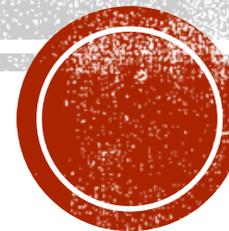


DÍODO DE JUNÇÃO P-N

João Paulo Neto Torres

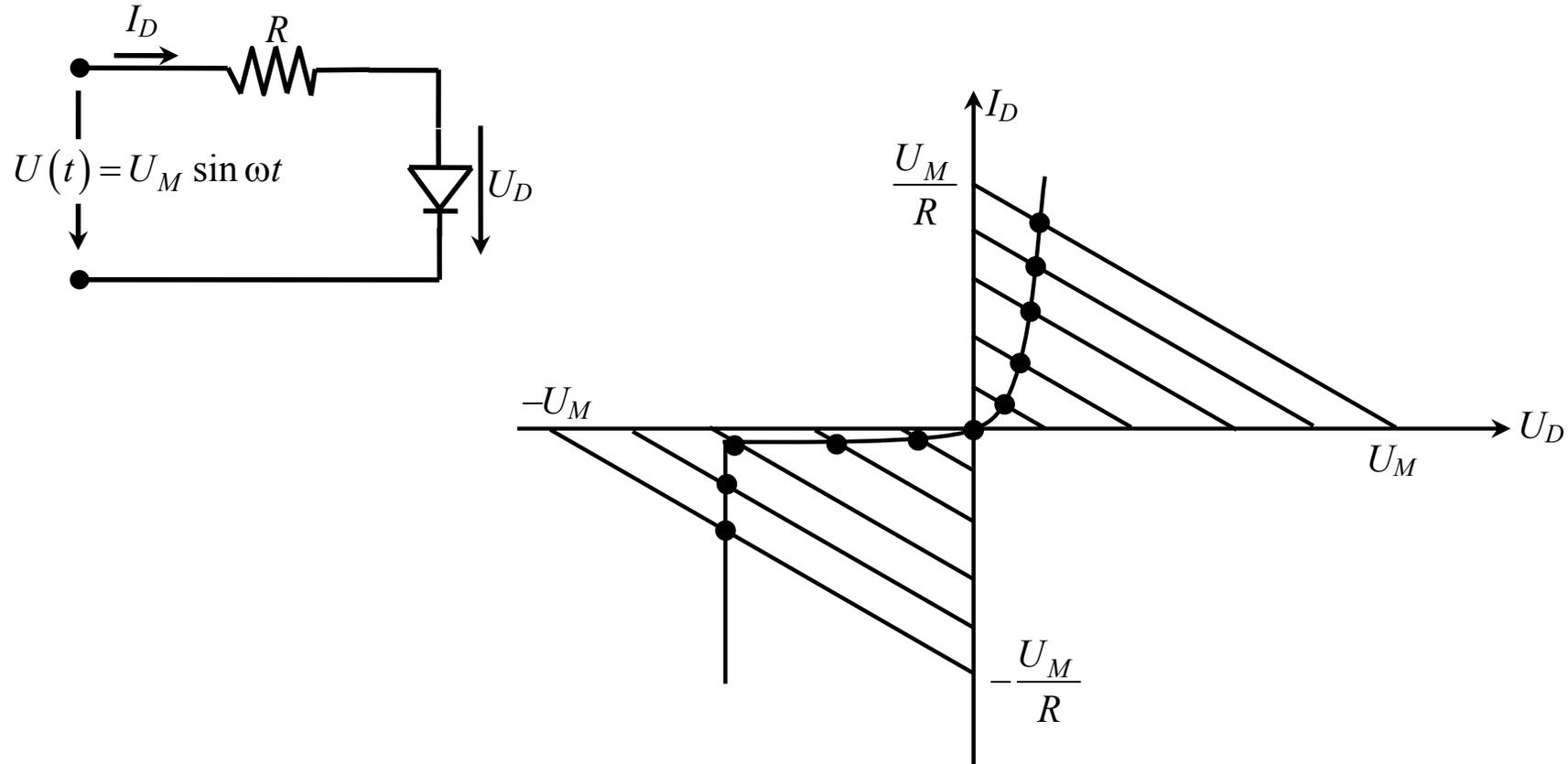


- **Junção p-n em regime variável**
- Analise da junção para correntes e tensões variáveis, como, por exemplo, considerando pequenas variações (**regime dito incremental**) em torno de um dado ponto da característica estacionária designado por ponto de funcionamento em repouso (PFR).
- Em determinadas aplicações, um **díodo poderá ser substituído** do ponto de vista de sinal **por uma resistência**; noutras situações será mais adequado modelar o díodo por uma **associação RC paralelo**, só **por uma capacidade**, ou até mesmo incluindo uma **bobina**.



- **Regime quase-estacionário**

- Considere-se o circuito da Fig., com uma tensão à entrada lentamente variável



- Tensão de entrada de baixa frequência ($\omega\tau \ll 1$), pode considerar-se a solução como uma seqüência de estados estacionários.



- O problema resume-se à determinação dos sucessivos pontos de funcionamento em repouso (PFR).

$$I_D = I_{is} (e^{U_D/u_T} - 1)$$

$$U = RI_D + U_D$$

- Três casos podem acontecer:
 - **$U > 0$: o diodo está polarizado diretamente :**

$$U_D = u_T \ln(I_D / I_{is} + 1)$$

$$I_D = \frac{U - U_D}{R}$$

- Por uso sucessivo das equações são calculados novos valores de I_D e U_D . O processo é rapidamente convergente.



