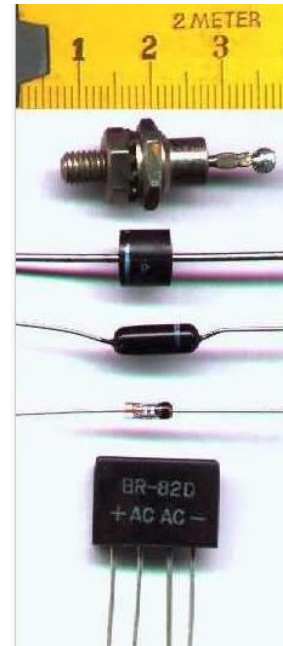
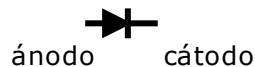
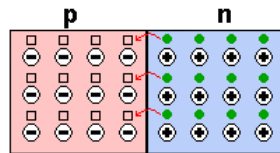


# Diodos, Rectificadores y Reguladores de Tensión

Luis Cucala García

# Diodo

- **Diodos:** el dispositivo semiconductor más sencillo, obtenido como unión de un material de tipo P con un material de tipo N



diodos

rectificador



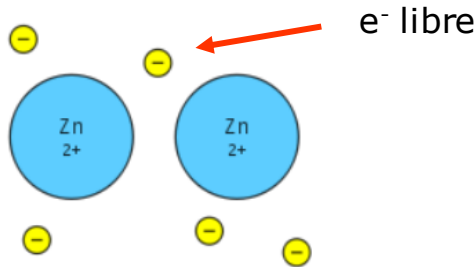
# Semiconductores

- Para la conducción eléctrica son necesarios electrones libres no ligados a un enlace determinado (en la banda de valencia), es decir, capaces de desplazarse por el material (en la banda de conducción). Desde este punto de vista, existen 3 tipos de materiales:
  - **Aislantes:** cuarzo, plástico, cerámicas, con conductividades del orden de  $10^{-18}$  S/cm y en los que la diferencia entre las bandas de valencia y conducción es del orden de 6 eV, demasiado grande para el salto de los electrones en condiciones normales.
  - **Conductores:** cobre, aluminio, oro, plata, etc ( $10^5$  S/cm) y en los que ambas bandas de energía se superponen.
  - **Semiconductores:** silicio, germanio, ... en los que el salto de energía entre bandas es pequeño ( $\approx 1$  eV) por lo que al suministrarles energía pueden conducir.



# Semiconductores

- En los **metales** los electrones de valencia no están ligados a ningún átomo en particular. Son una estructura de iones rígidamente unidos rodeada de una nube de electrones libres.

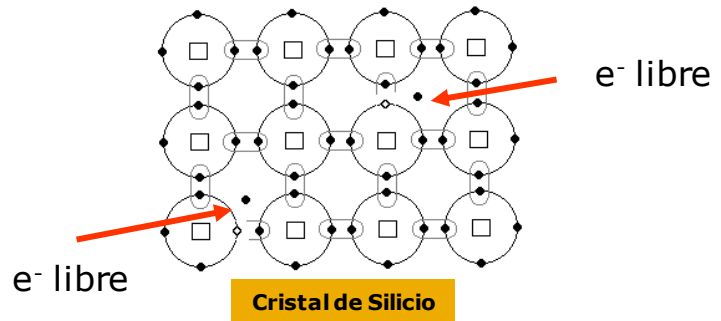
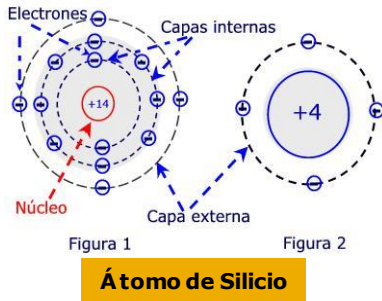


- En ausencia de campo eléctrico el flujo medio de electrones es nulo y por tanto también la intensidad.
- Bajo un campo eléctrico se establece un flujo medio de electrones y la corriente deja de ser nula.



# Semiconductores

- Los materiales **semiconductores** como el Silicio, Germanio, Arseniuro de Galio, etc, son materiales cuya conductividad no es tan alta como la de los metales, ni tan baja como en los aislantes, siendo además **muy variable con la temperatura**.

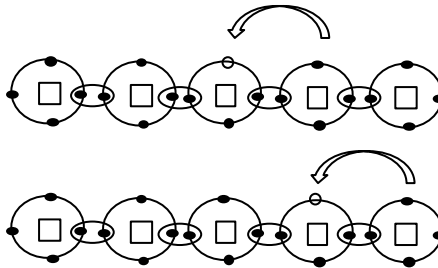


- Ej: cristal de silicio, con forma de tetraedro con un átomo en cada vértice. Cada átomo tiene 14  $e^-$  de los cuales 4  $e^-$  son de valencia. Los átomos se unen porque comparten sus  $e^-$  de valencia (enlace covalente), quedando éstos muy unidos al núcleo y contribuyendo poco a la conducción.



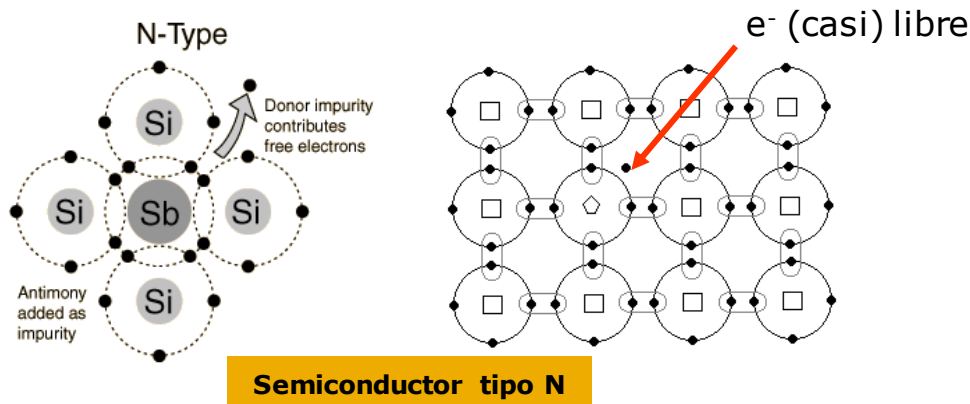
# Semiconductores

- A  $\approx 0$  K el semiconductor se comporta como un aislante. A temperatura ambiente algunos enlaces covalentes se rompen debido a la energía térmica del cristal y permiten una cierta conducción.
- Aparecen 2 tipos de conducción: por los  $e^-$  libres (como en el metal) y por los huecos (como cargas positivas): en efecto, cuando se genera un hueco es fácil que lo ocupe un  $e^-$  de un enlace cercano. Es como si el hueco (carga positiva) se desplazase.



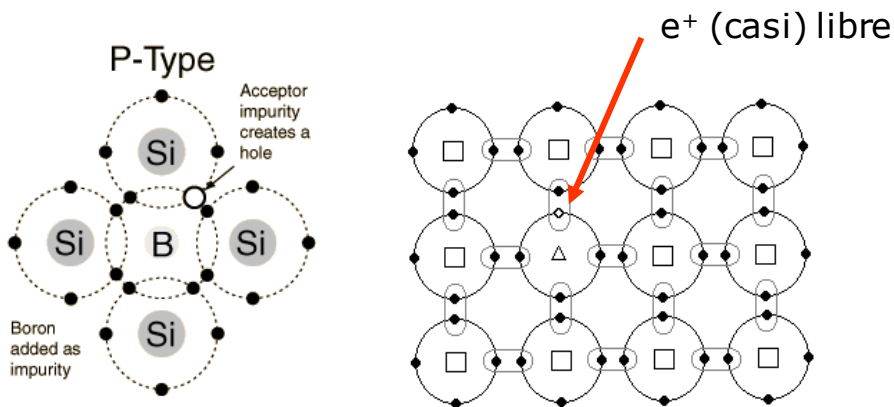
# Semiconductores

- **Semiconductores extrínsecos:** para aumentar el número de cargas libres de un semiconductor se introduce una concentración controlada de "impurezas" en el material, obteniendo un semiconductor extrínseco o **dopado** (si no está dopado se llama intrínseco). El nivel de impureza suele ser de 1 por cada  $10^6 \div 10^8$  átomos de semiconductor.
- **Tipo N:** en el silicio, añadiendo átomos pentavalentes. 4  $e^-$  para los enlaces de valencia, y el quinto queda no enlazado. La energía necesaria para liberarlo es solo de 0,05 eV frente a 1,1 en silicio no dopado (a T ambiente).



# Semiconductores

- **Tipo P:** en el silicio, añadiendo átomos trivalentes.



**Semiconductor tipo P**

- **Fabricación de dispositivos semiconductores:**

<http://www.youtube.com/watch?v=UvluuATiA50#t=336>

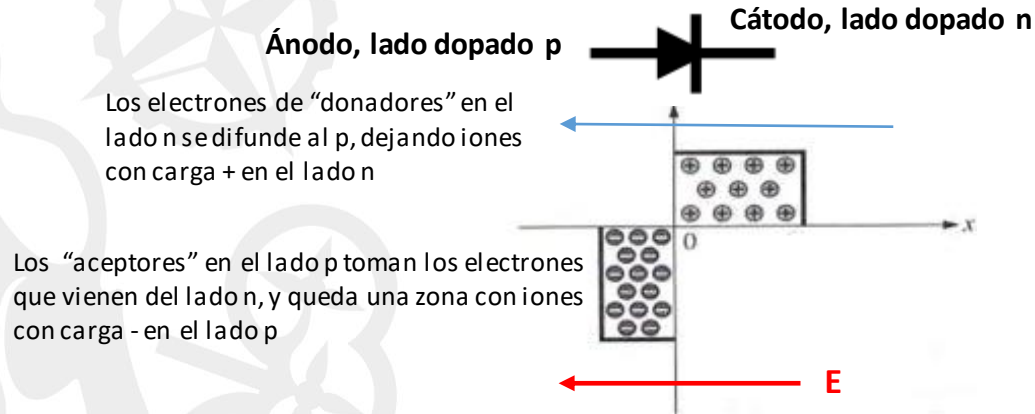
- **Diodos:** el dispositivo semiconductor más sencillo, obtenido como unión de un material de tipo P con un material de tipo N





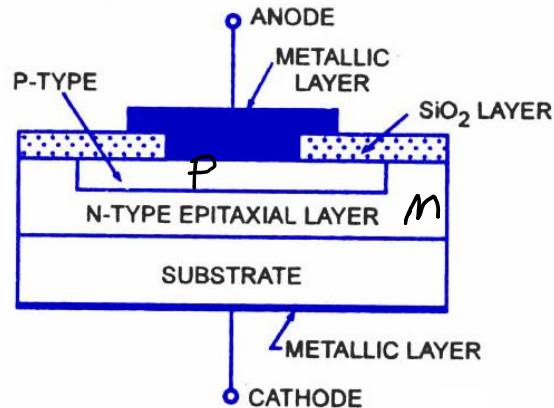
# Un breve vistazo al funcionamiento de un diodo (unión p-n)

- Para que entendáis como funciona un diodo, y la razón de que solo deja pasar la corriente en sentido
- En una unión p-n (zona de transición abrupta en un semiconductor, entre un lado “dopado” con “donadores” que ceden electrones (lado n), y un lado dopado con “aceptores” que “roban” electrones (lado p), se produce una difusión de cargas que forma una diferencia de potencial (“potencial de la unión”) sin necesidad de aplicar un voltaje externo

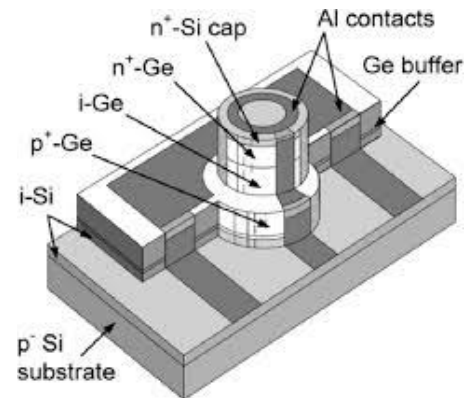
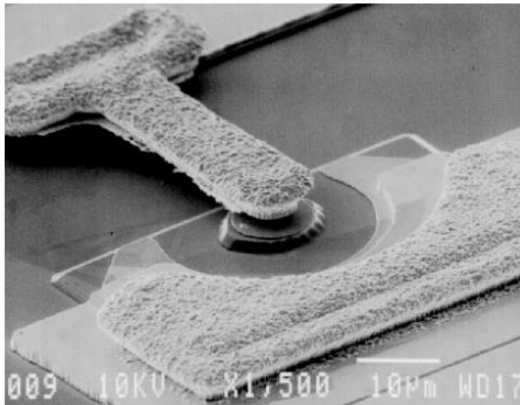


Esta separación de cargas crea un campo eléctrico que frena el paso adicional de cargas

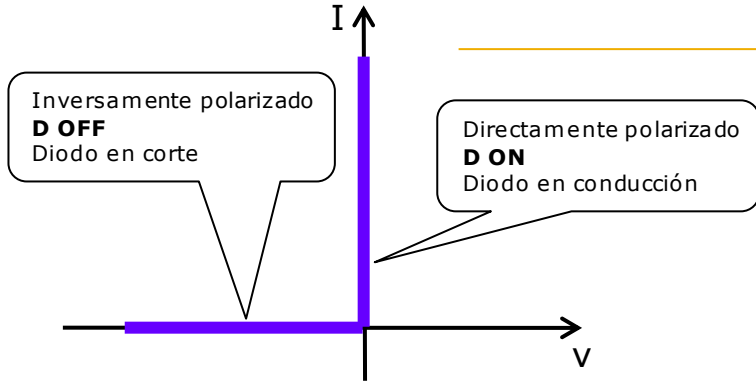
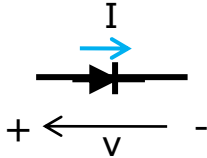
# Un diodo real tiene este aspecto



Y un ejemplo de fotodiodo tipo “pin” para comunicaciones ópticas:



# Diodo ideal



- Dispositivo no lineal con dos tramos lineales. Da lugar a dos modelos equivalentes (lineales), dependiendo de su estado:

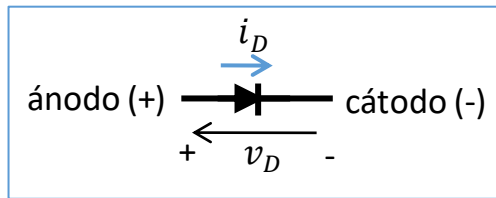
D ON	D OFF
$v = 0$	$v < 0$
$I > 0$	$I = 0$

## Procedimiento de cálculo en circuitos

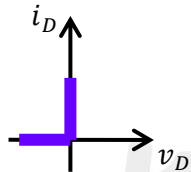
- Suponer un estado razonable para cada diodo
- Resolver con el modelo equivalente
- Comprobar hipótesis:
  - Si ON  $I > 0$
  - Si OFF  $v < 0$
- Volver a 1 si es necesario con nueva hipótesis de conducción



# Modelos de diodo



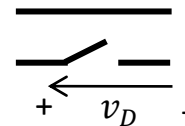
- Modelo de diodo ideal



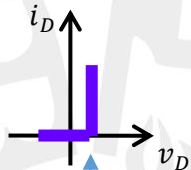
$$v_{D\text{ ON}} = 0$$

D ON si  $i_D > 0, v_D = 0$

D OFF si  $i_D = 0, v_D < 0$



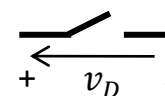
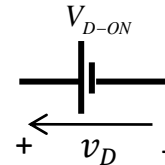
- Modelo con caída de tensión constante



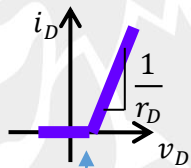
$$V_{D\text{ ON}} = 0,7 \text{ o } 1,4 \text{ V}$$

D ON si  $i_D > 0, v_D = V_{D\text{ ON}}$

D OFF si  $i_D = 0, v_D < V_{D\text{ ON}}$



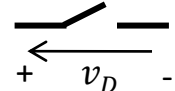
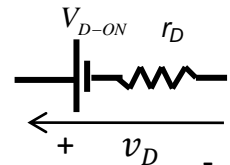
- Modelo con resistencia



$$V_{D\text{ ON}} = 0,7 \text{ o } 1,4 \text{ V}$$

D ON si  $i_D > 0, v_D = V_{D\text{ ON}} + i_D r_D$

D OFF si  $i_D = 0, v_D < V_{D\text{ ON}}$



- Modelo exponencial:

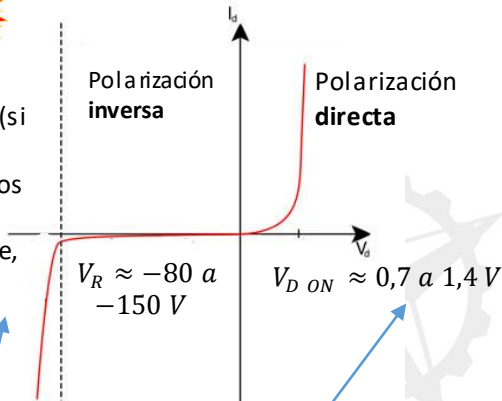
$$I_D = I_S \left( e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right)$$

# El modelo de Shockley del diodo

Hasta ahora hemos caracterizado el diodo como un interruptor, pero esto no es realista



Zona de ruptura (si no limitamos la corriente, adiós diodo)



0,7 V para diodos de “señal” de Si  
1,4 V para diodos LED de AsGa

Hay diodos diseñados para trabajar en la zona de ruptura, se llaman **Zener**

- Modelo de Shockley del diodo:

