para el diodo, siendo $V_e(t) = V_p \cdot \sin(\omega t)$. ¿ $v_s(t)$?

Se pueden dar dos situaciones:

- 1) D no conduce
- 2) D conduce



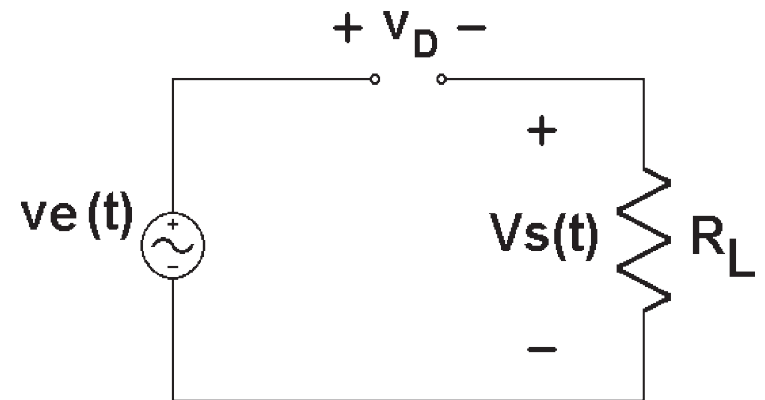
- 1) D no conduce:

$$I_D = 0 \Rightarrow V_s = 0$$

Condición:

$$V_D < V_\gamma ; V_D = V(+)-V(-) = V_e - 0 = V_e$$

$$\Rightarrow V_e < V_\gamma$$

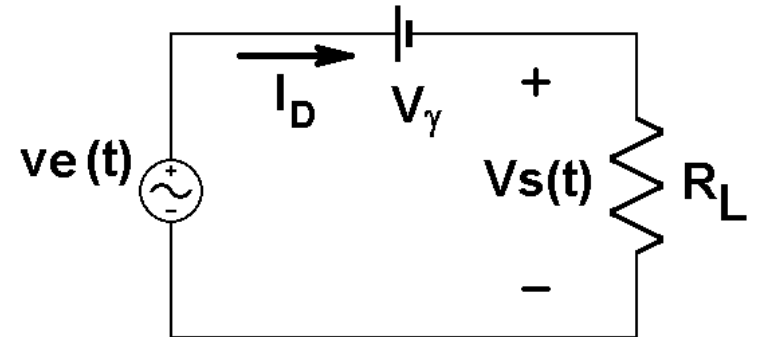


2) D conduce:

$$V_s = V_e - V_\gamma$$

Condición:

$$I_D > 0 \Rightarrow I_D = \frac{V_s}{R_L} = \frac{V_e - V_\gamma}{R_L} > 0 \Rightarrow V_e > V_\gamma$$



Para el circuito anterior, suponiendo $V_\gamma = 0,7V$ y $V_p = 4,0V$, obtenemos:

$$V_s = 0 \quad \text{si} \quad V_e < 0,7V$$

$$V_s = V_e - 0,7V \quad \text{si} \quad V_e > 0,7V$$

- * A la situación en la que el diodo cambia de un régimen a otro se le llama “punto de conmutación”
- * ¿Cómo varía en R_L la tensión con t si la comparamos con la de la fuente?

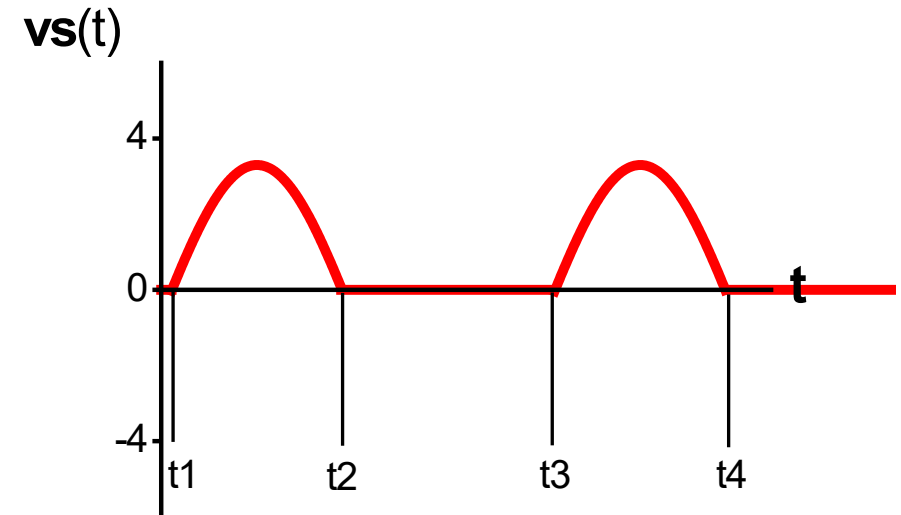
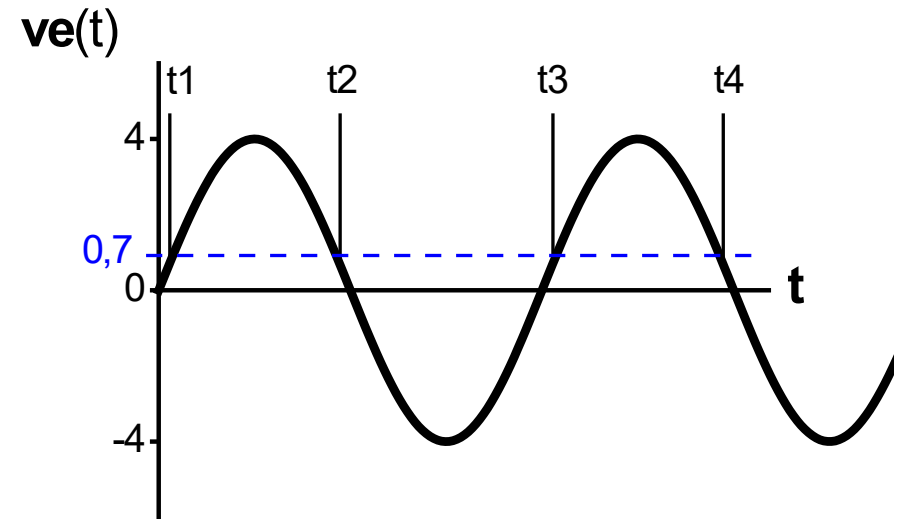
La forma de onda resultante corresponde a un rectificador de media onda:

- $V_s = 0$ si $V_e < 0,7V$

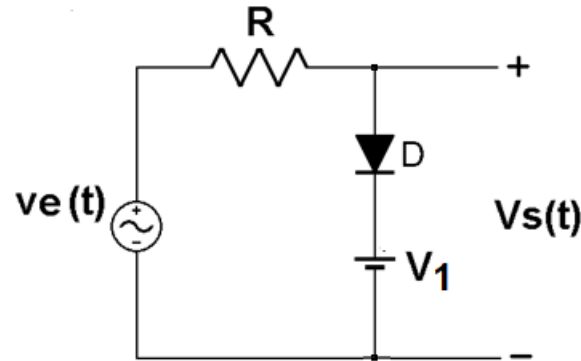
Esto ocurre: de 0 a t_1 , de t_2 a t_3 ...

- $V_s = V_e - 0,7V$ si $V_e > 0,7V$

Esto ocurre: de t_1 a t_2 , de t_3 a t_4 ...

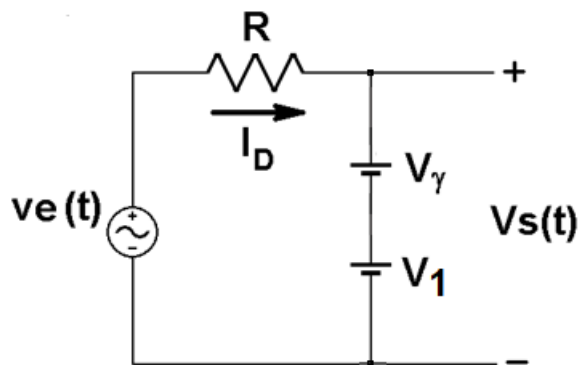


♣ **Ejemplo 4:** Consideremos el siguiente circuito y el modelo de la tensión umbral para el diodo, siendo $V_e(t) = V_p \cdot \sin(\omega t)$.



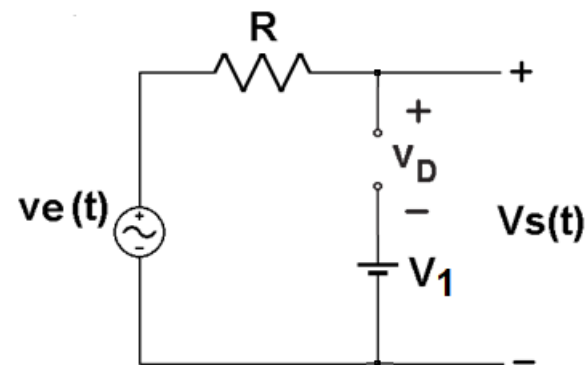
Calculamos V_s en los dos casos posibles:

1) D conduce



$$V_s = V_\gamma + V_1$$

2) D en corte



$$V_s = V_e$$

Valores necesarios de V_e para cada situación:

1) Condición:

$$I_D > 0 \Rightarrow V_e - V_\gamma - V_1 > 0; V_e > V_\gamma + V_1$$

2) Condición:

$$V_D < V_\gamma \Rightarrow V_e - V_1 < V_\gamma; V_e < V_\gamma + V_1$$

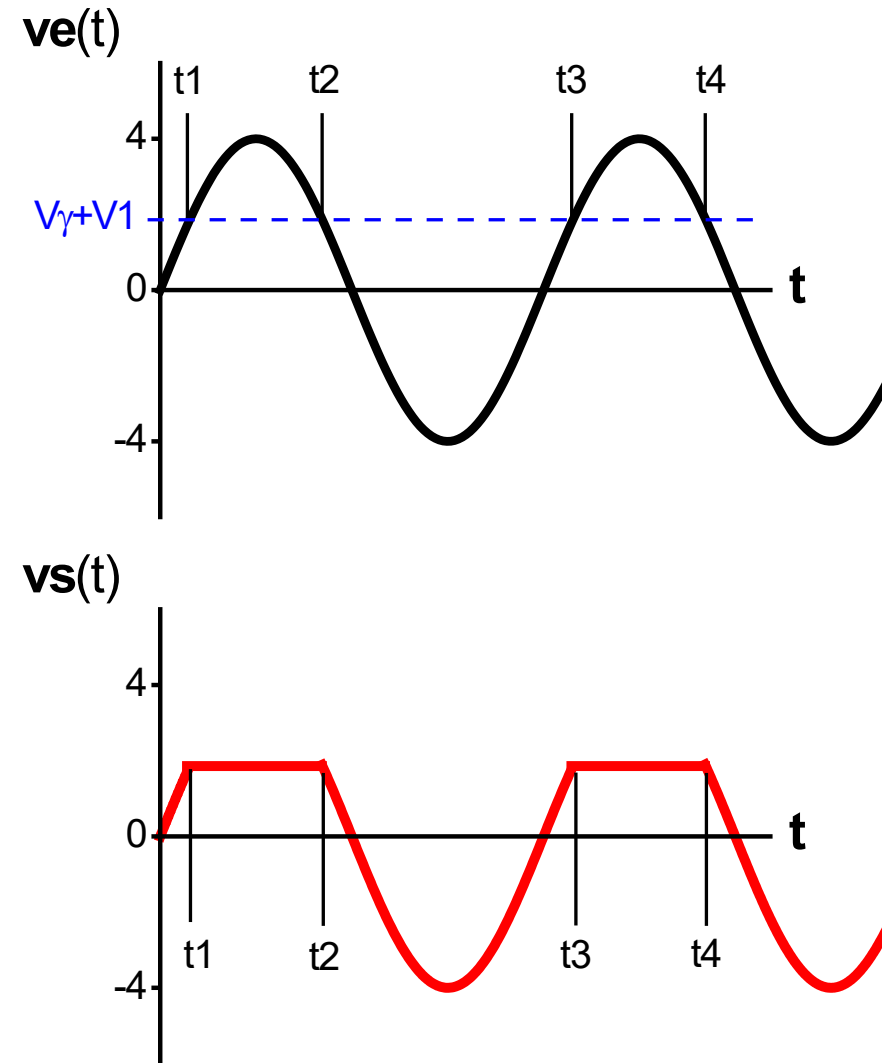
En resumen:

- $V_s = V_\gamma + V_1$ si $V_e > V_\gamma + V_1$

Esto ocurre: de t_1 a t_2 , de t_3 a t_4 ...

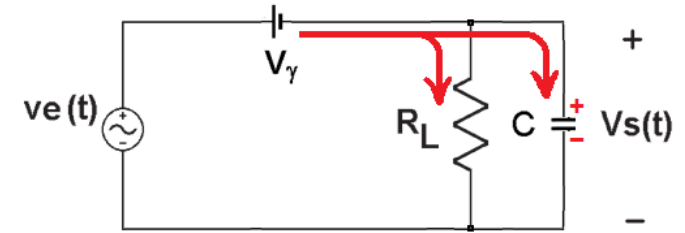
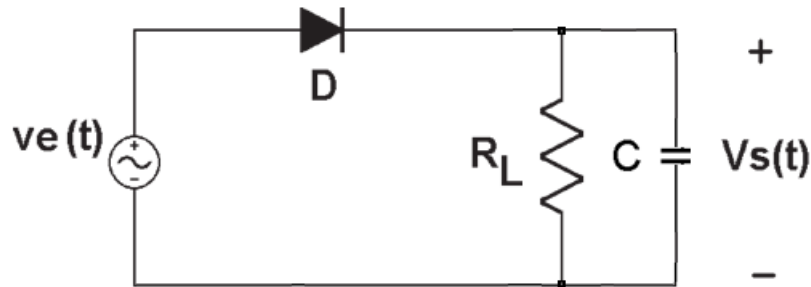
- $V_s = V_e$ si $V_e < V_\gamma + V_1$

Esto ocurre: de 0 a t_1 , de t_2 a t_3 ...

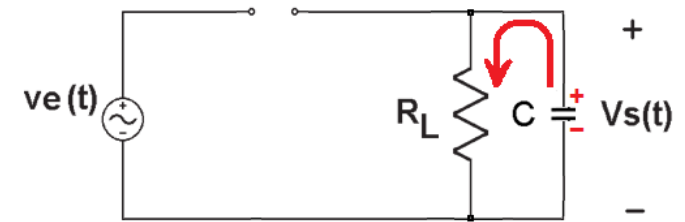


La salida está recortada a un valor definido por $V_\gamma + V_1$. Modificando V_1 , se varía el voltaje de recorte.

• Rectificación y filtrado



$$i_D > 0$$



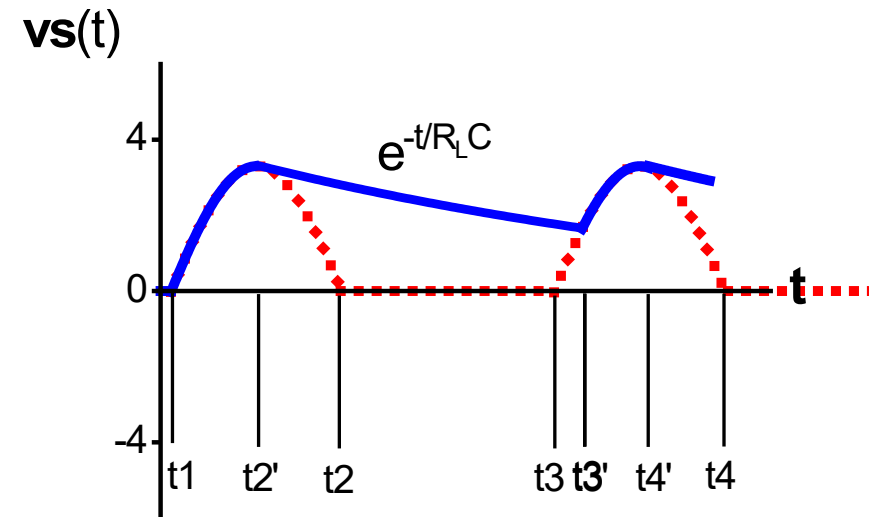
$$i_D = 0$$

Es un circuito rectificador con condensador

- $t=0$ a t_2' : El diodo conduce y carga C
- t_2' a t_3' : El condensador cargado se opone a la conducción del diodo y se descarga a través de R_L
- t_3' a t_4 : El diodo vuelve a conducir y a cargar al condensador

...

