Guía de Ejercicios Nº 3: Diodo PN

Constante	Valor
q	$1{,}602 \times 10^{-19}$ C
m_0	$9{,}109 \times 10^{-31}$ kg
k	$1{,}381 \times 10^{-23}$ J/K $= 8{,}617 \times 10^{-5}$ eV K
h	$6{,}626 \times 10^{-34}$ J s $= 4{,}136 \times 10^{-15}$ eV s
ϵ_0	$8{,}85 \times 10^{-12}$ F/m $= 88{,}5$ fF/cm $= 88{,}5 \cdot 10^{-15}$ F/cm
ϵ_r(Si)	11,7
ϵ_r(SiO_2)	3,9

Parte I: Principio de funcionamiento

1. Dibujar de manera cualitativa los perfiles de concentración de portadores a ambos lados de una juntura PN en las siguientes situaciones: i) en equilibrio térmico, ii) en polarización directa, iii) en polarización inversa. ¿Que fenómeno de corriente predomina en cada caso?

2. Dado un diodo con una región P dopada con $N_A = 10^{18}\,\text{cm}^{-3}$ y una región N dopada con $N_D = 10^{16}\,\text{cm}^{-3}$:

   a) Grafique la concentración de portadores minoritarios ($p_n(x_n)$ y $n_p(x_p)$) en los bordes de la región de vaciamiento en función de la tensión aplicada, para tensiones en el rango $-0{,}4\,\text{V} < V_D < 0{,}8\,\text{V}$. Utilice escala lineal para el eje de tensiones y escala logarítmica para el eje de concentraciones.

   b) ¿Hasta qué tensión V_D aplicada considera que es válida la hipótesis de bajo nivel de inyección?

3. Para un diodo PN de silicio,

   a) Considerando que la recombinación se produce sólo en la superficie de contacto, explique por qué en las regiones QNR la distribución de portadores debe ser una función lineal.

   b) A partir de la condición de contorno en la superficie de contacto y en los límites de la región SCR, halle la expresión de la corriente I_D vs. V_D. Remarque todas las hipótesis o aproximaciones que utilice.

   N c) Sabiendo que el area del dispositivo es $A = 0{,}1\,\text{mm}^2$, $N_A = 10^{14}\,\text{cm}^{-3}$ y que $N_D \gg N_A$, determine los parámetros constructivos del diodo de modo que para una tensión aplicada $V_D = 650\,\text{mV}$ la corriente I_D sea igual a 10 mA. Aclare todas las aproximaciones o suposiciones que considere necesarias.

   N d) Dado este diodo N^+P: ¿Cuál es la corriente predominante en la SCR, la de huecos o la de electrones? Justificar. Dibujar el corte lateral de la juntura indicando el mecanismo de transporte de este portador en cada región del diodo.

4. Sobre un diodo PN de juntura simétrica se aplica una tensión $V_D = 0{,}8\,\text{V}$. Sabiendo que $\phi_B = 0{,}9\,\text{V}$, $D_p = 2{,}5\,\text{cm}^2/\text{s}$, $W_n = 10\,\mu\text{m}$, sección $25\,\mu\text{m}^2$ y despreciando el ancho de la zona desierta calcular la corriente de huecos que circula.

5. Se quiere diseñar un diodo con corriente de saturación inversa $I_o = 5 \times 10^{-17}$ A. El proceso de fabricación empleado da como resultado los siguientes parámetros: $W_p = 0{,}5\,\mu\text{m}$, $W_n = 1\,\mu\text{m}$, $N_A = 2{,}5 \times 10^{18}\,\text{cm}^{-3}$, $N_D = 4 \times 10^{17}\,\text{cm}^{-3}$, $D_n = 5\,\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ y $D_p = 5\,\text{cm}^2\text{s}^{-1}$.

   a) Considerando que $W_p \gg x_p$ y que $W_n \gg x_n$, ¿Cuál debería ser el área A del diodo de modo de obtener $I_o = 5 \times 10^{-17}$ A? Suponiendo que el diodo tuviera sección cuadrada, ¿Cuánto medirían sus lados?

b) Verifique que para $V_D = 650\,\text{mV}$ se satisface la hipótesis de bajo nivel de inyección. Para esta tensión aplicada calcule la corriente que circulará por el diodo.

c) ¿Qué porcentaje de esa corriente se debe a huecos y qué porcentaje a electrones?

6. Se realizan las mediciones de I_D vs. V_D para un diodo PN obteniéndose los siguientes resultados:

V_D(mV)	600	660	720	780
I_D(A)	3×10^{-6}	3×10^{-5}	3×10^{-4}	3×10^{-3}

a) Calcule la corriente de saturación I_o de este diodo.

b) Sabiendo que la tensión de ruptura del diodo es $V_D = -18\,\text{V}$, y que la corriente del diodo para $V_D = -18{,}5\,\text{V}$ es $I_D = -500\,\mu\text{A}$, grafique la curva I_D vs. V_D para el rango $-18{,}5\,\text{V} < V_D < 0{,}8\,\text{V}$.

7. Sea un diodo PN ideal con $I_o = 100\,\text{pA}$. Se pide:

a) Grafique el valor absoluto de la corriente $|I_D|$ de este diodo en escala semilogarítmica para $V_D \in (-0{,}8\,\text{V}; 0{,}8\,\text{V})$. Ayuda: tome el logaritmo de la expresión I_D para anular la exponencial. Se debe usar el valor absoluto de la corriente ya que el logaritmo no admite valores negativos. Observe que en directa fuerte esta curva se aproxima a una recta, mientras que en inversa toma un valor constante.

b) ¿Cuáles son los efectos de la temperatura en la corriente del diodo? ¿Cómo cambia la curva I-V del dispositivo? Grafique cualitativamente el valor absoluto de la corriente $|I_D|$ en escala semilogarítmica para dos temperaturas a elección $T_1 > 300\,\text{K}$ y $T_2 < 300\,\text{K}$. Compare con el resultado anterior.

c) ¿Cómo cambia la curva I-V del dispositivo cuando se considera un diodo real? Grafique en escala semilogarítmica el modulo de la corriente $|I_D|$ para $n = 1,5$ e $I_{og} = 20\,\text{nA}$ a temperatura ambiente. Compare con lo obtenido anteriormente.

Parte II: Modelo de Orden 0

8. Para el circuito de la figura 1 donde $R = 100\,\Omega$, considerando el modelo de orden 0 con $V_{D(ON)} = 0$ V del diodo, grafique para $-5\,\text{V} < V_X < 5\,\text{V}$:

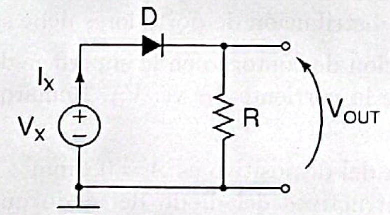


Figura 1

a) La corriente I_X en función de la tensión V_X.

b) La tensión V_{OUT} en función de la tensión V_X.

c) Repita considerando $V_{D(ON)} = 0{,}7\,\text{V}$.

9. Dado el circuito de la figura 1 con $V_X = 5\,\text{V}$

a) Hallar la resistencia R tal que la corriente $I_X = 2\,\text{mA}$

I. Utilizando el modelo de orden 0, considerando $V_{D(ON)} = 0{,}7\,\text{V}$.

II. Utilizando la ecuación de corriente del diodo sabiendo que $I_o = 0{,}1\,\text{pA}$.

b) Suponiendo ahora que $R = 1\,\text{k}\Omega$, hallar la corriente I_X

I. Utilizando el modelo de orden 0, considerando $V_{D(ON)} = 0.7\,\text{V}$.

II. Utilizando la ecuación de corriente del diodo sabiendo que $I_o = 0{,}1\,\mathrm{pA}$ ¿Es posible hallar una solución analítica en este caso?

c) En base a los resultados ¿considera que el modelo de orden 0 es una buena aproximación en este caso? ¿Cuál es su utilidad?

10. Para el circuito de la figura 2, los diodos D_1 y D_2 están fabricados en el mismo proceso, con los mismos parámetros, pero con diferente geometría, tal que $A_{D_1} = 2 \times A_{D_2}$. La tensión $V_X = 5\,\mathrm{V}$ y $R = 100\,\Omega$. Determine la corriente que circula por cada uno de ellos considerando $V_{D(ON)} = 0{,}7\,\mathrm{V}$.

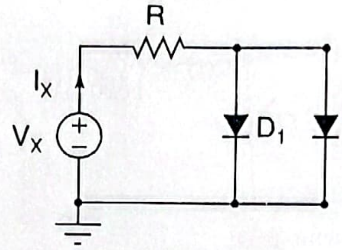


Figura 2

11. Se tiene el circuito de la figura 3, donde los dos diodos se diferencian solamente por haber sido fabricados con distinto material semiconductor, manteniendo iguales entre sí su geometría y niveles de dopaje. De esta manera, se obtienen dos corrientes de saturación inversa distintas para cada uno de ellos: $I_{o_1} = 100\,\mathrm{fA}$ e $I_{o_2} = 10\,\mathrm{fA}$. Hallar la caída de tensión en cada componente si $V_F = 6{,}3\,\mathrm{V}$ y $R = 1\,\mathrm{k\Omega}$.

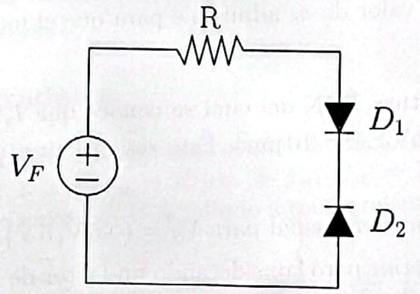


Figura 3

Parte III: Modelo de pequeña señal

12. Para el diodo PN del ejercicio 5 polarizado con una tensión $V_D = 720\,\mathrm{mV}$:
   a) ¿Es posible aplicar la aproximación de "juntura muy asimétrica"?
   b) Considerando que $W_p \gg x_p$ y que $W_n \gg x_n$, calcule el tiempo de transito de los huecos a través de la región n-QNR (τ_{Tp}) y el tiempo de transito de los electrones a través de la región p-QNR (τ_{Tn}).
   c) Encuentre los valores numéricos de los elementos del modelo de pequeña señal del diodo (r_d, C_j y C_d).
   d) Para esta tensión aplicada, ¿qué capacidad es más significativa, C_j o C_d?
   e) ¿Por qué razón la capacidad C_j es predominante en polarización inversa, mientras que C_d predomina en polarización directa?

13. Un diodo es polarizado con una corriente $I_D = 1\,\mathrm{mA}$. Utilizando el modelo de pequeña señal determine:
   a) ¿Cuánto cambia la corriente en el diodo si V_D cambia $1\,\mathrm{mV}$?
   b) ¿Cuál debe ser el cambio en la tensión si la corriente varía un 10 %?

14. Se polariza en directa un diodo PN de Silicio utilizando una resistencia de $100\,\Omega$ y una fuente de tensión de 3,3 V. Considerando que la fuente de tensión puede tener una variación de 10 mV, determine la variación en corriente utilizando el modelo de pequeña señal para bajas frecuencias.

15. Se polariza en directa un diodo PN de Silicio utilizando una resistencia de $1\,\mathrm{k\Omega}$ y una fuente de tensión de 5 V. Determinar la máxima variación admisible en la fuente de tensión para que el modelo de pequeña señal sea válido.

16. Un diodo N$^+$P con $N_D = 1\times10^{19}\,\mathrm{cm^{-3}}$, área $A = 0{,}01\,\mathrm{mm^2}$ y con parámetros $\phi_b = 900\,\mathrm{mV}$ y $\tau_T = 18\,\mathrm{ns}$. Considere el circuito de la figura 4a donde $V_S = 8\,\mathrm{V}$ y

$$v_s(t) = \begin{cases} 0 & \text{si } t < t_0 \\ 500\,\mathrm{mV} & \text{si } t \geq t_0 \end{cases}$$

con $t_0 = 1\,\mathrm{ns}$ y $R = 4{,}7\,\mathrm{k\Omega}$.

a) Calcular la polarización.

b) Hallar el modelo de pequeña señal.

c) Encuentre la respuesta temporal de la tensión $v_D(t)$.

d) Si V_S disminuye a la mitad, ¿cómo se modifica la respuesta temporal de $v_d(t)$?

17. Considere el circuito de la figura 4b con el diodo del ejercicio 16, con $V_S = 9\,\mathrm{V}$ y una resistencia R.

a) Calcule el valor de la resistencia de manera que circulen 10 mA.

b) Hallar el modelo de pequeña señal ¿Es válido el modelo de pequeña señal si $v_s(t)$ es un escalón de altura 1 V?

c) ¿Cuál es el máximo valor de v_s admisible para que el modelo de pequeña señal sea válido?

d) Grafique $v_D(t)$.

18. Se tiene un diodo de juntura P$^+$N del cual se conoce que $I_s = 1\,\mathrm{pA}$, $\tau_{Tn} = 12\,\mathrm{ns}$, $\tau_{Tp} = 18\,\mathrm{ns}$, $C'_{j0} = 31{,}4\,\mathrm{nF/cm^2}$, $\phi_B = 840\,\mathrm{mV}$, $A = 10\,\mathrm{\mu m^2}$. Éste se conecta a un circuito como muestra la figura 4a con $R = 330\,\Omega$.

a) Halle el modelo de pequeña señal para $V_S = \{-5\,\mathrm{V}; 5\,\mathrm{V}\}$.

b) Repetir el punto anterior pero considerando un factor de idealidad $n = 1,5$ ¿Qué parámetros se ven afectados por este factor?

c) Grafique $v_d(t)$ para los casos anteriores cuando se aplica escalón de tensión $v_s(t)$ de 200 mV.

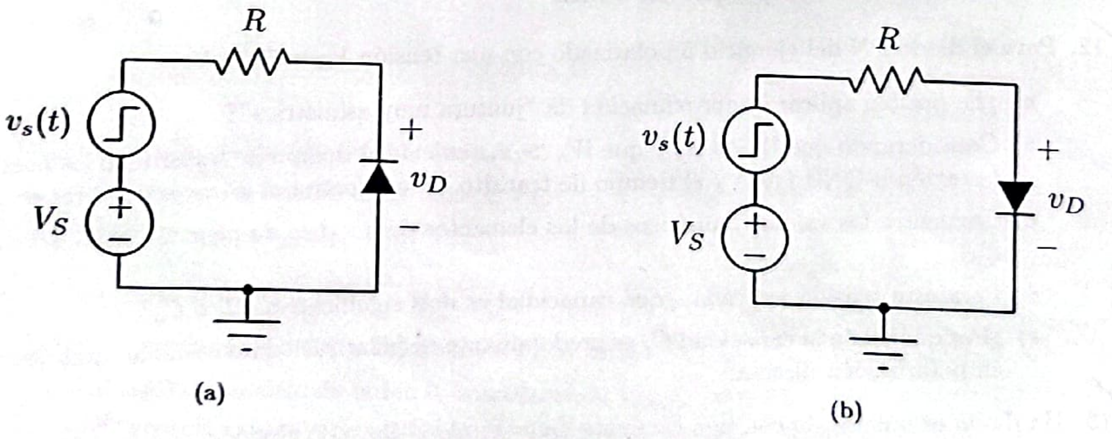


Figura 4

Parte IV: Diodos zener

19. Dado el circuito de la figura 5, donde $V_Z = 6{,}2\,\mathrm{V}$, $V_{IN} = 10\,\mathrm{V}$, $I_{R(max)} = 241\,\mathrm{mA}$, $I_{R(min)} = 60{,}5\,\mathrm{mA}$.
    - *a*) Explique cómo funciona un diodo Zener. Realice una curva I-V de la transferencia del mismo mostrando sus parámetros característicos.
    - *b*) Calcule un valor de R posible para el caso en que la salida tiene una carga de $100\,\Omega$. ¿Cuál es la mínima y la máxima R que se le puede colocar al circuito?

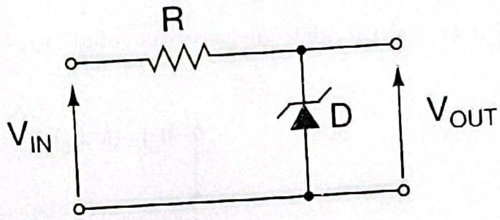


Figura 5

20. Se implementa una referencia de tensión con un diodo zener de $3{,}9\,\mathrm{V}$, $|I_{z(min)}| = 1\,\mathrm{mA}$, $|I_{z(max)}| = 5\,\mathrm{mA}$ y una resistencia de $330\,\Omega$. Conociendo que la carga es una resistencia de $890\,\Omega$ hallar el rango de valores de tensión no regulada para los cuales puede operar ($V_{\text{IN-min}}$, $V_{\text{IN-max}}$).

21. Se implementa una referencia de tensión con un diodo zener de $5{,}6\,\mathrm{V}$, $|I_{z(\min)}| = 1\,\mathrm{mA}$, $|I_{z(\max)}| = 10\,\mathrm{mA}$, una resistencia de $220\,\Omega$ y una fuente de $9\,\mathrm{V}$. Hallar el rango de valores de resistencias que pueden cargar a esta referencia ($R_{L\text{-min}}$, $R_{L\text{-max}}$).

Parte V: Ejercicios integradores

22. Se tiene un diodo de juntura PN **simétrica** basado en silicio del cual se conocen los siguientes datos: $A = 0{,}1\,\mathrm{mm}^2$; $W_p = 10\,\mu\mathrm{m} \gg x_p$; $W_n = 10\,\mu\mathrm{m} \gg x_n$; $C_{j0} = 76\,\mathrm{pF}$; $\tau_T = 20\,\mathrm{ns}$ y $V_{D(\mathrm{ON})} = 0{,}7\,\mathrm{V}$. Se realizan dos mediciones de la curva $I-V$ del diodo a temperatura ambiente y se presentan en la siguiente tabla:

V_D[V]	$-1{,}2$	$0{,}65$
I_D[A]	$6{,}5 \times 10^{-15}$	516×10^{-6}

   - *a*) Determinar el valor de la corriente I_0, las concentraciones N_A y N_D y el valor de ϕ_B.
   - *b*) Dicho diodo se **polariza en directa** mediante una fuente de 5 V y una resistencia de $470\,\Omega$. Obtener los valores de polarización, dibujar y calcular el modelo de pequeña señal del mismo. Indicar y justificar cuál es el efecto capacitivo que predomina en esta condición.

23. En base al circuito de la figura 6 determinar el rango de valores de R_1 y R_2 para que la corriente que atraviesa al diodo D ($V_{D(ON)} = 0{,}7\,\mathrm{V}$) sea de $I_D = 1\,\mathrm{mA}$. Otros datos: $V_{IN} = 7{,}5\,\mathrm{V}$; $|V_Z| = 5{,}6\,\mathrm{V}$; $|I_{Z_{mín}}| = 2\,\mathrm{mA}$; $|I_{Z_{máx}}| = 6\,\mathrm{mA}$; $T = 300\,\mathrm{K}$.

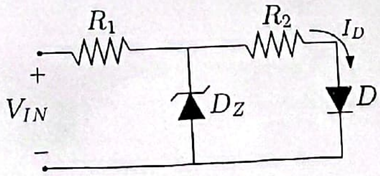


Figura 6

24. Se tiene un diodo de juntura PN$^+$ del cual se conocen los siguientes datos: $A = 1\,\text{mm}^2$, $\phi_B = 716\,\text{mV}$, $W_p = 100\,\mu\text{m} \gg x_p$, $W_n = 100\,\mu\text{m} \gg x_n$. Además, se sabe que el dopaje del lado menos dopado es $N_A < 10^{15}\,\text{cm}^{-3}$, de manera que en esa región se puede aproximar $\mu_n \approx 1400\text{cm}^2/(\text{Vs})$ y $\mu_p \approx 485\text{cm}^2/(\text{Vs})$. Se realiza una medición de la curva I-V del diodo a temperatura ambiente y se grafican los resultados en la figura 7 en escala semilogarítmica (**atención**: base 10), en donde se conoce $m = 13\text{V}^{-1}$, $P_x = (0{,}65\,\text{V}; 1{,}64\,\text{mA})$ e $I_{0\text{-real}} = 8{,}1\,\text{nA}$.

   a) Calcular el coeficiente de idealidad, la corriente de saturación ideal $I_{0\text{-ideal}}$, las concentraciones de impurezas y explicar cómo se modificaría la curva I_D vs V_D si se aumenta la temperatura. (Ayuda: $\log_b(a) = \log_c(a)/\log_c(b)$).

   b) Obtener los parámetros del modelo de pequeña señal (r_d, C_j y C_d) en el punto P_x.

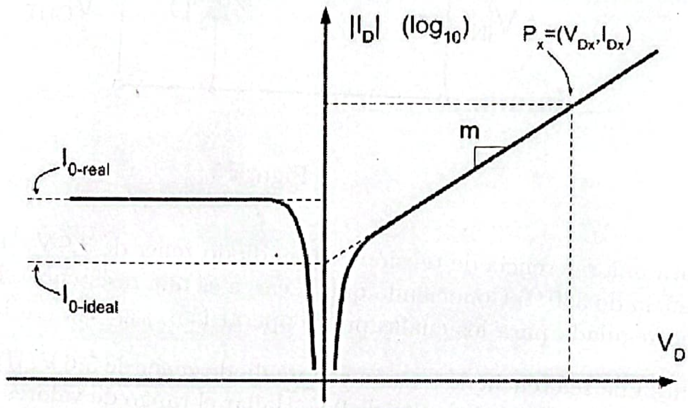


Figura 7

GUÍA N°3: DIODO PN

- PARTE I: Principio de funcionamiento

1. (i)

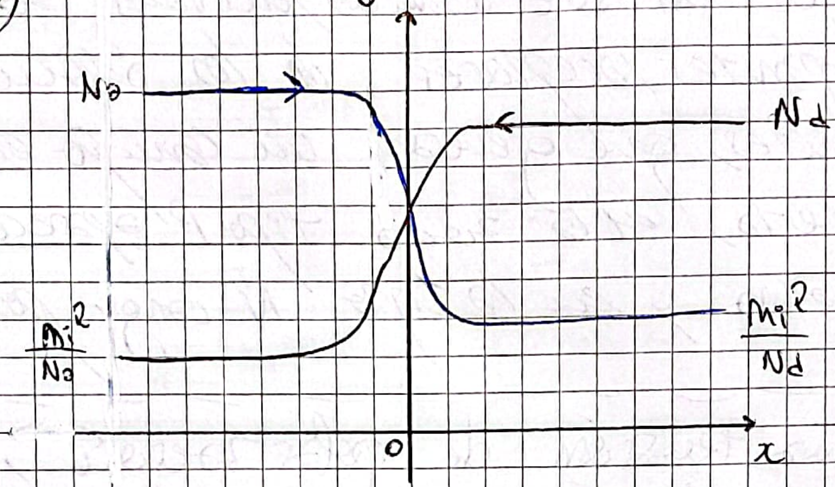
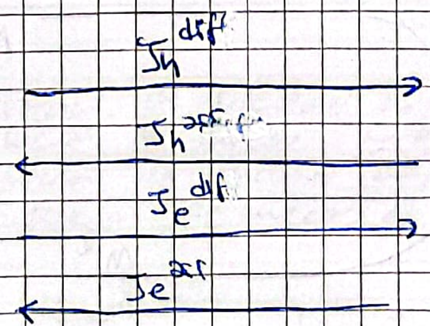


FIGURA 1

La figura 1 muestra el perfil de concentración de portadores a ambos lados de una juntura PN en equilibrio.

