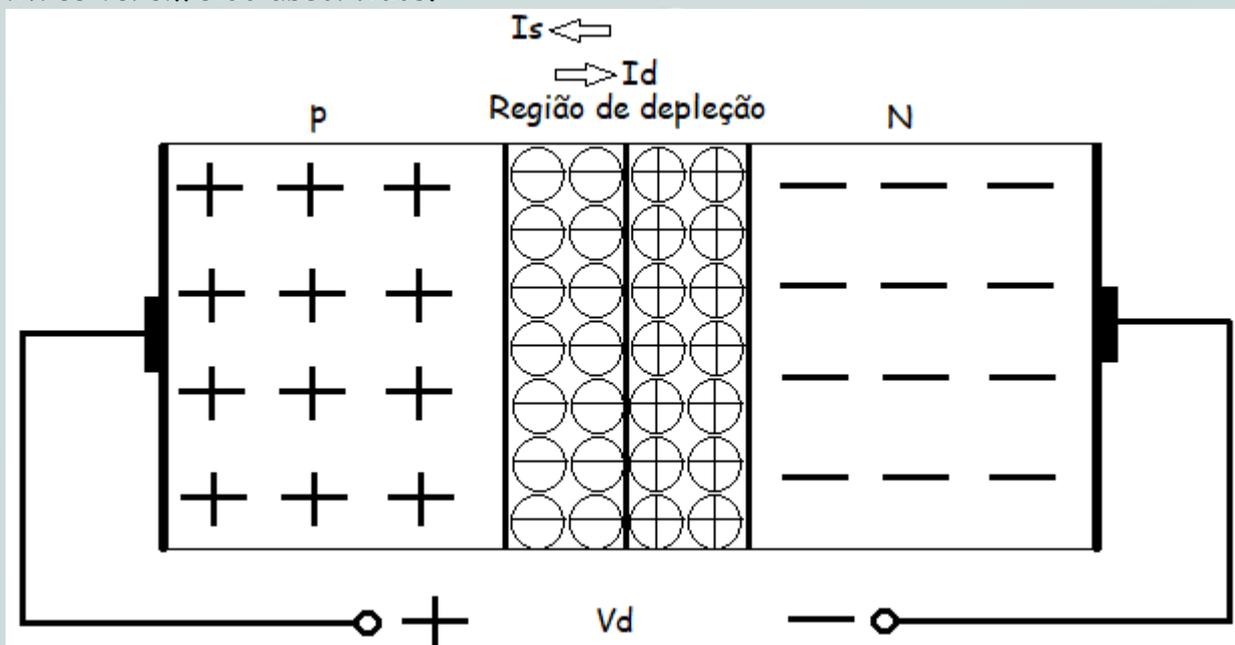


AULA: 02 - DIODO SEMICONDUTOR

Introdução: O dispositivo de estado sólido chamado de diodo é construído com materiais do tipo p e n disponíveis. É um dispositivo com diversas aplicações e muito importante na eletrônica. Simplesmente a junção de dois materiais tipo n e p formam o diodo. É chamado de diodo de junção, mas existem outros tipos de diodos, como conhecido como diodo de barreira que é o diodo shottky, também com diversas aplicações, diodo túnel, zener e outros... Quando há a união dos materiais p e n, na região da junção há uma recombinação de elétrons com as lacunas e com isso a falta de portadores livres. Conforme figura a seguir, a região da junção é formada por íons positivos e negativos após os portadores livres terem sido absorvidos.



Polarização Reversa: Um potencial externo aplicado a junção p-n de modo que o terminal positivo seja ligado ao material tipo n e o terminal negativo seja ligado ao material tipo p resultando na tensão $V_d < 0V$. Devido ao potencial positivo haverá um aumento de íons positivos na região de depleção, pois há uma atração para o potencial positivo de elétrons livres e por razões semelhantes no lado p há um aumento de íons negativos na região de depleção. O resultado é um alargamento na região de depleção estabelecendo uma barreira de potencial para os portadores majoritários e a redução do fluxo deles. A corrente existente sob condição de polarização reversa é chamada de corrente de saturação reversa representada por I_s . Essa corrente não aumenta de valor com o aumento do potencial na junção p-n.