* Cuanto mayor sean R_L o C , más plana es la forma de V_s



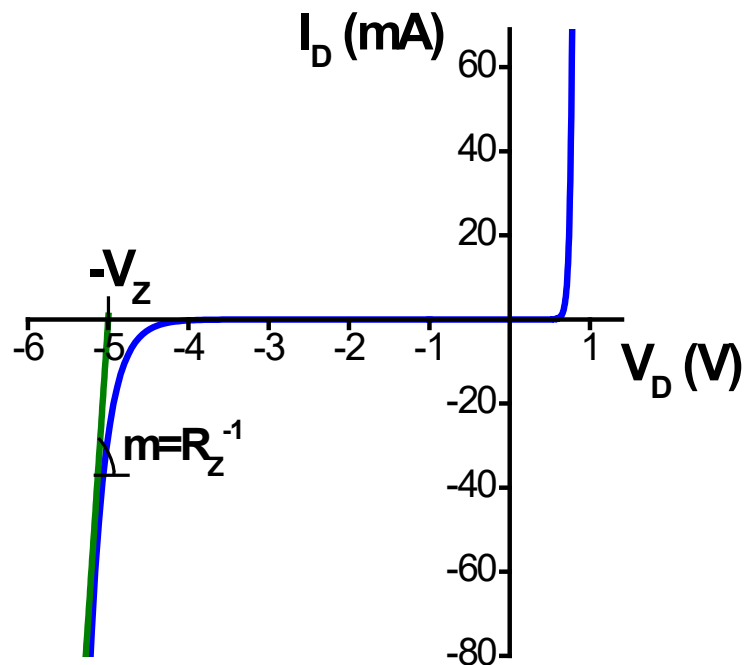
⊗ En resumen:

- Un diodo de unión es un dispositivo semiconductor de dos terminales, de comportamiento no lineal, que conduce de forma apreciable en un único sentido cuando se alcanza entre sus terminales un cierto valor umbral de tensión.
- Se pueden obtener los valores (I_D , V_D) - punto de trabajo - gráficamente, a partir del corte entre la característica del diodo y la recta de carga.
- Debido al comportamiento exponencial de la característica I-V, se trabaja habitualmente con tres modelos lineales aproximados por tramos: de interruptor, de la tensión umbral y de la resistencia dinámica.
- Los circuitos con diodos en que todas las fuentes son constantes se denominan circuitos de polarización. Para conocer los valores (I_D , V_D) en estos circuitos se plantean hipótesis sobre el estado de los diodos y se confirman.
- En los circuitos que presentan fuentes de tensión alterna, el diodo puede cambiar de región de funcionamiento dependiendo del valor de la tensión. En tal caso:
 - i) Resolveremos el circuito con el modelo aproximado correspondiente en cada región.
 - ii) Buscaremos el valor de la fuente que provoca la transición entre regiones.

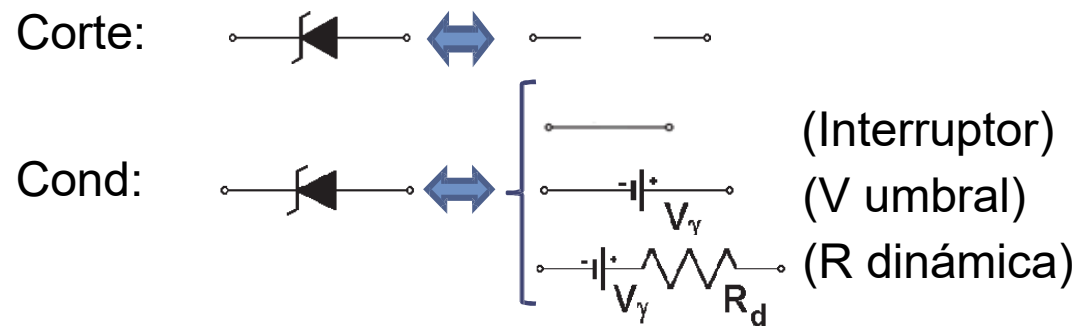
TEMA 4: DIODOS. 4.4.- Otros diodos: Zéner, LED, fotodiodo y células solares

Además de los diodos de unión p-n, existen otros tipos de diodos muy habituales en numerosas aplicaciones prácticas.

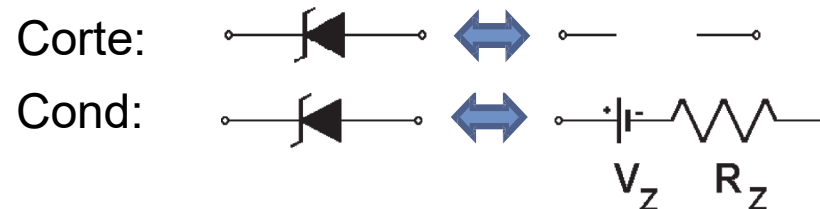
- **Diodo zéner:** en polarización directa se comporta como un diodo de unión, mientras que en polarización inversa presenta también una región de conducción llamada región de ruptura, en la que la tensión varía poco.