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

Con polarización directa y  $V_D \gg nV_T$

$$I_D \approx I_S e^{\frac{V_D}{nV_T}}$$

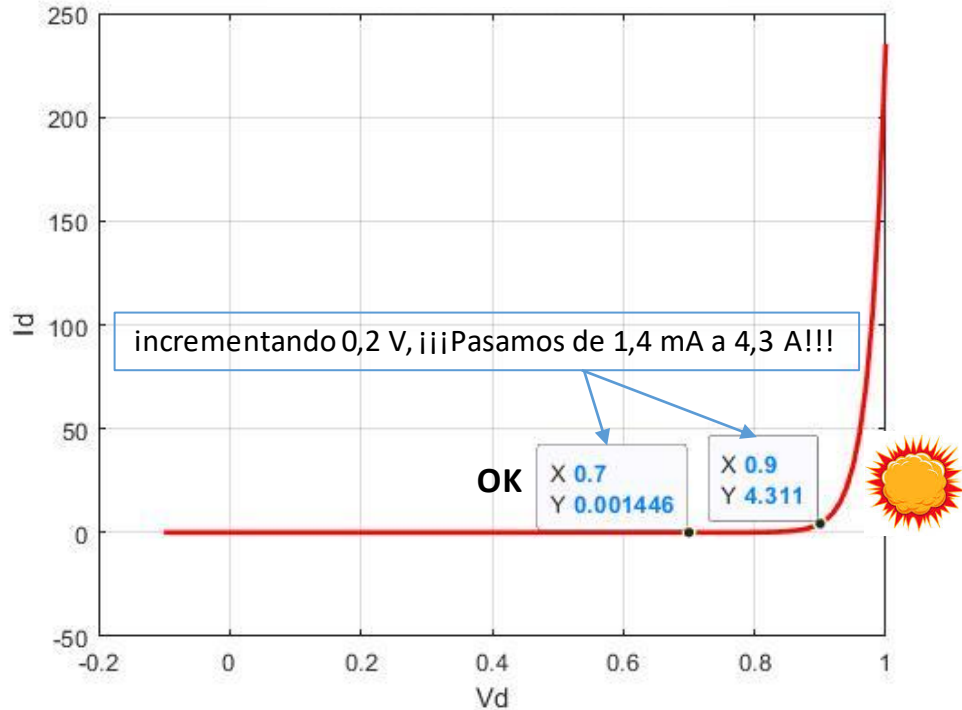
Y con polarización inversa

$$I_D \approx -I_S$$

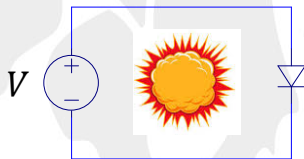
Donde  $I_S$  es la corriente de inversa de saturación, del orden de femtoamperios

$V_T = 25 \text{ mV} = \frac{KT}{q}$  es el potencial térmico y  $n$  un parámetro de fabricación

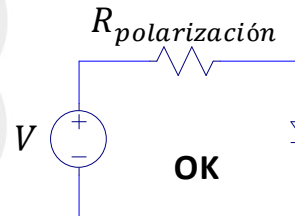
## Característica I / V del diodo



Por eso el diodo **NUNCA** se polariza así

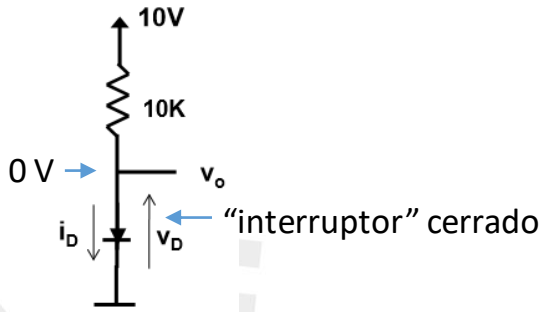


se polariza de esta forma



$$I_D = \frac{V - V_{D\ ON}}{R_{polarización}}$$

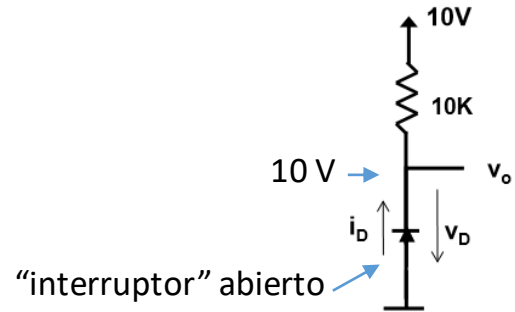
# Calcular tensión en directa y en inversa (problema 1)



- La corriente puede pasar por el diodo, al estar **polarizado en directa, ON** (la tensión en el lado p es superior a la de lado n)
- Si suponemos que no cae tensión en el diodo (diodo ideal), la corriente que pasará será

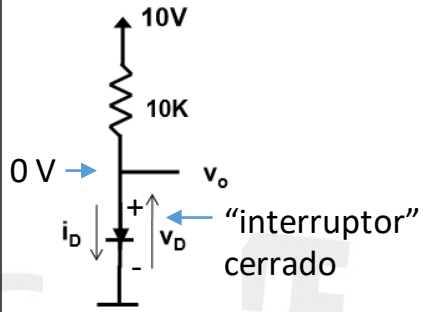
$$10 \text{ V} / 10\text{K} = 1 \text{ mA}$$

y la tensión de salida = 0 V



- Está **polarizado en inversa, OFF** (la tensión en el lado p es inferior a la de lado n)
- La corriente no puede pasar por el diodo, es como un interruptor abierto (se ve por inspección, la corriente no puede pasar del lado n al p)
- Si no pasa corriente, no cae tensión en la resistencia y la salida es 10 V (y comprobamos que todo cuadra, el lado n está a 10 V, el lado p a 0 V, luego está en inversa y no puede conducir

# Calcular tensión en directa y en inversa (problema 1)



**Si suponemos D ON**

$$i_D = \frac{10}{10} = 1\text{mA}, \quad v_o = 0 \quad \text{y comprobamos que } i_D > 0$$

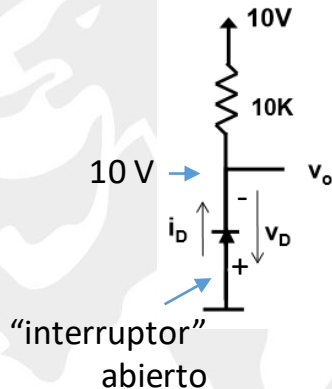
⇒ **Suposición correcta**

**Si suponemos D OFF**

$$i_D = 0, \quad v_o = 10\text{V} \quad \text{y comprobamos que no se cumple } v_D < 0$$

⇒ **Suposición incorrecta** ⇒ cambiar suposición y comenzar

Hay que comprobar que **ON** →  $i_D > 0, v_D = 0$  **OFF** →  $i_D = 0, v_D < 0$



**Si suponemos D OFF**

$$i_D = 0 \text{ mA}, \quad v_o = 10\text{V} \quad \text{y comprobamos que } v_D = -10 < 0$$

⇒ **Suposición correcta**

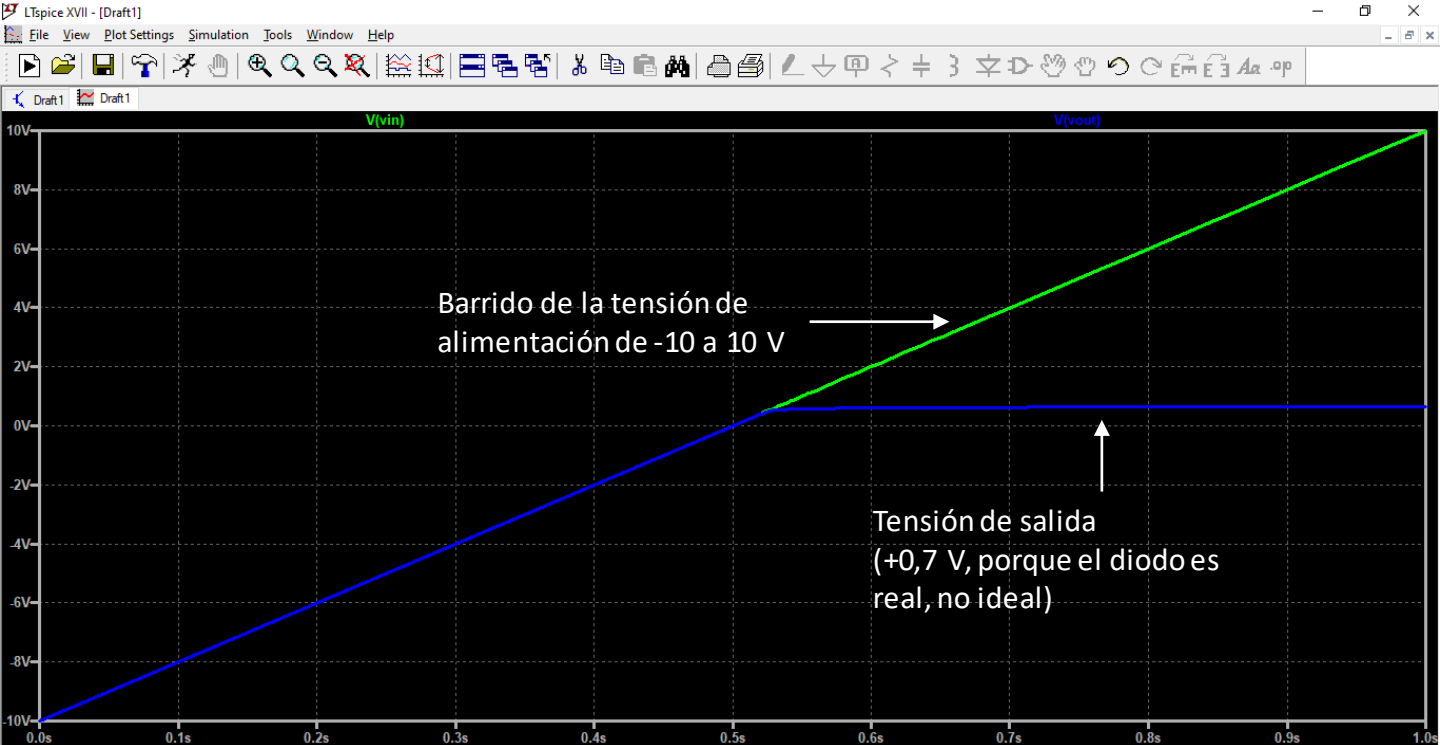
**Si suponemos D ON**

$$v_D = 0, \quad v_o = 0, \quad i_D = -1\text{mA} \quad \text{y comprobamos que no se cumple } i_D > 0$$

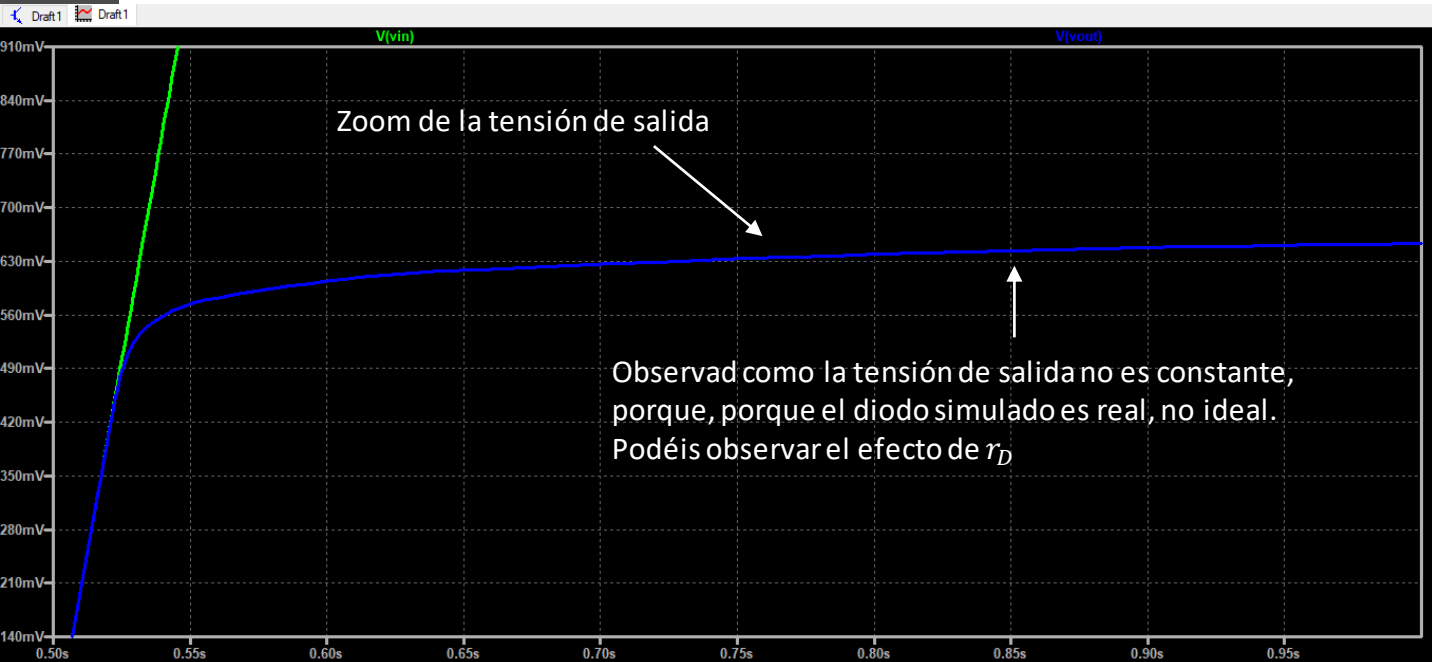
⇒ **Suposición incorrecta** ⇒ cambiar suposición y comenzar



# Comprobamos con una simulación que lo anterior es cierto (problema 1)

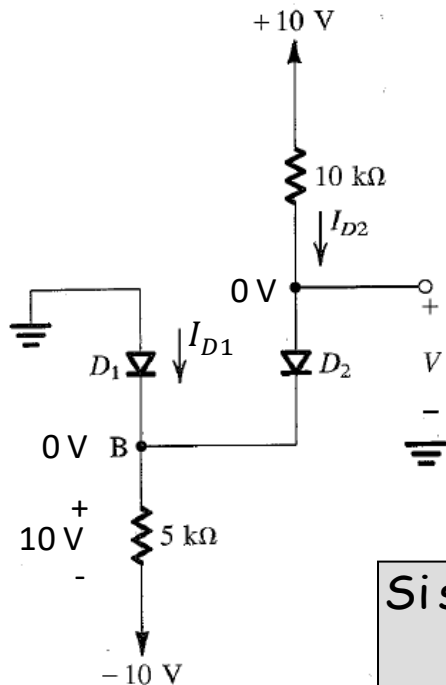


Comprobamos con una simulación que lo anterior es cierto (problema 1)



# Problema 2

Hay que comprobar que **ON**  $\rightarrow i_D > 0, v_D = 0$  **OFF**  $\rightarrow i_D = 0, v_D < 0$



corrientes y tensiones suponiendo D ON

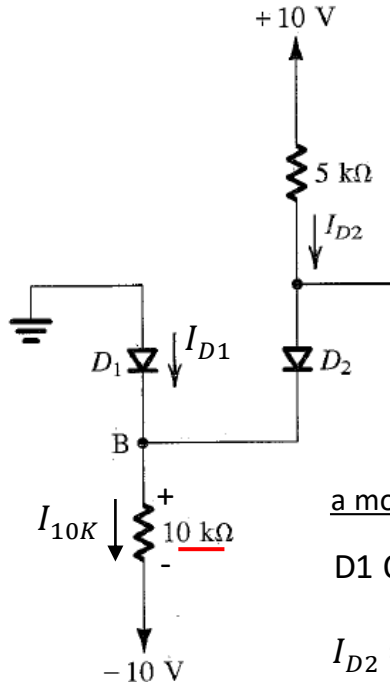
Si suponemos D1 ON y D2 ON ( $v_d = 0\text{ V}$ )

$$v = 0, I_{D2} = \frac{10\text{V}}{10\text{K}} = 1\text{mA}, I_{D1} = \frac{10\text{V}}{5\text{K}} - I_{D2} = 1\text{mA}$$

$I_{D1}, I_{D2} > 0 \Rightarrow$  suposición correcta

# Problema 2

Hay que comprobar que **ON**  $\rightarrow i_D > 0, v_D = 0$  **OFF**  $\rightarrow i_D = 0, v_D < 0$



Si suponemos D1 OFF y D2 ON

( $v_{D2} = 0V$ )

$$v = 10 - \frac{10 - (-10)}{5 + 10} 5 = 3,33V,$$

$$I_{D2} = \frac{10 - v}{5} = 1,33mA,$$

$$v_{D1} = 0 - v = -3,33V$$

$v_{D1} < 0, I_{D2} > 0 \Rightarrow$  **suposición correcta**

a modo de ejemplo, comprobemos que pasa si suponemos ambos ON

D1 ON, D2 ON  $\rightarrow v_{D1} = v_{D2} = 0V$ )

$$I_{D2} = \frac{10V}{5K} = 2mA$$

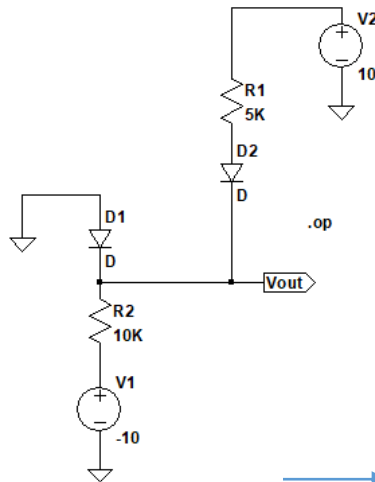
$$I_{10K} = \frac{10V}{10K} = 1mA$$

debe cumplir que  $I_{D1} + I_{D2} = I_{10K} \rightarrow I_{D1} = 1mA - 2mA = -1mA < 0$

luego nuestra suposición es incorrecta, D1 no puede estar ON

# Calcular tensiones de salida y corrientes (problema 2)

- Simulamos el segundo ejemplo y comprobamos con satisfacción que no hemos metido la pata



Las diferencias se deben a que la simulación considera diodos reales con 0,7 V de caída de tensión

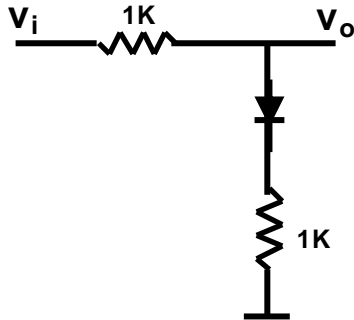
\* C:\Users\guinc\Documents\LTspiceXVII\examples\Educational\Draft2.asc

--- Operating Point ---

V(vout) :	2.89221	voltage
V(n002) :	3.5539	voltage
V(n001) :	10	voltage
V(n003) :	-10	voltage
I(D2) :	0.00128922	device_current
I(D1) :	-2.90221e-012	device_current
I(R2) :	0.00128922	device_current
I(R1) :	0.00128922	device_current
I(V2) :	-0.00128922	device_current
I(V1) :	0.00128922	device_current