Polarização direta: Um potencial externo aplicado a junção p-n de modo que o terminal positivo seja ligado ao material tipo p e o terminal negativo seja ligado ao material tipo n

resultando na tensão $V_d > 0$. Os elétrons do material tipo n e as lacunas do material tipo p são forçados pelo potencial elétrico a recombinarem com os íons positivos e negativos e como resultado uma diminuição na largura da zona de depleção. O fluxo de portadores majoritários através da junção. Um elétron do material tipo n consegue ver uma barreira reduzida na junção e uma força de atração para o potencial positivo aplicado ao material tipo p. A mesma coisa para a lacuna do material tipo p consegue ver uma barreira reduzida na junção e uma força de atração para o potencial negativo aplicado ao material tipo n. A medida que o potencial aumenta, a região de depleção continuará a diminuir a sua largura até que uma quantidade enorme de elétrons passar pela junção e resultar em um aumento exponencial da corrente. É possível demonstrar pela física do estado sólido que as características gerais de um diodo semiconductor podem ser definidas como equação de Schocley, para as regiões direta e reversa.

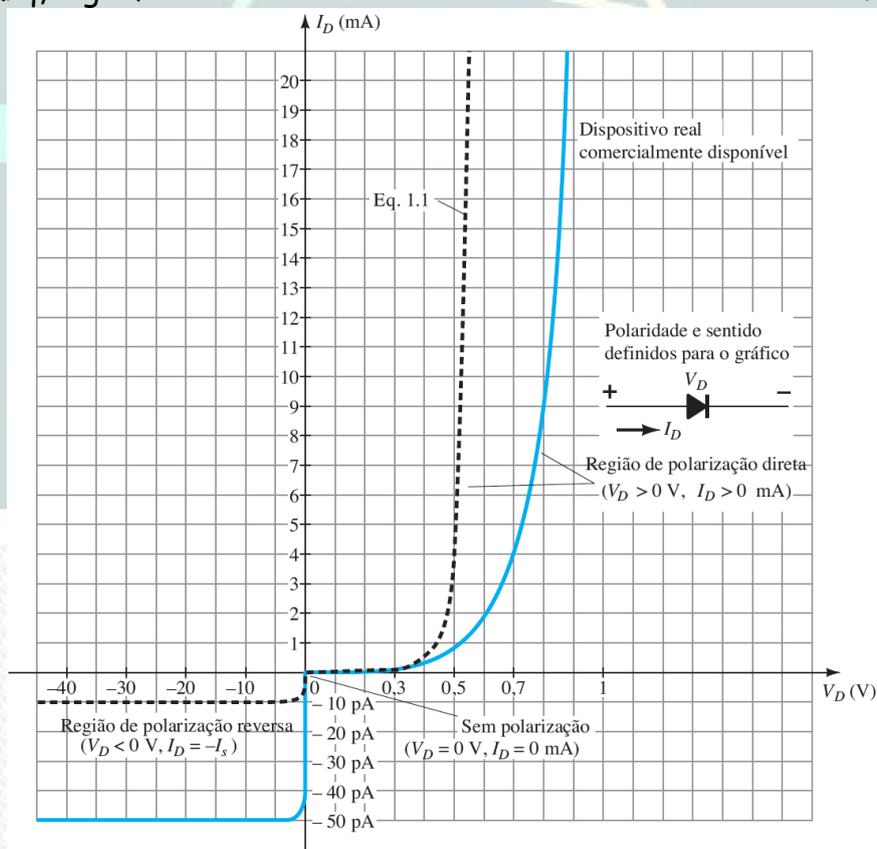
$I_d = I_s(\exp(V_d/nV_T) - 1)$, onde: I_s é a corrente de saturação reversa, V_d é a tensão de polarização direta aplicada ao diodo, n é o fator de idealidade vale entre 1 e 2 ($n = 1$).

k é a constante de Boltzmann igual a $1,38 \times 10^{-23}$ J/K.

T_K é a temperatura absoluta em Kelvin igual a $273 +$ temperatura em $^{\circ}C$.

q é a amplitude da carga eletrônica igual a $1,6 \times 10^{-19}$ C.