– Modelos lineales en polarización directa:



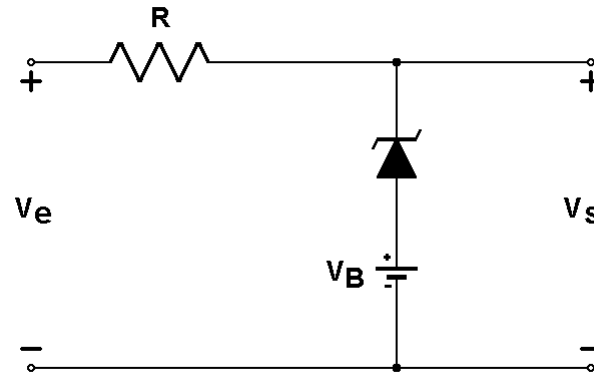
– Modelos lineales en polarización inversa:



V_Z , R_Z : tensión y resistencia de Zéner

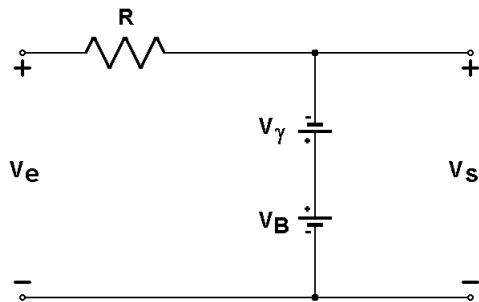
- El análisis de los circuitos con Zéner es análogo al de los diodos de unión, teniendo en cuenta que en el Zéner hay tres regiones de funcionamiento en lugar de dos.

♣ **Ejemplo 5:** Encontrar la tensión v_s , siendo $V_e(t) = V_p \cdot \sin(\omega t)$. Considerar conocidos R y V_B , V_γ y V_Z , $R_d = 0$, $R_Z = 0$.



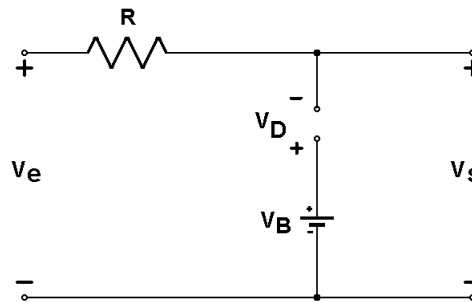
Calculamos v_o en los tres casos posibles:

1) D conduce en directa



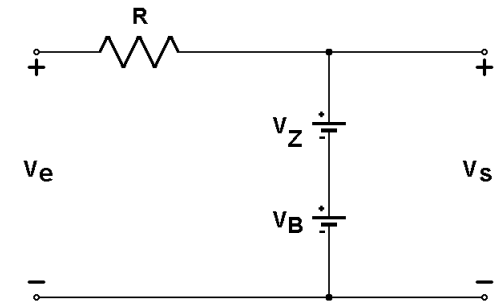
$$V_s = V_B - V_\gamma$$

2) D en corte



$$V_s = V_e$$

3) D conduce en inversa

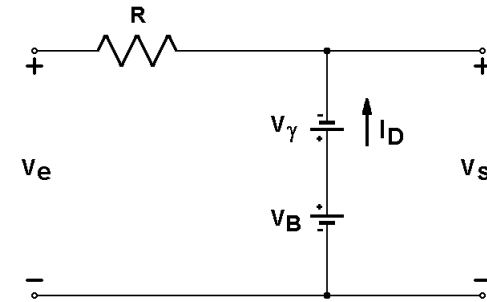


$$V_s = V_B + V_Z$$

Valores necesarios de V_e para cada situación:

1) Conducción directa. Condición:

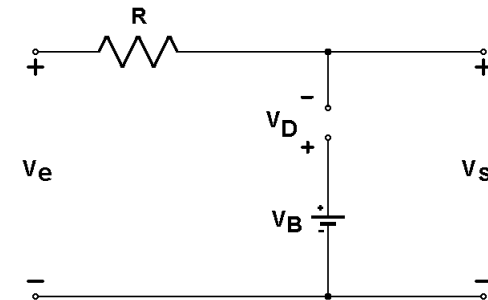
$$I_D > 0 \Rightarrow V_B - V_\gamma - V_e > 0; V_e < V_B - V_\gamma$$



2) Corte. Condiciones:

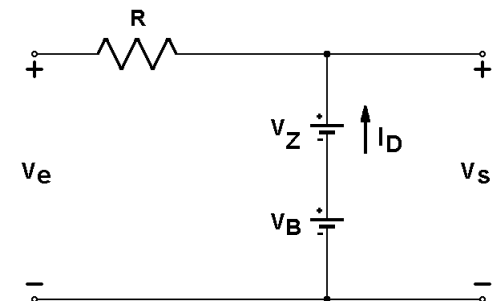
$$-V_Z < V_D < V_\gamma \Rightarrow -V_Z < V_B - V_e < V_\gamma \Rightarrow$$

$$V_e < V_B + V_Z \text{ y } V_e > V_B - V_\gamma$$



3) Conducción inversa. Condición:

$$I_D < 0 \Rightarrow V_B + V_Z - V_e < 0; V_e > V_B + V_Z$$



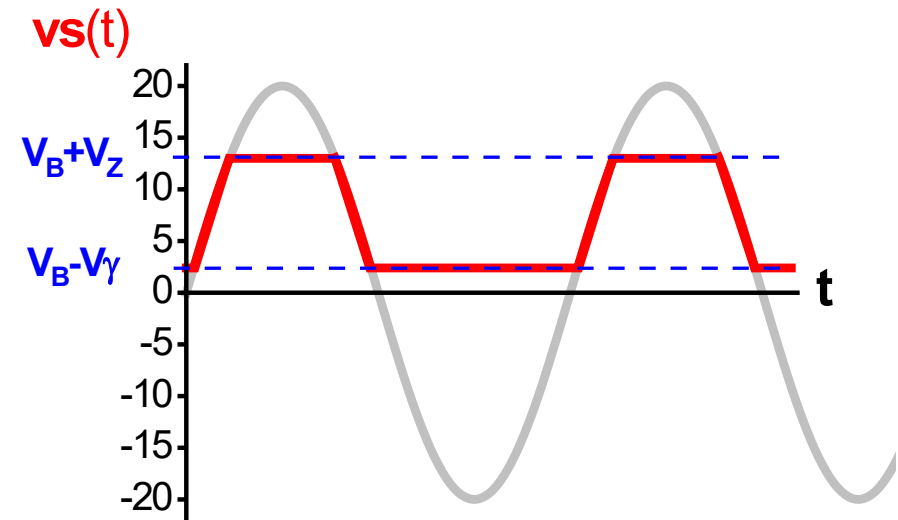
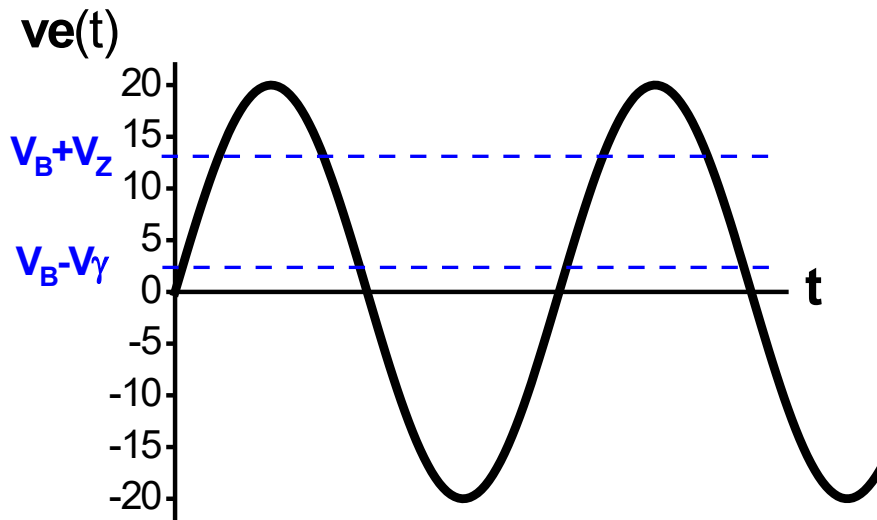
En resumen:

$$V_e < V_B - V_\gamma \Rightarrow V_s = V_B - V_\gamma$$

$$V_e < V_B + V_Z \text{ y } V_e > V_B - V_\gamma \Rightarrow V_s = V_e$$

$$V_e > V_B + V_Z \Rightarrow V_s = V_B + V_Z$$

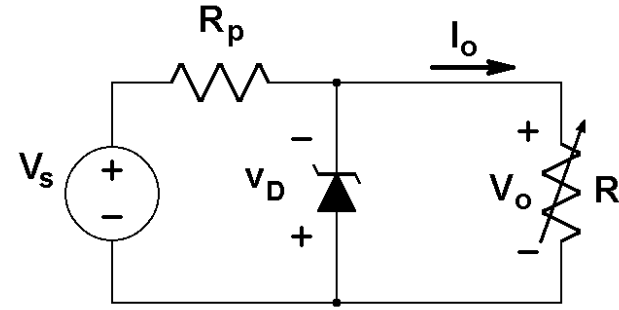
- Para el caso: $v_e(t) = 20V \cdot \sin(\omega t)$, con $V_B = 3V$, $V_\gamma = 0,6V$, $V_Z = 10V$:



- **Ejercicio:** Repetir el problema cuando $v_e(t) = 10V \cdot \sin(\omega t)$

Aplicación: el zéner como dispositivo **regulador de tensión**

En el circuito de la figura, la resistencia R varía entre 0 e ∞ , lo que produce cambios en el funcionamiento del zéner, aún siendo constante la fuente V_S .



Consideramos $V_S > V_Z$, con R_Z y V_Z conocidos. ¿ $V_o(I_o)$?

Observación: Polarización inversa \Rightarrow zéner en corte o en conducción inversa.

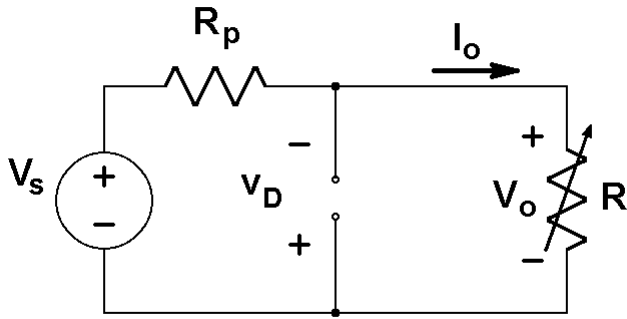
¡Al no ser el circuito de malla única, la condición $V_S > V_Z$ no garantiza la conducción del diodo!

