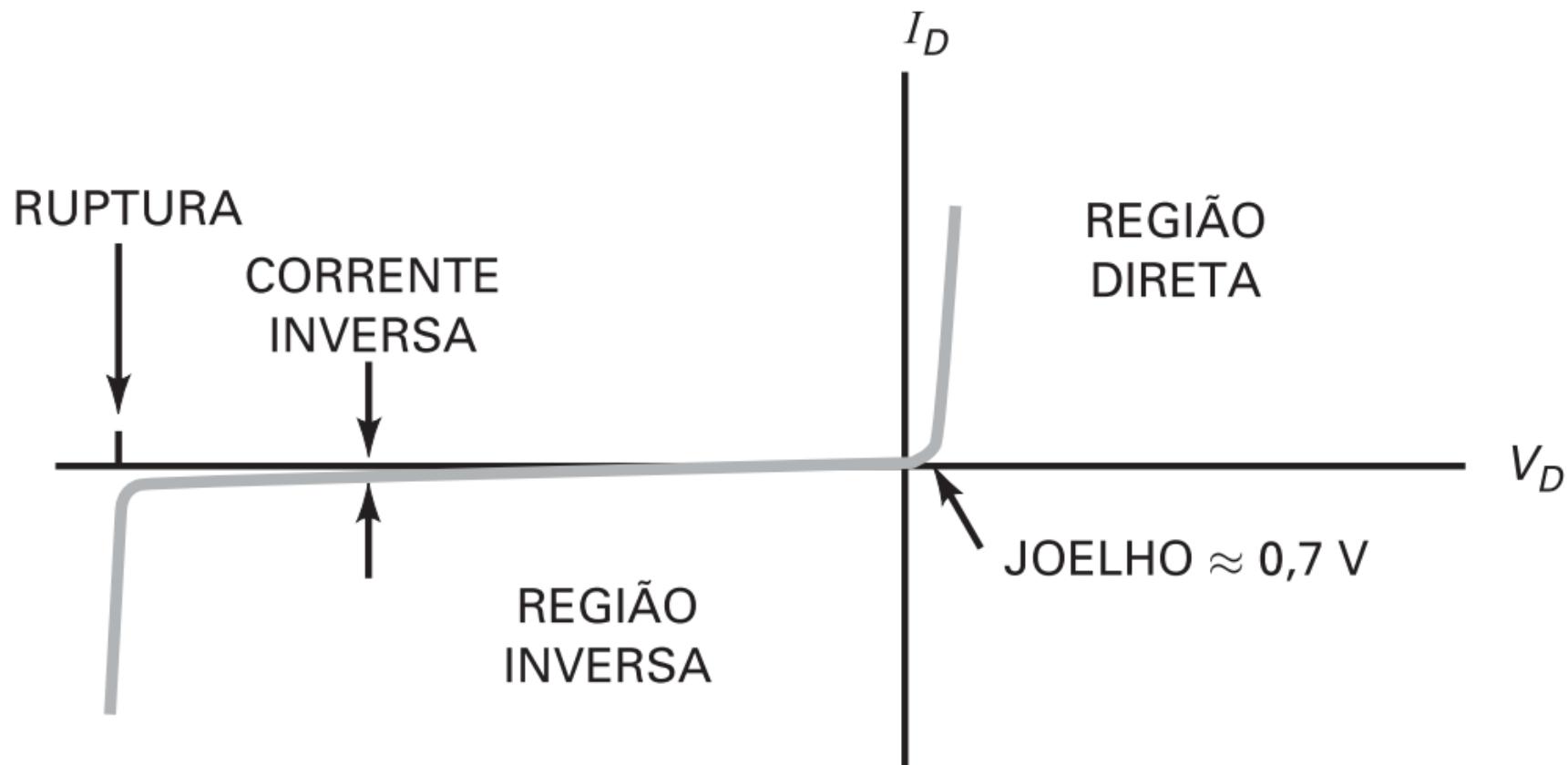


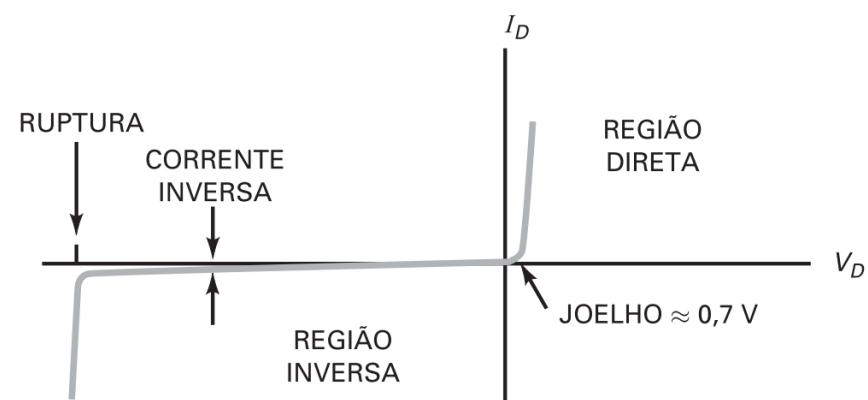
EECO6A – Eletrônica A

Diodo – curva de operação

- O comportamento real do diodo apresenta três regiões distintas:
Região Direta – Região Reversa - Ruptura



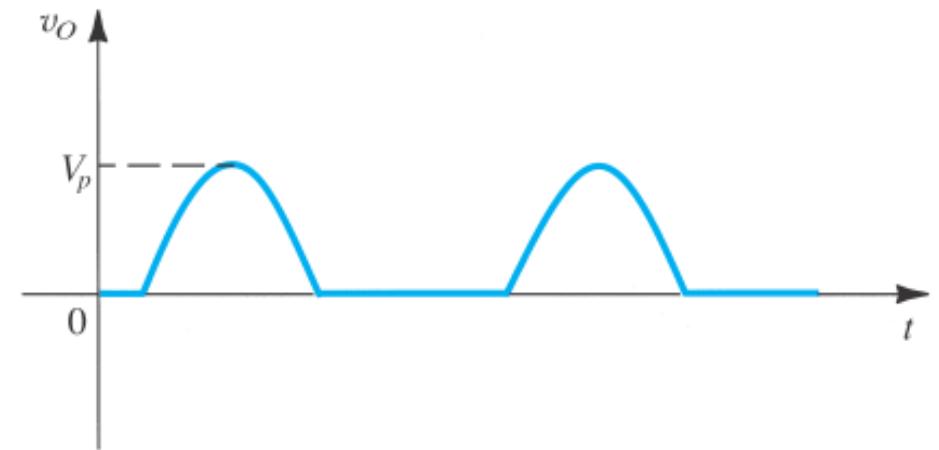
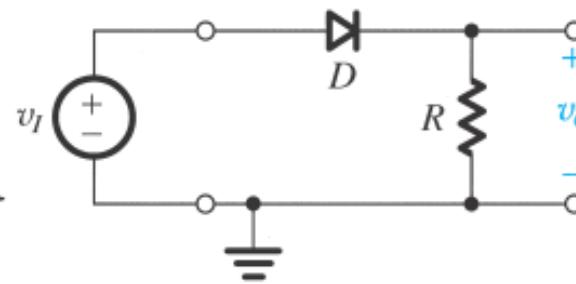
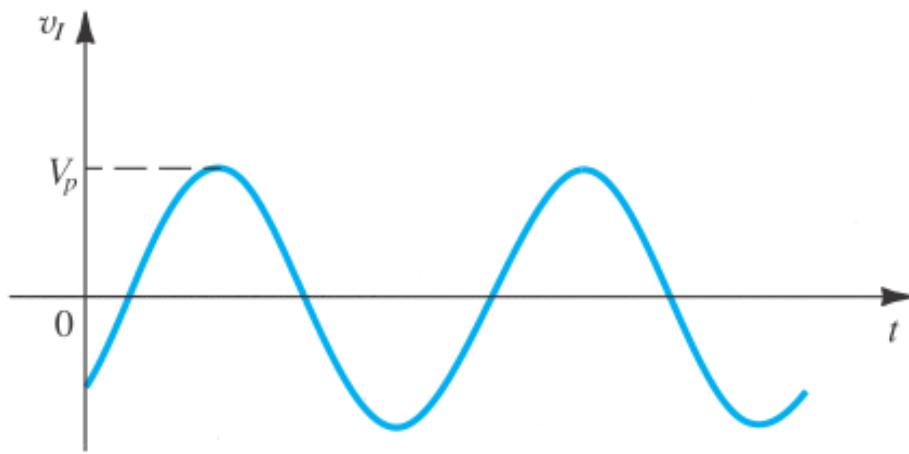
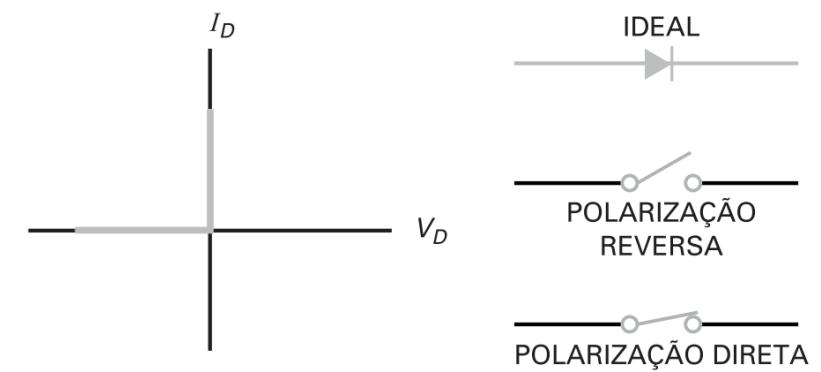
Região Direta

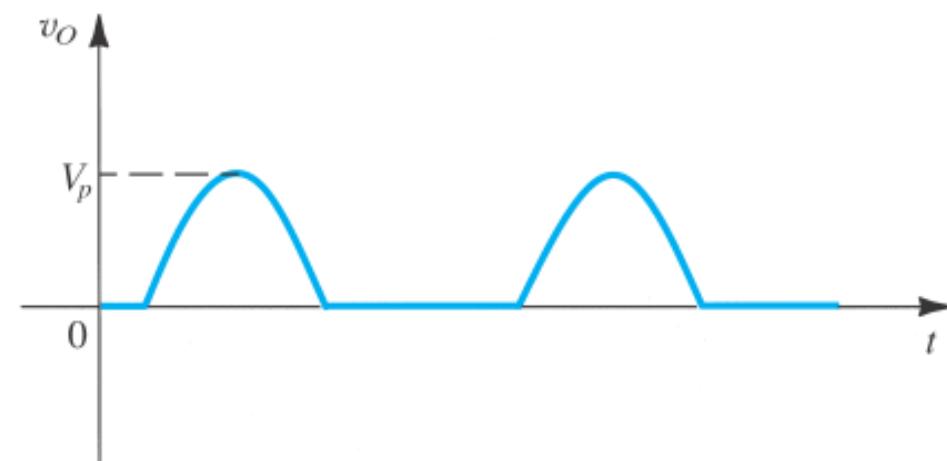
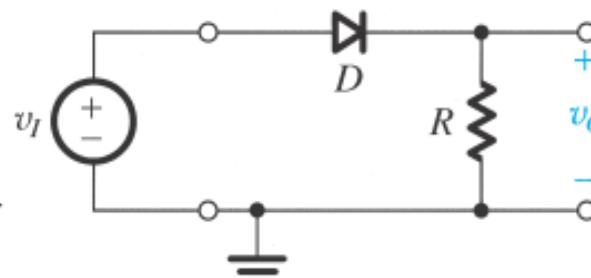
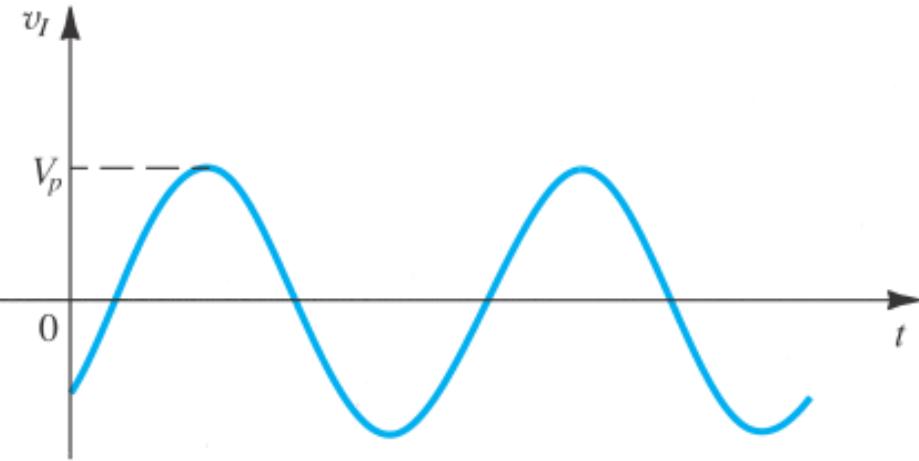


- Quando polarizado diretamente o diodo permite a passagem de corrente, a partir da tensão suficiente para vencer a barreira na junção.
- Este potencial é chamado de **tensão de joelho**, em referencia à forma que a curva se dobra neste ponto
- Em diodos de silício esta tensão é aproximadamente 0,7V
- A corrente aumenta com uma razão exponencial, sendo limitada pelo comportamento da junção semicondutora
- Por simplicidade este comportamento pode ser aproximado ao de uma resistência

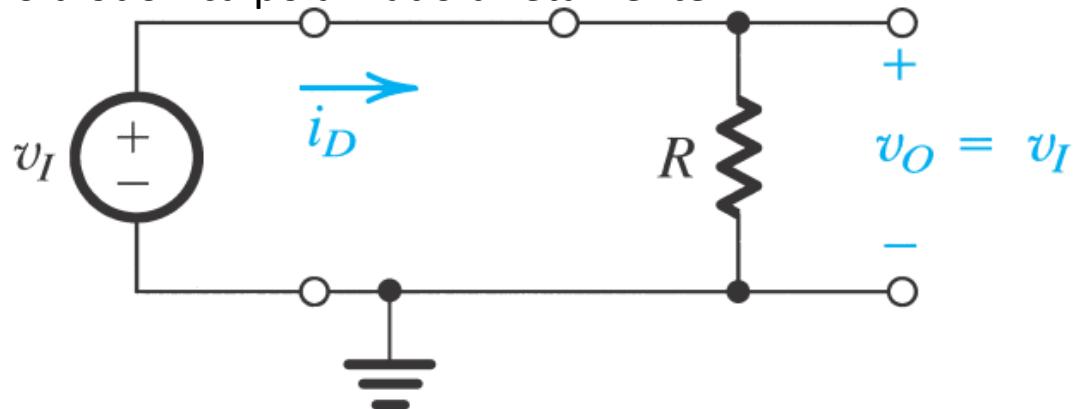
Diodo Ideal

- A aproximação mais simples de um diodo é o comportamento ideal, e permite a análise de circuitos de forma rápida