Sendo $V_T = kT_K/q$, o gráfico $I_d \times V_d$ será a curva característica do diodo.



Para a região de polarização reversa. Na região de polarização reversa $v < 0$ o termo exponencial é desprezível e a relação $i - v$ é aproximadamente por:

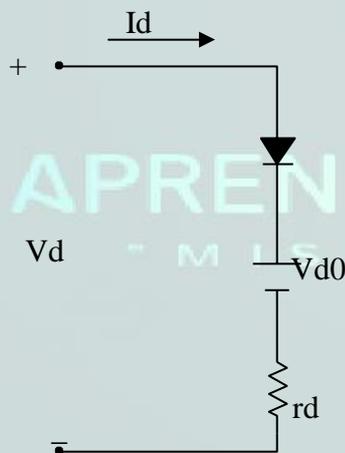
$$i = - I_S,$$

Região de ruptura.

Na região de ruptura a tensão reversa excede a tensão reversa do diodo e é chamada de tensão de ruptura. Essa tensão no "joelho" é chamada de V_{ZK} , onde Z é chamada de Zener e k é de joelho (Knee). Nessa região a corrente reversa aumenta muito e a queda de tensão é praticamente a mesma. Se a potência dissipada for controlada no diodo, não há danos no dispositivo.

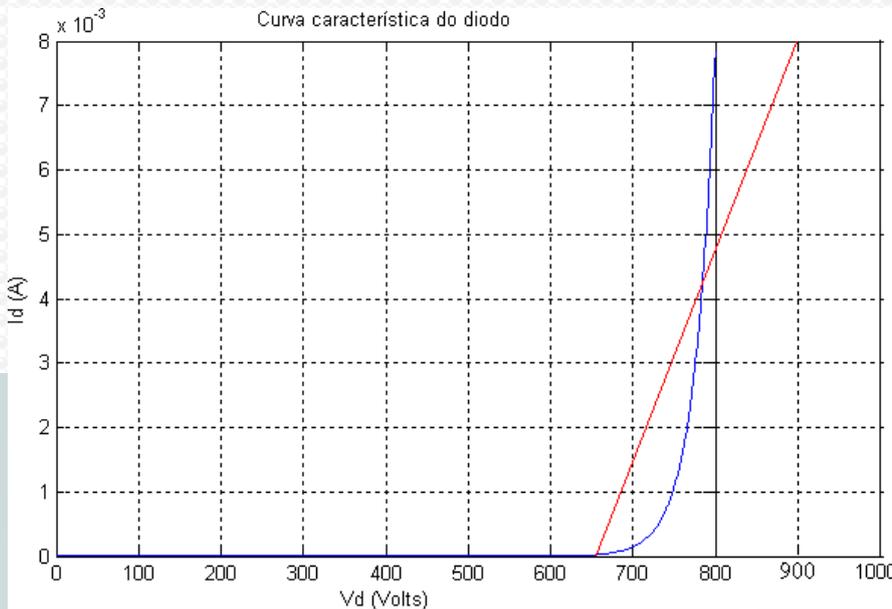
Modelo simplificado do diodo.

A característica exponencial do diodo é apresentada na figura a seguir e o ponto onde a reta cruza o eixo da tensão v_d é v_{d0} é a tensão equivalente a uma bateria em série com a resistência r_d , equivalente à inclinação da reta $1/r_d$. O modelo de segmentos lineares da característica e representação do diodo é apresentado a seguir.