En equilibrio térmico hay un balance dinámico entre difusión y arrastre de electrones y huecos:

$$\left| J_{arr_{neta}} \right| = \left| J_{dif_{neta}} \right|$$



La corriente de difusión de huecos/electrones se genera debido al gradiente de la concentración de huecos/electrones que avanza en dirección de la zona mayoritaria de portadores huecos/electrones a la zona minoritaria de portadores huecos/electrones respectivamente.

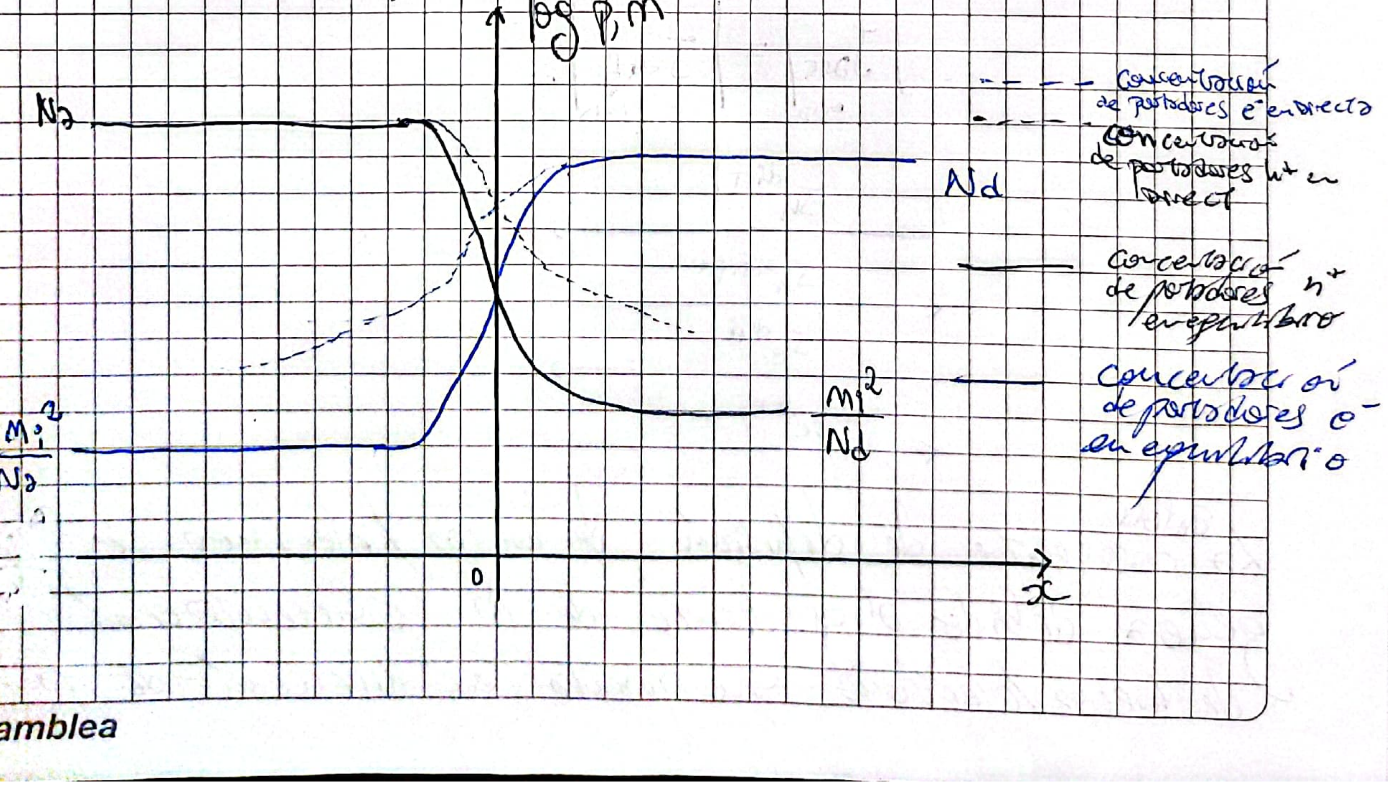
La corriente de arrastre de huecos/electrones se genera debido a los dopantes aceptores de los átomos aceptores/dopantes, que generan un campo eléctrico.

En la zona desierta, en la zona tipo P aparece una carga negativa y en la tipo N carga positiva.

(ii) Al aplicar una tensión de polarización, la concentración de portadores se modifica.

Para el caso de polarización directa ($V>0$):

$\phi_B - V\downarrow \Rightarrow \underbrace{|E_{sce}|\downarrow}_{\text{campo eléctrico dentro de la juntura PN disminuye}} \Rightarrow \underbrace{|J_{arrastre}|\downarrow}_{\text{corriente de arrastre disminuye.}}$



En este caso, $\underbrace{|J_{dif}| > |J_{arr}|}$ porque disminuye el campo eléctrico debido a $\phi_B - V$ para $V>0$

Entonces

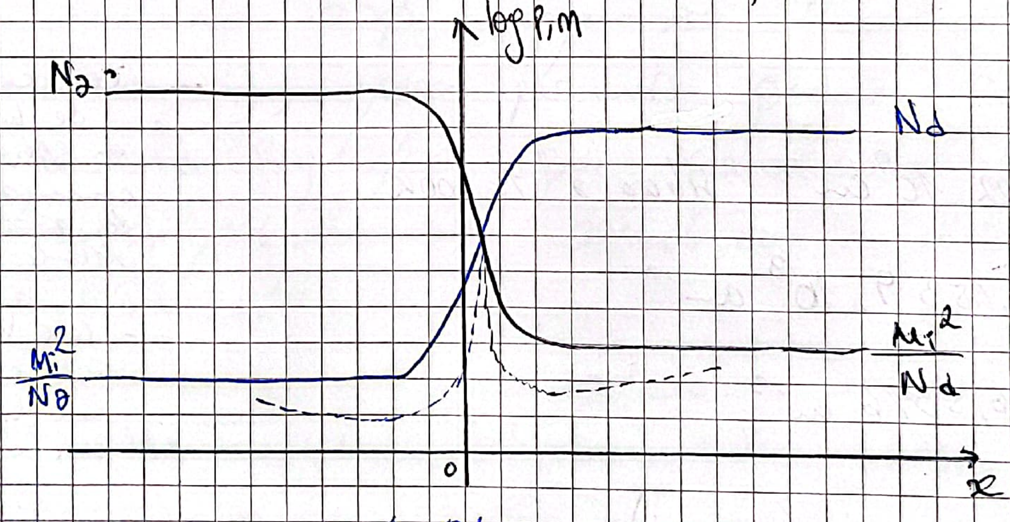
$J_n^{dif} \longrightarrow$

$\longleftarrow J_n^{arr}$ $\Big\}$ $\xrightarrow{J_n^+}$

$J_e^{dif} \longrightarrow$

$\longleftarrow J_e^{arr}$ $\Big\}$ $\xrightarrow{J_e^-}$

iii) Al aplicar una tensión de polarización inversa:



— concentración de electrones en equilibrio térmico

— concentración de huecos en equilibrio térmico

- - - concentración de electrones en polarización inversa

- - - concentración de huecos en polarización inversa

$J_n^{dif} \longrightarrow$

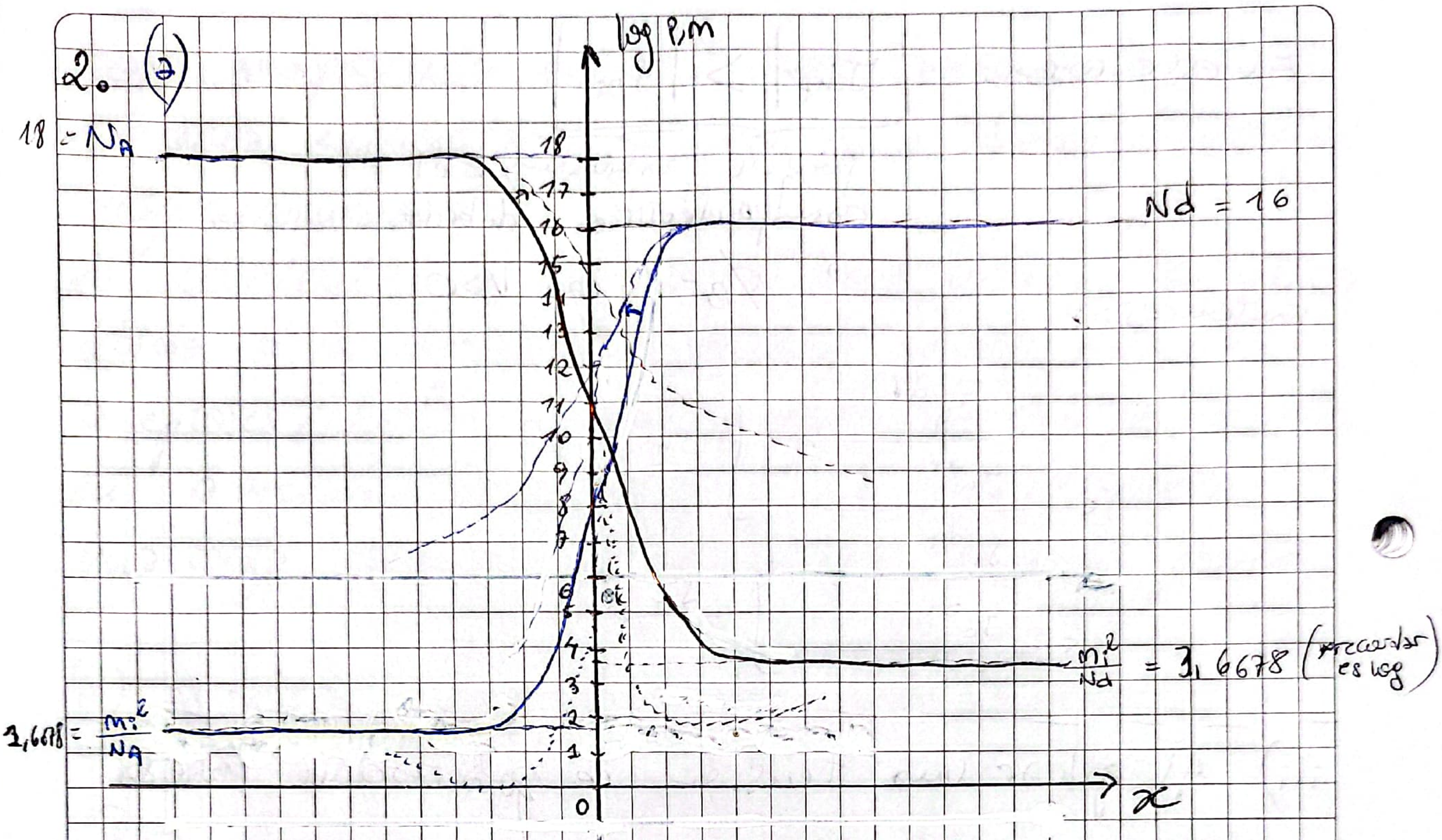
$\longleftarrow J_n^{arr}$ $\Big\}$ $\xleftarrow{J_n^+}$

$J_e^{dif} \longrightarrow$

$\longleftarrow J_e^{arr}$ $\Big\}$ $\xleftarrow{J_e^-}$

ya que $|J_{arr}| > |J_{dif}|$ puesto que $V<0$, $\phi_B - V \uparrow \Rightarrow |E_{SCR}| \uparrow \Rightarrow |J_{arr}| \uparrow$

2. (a)



— Concentración de huecos en equilibrio térmico

— concentración de e^- a equilibrio térmico

- - - - conc h^+ $V<0$

- - - - conc e^- $V<0$

.... conc h^+ $V>0$

.... conc e^- $V>0$

$n_i = 6,822 \cdot 10^9\ cm^{-3}$ silicio a $T = 300K$

$$\frac{n_i^2}{N_d} = 4,6539 \cdot 10^3\ cm^{-3}$$

$$\frac{n_i^2}{N_A} = 46,5396\ cm^{-3}$$

$$\phi_B = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A N_d}{n_i^2}\right)$$

$$\phi_B = \frac{1,381 \cdot 10^{-23}\ J/K \cdot 300K}{1,602 \cdot 10^{-19}\ C} \ln\left(\frac{10^{18} \cdot 10^{16}}{(6,822 \cdot 10^9)^2}\right) = \boxed{0,8534V}$$

(b) La hipótesis de bajo nivel de inyección dice que el nivel de exceso de portadores minoritarios en los bordes de la zona desierta debe ser mucho menor que la concentración de mayoritarios, es decir:

$$n(-x_p) \ll N_a \quad y \quad p(x_n) \ll N_d$$

Se considera mucho menor hasta 100 veces menor. Esta hipótesis resulta útil para calcular las concentraciones de portadores inyectados.
En general, se busca que la tensión V no supere en módulo a ϕ_B o que sea menor a 1 (entrando x_0), pero por más que se cumpla esto no significa que sea válida la hipótesis, deben cumplirse las condiciones mencionadas anteriormente.

3.a) En las regiones cuasineutrales QNR no hay variación de portadores en equilibrio térmico, pero, por ejemplo, al aplicar una tensión de polarización se modifica la concentración de portadores, alterando el balance entre generación y recombinación de portadores.

- En equilibrio térmico: la tasa de roturas de enlaces Si-Si está equilibrada con la tasa de formación de enlaces Si-Si. Se compensa la tasa de generación con la de recombinación.

$$\text{Si-Si bond} \underset{\text{recombinación}}{\overset{\text{generación}}{\rightleftharpoons}} n_0 + p_0$$

- Si hay inyección de portadores minoritarios (exceso de portadores minoritarios), entonces la concentración de portadores es superior al equilibrio y prevalece la recombinación.

$$\text{Si-Si bond} \underset{\text{recombinación}}{\overset{\text{se favorece}}{\longleftarrow}} n + p$$

- Si hay extracción de portadores minoritarios (disminución de portadores minoritarios), entonces la concentración de portadores es inferior al equilibrio y prevalece la generación:

$$\text{Si-Si bond} \underset{\text{generación}}{\overset{\text{se favorece}}{\longrightarrow}} n + p$$

---

b) En los dispositivos modernos, la recombinación y la generación ocurren principalmente en las superficies (los bordes o límites donde termina el dispositivo):

- En las superficies, se interrumpe la estructura cristalina perfectamente periódica, entonces hay una gran cantidad de enlaces rotos lo que genera centros de generación y recombinación.
- Los dispositivos modernos son muy pequeños, entonces el efecto de superficie es muy significativo.

Se concluye, entonces, que hay una elevada cantidad de generación y recombinación en las superficies, por lo que la concentración de portadores no se aparta respecto a los valores de equilibrio.

$$n(s) \cong n_0 \quad , \quad p(s) \cong p_0 \quad \Big\} \text{ condiciones de contorno.}$$

El despeje y desarrollo está en la clase -7 (powerpoint), donde se llega a que:

$$n(-x_p) \cong \frac{n_i^2}{N_a} \exp\left(\frac{qV}{KT}\right)$$

$$p(x_n) \cong \frac{n_i^2}{N_d} \exp\left(\frac{qV}{KT}\right)$$

Se utiliza la relación de Boltzmann y las condiciones de equilibrio $p(-x_p) \simeq N_a$ y $n(x_n) \simeq N_d$.

Para obtener la corriente de difusión en las regiones QNR, los electrones se difunden hasta alcanzar el contacto.

J_n es constante en la región p-QNR (y en n-QNR) y $n(x)$ tiene que ser lineal

No hay efecto de recombinación (es despreciable).

Se llega entonces a que:

$$J_n = q \frac{n_i^2}{N_a} \frac{D_n}{w_p - x_p} \left(\exp \frac{qV}{kT} - 1 \right) \Bigg\} e^-$$

de forma similar

$$J_p = q \frac{n_i^2}{N_d} \frac{D_p}{w_n - x_n} \left(\exp \frac{qV}{kT} - 1 \right) \Bigg\} h^+$$

Finalmente, sumando ambas componentes de corriente:

$$I = \underbrace{q A n_i^2 \left(\frac{1}{N_a} \frac{D_n}{w_p - x_p} + \frac{1}{N_d} \frac{D_p}{w_n - x_n} \right)}_{= I_0} \left(\exp\left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right)$$

que habitualmente se escribe como:

$$I = I_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right)$$

La ecuación de contorno vale en directa y en inversa.

Siendo

w_p: ancho del diodo en la región de tipo p

w_n: ancho del diodo en la región de tipo n

A: área del diodo

I_0: corriente de saturación

c) Area del diodo $= A = w_m \cdot w_p = 0{,}1\,mm^2 = 0{,}1 \cdot 10^{-2}\,cm^2$

Siendo w_m = ancho del diodo en región de tipo n

w_p = ancho del diodo en región de tipo p

$I_D = 10\,mA = 10 \cdot 10^{-3} A = 0{,}01\,A$

$N_A = 10^{14}\,cm^{-3}$

$N_D >> N_A$ } unión muy asimétrica $N^+p \rightarrow x_{p0} >> x_{n0}$

$V_D = 650\,mV = 0{,}65\,V$

$\rightarrow x_{p0} = x_d = \sqrt{\frac{2\epsilon(\phi_0 - V)}{q N_A}}$

$0{,}001\,cm^2 = w_m\, w_p$

$T = 300\,K$ } tomo este valor.

$$I_D = I_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\right)$$

$$0{,}01\,A = I_0 \left(\exp\left(\frac{1{,}602 \cdot 10^{-19}\,C \cdot 0{,}65\,V}{1{,}381 \cdot 10^{-23}\,J/K \cdot 300\,K}\right) - 1\right)$$

despejando:

$$I_0 = 1{,}2146 \cdot 10^{-13}\,A$$ (suele dar del orden de -12 aprox.)

Entonces:

$$I_0 = q A n_i^2 \left(\frac{1}{N_A} \cdot \frac{D_n}{w_p - x_p} + \cancel{\frac{1}{N_d} \frac{D_p}{w_n - x_n}}\right)$$

Dado que $N_D >> N_A$

$$I_0 \approx q A n_i^2 \cdot \frac{1}{N_A} \cdot \frac{D_n}{w_p - x_p}$$

$$\frac{n_i^2}{N_A} = \frac{(6{,}822 \cdot 10^9\,cm^{-3})^2}{10^{14}\,cm^{-3}} = 465396{,}84\,cm^{-3}$$

(d) Dado que la juntura es P^+N^+, la corriente predominante es la de los huecos, notar que en el calculo de la corriente se desprecia el aporte de los electrones por ser $N_D >> N_A$

4) $V_D = 0{,}8V > 0 \Longrightarrow$ en directa

$\phi_B = 0{,}9V$

$D_p = 2{,}5\ cm^2/s$

$W_n = 10\mu m = 10 \cdot 10^{-4} cm = 10^{-3} cm$

$A = S = 25\mu m^2 = 25 \cdot 10^{-8} cm^2$ } sección = area de un circulo $= \pi r^2$

desprecio ancho de la zona desierta

Juntura simétrica: $N_A = N_D$

$x_p = x_n \approx 0$ ("desprecio el ancho de la zona desierta")

$$\phi_B = \frac{KT}{q} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2}$$

$$0{,}9V = \phi_B = \frac{1{,}381 \cdot 10^{-23} J/K \cdot 300K}{1{,}602\ 10^{-19} C} \ln\left(\frac{(N_a)^2}{n_i^2}\right)$$

$$\boxed{N_a = N_d = 2{,}4593 \cdot 10^{17} cm^{-3}}$$

Planteo:

$$I_{n^+} = I_p = qA n_i^2 \frac{1}{N_d} \cdot \frac{D_p}{W_n - x_n} \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\right)$$

reemplazo por los valores:

$$I_p = 1{,}602 \cdot 10^{-23} C \cdot 25 \cdot 10^{-8} cm^2 \cdot (6{,}822 \cdot 10^{9} cm^{-3})^2 \cdot \frac{1}{2{,}4593\ 10^{17} cm^{-3}} \cdot$$

$$\cdot\ 2{,}5 \frac{cm^2}{s} \cdot \frac{1}{10^{-3} cm - 0} \left(\exp\left(\frac{1{,}602 \cdot 10^{-19} C \cdot 0{,}8V}{1{,}381 \cdot 10^{-23} J/K \cdot 300K}\right) - 1\right)$$

$$\boxed{I_p = 5{,}4530 \cdot 10^{-11} A}$$

5. $I_0 = 5 \cdot 10^{-17}$ A

SATURACIÓN INVERSA $\Rightarrow V<0$

$W_p = 0{,}5\,\mu m$

$W_n = 1\,\mu m$

$N_A = 2{,}5 \cdot 10^{18}\,cm^{-3}$

$N_D = 4 \cdot 10^{17}\,cm^{-3}$

$D_n = 5\,\frac{cm^2}{s}$

$D_p = 5\,\frac{cm^2}{s}$

a) considero $W_p >> x_p$ y $W_n >> x_n$, por lo que

$W_p - x_p \approx W_p$ y $W_n - x_n \approx W_n$

$$I_0 = q\,A\,n_i^2 \left(\frac{1}{N_a}\frac{D_n}{W_p - x_p} + \frac{1}{N_d}\frac{D_p}{W_n - x_n} \right)$$

$$5 \cdot 10^{-17} A = 1{,}602 \cdot 10^{-19} C \cdot A \cdot \left(6{,}822 \cdot 10^{9}\,cm^{-3}\right)^2 \cdot$$

$$\cdot \left[\frac{1}{2{,}5 \cdot 10^{18}\,cm^{-3}} \cdot \frac{5\,cm^2/s}{0{,}5 \cdot 10^{-4}\,cm} + \frac{1}{4 \cdot 10^{17}\,cm^{-3}} \cdot \frac{5\,cm^2/s}{1 \cdot 10^{-4}\,cm} \right] \Rightarrow$$

despejando...