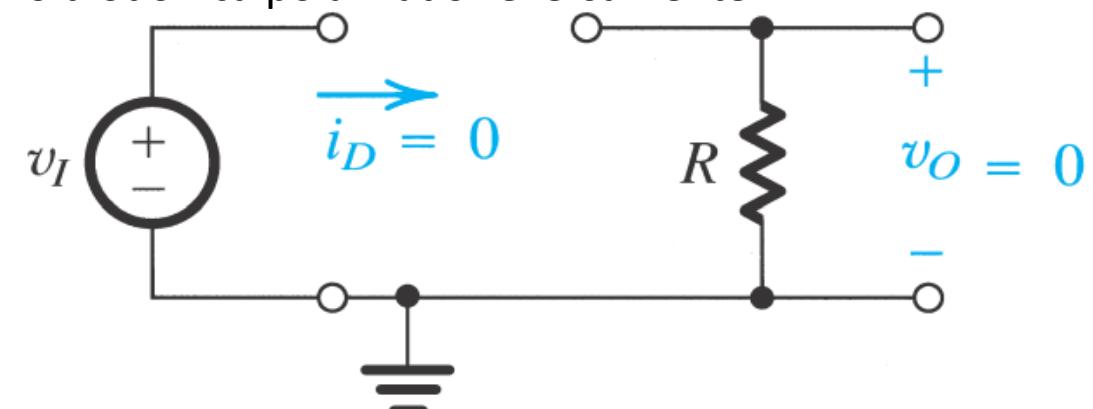


Quando a tensão de entrada é maior que zero
o diodo fica polarizado diretamente



O diodo se comporta como uma chave fechada

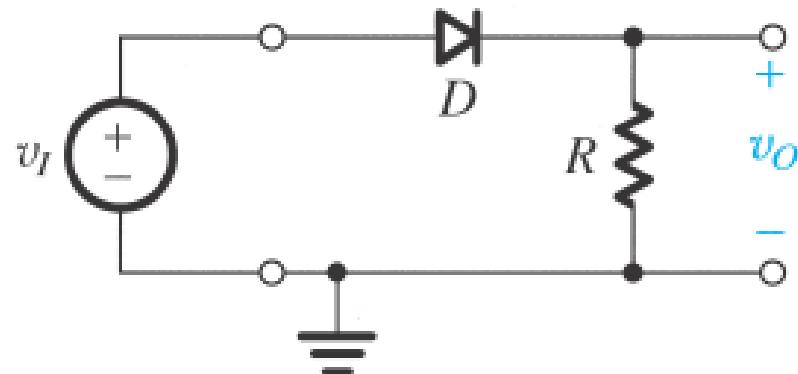
Quando a tensão de entrada é menor que zero
o diodo fica polarizado reversamente



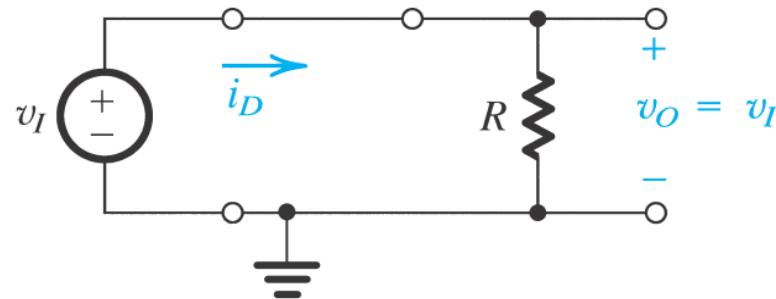
O diodo se comporta como uma chave aberta

Exemplo

- Calcule a corrente no diodo (I_D) quando $v_i=10V$, $v_i=5V$, $v_i=-10V$, com $R=1k\Omega$



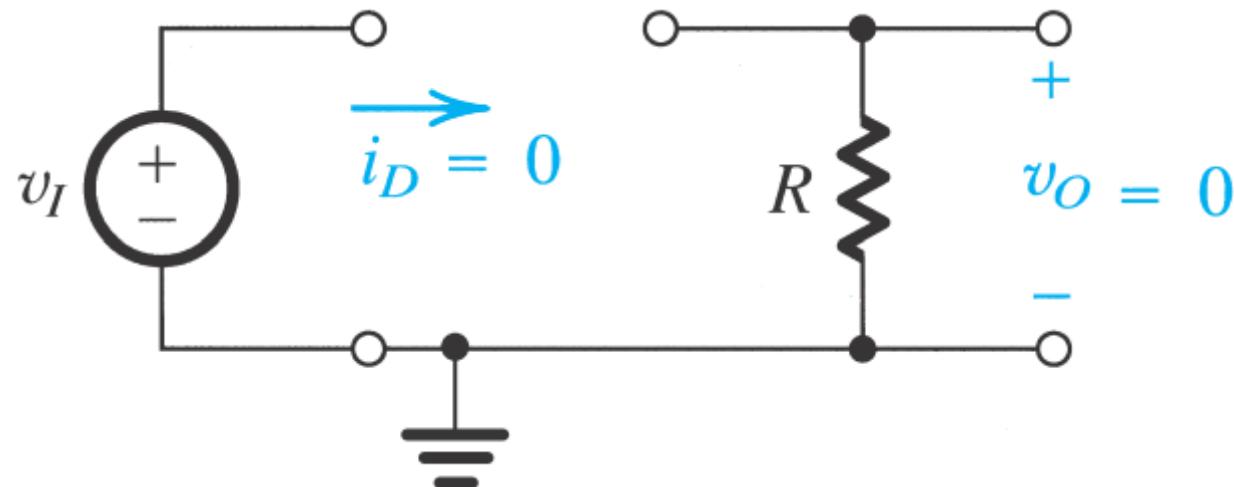
- Com $v_i=10V$, o diodo está polarizado diretamente e se comporta como um curto-circuito:



- Portanto a corrente fica $I_D = v_i/R = 10V/1k\Omega = 10mA$
- Para $v_i=5V \rightarrow I_D=5mA$
- E como fica para $v_i=-10V$?

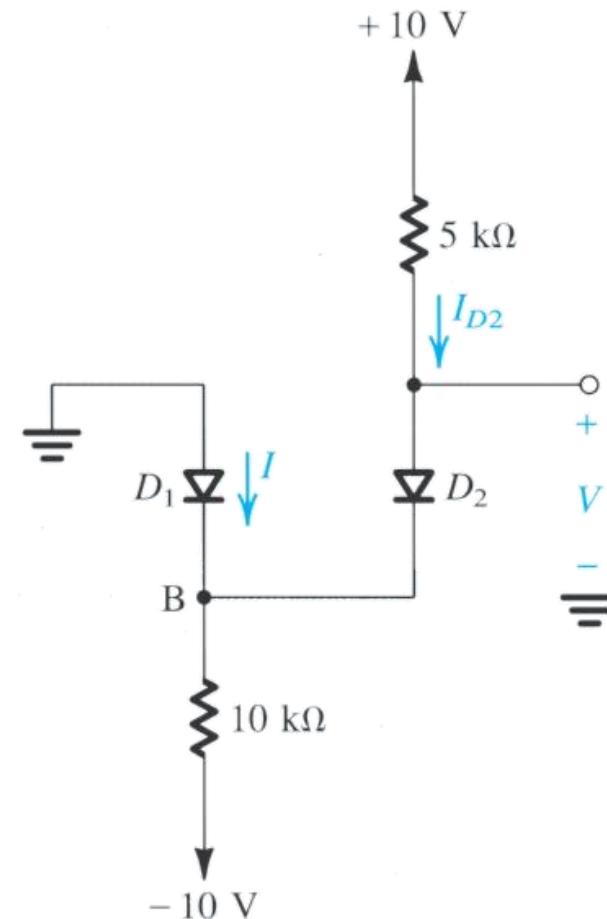
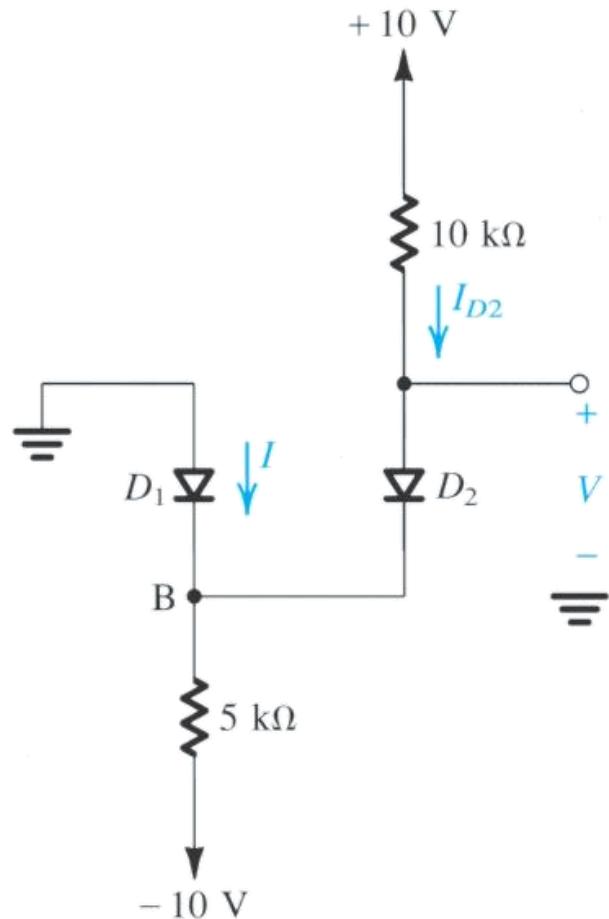
Exemplo

- $v_i = -10V$ implicaria em corrente no sentido reverso no diodo!
- Como o diodo se comporta como um circuito aberto no sentido reverso, não há corrente no circuito



Exercício

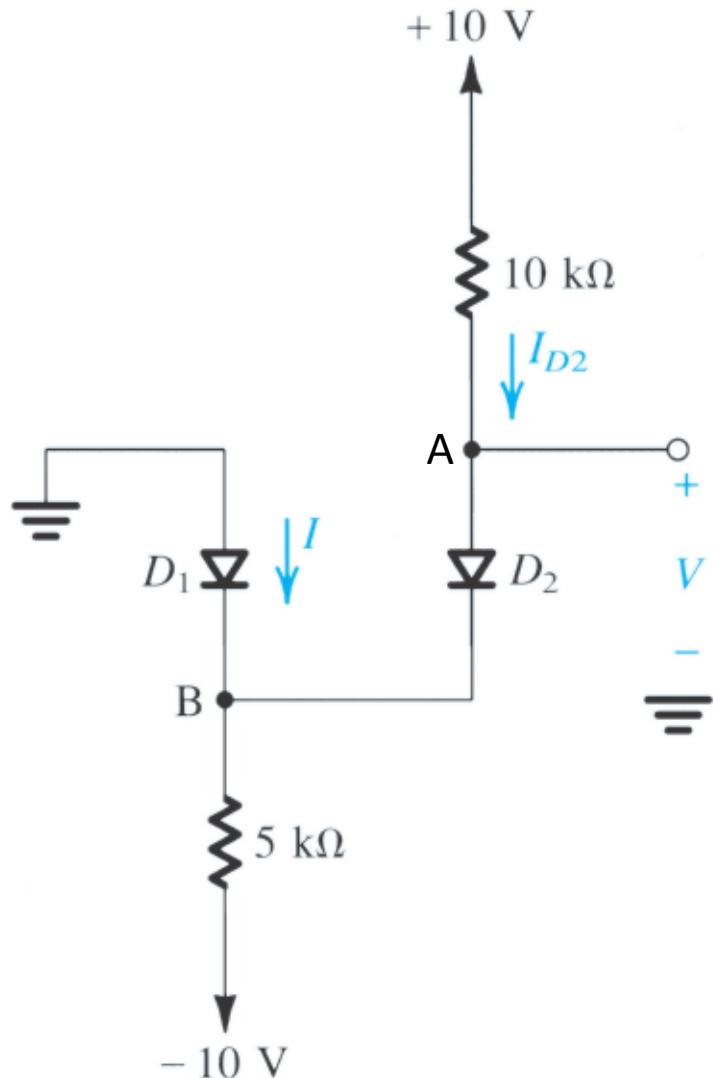
- Considerando os diodos ideais, calcule a corrente nos diodos e a tensão V.



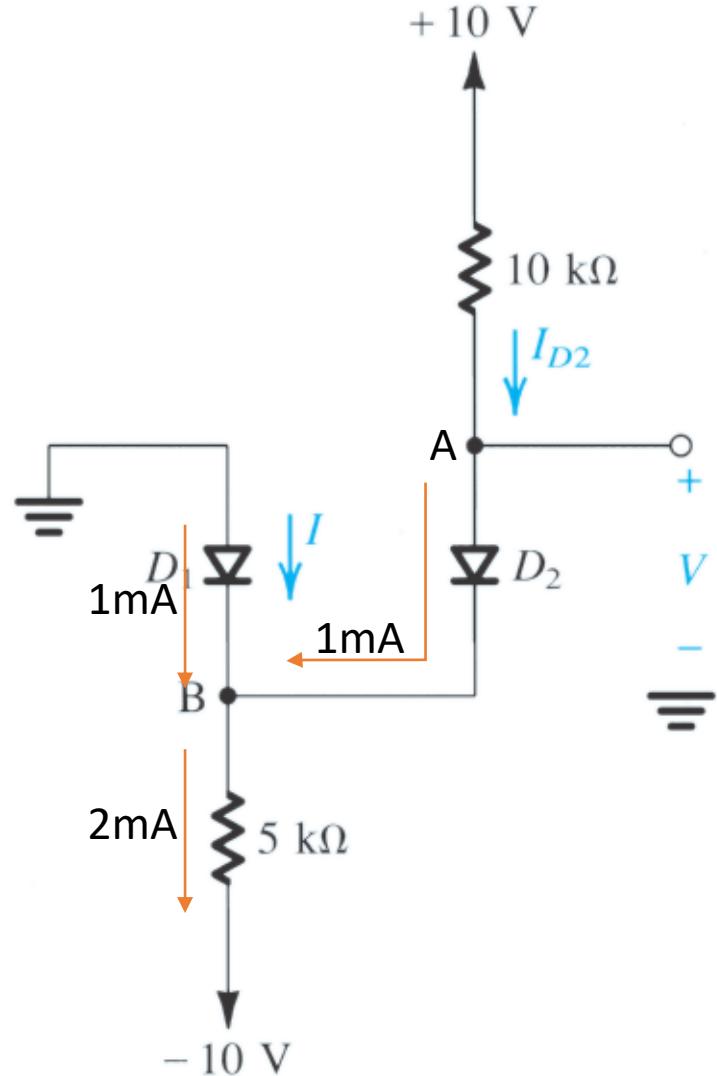
Exercício: Circuito 1

- A princípio, não sabemos se os diodos estão conduzindo ou em corte, então vamos **SUPOR** que ambos estão conduzindo

- Se D1 conduz, o potencial em B é zero.
- Com B=0V então a corrente no resistor de 5k é $(0V - -10V)/5k = 2mA$
- Se D2 conduz, o potencial em A é igual ao de B que é zero, portanto V=0V
- Com A=0V então a corrente no resistor de 10k $(10V - 0V)/10k = 1mA$

