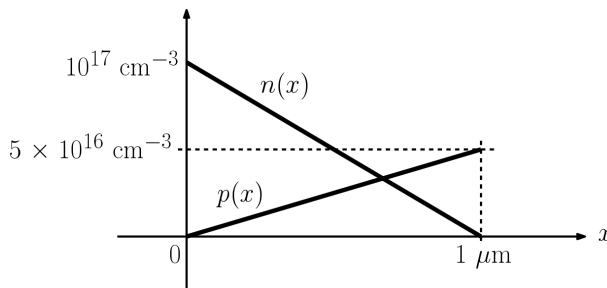


Todos os itens da prova têm o mesmo valor: 1.0 ponto cada (total de 10 pontos). Tempo de prova: 2 horas.

1. (*Corrente de Deriva*) Uma barra de silício é dopada com fósforo à concentração de  $5 \times 10^{16}$  átomos/cm<sup>3</sup>. Um campo elétrico de  $10^4$  V/cm é aplicado às extremidades desta barra. Ela tem seção transversal com área igual a  $100 \text{ nm} \times 100 \text{ nm}$ . O limite de velocidade dos elétrons é dado por  $v_{sat} = 10^7$  cm/s. Qual é o valor da corrente de deriva que percorre a barra? Considere temperatura  $T = 300 \text{ K}$ .

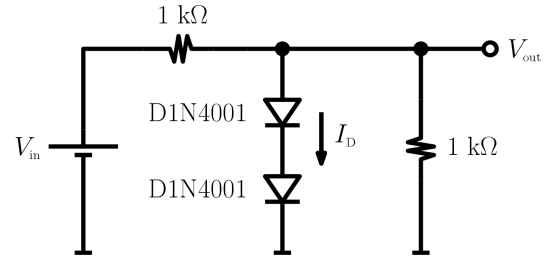
2. (*Corrente de Difusão*) Considere uma barra de silício, com seção transversal de  $200 \text{ nm} \times 200 \text{ nm}$  e comprimento de  $1 \mu\text{m}$ , para dentro da qual elétrons são injetados, pelo lado esquerdo, ao mesmo tempo em que lacunas são injetadas, pelo lado direito. Os perfis de concentração de elétrons,  $n(x)$ , e de lacunas,  $p(x)$ , são mostrados na figura a seguir. Calcule a corrente de difusão que flui através da barra, e indique a sua direção.



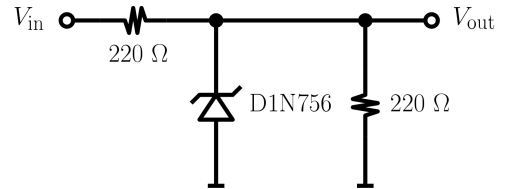
3. (*Junção pn*) Uma junção pn de silício é fabricada com  $N_D = 2 \times 10^{17}$  átomos/cm<sup>3</sup> e  $N_A = 5 \times 10^{16}$  átomos/cm<sup>3</sup>.

- Calcule as concentrações de portadores minoritários,  $p_n$  e  $n_p$ , a  $350 \text{ K}$ .
- Calcule a voltagem da barreira de potencial, também a  $350 \text{ K}$ .

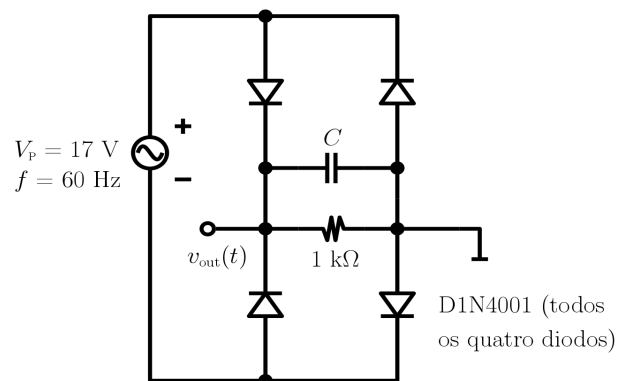
4. (*Polarização Direta – Modelo Exponencial*) Calcule os valores de  $V_{out}$  e  $I_D$  do circuito da figura a seguir, assumindo: a)  $V_{in} = 10 \text{ V}$ , e b)  $V_{in} = 1 \text{ V}$ .