$\Rightarrow \boxed{A = 4{,}0644 \cdot 10^{-8}\,cm^2}$

$l \cdot l = A = l^2 \Rightarrow \boxed{l = 6{,}3753 \cdot 10^{-3}\,cm}$

Asamblea

(6) $V_D = 650\,mV$

Asumimos de cumplo que el nivel de exceso de portadores minoritarios en los bordes de la zona desierta sea mucho menor que la concentración de mayoritarios, es decir:

$$n(-x_p) \ll N_a \quad y \quad p(x_n) \ll N_d$$

$$I = I_0\left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\right] = 5 \cdot 10^{-17} A \cdot \left[\exp\left(\frac{1{,}602 \cdot 10^{-19}\,C \cdot 0{,}65\,V}{CV/K \cdot 1{,}381 \cdot 10^{-23} \cdot 300\,K}\right) - 1\right]$$

$$\boxed{I = 4{,}1163 \cdot 10^{-6}\,A}$$

Esto sólo es válido bajo la hipótesis de bajo nivel de inyección.

c)

Multiplicando las densidades de corrientes por el área se obtienen los aportes de huecos y electrones:

$$J_n = q \frac{n_i^2}{N_a} \frac{D_n}{w_p - x_p} \left(\exp\left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right)$$

$$J_p = q \frac{n_i^2}{N_d} \frac{D_p}{w_n - x_n} \left(\exp\left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right)$$

reemplazando con los datos:

$$I_n = 1{,}602 \cdot 10^{-19}\,C \; \frac{(6{,}822 \cdot 10^{9}\,cm^{-3})^2}{2{,}5 \cdot 10^{18}\,cm^{-3}} \cdot \frac{5\,cm^2/s}{0{,}5 \cdot 10^{-4}\,cm - 0} \left[\exp\left(\frac{1{,}602 \cdot 10^{-19} \cdot 0{,}65\,V}{1{,}381 \cdot 10^{-23}\,VC/K \cdot 300\,K} \right) - 1 \right]$$

$$\cdot \; 4{,}0644 \cdot 10^{-5}\,cm^2$$

$$\boxed{I_n = 9{,}9789 \cdot 10^{-7}\,A} \Rightarrow \frac{I_n}{I} \cdot 100\% = \boxed{24{,}25\%}$$

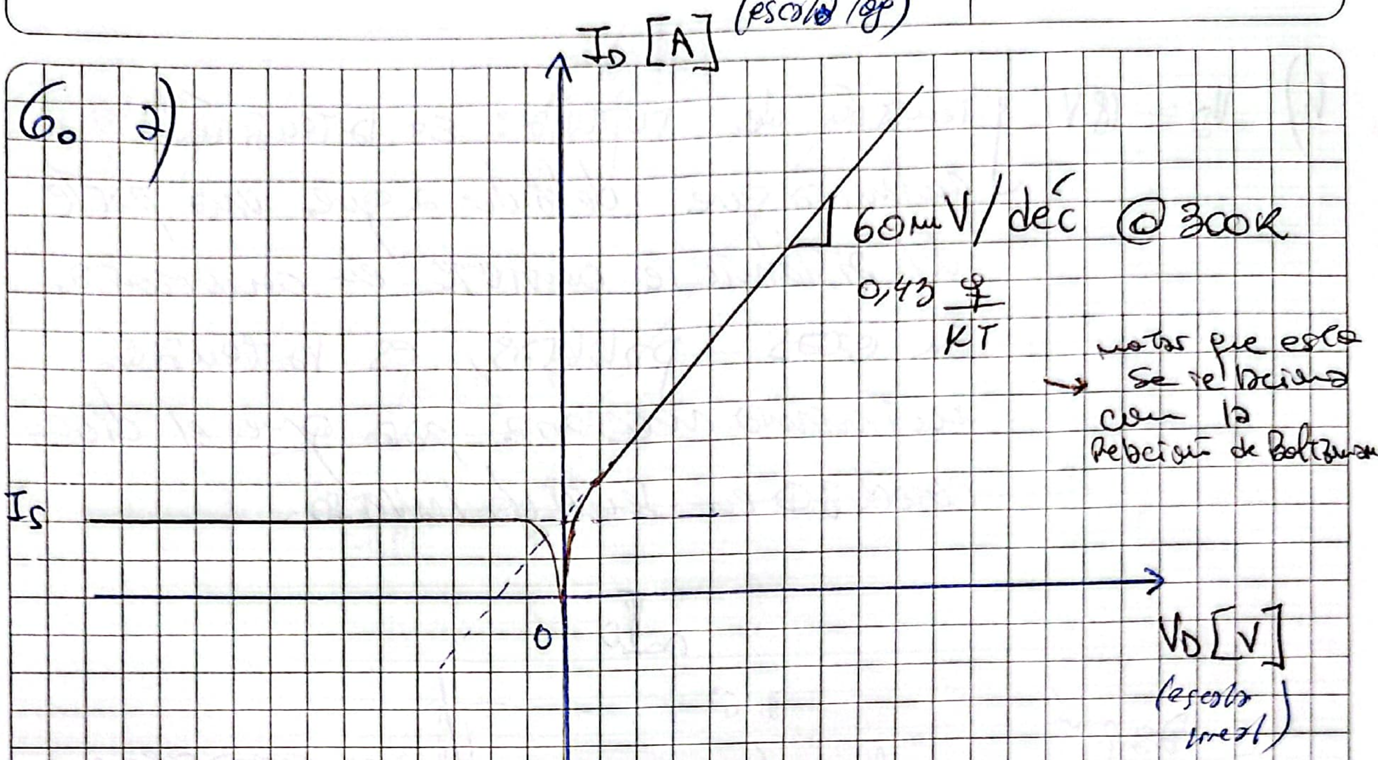
$$I_p = 1{,}602 \cdot 10^{-19}\,C \; \frac{(6{,}822 \cdot 10^{9}\,cm^{-3})^2}{4 \cdot 10^{17}\,cm^{-3}} \cdot \frac{5\,cm^2/s}{1 \cdot 10^{-4}\,cm - 0} \left[\exp\left(\frac{1{,}602 \cdot 10^{-19} \cdot 0{,}965\,V}{1{,}381 \cdot 10^{-23}\,VC/K \cdot 300\,K} \right) - 1 \right]$$

$$\cdot \; 4{,}0644 \cdot 10^{-5}\,cm^2$$

$$\boxed{I_p = 3{,}1184 \cdot 10^{-6}\,A} \Rightarrow \frac{I_p}{I} \cdot 100\% = \boxed{75{,}75\%}$$

Asamblea

6. 2)



Como se puede observar en la tabla desciende de a 60 mV / década, por lo que si aproximo linealmente cuando $V_D = 0$, puedo deducir que la corriente de saturación vale:

60 mV — 1 déc

600 mV — $\boxed{10 \text{ déc}}$ $\Rightarrow$ 600 mV — $3 \cdot 10^{-6}$ A $\Rightarrow$

0 mV — $3 \cdot 10^{-16}$ A

(notar que en la tabla a menor tensión menor corriente).

Entonces

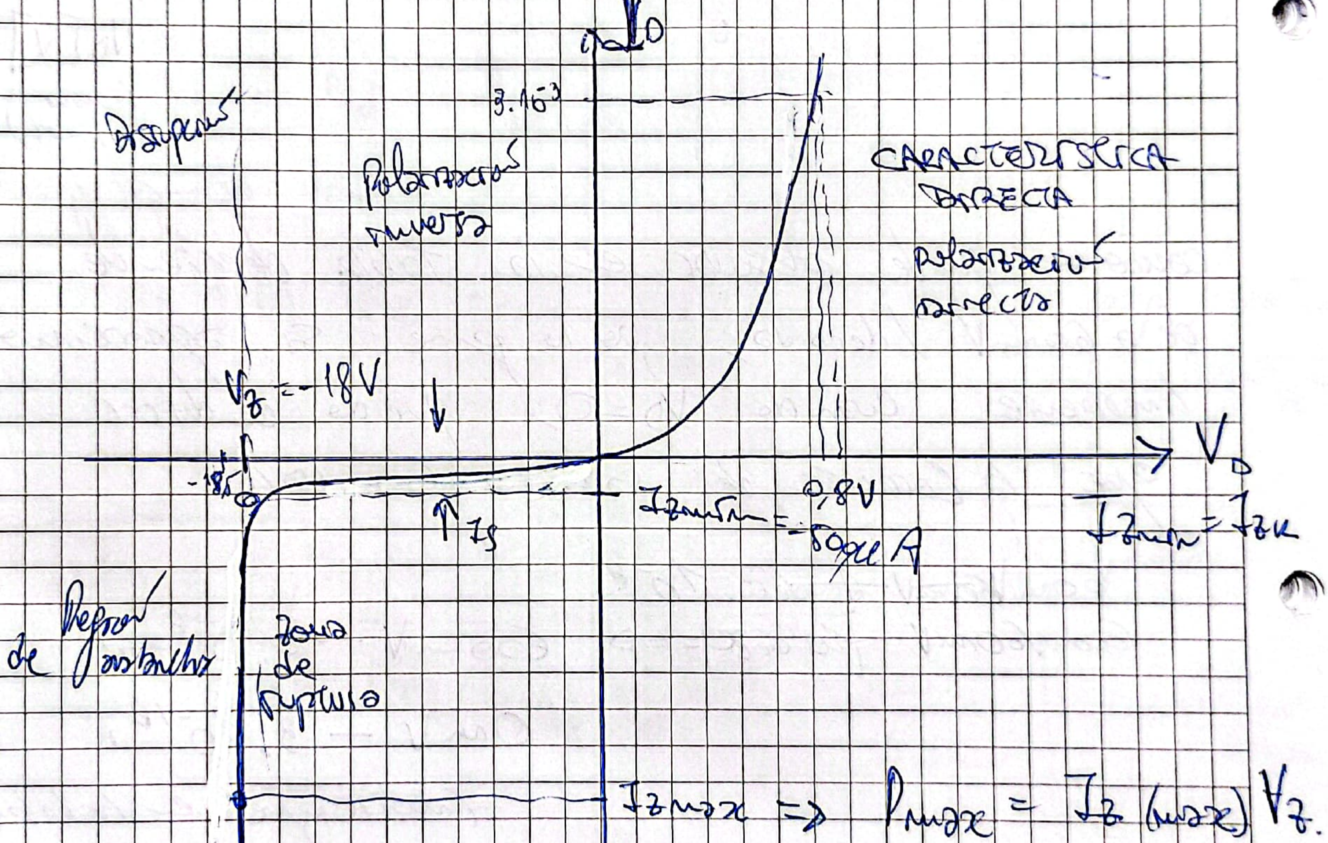
$$I_0 = \boxed{I_S \approx 3 \cdot 10^{-16} \text{ A}}$$

También vale aclarar que

Si $V_D > 5 V_{th} \Rightarrow I_D \approx I_0 \exp\left(\frac{V_D}{V_{th}}\right)$

Si $V_D < -5 V_{th} \Rightarrow I_D \approx -I_0 \sim 0$

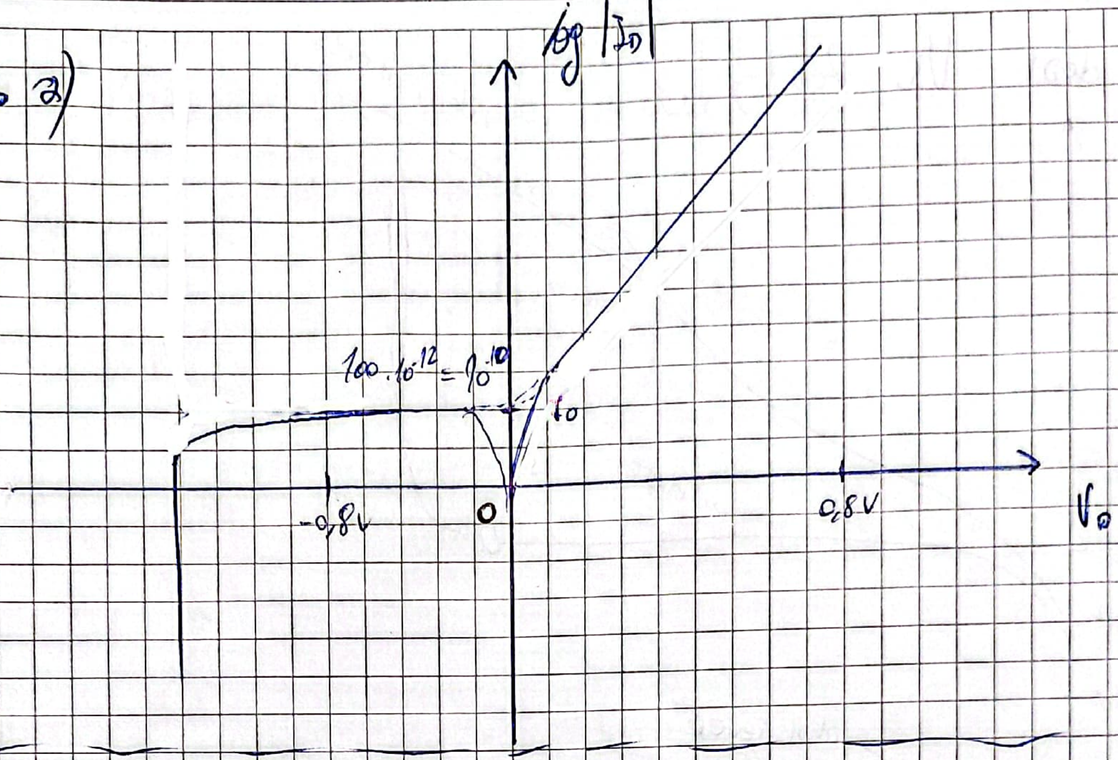
b) $V_D = -18V$ } Tensión de ruptura: Es la tensión mínima que debido a que una parte del aislante se convierte en conductora. En otras palabras, es la tensión mínima necesaria para que el diodo conduzca en sentido inverso.



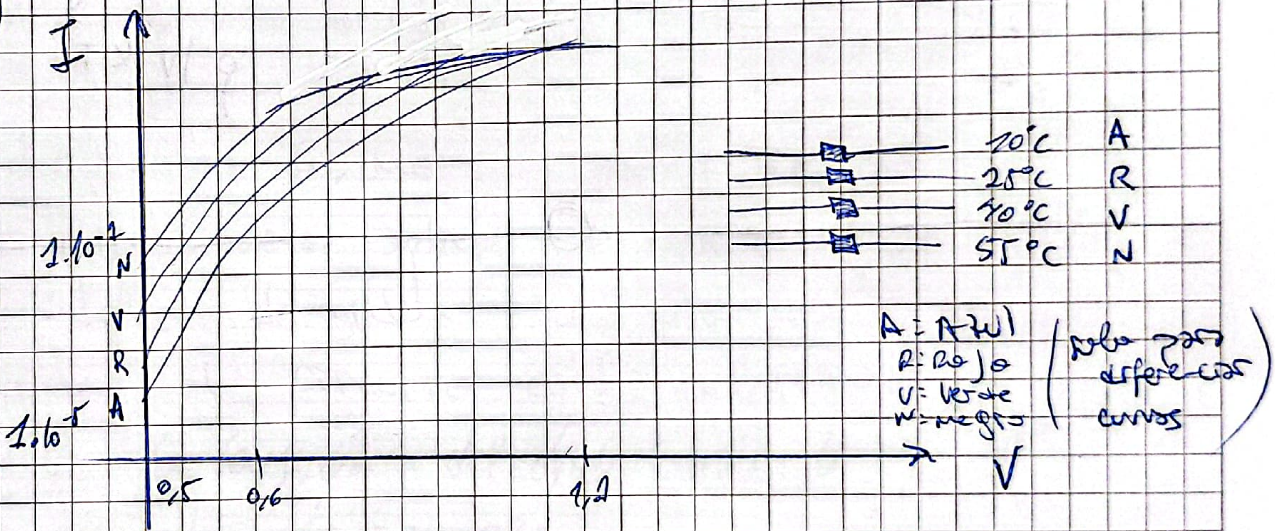
V_Z sería $-18V$

$I_{Zmin} = -500 \mu A$

7. a)

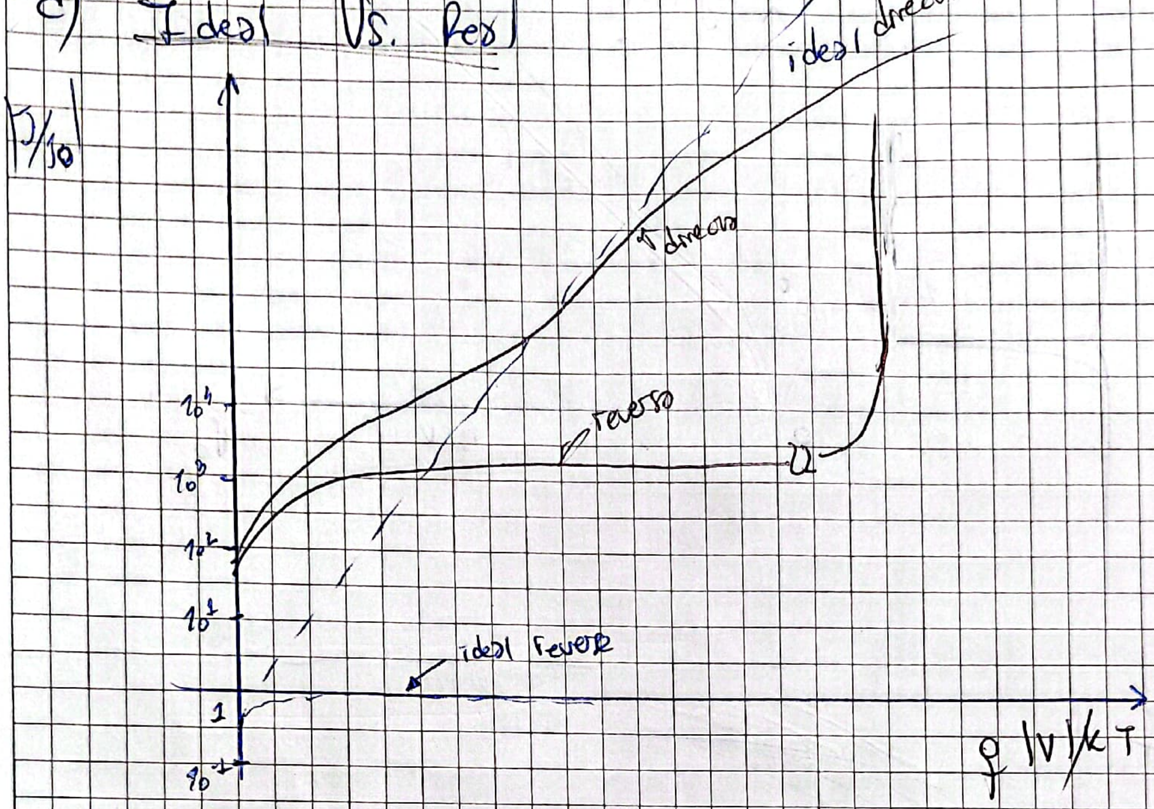


b)



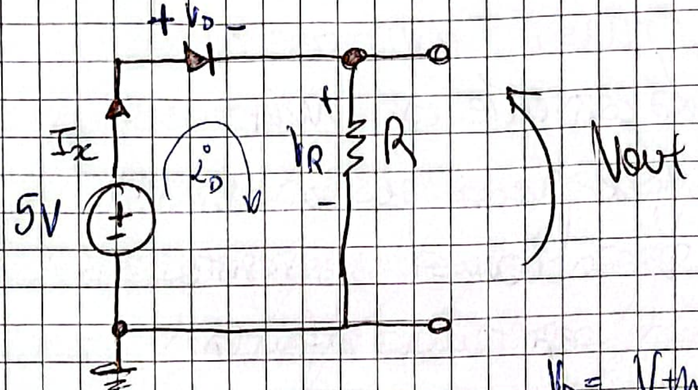
La corriente aumenta con la temperatura ya que aumenta n_i y dicho aumento es mayor que la disminución de μ.

c) Ideal Vs. Real



PARTE II: Modelo de orden 0

8.



$$V_D = V_{th} \ln\left(\frac{I_D}{I_0} - 1\right)$$ para T = 300K

$V_{th} = 25,9 mV$

$5V - V_R - V_D = 0$

ley de Ohm

$$5V - i_D \cdot R - V_{th} \ln\left(\frac{I_D}{I_0} + 1\right) = 0$$ } Forma directa en caso de conocer I_D

Si desconozco I_D, no es posible resolverlo, por lo que debo aplicar el MODELO DE ORDEN 0. El modelo de orden 0 plantea que cuando el circuito está polarizado en directa la tensión del diodo vale la tensión de encendido, la así es:

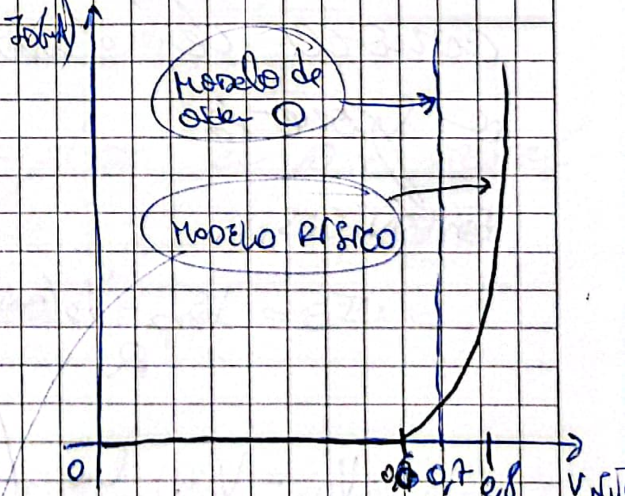
$$\left[\begin{array}{l} V_D = V_D(ON) = 0,7 V \\ I_D > 0 \end{array}\right.$$

$I_D = 0,1 mA \Rightarrow V_D \approx 596 mV$

$I_D = 1 mA \Rightarrow V_D \approx 656 mV$

$I_D = 10 mA \Rightarrow V_D \approx 716 mV$

$I_D = 100 mA \Rightarrow V_D \approx 775 mV$



Si me alejo de valores entre 0,6V y 0,8V de tensión, entonces $I_D = 0$

* formas más simplificadas de representar este modelo.

Asamblea

En inversa

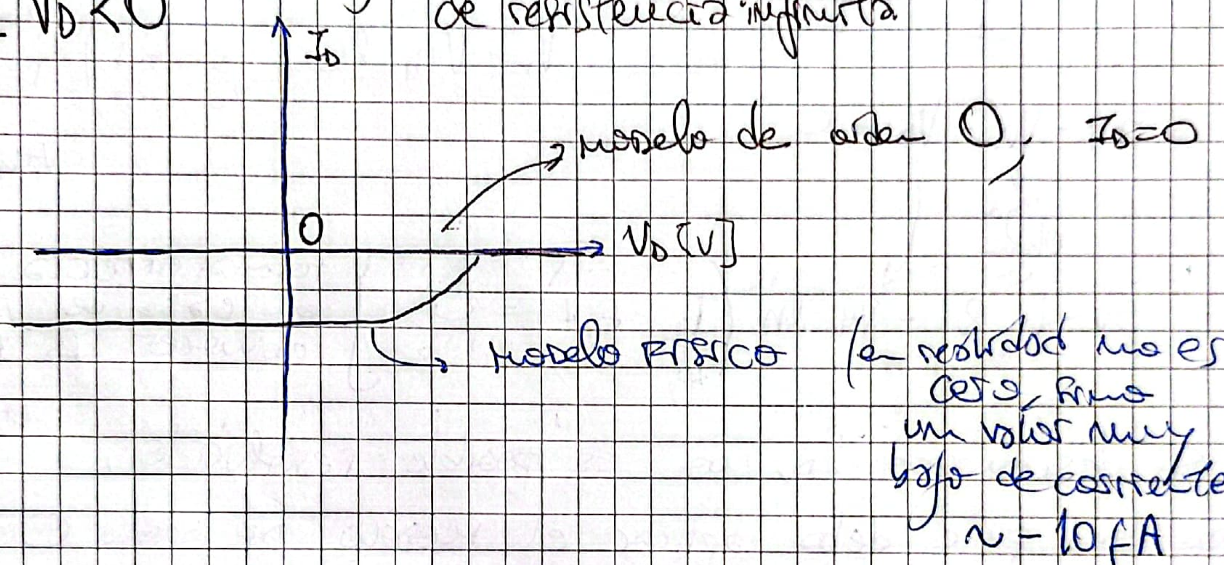
$I_D = -I_0$

$I_0 << 0{,}1\,mA$

$I_D \approx 0$

$V_D < 0$

La corriente es nula y se puede pensar al diodo como un resistor de resistencia infinita



Para poder resolver el circuito voy a tener que resolver el circuito o en DIRECTA o en INVERSA (si no tengo I_D), para ello voy a tener que conocer de antemano la polarización o suponerla.