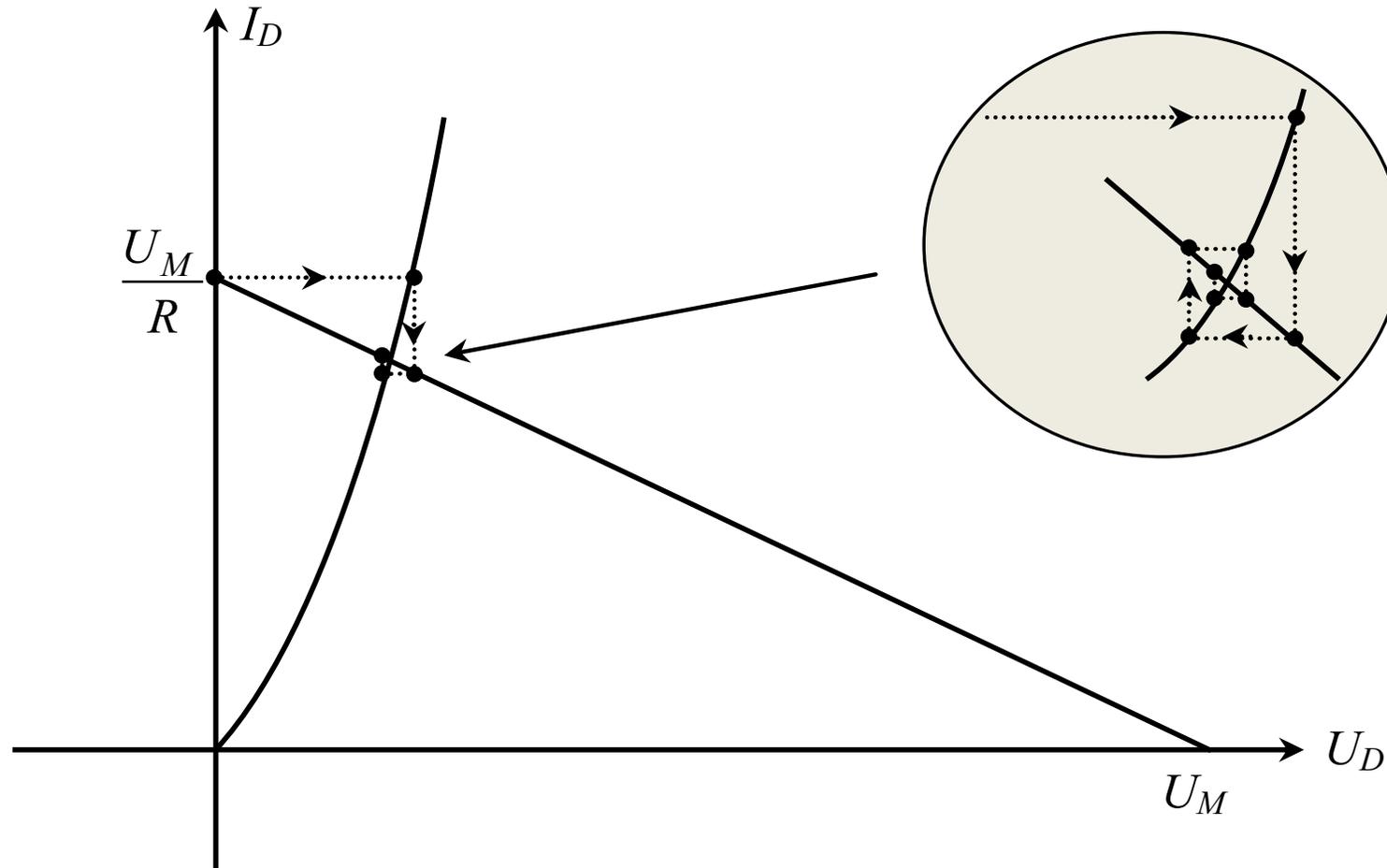


Fig. – Cálculo gráfico do PFR por um processo iterativo quando este se encontra no primeiro quadrante.



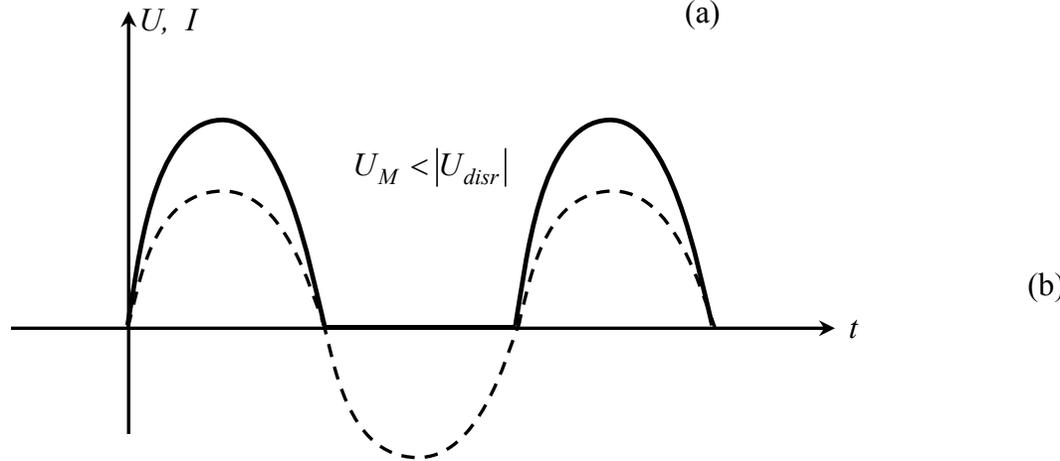
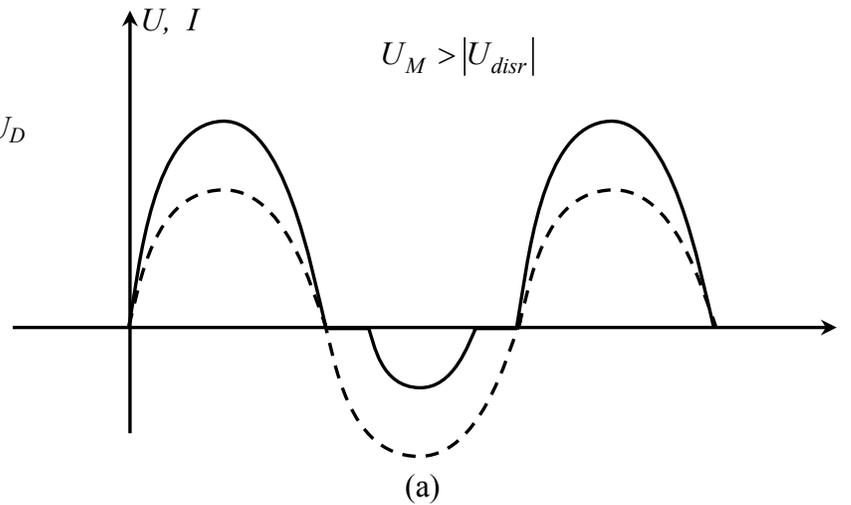
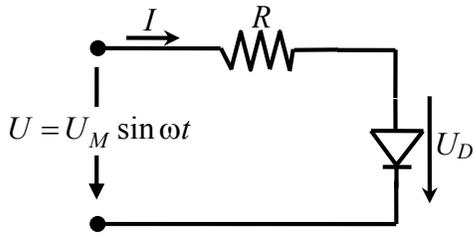


Fig.– Regime quase-estacionário: (a) $U_M > |U_{disr}|$; (b) $U_M < |U_{disr}|$ (retificador de meia-onda).

A tensão está representada a tracejado e a corrente a traço contínuo.

- $U_{disr} < U < 0$: o diodo está polarizado inversamente sem estar na disrupção. As soluções são dadas por:

$$I_D = -I_{is}$$

$$U_D = U - RI_D \cong U$$

- $U < U_{disr}$: o diodo está na disrupção. As soluções são dadas por:

$$I_D = \frac{U - U_{disr}}{R}$$

$$U_D = U_{disr}$$



- O retificador de onda completa permite a passagem de corrente nos dois sentidos, obrigando à utilização de circuitos com, pelo menos, dois díodos (Fig.).