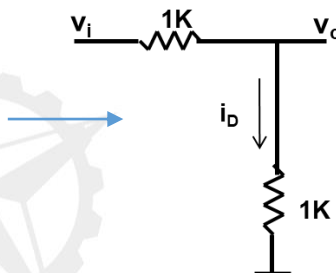
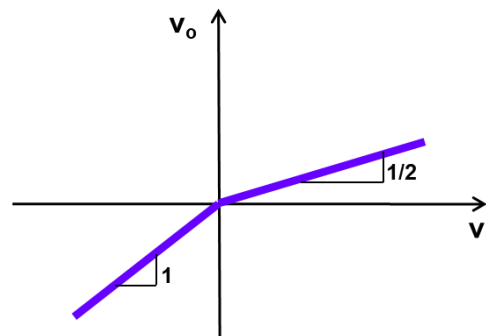
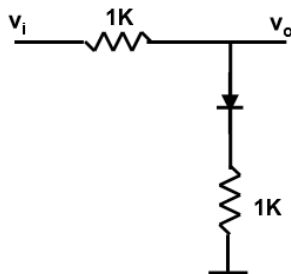
# Problema 3

- Calcular y representar la característica de transferencia  $V_o - V_i$  del siguiente circuito



# Problema 3

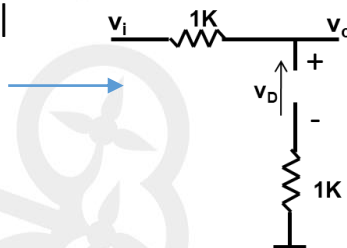
- Cuando  $V_i$  sea positiva el diodo conducirá y se formará un divisor resistivo, de modo que la salida será la mitad de la entrada
- Y cuando  $V_i$  sea negativa el diodo no conducirá, de modo que la salida será igual a la entrada (pues no pasa corriente por la resistencia y no hay caída de tensión)



**D ON** ( $v_d = 0 \text{ V}$ )

$$v_o = v_i \frac{1K}{1K + 1K} = \frac{v_i}{2}$$

$$i_D = \frac{v_i}{2 \cdot 1K} > 0 \rightarrow v_i > 0$$



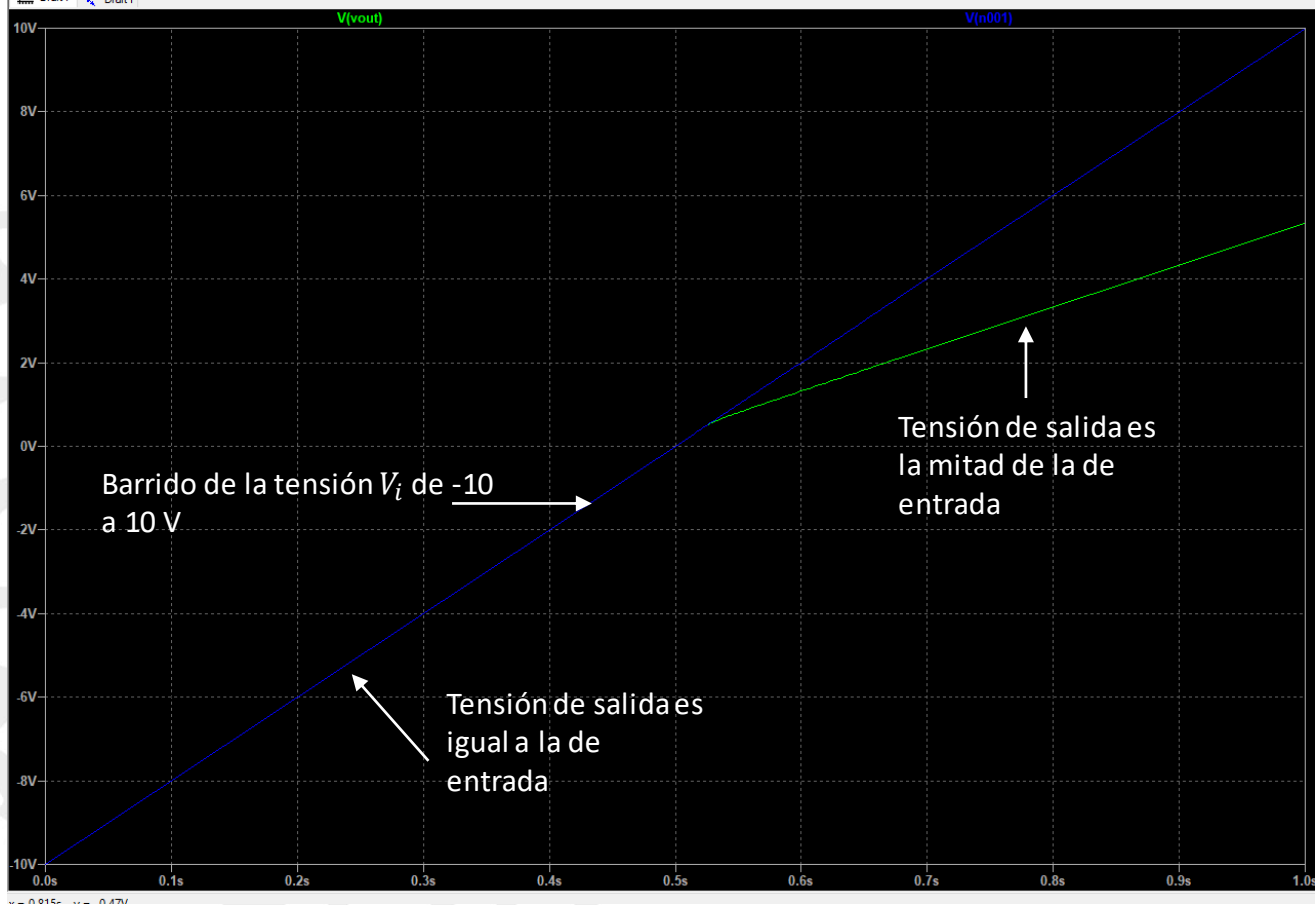
**D OFF** ( $i_d = 0 \text{ A}$ )

$$v_o = v_i$$

$$v_D = v_i < 0 \Rightarrow v_i < 0$$

Hay que comprobar que **ON**  $\rightarrow i_D > 0, v_D = 0$  **OFF**  $\rightarrow i_D = 0, v_D < 0$

# Característica de transferencia (problema 3)





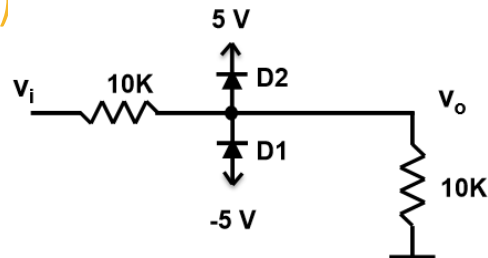
# Característica de transferencia de una protección de entrada(problema 4)

Nota: razonar estado diodos

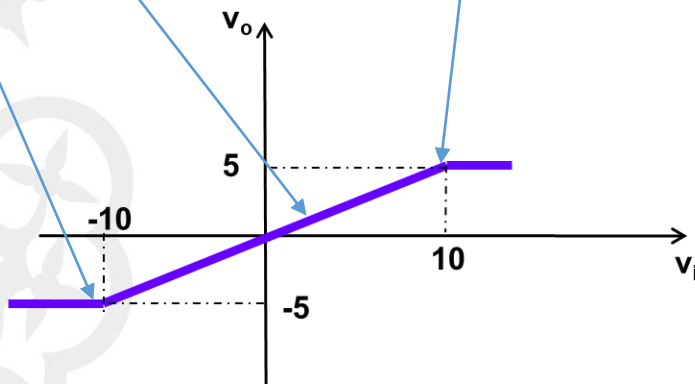
D1 y D2 para  $v_i \gg 0$

D1 y D2 para  $v_i \ll 0$

¿y para  $v_i = 0$ ?



- Mientras no entren en conducción los diodos, la tensión de salida es la mitad de la de entrada (por el divisor resistivo, es como si los diodos no estuvieran)
- Cuando  $V_i$  es 10 V, la tensión de salida alcanza los 5 V, el diodo D2 entra en conducción, derivando corriente por él y limitando la salida a 5 V
- Cuando  $V_i$  llega a  $-10$  V, la salida alcanza los  $-5$  V, entra en conducción D1, pasa corriente por él y limita la salida a  $-5$  V



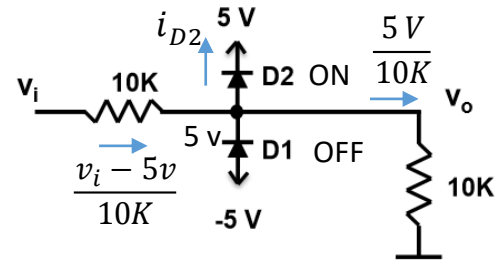
# Característica de transferencia de una protección de entrada(problema 4)

si  $v_i \gg 0 \rightarrow V_o \uparrow$

supongo D2 ON, D1 OFF  $\rightarrow V_o = 5V$

$$\frac{v_i - 5V}{10K} = \frac{5V}{10K} + i_{D2} \rightarrow i_{D2} = \frac{v_i - 10V}{10K} \rightarrow i_{D2} > 0 \text{ si } v_i > 10V$$

$$v_{D1} = -5V - (5V) = -10V \text{ luego } D1 \text{ OFF}$$

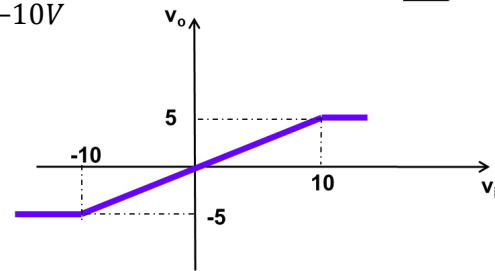
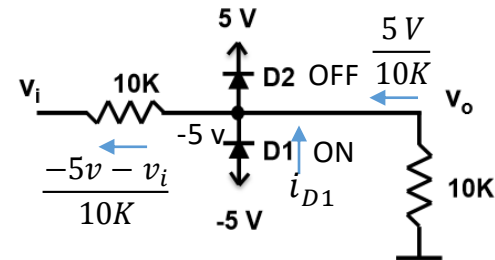


si  $v_i \ll 0 \rightarrow V_o \downarrow$

supongo D1 ON, D2 OFF  $\rightarrow V_o = -5V$

$$\frac{-5V - v_i}{10K} = \frac{5V}{10K} + i_{D1} \rightarrow i_{D1} = \frac{-v_i - 10V}{10K} \rightarrow i_{D1} > 0 \text{ si } v_i < -10V$$

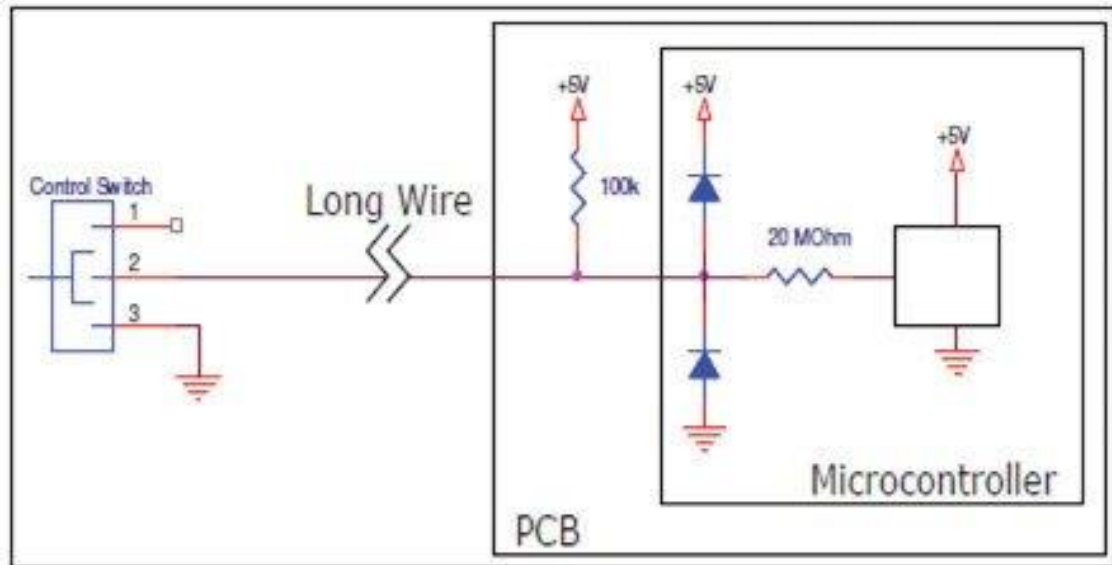
$$v_{D2} = -5V - (5V) = -10V \text{ luego } D2 \text{ OFF}$$



si  $v_i = 0 \rightarrow D1, D2 \text{ OFF}, V_o = \frac{v_i}{2} = 0 \quad v_{D1} = v_{D2} = -5V < 0$

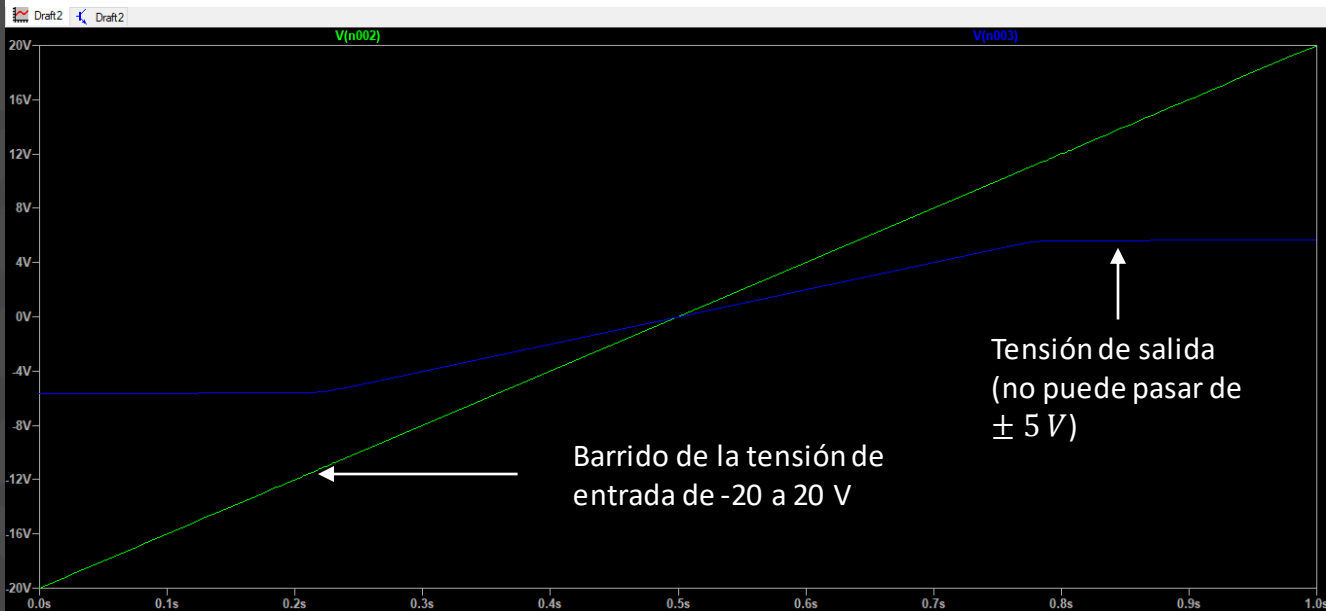
si  $-10 < v_i < 10V \rightarrow D1, D2 \text{ OFF}, V_o = \frac{v_i}{2} \quad v_{D1} = -\frac{v_i}{2} - 5 < 0, v_{D2} = \frac{v_i}{2} - 5 < 0$

## Característica de transferencia de una protección de entrada(problema 4)



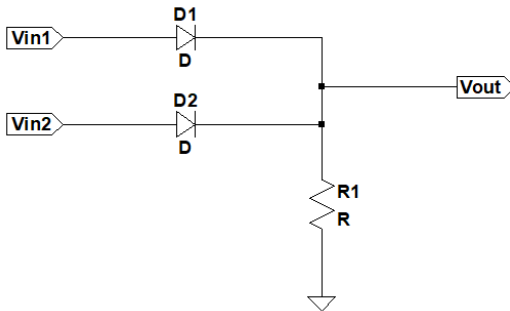
- Este tipo de esquema se emplea para proteger la entrada de un circuito integrado (IC), de modo que aunque se rebase la tensión correcta el circuito no se destruya. Se conoce como “diode clamping protection”, y se incluye dentro del IC para proteger entradas de alimentación y / o de señal

# Característica de transferencia (problema 4)



# Un ejemplo de uso del diodo

- La primera generación de lógica digital se basó en diodos (hace muuuucho que se abandonó, porque consume demasiado y es lenta), este es un ejemplo de una puerta OR (la salida de una puerta OR es un “1” lógico en el caso de que cualquiera de sus entradas se ponga a “1”, siendo un “1” una tensión positiva determinada, y un “0” una tensión de 0 V)



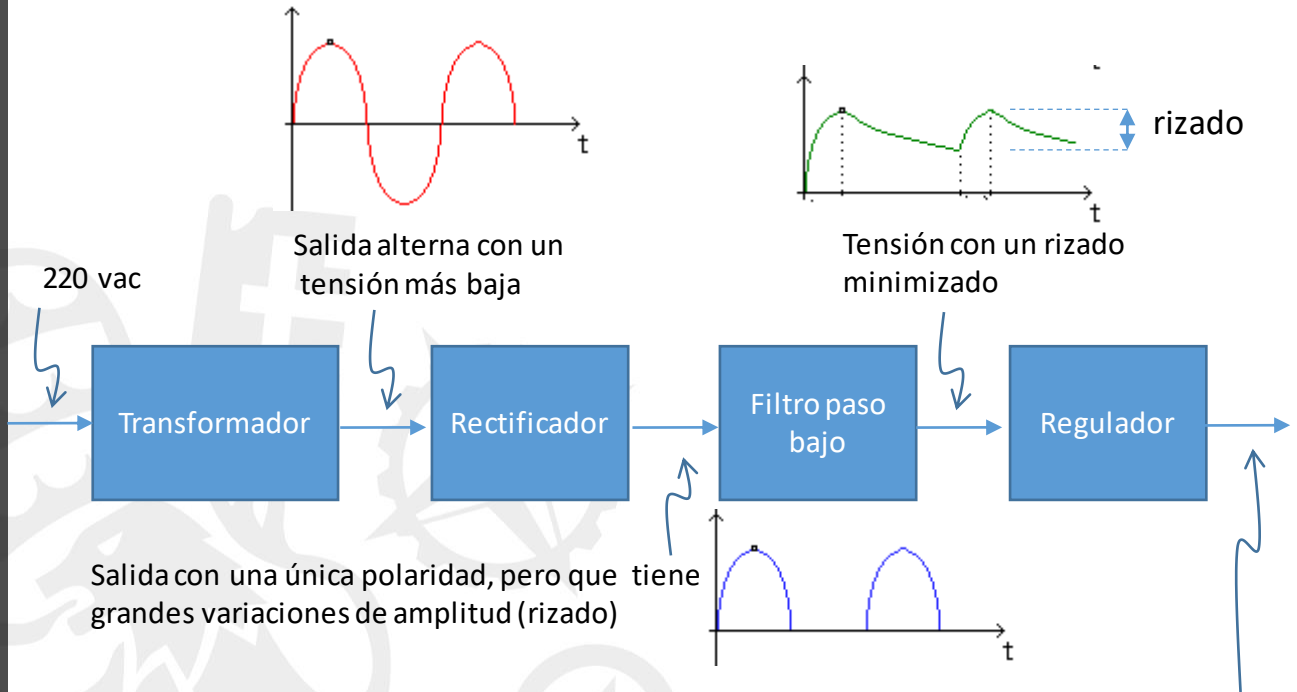
- Cuando las dos entradas están a 0 V los diodos no conducen, de modo que la salida está a 0 V
- Cuando cualquiera de las dos entradas está una tensión positiva (p.e. 5 V), el diodo correspondiente conduce y la salida también pasa a ser positiva
- Esto implementa la “tabla de verdad” de la puerta OR (lo veremos en el siguiente tema)