Entonces.

$$I_D = \frac{V_{sup} - V_D(ON)}{R}$$

$V_D(ON)$: cte = 0,7 (para la cátedra)

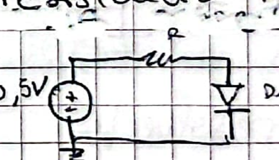
$$V_D = V_{th} \ln\left(\frac{I_D}{I_0} + 1\right)$$

una forma de resolverlo puede ser suponer un valor de V_D o I_D y calcular e iterar hasta que no cambien demasiado y así se tendrán los valores.

no es posible calcularlo de forma exacta.
Este ciclo iterativo resulta útil para obtener valores coherentes.
Si el resultado no se corresponde con la suposición (por ejemplo supuse polarización directa), entonces simplemente llegué a la conclusión de que la polarización es inversa, o viceversa.

¿Cuándo NO se puede aplicar el modelo de orden 0?

- Si la tensión de alimentación es muy baja, menor al valor de $V_D(on) = cte = 0,7V$, el diodo estará en directa débil, por lo que
  $I_D \approx 0$ y la tensión en R es casi nula $V_R \approx 0$.
  Entonces, la tensión sobre el diodo será la tensión del nodo positivo, que puede o no ser la de alimentación (es una resistencia infinita por la cual no circula corriente)

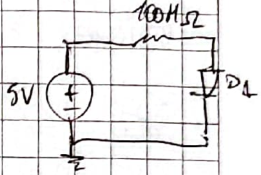


  Para obtener I_D debo reemplazar en la expresión de corriente vista anteriormente $I_D = I_0 \left(\exp\left(\frac{V_D}{V_{th}}\right) - 1\right)$
  Si se aplica el modelo de orden 0, se obtiene un absurdo.

- Otro posible caso es si la resistencia en el circuito es muy grande, lo que limita la corriente a un valor muy bajo (prácticamente cero, aunque positivo)

Entonces si R limita la corriente $I_D \approx 0 > 0 \Rightarrow V_D \approx 0$
ya que se encuentra en directa débil.

$$I_D \approx \frac{V_{sup}}{R}$$



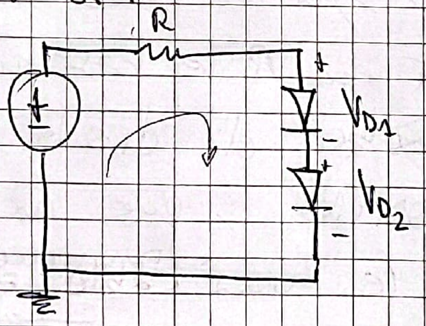
Finalmente, calculo V_D con la expresión:

$$V_D = V_{th} \ln\left(\frac{I_D}{I_0} + 1\right) < V_D(ON)$$

- Otro ejemplo donde NO se puede utilizar el modelo de orden 0 es si se tienen dos diodos distintos en serie.

No se puede afirmar que $V_{D1} = V_{D2} = V_D(ON)$

Por ejemplo si:



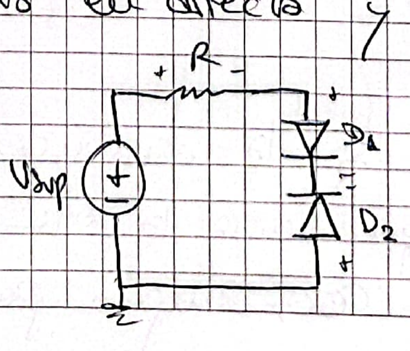
$V_{D2} < V_{D1}$

$I_{02} > I_{01}$

Para resolverlo se podría hacer una iteración con el modelo físico.

- Otro posible caso sería, por ejemplo, si un diodo está en directa y otro en inversa.

Por ejemplo:



$I_{D2} = -I_0$

$I_{D1} = I_0$

$V_{D1} = V_{th} \ln\left(\frac{I_0}{I_0} + 1\right)$

$V_{D2} \approx V_{sup}$

En este caso, el diodo que está en inversa (D_2) limitará la corriente, porque precisamente su corriente está limitada al coeficiente de saturación inversa. Esto fuerza que sobre el diodo 1 circule la misma corriente, pero en sentido contrario. Entonces:

$I_{D_2} = -1 \cdot 10^{-14}\,A$
$I_{D_1} = 1 \cdot 10^{-14}\,A$
(para $I_0 = 10\,fA$)

por lo que ambos poseen valores de corriente muy bajos, cercanos a cero.

Reemplazando en la ecuación de tensión para el uso del físico:

$$V_{D_1} = V_{th} \ln\left(\frac{I_0}{I_0} + 1\right) = 17{,}95\,mV \approx 18\,mV$$

$$V_{D_2} \approx V_{sup}$$

(casi toda la tensión cae sobre el diodo 2)

* también hay unos ejemplos (diodos en paralelo, ambos polarizados en directa / inversa o con diferente polarización).

Entonces, analizando el ejercicio 8.
si la tensión de $V_D(on) = 0V$ y $V_{sup} = V_x$ está entre 0 y 5V, toda la tensión cae sobre el resistor R, entonces:

$$V_x = \underbrace{V_D}_{=0} + V_R \Rightarrow I_x \cdot R = V_x$$

$$I_x = \frac{V_x}{100\,\Omega} \quad \forall\, V_x \in (0,5)$$

Asamblea

Si $V_X < 0$, entonces el diodo está en inverso

$I_X = I_D \approx 0$

$V_D < 0$

entonces, la corriente $I_X = 0$ y no circula corriente por el mismo, lo que significa que

$$V_D = V_X$$

Se deduce de que:

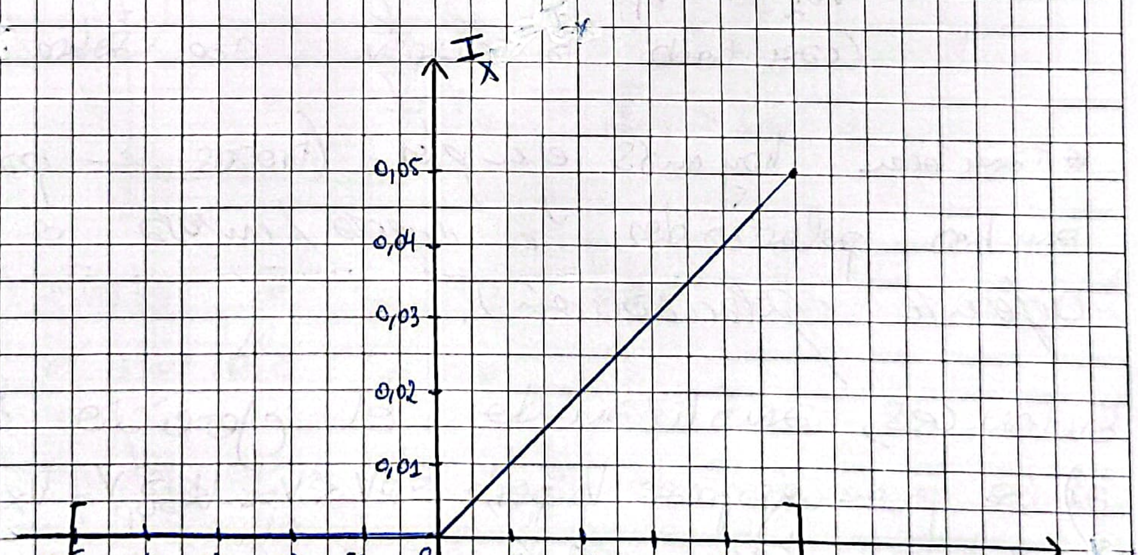
$$V_X - \underbrace{I_X}_{\approx 0} R - V_D = 0 \Rightarrow V_X = V_D$$

Puesto que Vout es la tensión sobre el resistor

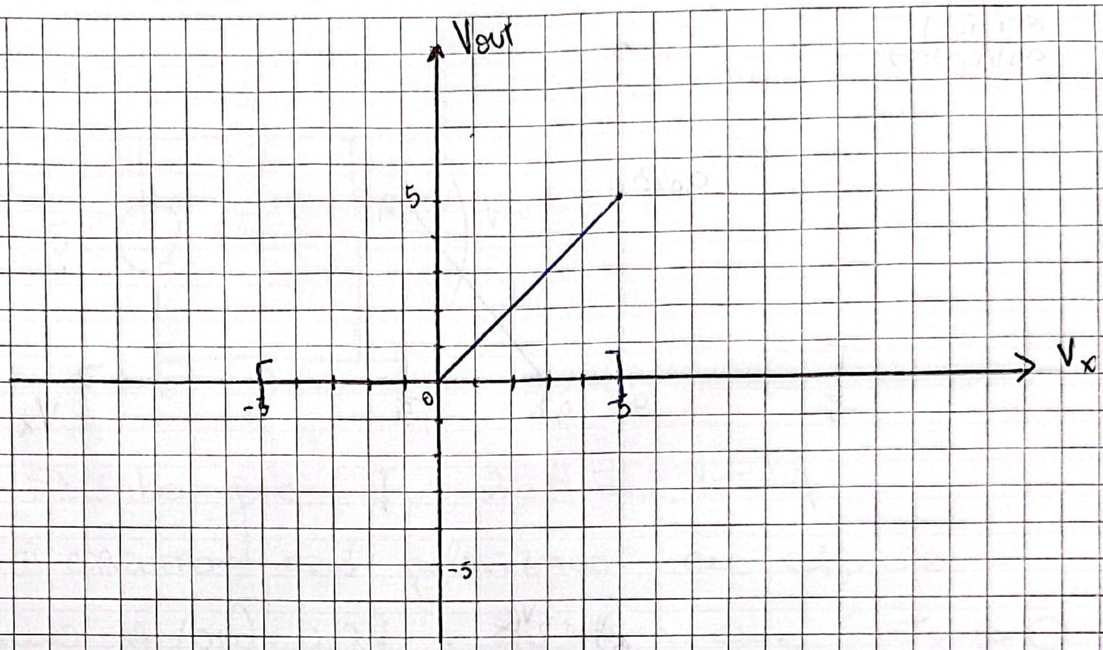
$V_R = V_X$ si $5 \geq V_X \geq 0$

$V_R = 0$ si $-5 \leq V_X < 0$

d)



(b)



(c) Si $V_D(ON) = 0,7V$

Si $V_{sup} \in [0,7V, 5V]$ el circuito está en directa y $V_D = cte$, tal que:

$$V_S - I_x \cdot R - V_D = 0$$

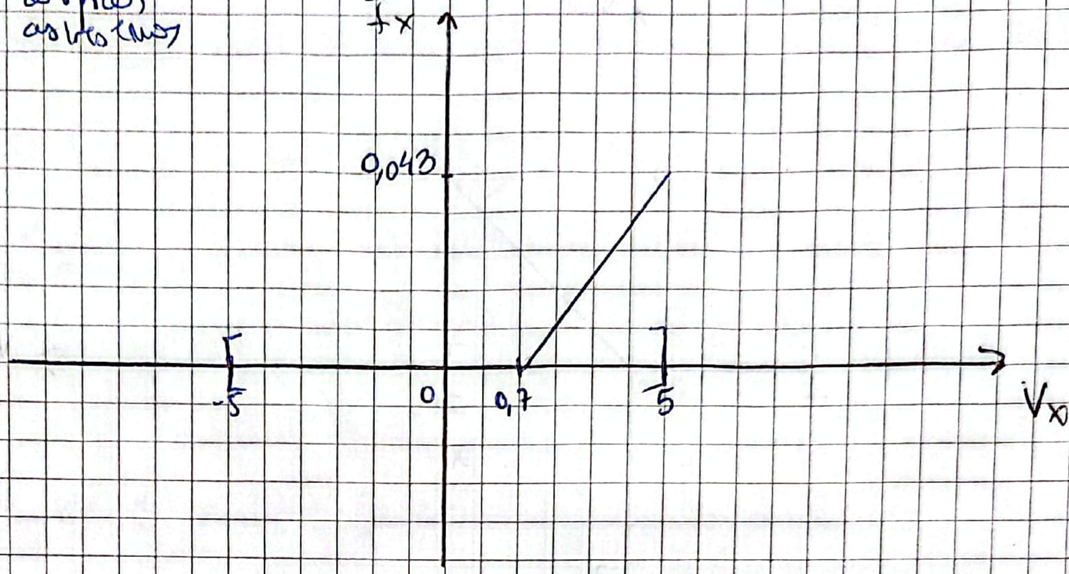
$$\frac{V_S - V_D}{R} = I_x = \frac{V_x - 0,7V}{100\Omega} \quad \forall\ V_x \geq 0,7V \text{ y } V_x \leq 5V$$

Si $0 \leq V_x < 0,7V$ está en directa débil, por lo que NO puedo aplicar el modelo de orden 0, pero $I_D \approx 0$ y la tensión sobre R es casi nula. Entonces vale que:

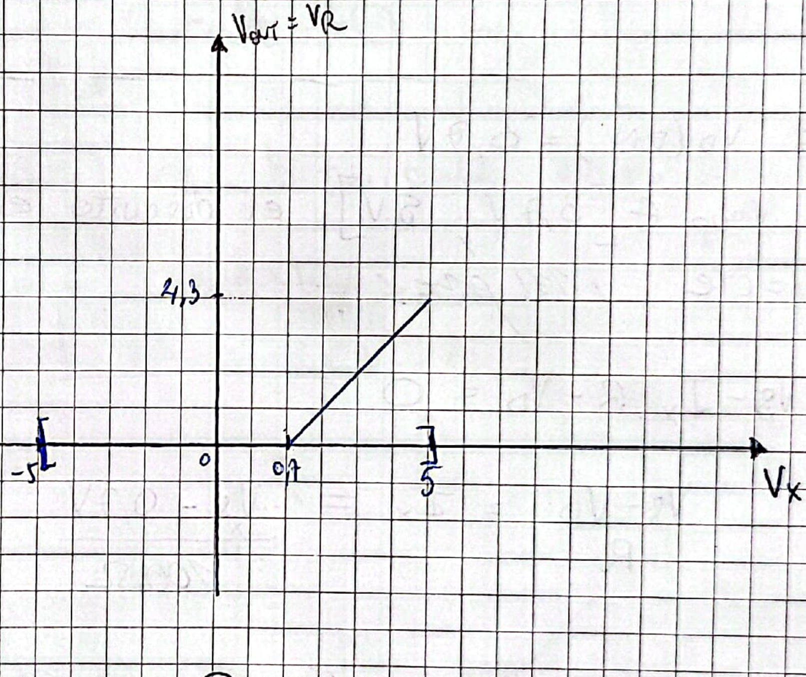
$$V_x = V_S = V_D$$

Para $V_x < 0$ el diodo está en inversa y ocurre de forma similar que $I_x \approx 0$, entonces, por R no cae prácticamente tensión y $V_D < 0$. $V_D = V_x$.

i. gráficos asintóticos

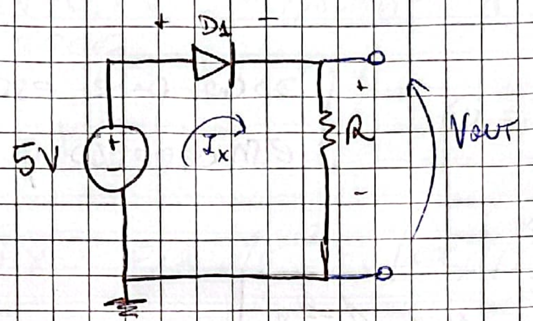


ii.



Asamblea

9. a)



$I_x = 2mA$

Se sabe que $I_x = 2mA = 2\cdot10^{-3}A$

El circuito está polarizado en directo

Tomo $V_D(ON) = 0,7V$, por lo que $I_x > 0$ se cumple ya que es $2\cdot10^{-3}A > 0$

i. $V_D - I_x\cdot R - V_D = 0$

$$5V - 2\cdot10^{-3}A\cdot R - 0,7V = 0 \Rightarrow \boxed{R = 2150\,\Omega}$$

ii. Sabiendo que $I_0 = 0,1\,pA = 0,1\cdot10^{-12}A$

$$I_D = I_0\left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\right] \quad = \frac{V_D}{V_{th}}$$

$$2\cdot10^{-3}A = I_D = I_x = 0,1\cdot10^{-12}A\left(\exp\left(\frac{1,602\cdot10^{-19}C\cdot V_D}{1,381\cdot10^{-23}J/K\cdot300K}\right)-1\right)$$

o bien:

$$2\cdot10^{-3}A = 0,1\cdot10^{-12}A\left(\exp\left(\frac{V_D}{V_{th}}\right)-1\right)$$

Tal que $V_{th} \approx 25,9\,mV$

despejando... $V_D = 0,6134V \approx \boxed{0,61V}$

Entonces:

$$V_R = V_x - V_D = 5V - 0,61V = \boxed{4,39V}$$

b) De forma similar:

i°)

$$V_x - I_x \cdot R - V_D = 0$$ } Dado que está en directa y $V_D(ON) = 0{,}7V$

$$\frac{4{,}3\,V}{1000\Omega} = I_x$$

$$\boxed{I_x = 4{,}3 \cdot 10^{-3} A}$$

---

ii°.

$$I_x = I_0 \left(\exp\left(\frac{V_D}{V_{th}}\right) - 1 \right)$$

$$= I_x = 0{,}1 \cdot 10^{-12} A \left(\exp\left(\frac{V_D}{25{,}9\,mV}\right) - 1 \right)$$

$$V_x - I_x \cdot R - V_D = 0$$

$$5V - I_x \cdot 1000\Omega - V_D = 0$$

$$\frac{5V - V_D}{1000\Omega} = I_x$$

El problema es que no es posible despejar de ambas ecuaciones, por lo que, se sugiere, iterar probando valores hasta que se obtenga una relación que prácticamente no cambie, por ejemplo tomo $V_D = 0{,}5\,V$

Si $V_D = 0{,}5\,V$

$$I_x = 0{,}1 \cdot 10^{-12} A \left(\exp\left(\frac{500\,mV}{25{,}9\,mV}\right) - 1 \right) =$$

$$I_x = 2{,}4223 \cdot 10^{-5} A$$

Ahora remplazo este valor en la otra ecuación

Asamblea

$$\frac{5V-0,5V}{1000} = 4,5.10^{-3}\ A$$ no se corresponden

Si $V_D = 1V$

$$I_X = 0,1.10^{-12}A.\left(\exp\left(\frac{1000}{25,9}\right)-1\right) = 5863,09A$$ (para este subió)

$$\frac{5V-1V}{1000\Omega} = 4.10^{-3}A$$ (para este caso bajó).

entonces, si $V_D > 1V$ seguirá subiendo y baja de para cada caso.

Pruebo $V_D = 0,7V$

$$I_X = 0,1.10^{-12}A\left(\exp\left(\frac{700mV}{25,9mV}\right)-1\right) = 0,0546A$$

$$\frac{5V-0,7V}{1000} = 4,3.10^{-3}A$$

se acercan más

pruebo $V_D = 0,6V$

$$I_X = 0,1\ 10^{-12}A\left(\exp\left(\frac{600}{25,9}\right)-1\right) = 1,150.10^{-3}A$$

$$I_X = \frac{5V-0,6V}{1000\Omega} = 4,4.10^{-3}A$$

están muy cerca

verifico para $V_D = 0,55V$

$$I_X = 0,1.10^{-12}\left(\exp\left(\frac{550}{25,9}\right)-1\right) = 1,669.10^{-4}$$

$$I_X = \frac{5V-0,55V}{1000\Omega} = 4,45.10^{-3}A$$

se aleja

prueba $V_D = 650mV$

$$I_x = 0{,}1 \cdot 10^{-12}\left(\exp\left(\frac{650}{25{,}9}\right)-1\right) = 7{,}9301 \cdot 10^{-3} A$$

$$I_x = \frac{5V - 0{,}650V}{1000} = 4{,}35 \cdot 10^{-3} A$$

prueba $V_D = 635mV$

$$I_x = 0{,}1 \cdot 10^{-12}\left(\exp\left(\frac{635}{25{,}9}\right)-1\right) = 4{,}4438 \cdot 10^{-3} A$$

$$I_x = \frac{5V - 0{,}635V}{1000} = 4{,}365 \cdot 10^{-3} A$$

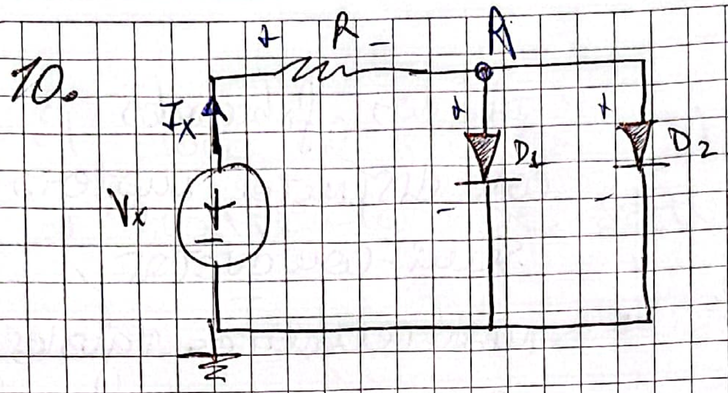
Si continuo iterando puedo llegar a un resultado más preciso, pero para dicho valor $V_D = 635mV$ considero que está bien.

No es posible resolverlo de forma analítica.

c) El modelo de orden 0 resulta útil para obtener resultados aproximados y resolver el circuito rápidamente. También resulta útil para entender el funcionamiento del circuito velozmente. Ante resultados más precisos se deben utilizar simulaciones u otros métodos.

Asamblea

10.



Dado que $A_{D1} = 2A_{D2}$, a partir de la ecuación de corriente, se llega a que:

$$I = \underbrace{q\, A\, n_i^2 \left(\frac{1}{N_a} \frac{D_n}{W_p - x_p} + \frac{1}{N_d} \frac{D_p}{W_n - x_n} \right)}_{I_0} \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right)$$

$$I = I_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right)$$

es posible afirmar que

$I_{D1} = 2\, I_{D2}$ (suponiendo que en todos los otros sentidos son iguales) por ser el área de D_2 el doble de la del D_1.

