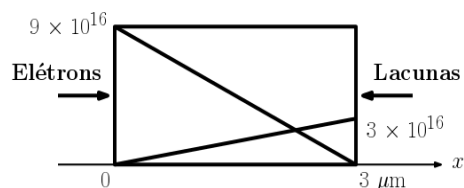


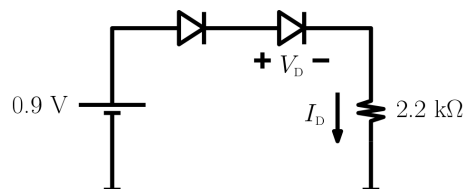
Todos os itens da prova têm o mesmo valor: 1.0 ponto cada (total de 10 pontos). Tempo de prova: 2 horas.

1. (Difusão) A figura a seguir mostra uma barra de silício sujeita a injeção de elétrons pela esquerda e lacunas pela direita. Considerando que a área da seção transversal da barra é de $500 \text{ nm} \times 500 \text{ nm}$, calcule a corrente de difusão que flui através dela.



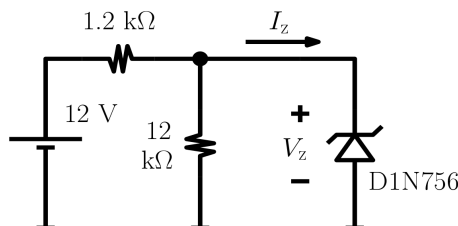
2. (Junção pn) Uma junção pn de silício é fabricada com $N_D = 10^{17} \text{ átomos/cm}^3$ e $N_A = 10^{17} \text{ átomos/cm}^3$. Calcule a voltagem da barreira de potencial à temperatura de 350 K.

3. (Polarização Direta) Considere o circuito a seguir, assumindo $I_s = 10^{-15} \text{ A}$ e $n = 1$ para o modelo exponencial do diodo. Calcule V_D e I_D .

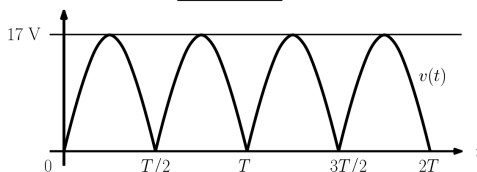
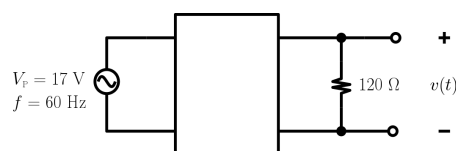


4. (Modelos de Diodos) Considerando o circuito a seguir, desenvolva um modelo linear por partes adequado para o diodo Zener e calcule I_z e V_z . Repita os cálculos, considerando resistores de 180Ω e

$1.8 \text{ k}\Omega$ no lugar dos resistores de $1.2 \text{ k}\Omega$ e $12 \text{ k}\Omega$, respectivamente.



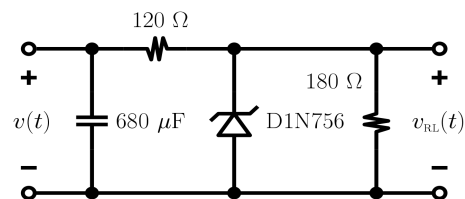
5. (Retificadores e Valores Eficazes) Considerando a figura a seguir, preencha o interior da caixa vazia de forma a gerar, para o resistor de 120Ω , a forma de onda $v(t)$ que está indicada. Calcule o fator de ripple de $v(t)$ e a potência dissipada no resistor de 120Ω . Para simplificar, utilize o modelo ideal para representar os diodos.



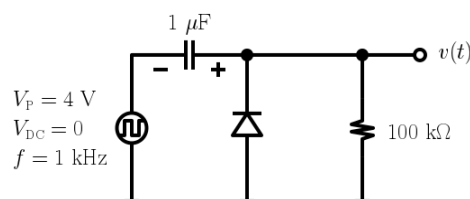
6. (Filtro RC) Se conectarmos um capacitor em paralelo com o resistor da figura da Questão 5, qual é a menor capacitância que leva a fator de ripple inferior a 15 %?