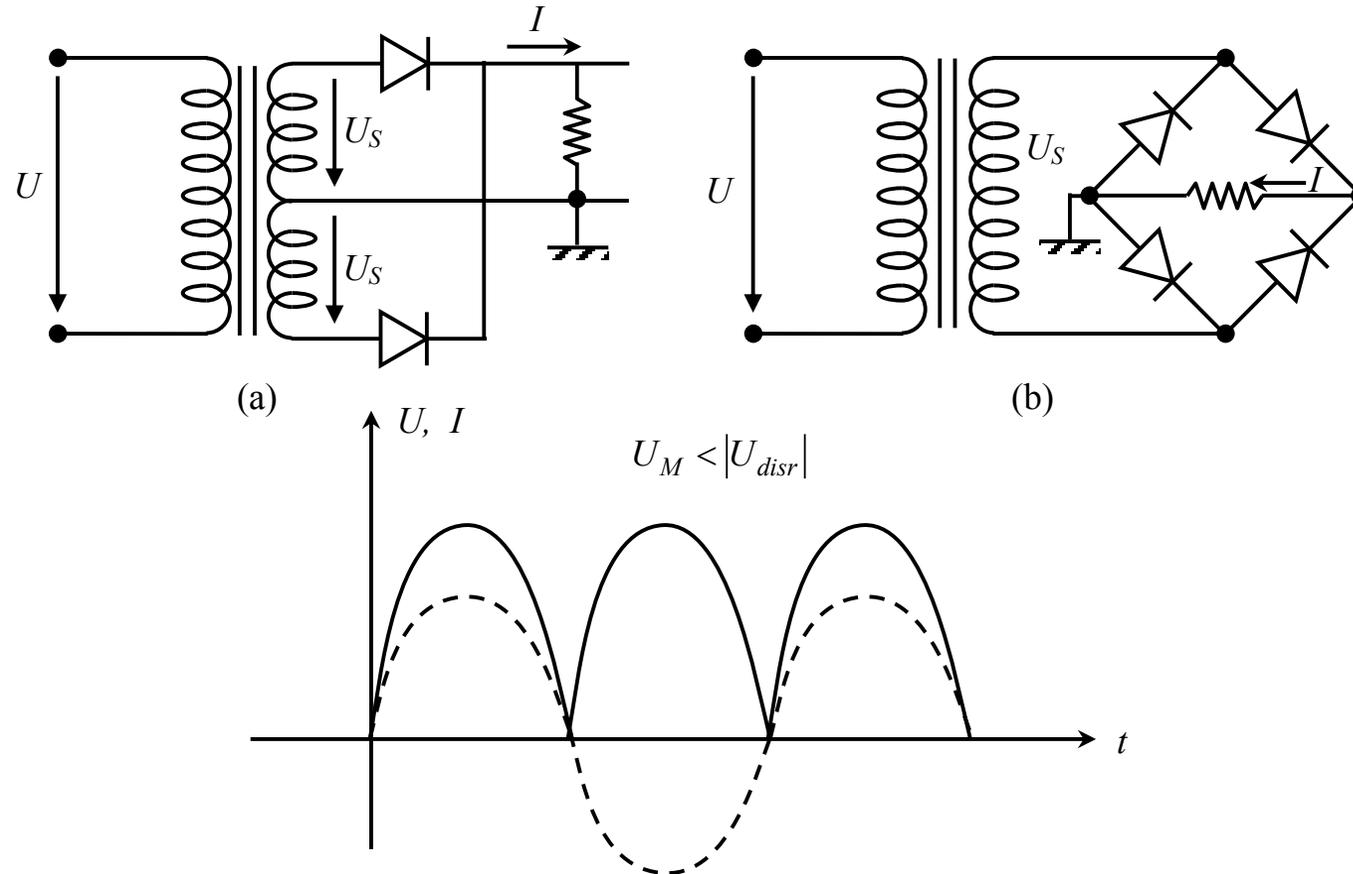


Fig. – Retificador de onda completa. (a) Circuito com transformador com ponto médio; (b) Circuito com ponte de díodos. A tensão está representada a tracejado e a corrente a traço contínuo.



- Modelos simplificados para a característica do díodo de junção

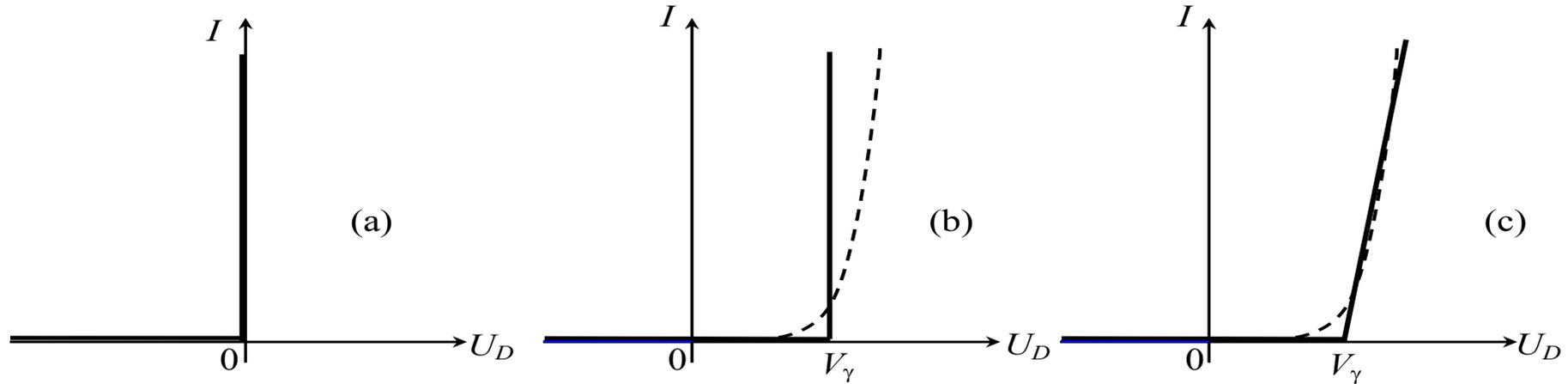


Fig. – Modelos simplificados para a característica do díodo de junção. (a) Díodo ideal; (b) Modelo de fonte de tensão ; (c) Modelo de fonte de tensão mais resistência.

- Uma aproximação melhor consiste em substituir o díodo por uma fonte de tensão constante que, no caso do Si toma um valor típico de 0,7V .
- Um modelo ainda mais preciso envolve um fonte de tensão em série com uma resistência.



- No caso do diodo ideal, a análise do circuito é bastante simples. Considere-se o circuito da Fig.