Al estar en paralelo con misma polarización (DIRECTA)

Es posible afirmar que la tensión sobre ellos será la misma

Dado que: modelo de orden 0

$V_X - V_R - \underbrace{V_{D1//D2}}_{\text{simplemente para nombrarlo}} = 5V - I_X \cdot R - 0{,}7V = 0 \Rightarrow$

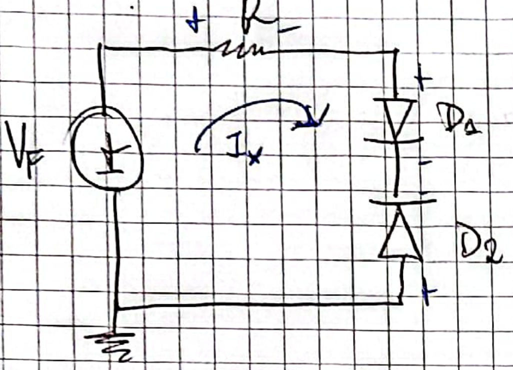
$I_X = \frac{4{,}3V}{100\Omega} = \boxed{0{,}043A}$

Sabiendo que, por ley de nodos)

$I_X = I_{D1} + I_{D2} = 3\, I_{D2} = 0{,}043A \Rightarrow \boxed{I_{D2} = 0{,}0143A}$

y $\boxed{I_{D1} = 0{,}0286A}$

11.



Diodos fabricados con distinto material semi-conductor, manteniendo iguales su geometría y niveles de dopaje.

$I_{o_1} = 100\,fA = 100 \cdot 10^{-15} A$

$I_{o_2} = 10\,fA = 10 \cdot 10^{-15} A$

$V_F = 6{,}3\,V$

$R = 1\,K\Omega = 1000\,\Omega$

El diodo en inversa (D_2) limitará la corriente, porque precisamente su corriente está limitada al coeficiente de saturación inversa.

Esto fuerza hace que sobre el diodo 1 circule la misma corriente, pero en sentido contrario.

I_x posee valores cercanos a cero

$I_x = I_{D1}$

$I_{D_2} = -I_{D_1} = -I_{o_2}$ (por estar en inversa) } esto significa que la caída sobre la resistencia R será cercana a cero.

$V_{D_1} = V_{th} \ln\left(\frac{I_{D1}}{I_o} + 1\right)$ $\rightarrow = -I_{D_2}$

$V_{D_2} \approx V_F$ (la mayor parte de la tensión cae en V_{D_2})

V_R es cercana

El diodo 2 invierte la corriente a su corriente de saturación inversa:

$I_{D2} = -I_{O2} = -I_{D1}$, entonces:

$$\underbrace{10 \cdot 10^{-15} A}_{= I_{O2} = I_{D1}} = \underbrace{100 \cdot 10^{-15}}_{= I_{O1}} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{D1}}{V_{th}}\right) - 1 \right)$$

o sea:

$$V_{D1} = V_{th} \ln \left(\frac{10 \cdot 10^{-15} A}{100 \cdot 10^{-15} A} + 1 \right)$$

$$\boxed{V_{D1} = 2,4685 mV}$$

$$V_{R1} = I_R \cdot R = I_{O2} \cdot R = 10 \cdot 10^{-15} A \cdot 100 \Omega$$

$$\boxed{V_{R1} = 1 \cdot 10^{-12} V}$$

$$V_F - V_{D1} - V_{R1} - V_{D2} = 0$$

$$6,3V - 2,4688 \cdot 10^{-3} V - 1 \cdot 10^{-12} V = \boxed{V_{D2} = 6,2975V}$$

• Parte III: Modelo de pequeña señal

12. $V_D = 720 mV$

$I_0 = 5 \cdot 10^{-17} A$

$W_p = 0,5 \mu m = 0,5 \cdot 10^{-6} m = 0,5 \cdot 10^{-4} cm$

$W_n = 1 \mu m = 1 \cdot 10^{-6} m = 1 \cdot 10^{-4} cm$

$N_A = 2,5 \cdot 10^{18} cm^{-3}$

$N_D = 4 \cdot 10^{17} cm^{-3}$

$D_n = 5 \, cm^2/s$

$D_p = 5 \, cm^2/s$

a) No es posible, ya que difieren en un solo orden de magnitud y en la contestación se considera como una diferencia mucho mayor a al menos dos órdenes de magnitud.

$$2,5 \cdot 10^{18} cm^{-3} > 4 \cdot 10^{17} cm^{-3}$$

b) Considerando que $W_p >> x_p$ y $W_n >> x_n$, y sabiendo que:

$$\underbrace{T_{Tp} = \frac{(W_n - x_n)^2}{2D_p} \approx \frac{W_n^2}{2D_p}}_{\text{tiempo de tránsito de los electrones a través de la región p-QNR}} \qquad \underbrace{T_{Tn} = \frac{(W_p - x_p)^2}{2D_n} \approx \frac{W_p^2}{2D_n}}_{\text{tiempo de tránsito de los huecos a través de la región n-QNR}}$$

Asamblea

reemplazando por sus valores:

$$\tau_{Tp} = \frac{(1 \cdot 10^{-4}\, cm)^2}{2 \cdot 5\, cm^2/s} = \boxed{1 \cdot 10^{-9}\, s}$$

$$\tau_{Tm} = \frac{(0{,}5 \cdot 10^{-4}\, cm)^2}{5\, cm^2/s} = \boxed{5 \cdot 10^{-10}\, s}$$

---

c)

capacidad de difusión de los huecos en la región m-QNR $\left\{ C_{dm} \simeq \frac{q}{KT} \tau_{Tp} I_p \right.$

capacidad de difusión de los electrones en la región p-QNR $\left\{ C_{dp} \simeq \frac{q}{KT} \tau_{Tm} I_m \right.$

$$C_{d_{total}} = C_d = C_{dm} + C_{dp} = \frac{q}{KT} \tau_T \cdot I_T$$

$$\tau_T = \frac{\tau_{Tm} I_m + \tau_{Tp} I_p}{I}$$

Del ejercicio 8.a se sabe que:

$$A = 4{,}0644 \cdot 10^{-5}\, cm^2 \qquad \phi_B = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{N_a N_d}{n_i^2}\right)$$

$$C_j = A \sqrt{\frac{q\, \varepsilon_s\, N_a N_d}{2(\phi_B - V)(N_a + N_d)}} \qquad \phi_B = 0{,}9725\, V$$

$$C_j = 4{,}0644 \cdot 10^{-5}\ cm^2 \cdot \sqrt{\frac{(1{,}602 \cdot 10^{-19}\ C)\ 11{,}7 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-14}\ F/cm \cdot 2{,}5 \cdot 4 \cdot 10^{35}\ cm^{-6}}{2 \cdot (0{,}9725\ V - 0{,}720\ V)(2{,}5 \cdot 10^{18}\ cm^{-3} + 4 \cdot 10^{17}\ cm^{-3})}}$$

$$\boxed{C_j = 1{,}3678 \cdot 10^{-11}\ F}$$

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{V}{V_{th}}\right) - 1\right]$$

$$I = 5 \cdot 10^{-17}\ A \left[\exp\left(\frac{0{,}720}{25{,}9}\right) - 1\right]$$

$$\boxed{I = 5{,}9159 \cdot 10^{-5}\ A}$$

Para obtener J_p e J_n:

$$J_p = q \frac{n_i^2}{N_d} \frac{D_p}{W_n - x_n} \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\right)$$

$$J_n = q \frac{n_i^2}{N_a} \frac{D_n}{W_p - x_p} \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\right)$$

Entonces:

$$I_p = A\ q \frac{n_i^2}{N_d} \frac{D_p}{W_n - x_n} \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\right)$$

$$I_n = A\ q \frac{n_i^2}{N_a} \frac{D_n}{W_p - x_p} \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\right)$$

reemplazando por los valores se llega a que:

$I_m = 1{,}4948 \cdot 10^{-5}\,A$

$I_p = 4{,}6714 \cdot 10^{-5}\,A$

notar que la suma da I.

Entonces:

$$\tau_T = \frac{5 \cdot 10^{-10}\,s \cdot 1{,}4948 \cdot 10^{-5}\,A + 1 \cdot 10^{-9}\,s \cdot 4{,}6714 \cdot 10^{-5}\,A}{5{,}9159 \cdot 10^{-5}\,A}$$

$$\tau_T = 9{,}1624 \cdot 10^{-10}\,s$$

$$C_{dif} = \frac{q}{KT}\,\tau_T \cdot I_T$$

$$\boxed{C_{dif} = 2{,}0959 \cdot 10^{-12}\,F}$$

$$C_T = C_j + C_{dif}$$

$$C_T = 1{,}3678 \cdot 10^{-11}\,F + 2{,}0959 \cdot 10^{-12}\,F$$

$$\boxed{C_T = 1{,}5774 \cdot 10^{-11}\,F}$$

$$g_d \simeq \frac{q\,I_D}{KT}$$ en polarización directa

$$\boxed{g_d \simeq 2{,}2875 \cdot 10^{-3}\,\frac{1}{\Omega}} \Rightarrow r_d = \frac{1}{g_d}$$

$$\boxed{r_d = 437{,}15\,\Omega}$$

---

d) $C_j > C_d$ por lo que la capacidad de juntura es más significativa en ESTE CASO.

---

e) En directa, una vez que la capacidad de difusión supera el valor de capacidad de juntura satura y diverge.

NO "Creo" que como Na no es tanto mayor a Nd por eso se dieron esos resultados, pero normal(mente). Tiene que ver con $(\phi_B - V)$

Cd domina en polarización directa fuerte $(\sim e^{qV/KT})$

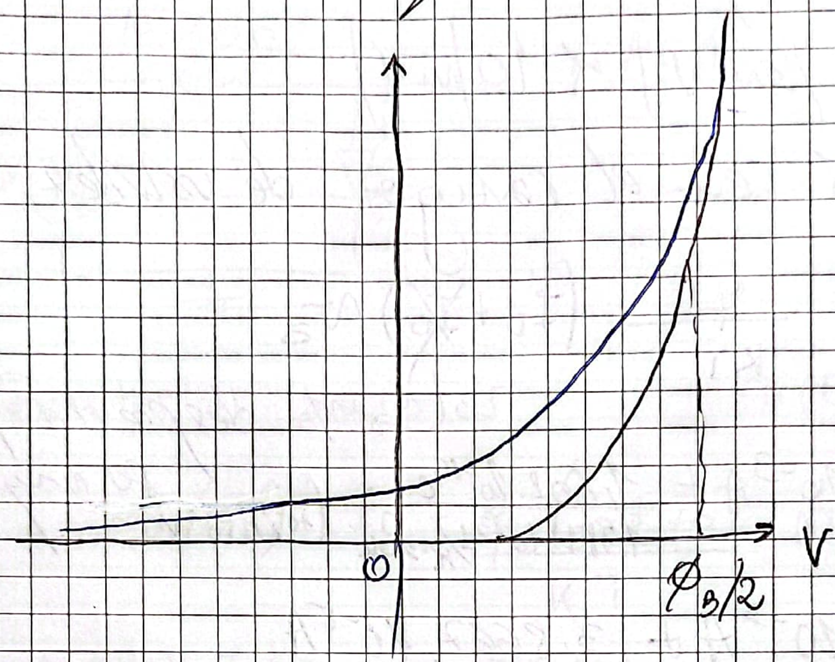
C_j domina en polarización inversa y directa débil $\left(\sim \frac{1}{\sqrt{\phi_B - V}}\right)$

Para polarización directa fuerte, el modelo de C_j es inválido (diverge). Por convención se toma se considera que C_j satura al valor correspondiente a $V = \frac{\phi_B}{2}$, es decir:

$$C_{j\,max} = \sqrt{2}\, C_{j0}$$

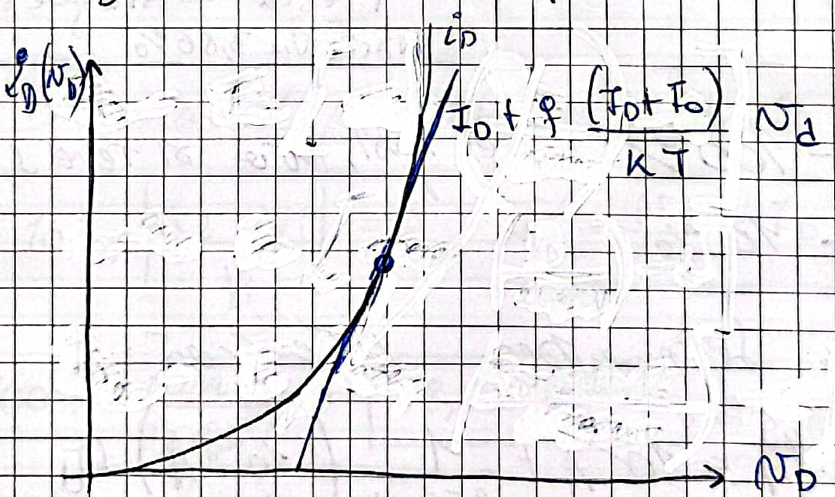
Asamblea

Dependencia con la polarización de C_j y C_d



1g. $I_D = 1mA = 1 \cdot 10^{-3} A$

a)



Aproximamos la curva característica del diodo con una recta. Ambas coinciden en el punto de polarización, también llamado punto de reposo o de trabajo.

Entonces:

Esto es válido mientras $|v_d| < 10mV$ (pico)

Lo que significa que:

$$|1mV| < 10|mV|$$

entonces está en el rango de validez.

$$i_D(v_D) = I_D + \frac{q}{KT}(I_D + \cancel{I_0})\, v_d$$

lo desprecio por ser muy pequeño

$$i_D(1mV) \cong 10^{-3}A + \frac{1{,}602 \cdot 10^{-19}C}{1{,}381 \cdot 10^{-23}\,1/K \cdot 300K}(10^{-3}A) \cdot 10^{-3}V$$

$$i_D(1mV) \cong 10^{-3}A + 3{,}8667 \cdot 10^{-5}A$$

$$\boxed{i_D(1mV) \cong 1{,}0386 \cdot 10^{-3}A}$$

(si cambia 1mV "hacia arriba", si resta habría que restarlo)

Varía un 3,86%

b)

$10^{-3}A$ — 100% es igual, pero al revés

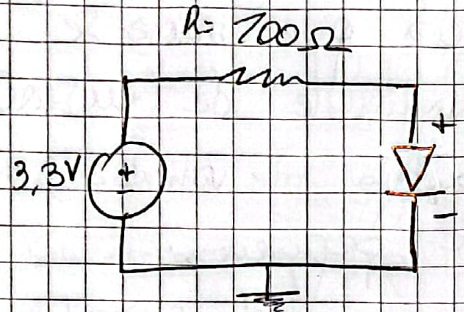
$10^{-4}A$ — 10%

Calculo como si aumentara la tensión:

$$\cancel{10^{-3}A} + 10^{-4}A = \cancel{10^{-3}}A + \frac{1}{25{,}9mV}(10^{-3}A)\, v_d$$

$$\boxed{\pm 2{,}59mV = v_d}$$

14.



$\Delta V = 10mV$

Similar al anterior $\quad i_D(0mV) = 0,026A$

$$i_D(v_D) = I_D + \frac{q\,(I_0 + I_D)}{kT}\, v_d$$

Supongo $I_D >> I_0$ tal que:

$$i_D \approx I_D + \frac{q\, I_D}{kT} \cdot v_d \approx I_D + \frac{v_d}{25,9mV}\, I_D$$

Para obtener el porcentaje de variación

$$100\% \left|\frac{X_f - X_i}{X_i}\right| \Rightarrow \frac{\cancel{I_D} + \frac{v_d}{25,9mV} I_D - \cancel{I_D}}{I_D} = \frac{v_d}{25,9mV} \cdot 100\%$$

$$100\% \frac{10mV}{25,9mV} = \boxed{38,61\,\%}$$ } varía en porcentaje (en realidad se puede la corriente que es $i_D = 0,036A$ para $v_D = 10mV$)

Esto es válido ya que 10mV se encuentra en el rango aceptable de aproximación lineal. $< 10mV$. También se puede de resolver numéricamente pero no es imprescindible.

15. Es similar al anterior, de hecho el procedimiento es el mismo con la diferencia que ahora se pide la máxima variación admisible de tensión:

Para que se válido en el rango de validez, $v_d(t)$ debe ser "lo suficientemente pequeño".

El error que se comete entre el valor de señal $i_d(t)$ y el real $i_D(t) - I_D$ debe ser pequeño.

Se aplica el criterio del 10% (mientras sea menor al 10% será aceptable)

$$i_D(t) - (I_D + i_d(t)) < 10\% \, (i_D(t) - I_D)$$

Dado que esta inecuación NO tiene solución, se pide que el término de segundo orden de Taylor (primer término de error) sea despreciable frente al término lineal:

$$\frac{1}{2} \frac{\partial^2 i_D}{\partial^2 v_d} \cdot v_d^2 < 10\% \, i_d(t)$$

$$\frac{1}{2} \frac{q^2 (I_D + I_0)}{(kT)^2} \cdot v_d^2 < 0{,}1 \left(\frac{q (I + I_0)}{kT} v_d \right)$$

En directa ($I_D >> I_0$):

$$\frac{1}{2} \frac{q^2 I_D}{(kT)^2} \cdot v_d^2 < 0{,}1 \frac{q I_D}{kT} \cdot v_d$$

$$v_d < 0{,}2 \frac{kT}{q}$$

considerando temperatura ambiente $v_d \simeq 5{,}2\,mV$

Asamblea

Aunque en la práctica se tolera
$$|v_d| < 10\,mV \text{ (pico)}$$

En inverso ($I_D \approx -I_0$), no tiene sentido evaluar dicho error ya que se puede despreciar.

Se asume válido el modelo considerando un valor de resistencia muy alto o infinito, "no circula corriente". Será un 38,61 % o porcentaje del valor original de corriente.

16. Juntura $N^+P \Longrightarrow N_d >> N_a$

$N_D = 1.10^{19}\,cm^{-3}$

$\phi_B = 900\,mV = 0,9\,V$

$A = 0,01\,mm^2 = 0,01 \cdot 10^{-2}\,cm^2 = 1 \cdot 10^{-4}\,cm^2$

$\tau_T = 18\,ns = 18 \cdot 10^{-9}\,s$

$V_s = 8\,V$

$v_s(t) = \begin{cases} 0 & si\ t < t_0 \\ 500 & si\ t \geq t_0 \end{cases}$

$t_0 = 1\,ns = 1 \cdot 10^{-9}\,s$

$R = 4,7 \cdot 10^3\,\Omega$

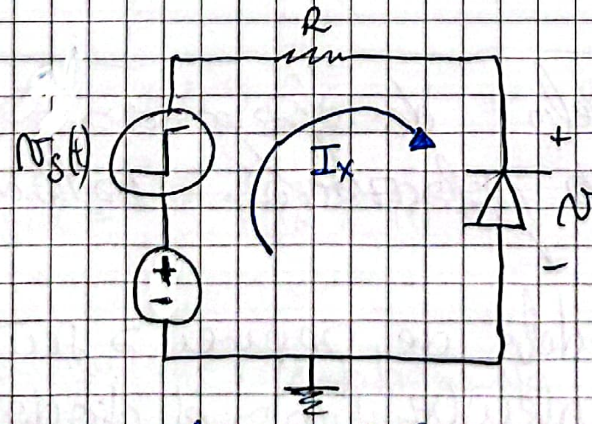
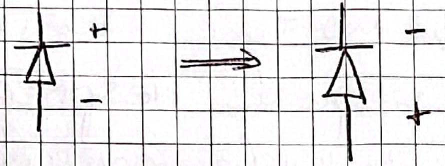


figura 4.(a)

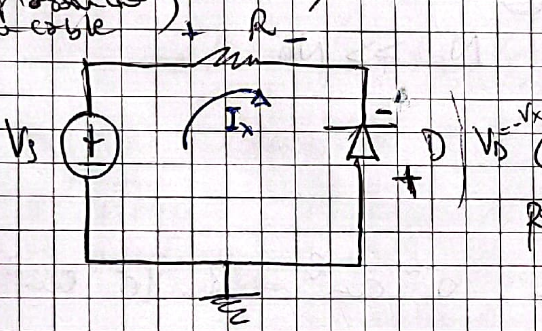
En primer lugar, resulta más simple para resolver los ejercicios cambiar la referencia del diodo y luego cambiarlo al final: en vez de



(que es como se suele simbolizar)

a) Para obtener la polarización, pasivo la fuente $v_s(t)$, con lo que el circuito queda:

(reemplazando por un cable)



El Diodo es un componente NO lineal, por lo que NO es posible utilizar el principio de superposición.

Dado que está en inversa, por el modelo de orden 0

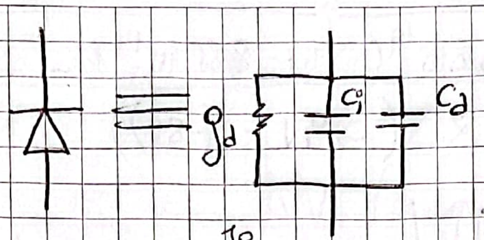
$I_x \approx -I_0 \approx 0 \Rightarrow$ (aproximo por no tener I_0)

$V_x = -V_D$ } cambie la referencia del diodo.

$$V_S - \underbrace{I_x}_{\approx 0} R + V_D = 0 \Rightarrow -V_S = V_D = -8V$$

b) Para hallar el modelo de pequeña señal, debo utilizar la polarización hallada en (a).

Recordar que el modelo de pequeña señal es un modelo equivalente para el diodo:



$$g_d = \frac{(\overset{=I_0}{I_D} + I_0)}{\frac{KT}{q}} = 0 \Rightarrow r_d = \frac{1}{g_d} \approx \infty$$

tiende a

$$\underbrace{C_D}_{\text{capacidad del diodo}} = \underbrace{C_{jun}}_{\text{cap. de juntura}} + \underbrace{C_{dif}}_{\text{cap. de dif}}$$

$$C_{dm} = \frac{1}{25{,}9mV} t_{T_p} \cdot I_p$$

$$C_{dp} = \frac{1}{25{,}9mV} \cdot t_{T_m} \cdot I_m$$

o bien

$$C_{dif} = \frac{1}{25{,}9mV} \tau_T \cdot \underbrace{I_T}_{\approx 0} \Rightarrow$$

en realidad es: $I_T + \underbrace{I_0}_{\approx 0}$ $\Uparrow$

$$C_{dif} \approx 0$$

$$C_{Juntura} = C_j = A \cdot \sqrt{\frac{q\, \varepsilon_s . Na}{2(\phi_B - V_D)}}$$ por ser PN^+

$$\phi_m = \frac{KT}{q} \ln \frac{Nd}{Ni} = 546{,}63 mV \Rightarrow \phi_p = 900mV - 546{,}63mV$$

$$\phi_p = 353{,}36mV = 25{,}9mV \ln\left(\frac{Na}{Ni}\right) \Rightarrow$$

$$Na = 5{,}7429 . 10^{15} cm^{-3}$$

↳ * una forma rápida de hallar esto (y aproximada) puede ser haciendo $\frac{360mV}{60mV} = 6 \Rightarrow 1 . 10^{16} cm^{-3} = Na$.