Representação do modelo de um diodo

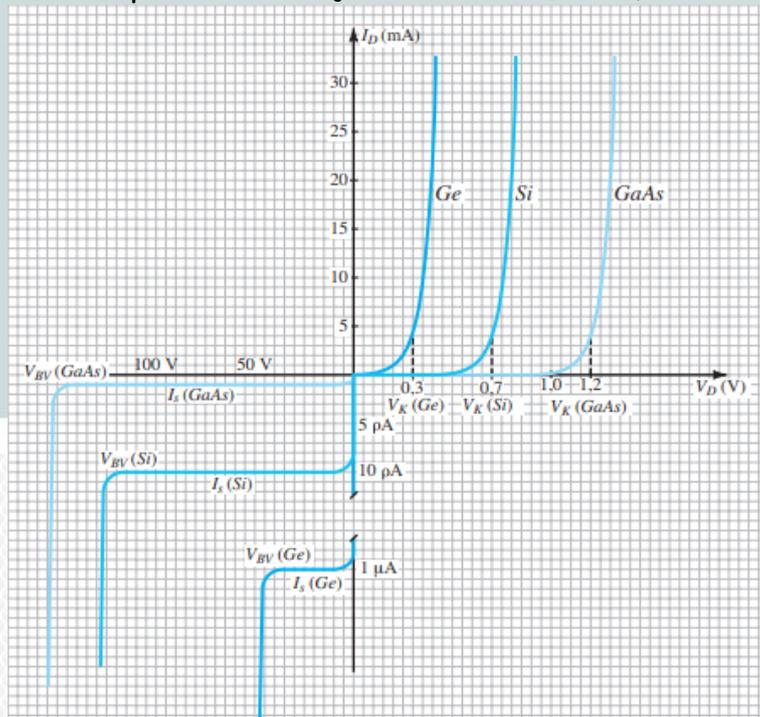
Curva características e comparação de diodos comerciais de Ge, Si e GaAs.



Curva característica do diodo Ge, Si e Arseneto de Gálio.

Método dos segmentos lineares.

Os parâmetros V_{D0} que é a intersecção entre a reta em vermelho com o eixo da tensão V_D e r_D que é a inclinação da reta $\Delta I_D / \Delta V_D$, então a inclinação é igual $1/r_D$.



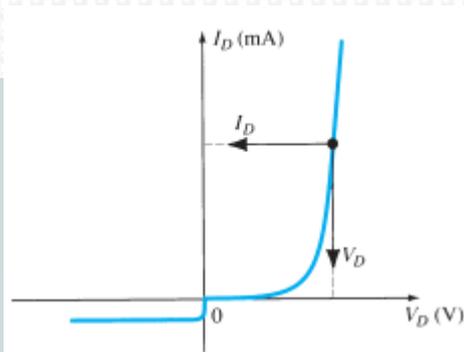
ETRÔNICA
S S Í V E L

Segue a curva característica de um diodo de Silício em função da temperatura.

empregar uma fonte de corrente relativamente constante, a resistência será determinada a partir de um nível predefinido de corrente (normalmente, alguns miliampères).

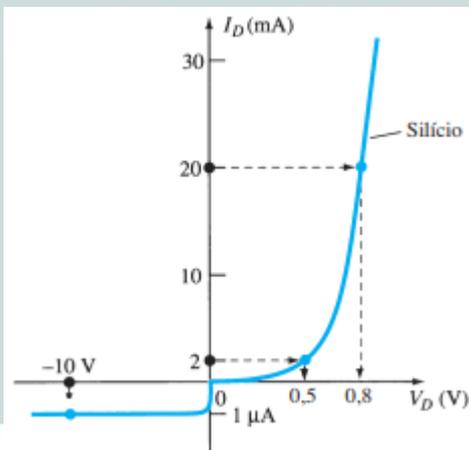
De modo geral, portanto, quanto maior a corrente que passa através de um diodo, menor o nível de resistência CC.

Tipicamente, a resistência CC de um diodo ativo (mais utilizado) variará entre cerca de 10 e 80 Ω .



Exemplo: Determine os níveis de resistência CC do diodo da figura a seguir.