Vin 1	Vin 2	Vou t
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

# Uso del diodo para el diseño de rectificadores

- Un rectificador es un circuito que permite **convertir una señal alterna en una señal continua**
  - Un ejemplo típico es transformar la señal alterna de 220 v AC en una señal continua para la alimentación de un aparato
- Tendremos 2 tipos básicos:
  - De media onda, que aprovechan solo la excursión positiva de la señal alterna, son menos eficientes
  - De onda completa, aprovechan tanto la excursión positiva como la negativa de la señal alterna
- Una variante del rectificador es el detector de pico, con una estructura similar al rectificador de media onda, que permite detectar el valor máximo de una señal variable con el tiempo, para procesar este valor posteriormente

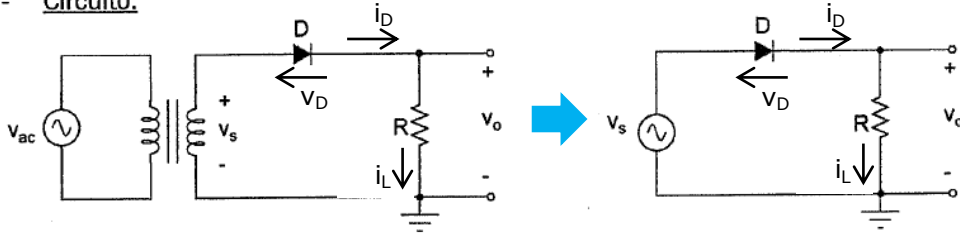
# Esquema básico de un rectificador



El regulador consigue que la fuente de tensión se acerca al ideal, con una resistencia de salida mínima, y con tensión de salida independiente de las variaciones de la tensión ac original, la temperatura, etc. (veremos un regulador sencillo, mediante diodo Zener)

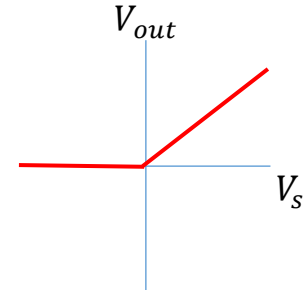
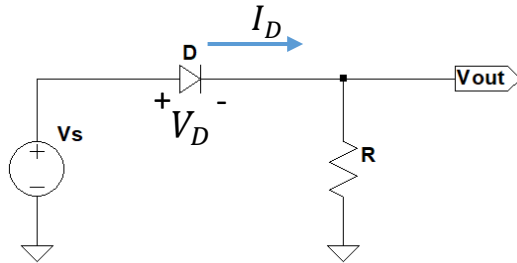
# Rectificador de media onda

- Circuito:



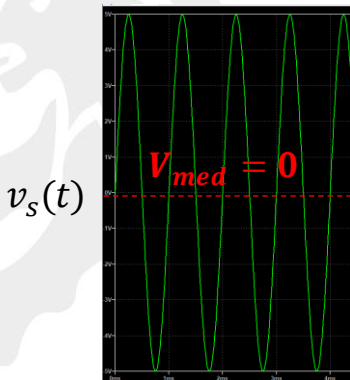


# Rectificador de media onda



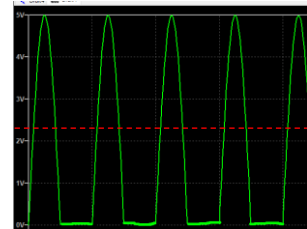
- Si suponemos que el diodo es ideal ( $v_D = V_{D\text{ ON}} = 0$  cuando conduce), si  $V_s > 0$  entonces D está en conducción (ON) y  $V_{out} = V_s$
- Y siendo ideal, cuando  $V_s < 0$  entonces D no conduce y  $V_{out} = 0$

$$v_s(t) = V_s \sin \omega t$$



$+V_s$

$$v_{out}(t) = V_s \sin \omega t \left( 0 < t < \frac{T}{2} \right), 0 \left( \frac{T}{2} < t < T \right)$$



$+V_s$

$V_{med} \neq 0$

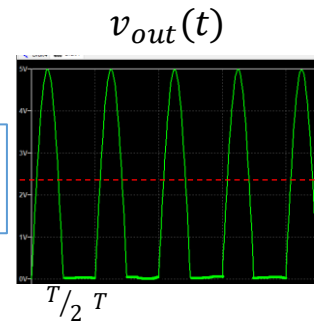
0

$-V_s$

Decir que esto es una señal DC resulta algo optimista... por eso hace falta un filtrado posterior

# Rectificador de media onda

$$V_{med} = \frac{V_s}{\pi}$$



- El valor **medio** de tensión de salida es

$$V_{out med} = \frac{1}{T} \int_0^T V_s \sen \omega t \, dt = \frac{V_s}{T} \int_0^{T/2} \sen \omega t \, dt = \frac{V_s}{\pi}$$

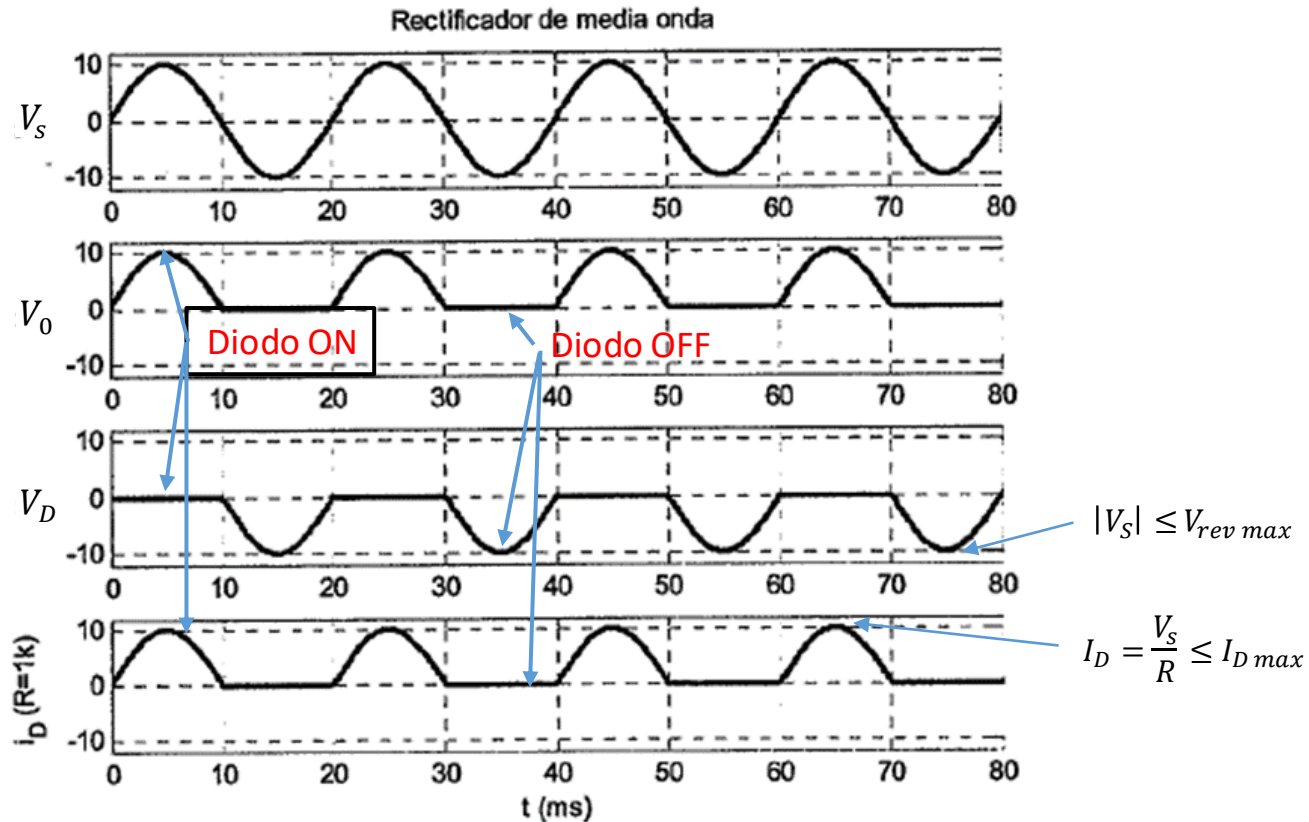
- Y el valor **eficaz** es

$$V_{out Ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (V_s \sen \omega t)^2 \, dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T/2} (V_s \sen \omega t)^2 \, dt} = \frac{V_s}{2}$$

(podéis comprobar que  $V_{out ef} \neq \frac{V_s}{\sqrt{2}}$  pues  $v_{out}(t)$  no es una onda sinusoidal completa)

- En cuanto a los parámetros que afectan a la seguridad del diodo (su no destrucción, hay que consultar el “data sheet” para no superarlos):
  - Tensión inversa máxima  $|V_s| \leq V_{rev max}$
  - Corriente máxima por el diodo  $I_D = \frac{V_s}{R} \leq I_{D max}$

# Rectificador de media onda

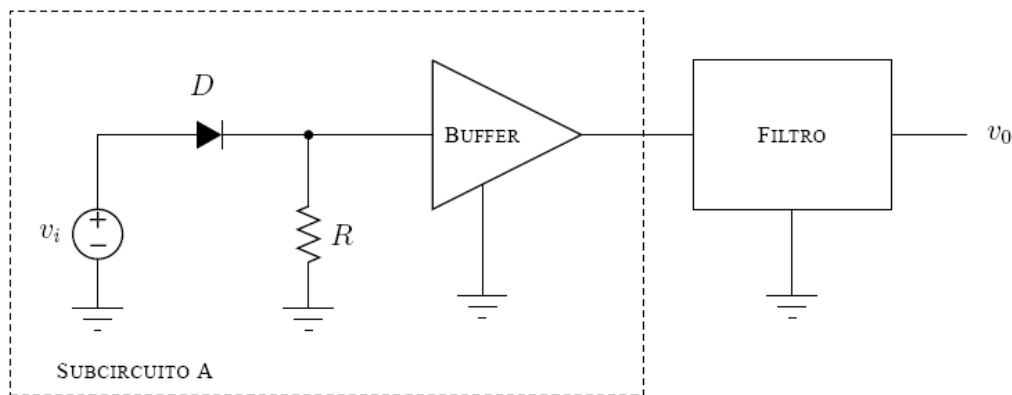


# Problema 5

El objetivo del circuito de la figura es conseguir una tensión de salida  $v_0$  constante, proporcional a la amplitud de la señal senoidal de entrada. Consta de un rectificador, un BUFFER y un filtro. El *buffer* es un **amplificador de tensión** ideal de ganancia unidad.

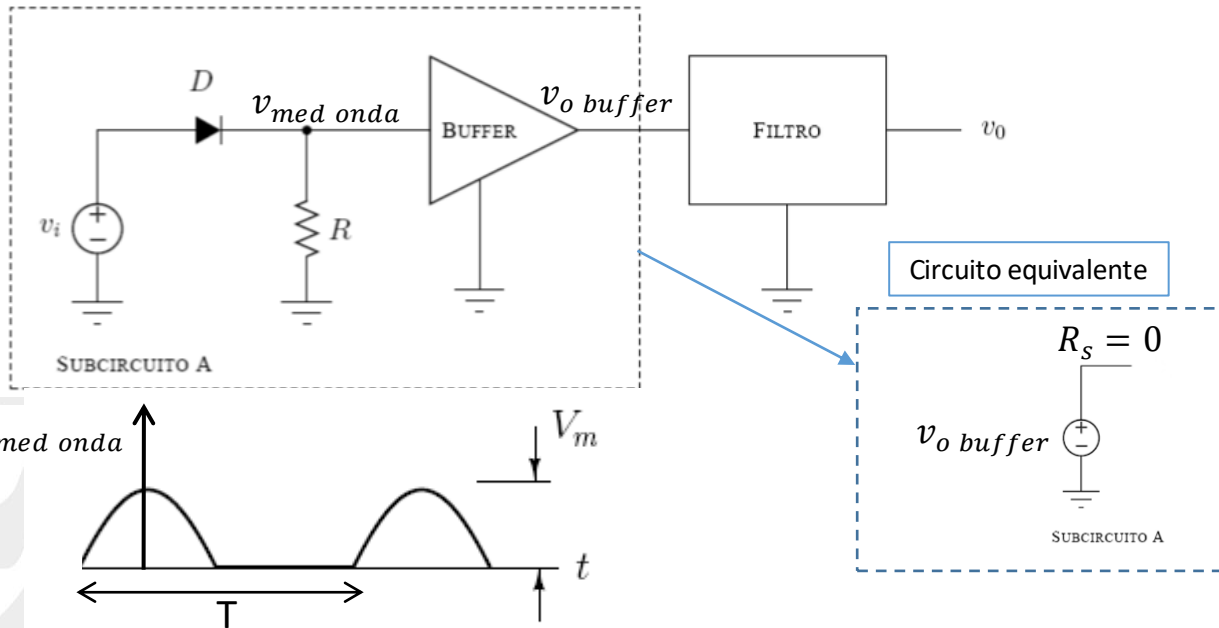
Suponga que  $v_i(t) = V_m \cos \omega t$

1. Dibuje la señal de entrada al *buffer*.
2. Dibuje un circuito equivalente para el SUBCIRCUITO A.
3. Diseñe un filtro RC para que la señal de salida sea constante. ¿Qué valor tiene  $v_0$ ?
4. Diseñe un circuito *buffer* usando un amplificador operacional.



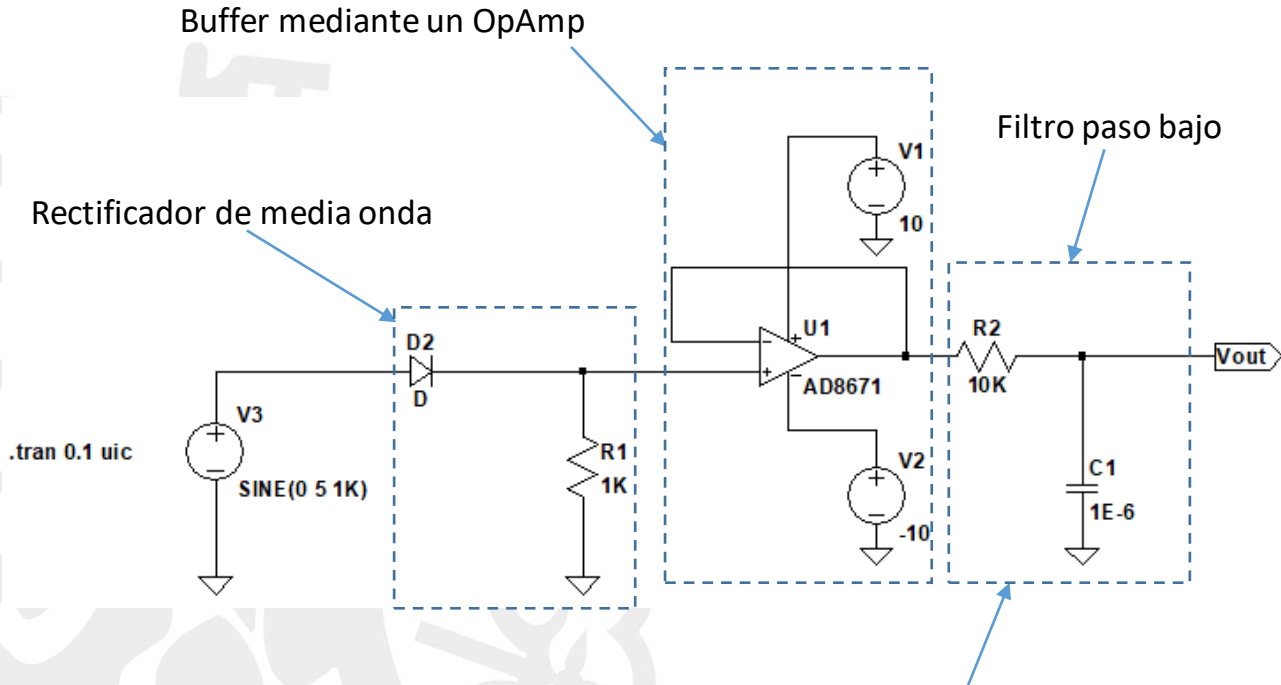
## Ejemplo de rectificador de media onda (problema 5)

- Rectificador de media onda seguido de un filtro paso bajo para minimizar el rizado de la salida ( $v_o$  consta de una componente DC y parte de la señal alterna que no ha eliminado el filtro, esto último es el **rizado**)
- El buffer intermedio sirve para adaptar la resistencia de salida del rectificador de media onda a la resistencia de entrada del filtro (que no se afecten)