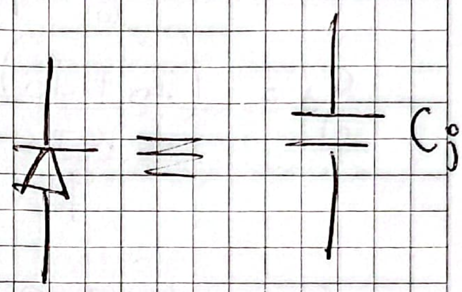
Entonces, reemplazando en $C_{juntura}$:

$$C_j = 1\cdot 10^{-4}\,cm^2 \cdot \sqrt{\frac{1{,}602\cdot 10^{-19}\,C \cdot 11{,}7 \cdot 8{,}85\cdot 10^{-14}\,F/cm \cdot 5{,}7429\cdot 10^{15}\,cm^{-3}}{2\,(0{,}9V - (-8V))}}$$

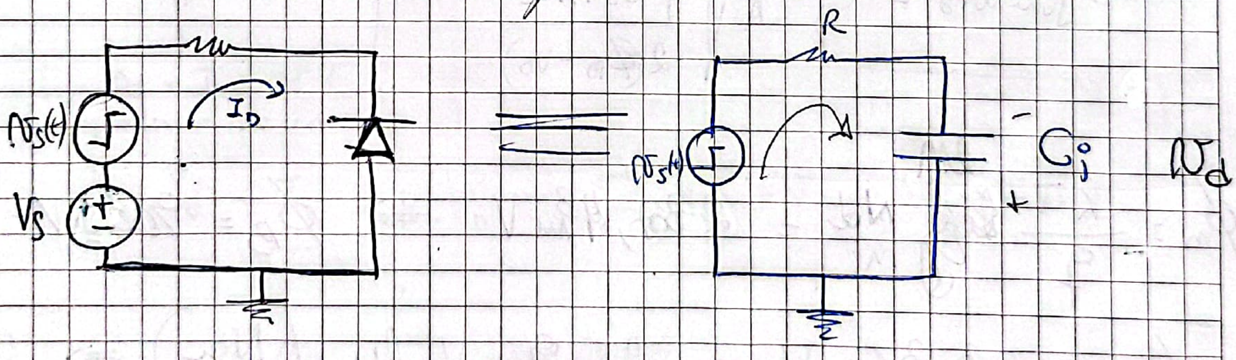
$$\boxed{C_j = 7{,}3156\cdot 10^{-13}\,F}$$

$$\boxed{g_d = 0 \Rightarrow r_d \to \infty}$$

$$\boxed{C_d = 0}$$



c) Para obtener la respuesta temporal $v_D(t)$ (una vez hallada la polarización y el modelo de pequeña señal) resuelvo el circuito equivalente:



Este es un circuito RC, tal que

$$v_s(t) - \underbrace{IR}_{\to 0} + v_d(t) = 0 \Rightarrow v_s(t) = -v_d(t)$$

pero $v_d(t)$ posee como función a la

carga de un capacitor, por lo que:

$$v_d(t) = \Delta V \left(1 - \exp\left(-\frac{(t-t_0)}{RC}\right)\right)$$

siendo $\Delta V = 500\,mV$

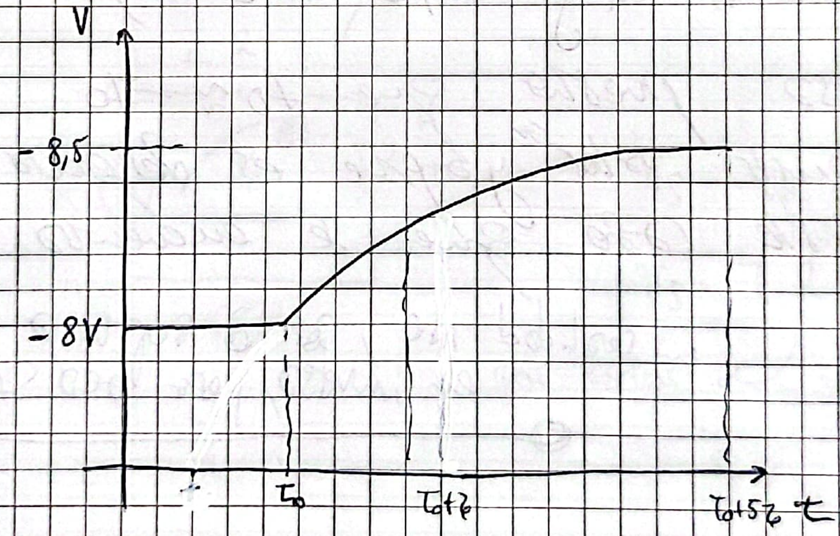
$$\tau = RC = 4{,}7\cdot 10^{3}\,\Omega \cdot 7{,}3156\cdot 10^{-13}\,F$$

$$\boxed{\tau = 3{,}4383\cdot 10^{-9}}$$

$$\boxed{v_d(t) = -500\,mV \left(1 - \exp\left(-\frac{(t-t_0)}{\tau}\right)\right)}$$

$$\boxed{v_s(t) = 500\,mV \left(1 - \exp\left(-\frac{(t-t_0)}{\tau}\right)\right)}$$

$$\boxed{v_D(t) = -8V - 0{,}5V \left(1 - \exp\left(-\frac{(t-t_0)}{\tau}\right)\right)} = v_s + V_D$$



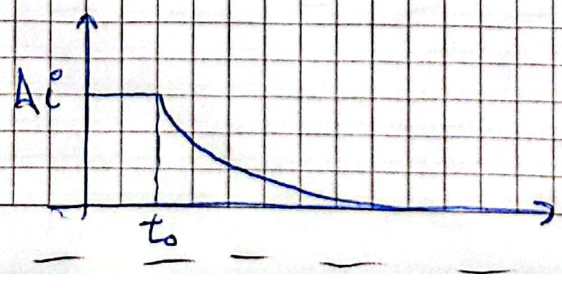
Tener en cuenta que debido a la referencia $V_D = -V_x$,

$$\boxed{v_x(t) = 8V + 0{,}5V\left(1 - e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau}}\right)}$$

el gráfico sería igual solo que positivos 8V y 8,5V

▼ Aunque no lo pide: si quisiera obtener

$$i_D(t) = i_x(t) = \frac{v_{th}(t) - v_d(t)}{R_{th}}$$



d) $\boxed{v_D = -4V}$ (la ecuación es igual) recordar que la referencia está al revés porque la elegí de esa forma

$\boxed{C_j = 1{,}3 \cdot 10^{-12}\ F}$

$\boxed{\tau = 6{,}11 \cdot 10^{-11}\ s}$

Cambian dichos valores, pero el modelo de pequeña señal se mantiene.

El gráfico "baja" por ser menor la tensión y por el tau más chico "crece" más rápido.

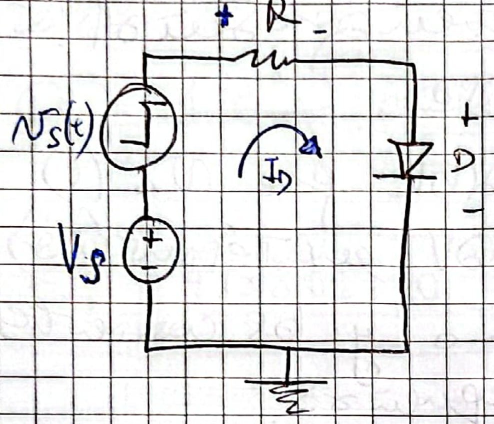
El modelo resulta válido ya que

$|v_d| < 10mV$ en directa,

pero en inversa puesto que $I_D \approx -I_0$ vale "cualquier valor" ya que es despreciable (como en este caso que se encuentra en inversa).

en realidad NO, por la ruptura en inversa, pero acá sí.

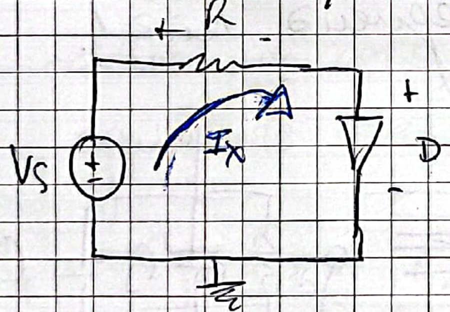
17. Con los datos del ejercicio 16 y la figura 4 (b):



Es similar al caso del ejercicio anterior, pero ahora el diodo está en directa.

$V_S = 9V$

a) Busco la polarización por el método de orden 0 tal que considero al circuito en directa y tomo $V_D(ON) = 0,7V$.



$V_S - V_R - V_D = 0$

$V_S - I R - V_D = 0$

por estar en directa

$9V - 10 \cdot 10^{-3} A R - 0,7V = 0$

$\frac{8,3 V}{10^{-2}} = R$

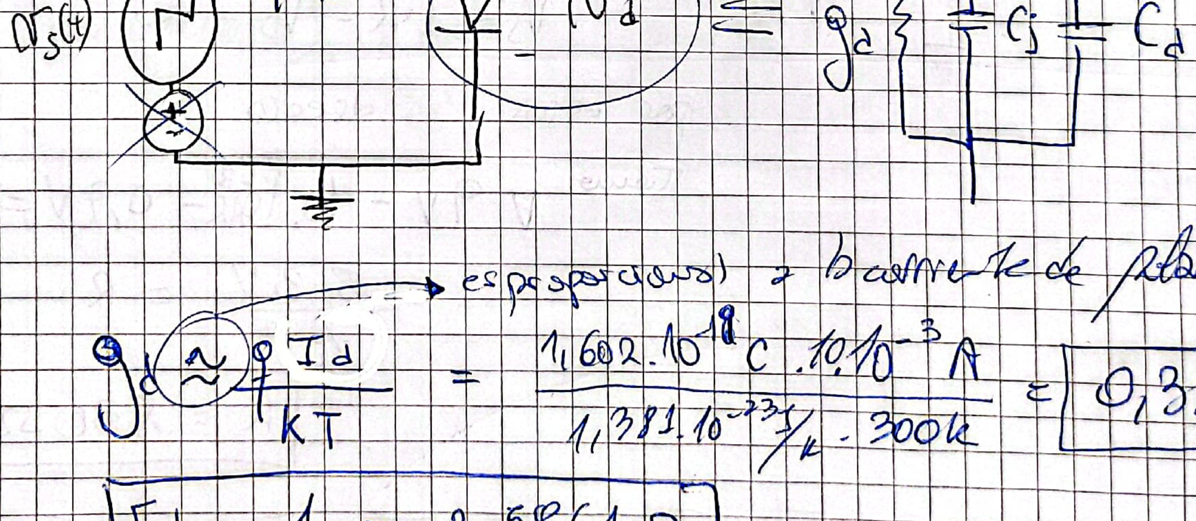
$\boxed{R = 830 \Omega}$

b) Sí es aceptable, ver el punto (d), lo importante es que $v_d(t)$ no supere 10mV, pero $v_s(t)$ puede tomar cualquier valor mínimo; esto no ocurre.

c) El máximo valor posible que $v_s(t)$ puede tomar es 3,2295 V, ver punto (d).

d) $v_D(t) = \underbrace{V_D}_{=0,7V} + \underbrace{v_d(t)}_{\text{lo calculo para}}$ $v_s(t) = \begin{cases} 0\,mV & si\ t<0 \\ 10\,mV & si\ t\geq 0 \end{cases}$

ya que si fuera para 1V no tendría validez el modelo de pequeña señal.



es proporcional a la corriente de polarización

$$g_d \approx \frac{q I_d}{kT} = \frac{1,602\cdot 10^{-19}\,C \cdot 10\cdot 10^{-3}\,A}{1,381\cdot 10^{-23}\,J/K \cdot 300K} = \boxed{0,3866\,\Omega^{-1}}$$

$$\boxed{r_d = \frac{1}{g_d} = 2,5861\,\Omega}$$

$C_j = A\sqrt{\frac{q \epsilon_s N_a}{2(\phi_B - V_D)}}$ } posee las características del diodo del ej. 16 juntura PN+

$C_j = 1.10^{-4}\sqrt{\frac{1{,}602.10^{-19}C \cdot 11{,}7 . 8{,}85.10^{-14}\ F/cm \cdot 5{,}7429.10^{15}\ cm^{-3}}{2(0{,}9V - 0{,}7V)}}$

$\boxed{C_j = 4{,}8801.10^{-12}F}$

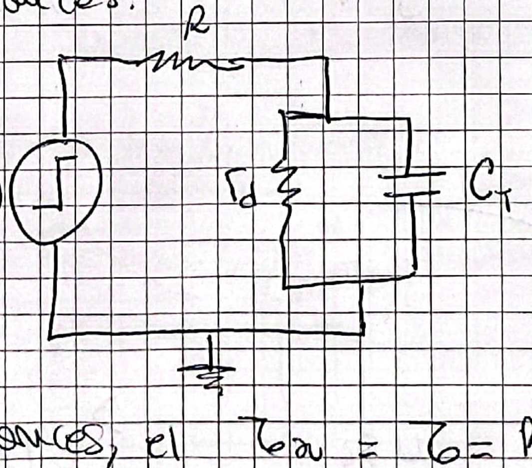
$C_d = \frac{1}{25{,}9mV} \cdot 18.10^{-9}s . 10.10^{-3}A$

$\boxed{C_d = 6{,}9498.10^{-9}F}$ } Domina en polarización directa.

A partir de esto, ya es posible obtener el equivalente al modelo de pequeña señal:

$C_T = C_j + C_d = \boxed{6{,}9546.10^{-9}F}$

Entonces:



La resistencia total que ve el capacitor es:

$R // r_d = \frac{2{,}5861 \cdot 830\Omega^2}{(2{,}5861+830)\Omega}$

$\boxed{R // r_d = 2{,}5780\Omega}$

Entonces, el $\tau_a = \tau = R \cdot C = 2{,}5780\Omega . 6{,}9546.10^{-9}F$

$\boxed{\tau = 1{,}7928.10^{-8}s} \approx 18ns$

$$10mV = v_r(\infty) = \frac{r_d}{R + r_d} \cdot v_s(t) \Rightarrow \boxed{v_s(t) = 3,2295\,V}$$

máximo valor aceptable para $v_s(t)$ (punto c.)

1V es menor, por lo que es aceptable (punto b.)

Entonces,

$$\boxed{v_d(t) = \underline{10mV}\left(1 - \exp\left(-\frac{(t - t_0)}{\tau}\right)\right)}$$

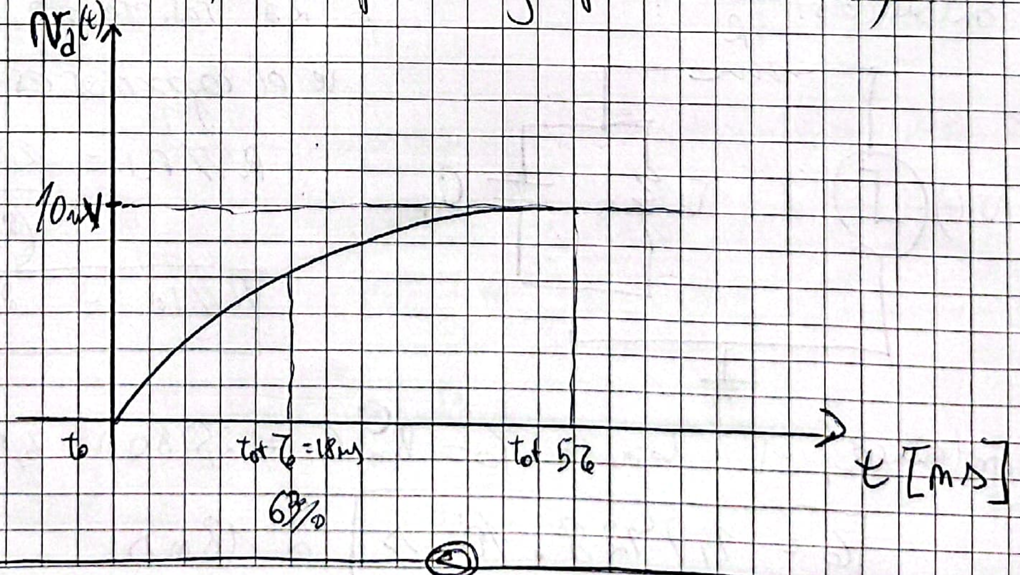
recordar que este valor lo elegí arbitrariamente porque no especificaba en el ejercicio.

De forma similar al anterior.

$$v_D(t) = V_D + v_d(t)$$

$$\boxed{v_D(t) = 0,7V + 10mV\left(1 - \exp\left(-\frac{(t - t_0)}{\tau}\right)\right)}$$

De cualquier manera, se puede graficar $v_d(t)$



Asamblea

18. Juntura $P^+N \Rightarrow N_A \gg N_d$

$I_s = 1\,pA = 10^{-12}\,A$

$\tau_{T_n} = 12\,ns = 12 \cdot 10^{-9}\,s$

$\tau_{T_p} = 18\,ns = 18 \cdot 10^{-9}\,s$

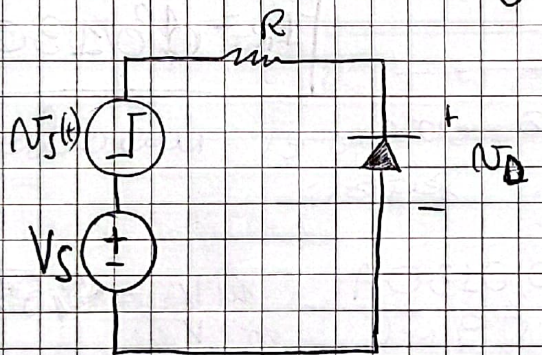
$C'_{j0} = 31{,}4\,nF/cm^2 = 31{,}4 \cdot 10^{-9}\,F/cm^2$

$\phi_B = 840\,mV = 0{,}84$

$A = 10\,\mu m^2 = 10 \cdot 10^{-8}\,cm^2$

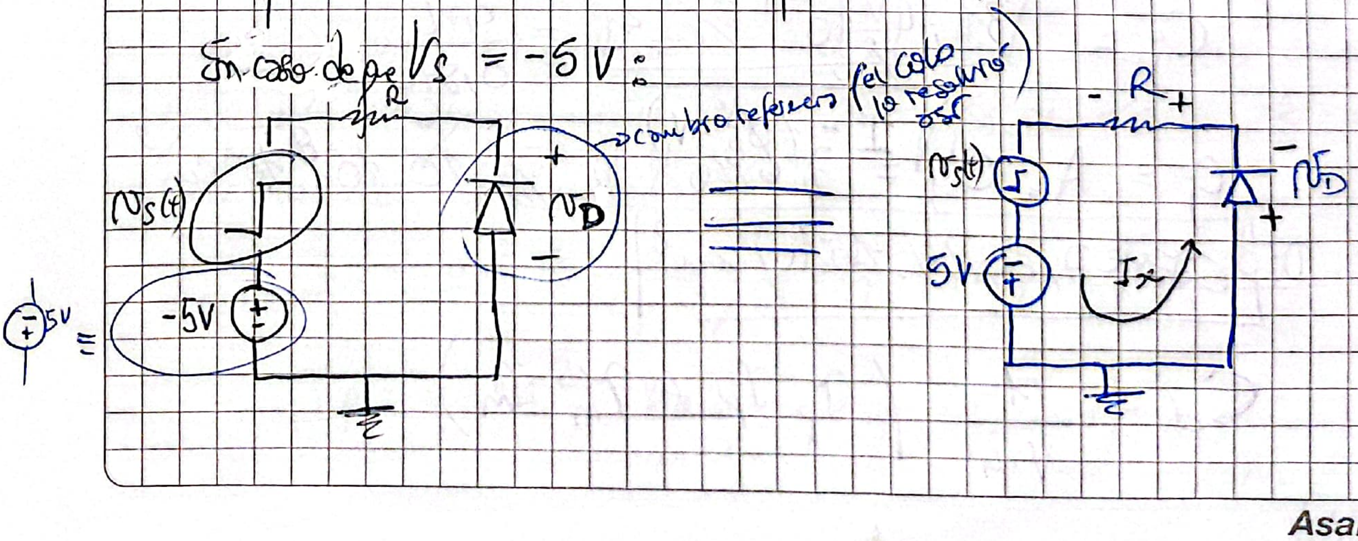
$R = 330\,\Omega$

a partir de la figura 4.(a)

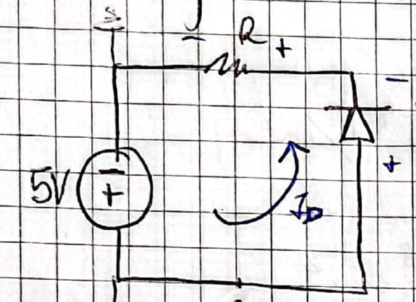


a) Dado que $V_s = \{-5V; 5V\}$, significa que el diodo puede estar en DIRECTA o INVERSA dependiendo el valor que adopte V_s.

En caso de que $V_s = -5V$:



Entonces, para $V_S = -5V$ el diodo está en directa ya que está invertido.
Por lo que, calculo la polarización:



Tomo $V_D(ON) = 0,7V$

$$V_S - V_R - V_D = 0$$

$$V_S - V_R - 0,7V = 0$$

$$5V - I_D \cdot R - 0,7V = 0$$

$R = 330\,\Omega$ →

$$\boxed{I_D = 13,03\,mA}$$

$I_S = 1pA = 10^{-12}\,A$

Busco g_d, C_d y C_j para obtener el modelo equivalente de pequeña señal:

$$g_d \approx \frac{q}{KT} I = \frac{0,0130\,A}{25,9\,mV} \cdot \frac{mV}{10^{-3}\,V} = 0,5031\,\Omega^{-1}$$

$$r_d = 2\,\Omega$$

$$C_j' = \frac{C_{j0}'}{\sqrt{1-\frac{V}{\phi_B}}} = \frac{31,1 \cdot 10^{-9}\,F/cm^2}{\sqrt{1-\frac{0,7V}{0,840}}} = 7,6914\cdot 10^{-8}\,F/cm^2$$

$$C_j = A \cdot C_j' = 7,6914 \cdot 10^{-8}\,F/cm^2 \cdot 10 \cdot 10^{-8}\,cm^2$$

$$\boxed{C_j = 7,6914 \cdot 10^{-15}\,F}$$

$$C_d = \frac{1}{V_{th}}\left(\tau_p I_p + \tau_n I_n\right)$$

Sabiendo que:

$$C_j'(V) = \sqrt{\frac{q\,\varepsilon_{Si}\,N_a N_d}{2(\phi_B - V)(N_a + N_d)}} \overset{\text{juntura } p^+N \Rightarrow N_a \gg N_d}{\approx} \sqrt{\frac{1{,}602 \cdot 10^{-19}C \cdot 11{,}7 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-14}\, N_d}{2(0{,}84V - 0{,}7V)}}$$

$$\left(7{,}6914 \cdot 10^{-8}\, F/cm^2\right)^2 = \frac{1{,}602 \cdot 10^{-19}C \cdot 11{,}7 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-14}\, N_d}{2(0{,}84V - 0{,}7V)}$$

$$\boxed{1 \cdot 10^{25}\, cm^{-3} \approx N_d}$$

$$\phi_n = V_{th} \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right) = 308{,}09\, mV$$

$$\phi_p = \phi_n - \phi_B = -V_{th} \ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right)$$

$$\boxed{N_a = 5{,}68 \cdot 10^{18}\, cm^{-3}}$$

Para obtener las corrientes individuales, supongo $x_p \ll W_p$, $x_n \ll W_n$ por lo que $W_p - x_p \approx W_p$ y $W_n - x_n \approx W_n$.