- $I_D = 2\text{mA}$ (nível baixo)
- $I_D = 20\text{mA}$ (nível alto)
- $I_D = -10\text{V}$ (polarização reversa)



Solução:

a) Em $I_D = 2\text{ mA}$, $V_D = 0,5\text{ V}$ (da curva) e

$$R_D = \frac{V_D}{I_D} = \frac{0,5\text{ V}}{2\text{ mA}} = 250\ \Omega$$

b) Em $I_D = 20\text{ mA}$, $V_D = 0,8\text{ V}$ (da curva) e

$$R_D = \frac{V_D}{I_D} = \frac{0,8\text{ V}}{20\text{ mA}} = 40\ \Omega$$

c) Em $V_D = -10\text{ V}$, $I_D = -I_S = -1\ \mu\text{A}$ (da curva) e

$$R_D = \frac{V_D}{I_D} = \frac{10\text{ V}}{1\ \mu\text{A}} = 10\ \text{M}\Omega$$

Resistência CA ou dinâmica

A resistência CC de um diodo independe da forma da curva característica na região que circunda o ponto de interesse. Se for aplicada uma entrada senoidal, em vez de uma entrada CC, a situação mudará completamente. A entrada variável moverá o ponto de operação instantâneo para cima e para baixo em uma região da curva característica e, assim, definirá uma alteração específica em corrente e tensão, como mostrado na figura a seguir.

Sem nenhum sinal variável aplicado, o ponto de operação seria o ponto Q que aparece na figura a seguir, determinado pelos níveis CC aplicados. A designação de ponto Q deriva da palavra quiescente, que significa "estacionário ou invariável"

Método dos 3 pontos.

Uma linha reta traçada tangente à curva através do ponto Q, como mostrado na figura, definirá uma mudança específica em tensão e corrente que pode ser usada para determinar a resistência CA ou dinâmica para essa região da curva característica do diodo. Deve-se fazer um esforço para manter a mudança em tensão e corrente tão pequena quanto possível e equidistante de cada lado do ponto Q. Em forma de equação,

$$r_d = \frac{\Delta V_d}{\Delta I_D}$$

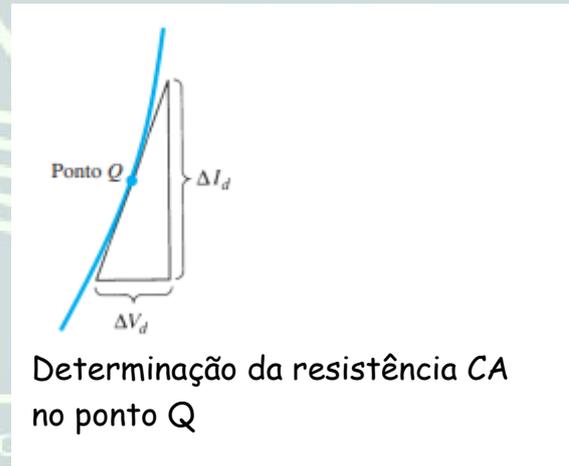
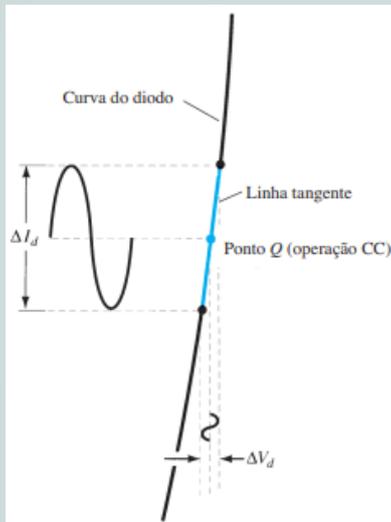


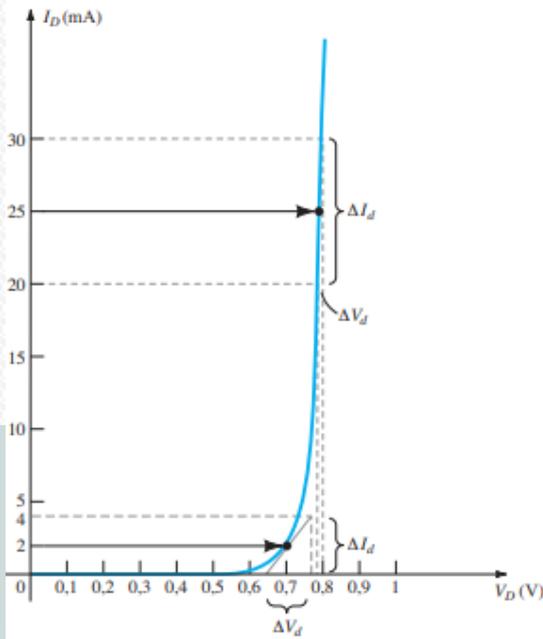
Figura definição da resistência dinâmica ou resistência CA.