– Analizando las situaciones extremas:

- $R=0 \Rightarrow V_o=0$, zéner en corte, $I_o=I_{o\text{ máx}}=V_S/R_p$
- $R \rightarrow \infty$: malla única y $V_S > V_Z \Rightarrow$ conducción inversa, $I_o=0$

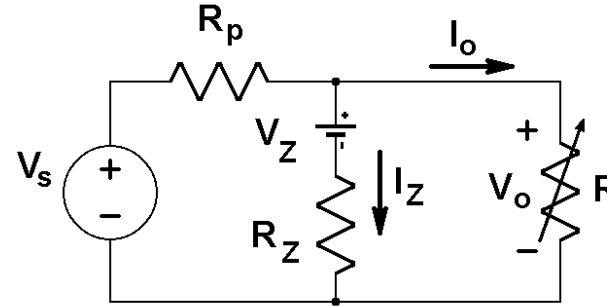
Entre ambos extremos, habrá un valor de R para el que el zéner pase de corte a conducción inversa

– $\underline{R < R_{\text{lim}}}$ (corte)



$$V_o(I_o) = V_s - R_p I_o$$

– $\underline{R > R_{\text{lim}}}$ (conducción inversa, $I_Z \equiv -I_D$)



$$\frac{V_s - V_o}{R_p} = \frac{V_o - V_Z}{R_Z} + I_o;$$

$$V_o(I_o) = \frac{R_p}{R_Z + R_p} V_Z + \frac{R_Z}{R_Z + R_p} V_s - \frac{R_Z R_p}{R_Z + R_p} I_o$$

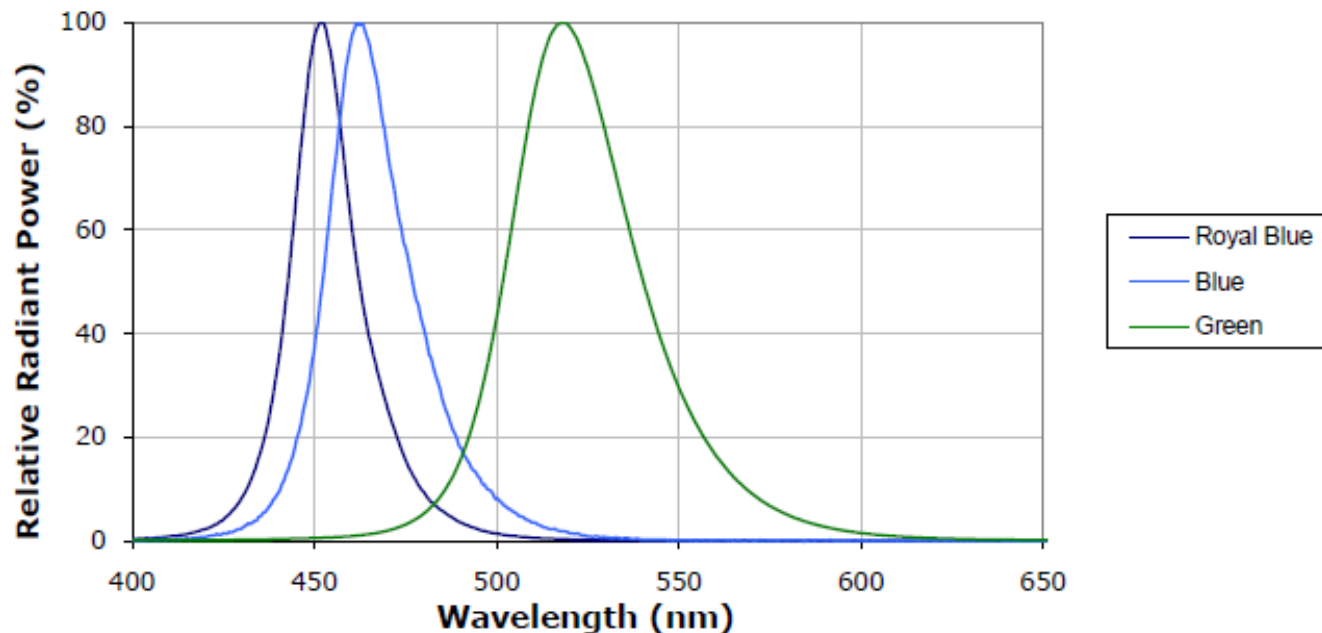
Observación:

Si el zéner conduce en inversa y $R_Z \ll R_p$, entonces $V_o(I_o) \approx V_Z - R_Z I_o \approx V_Z$
 \Leftrightarrow el zéner **regula** la tensión manteniéndola aproximadamente constante con R.

- **Ejercicio:** Encontrar el valor R_{lim}

- **LED** (*Light-emitting diode*): es un diodo de unión p-n que emite luz cuando se polariza en la región de conducción. Esta propiedad se da solo en los dispositivos fabricados con algunos materiales semiconductores.

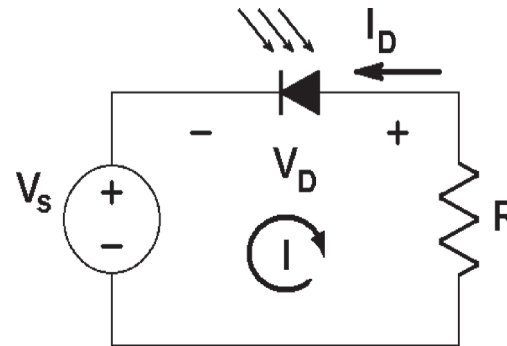
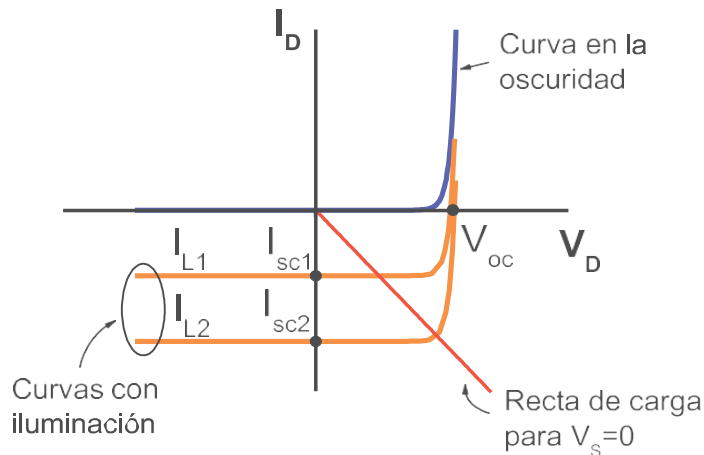
Aunque la luz emitida no es monocromática, la intensidad emitida presenta un máximo a una longitud de onda que depende del material con que se fabrique. Esto se observa en la gráfica típica de distribución espectral siguiente:



En un LED se define la *eficiencia de emisión*: $\eta \equiv \frac{P_{lum}}{P_{el}}$, P_{lum} = Potencia emitida
 $P_{el} = I_D V_D$

- **Fotodiodo:** es un diodo de unión p-n construido de forma que la luz puede llegar al semiconductor. La irradiación de este produce una corriente inversa a la habitual en el diodo, que se suma a la corriente que es suministrada por el circuito.

La corriente inversa es más evidente bajo polarización inversa, y es proporcional al número de fotones incidentes (a la intensidad luminosa).



Recta de carga:

$$I_D = -\frac{V_s}{R} - \frac{V_D}{R}$$

Cuando el dispositivo trabaja en el cuarto cuadrante de la característica, recibe el nombre de célula fotovoltaica, y proporciona al circuito una potencia igual al producto $I_D \times V_D$. En una célula se definen:

▪ *Corriente de cortocircuito* ($V_D=0$): I_{sc}

▪ *Tensión de circuito abierto* ($I_D=0$): V_{oc}

▪ *Eficiencia o rendimiento:* $\square \equiv \frac{P_{m\acute{a}x}}{P_{lum}}$

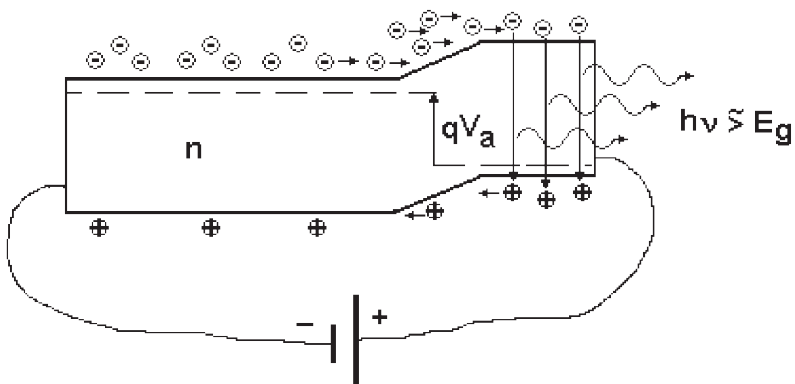
P_{lum} = Potencia luminosa incidente

$P_{m\acute{a}x}$ = Potencia máxima que proporciona

• LED y fotodiodo

Teniendo en cuenta los diagramas de bandas de energía, su funcionamiento se basa en la variación de energía de los portadores con intercambio de energía luminosa bajo ciertas condiciones:

LED: Diodo emisor de luz



Los electrones inyectados desde el lado n se recombinan con los huecos de la región p

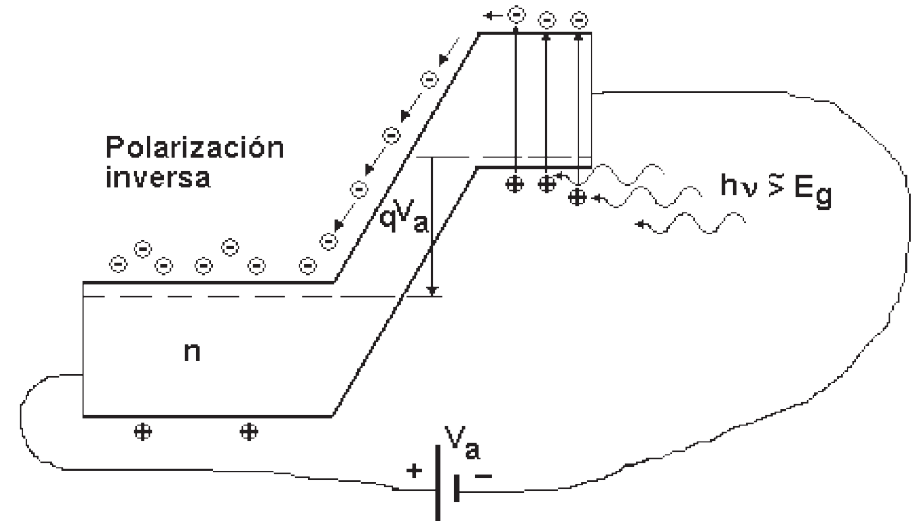
Materiales con elevada eficiencia de recombinación radiativa

La elección del material semiconductor (E_g) determina la longitud de onda de emisión

Unión p-n con la región p muy estrecha y superficial

Los fotones se generan muy cerca de la superficie y escapan fácilmente

Fotodiodo



Unión p-n con la región p muy estrecha y superficial

Fotones con energía mayor que E_g son absorbidos por electrones de la BV del lado p, pasando a la BC y dejando un hueco

Los electrones abandonan fácilmente esa estrecha región p y son acelerados por el campo eléctrico hacia el lado n