Además a efectos del diodo supongo $W_p \approx W_n \approx W$.

De esta manera, sabiendo además que en la juntura $p^+N \Rightarrow N_a \gg N_d$ puedo deducir que el mayor aporte a la corriente total lo dan los huecos:

$$J_n = q\, n_i^2 \frac{D_n}{W_p - x_p}\left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\right) \cdot \frac{1}{N_a}$$

$$J_p = q\, n_i^2 \frac{D_p}{W_n - x_n}\left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\right) \cdot \frac{1}{N_d}$$

$J_p \gg J_n$

Entonces: $I_T \approx I_p \cdot A = I_h \Rightarrow \quad I_h >> I_m$

por lo que:

$$I_T \cdot \tau_T \approx I_h \cdot \tau_h$$

entonces: (como $I_D = I_T >> I_0$)

$$C_d = \frac{\tau_h}{V_{th}} \cdot 0{,}013\,A$$

$$C_d = \frac{12 \cdot 10^{-9}\,s}{25{,}9 \cdot 10^{-3}\,V} \cdot 0{,}013\,A$$

$$\boxed{C_d = 6{,}0231 \cdot 10^{-9}\,F}$$

$C_d >> C_j$ (típico en polarización directa)

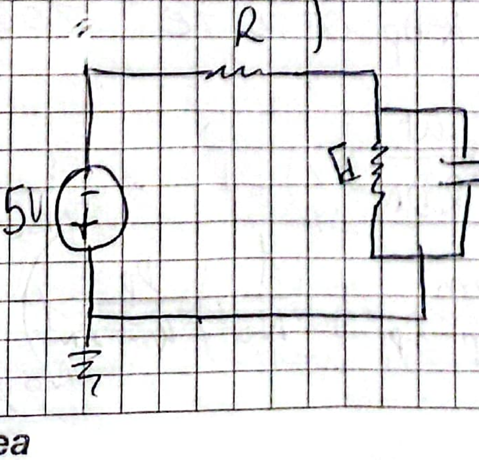
Por lo que

la capacidad de juntura satura en directa.

$$C_T \approx C_d$$

$$\boxed{C_T = 6{,}0231 \cdot 10^{-9}\,F}$$

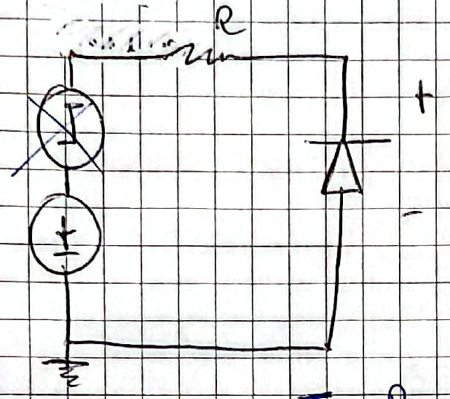
De esta manera, ya es posible armar el modelo equivalente del diodo



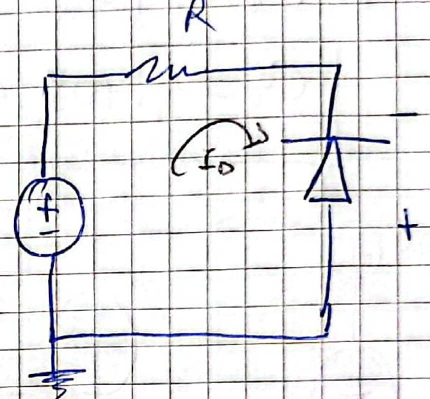
$$\tau_{ideal_{-5}} = \frac{2\Omega \cdot 330\Omega}{332\Omega} \, 6{,}0231 \cdot 10^{-9}\,F$$

$$\tau_{ideal_{-5}} = 1{,}1973 \cdot 10^{-8}\,s$$

Para el caso de 5V:



$\Longrightarrow$



$$V_S - \overbrace{V_R}^{I_D \cdot R} + V_D = 0$$

Dado que el diodo está en inversa, tomo

$I_D \approx I_S = -10^{-12} A$, por lo que:

$$5V - \underbrace{10^{-12} A \cdot 330\Omega}_{\approx 0} + V_D = 0$$

$\boxed{V_D = -5V}$ $\boxed{V_R = 3{,}3 \cdot 10^{-10} V}$

$$g_d = \frac{I_D}{25{,}9mV} \approx 0 \Rightarrow \boxed{r_d \to \infty}$$

$$C_d = \frac{1}{V_{th}} \tau_T \cdot I_1 \approx 0 \Rightarrow \boxed{C_d = 0}$$

$$C_j' = \frac{C_{j0}'}{\sqrt{1 - \frac{V_B}{\phi_B}}} = \frac{31{,}4 \cdot 10^{-9} F/cm^2}{\sqrt{1 - \frac{-5V}{0{,}84V}}} = 1{,}1908 \cdot 10^{-8} F/cm^2$$

$$C_j^0 = A\, C_j' = 10 \cdot 10^{-8} cm^2 \cdot 1{,}1908 \cdot 10^{-8} F/cm^2 =$$

$\boxed{C_j^0 = 1{,}1908 \cdot 10^{-15} F}$ fF (fentofaradio)

$\tau_{diodo_{5V}} = 330\Omega \cdot 1{,}1908 \cdot 10^{-15} F$

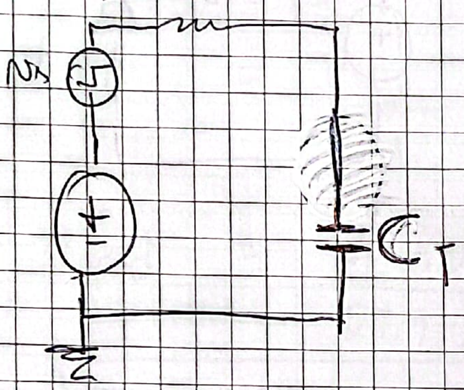
$\tau_{e\,ideal} = 3{,}92964 \cdot 10^{-13} A$

Asamblea

Entonces:

$$C_T = C_j =$$

$$\boxed{C_T = 1{,}1908 \cdot 10^{-15}\,F}$$



(b) Al medir la característica I-V de un diodo real se observa que es necesario introducir factores empíricos en la ecuación teórica para que la misma ajuste correctamente la curva experimental.

De aquí, surge el coeficiente de emisión o factor de idealidad y se lo identifica con la letra "m" y modifica la expresión de la corriente del diodo de la siguiente forma.

$$i_D = I_O \left[\exp\left(\frac{v_D}{m \underbrace{\left(\frac{KT}{q}\right)}_{= V_{th} \text{ por relación de Einstein}}} \right) - 1 \right]$$

Dependiendo del diodo, el tipo de semi-conductor y el proceso de fabricación, "n" puede tomar valores entre 1 y 2.

El factor empírico "n" debe introducirse ya que ciertas hipótesis asumidas al momento de plantear el modelo para hallar la transferencia del diodo en la práctica no se cumplen con de forma rigurosa.

Por ejemplo:

- En la hipótesis de diodo corto, se asume que NO existe recombinación de portadores en el cuerpo del diodo.

  Esto es una aproximación ya que en la práctica existe una fracción de portadores que se recombina en la zona desierta especialmente donde ambas concentraciones de portadores alcanzan igual nivel.

- En la hipótesis de vaciamiento, se asume una juntura metalúrgica perfecta. Sin embargo esto no puede lograrse en la fabricación real del dispositivo y existe una zona de transición entre la región dopada tipo P y la tipo N.

Para el caso de 5V (diodo en inversa), el resultado es el mismo ya que el diodo fuerza la corriente a $I_D \approx -I_s = -I_o$.

Para el caso de -5V (diodo en directa)

por lo que:

$$i_D = I_o \left(\exp \frac{v_D}{n\left(\frac{kT}{q}\right)} - 1 \right)$$

continuo utilizando el modelo de orden 0 y la respuesta sigue siendo RC, lo que cambia son los parámetros que predominan esa dinámica

para el diodo en directa (-5V)

$$g_d = \frac{I_D + I_o}{n\, V_{th}} = 0,3354 \Rightarrow \boxed{r_d \approx 3\,\Omega}$$

* para este caso

$$C_{dif} = \frac{t_T}{n\, V_{th}} (I_D + I_o) = \boxed{4,0154 \cdot 10^{-9}\, F}$$

* para este caso

$$C_j = \frac{C_{j0}}{\sqrt{1 - \frac{v_D}{\phi_B}}} = \sqrt{2}\, C_{j0}$$

No cambia

$$\tau_{real_{-5V}} = \frac{330\Omega \cdot 3\Omega}{333\Omega} \cdot 4,0154 \cdot 10^{-9} F$$

$$\boxed{\tau_{real_{-5V}} = 1,1937 \cdot 10^{-8} F}$$

En inversa (5V) no cambian los valores, C_j se mantiene

$$\boxed{\tau_{ideal_{5V}} = \tau_{real_{5V}}}$$

$C_{dif} = 0$

$g_d = 0$

c) tomo el valor de v_s como positivo en dirección con la fuente con el borne positivo:

Para el caso de $-5V$ (ideal) (el diodo está en directa):

$$v_{r_d} = \frac{r_d}{R+r_d} \cdot v_1$$

$$= \frac{2\Omega}{330\Omega+2\Omega} \cdot 200mV = 1,2048mV < 10mV$$

cumple con el rango de validez del modelo.

Para el caso de $-5V$, diodo real:

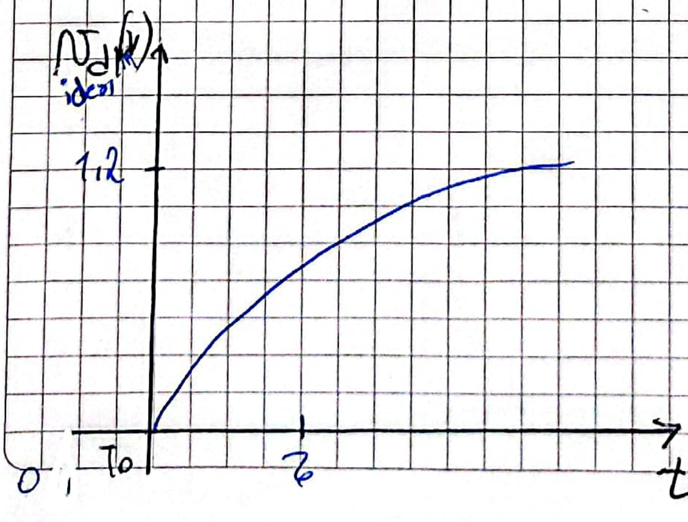
$$\frac{3\Omega}{330\Omega+3\Omega} \cdot 200mV = 1,8018mV < 10mV$$

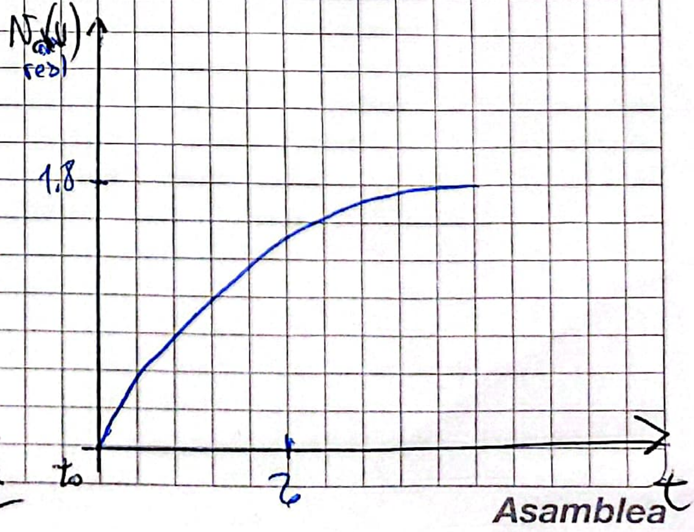
$v_d(t)$ posee la forma de carga de un exponencial:

tal que

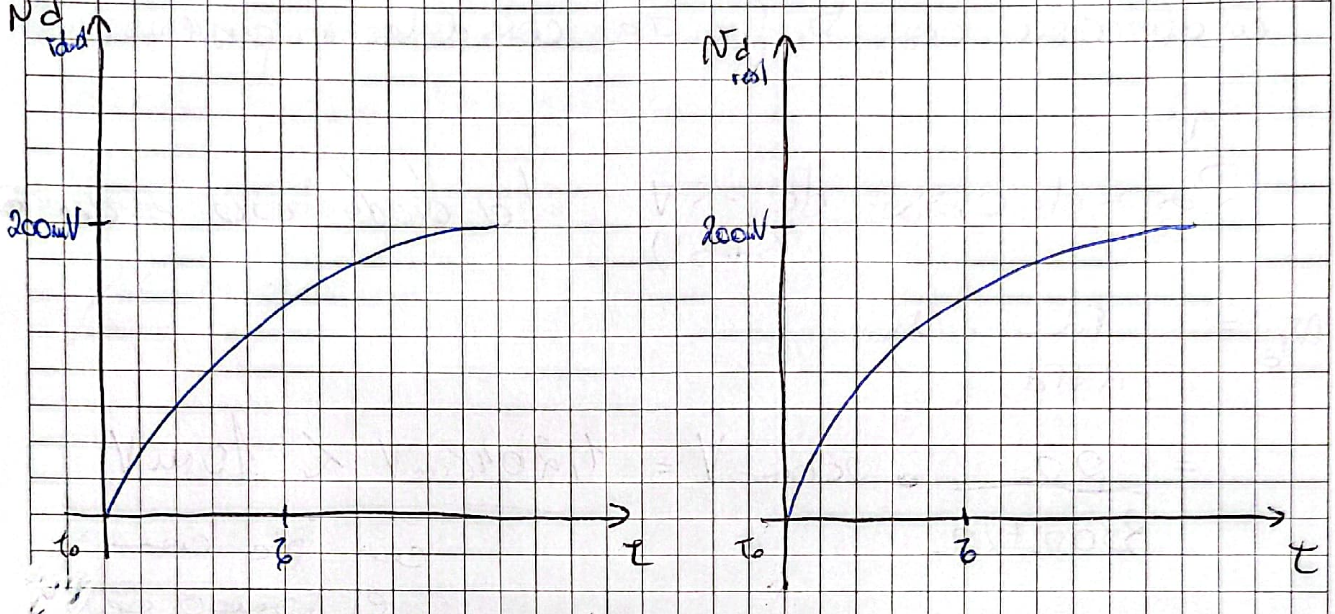
$$v_{d_{ideal}} = 1,2048mV\left(1 - \exp\left(-\frac{(t-t_0)}{\tau_p}\right)\right)$$

$$v_{d_{real}} = 1,8018mV\left(1 - \exp\left(-\frac{(t-t_0)}{\tau_r}\right)\right)$$





Para el caso de 5V, el diodo está en inversa.



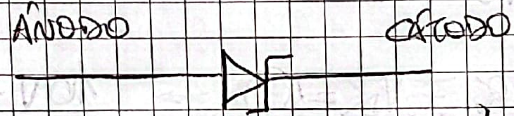
Son exactamente iguales.

Recordar que no importa si 200mV > 10mV (rango de validez) ya que la corriente es muy pequeña $I_D \simeq -I_0$.

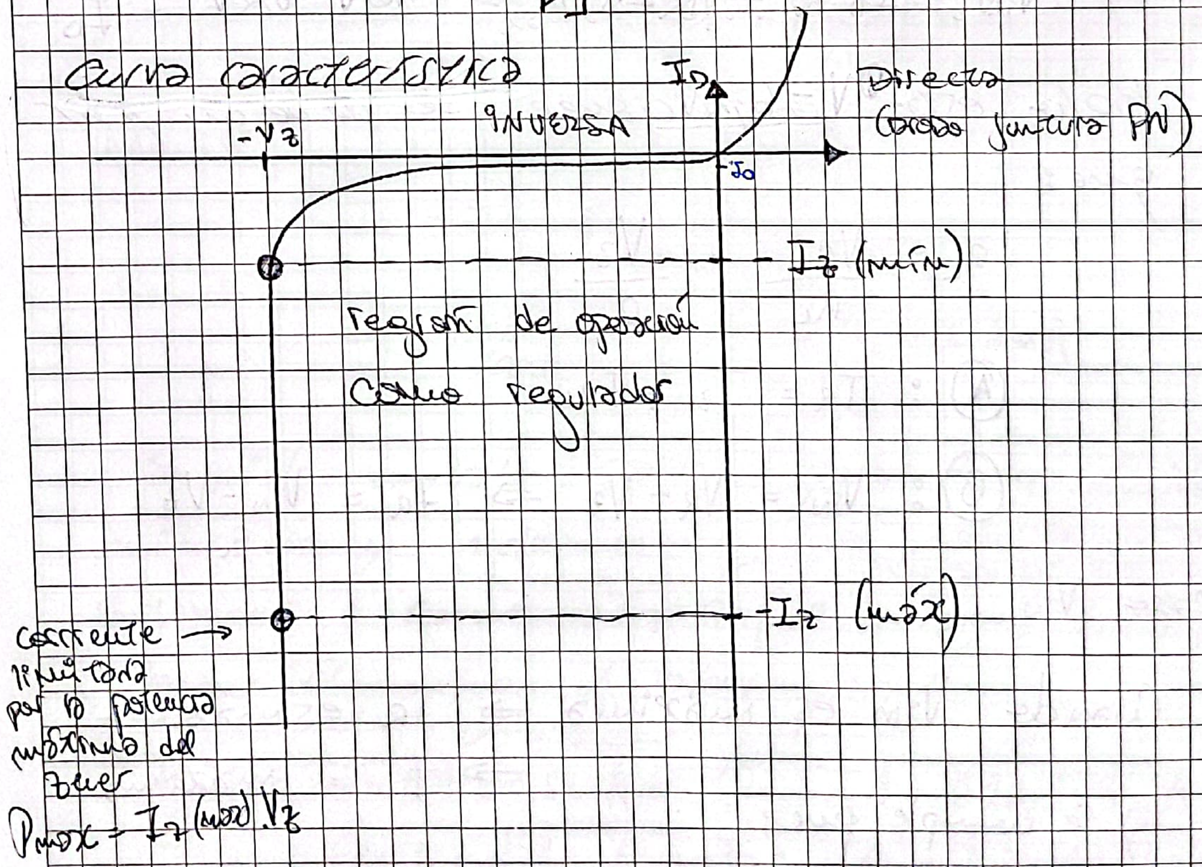
• PARTE IV: DIODOS ZENER

19. a) Es un diodo con una estructura interna que le permite funcionar como un diodo de juntura PN cuando se lo polariza en directa (tensión positiva entre ánodo y cátodo) o como "regulador de tensión", cuando se lo polariza en inversa (tensión negativa entre ánodo y cátodo).

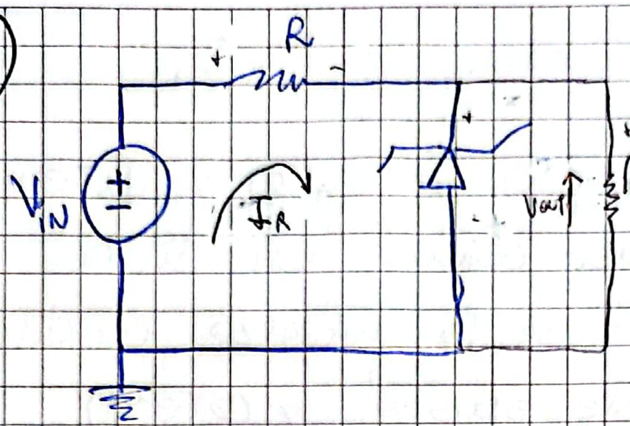
Símbolo



Curva característica



b)



$V_{IN} = 10V$

$V_Z = 6{,}2V$

$I_{R\,(max)} = 241\,mA$

$I_{R\,(min)} = 60{,}5\,mA$

$R_L = 100\Omega$

El diodo está en inversa, por lo que regula la tensión.

Si el diodo Zener funciona como regulador, entonces:

$$V_D = V_Z$$

$$I_{Z\,min} < I_Z < I_{Z\,max}$$

Bajo estas condiciones se debe cumplir que:

$$I_{R_L} = \frac{V_{R_L}}{R_L} = \frac{V_Z}{R_L}$$

A : $I_R = I_Z + I_{R_L}$

B : $V_{IN} = V_R + V_Z \Rightarrow I_R = \frac{V_{IN} - V_Z}{R}$

o Caso $V_{IN\,max}$

Cuando V_{IN} es máxima $\Rightarrow$ I_R es máxima

$\Rightarrow$ I_Z es máxima

y se cumple que:

$$I_{R\,max} = \frac{V_{IN\,max} - V_Z}{R}$$

• Cuando $Vi_{m\,\text{mínimo}} \rightarrow I_{R_{\text{mín}}}$ es mínima

$\Rightarrow I_Z$ es mínima

y se cumple que:

$$I_{R_{\text{mín}}} = \frac{Vi_{m\,\text{mín}} - V_Z}{R}$$

El diodo Zener suele utilizarse en inversa y resulta útil pensarlo como una fuente.
Entonces:

$$Vi_m - V_Z - I_R R = 0$$

$$\frac{10V - 6{,}2V}{R} = I_R = \frac{3{,}8V}{R} \Rightarrow R = \frac{3{,}8V}{I_R}$$

Además,

$$I_R = I_Z + I_{R_L}$$

Siendo

$$I_{R_L} = \frac{6{,}2V}{100\Omega} = 0{,}062\,A = 62\,mA$$

Se pide un valor posible para R y sus valores mínimos y máximos.

Notar que dice $I_{Z\,mín}$ y $I_{Z\,máx}$, pero esos son cuando NO hay [illegible] de carga

Entonces, como $I_Z \in [60{,}5\,mA ; 241\,mA]$

verifico el rango de valores para R:

como es el mismo

$$I_{R_{mín}} = 62\,mA + \underbrace{60{,}5\,mA}_{=I_{Z\,mín}} = 122{,}5\,mA = 122{,}5 \cdot 10^{-3}\,A$$

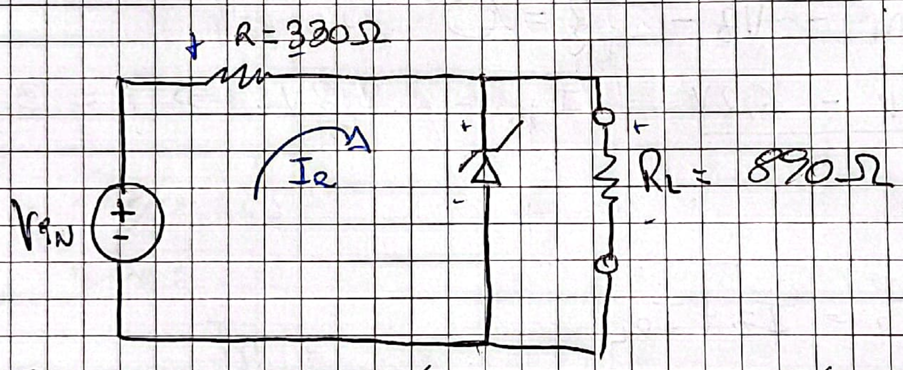
$$I_{R_{máx}} = 62\,mA + \underbrace{241\,mA}_{=I_{Z\,máx}} = 303\,mA = 303 \cdot 10^{-3}\,A$$

$$R_{mín} = \frac{3{,}8V}{0{,}1225} = \boxed{31{,}02\,\Omega} \quad ; \quad R_{máx} = \frac{3{,}8V}{0{,}303} = \boxed{12{,}54\,\Omega}$$

cabe aclarar que por ley de Ohm a mayor corriente menor resistencia y viceversa, de ahí que si R es menor I_R será mayor y viceversa.