Onde Δ significa uma variação limitada da grandeza. Quanto mais vertical a inclinação, menor o valor de ΔV_d para a mesma variação em ΔI_d e menor a resistência. A resistência CA na região de elevação vertical da curva característica é, portanto, bem pequena, enquanto a resistência CA é muito mais alta em baixos níveis de corrente.

De modo geral, portanto, quanto menor o ponto Q de operação (corrente menor ou tensão inferior), maior a resistência CA.

EXEMPLO: Para a curva característica da figura:

- Determine a resistência CA em $I_D = 2 \text{ mA}$.
- Determine a resistência CA em $I_D = 25 \text{ mA}$.
- Compare os resultados das partes (a) e (b) para as resistências CC em cada nível de corrente.



Solução:

a) Para $I_D = 2 \text{ mA}$, a linha tangente em $I_D = 2 \text{ mA}$ foi traçada como mostrado na Figura e foi escolhida uma amplitude de 2 mA acima e abaixo da corrente do diodo especificada. Em $I_D = 4 \text{ mA}$, $V_D = 0,76 \text{ V}$; em $I_D = 0 \text{ mA}$, $V_D = 0,65 \text{ V}$. As variações resultantes em corrente e tensão são, respectivamente, $\Delta I_d = 4 \text{ mA} - 0 \text{ mA} = 4 \text{ mA}$ e $\Delta V_d = 0,76 \text{ V} - 0,65 \text{ V} = 0,11 \text{ V}$

e a resistência CA é: $r_d = \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d} = \frac{0,11}{4 \text{ mA}} = 27,5 \Omega$

b) Para $I_D = 25 \text{ mA}$, a linha tangente em $I_D = 25 \text{ mA}$ foi traçada como mostrado na Figura e foi escolhida uma amplitude de 5 mA acima e abaixo da corrente de diodo especificada. Em $I_D = 30 \text{ mA}$, $V_D = 0,8 \text{ V}$; em $I_D = 20 \text{ mA}$, $V_D = 0,78 \text{ V}$. As variações resultantes em corrente e tensão são, respectivamente,

$$r_d = \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d} = \frac{0,02}{10 \text{ mA}} = 2 \Omega \quad \Delta I_d = 30 \text{ mA} - 20 \text{ mA} = 10 \text{ mA} \text{ e } \Delta V_d = 0,8 \text{ V} - 0,78 \text{ V} = 0,02 \text{ V}$$

e a resistência CA é:

c) Para $I_D = 2 \text{ mA}$, $V_D = 0,7 \text{ V}$ e

$$R_D = \frac{V_D}{I_D} = \frac{0,7}{2 \text{ mA}} = 350 \Omega$$

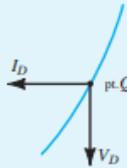
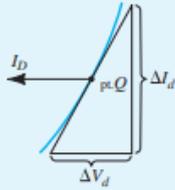
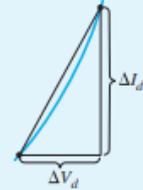
o que excede em muito o r_d de $27,5 \Omega$. Para $I_D = 25 \text{ mA}$, $V_D = 0,79 \text{ V}$ é:

$$R_D = \frac{V_D}{I_D} = \frac{0,79}{25 \text{ mA}} = 31,62 \Omega$$

o que excede em muito o r_d de 2Ω .