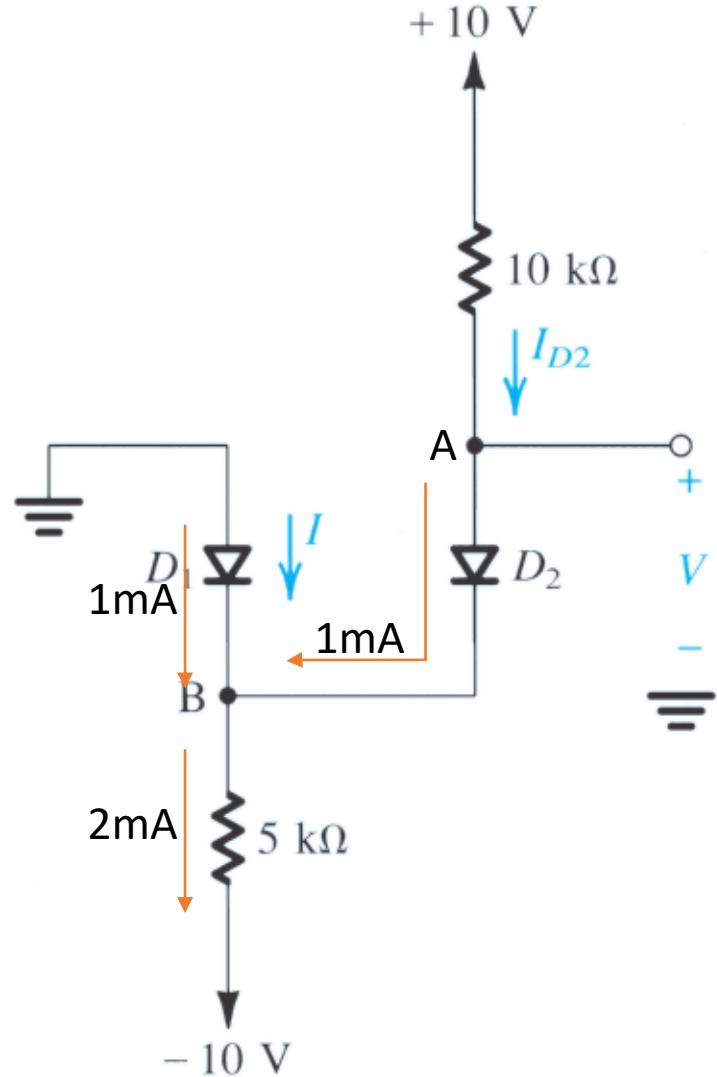


Exercício: Círcuito 1



- A princípio, não sabemos se os diodos estão conduzindo ou em corte, então vamos **SUPOR** que ambos estão conduzindo
 - Se D₁ conduz, o potencial em B é zero.
 - Com B=0V então a corrente no resistor de 5k é $(0V - -10V)/5k = 2mA$
 - Se D₂ conduz, o potencial em A é igual ao de B que é zero, portanto V=0V
 - Com A=0V então a corrente no resistor de 10k $(10V - 0V)/10k = 1mA$
- Como D₂ está em série com o resistor de 10k, a corrente em D₂ é 1mA
- Pela lei dos nós em B, a corrente em D₁ é 1mA

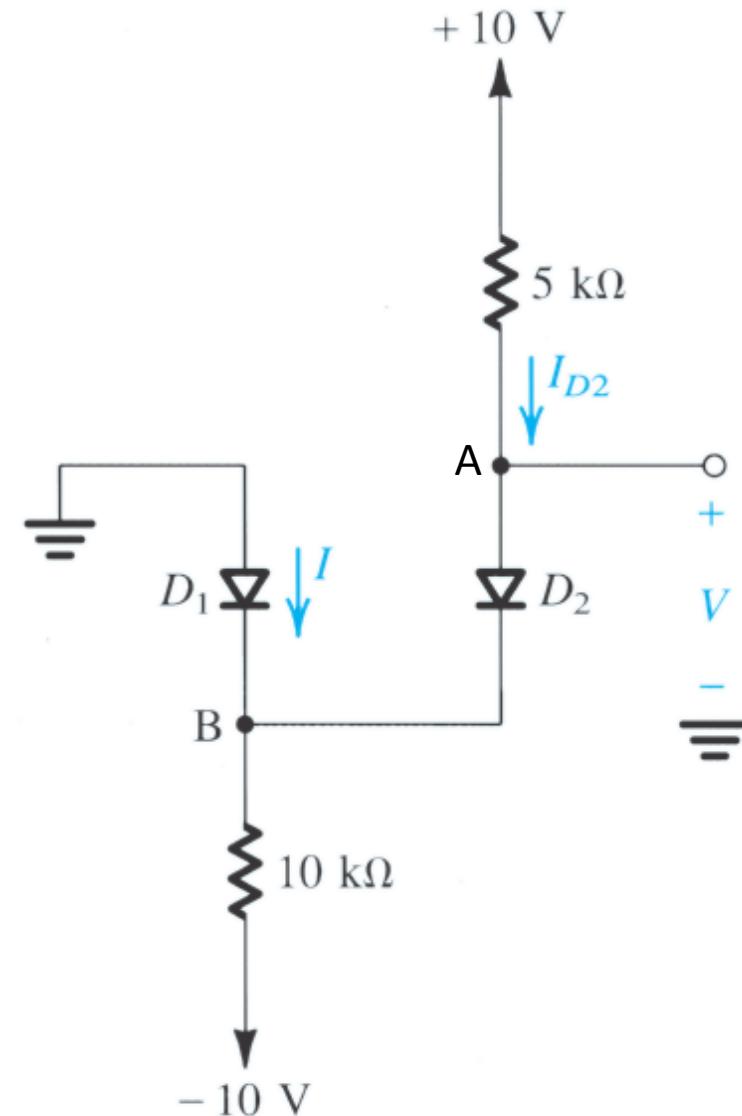
Exercício: Círcuito 1



- A princípio, não sabemos se os diodos estão conduzindo ou em corte, então vamos **SUPOR** que ambos estão conduzindo
 - Se D₁ conduz, o potencial em B é zero.
 - Com B=0V então a corrente no resistor de 5k é $(0V - -10V)/5k = 2mA$
 - Se D₂ conduz, o potencial em A é igual ao de B que é zero, portanto V=0V
 - Com A=0V então a corrente no resistor de 10k $(10V - 0V)/10k = 1mA$
 - Como D₂ está em série com o resistor de 10k, a corrente em D₂ é 1mA
 - Pela lei dos nós em B, a corrente em D₁ é 1mA
- Então verificamos:
 - ID₁ positiva OK
 - ID₂ positiva OK
- Portanto nossa suposição inicial é **verdadeira** e o resultado está **correto**.

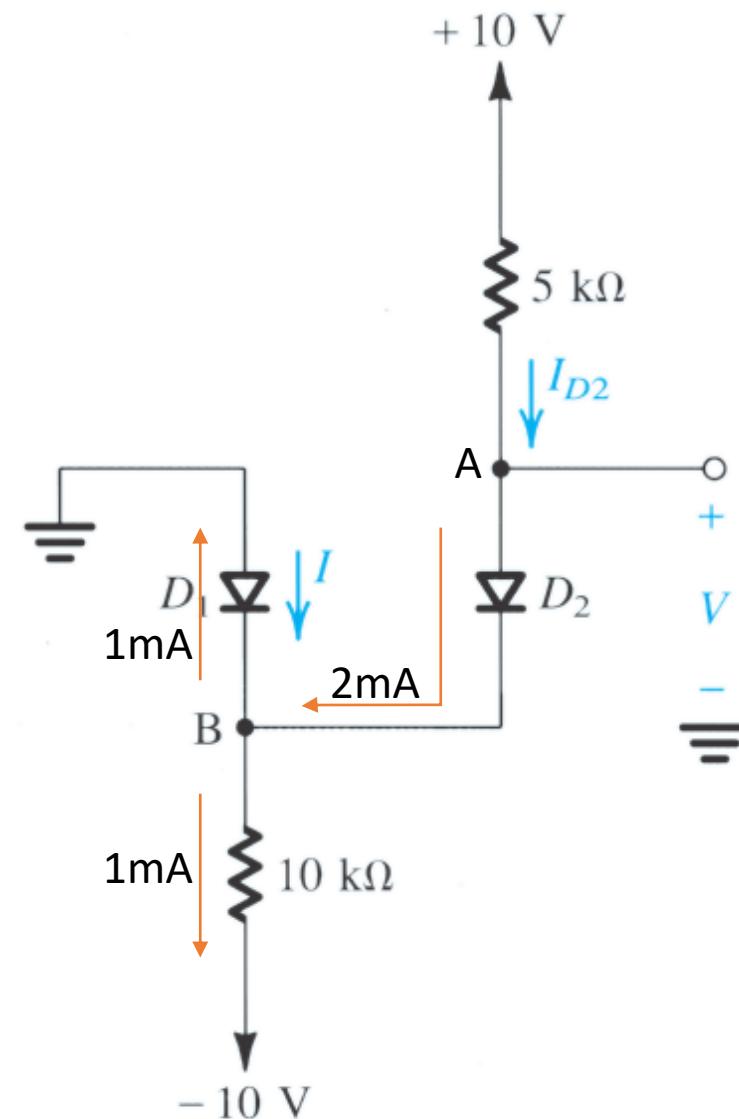
Exercício: Círcuito 2

- vamos **SUPOR** que ambos estão conduzindo
 - Se D1 conduz, o potencial em B é zero.
 - Com B=0V então a corrente no resistor de 10k é $(0V - -10V)/10k = 1mA$
 - Se D2 conduz, o potencial em A é igual ao de B que é zero, portanto V=0V
 - Com A=0V então a corrente no resistor de 5k $(10V - 0V)/5k = 2mA$

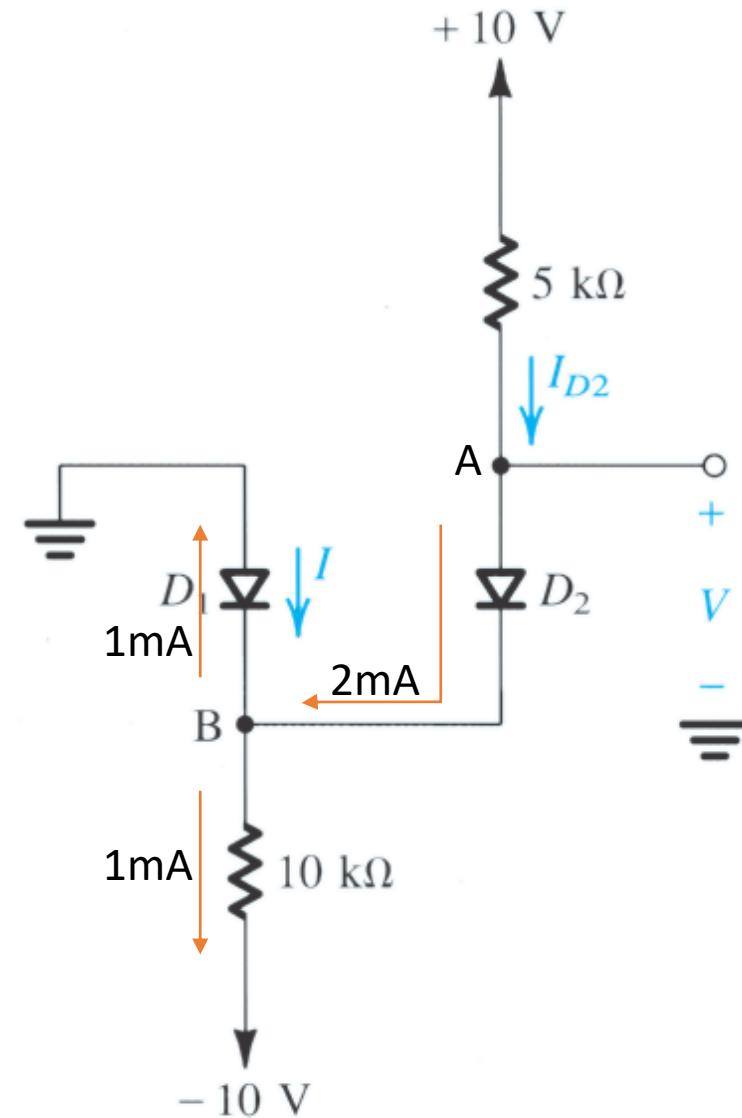


Exercício: Círcuito 2

- vamos **SUPOR** que ambos estão conduzindo
 - Se D1 conduz, o potencial em B é zero.
 - Com B=0V então a corrente no resistor de 10k é $(0V - -10V)/10k = 1mA$
 - Se D2 conduz, o potencial em A é igual ao de B que é zero, portanto V=0V
 - Com A=0V então a corrente no resistor de 5k é $(10V - 0V)/5k = 2mA$
- Como D2 está em série com o resistor de 10k, a corrente em D2 é 1mA
- Pela lei dos nós em B, a corrente em D1 é -1mA



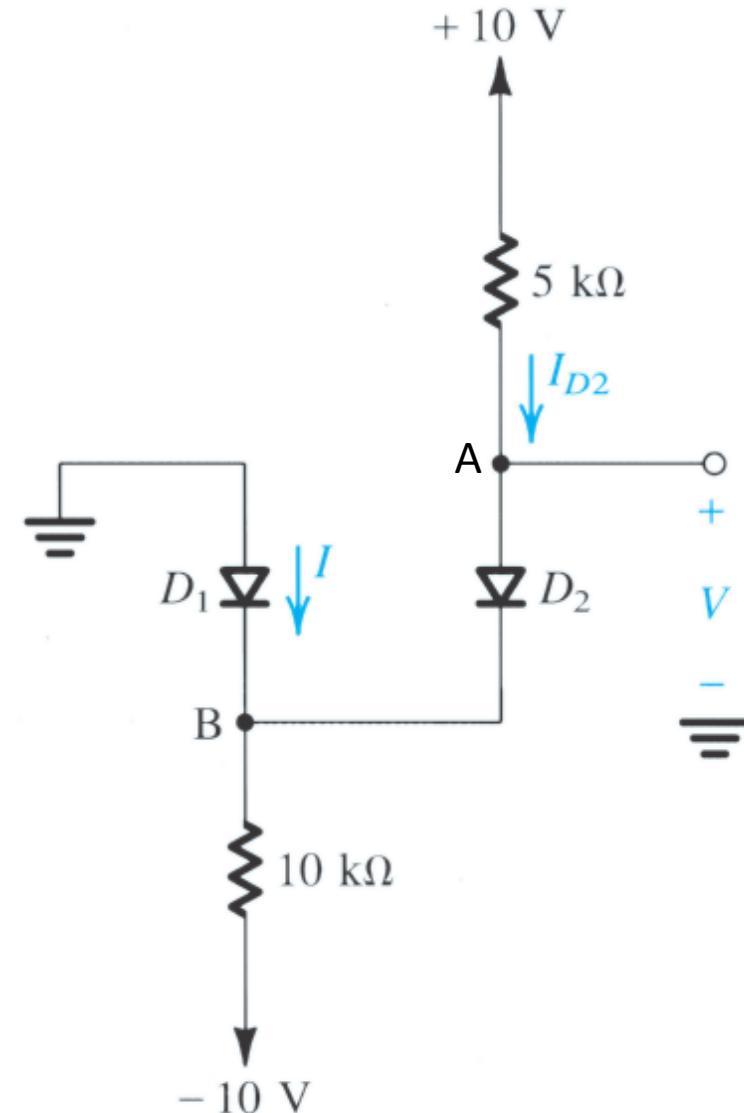
Exercício: Círcuito 2



- vamos **SUPOR** que ambos estão conduzindo
 - Se D1 conduz, o potencial em B é zero.
 - Com B=0V então a corrente no resistor de 10k é $(0V - -10V)/10k = 1mA$
 - Se D2 conduz, o potencial em A é igual ao de B que é zero, portanto V=0V
 - Com A=0V então a corrente no resistor de 5k é $(10V - 0V)/5k = 2mA$
 - Como D2 está em série com o resistor de 10k, a corrente em D2 é 1mA
 - Pela lei dos nós em B, a corrente em D1 é -1mA
- Então verificamos:
 - ID1 negativa **Não-OK**
 - ID2 positiva **OK**
- Ou seja, nossa suposição inicial estava **incorrecta** e o resultado está errado.
- Portanto, devemos refazer a suposição!