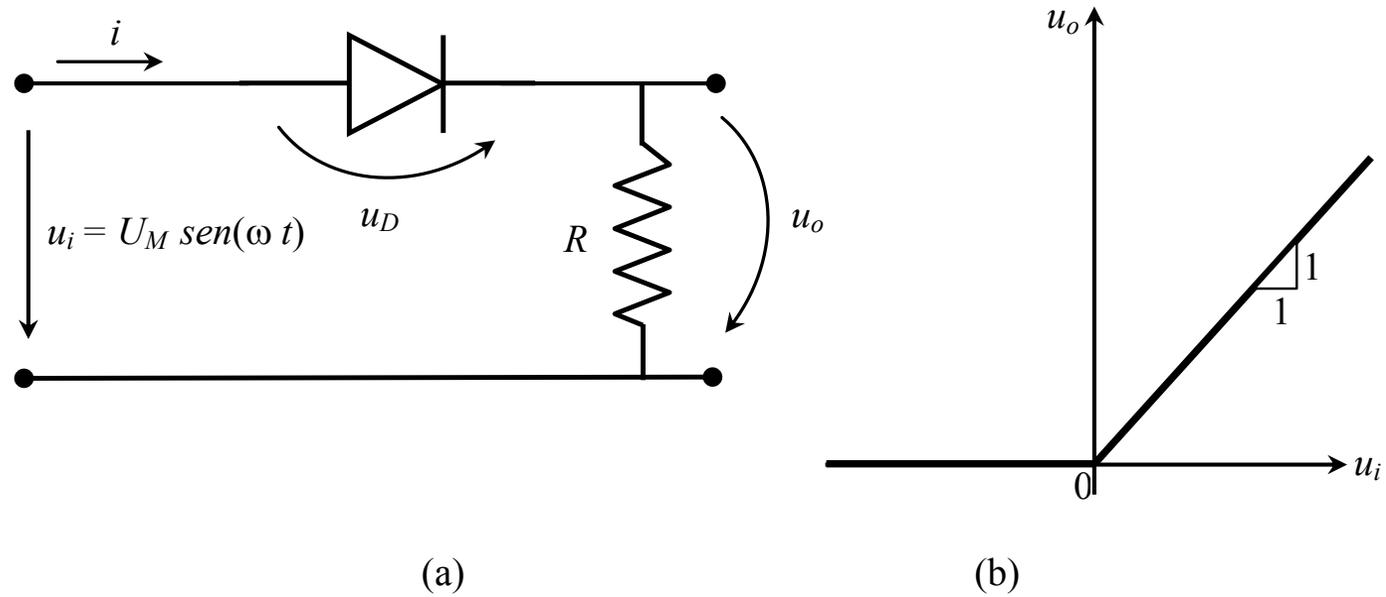


Fig. – (a) Circuito retificador; (b) Função de transferência: diodo ideal.

- Para $U > 0$, $u_o = u_i$
- Para $U < 0$, $u_o = 0$



Regime incremental. Condutância. Capacidades de transição e de difusão

- Estudo de uma componente variável de pequena amplitude, dita incremental, em torno do PFR.
 - O díodo pode ser modelado por associações de condutâncias e capacidades que dependem do PFR.

Condutância incremental

- O desenvolvimento em série da corrente I em torno do PFR é dado por:

$$I = I_0 + \left(\frac{\partial I}{\partial U} \right)_{PFR} (U - U_0) + \left(\frac{\partial^2 I}{\partial U^2} \right)_{PFR} \frac{(U - U_0)^2}{2!} + \dots$$

- Define-se a condutância incremental como:

$$g_0 = \left(\frac{\partial I}{\partial U} \right)_{PFR} = \frac{I_{is} e^{\frac{U_0}{\eta u_T}}}{\eta u_T} = \frac{I_0 + I_{is}}{\eta u_T}$$



Por sua vez:

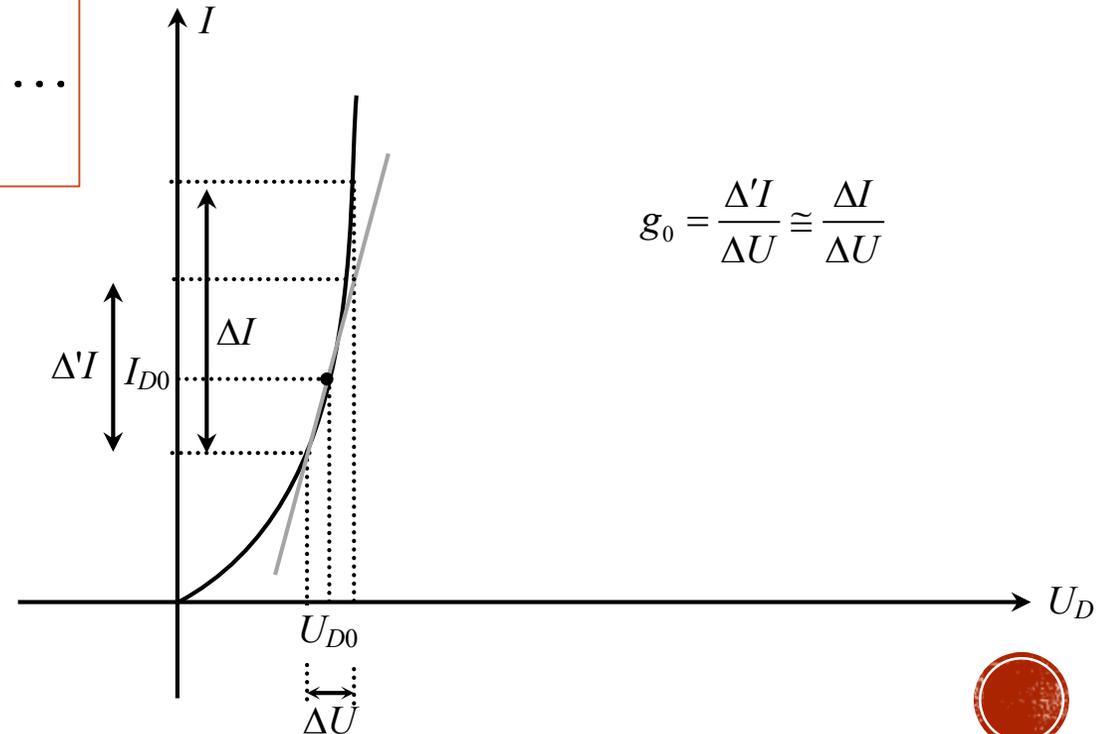
$$\left(\frac{\partial^2 I}{\partial U^2} \right)_{PFR} = \frac{I_{is}}{(\eta u_T)^2} e^{\frac{U_0}{\eta u_T}} = \frac{g_0}{\eta u_T} \quad \longrightarrow \quad \left(\frac{\partial^n I}{\partial U^n} \right)_{PFR} = \frac{g_0}{(\eta u_T)^{n-1}}$$

pelo que:

$$\Delta I = g_0 \Delta U + g_0 \frac{\Delta U^2}{2! \eta u_T} + g_0 \frac{\Delta U^3}{3! (\eta u_T)^2} + \dots$$

Para pequenas variações, isto é, $\Delta U \ll \eta u_T$, tem-se:

$$\Delta I \cong g_0 \Delta U$$



Capacidades diferenciais

Um fenómeno que pode assumir grande importância é **a variação de carga espacial quando a tensão varia**. Pode ser traduzido no modelo equivalente da junção *p-n* por capacidades, ditas diferenciais, que traduzem:

- O efeito associado à variação da carga espacial, resultante da variação dos limites da região de carga espacial (**capacidade de transição C_T**);
- O efeito ligado à variação das concentrações nas fronteiras das regiões neutras com a região de transição (**capacidade de difusão C_D**).