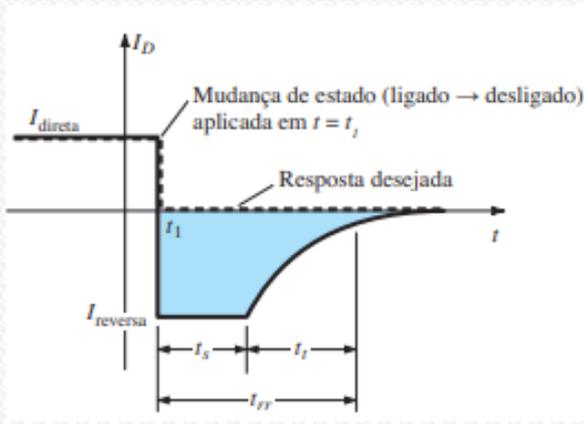
Importante: A resistência dinâmica pode ser encontrada com a simples substituição do valor quiescente da corrente do diodo na equação.

$$r_d = \frac{26 \text{ mV}}{I_D}$$

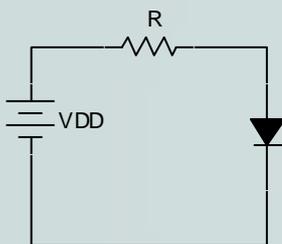
Tipo	Equação	Características especiais	Representação gráfica
CC ou estática	$R_D = \frac{V_D}{I_D}$	Definida como um ponto na curva característica	
CA ou dinâmica	$r_d = \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d} = \frac{26 \text{ mV}}{I_D}$	Definida por uma linha tangente no ponto Q	
CA média	$r_{av} = \left. \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d} \right _{\text{pt. a pt.}}$	Definida por uma linha reta entre os limites de operação	

1.11 Tempo de recuperação reversa

Determinadas especificações são normalmente apresentadas nas folhas de dados do diodo fornecidas pelos fabricantes. Um parâmetro ainda não levado em consideração é o tempo de recuperação reversa, denotado por t_{rr} (recovery time). No estado de polarização direta, já foi demonstrado que existe uma grande quantidade de elétrons do material do tipo n avançando em direção ao material do tipo p e um grande número de lacunas no material do tipo n — um requisito para a condução. Os elétrons no tipo p e as lacunas que avançam na direção do material do tipo n estabelecem um grande número de portadores minoritários em cada material. Se a tensão aplicada fosse invertida para criar uma situação de polarização reversa, deveríamos ver o diodo mudar instantaneamente do estado de condução para o de não condução. Entretanto, por causa do grande número de portadores minoritários em cada material, a corrente no diodo será simplesmente invertida, como mostra a Figura a seguir, e permanecerá nesse nível mensurável pelo período de tempo t_s (tempo de armazenamento), necessário para os portadores minoritários voltarem a seu estado de portadores majoritários no material oposto. Em essência, o diodo permanecerá no estado de curto-circuito com uma corrente $I_{reversa}$ determinada pelos parâmetros do circuito. Quando essa fase de armazenamento tiver passado, a corrente será reduzida até o valor associado ao estado de não condução. Esse segundo período de tempo é denotado por t_t (intervalo de transição). O tempo de recuperação reversa é a soma desses dois intervalos: $t_{rr} = t_s + t_t$. Trata-se de um fator importante nas aplicações de chaveamento de alta velocidade. A maioria dos diodos de chaveamento disponíveis no mercado possui um t_{rr} na faixa de alguns nanossegundos até 1 μ s. No entanto, existem elementos disponíveis com um t_{rr} de apenas algumas centenas de picossegundos (10^{-12} s).



Exemplo: Determine os valores de I_D e da tensão V_D para o circuito da figura a seguir com $V_{DD} = 5V$ e $R = 1K\Omega$. Suponha que a corrente do diodo seja de $1mA$ para uma tensão de $0,7V$.



Solução:

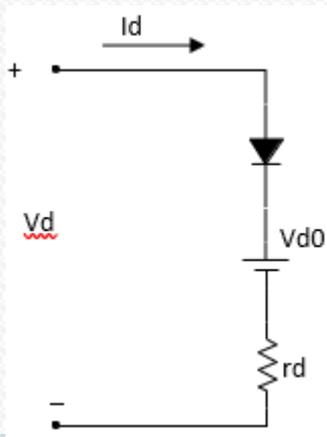
$$I_D = \frac{V_{DD} - V_D}{R} = \frac{5 - 0,7}{1K} = 4,3mA$$

$$I_1 = I_S e^{\frac{V_1}{nV_T}} \text{ e } I_2 = I_S e^{\frac{V_2}{nV_T}} \text{ a relação entre } I_2 \text{ e } I_1, \text{ fica:}$$