Exercício: Círcuito 2

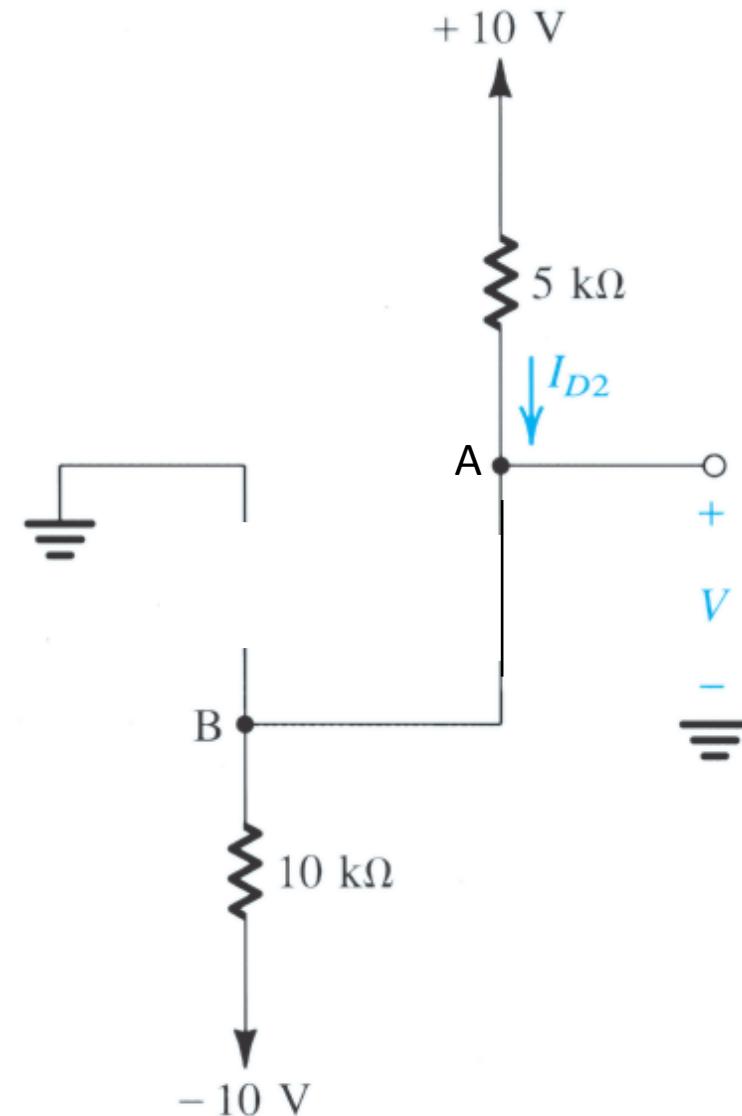
- vamos **SUPOR** agora que D2 está conduzindo e D1 em corte



Exercício: Círcuito 2

- vamos **SUPOR** agora que D2 está conduzindo e D1 em corte

- Se D1 não conduz, a corrente em D1 é zero.
- Se D2 conduz, o potencial em A é igual ao de B, e podem ser calculados pelo divisor resistivo formado no circuito



Exercício: Círcuito 2

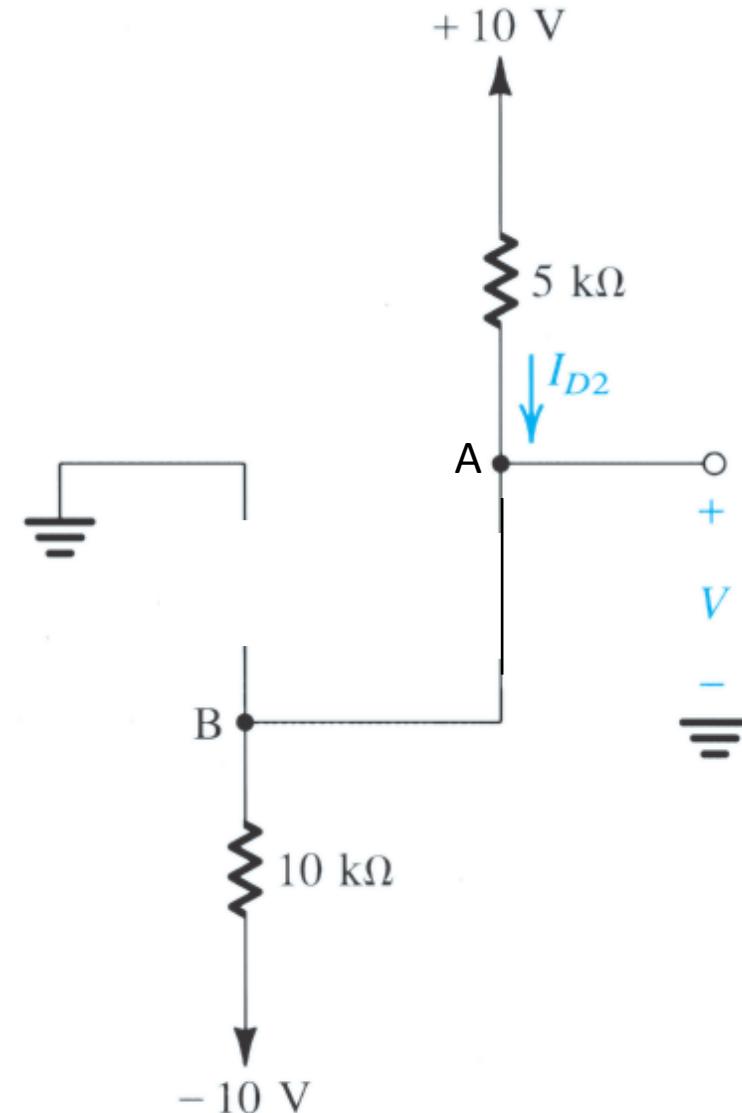
- vamos **SUPOR** agora que D2 está conduzindo e D1 em corte

- Se D1 não conduz, a corrente em D1 é zero.
- Se D2 conduz, o potencial em A é igual ao de B, e podem ser calculados pelo divisor resistivo formado no circuito

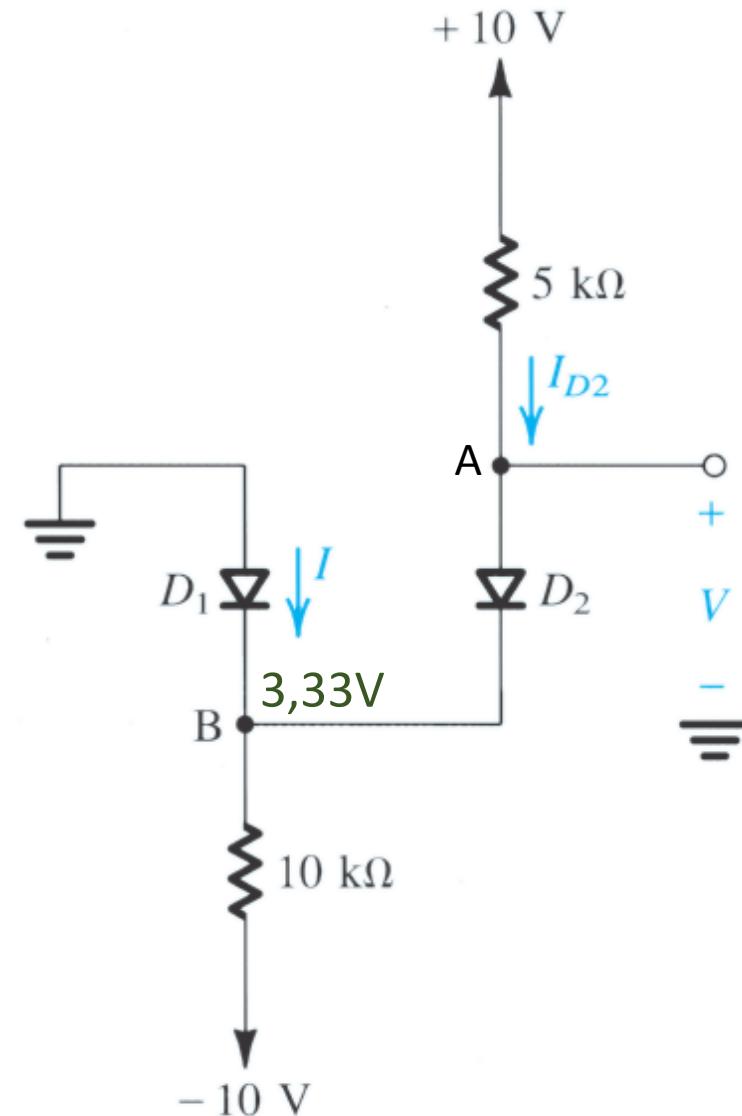
$$V = (-10V) + 10k/(10k+5k)*(10V - -10V) = 3,33V$$

- A corrente no circuito é

$$(10V - -10V)/(5k+10k)=1,33mA$$



Exercício: Círcuito 2

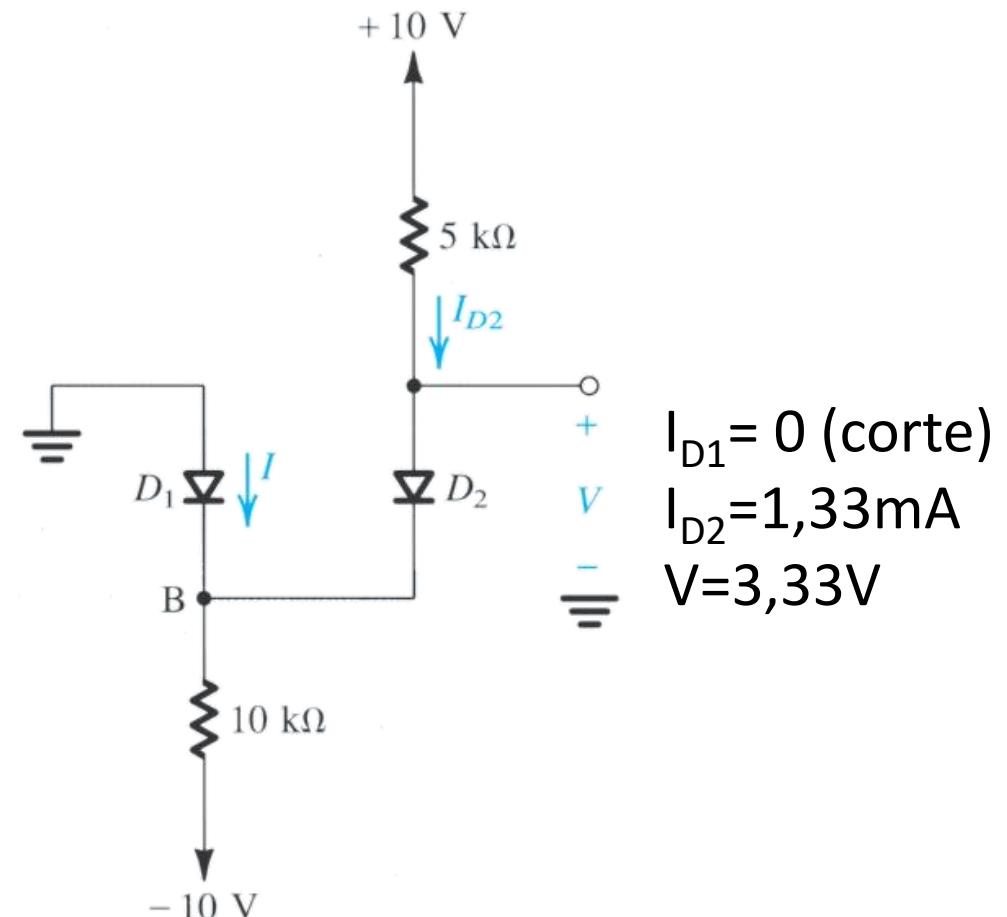
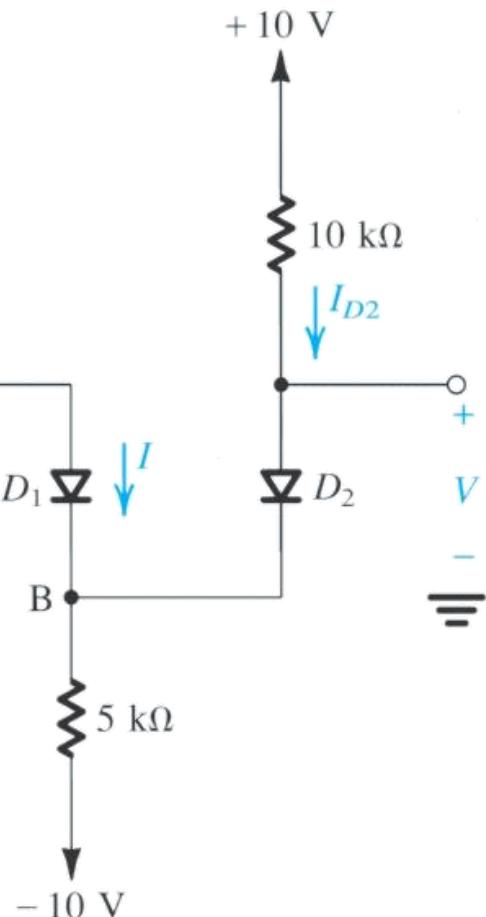


- vamos **SUPOR** agora que D₂ está conduzindo e D₁ em corte
 - Se D₁ não conduz, a corrente em D₁ é zero.
 - Se D₂ conduz, o potencial em A é igual ao de B, e podem ser calculados pelo divisor resistivo formado no circuito
$$V = (-10V) + 10k/(10k+5k)*(10V - -10V) = 3,33V$$
 - A corrente no circuito é
$$(10V - -10V)/(5k+10k)=1,33mA$$
- Verificamos:
 - ID₁ zero (Díodo em corte) OK
 - ID₂ positiva OK
- Portanto nossa suposição agora é **verdadeira** e o resultado está **correto**.