Capacidade de transição

- A tensão aos terminais da junção reflete-se inteiramente na variação do potencial de contacto.
- A uma variação de tensão δU corresponderá uma variação de carga dQ_n do lado n e dQ_p igual e de sinal contrário do lado p .

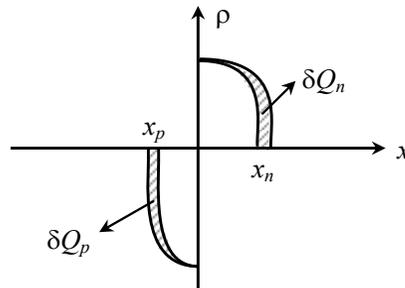
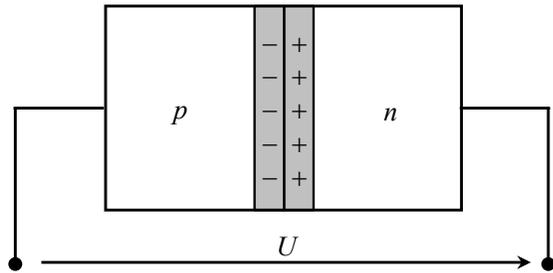


Fig. – Variação da carga na região de carga espacial com a variação da tensão aplicada.

$$C_t = - \left. \frac{\delta Q_n}{\delta U} \right|_{PFR} \cong - \left. \frac{dQ_n}{dU} \right|_{PFR} = - \left. \frac{dQ_n}{dx_n} \frac{dx_n}{dU} \right|_{PFR}$$

Ao admitir-se a hipótese de depleção total:

$$\frac{dQ_n}{dx_n} = A\rho(x_n) = AqN_d^+ \cong AqN_d$$



Tendo em conta que

$$x_{n0} = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_{c0}}{q} \frac{N_a^-}{N_d^+ (N_a^- + N_d^+)}}$$

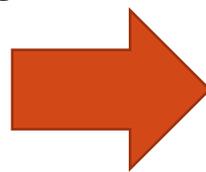
com V_{c0} substituído por $V_{c0} - U$:

$$\frac{dx_n}{dU} = \sqrt{\frac{2\varepsilon N_a}{q N_d (N_a + N_d)}} \left(-\frac{1}{2}\right) (V_{c0} - U)^{-\frac{1}{2}}$$

Tendo em conta as equações anteriores obtém-se

$$C_t = A \sqrt{\frac{\varepsilon q N_a N_d}{2(N_a + N_d)}} (V_{c0} - U_0)^{-\frac{1}{2}}$$

generalizando



$$C_t = C_t(0) \left(1 + \frac{U}{V_{c0}}\right)^{-m} \quad \frac{1}{3} \leq m \leq \frac{1}{2}$$



- Sendo U o módulo da tensão aos terminais do díodo polarizado inversamente e m o coeficiente de gradualidade da junção.
 - Vale $1/2$ para uma junção $p-n$, que se tomou como abrupta, e $1/3$ para junções graduais.

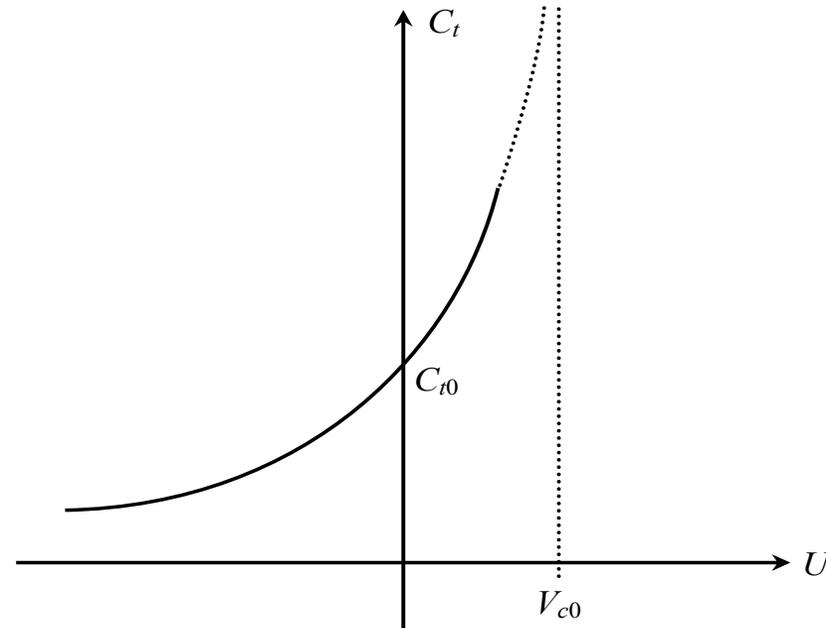


Fig. – Variação da capacidade diferencial de transição com a polarização.

A variação da capacidade de transição com a tensão aplicada pode ser utilizada na determinação da concentração de dopante em função da posição. A situação mais simples é a de uma junção assimétrica.



Hipótese: lado p é mais fortemente dopado do que o lado n , $N_a \gg N_d$, e que a junção é abrupta pode escrever-se:

$$N_d(x_n) = -C_t / \left[Aq \left(dx_n / dU \right) \right]_{\text{PFR}}$$

Tendo em atenção que:

$$\frac{dx_n}{dU} = \frac{dx_n}{dC_t} \frac{dC_t}{dU}$$

e admitindo que $C_t = \epsilon A/l$, em que $l \cong x_n$, ter-se-á:

$$N_d(x_n) = \frac{(C_t / A)^3}{q\epsilon d(C_t / A) / dU} \Big|_{\text{PFR}}$$



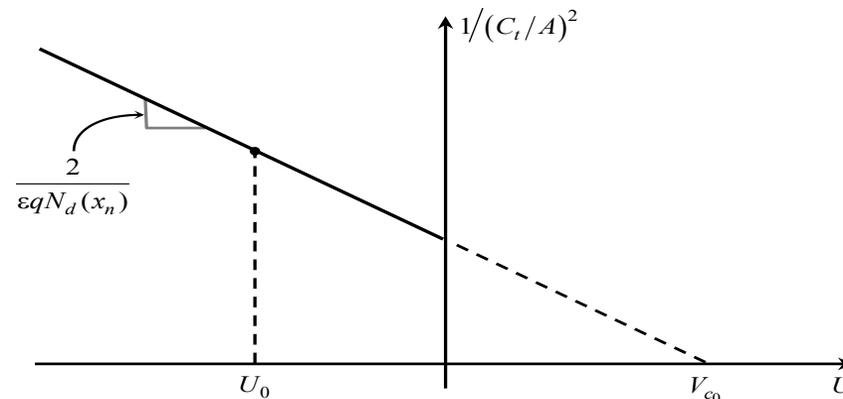
Atendendo a que:

$$\frac{d(1/C^2)}{dU} = -\frac{2}{C^3} \left(\frac{dC}{dU} \right)$$

tem-se finalmente:

$$N_d(x_n) = \frac{-2}{q\varepsilon d \left(1/(C_t/A)^2 \right) / dU \Big|_{\text{PFR}}}$$

Este resultado mostra que o declive da curva representada no gráfico de $1/(C_t/A)^2$, em função da tensão de polarização, U é uma medida da densidade de dopante N_d na fronteira da região de transição com a região neutra do tipo- n



- Nas aplicações do diodo, não como retificador mas como capacidade controlada por tensão, o dispositivo toma a designação de Varicap (*Variable Capacitance*) ou Varactor (*Variable Reactance*).
 - Possuem valores típicos de dezenas a centenas de picofarads, sendo fabricados com Si para aplicações em baixa frequência e com GaAs para frequências mais elevadas.
 - São utilizados, por exemplo, para **sintonia eletrónica do recetor às diferentes estações de televisão**.