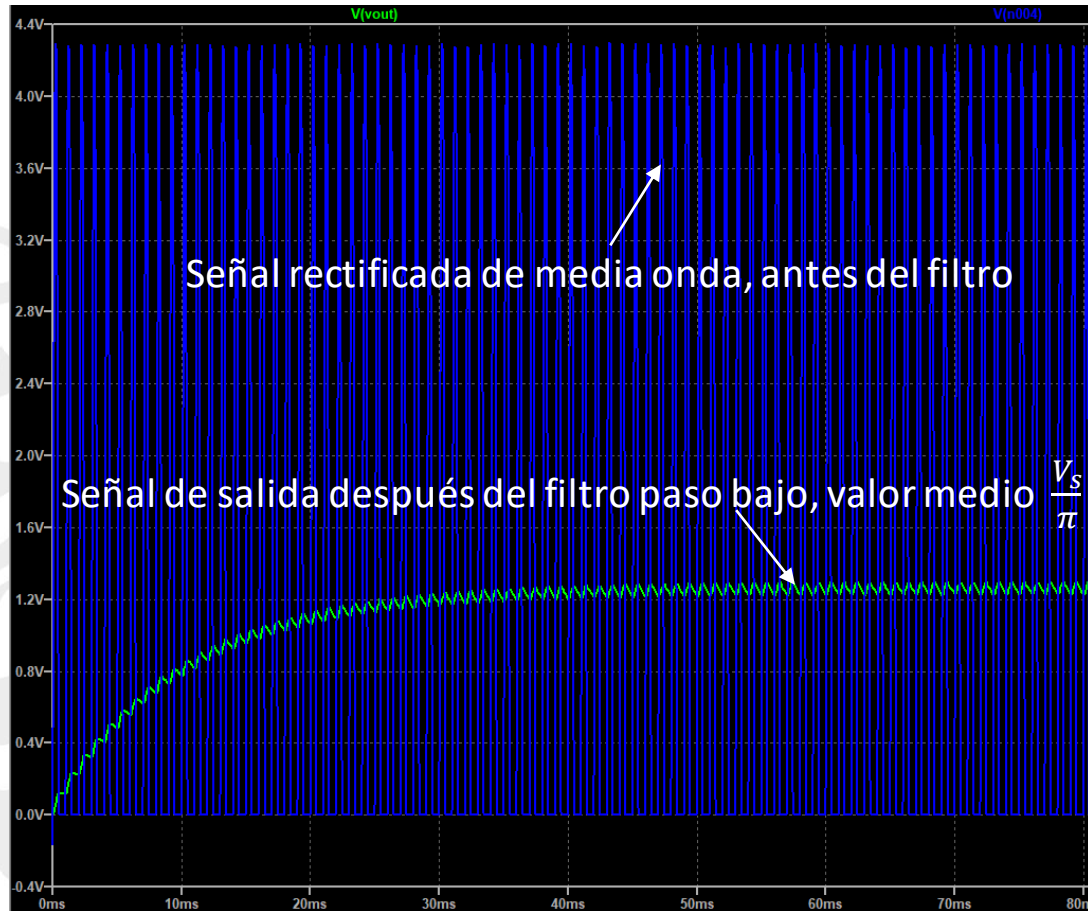
$$v_{med\ onda} = v_o\ buffer(t) = V_M \cos \omega t \left( 0 < t < \frac{T}{2} \right), 0 \left( \frac{T}{2} < t < T \right)$$

# Ejemplo de rectificador de media onda (problema 5)



la frecuencia de corte  $f_0$  debe ser mucho menor que la  $f$  de la señal a rectificar (filtrar)

# Señal antes y después del filtro

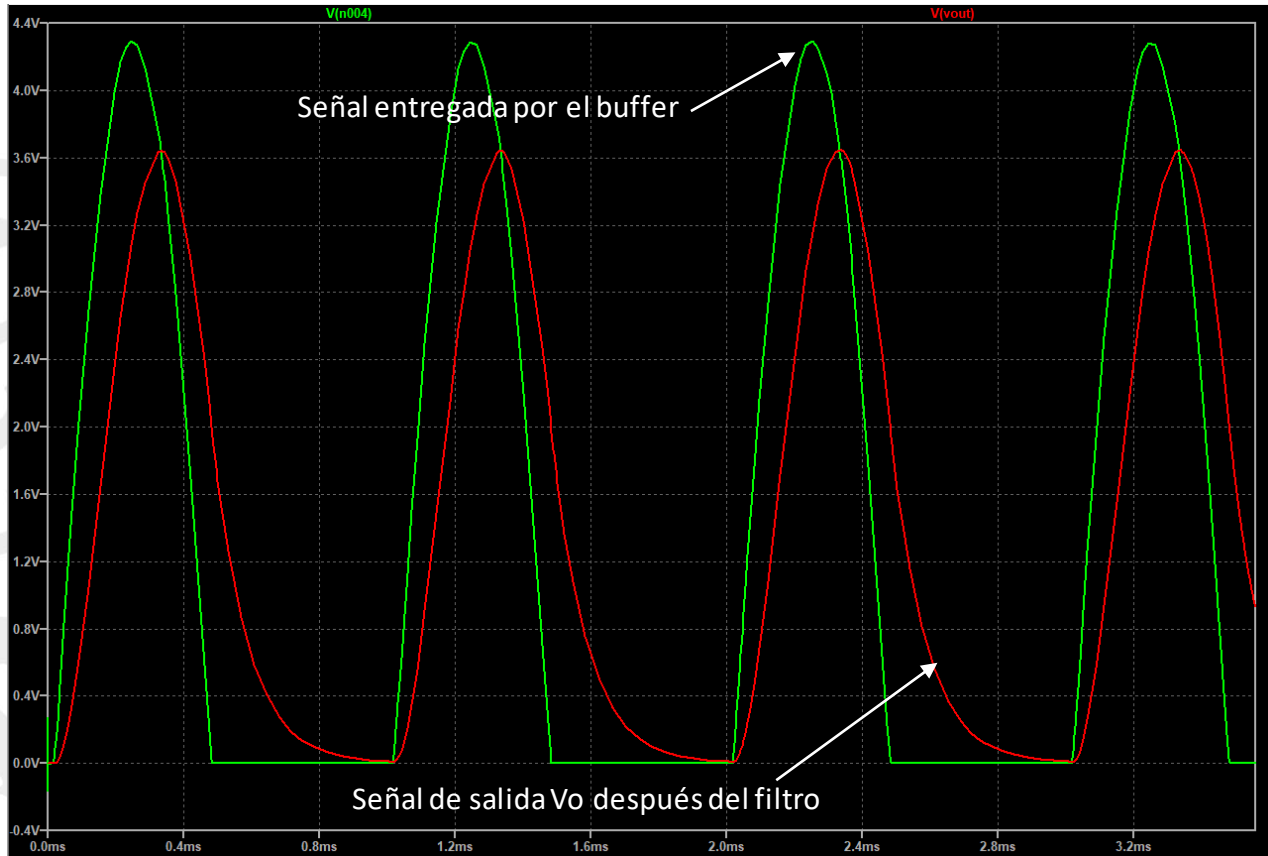


# Rizado de la tensión de salida

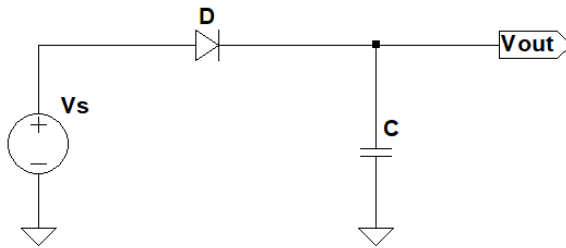




Y si diseñamos con un RC que no filtra lo suficiente,  $f_0$  no  $\ll f$ , (p.e.  $R=10K$   $C=10$  nF), las cosas van mal

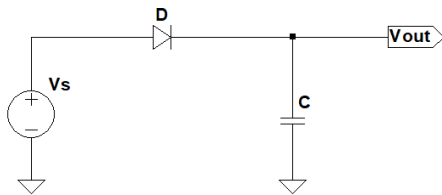


# Rectificador de media onda solo con condensador (también conocido como DETECTOR DE PICO)



Este ejemplo es útil para ir avanzando en la comprensión del rectificador con filtrado, pero no es del todo realista, pues no tiene en cuenta el efecto de la carga resistiva que se conectará a su salida (a no ser que tras  $V_{out}$  coloquemos un buffer con  $R_{in} \rightarrow \infty$ )

- Esta es la teoría para avanzar poco a poco en el concepto del rectificador con filtrado. La realidad será otra, pues el condensador se descargará por la resistencia de carga que haya, y por la corriente inversa del diodo si es real (y lo es...)
- También nos servirá para hacer un **detector de pico**, si la carga resistiva que viene después es muy elevada (p.e. un buffer)



Comencemos con C descargado y  $V_{out}$  es 0 V. Cuando  $V_s$  es positiva el diodo conduce y carga al condensador, y si es un diodo ideal la tensión del condensador será la misma que la de  $V_s$

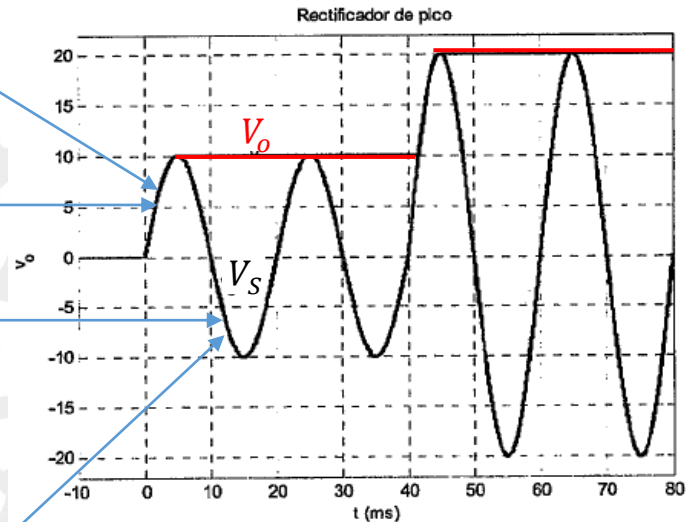
**Análisis** (suponiendo diodo ideal)

$$\text{D ON} \begin{cases} v_o = v_s \\ i_D = C \frac{dv_o}{dt} \geq 0 \Rightarrow \frac{dv_o}{dt} \geq 0 \end{cases}$$

$$\text{D OFF} \begin{cases} v_o = Cte = V_{s-max} \\ v_D = v_s - v_o = v_s - V_{s-max} \Rightarrow v_s < V_{s-max} \end{cases}$$

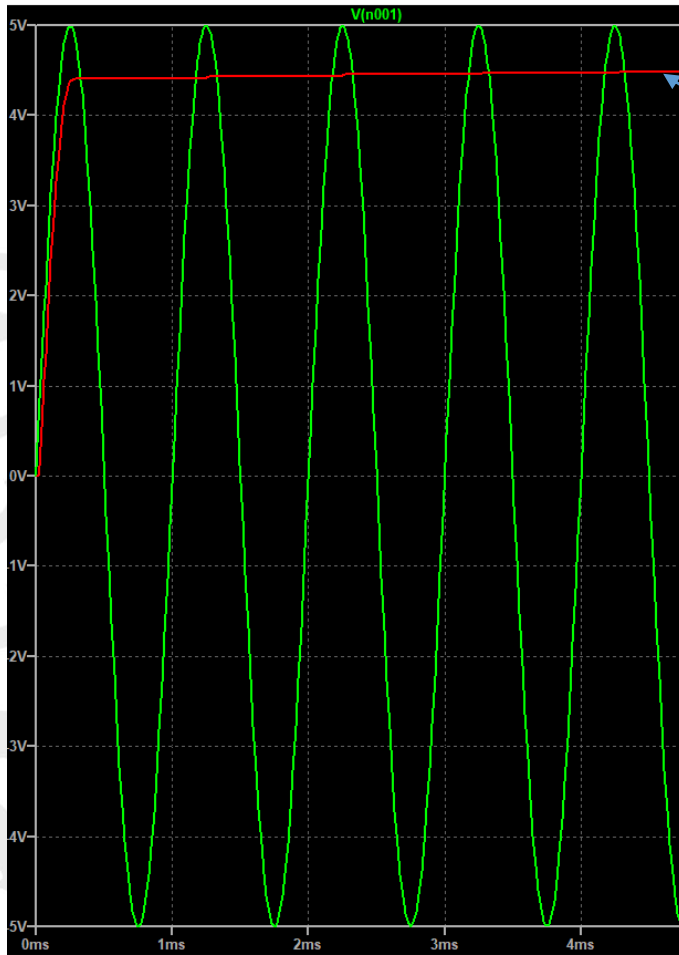
Memoriza la máxima  $v_o$

Funciona como un **detector de pico**



Si  $V_s$  decrece, el diodo quedará en inversa, e idealmente no habrá ningún camino para que el condensador se descargue, de modo que retendrá la tensión de  $V_s$  que haya almacenado hasta entonces → **Detector de Pico**

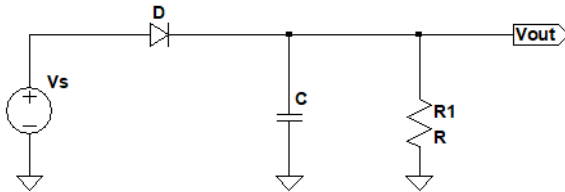
# Rectificador de media onda solo con condensador



Salida que **retiene el valor de pico**

Simulación levemente más realista (tiene en cuenta la caída de tensión en el diodo y su corriente inversa)

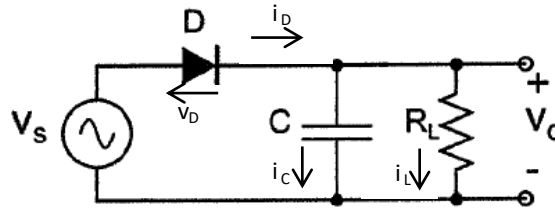
# Rectificador de media onda con condensador y resistencia



- Circuito ya realista, pues tiene en cuenta el efecto de la carga resistiva que se conectará a la salida

- De nuevo, comencemos con el condensador descargado y tensión de salida 0. Cuando  $V_s$  es positiva el diodo conduce y carga al condensador, y si es un diodo ideal la tensión del condensador será la misma que la de  $V_s$
- Si  $V_s$  decrece, el diodo quedará en inversa, pero hay un camino para que el condensador se descargue, la resistencia de carga, de modo que retendrá la tensión de  $V_s$  que haya almacenado hasta entonces pero irá cayendo con el tiempo

# Rectificador media onda con condensador y resistencia



Análisis (suponiendo diodo ideal):

- Si  $C$  inicialmente descargado, al aplicar senoidal  $\Rightarrow$  D ON cargando  $C$  y alimentando a  $R_L$
- Al alcanzar la tensión máxima,  $\frac{dv_o}{dt} = 0$ ,  $i_C = C \frac{dv_o}{dt} = 0$ : D sigue ON suministrando  $i_L = \frac{v_o}{R_L}$
- Cuando  $v_s$  comienza a decrecer,  $i_C$  se hace negativa aunque DON ya que :

$$i_L > 0, \text{ y además } i_D = i_C + i_L = C \frac{dv_o}{dt} + \frac{v_o}{R_L} > 0 \text{ pues } \frac{V_o}{R_L} > |i_C|$$

- En algún momento  $i_D = i_C + i_L = 0 \Rightarrow \frac{dv_o}{dt} = -\frac{v_o}{R_L C}$  y entonces D OFF

- Con D OFF, descarga exponencial de  $C$  sobre  $R_L$  mientras se cumpla  $v_D = v_s - v_o < 0$
- Cuando la exponencial cruza la senoidal de entrada  $v_D = 0$  con tendencia a hacerse positiva, y DON
- Si  $\tau \gg T$  (periodo de  $v_s$ ) el condensador casi no se descarga, y D pasa a OFF para  $v_s \approx \hat{v}_s$  durante casi todo  $T$

# Rectificador de media onda con condensador y R



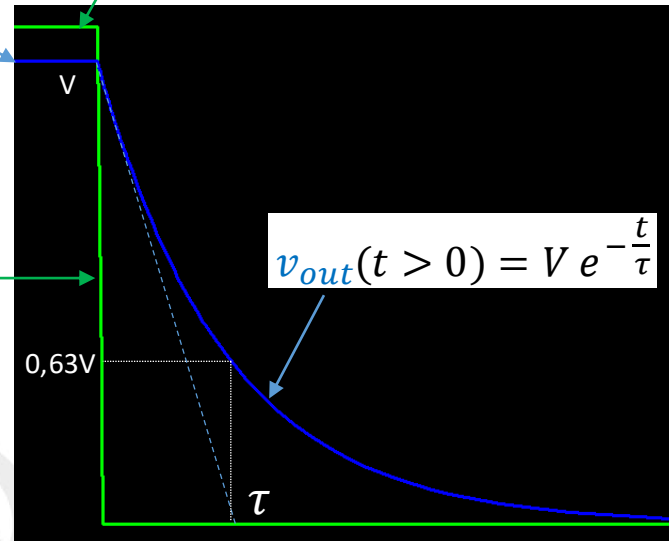
*Tensión de rizado*

Tensión de salida, se puede observar como cae la tensión de salida cuando la tensión de entrada desciende desde su valor de pico, porque el condensador se descarga por la resistencia

# Rectificador de media onda con condensador y R

Este comportamiento es el esperable, pues a fin de cuentas se trata de un circuito RC. Cuando es sometido a un **pulso de bajada**, lo que obtenemos es **esto a la salida**

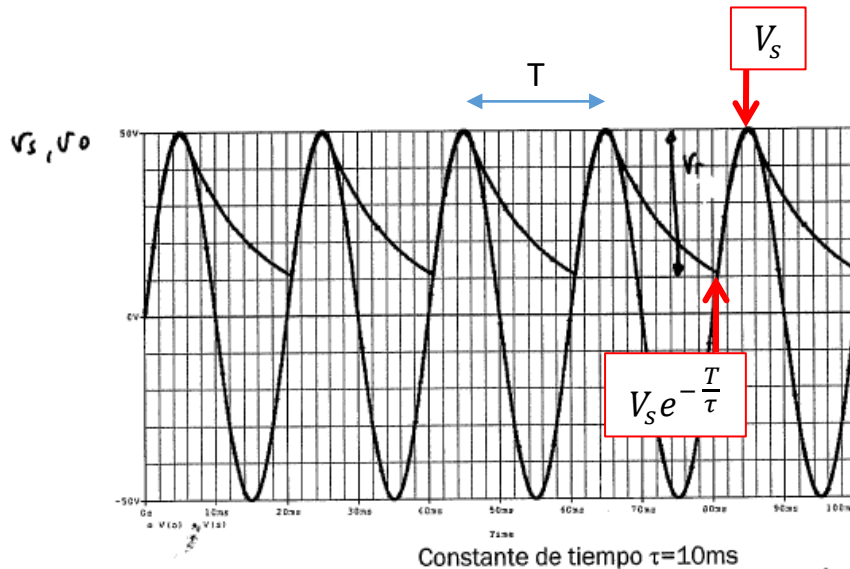
$$\left. \begin{aligned} v_s(t) &= V \text{ para } t < 0 \\ v_s(t) &= 0 \text{ para } t > 0 \end{aligned} \right\}$$



donde  $\tau = RC$  (constante de tiempo)



# Rectificador de media onda con condensador y R



$$V_{\text{rizado}} \cong V_s \frac{T}{\tau}$$

(si  $\tau \gg T$ )