5. (*Modelos de Diodos*) No circuito a seguir, considerando que a tensão de entrada  $V_{in}$  pode variar entre  $15 \text{ V}$  e  $20 \text{ V}$ : a) desenvolva um modelo linear por partes e calcule o valor que a tensão  $V_{out}$  assume quando  $V_{in} = 20 \text{ V}$ ; b) usando o modelo desenvolvido no item (a), calcule o valor que a tensão  $V_{out}$  assume quando  $V_{in} = 15 \text{ V}$ .



6. (*Fonte DC com Filtro RC e Valor Efícaz*) Para o circuito a seguir: a) escolha, para o capacitor  $C$ , o menor valor comercial que permite fator de ripple inferior a 10%; b) desenhe a forma de onda  $v_{out}(t)$  e calcule a diferença entre o seu valor efícaz e o seu nível médio.



Boa prova!

## Dados e Lista de Equações

1 eV =  $1.6 \times 10^{-19}$  J; silício:  $E_g = 1.12$  eV; diamante:  $E_g = 2.5$  eV; germânio:  $E_g = 0.66$  eV;

Silício:  $n_i = 5.2 \times 10^{15} T^{3/2} \exp \frac{-E_g}{2kT}$  elétrons/cm<sup>3</sup>; germânio:  $n_i = 1.66 \times 10^{15} T^{3/2} \exp \frac{-E_g}{2kT}$  elétrons/cm<sup>3</sup>;

Silício a 300 K:  $n_i = 1.08 \times 10^{10}$  cm<sup>-3</sup>;

Constante de Boltzmann:  $k = 1.38 \times 10^{-23}$  J/K; densidade do silício intrínseco:  $5 \times 10^{22}$  átomos/cm<sup>3</sup>;

Semicondutor intrínseco e dopagem:  $np = n_i^2$ ; fósforo e arsênio são “doadores”; boro e gálio são “aceitadores”;

Vetor velocidade, elétrons e lacunas:  $v_e = -\mu_n E$  e  $v_h = \mu_p E$ . No silício:  $\mu_n = 1350$  cm<sup>2</sup>/(Vs) e  $\mu_p = 480$  cm<sup>2</sup>/(Vs);

No germânio:  $\mu_n = 3900$  cm<sup>2</sup>/(Vs) e  $\mu_p = 1900$  cm<sup>2</sup>/(Vs);

Densidade de corrente (deriva):  $J_{tot} = q(\mu_n n + \mu_p p) E$ , proveniente de  $I = -vWhnq$ ;  $q = 1.6 \times 10^{-19}$  C;

Saturação de velocidade:  $v = \frac{\mu_0}{1 + \frac{\mu_0}{v_{sat}} E} E$

Dens. de corrente (difusão):  $J_{tot} = q \left( D_n \frac{dn}{dx} - D_p \frac{dp}{dx} \right)$ , prov. de  $I = AqD_n \frac{dn}{dx}$ ;  $D_n = 34$  cm<sup>2</sup>/s e  $D_p = 12$  cm<sup>2</sup>/s;

Concentração exponencial de elétrons ao longo do eixo  $x$ :  $n(x) = Ne^{-x/L_d}$ ;

Relação de Einstein:  $D/\mu = kT/q$ ; observação:  $kT/q \approx 26$  mV @  $T = 300$  K;

Barreira de potencial:  $V(x_2) - V(x_1) = \frac{-D_p}{\mu_p} \ln \frac{p_p}{p_n} \Rightarrow |V_0| = \frac{kT}{q} \ln \frac{p_p}{p_n} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$ , prov. de  $q\mu_p p E = qD_p \frac{dp}{dx}$ ;

Junção pn em polarização reversa:  $C_j = C_{j0} / \sqrt{1 - \frac{V_R}{V_0}}$ ;  $C_{j0} = \sqrt{\frac{\epsilon_{Si} q}{2} \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \frac{1}{V_0}}$ ;  $\epsilon_{Si} = 11.7 \times 8.85 \times 10^{-14}$  F/cm;