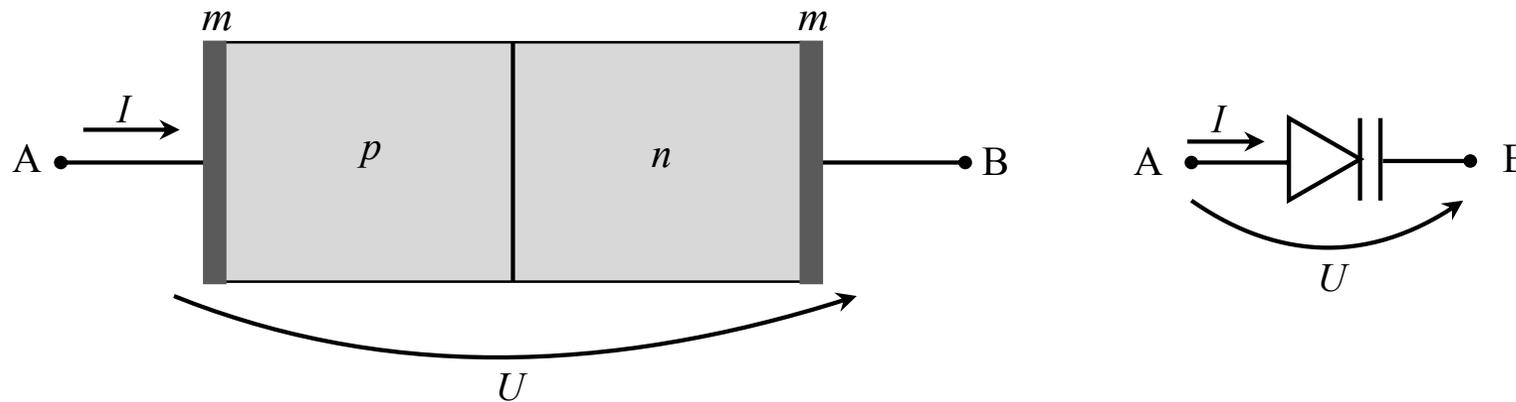


Fig. – Varicap.



Capacidade de difusão

- A capacidade de difusão traduz a variação de carga nas regiões quase-neutras.
- Admita-se que as grandezas variáveis têm uma variação sinusoidal no tempo em torno de um valor constante (polarização):

$$u(t) = U_0 + U_M \cos(\omega t + \alpha)$$

- As densidades de minorias à entrada da região quase-neutra de tipo-p são dadas por:

$$n_{p1}(t) = n_{p0} e^{u(t)/\eta u_T} = n_{p0} e^{U_0/\eta u_T} e^{U_M \cos(\omega t + \alpha)/\eta u_T}$$

- Se $U_M \ll \eta u_T$, tem-se:

$$e^{U_M \cos(\omega t + \alpha)/\eta u_T} \cong 1 + \frac{U_M}{\eta u_T} \cos(\omega t + \alpha)$$



senconduzido a:

$$n_{p_1}(t) = n_{p_0} e^{U_0/\eta u_T} + \frac{n_{p_0} e^{U_0/u_T}}{\eta u_T} U_M \cos(\omega t + \alpha)$$

Sendo

$$n(x,t) = \text{Re} \left\{ \bar{n}(x) e^{j\omega t} \right\}$$

Da equação da continuidade correspondente ao regime estacionário sem condução é-se conduzido no lado neutro do tipo-p a:

$$j\omega \bar{n} = -\frac{\bar{n}}{\tau_n} + D_n \frac{d^2 \bar{n}}{dx^2}$$

$$\bar{L}_n = \sqrt{\frac{D_n \tau_n}{1 + j\omega \tau_n}} = \frac{L_n}{\sqrt{1 + j\omega \tau_n}}$$



Para os casos em que as zonas quase-neutras tenham comprimentos muito superiores aos comprimentos de difusão das minorias, a solução é:

$$\bar{n}(x) = \bar{n}_1 e^{-(x_p - x)/\bar{L}_n}$$

À entrada da zona neutra do tipo-p, a densidade de corrente de elétrons é dada por:

$$\bar{J}_n(x_p) = qD_n \frac{d\bar{n}}{dx} = q \frac{D_n}{\bar{L}_p} \bar{n}(x_p)$$

De forma análoga se mostraria que, para a fronteira da zona neutra do tipo-n, a densidade de corrente de buracos seria dada por:

$$\bar{J}_p(x_n) = -qD_p \frac{d\bar{p}}{dx} = q \frac{D_p}{\bar{L}_p} \bar{p}(x_n)$$



Para a fronteira entre a zona neutra e de transição obtém-se:

$$\bar{n}(x_p) = \frac{n_{p0} e^{U_0/\eta u_T}}{\eta u_T} \bar{U}_M$$

$$\bar{p}(x_n) = \frac{p_{n0} e^{U_0/\eta u_T}}{\eta u_T} \bar{U}_M$$

A amplitude complexa da componente variável da corrente é dada pela contribuição dos dois tipos de portadores, de acordo com:

$$\bar{I} = A \left[\bar{J}_p(x_n) + \bar{J}_n(x_p) \right] = Aq \frac{e^{\frac{U_0}{\eta u_T}}}{\eta u_T} \left(\frac{D_p p_{n0}}{L_p} \sqrt{1 + j\omega\tau_p} + \frac{D_n n_{p0}}{L_n} \sqrt{1 + j\omega\tau_p} \right) \bar{U}_M$$

Definindo a admitância incremental como sendo:

$$\bar{I} = \bar{Y} \times \bar{U}_M$$



Caso 1: $\omega\tau_{n,p} \ll 1$  $\sqrt{1 + j\omega\tau} \cong 1 + j\omega\tau / 2$

$$\bar{Y} = Aq \frac{e^{U_0/\eta u_T}}{\eta u_T} \left(\frac{D_p p_{n_0}}{L_p} + \frac{D_n n_{p_0}}{L_n} \right) + j\omega \frac{qA}{2} (p_{n_0} L_p + n_{p_0} L_n) \frac{e^{U_0/\eta u_T}}{\eta u_T}$$

condutância incremental g

capacidade de difusão C_d

$$\bar{Y} = g + j\omega C_d$$

Caso 2: $\omega\tau_{n,p} \gg 1$

$$g(\omega) \propto \sqrt{\omega}$$

$$C_d(\omega) \propto 1 / \sqrt{\omega}$$

$$\bar{Y} = g(\omega) + j\omega C_d(\omega)$$

O conceito de modelo não faz sentido neste caso, uma vez que o valor a atribuir aos parâmetros incrementais varia, agora, com a própria frequência.