Exercício

- Considerando os diodos ideais, calcule a corrente nos diodos e a tensão V.

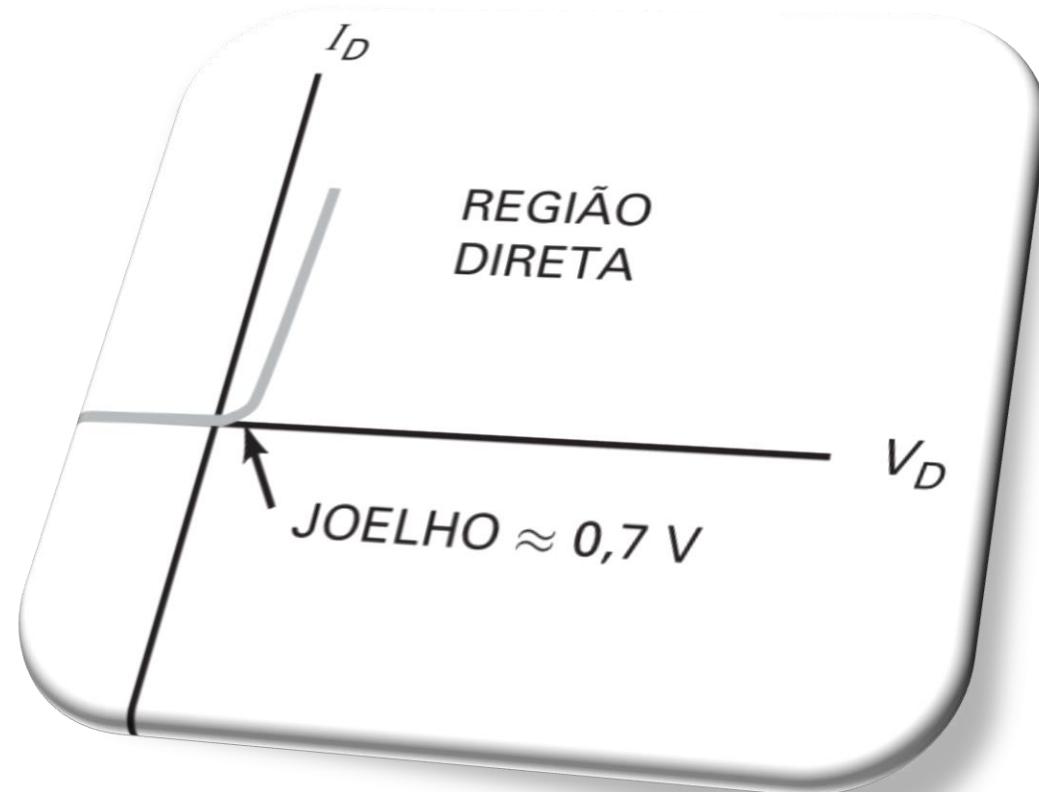
$$\begin{aligned}I_{D1} &= 1 \text{mA} \\I_{D2} &= 1 \text{mA} \\V &= 0 \text{V}\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}I_{D1} &= 0 \text{ (corte)} \\I_{D2} &= 1,33 \text{mA} \\V &= 3,33 \text{V}\end{aligned}$$

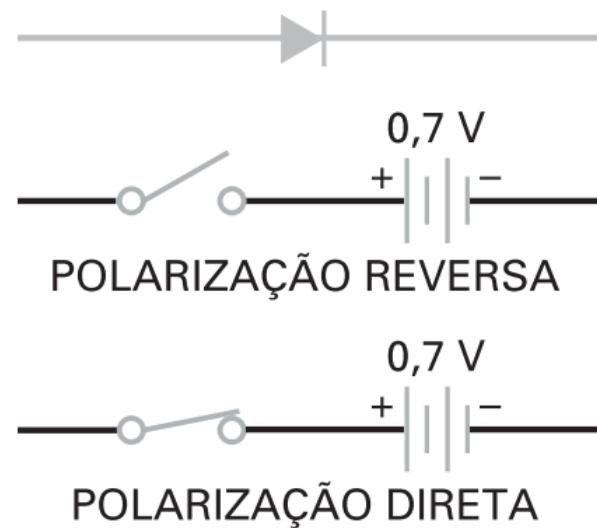
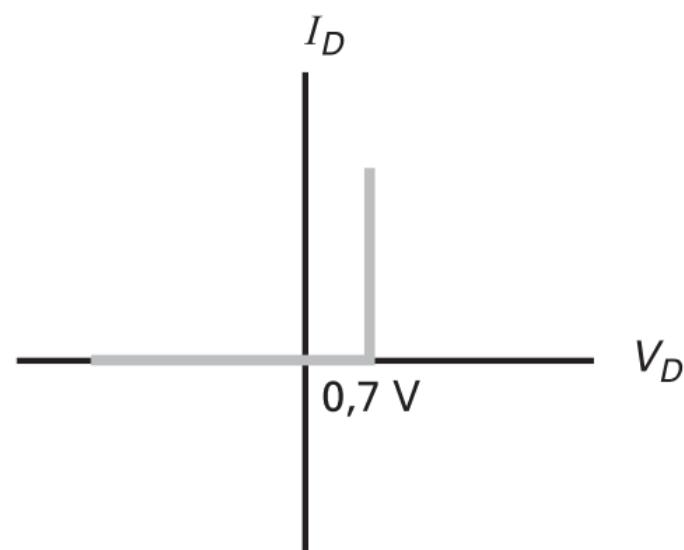
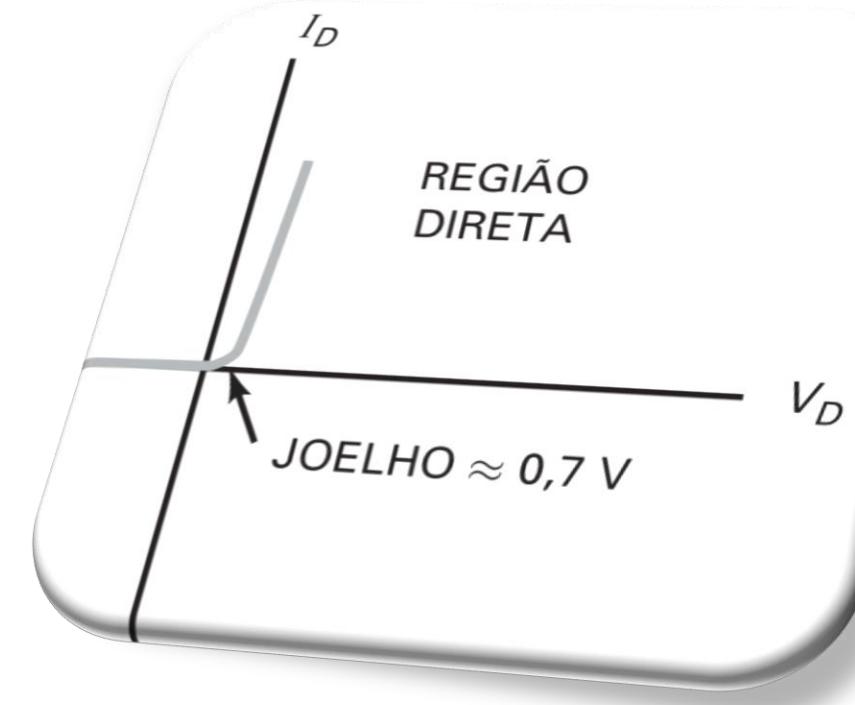
Diodo Real x Diodo Ideal

- O diodo real apresenta um comportamento exponencial, diferente do ideal.



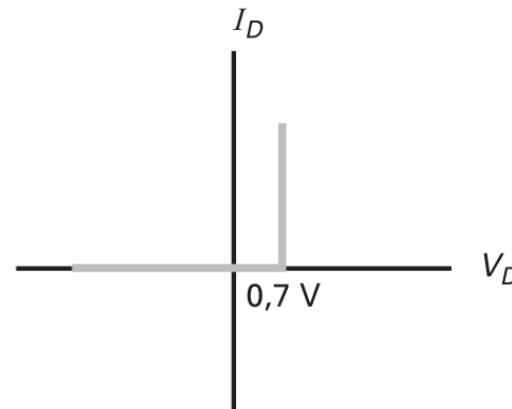
Diodo Real x Diodo Ideal

- O diodo real apresenta um comportamento exponencial, diferente do ideal.
- Uma aproximação melhor para seu comportamento, mas ainda conservando a simplicidade do modelo ideal, é considerar a queda de tensão devida à tensão de joelho como parte do modelo.



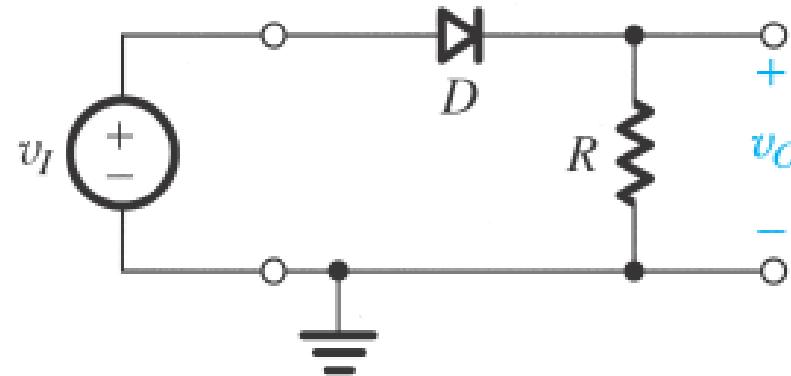
Modelo de queda constante

- Com este modelo, o diodo é substituído por uma chave em série com uma fonte de tensão constante.
- Os resultados serão mais próximos de um comportamento real, pois essa queda de tensão pode ser significativa em relação aos potenciais do circuito.
- Imagine um circuito alimentado por uma fonte de 3V, essa queda representa 23% do potencial.



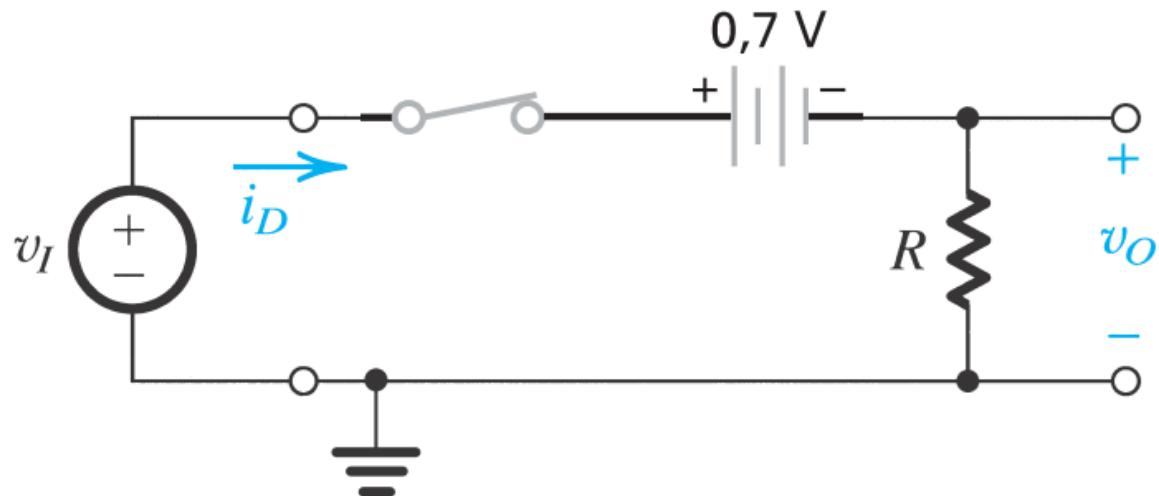
Exercício

- Calcule a corrente no diodo e a tensão sobre o resistor do circuito com $v_i=5V$ e $R=1k$, calcule a potência dissipada no diodo.
- Compare este resultado ao obtido com o modelo ideal do diodo



Exercício

- Calcule a corrente no diodo e a tensão sobre o resistor do circuito com $v_i=5V$ e $R=1k$, calcule a potência dissipada no diodo. Compare este resultado ao obtido com o modelo ideal do diodo



$$i_D = (5V - 0,7V)/1k = 4,3mA$$

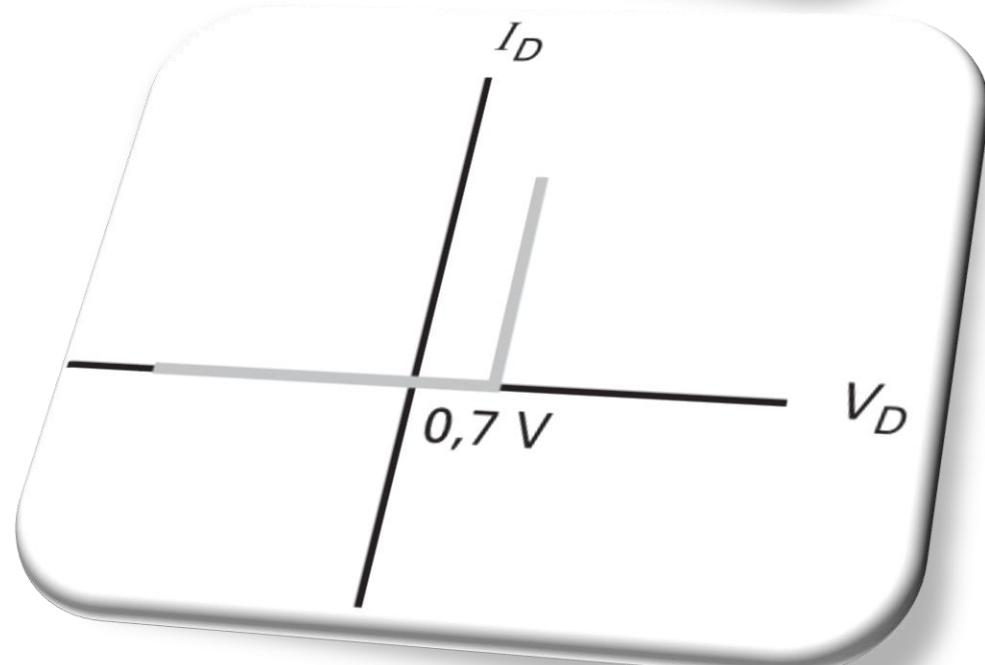
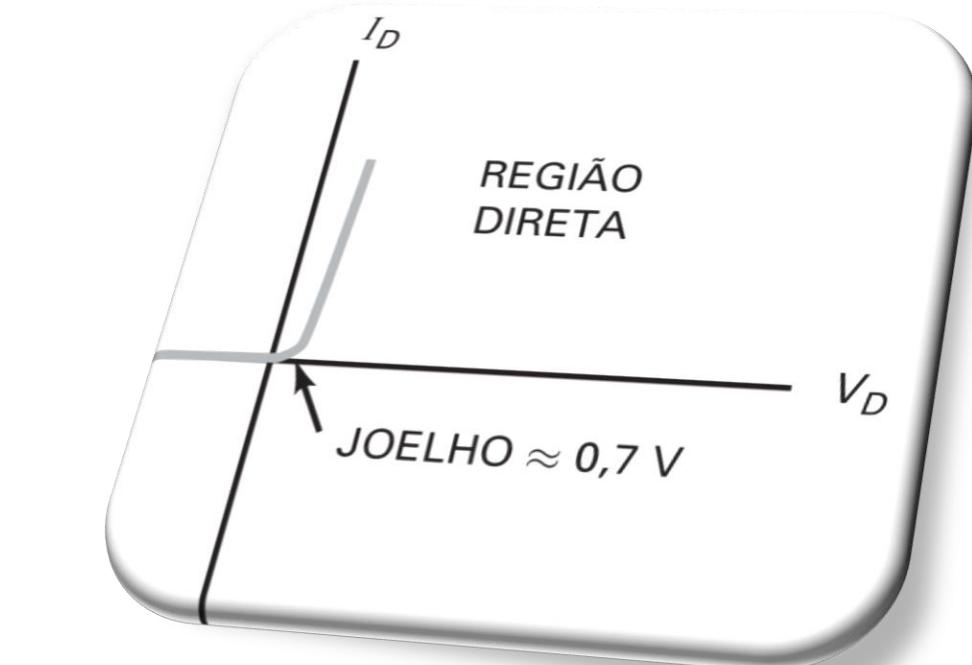
$$v_O = (5V - 0,7V) = 4,3V$$