Entonces, $R \in [12{,}54\,\Omega \,,\, 31{,}02\,\Omega]$ y un posible valor para R elegido arbitrariamente puede ser $\boxed{R = 20\,\Omega}$

20.



Similar al anterior, pero ahora se pide el rango de valores posibles que Vin puede adoptar.

$$V_{IN} = I_R\, R + V_Z \quad \text{y} \quad I_R = I_{R_L} + I_Z$$

tal que $I_{R_L} = \dfrac{V_Z}{R_L} = \dfrac{3{,}9V}{890\Omega} =$

$I_{R_L} = 4{,}3820 \cdot 10^{-3} A$

entonces:

$$V_{IN} = (I_{R_L} + I_Z) \cdot R + V_Z$$

$$V_{IN} = (4{,}3820 \cdot 10^{-3} A + I_Z) \cdot 330\,\Omega + 3{,}9\,V$$

Busco $V_{in_{min}}$ y $V_{in_{max}}$ con los valores mínimos y máximos del diodo zener.

$$V_{IN_{min}} = (4{,}3820 \cdot 10^{-3} A + 1 \cdot 10^{-3} A) \cdot 330\Omega + 3{,}9V$$

$$\boxed{V_{IN_{min}} = 5{,}6760\ V}$$

$$V_{IN_{max}} = (4{,}3820 \cdot 10^{-3} A + 5 \cdot 10^{-3} A) \cdot 330\Omega + 3{,}9V$$

$$\boxed{V_{IN_{max}} = [illegible]\ V}$$

Entonces:

$$\boxed{V_{IN} \in [5{,}6760V;\ [illegible]\ V]}$$

---

21. Es similar a los anteriores, sólo que ahora debo obtener el rango de valores para la resistencia de carga:

$$V_{IN} = I_R \cdot R + V_Z$$

$$9V = I_R \cdot 220\Omega + 5{,}6V \Rightarrow \boxed{I_R = 0{,}0154A}$$

$$I_R = I_{R_L} + I_Z$$

$$I_R - I_Z = I_{R_L} \quad \text{y} \quad \frac{V_Z}{I_{R_L}} = R_L$$

por lo que

$$I_R - I_{Z_{min}} = I_{R_{L_{min}}} \qquad \frac{5{,}6V}{0{,}0144A} = \boxed{R_{L_{min}} = 387{,}42\Omega}$$

$$0{,}0154A - 0{,}001A = 0{,}0144A = I_{R_{L_{min}}}$$

$$I_R - I_{Z_{max}} = I_{Z_{max}} \qquad \frac{5{,}6V}{0{,}0054A} = \boxed{R_{L_{max}} = 1026{,}67\Omega}$$

$$0{,}0154A - 0{,}01A = 0{,}0054A$$

Entonces: $\boxed{R \in [387{,}42\Omega;\ 1026{,}67\Omega]}$

• PARTE V: EJERCICIOS INTEGRADORES

22. PN simétrica → $N_a = N_d$

$A = 0,1\,mm^2 = 0,1 \cdot 10^{-2}\ cm^2$

$w_p = 10\,\mu m = 10 \cdot 10^{-4}\,cm \gg x_p$

$w_n = 10\,\mu m = 10 \cdot 10^{-4}\,cm \gg x_n$

$C_{j0} = 76\,pF = 76 \cdot 10^{-12}\,F$

$\tau_T = 0,7\,V$

$V_D(ON) = 0,7\,V$

a) El valor de la corriente Io se deduce del gráfico I – V

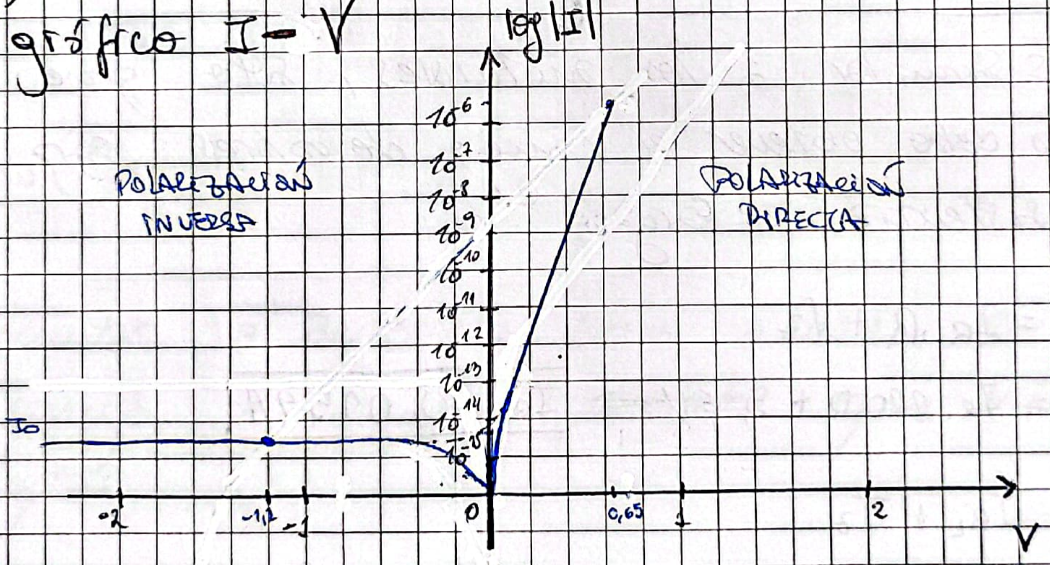


FIGURA 1

Dado que no se tienen más puntos, no es posible trazar una curva más exacta, pero se puede aproximar a la de la figura 1, la cual converge a $\boxed{6,5 \cdot 10^{-15}\,A = I_o}$ en polarización inversa.

Al ser una juntura simétrica, $N_d = N_a$, es decir el nivel de dopaje de ambos lados es igual. Además $x_{p_0} = x_{n_0}$

El tiempo de tránsito total se calcula como: (es una ecuación equivalente)

$$\tau_T = \frac{qA\,(W_p \cdot n_p + W_n \cdot p_n)}{2\,I_0}$$

W_p := ancho del diodo en la región p - QNR

W_n := ancho del diodo en la región n - QNR

I_0 := corriente de saturación

A := Area

q := carga de 1 electrón

n_p := concentración de electrones en W_p $= \dfrac{n_i^2}{N_a}$

p_n := concentración de huecos en W_n $= \dfrac{n_i^2}{N_d}$

(en este caso son iguales por ser juntura simétrica)

Entonces: (planteo ecuación C/I_0)

$$20\cdot10^{-9}\,s = \frac{1{,}602\cdot10^{-19}\,C \cdot 0{,}1\cdot10^{-2}\,cm^2\,(10\cdot10^{-4}\,cm\cdot n + 10\cdot10^{-4}\,cm\cdot n)}{2\cdot 6{,}5\cdot10^{-15}\,A}$$

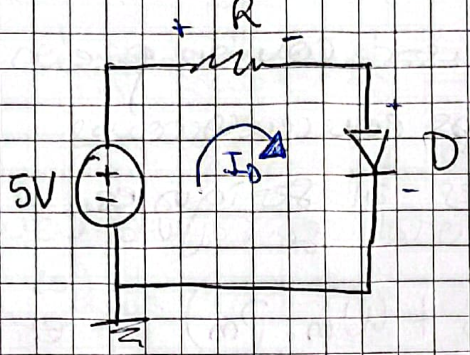
$$n = n_p = p_n = 811{,}4856\ cm^{-3}$$

$$\frac{n_i^2}{N} = 811{,}4856\ cm^{-3} = \frac{(6{,}822\cdot10^{9}\,cm^{-3})^2}{N} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow N = \boxed{N_a = N_d = 5{,}7351\cdot10^{16}\,cm^{-3}}$$

$$\phi_B = V_{th}\ln\frac{N_a N_d}{n_i^2} = \boxed{825{,}9278\,mV}$$

b)



$5V - V_R - V_D(ON) = 0$

$5V - 0{,}7V - V_R = 0$

$4{,}3V = V_R$

$4{,}3V = I_D \cdot 470\,\Omega$

$\boxed{9{,}1489 \cdot 10^{-3} A = I_D}$

$$g_d = \frac{I_D + \overset{\sim 0}{I_0}}{25{,}9\,mV} = 0{,}3532\,\Omega^{-1} \Rightarrow \boxed{r_d \to 2{,}8309\,\Omega}$$

$$C_j(V) = C_{j0} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V}{\phi_B}}}$$

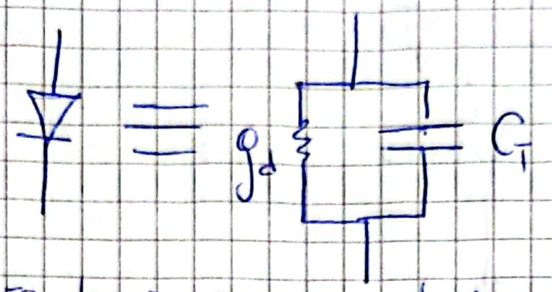
$$C_j(V) = 76 \cdot 10^{-12} F \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{0{,}7}{0{,}8259}}} = \boxed{1{,}9465 \cdot 10^{-10} F}$$

$$C_{dif}(V) = \frac{\tau_T}{V_{th}} (I_D + I_0)$$

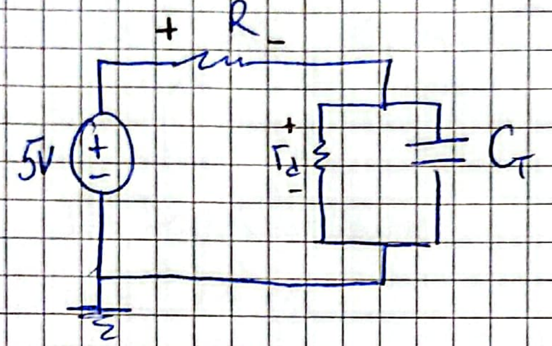
$$C_{dif}(0{,}7) = \frac{20 \cdot 10^{-9} s}{25{,}9 \cdot 10^{-3} V} \left(9{,}1489 \cdot 10^{-3} A + \overset{\sim 0}{I_0}\right)$$

$$\boxed{C_{dif}(0{,}7V) = 7{,}0647 \cdot 10^{-9} F}$$

$$C_T = C_{dif} + C_j = \boxed{7{,}2594 \cdot 10^{-9} F}$$



Es decir que el circuito puede resolverse de forma equivalente en DIRECTA como:

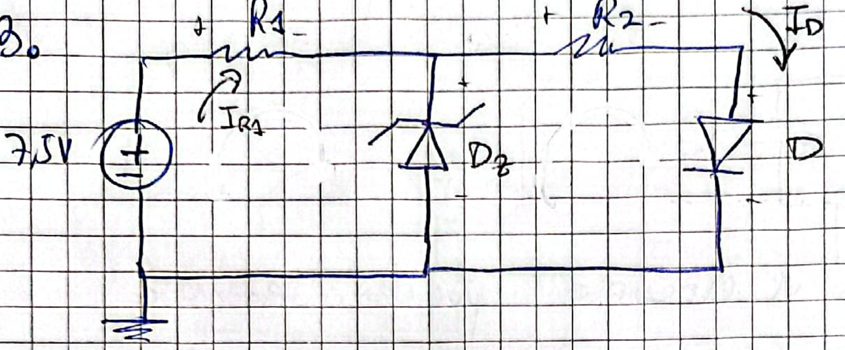


$C_{dif} > C_j$ } predomina la capacidad de difusión (lo esperable en polarización directa)

ya que C_j satura a $\sqrt{2}\, C_{j0}$

⊖

23.



$V_{D(on)} = 0,7\,V$

$I_D = 1\,mA = 10^{-3}\,A$

$V_{IN} = 7,5\,V$

$|V_Z| = 5,6\,V$

$|I_{Z\,min}| = 2 \cdot 10^{-3}\,A$

$|I_{Z\,max}| = 6 \cdot 10^{-3}\,A$

$T = 300\,K$

$V_{IN} - I_{R1} \cdot R_1 - V_{DZ} = 0$

$7,5\,V - I_{R1} \cdot R_1 - 5,6\,V = 0$

$\dfrac{1,9\,V}{I_{R1}} = R_1$

$V_{DZ} - V_{D(ON)} = I_D \cdot R_2$

$5,6\,V - 0,7\,V = 10^{-3}\,A \cdot R_2$

$\boxed{4900\,\Omega = R_2}$

único valor posible para R_2

$I_{R1} = I_D + I_Z$

$I_{R1\,min} = 10^{-3}\,A + 2 \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 10^{-3}\,A$

$I_{R1\,max} = 10^{-3}\,A + 6 \cdot 10^{-3} = 7 \cdot 10^{-3}\,A$

rango de valores para I_{R1}

$R_{1\,max} = \dfrac{1,9\,V}{3 \cdot 10^{-3}\,A} = 633,33\,\Omega$

$R_{1\,min} = \dfrac{1,9\,V}{7 \cdot 10^{-3}\,A} = 271,42\,\Omega$

$R_1 \in [271,42\,\Omega, 633,33\,\Omega]$

Asamblea

24. a) Diodo de juntura $PN^+ \Rightarrow N_d >> N_a$

$A = 1mm^2 = 1.10^{-2}\ cm^2$

$\phi_B = 716mV = 0,716V$

$w_p = 100\mu m = 100 . 10^{-4}\ cm = 0,01\ cm >> x_p$

$w_n = 100\mu m = 100 . 10^{-4}\ cm = 0,01\ cm >> x_n$

Dado que $N_A < 10^{15}\ cm^{-3} \Rightarrow \mu_n = 1400\ cm^2/Vs$

$\mu_p = 485\ cm^2/Vs$

$T = 300K = T_{amb}$

$m = 13\ 1/V$

$P_x = (0,65V ; 1,64mA)$

$I_{o\,real} = 8,1mA = 8,1.10^{-9}A$

$D_{p/n} = \mu_{p/n} . V_{th}$ (a T_{amb})

$D_p = 485\ cm^2/Vs . 25,9mV . 10^{-3} = 12,5615\ cm^2/s$

$D_n = 1400\ cm^2/Vs . 25,9mV . 10^{-3} = 36,26\ cm^2/s$

$\log_{10}(|I_d|) = m V_d + b \Rightarrow$

$|I_d| = 10^{mV_d} . \underbrace{10^b}_{\approx C_o}$

$|I_d| = C_o\ 10^{mV_d}$

$|I_d| = C_o\ 10^{13\ 1/V . V_d}$ } reemplazo con el punto P_x

$1,64.10^{-3}A = C_o\ 10^{13\ 1/V . 0,65V} \Rightarrow C_o = 5,8189.10^{-12}A$

Asamblea

$$|I_d| = 5{,}8189 \cdot 10^{-12} \cdot 10^{13\%/V \cdot V_d}$$

$$\text{Si } V_d = 0 \Rightarrow |I_d| = \boxed{I_{o_{ideal}} = 5{,}8189 \cdot 10^{-12}\,A}$$

Para encontrar el coeficiente de idealidad que ajusta a la función de corriente del diodo:

$$i_D = I_{o_{ideal}}\left[\exp \frac{V_D}{mV_{th}} - 1\right]$$

reemplazo con $I_{o_{ideal}}$ y el punto P_x

$$1{,}64 \cdot 10^{-3}A = 5{,}8189 \cdot 10^{-12}\left(\exp\left(\frac{0{,}65V}{25{,}9m \cdot V \cdot 10^{-3}}\right) - 1\right)$$

$$\boxed{m = 1{,}2898} \} \text{ coeficiente de idealidad}$$

Sabiendo que:

$$I_o = q\,A\,n_i^2\left(\frac{1}{N_a}\frac{D_n}{W_p - x_p} + \frac{1}{N_d}\frac{D_p}{W_n - x_n}\right)$$

$$5{,}8189 \cdot 10^{-12} = 1{,}602 \cdot 10^{-19}C \cdot 10^{-2}cm^2\,(6{,}822 \cdot 10^{9}cm^{-3})^2$$

$$\cdot\left(\frac{1}{N_a} \cdot \frac{36{,}26\,cm^2/s}{0{,}01\,cm} + \underbrace{\cancel{\frac{1}{N_d}\frac{12{,}5615\,cm^2/s}{0{,}01\,cm}}}_{N_d \gg N_a}\right)$$

resolviendo...

$$\boxed{N_a = 4{,}6459 \cdot 10^{13}\,cm^{-3}} < 10^{15}\,cm^{-3}$$

Asamblea

Además,

$$\phi_B = 25{,}9\,mV \ln \frac{Na\,Nd}{n_i^2}$$

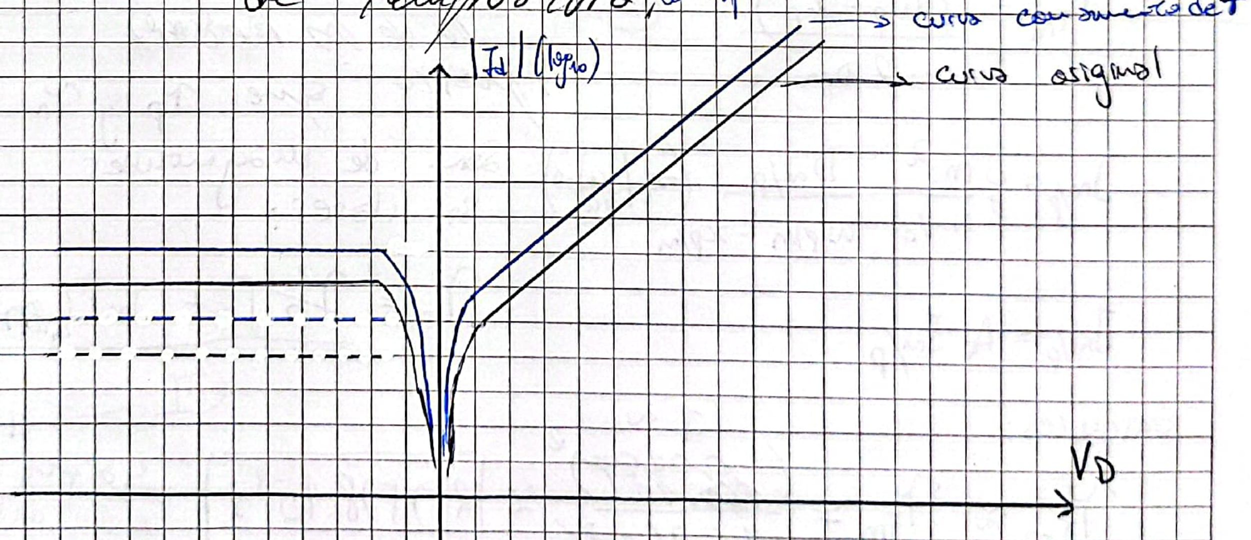
$$\frac{716\,mV}{25{,}9\,mV} = \ln\left(\frac{4{,}6459 \cdot 10^{13}\,cm^{-3} \cdot Nd}{(6{,}822 \cdot 10^{9}\,cm^{-3})^2}\right)$$

$$\boxed{1{,}0156 \cdot 10^{18}\,cm^{-3} = Nd}$$

Dado que:

$$I = \underbrace{Io\left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\right)}$$

el aumento de Io es superior a la disminución del segundo término puesto que el aumento en n_i es predominante ante un aumento de temperatura, con respecto a la disminución de la movilidad.



b) $P_x = (0{,}65\,V,\ 1{,}64\,mA)$

$\underbrace{0{,}65\,V}_{\text{Tensión del diodo}}$, $\underbrace{1{,}64\,mA}_{|I_D| \text{ del diodo}}$

$V_D = 0{,}65\,V$

$|I_D| = 1{,}64 \cdot 10^{-3}\,A$

$$g_m = \frac{I_D + \cancel{I_0}}{m\,V_{th}} = \frac{1{,}64 \cdot 10^{-3}\,A}{1{,}2898 \cdot 25{,}9 \cdot 10^{-3}\,V} = 0{,}0490\,\Omega^{-1}$$

muy pequeño

$$\boxed{r_d = 20{,}37\,\Omega}$$

$$\tau_{T_p} = \frac{(W_n - x_n)^2}{2 D_p}$$

$$\tau_{T_n} = \frac{(W_p - x_p)^2}{2 D_n}$$

$$J_{n/p} = q \frac{n_i^2}{N_{a/d}} \frac{D_{n/p}}{W_{p/n} - x_{p/n}} \left(\exp\left(\frac{V_d}{V_{th}}\right) - 1\right)$$

$$I_{n/p} = A\,J_{n/p}$$

Dado que $N_d \gg N_a$ la corriente predominante en el diodo será la de los electrones y puesto que τ_p y τ_n son de magnitudes similares:

$$\tau_T = \frac{\cancel{\tau_p I_p} + \tau_n I_n}{I}$$

$I \approx I_n$ ya que son de magnitudes similares.

Entonces:

$$\tau_T \approx \tau_{T_n} = \frac{(0{,}01\,cm)^2}{36{,}26\,cm^2/s} \approx \boxed{2{,}7578 \cdot 10^{-4}\,s}$$

$$C_{dif} = \frac{\tau_T}{m\,V_{th}} \left(I_D + \cancel{I_0}^{\,\sim 0}\right) = \frac{2{,}7578 \cdot 10^{-4}\,s}{1{,}2898 \cdot 25{,}9 \cdot 10^{-3}} \left(1{,}64 \cdot 10^{-3}\,A\right)$$

$$\boxed{C_{dif} = 1{,}3539 \cdot 10^{-5}\,F}$$

$$C_j = A \cdot \sqrt{\frac{q\, \varepsilon_{Si}\, Na\, Nd}{2(\phi_B - V)(Na + Nd)}} \xrightarrow{Nd >> Na} \simeq A \sqrt{\frac{q\, \varepsilon_{Si}\, Na}{2(\phi_B - V)}}$$

$$C_j = 1 \cdot 10^{-2}\, cm^{-2}\, cm^2 \sqrt{\frac{1{,}602 \cdot 10^{-19}\; 11{,}7 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-14} \cdot 4{,}6459 \cdot 10^{13}}{2\,(0{,}716V - 0{,}65V)}}$$

no se ve operando por m

$$\boxed{C_j = 7{,}6408 \cdot 10^{-11} F}$$

Notar que $C_d >> C_j$ (predomina la capacidad de difusión en directa).

$$C_T = \cancel{C_j} + C_d \approx C_d$$

$$\boxed{C_T = 1{,}3839 \cdot 10^{-8} F}$$