$$\frac{I_2}{I_1} = e^{\frac{V_2 - V_1}{nV_T}} \therefore \ln \frac{I_2}{I_1} = \frac{V_2 - V_1}{nV_T} \text{ para } n = 1,732, \text{ temos:}$$

$$\text{Calculando } V_2 = 0,7 + \ln 4,3 \times 1,732 \times 0,025 = 0,763V$$

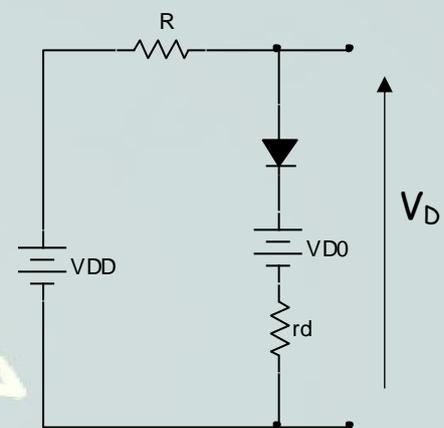
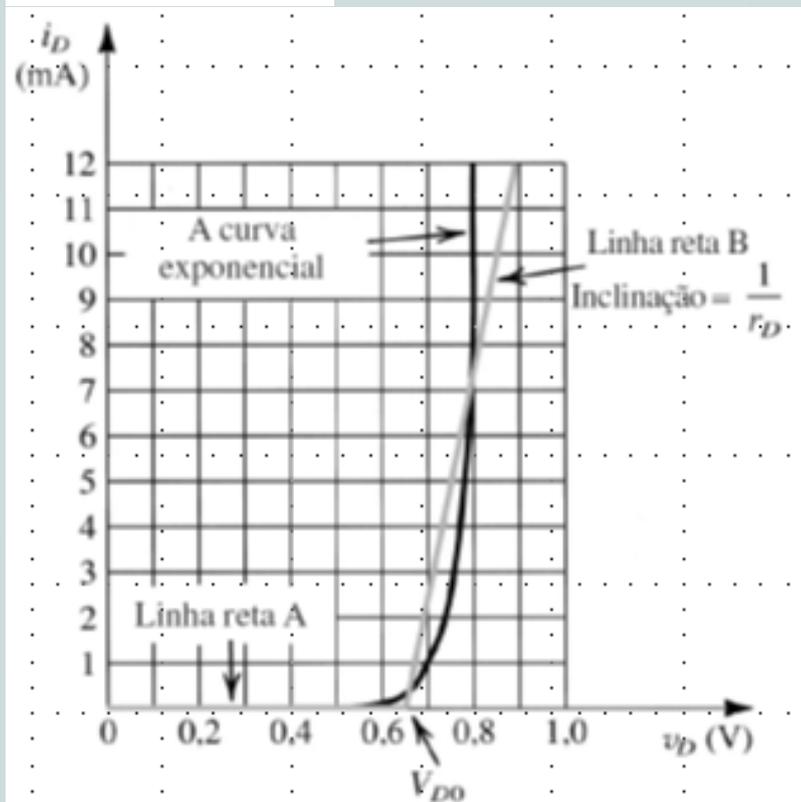
Exemplo: Utilizando-se o modelo de segmentos lineares cujos parâmetros são dados na figura a seguir.



O modelo segmentos lineares define:

$$I_D = 0, V_D \leq V_{D0} \text{ e } i_D = (V_D - V_{D0})/r_D \text{ e } V_D \geq V_{D0},$$

onde V_{D0} é a intersecção da reta com o eixo da tensão e r_D é o inverso da inclinação da reta.



Dados: $V_{DD} = 5V, R = 1K$

Do gráfico tiramos $V_{D0} = 0,65V$ e $r_D = 20\Omega$.

$$I_D = \frac{V_{DD} - V_{D0}}{R + r_D} = \frac{5 - 0,65}{1K + 20} = 4,26mA \text{ e a tensão } V_D \text{ no diodo será:}$$

$$V_D = V_{D0} + r_D I_D = 0,65 + 20 \times 4,26mA = 0,735V$$