- A determinação da C_d pode ser feita tendo em conta o excesso de portadores minoritários nas regiões n e p junto à região de transição, com tensão direta aplicada.
- Este excesso de portadores dá origem a uma carga elétrica diretamente proporcional à corrente no diodo, de acordo com:

$$Q_S = \tau_T I$$



tempo de trânsito

- é um parâmetro do modelo do diodo utilizado no programa de simulação de circuitos SPICE.
- Define-se capacidade de difusão:

$$C_d = \left. \frac{\delta Q_S}{\delta U} \right|_{\text{PFR}} \approx \tau_T \left. \frac{\delta I}{\delta U} \right|_{\text{PFR}}$$



$$C_d = \frac{\tau_T I_{is} e^{U_0/nu_T}}{nu_T} = \tau_T g_0$$



- O tempo de trânsito τ_T é determinado pelo ritmo de recombinação.
- Pretendendo-se reduzir o tempo de trânsito, deve elevar-se o ritmo de recombinação,
- **O modelo incremental do díodo**

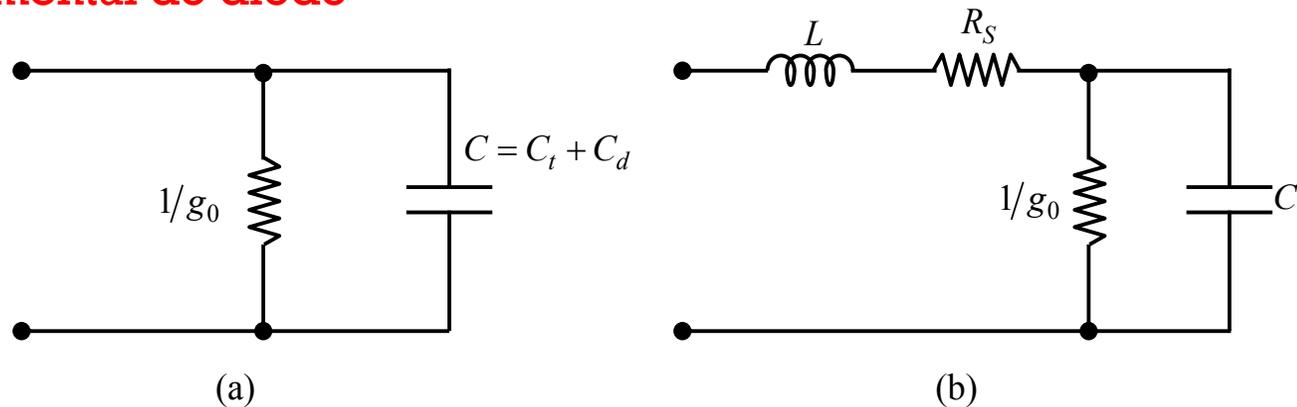


Fig. – Modelo incremental para o díodo: (a) Frequências intermédia; (b) Frequências muito altas.

- Na polarização inversa, reduz-se à capacidade de transição C_t , pois $g_0 \cong 0$ e $C_d \cong 0$.
- No caso das frequências muito elevadas (da ordem dos GHz) existem efeitos indutivos em causa que devem ser incluídos no modelo.



Regime de comutação

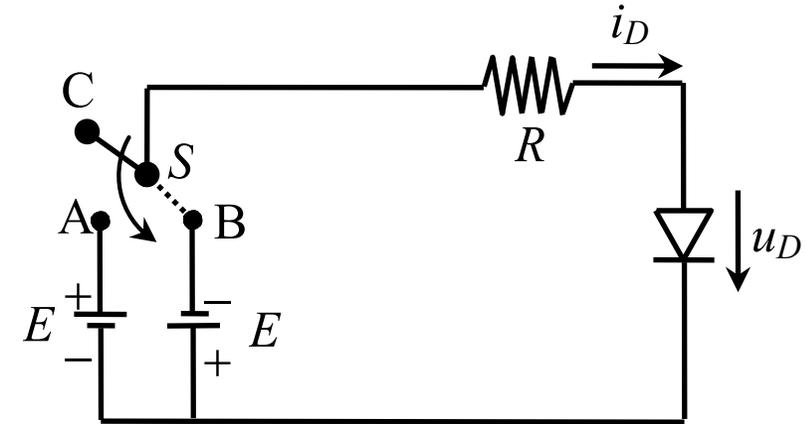
- Análise dos transitórios associados às mudanças rápidas de um diodo da situação de polarização direta para a situação de polarização inversa ou vice-versa,.
 - casos em que os tempos em causa são da ordem dos tempos de vida média dos portadores.
- Hipótese de **injeção fraca**.
 - válida desde que as densidades de corrente não sejam muito elevadas (da ordem de 10^6 A/cm² para as concentrações habituais de impurezas de substituição, $\sim 10^{24}$ m⁻³),.
 - corresponde a assumir, para as concentrações das maiorias, o seu valor de equilíbrio termodinâmico ($n_{n1} \cong n_{n0}$; $p_{p1} \cong p_{p0}$).
- Este facto observa-se quer a polarização seja direta quer seja inversa, isto é, o seu valor não é afetado pela polarização, desde que esta seja tomada como **uma pequena perturbação no sistema**.



Transitório de ligação

- Para $t < 0$ o interruptor S está ligado a C e portanto $i_D = 0$ e $u_D = 0$.
- Quando no instante $t = 0$ o interruptor S muda para a posição A , a evolução de u_D no tempo não é instantânea. A distribuição dos portadores minoritários demora algum tempo a atingir o valor final.
- i_D sobe imediatamente para o valor final desde se admita que $u_D \ll E$.