La tensión de rizado es una tensión pico-pico

Calculamos el **rizado** como la **diferencia de tensión** desde el máximo ( $V_s$  o  $V_s - 0,7V$ ) hasta el mínimo (cuando ha pasado un periodo  $\cong T$ )

$$V_{\text{rizado}} = V_s - V_s e^{-\frac{T}{\tau}} \quad \text{y si } \frac{T}{\tau} \rightarrow 0 \text{ entonces } V_{\text{rizado}} \cong V_s \left(1 - \left(1 + \left(-\frac{T}{\tau}\right)\right)\right) = V_s \frac{T}{\tau}$$

( $\tau \gg T$ )

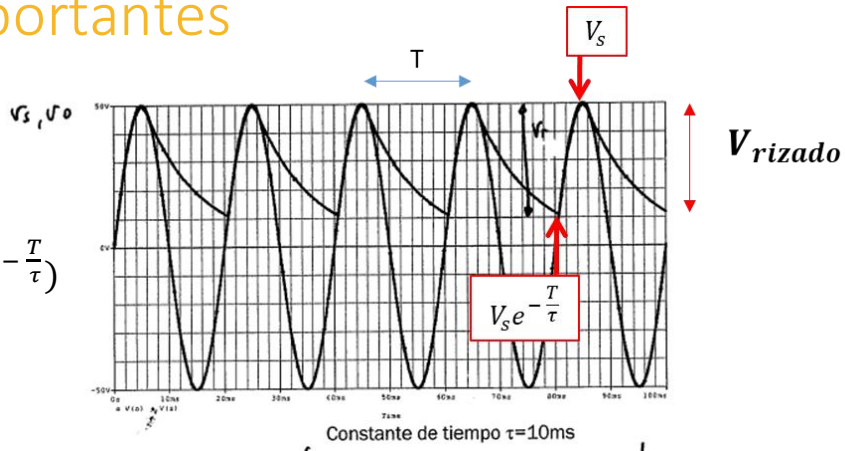
(recordemos que  $e^x$  (para  $x \rightarrow 0$ )  $\approx 1 + x$ )

solo si  $\tau \gg T$

# Comentarios importantes

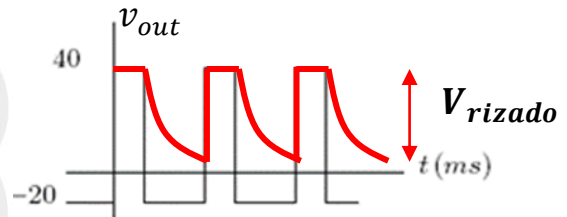
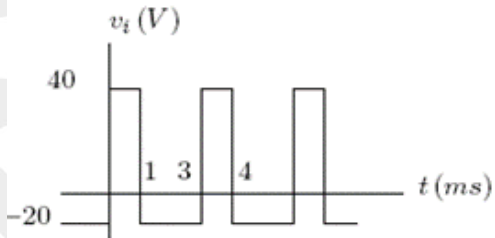
$v_s$  sinusoidal

en general  $V_{rizado} = V_s(1 - e^{-\frac{T}{\tau}})$   
 solo si  $\tau \gg T \rightarrow V_{rizado} \cong V_s \frac{T}{\tau}$



$v_s$  cualquiera (p.e. cuadrada)

Calculamos el **rizado** como la **diferencia de tensión** desde el máximo ( $V_s$  o  $V_s - 0,7V$ ) hasta el mínimo (**durante el tiempo que el diodo está OFF**, en este ejemplo 3 ms – 1 ms)



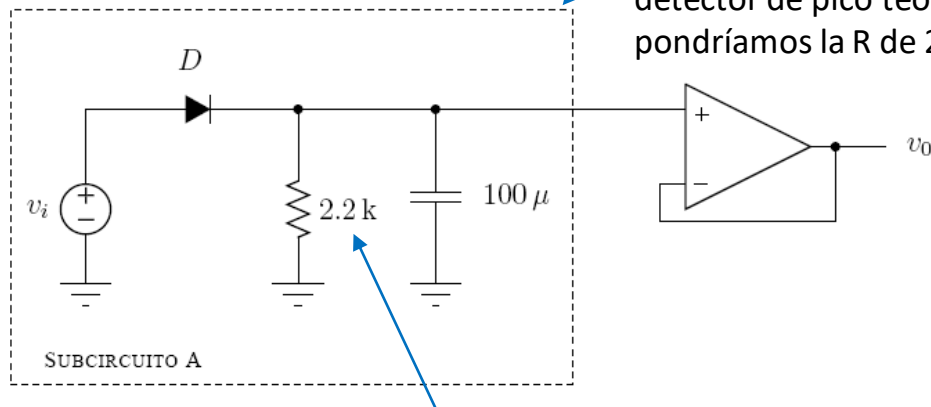
$$V_{rizado} = V_s - V_s e^{-\frac{3ms - 1ms}{\tau}}$$

# Problema 6

La figura muestra una forma más sencilla de diseñar un DETECTOR. El SUBCIRCUITO A es un **detector de pico**.

Si  $v_i(t) = 10 \cos 200\pi t$  voltios,

1. Dibuje la señal de entrada al *buffer*, señalando las cotas relevantes. ¿Qué rizado tiene esta señal? Suponga que el diodo es ideal.
2. ¿Qué cambios espera si el diodo es real?
3. ¿Qué misión tiene el *buffer*?



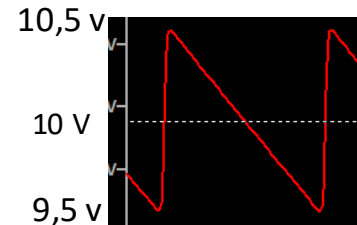
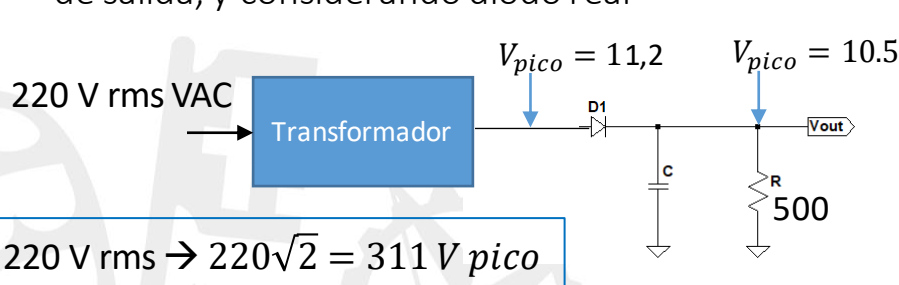
Para ser exactos, esto es un rectificador de media onda con condensador y resistencia, en el detector de pico teórico no pondríamos la R de 2K2

Comentario para el laboratorio: Esta R hace falta para *polarizar* el operacional



## Diseño de rectificador de media onda (problema 7)

- Diseño de un rectificador de media onda con filtro capacitivo, con una entrada de 220 V rms 50 Hz para alimentar una carga de  $500 \Omega$  y tensión **media** de salida de 10 V, tensión de rizado inferior al 10 % de la tensión de salida, y considerando diodo real



Ahora **calculamos para atrás, de la salida a la entrada**

Si  $V_{out med} = 10 \text{ V}$  y teniendo el rizado del 10% (1V), la tensión de salida de pico debe ser 10,5 V

A esto le añadimos 0,7 V de caída en el diodo, de modo que la salida del transformador la tensión de pico será aprox. 11,2 V

Por lo tanto, la relación del transformador debe ser  $\frac{N_2}{N_1} = \frac{11,2}{311}$

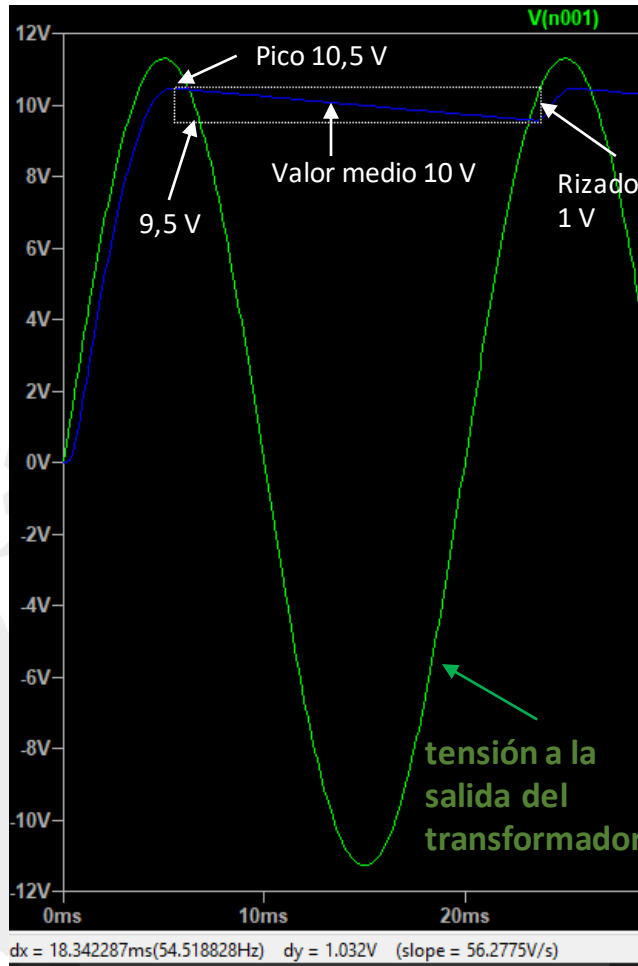
Y ahora calculamos el condensador, que debe dar un rizado de 1 V

$$V_{rizado} = 1 \text{ V} = V_{out pico} \frac{T}{RC} = 10,5 \text{ V} \frac{0,02 \text{ s}}{500 \Omega C} \rightarrow C = 420 \mu F$$

Ojo, 10,5 voltios (tensión de pico), no 10 voltios (tensión media)

## Diseño de rectificador de media onda (problema 7)

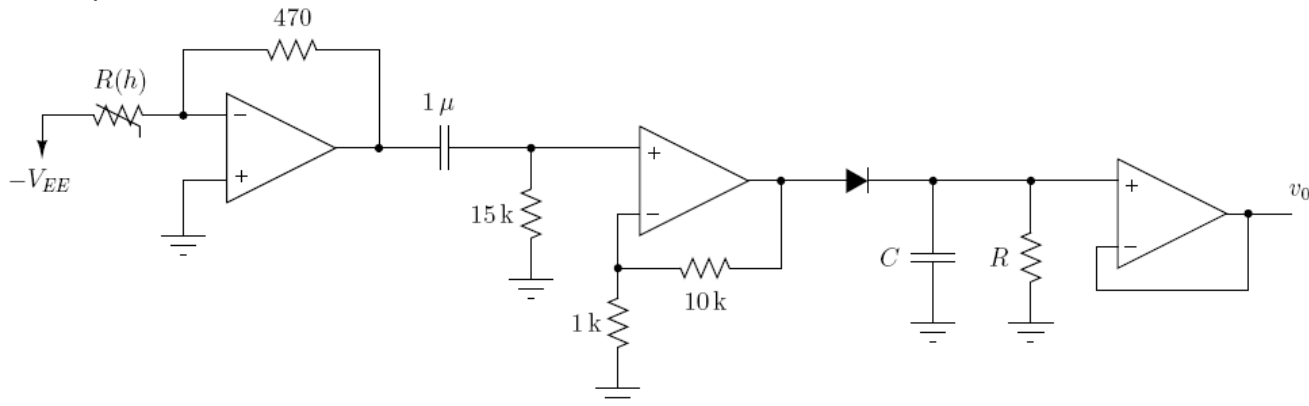
Lo simulamos y de nuevo parece que las fórmulas no nos engañan



$V_{out}$

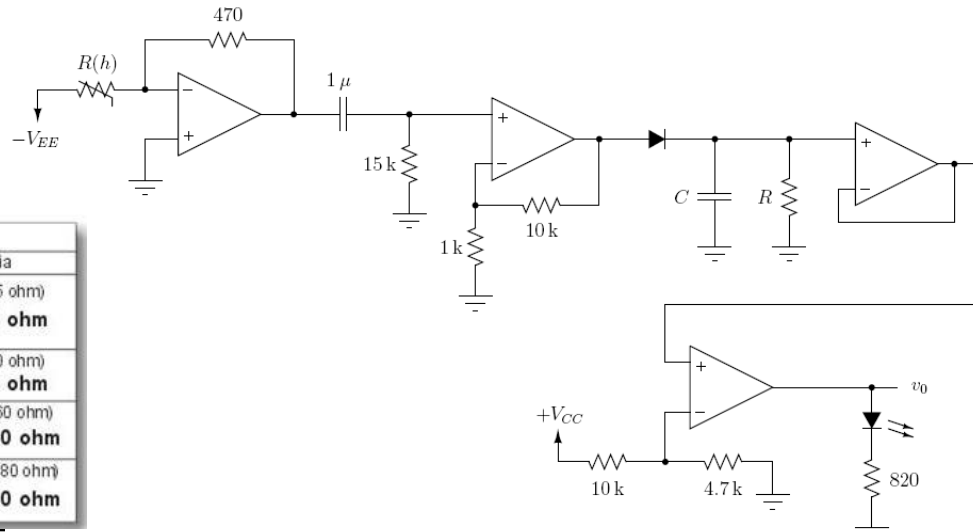
# Problema 8

- La figura muestra un circuito para detectar la componente artificial de la luz en una habitación (emitida por una bombilla de incandescencia, y suponiendo que la luz emitida es proporcional a su potencia). Los operacionales están alimentados a  $\pm 15\text{V}$ . El sensor  $R(h) = \alpha/h$  (con  $\alpha = 10^4 \Omega \cdot \text{fc}$ ) corresponde al analizado en problemas anteriores.
- Suponga que la **intensidad luminosa natural es 9fc**, que **la artificial tiene un valor medio de 1fc**, que  $V_{EE} = 15\text{V}$ , y que el **diodo es ideal**.
  - Determine el espectro de la señal luminosa (compuesta por la parte natural y por la parte artificial).
  - Dibuje el diagrama de bloques del circuito. Explique la función de cada etapa. Calcule unos valores de RC adecuados para un rizado de 0,1V.
  - Determine la sensibilidad del circuito.
  - Supuesto que en el diodo en conducción caen 0,7V, ¿qué intensidad luminosa artificial puede detectar el circuito?



# Problema 9

- Al circuito del problema 8 se le ha conectado un comparador a la salida. El objetivo es que el LED se ilumine cuando la intensidad luminosa artificial supere un cierto umbral.
- Suponga que el LED tiene las siguientes características: potencia máxima 80mW, corriente máxima 30mA, tensión directa 2V para 20mA.
- El operacional está alimentado a  $\pm 15V$  y su máxima corriente de salida es  $\pm 25mA$ .
  - Dibujar la tensión de salida  $v_o$
  - ¿Para qué mínima intensidad luminosa se ilumina el LED?
  - ¿Qué cambios se pueden hacer para modificar ese mínimo?
  - A simple vista ¿se puede simplificar el circuito?



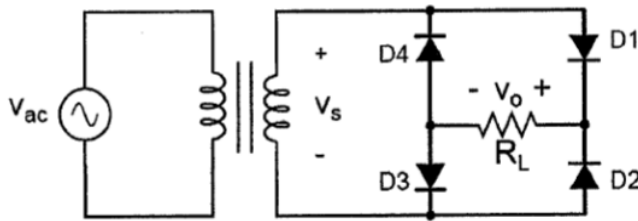
## LED

Alimentación: 12V

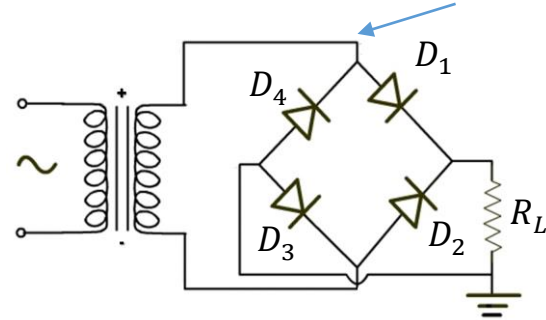
tipo de led	Vled	corriente	resistencia
azul / blanco alta luminosidad	3,7V	20 mA	(calculado: 415 ohm) <b>390 ohm</b>
rojo alta luminosidad	1,2V	20 mA	(calculado: 540 ohm) <b>560 ohm</b>
rojo tipo indicatore	1,2V	5 mA	(calculado: 2160 ohm) <b>2200 ohm</b>
verde / amarillo tipo indicatore	1,6V	5 mA	(calculado: 2080 ohm) <b>2200 ohm</b>



# Rectificador en puente (onda completa)

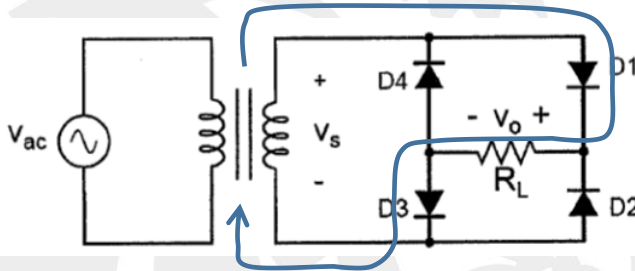


Muchas veces se representa así

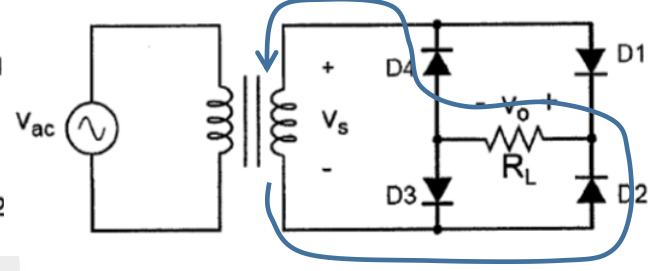


El rectificador en puente es un rectificador de onda completa, pues tanto cuando  $V_s$  es positiva como cuando es negativa, hay un camino de conducción por los diodos y por  $R_L$

Cuando  $V_s$  es positiva, conducen  $D_1$  y  $D_3$



Cuando  $V_s$  es negativa, conducen  $D_2$  y  $D_4$



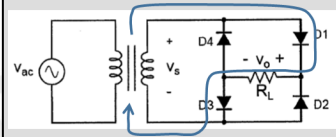


# Rectificador en puente (onda completa)

Análisis (suponiendo diodo ideal):

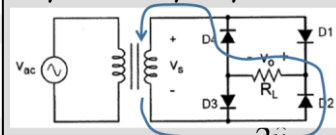
D1,D3 ON, D2,D4 OFF

$$\begin{cases} v_o = v_s \\ i_{D1} = i_{D3} = \frac{v_o}{R_L} = \frac{v_s}{R_L} \geq 0 \Rightarrow v_s \geq 0 \\ v_{D2} = v_{D4} = -v_s < 0 \Rightarrow v_s > 0 \end{cases}$$