7. (Fonte Regulada a Zener) Mantendo o resistor de 120Ω conectado ao circuito da Questão 5, conecte também a este resistor o circuito mostrado a seguir. Qual será o fator de ripple observado na

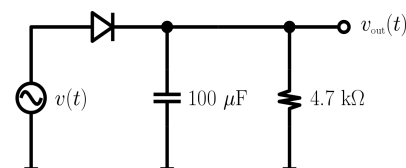
carga resistiva de 180Ω ? Dica: calcule, primeiro, o fator de ripple no capacitor.



8. (Grampeador) Desenhe a forma de onda $v(t)$ gerada pelo circuito a seguir em regime permanente:



9. (Multiplicador) Considere uma fonte de tensão com forma de onda $v(t) = 9.3 + 10 \sin(2\pi \times 60 \times t)$ ligada à entrada do circuito a seguir. Desenhe a forma de onda $v_{out}(t)$.



10. (Amp Op) Desenhe o diagrama esquemático de um amplificador operacional com seus terminais conectados em configuração não-inversora, utilizando dois resistores iguais ($R_1 = R_2$) com valor igual a $1 \text{ k}\Omega$. Calcule o ganho do amplificador assim obtido, assumindo que o ganho em malha aberta do amplificador operacional é $A = 1000$ e a sua resistência de entrada é $R_{in} = 10 \text{ k}\Omega$.

Boa prova!

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

(Fonte Regulada a Zener) $r_{RL} = r_{capacitor} \frac{r_z}{R_s + r_z} \frac{V_{DC, capacitor}}{V_z}$; fator de regulação = $\frac{V_{DC,NL} - V_{DC,FL}}{V_{DC,NL}} \times 100\%$;

$(V_1 - V_z)/R_{smax} = I_{zmax} + I_{Lmin}$ (use esta fórmula com moderação e com cuidado!)

$(V_2 - V_z)/R_{smin} = I_{zmin} + I_{Lmax}$ (use esta fórmula com moderação e com cuidado!)

Alguns valores de resistores comerciais (Ω): 33, 47, 68, 82, 100, 120, 150, 180, 220, 270;

Alguns valores de capacitores comerciais (μF): 47, 68, 100, 220, 330, 470, 680.

Dados e Lista de Equações

1 eV = 1.6×10^{-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/cm³; germânio: $n_i = 1.66 \times 10^{15} T^{3/2} \exp \frac{-E_g}{2kT}$ elétrons/cm³;

Silício a 300 K: $n_i = 1.08 \times 10^{10}$ cm⁻³;

Constante de Boltzmann: $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K; densidade do silício intrínseco: 5×10^{22} átomos/cm³;

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: $\mu_n = 1350$ cm²/(Vs) e $\mu_p = 480$ cm²/(Vs);

No germânio: $\mu_n = 3900$ cm²/(Vs) e $\mu_p = 1900$ cm²/(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 $I = AqD_n \frac{dn}{dx}$; $D_n = 34$ cm²/s e $D_p = 12$ cm²/s;

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

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 $I_S = Aq n_i^2 \left(\frac{D_n}{N_A L_n} + \frac{D_p}{N_D L_p} \right)$; n = fator de não-idealidade do diodo;

Aproximação com $V_{D0} = 0.6$ V e $r_d = 10$ Ω : $V_D = 0.6 + 10 I_D$;

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 μ	5 μ	10 μ	20 μ	50 μ	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 μ	5 μ	10 μ	20 μ	50 μ	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 μ	5 μ	10 μ	20 μ	50 μ	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 $V_{R,P} = (V_1 - V_2)/2$;

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