$$I_F = \frac{E - u_D}{R} \simeq$$



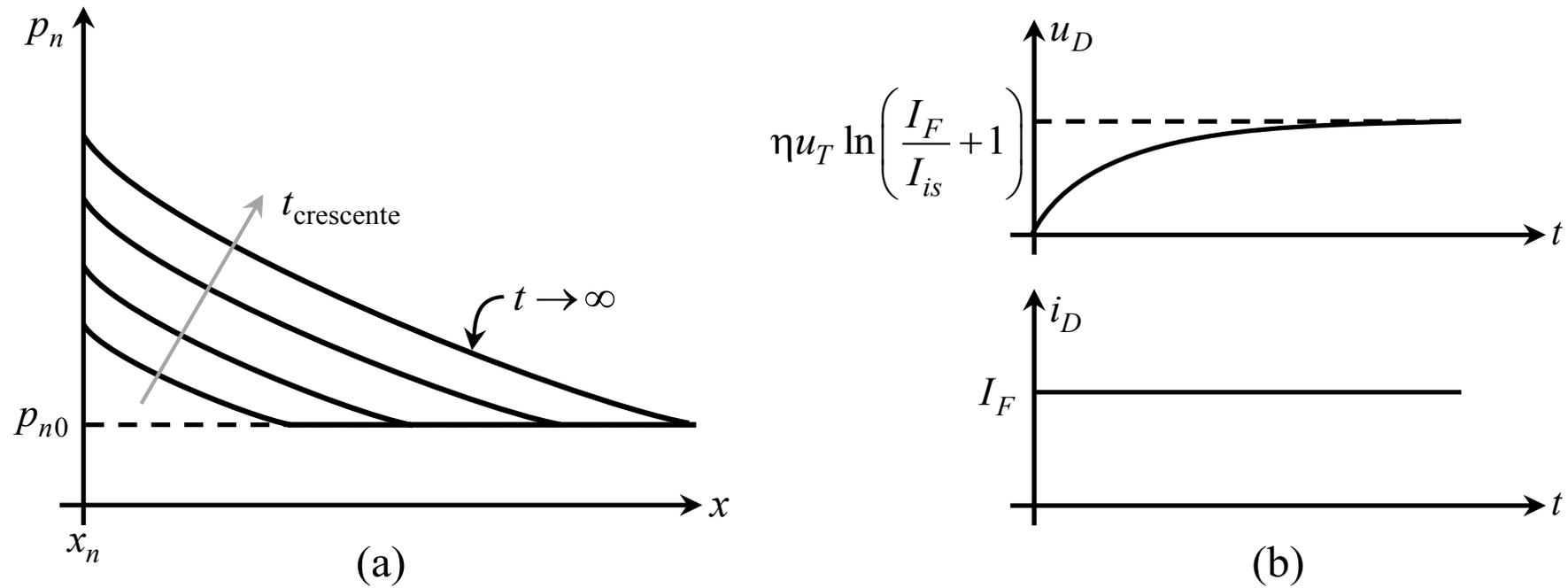


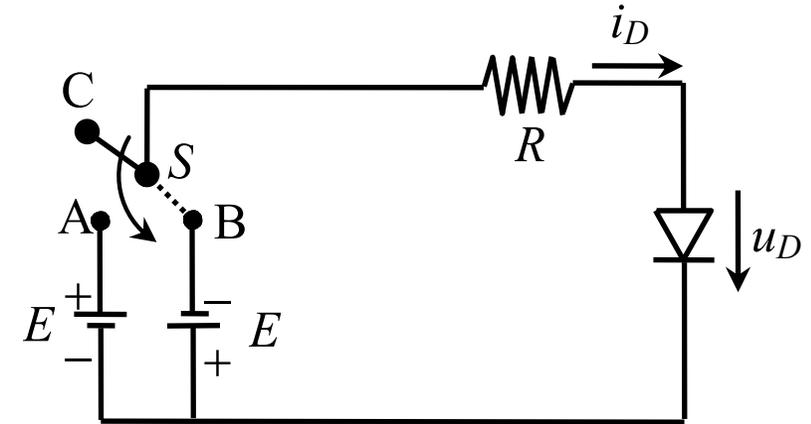
Fig. – Transitório de ligação para polarizar diretamente o díodo.

(a) Evolução da densidade de buracos do lado- n . (b) Evoluções da corrente e da tensão no díodo durante o transitório.



Transitório e Corte

- na situação estacionária, se inverte a polarização. Isto corresponde a, no instante $t = 0$, mudar o interruptor da posição A para a posição B.
- A tensão aos terminais do diodo, relacionada com as concentrações dos portadores, não pode variar instantaneamente.
- Contudo, variações bruscas na corrente são possíveis.
- A corrente que, para $t < 0$, era $I_F = (E - u_D)/R$ passa a ser em $t = 0$, $I_R = (-E - u_D)/R$.
 - corresponde um ajuste da distribuição dos minoritários junto à região de transição.



- Quando u_D se torna negativo, a junção fica polarizada inversamente e a densidade dos minoritários passa a estar abaixo do valor de equilíbrio termodinâmico.
- t_{rc} : tempo de recuperação do corte
- t_a : tempo de armazenamento
- A variação da corrente deve-se ao facto de termos desprezado o coeficiente de indução dos fios, não havendo, assim, variação instantânea da energia magnética associada à da corrente. Esta indução será tanto menor quanto mais grossos e curtos forem os fios.

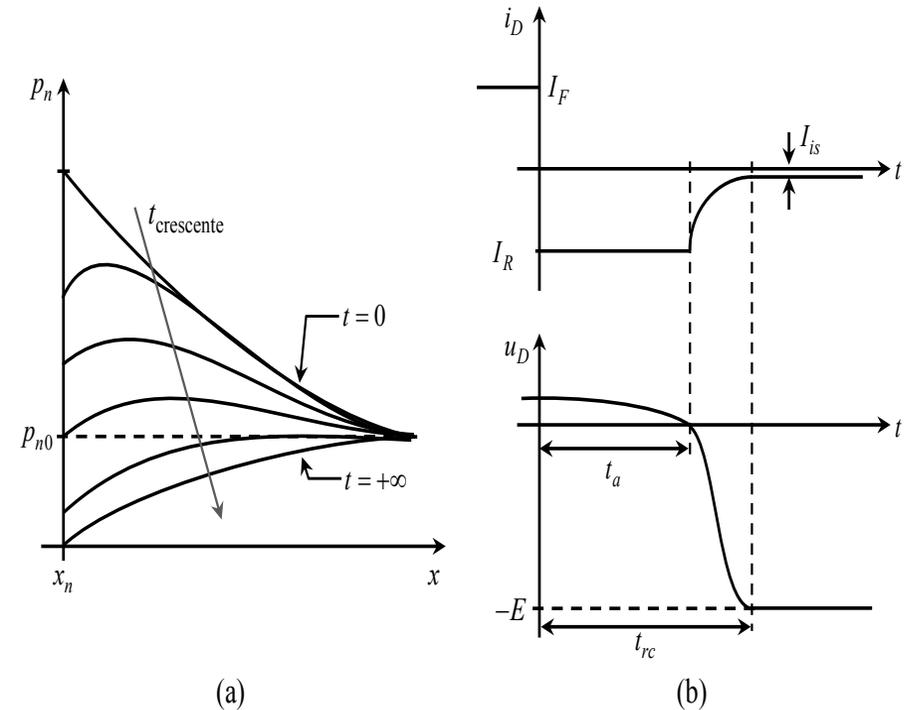


Fig.— Transitório associado à passagem da polarização direta para a polarização inversa. (a) Evolução da densidade de buracos do lado n ; (b) Evoluções da corrente e da tensão durante o regime transitório.