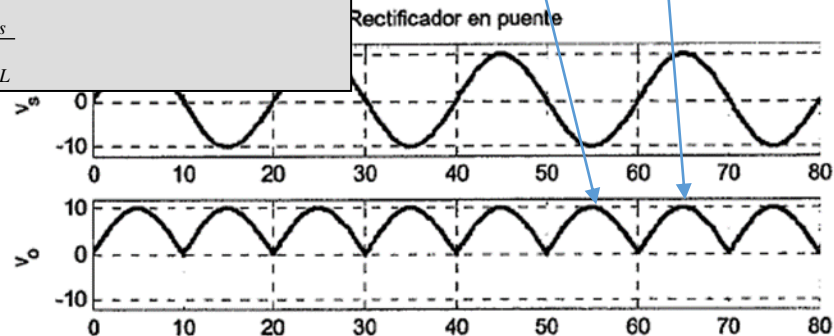
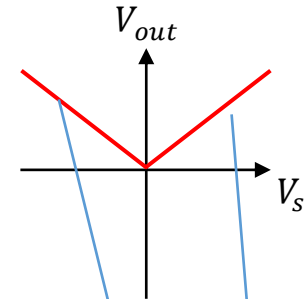
D1,D3 OFF, D2,D4 ON

$$\begin{cases} v_o = -v_s \\ v_{D1} = v_{D3} = -v_o = v_s < 0 \Rightarrow v_s < 0 \\ i_{D2} = i_{D4} = \frac{v_o}{R_L} = \frac{-v_s}{R_L} > 0 \Rightarrow v_s < 0 \end{cases}$$



Portanto:  $\langle v_o \rangle = \frac{2\hat{v}_s}{\pi}$ ,  $\langle i_L \rangle = \frac{2\hat{v}_s}{\pi R_L}$

Función de transferencia (ideal, sin caídas en los diodos)



NOTA: Cuando los diodos sean NO ideales, la tensión de pico de  $V_{out}$  será la de pico de  $V_s$  menos  $2 \times 0,7 \text{ V}$

# Rectificador en puente (onda completa)

- El valor medio de tensión de salida (tensión media en la carga) es

$$V_{out\ med} = \frac{1}{T} \int_0^T V_s \sen \omega t \, dt = \frac{2V_s}{\pi}$$

(el doble que el rectificador de media onda)

- El valor medio de corriente de salida (corriente media por la carga) es

$$I_{out\ med} = \frac{2V_s}{\pi R_L}$$

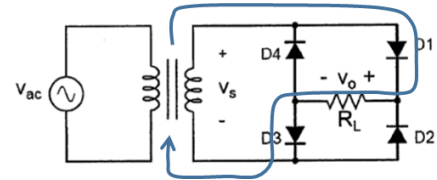
- Y el valor eficaz es

$$V_{out\ Ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (V_s \sen \omega t)^2 \, dt} = \frac{V_s}{\sqrt{2}}$$

- En cuanto a los demás parámetros:

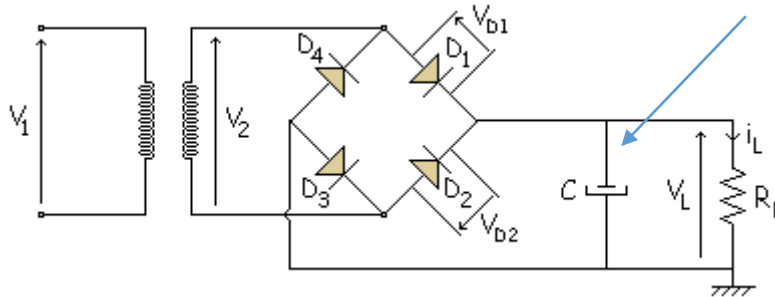
- Tensión inversa máxima  $|V_s| < V_{rev\ max}$
- Corriente máxima por diodo  $\frac{V_s}{R_L} < I_{D\ max}$
- Corriente media por diodo  $I_{D\ med} = \frac{V_s}{\pi R_L}$

$\left(\frac{1}{2} \frac{2V_s}{\pi R_L}\right)$  *pues* D1-D3 o D2-D4 solo conducen durante medio periodo)



# Rectificador en puente con condensador

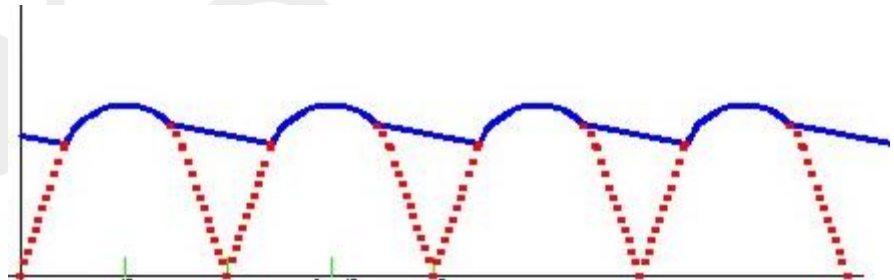
- Si añadimos un condensador en paralelo con la carga, tal como hemos hecho con el rectificador de media onda, el circuito queda así:



- La salida también tendrá un rizado, será la mitad del de media onda

$$V_{\text{rizado}} \approx V_s \frac{T/2}{\tau}$$

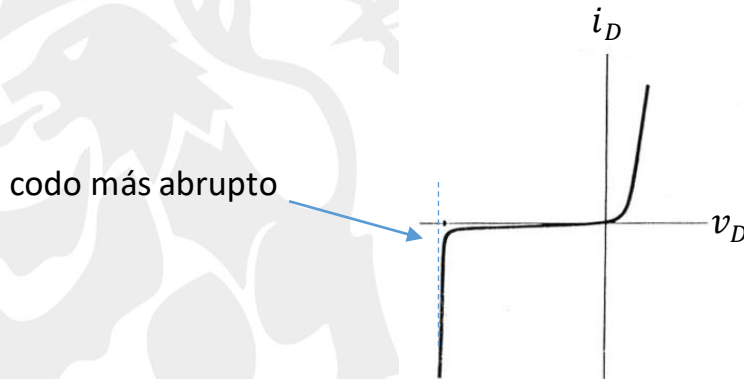
- Pues la señal de salida tendrá periodo mitad con respecto a la señal que rectificamos:



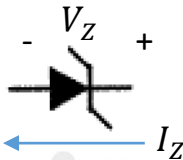
# El diodo Zener



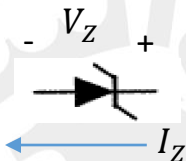
- Recordad que comentamos que hay diodos que están diseñados para funcionar en inversa, en la zona de su tensión de ruptura. Mientras no se supere la corriente inversa máxima, no explotan...
- El motivo de usar un Zener es que su tensión inversa es poco sensible a la corriente que pasa por él (esto quiere decir que el “codo” que forma es más abrupto que el de un diodo normal en directa, o hablando con propiedad, su pendiente es mayor, luego su resistencia serie es menor) y poco sensible a la temperatura, de modo que es muy útil para generar una tensión de referencia



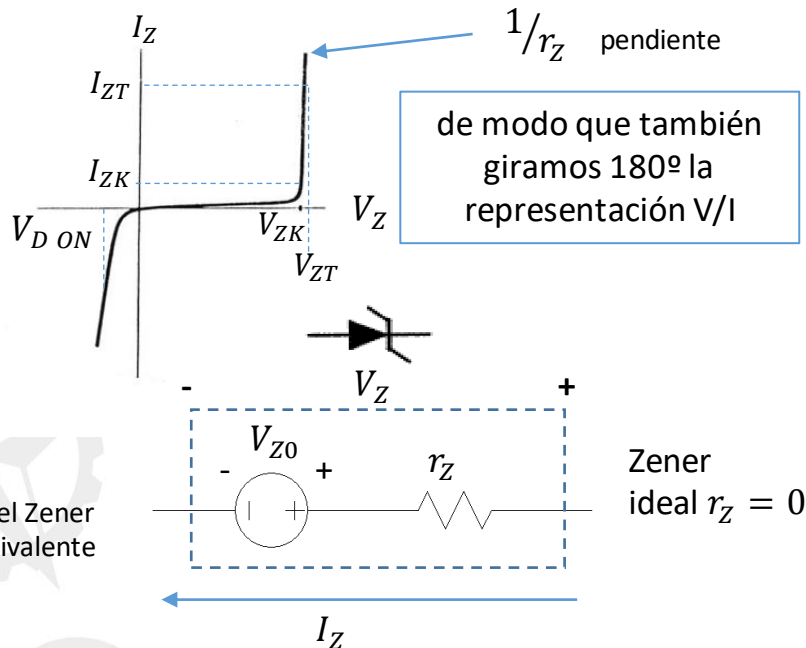
# El diodo Zener



fijaros que para el Zener cambiamos el sentido referencia de la corriente y de la tensión

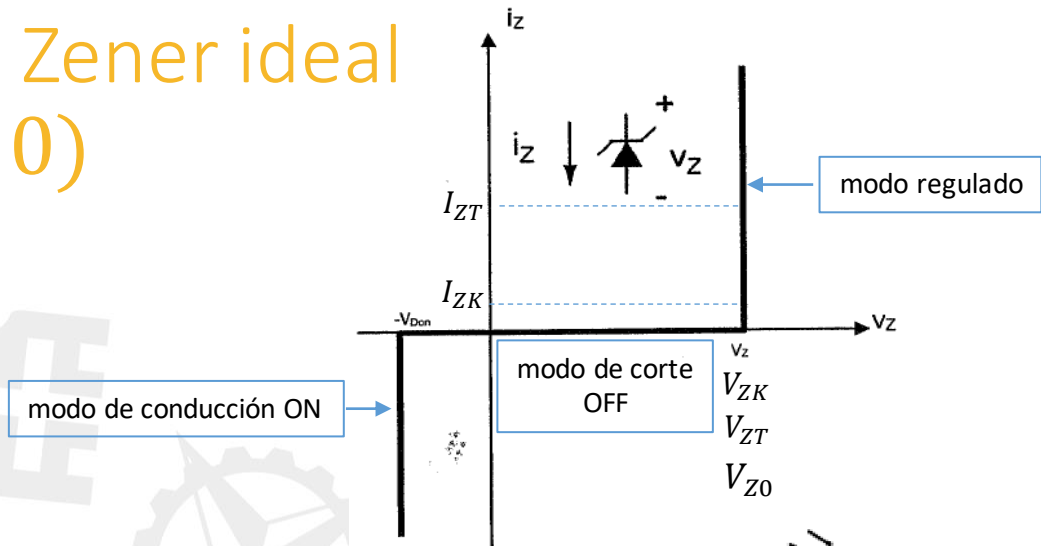


Podemos sustituir el Zener por su modelo equivalente



- Concepto de “**regulación**”. Se dice que el Zener trabaja en su zona regulada cuando la corriente que pasa por él supera un valor llamado  $I_{ZK}$  que corresponde a una tensión  $V_{ZK}$  (es un dato que viene en el “datasheet”, K viene de “knee”, aquí usaríamos la palabra codo, que viene a ser lo mismo)
- Concepto de “**punto de trabajo**”. Se refiere a la corriente a la que trabajamos,  $I_{ZT}$ , que debe ser mayor que  $I_{ZK}$ , a la que le corresponde a una tensión  $V_{ZT}$

# Diodo Zener ideal ( $r_Z = 0$ )



## 3 modos:

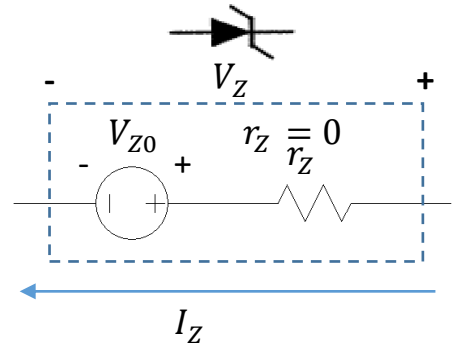
### • Conducción en zona de ruptura o modo regulado

$$i_Z > 0 \text{ y } V_Z = V_{Z0} = V_{ZK} = V_{ZT}$$

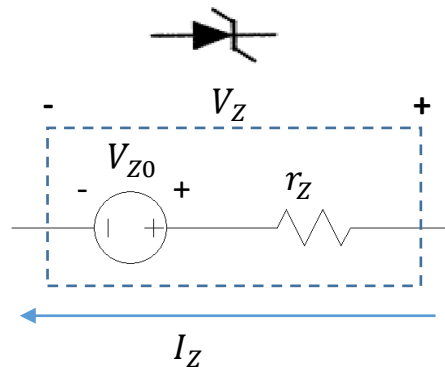
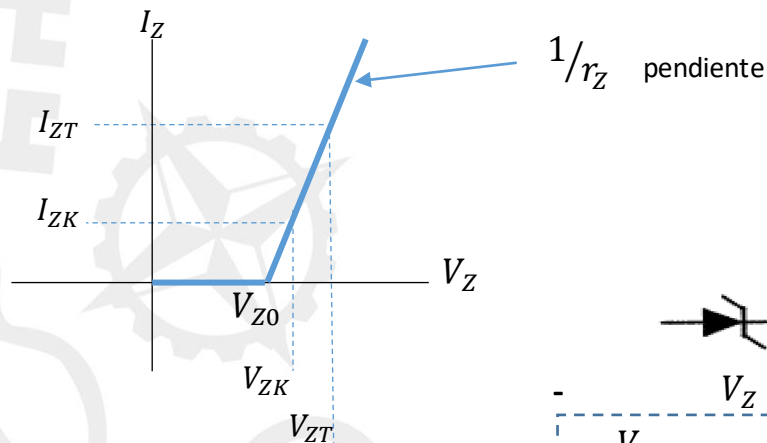
### • Corte: $-V_{DON} \leq V_Z \leq V_{Z0}$

### • Conducción en modo directo:

$$i_Z < 0 \text{ y } V_Z = -V_{DON}$$

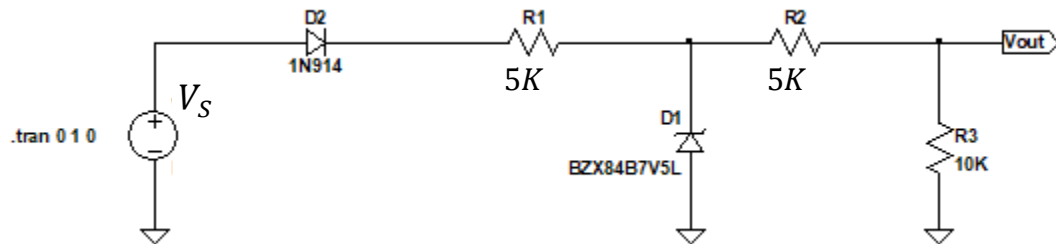


# Diodo Zener menos ideal (con $r_Z \neq 0$ )



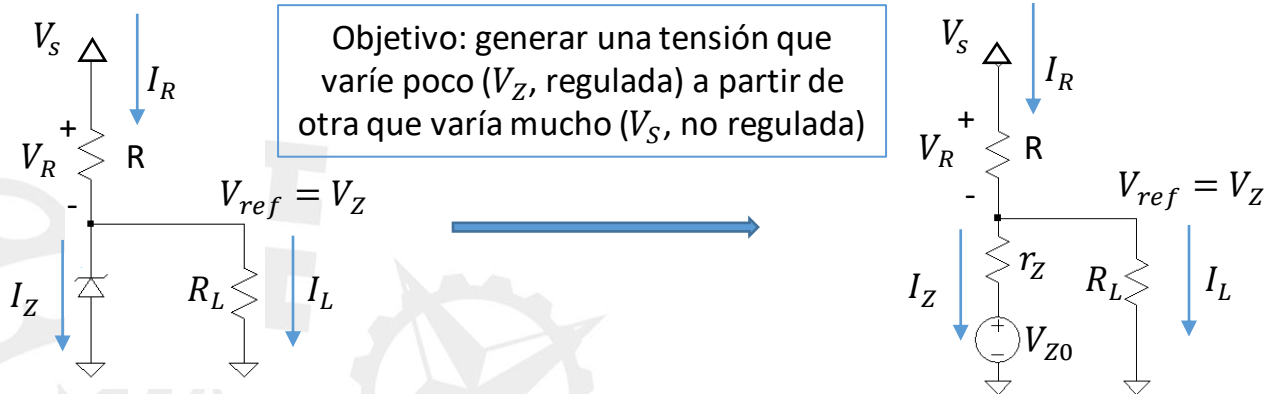
# Análisis de un circuito con Zener (problema 10)

El diodo D2 presenta una caída 0,7 V en conducción directa y el Zener una tensión de Zener  $V_{ZK}$  de 7,5V, una resistencia despreciable, obtener analíticamente y representar la característica de transferencia del siguiente circuito





# Generación de tensiones de referencia mediante un diodo Zener



- Para tener regulación, debemos garantizar que  $I_Z > I_{ZK}$  (esto último es un dato)
- El caso más desfavorable se da cuando la entrada tiene su valor mínimo ( $V_S = V_{S \min}$ ) y conectamos una carga pequeña que pide la máxima corriente ( $I_L = I_{L \max}$ ), de modo que la corriente que queda para el Zener es mínima

$$I_R = I_Z + I_L$$

$$V_{R \min} = V_{S \min} - (V_{Z0} + I_{Z \min} r_Z)$$

$$I_{Z \min} = I_{R \min} - I_{L \max} = \frac{V_{R \min}}{R} - I_{L \max} = \frac{V_{S \min} - (V_{Z0} + I_{Z \min} r_Z)}{R} - I_{L \max}$$

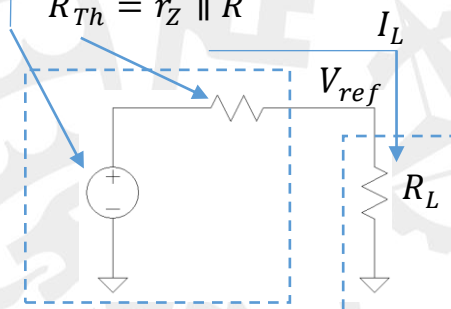
luego para tener regulación  $\rightarrow R \leq \frac{V_{S \min} - (V_{Z0} + I_{Z \min} r_Z)}{I_{Z \min} + I_{L \max}}$

# Generación de tensiones de referencia mediante un diodo Zener

- Calculamos ahora la tensión regulada  $V_{ref}$  (considerando que  $I_Z > I_{ZK}$ ) sin tener en cuenta la carga  $R_L$ , calculando su **equivalente de Thevenin** ---

$$V_{Th} = V_{ref}(\text{sin carga}) = V_{Z0} \frac{R}{R + r_Z} + V_s \frac{r_Z}{R + r_Z}$$