$$P = 0,7V * 4,3mA = 3mW$$

Com o modelo ideal teríamos 5mA e 5V, um erro de 14%

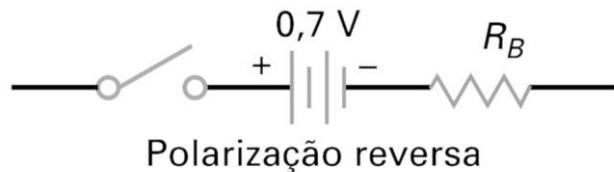
Diodo Real x Diodo Ideal

- Apesar de se aproximar à curva real, o modelo de queda constante não considera a relação tensão/corrente após o joelho da curva

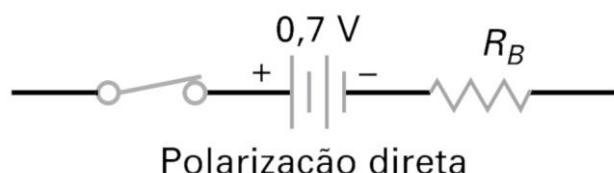


Diodo Real x Diodo Ideal

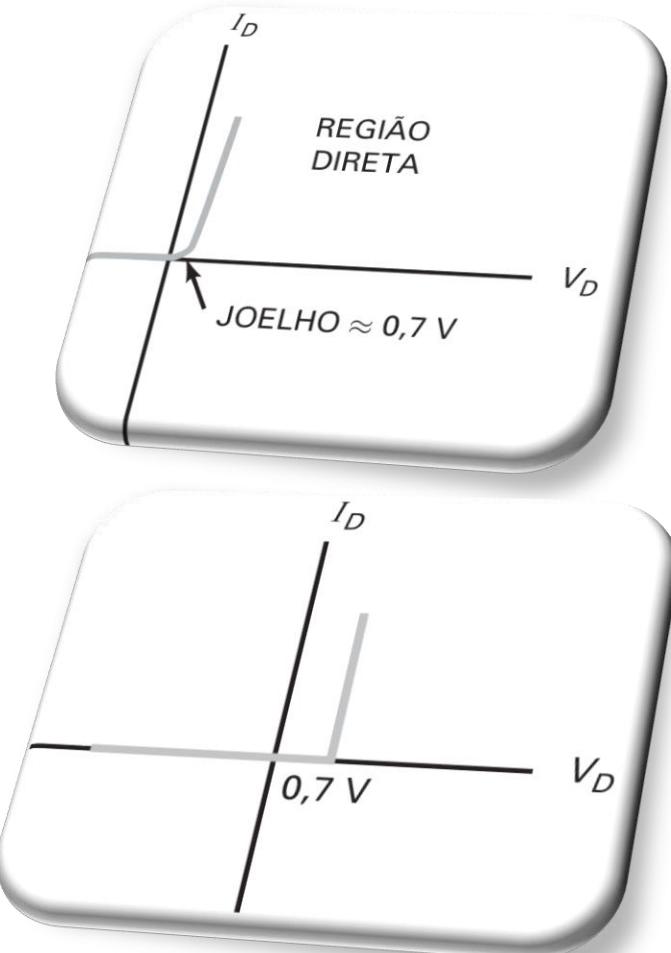
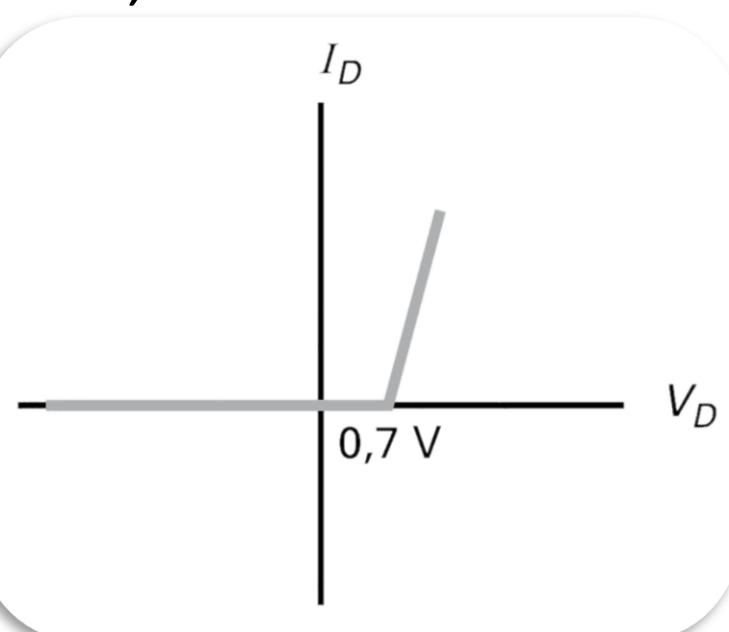
- Apesar de se aproximar à curva real, o modelo de queda constante não considera a relação tensão/corrente após o joelho da curva
- O modelo pode ser aprimorado para considerar este comportamento, acrescentando um resistor.



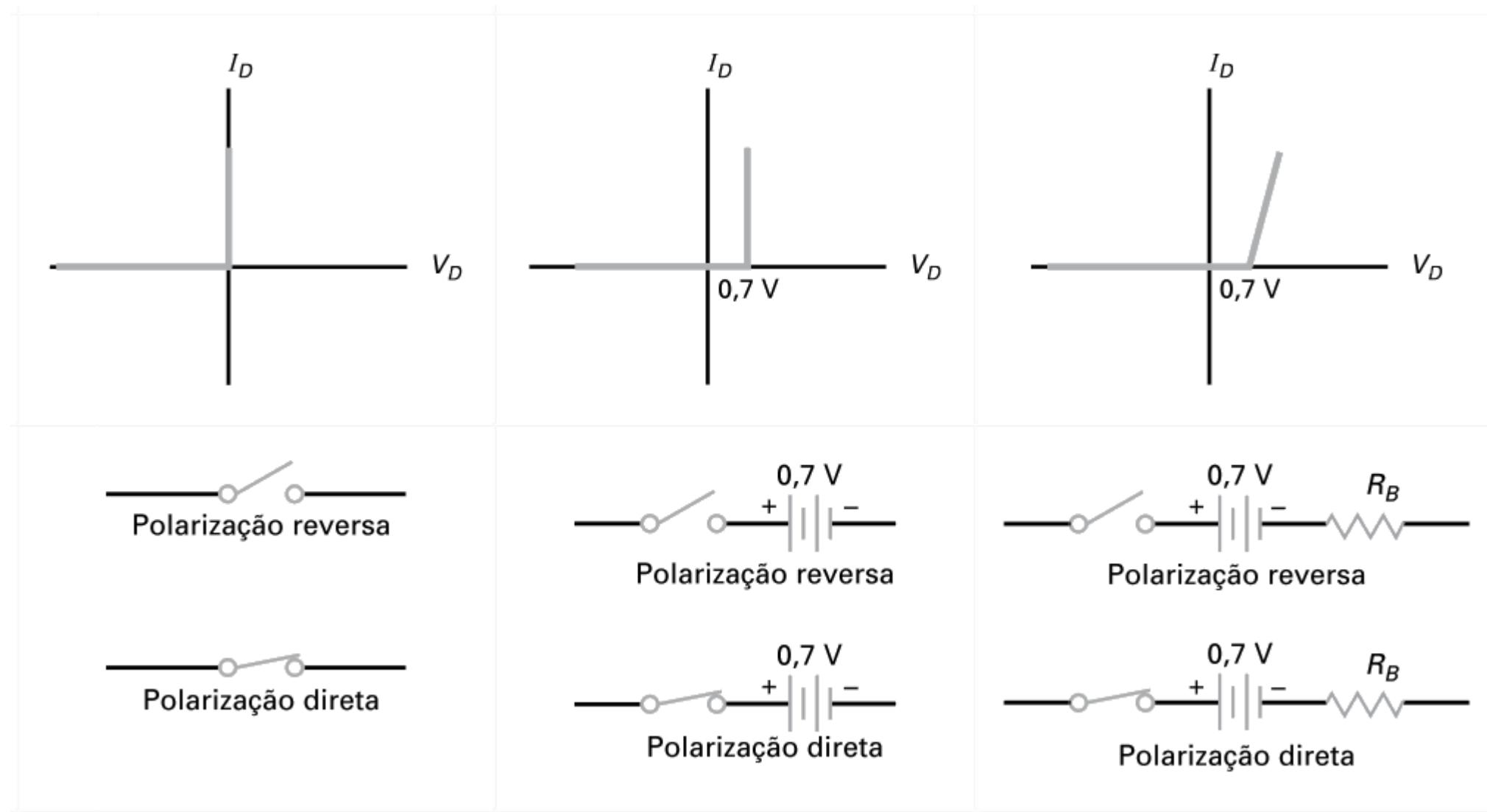
Polarização reversa



Polarização direta



Modelos para um diodo

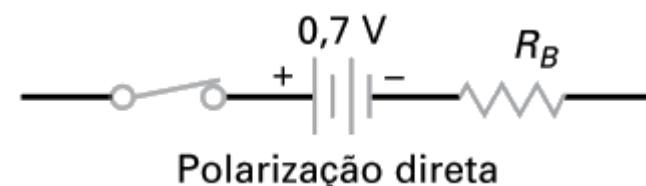


Modelo bateria

- Modelo que leva em conta a queda de tensão do diodo e também o efeito de tensão/corrente
- Se aproxima melhor da curva exponencial do diodo e leva a resultados mais próximos à realidade
- O diodo conduz quando a tensão direta é maior que a tensão de barreira e a tensão aumenta linearmente com a corrente