Polarização direta:  $p_{n,f} = \frac{p_{p,f}}{\exp \frac{V_0 - V_F}{V_T}}$ , e também  $\Delta p_n = p_{n,f} - p_{n,e} = \frac{N_A}{\exp(V_0/V_T)} \left( \exp \left( \frac{V_F}{V_T} \right) - 1 \right)$ ;

$I_D = I_S (e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1)$ , onde  $I_S = Aqn_i^2 \left( \frac{D_n}{N_A L_n} + \frac{D_p}{N_D L_p} \right)$ ;  $n$  = fator de não-idealidade do diodo;

Aproximação linear por partes (com  $V_{D0} = 0.6$  V e  $r_d = 10 \Omega$ , por exemplo):  $V_D = 0.6 + 10I_D$ ;

Polarização reversa:  $|\Delta T| = 10 \log_2 \frac{I_{D,f}}{I_{D,i}}$ ; diodo Zener em polarização reversa:  $I_Z = I_S \exp \frac{V_Z - V_{ZK}}{nV_T}$ ;

**Tabela 1.** Alguns dados sobre o diodo D1N4001.  $I_S = 14.1$  nA e  $n = 1.98$ .

$I_D$ (A)	2 $\mu$	5 $\mu$	10 $\mu$	20 $\mu$	50 $\mu$	0.1 m	0.2 m	0.5 m	1 m	2 m	5 m	10 m	20 m
$V_D$ (mV)	255	301	337	372	419	455	490	538	573	609	656	692	727

**Tabela 2.** Alguns dados sobre o diodo D1N756 em polarização direta.

$I_D$ (A)	2 $\mu$	5 $\mu$	10 $\mu$	20 $\mu$	50 $\mu$	0.1 m	0.2 m	0.5 m	1 m	2 m	5 m	10 m	20 m
$V_D$ (mV)	378	429	467	505	554	589	621	658	683	708	743	777	825

**Tabela 3.** Alguns dados sobre o diodo D1N756 em polarização reversa (considere  $V_{ZK} = 8.0$  V).

$I_Z$ (A)	2 $\mu$	5 $\mu$	10 $\mu$	20 $\mu$	50 $\mu$	0.1 m	0.2 m	0.5 m	1 m	2 m	5 m	10 m	20 m
$V_Z - V_{ZK}$ (mV)	020	032	041	050	063	072	081	094	105	117	138	161	200

$V_{DC} = (1/T) \int_0^T v(t) dt$ ;  $V_{RMS}^2 = (1/T) \int_0^T v^2(t) dt$ ;  $V_{AC,RMS}^2 = V_{RMS}^2 - V_{DC}^2$ ;

Senóide retificada (meia onda):  $V_{DC} = A/\pi$  e  $V_{RMS} = A/2$ ; senóide retificada (onda completa):  $V_{DC} = 2A/\pi$  e  $V_{RMS} = A/\sqrt{2}$ ; onda “dente-de-serra”:  $V_{DC} = (V_1 + V_2)/2$  e  $V_{AC,RMS} = V_{R,P}/\sqrt{3}$ , onde  $V_{R,P} = (V_1 - V_2)/2$ ;

$P_{AVG} = (1/T) \int_0^T v(t)i(t) dt = V_{RMS}^2/R$ .

(Filtro RC)  $r = I_{DC}/(4\sqrt{3}fCV_m) = V_{AC,RMS}/V_{DC}$ ;  $(1 + r\sqrt{3})V_{DC} = V_m$ ;  $V_{AC,RMS} = V_{R,P}/\sqrt{3} = (V_2 - V_1)/(2\sqrt{3})$ ;

Alguns valores de resistores comerciais ( $\Omega$ ): 33, 47, 68, 82, 100, 120, 150, 180, 220, 270; e alguns valores de capacitores comerciais ( $\mu F$ ): 47, 68, 100, 220, 330, 470, 680.