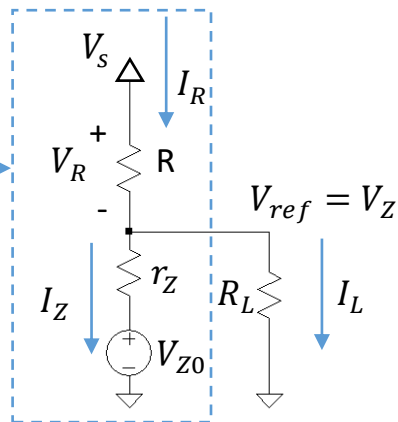
$$R_{Th} = r_Z \parallel R$$



Y ya con la carga

$$V_{ref} = V_{Z0} \frac{R}{R + r_Z} + V_s \frac{r_Z}{R + r_Z} - I_L (r_Z \parallel R)$$

Lo expresamos así para destacar el efecto de  $I_L$



Usando la fórmula de  $V_{ref}$  calculamos la regulación de línea y de carga (sensibilidades):

$$\text{Regulación de línea (alimentación)} \rightarrow \frac{\Delta V_{ref}}{\Delta V_s} = \frac{r_Z}{r_Z + R}$$

$$\text{Regulación de carga } (I_L) \rightarrow \frac{\Delta V_{ref}}{\Delta I_L} = - r_Z \parallel R$$

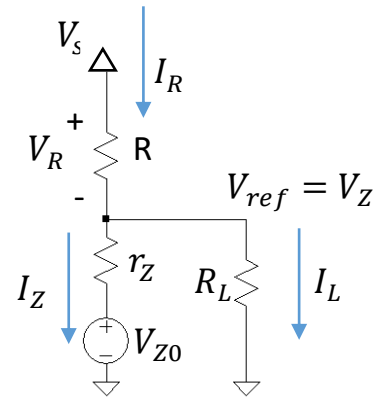
# Generación de tensiones de referencia mediante un diodo Zener

**Regulación de línea** (alimentación)  $\rightarrow \frac{\Delta V_{ref}}{\Delta V_s} = \frac{r_Z}{r_Z + R}$

Para una buena regulación de línea, interesa una  $R$  elevada, pues  $\frac{\Delta V_{ref}}{\Delta V_s} \rightarrow 0$ , pero una  $R$  elevada disminuye la corriente por el Zener y puede llegar a estar por debajo de  $I_{ZK}$

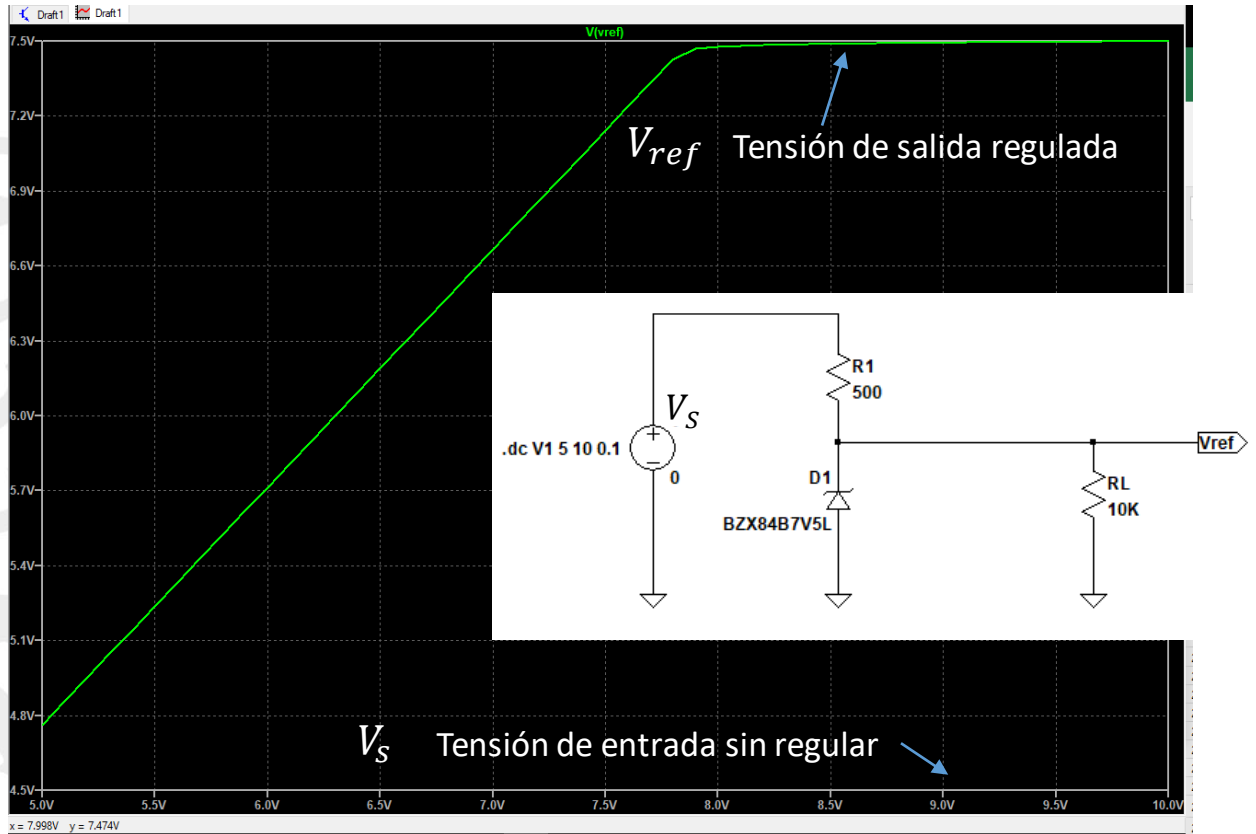
**Regulación de carga** ( $I_L$ )  $\rightarrow \frac{\Delta V_{ref}}{\Delta I_L} = -r_Z \parallel R$

Sin embargo, para una buena regulación de carga, interesa una  $R$  baja, pues  $\frac{\Delta V_{ref}}{\Delta I_L} \rightarrow 0$ , pero una  $R$  baja contradice el objetivo anterior

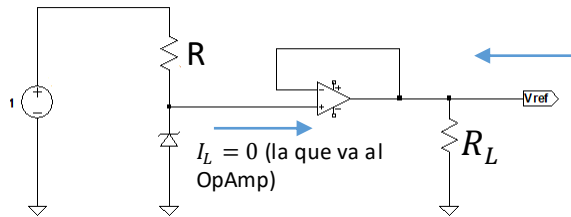


Por este motivo este circuito tan simple es un regulador pobre, es necesario una estructura más elaborada

# Generación de tensiones de referencia mediante un diodo Zener. Un ejemplo

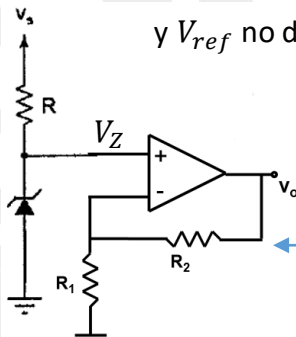


# Regulador mejorado. Zener y Op Amp

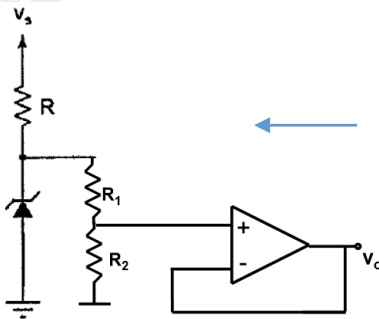


Una opción evidente es añadir un buffer, nos permite tener una buena regulación de carga pues toda la corriente de R va al Zener. Idealmente  $\frac{\Delta V_{ref}}{\Delta I_L} = 0$

(pues si  $I_L = 0 \rightarrow V_{ref} = V_{Z0} \frac{R}{R+r_Z} + V_s \frac{r_Z}{R+r_Z} - I_L(r_Z \parallel R) = V_{Z0} \frac{R}{R+r_Z} + V_s \frac{r_Z}{R+r_Z}$  y  $V_{ref}$  no depende de la corriente por la carga)



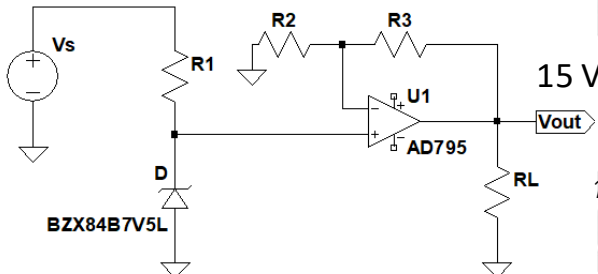
Otra opción interesante es añadir ganancia. De nuevo idealmente  $\frac{\Delta V_{ref}}{\Delta I_L} = 0$  y además podemos controlar el valor de la tensión  $V_o = V_Z \frac{R_2 + R_1}{R_1}$



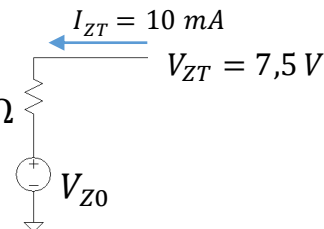
También podemos generar un valor de tensión inferior con este circuito, aunque ahora  $\frac{\Delta V_{ref}}{\Delta I_L} \neq 0$ , con un valor de la tensión  $V_o = V_Z \frac{R_2}{R_1 + R_2}$

# Regulador Zener + Operacional (problema 11)

- Diseñar una tensión de referencia regulada, a partir de una tensión  $V_S$  no regulada, con un **valor nominal de  $V_S$  de 25 V pero que puede oscilar entre 20 y 30 V**. Se dispone de un diodo Zener con una tensión  $V_{ZT} = 7,5 \text{ V}$  a  $I_{ZT} = 10 \text{ mA}$  (nota: T denota la tensión y corriente nominal de trabajo, recomendada en la hoja de datos), una corriente de codo  $I_{ZK} = 0,1 \text{ mA}$  y una resistencia de Zener  $r_Z = 10 \Omega$
- Diseñar el circuito para obtener una **tensión de salida regulada de 15 V** para:
  - a) El Zener funcione con  $I_Z \geq 10I_{ZK} = 1 \text{ mA}$  y  $V_S$  en todo su rango posible de 20 a 30 V
  - b) El Zener funcione en su punto de trabajo nominal ( $I_Z = I_{ZT} = 10 \text{ mA}$ ) con el regulador en condiciones nominales ( $V_S = 25 \text{ V}$ )
- En los casos a) y b), hallar el rango de variación de la tensión de salida

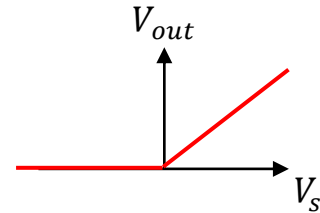
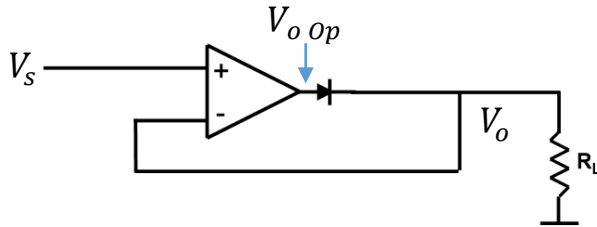


1º debemos determinar  $V_{Z0}$  a partir de los datos



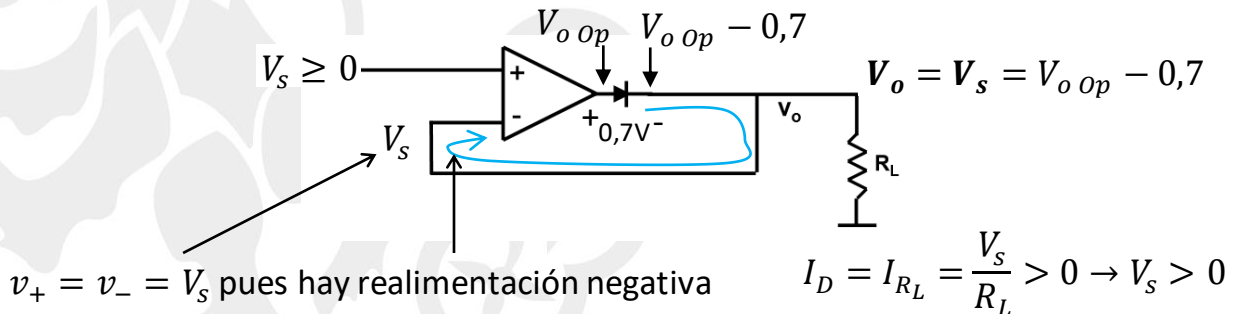
$$V_{Z0} = 7,5 - 10\text{mA} \cdot 10\Omega = 7,4 \text{ V}$$

# Rectificador de precisión (problema 12)



- Este circuito permite “idealizar” un diodo, de modo que no nos afecte su caída  $V_{D ON}$
- **Cuando  $V_s \geq 0$  V**. Asumamos que el diodo conduce (ON) y hay un camino de realimentación negativa, y por lo tanto  $V_o = V_s$

Entonces el Op Amp pondrá una tensión a su salida tal que  $V_{o op} - V_s \approx 0,7$  V y la corriente a la carga será entregada por el Op Amp a través del diodo, de modo que el lazo está cerrado, y efectivamente el diodo está ON



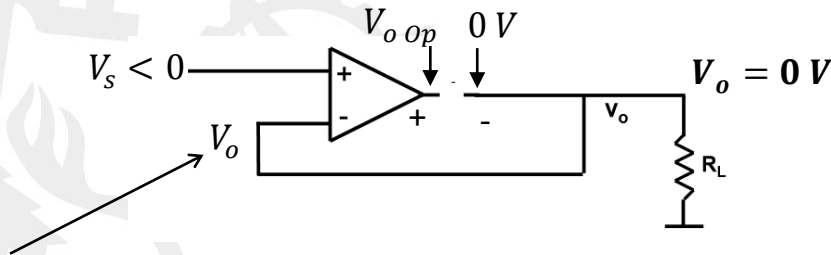
# Rectificador de precisión (problema 12)

- Cuando  $V_S < 0\text{ V}$ . Asumamos que el diodo NO conduce y no hay un camino de realimentación negativa, y por lo tanto  $V_o = 0$  (no hay corriente por la carga)

Entonces el Op Amp pondrá una tensión a su salida  $V_{o\text{ op}} = L^-$  (fijaros que

$V_S = v^+ < 0$  y que  $v^- = 0$ , de modo que se satura la salida a  $V_{o\text{ op}} = L^-$ )

En estas condiciones el diodo está en inversa, OFF ( $V_{o\text{ op}} = L^-$ ,  $V_o = 0$ ,  $V_D < 0$ ), no conduce y se confirma que el lazo está abierto



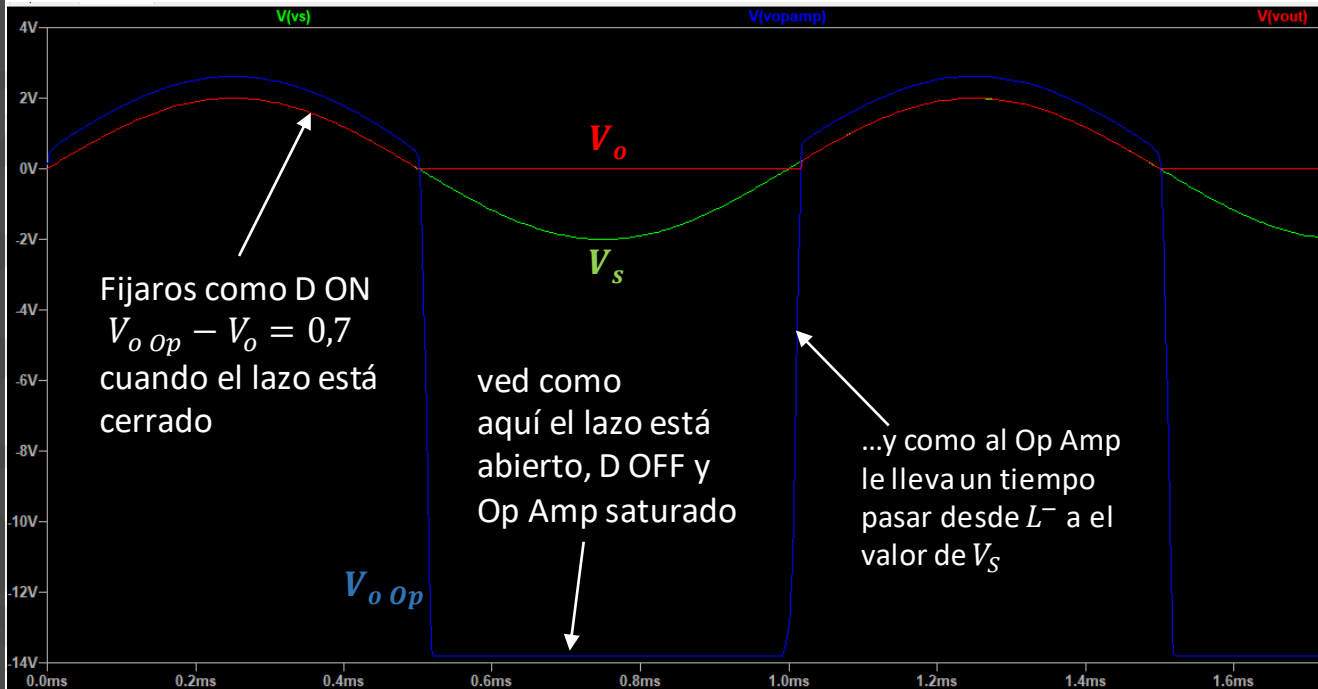
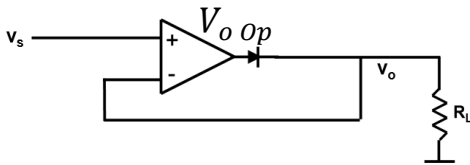
$v_+ \neq v_-$  pues NO hay realimentación negativa,  $V_{o\text{ op}}$  solo puede ser  $L^-$  o  $L^+$

Para D OFF  $v_D = V_{o\text{ op}} - 0\text{ V} < 0 \rightarrow V_{o\text{ op}} = L^-$

$$v_+ \neq v_- \quad v_+ = V_S \quad v_- = 0 \quad \xrightarrow{\text{para } V_{o\text{ op}} = L^-} \quad v_+ - v_- = V_S - 0 < 0 \rightarrow V_S < 0\text{ V}$$



# Rectificador de precisión (problema 12)



# Rectificador de precisión (problema 12)