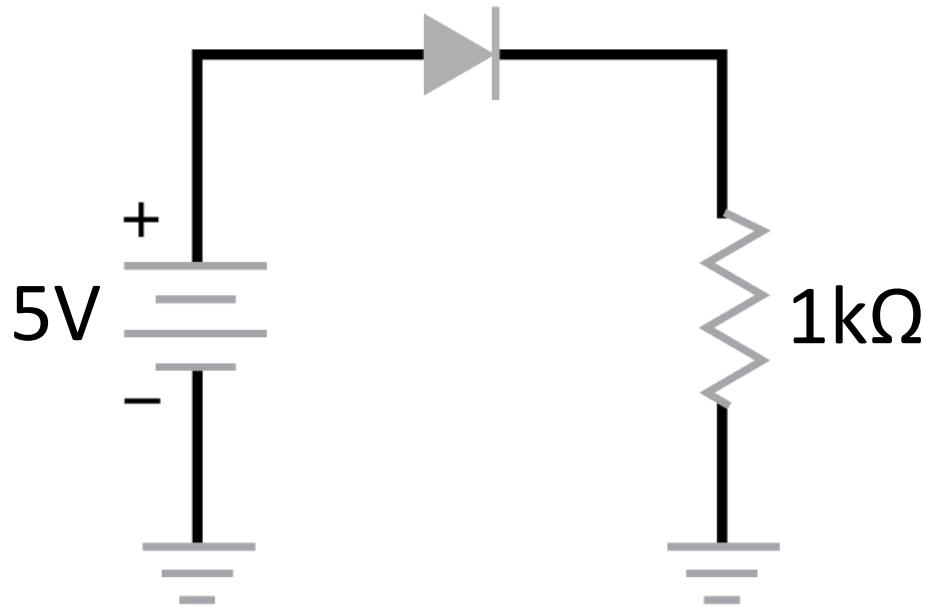


Polarização reversa



Polarização direta

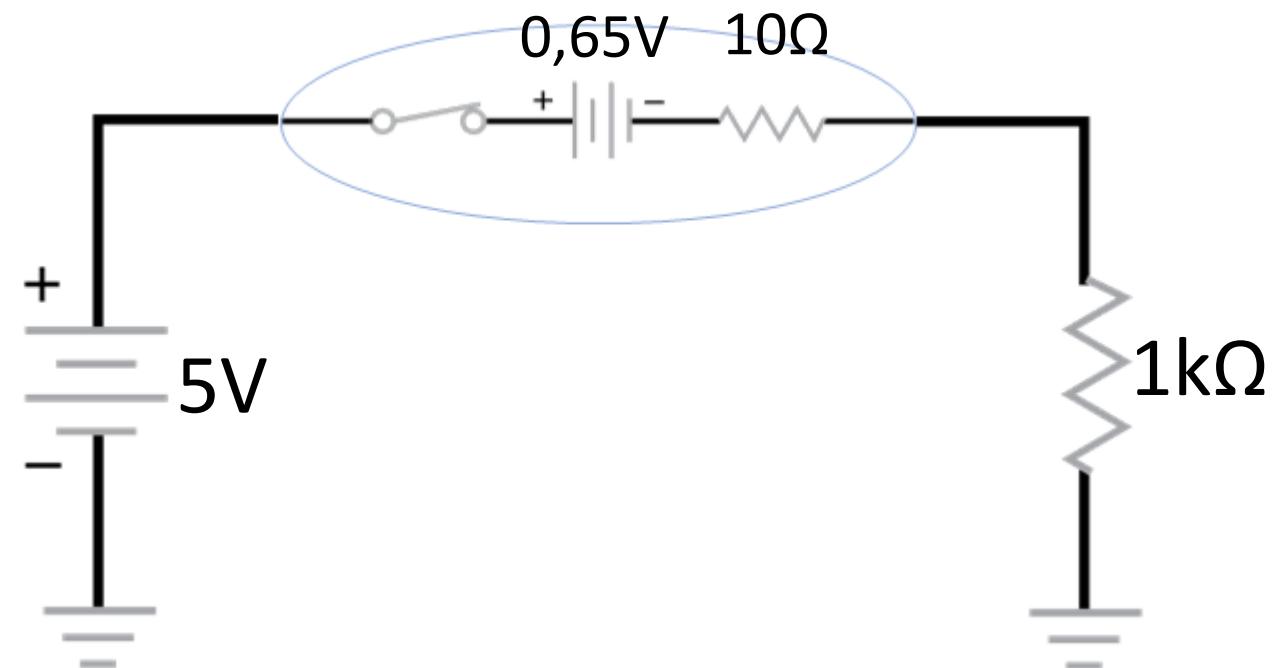
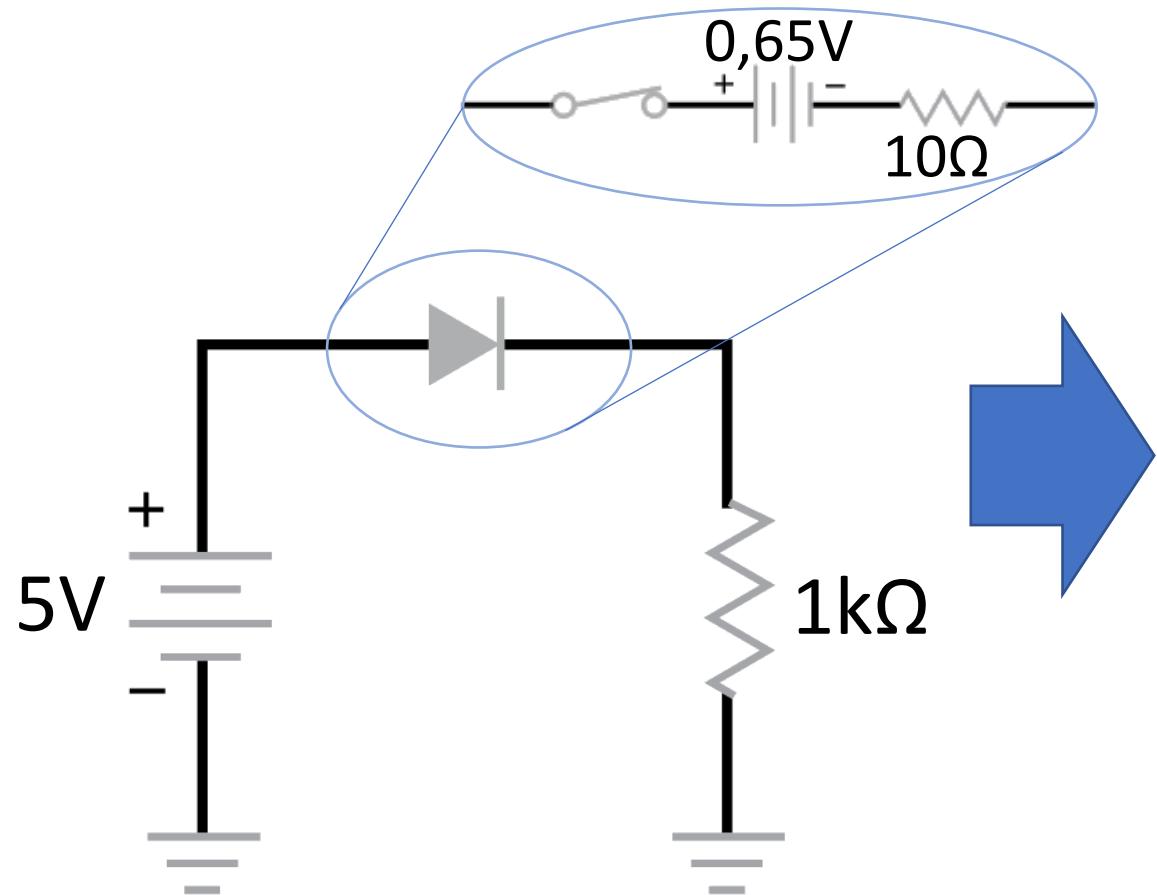
Exemplo 1



- Considere o diodo com $R_B=10\Omega$ e tensão de barreira $0,65V$
- Quais os valores de tensão e corrente no resistor?

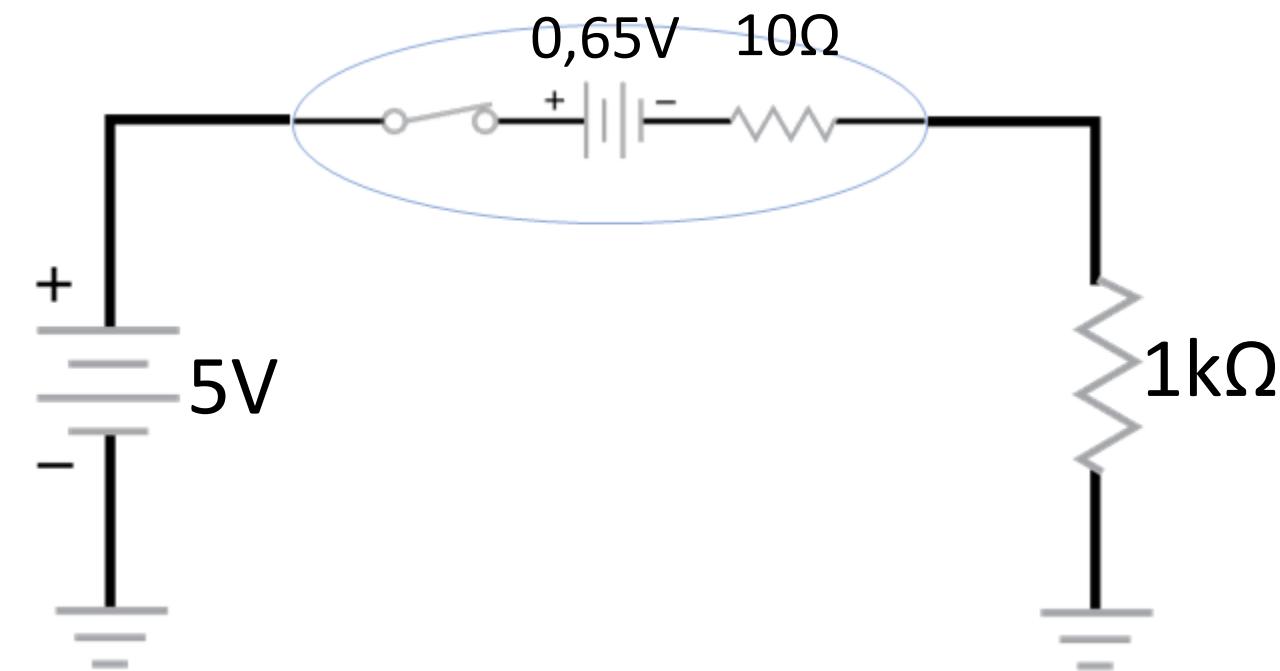
Exemplo 1

- Substituímos o diodo pelo modelo com $R_B=10\Omega$ e tensão de barreira $0,65V$



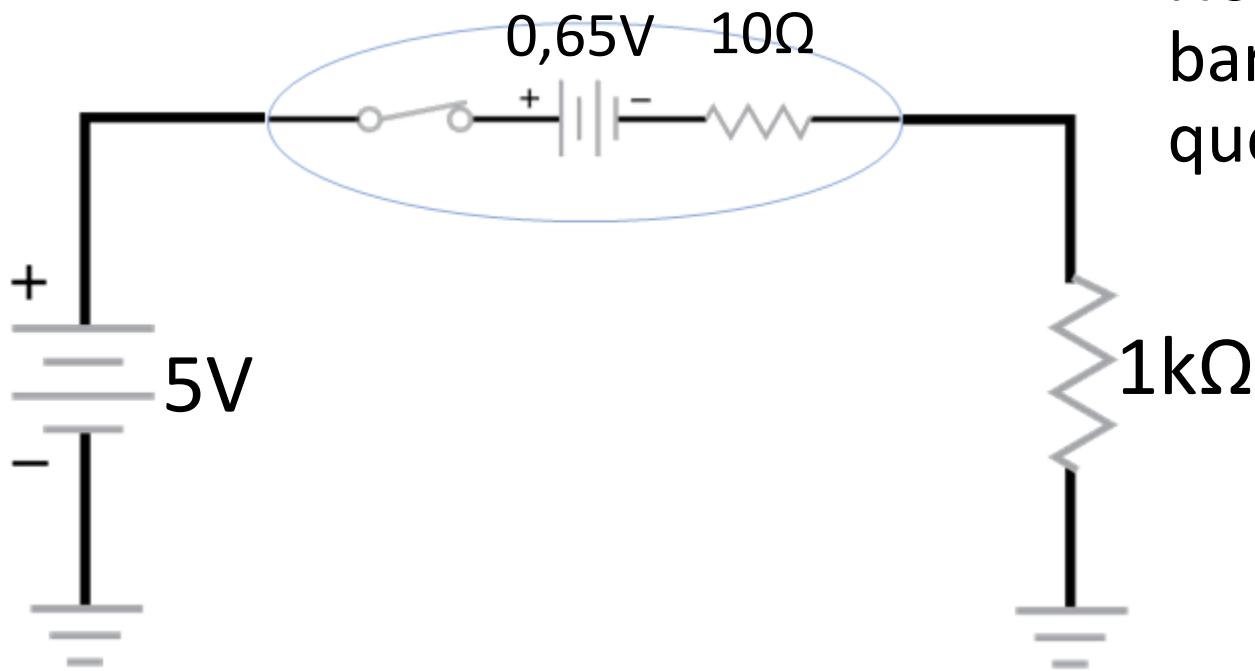
Exemplo 1

- Substituímos o diodo pelo modelo
- Resolvemos o circuito completo:
- $I_R = (5V - 0,65V)/(1k+10) = 4,307mA$
- $V_R = 4,307V$

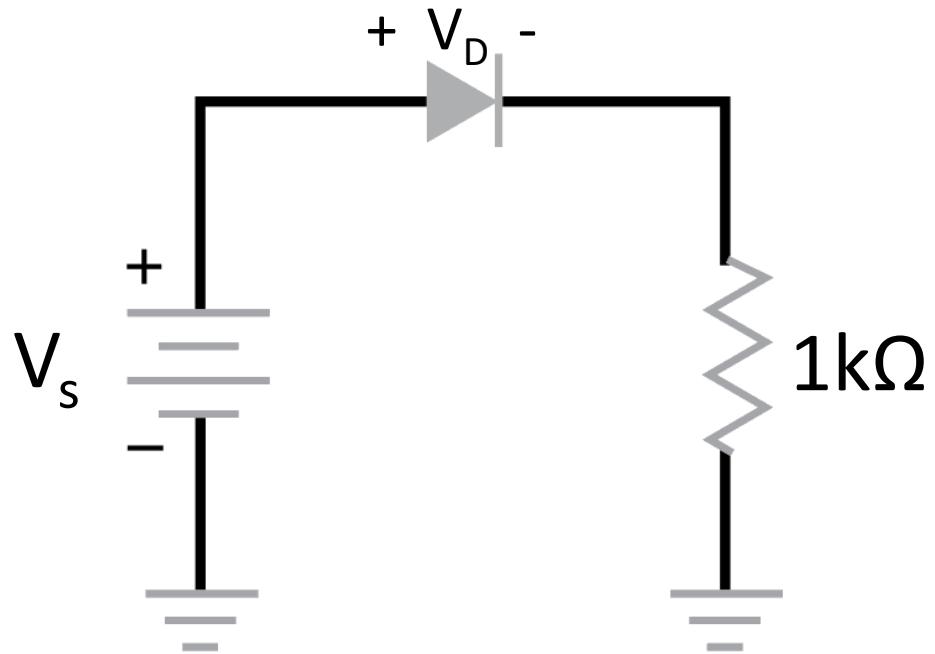


Exemplo 1

- Substituímos o diodo pelo modelo
- Resolvemos o circuito completo:
- $I_R = (5V - 0,65V)/(1k+10) = 4,307mA$
- $V_R = 4,307V$
- Note que além da queda de 0,65V da barreira, há mais um valor de 43mV de queda do diodo, totalizando 0,693V



Exemplo 2

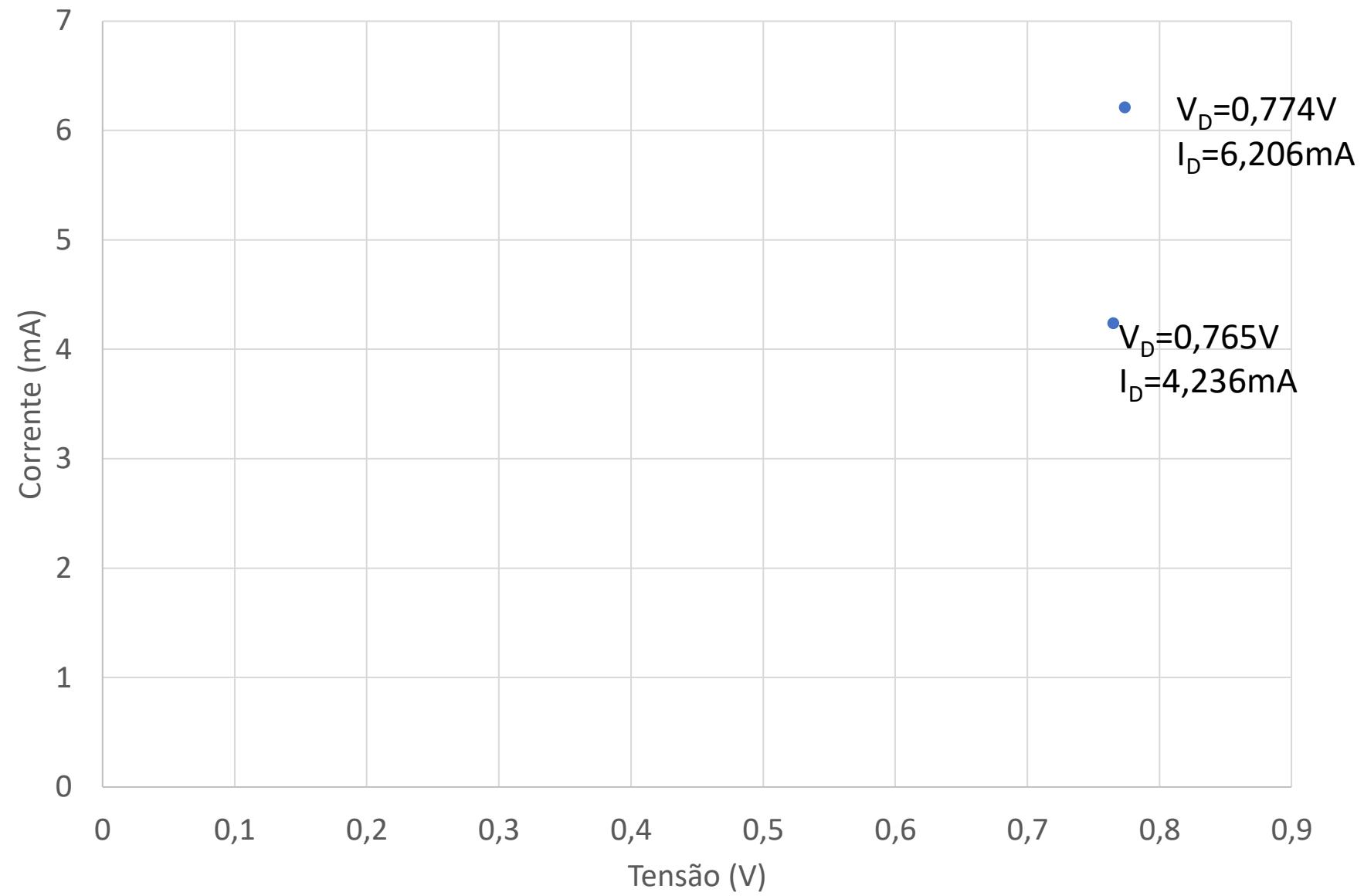


- Em dois testes no circuito, as tensões e correntes medidas no diodo foram:
 - $V_D=0,765V$ $I_D=4,236mA$
 - $V_D=0,774V$ $I_D=6,206mA$
- Encontre o valor de tensão de barreira e resistência interna do diodo

Exemplo 2

- Análise gráfica:

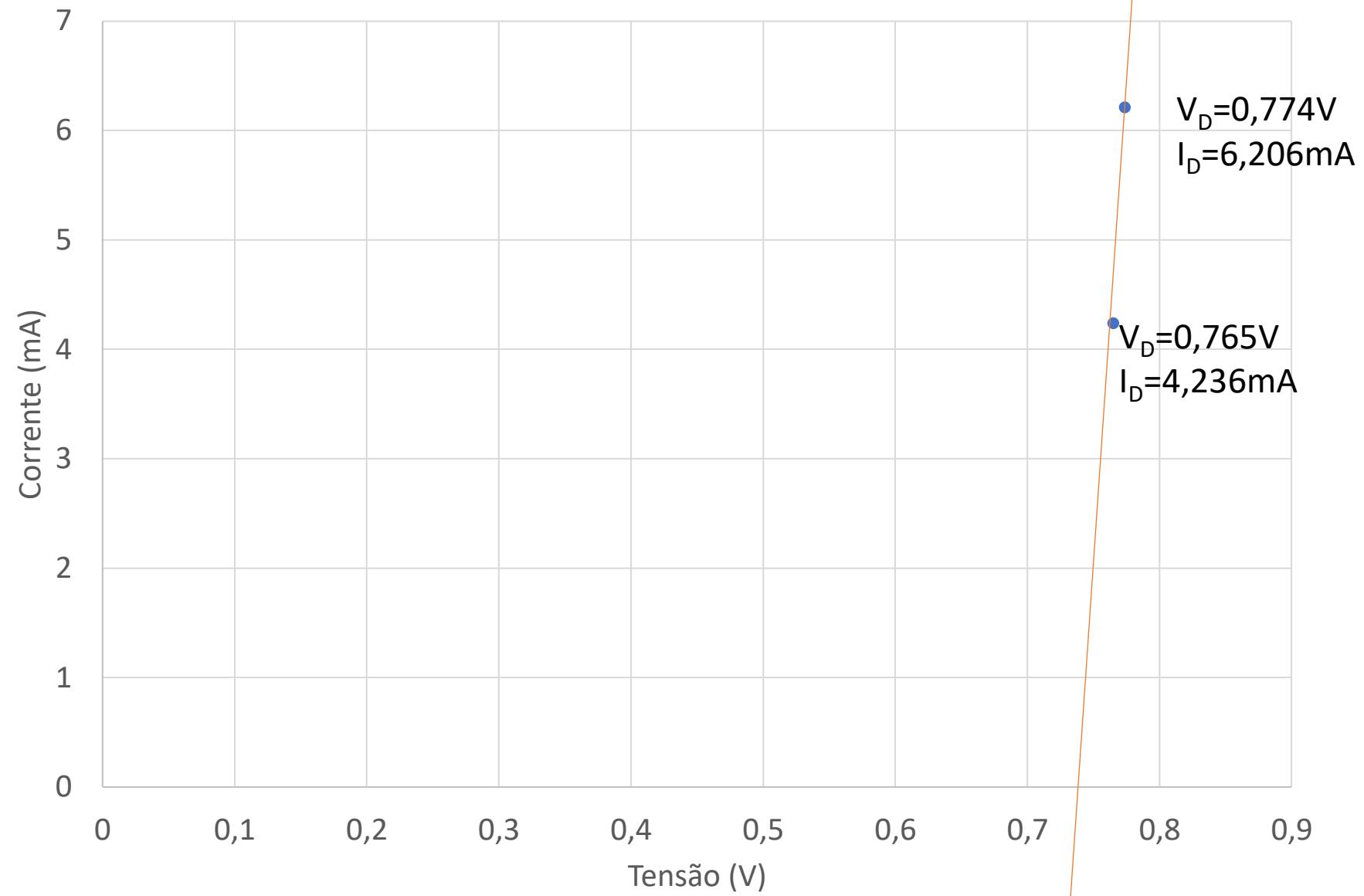
Tensão x Corrente no diodo



Exemplo 2

- Análise gráfica:

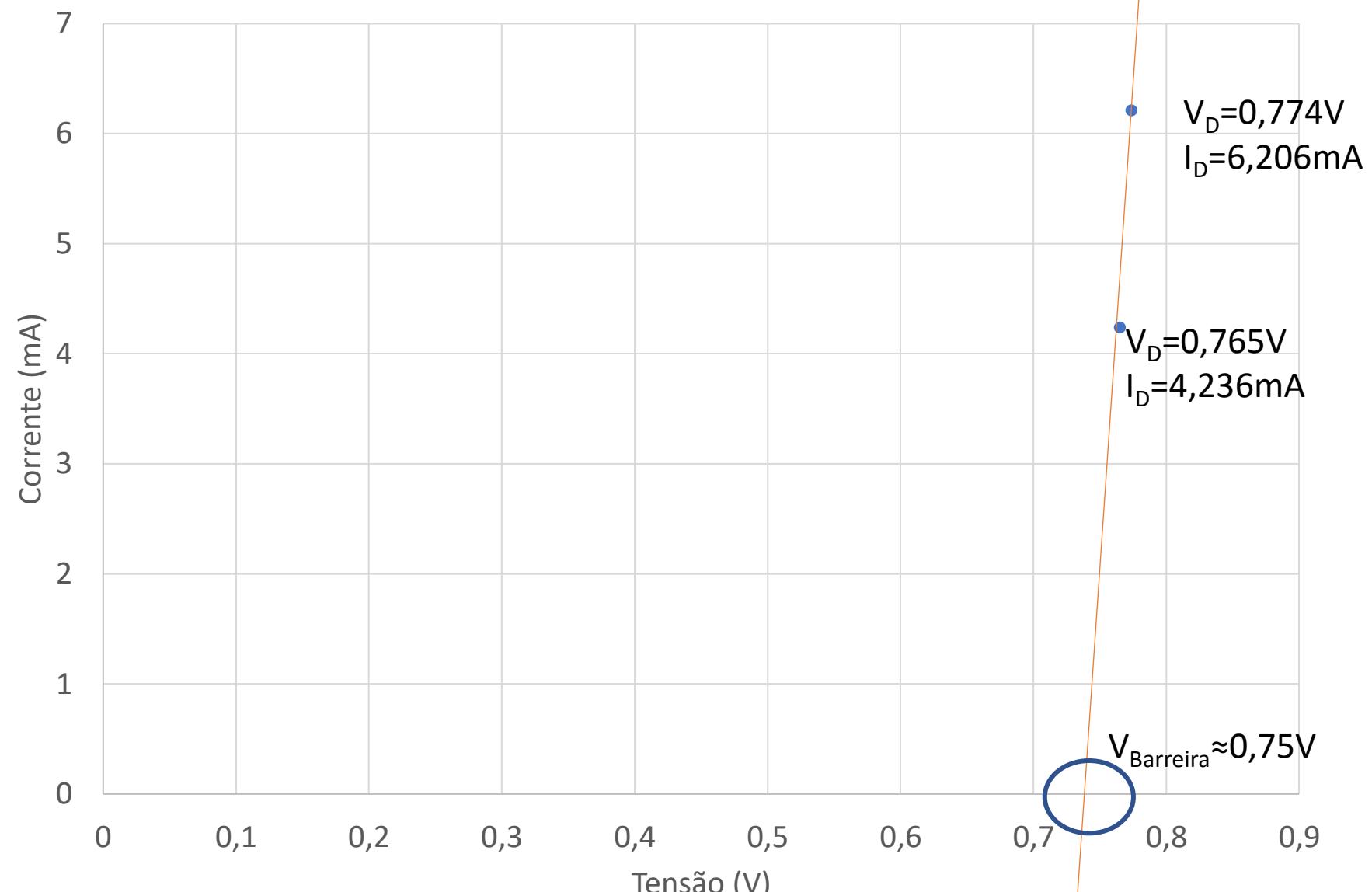
Tensão x Corrente no diodo



Exemplo 2

- Análise gráfica:

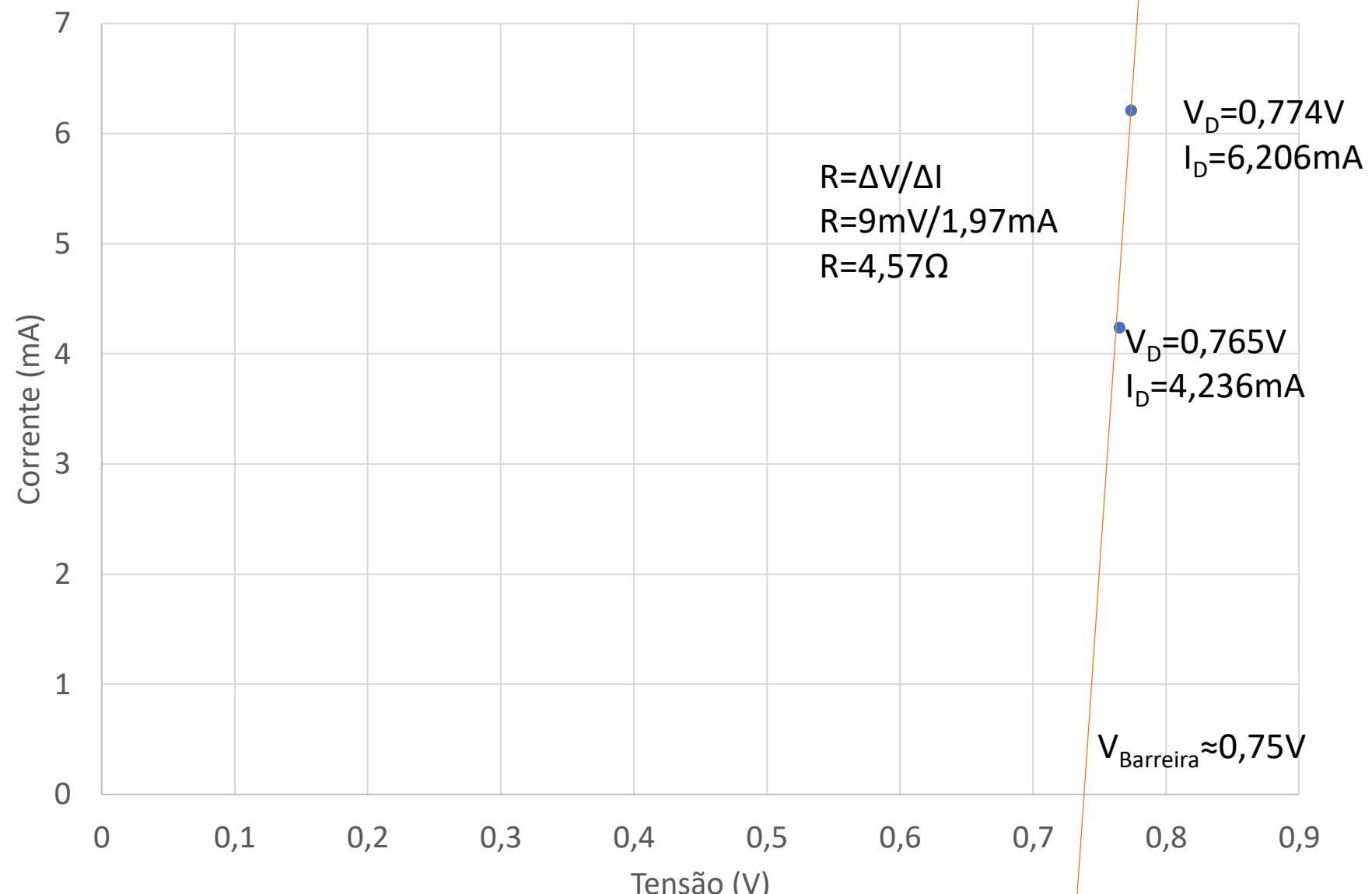
Tensão x Corrente no diodo



Exemplo 2

- Análise gráfica:

Tensão x Corrente no diodo



Exemplo 2

- Análise matemática
- A tensão no diodo obedece a formula $V_{\text{Diodo}} = V_{\text{Barreira}} + I_{\text{Diodo}} * R_{\text{Diodo}}$

Exemplo 2

- Análise matemática
- A tensão no diodo obedece a formula $V_{\text{Diodo}} = V_{\text{Barreira}} + I_{\text{Diodo}} * R_{\text{Diodo}}$
- $0,765V = V_{\text{Barreira}} + 4,236mA * R_{\text{diodo}}$
- $0,774V = V_{\text{Barreira}} + 6,206mA * R_{\text{diodo}}$

Exemplo 2

- Análise matemática
- A tensão no diodo obedece a formula $V_{\text{Diodo}} = V_{\text{Barreira}} + I_{\text{Diodo}} * R_{\text{Diodo}}$
- $0,765V = V_{\text{Barreira}} + 4,236mA * R_{\text{diodo}}$
- $0,774V = V_{\text{Barreira}} + 6,206mA * R_{\text{diodo}}$
- Resolvendo o sistema de equações, $V_{\text{Barreira}}=0,745V$ e $R_{\text{Diodo}}=4,568\Omega$

Exemplo 3

- Utilizando o diodo do exercício anterior, qual seria a magnitude de tensão sobre o diodo para um valor de corrente de 1A?

Exemplo 3

- Utilizando o diodo do exercício anterior, qual seria a magnitude de tensão sobre o diodo para um valor de corrente de 1A?
- A tensão no diodo obedece a formula $V_{\text{Diodo}} = V_{\text{Barreira}} + I_{\text{Diodo}} * R_{\text{Diodo}}$

Exemplo 3

- Utilizando o diodo do exercício anterior, qual seria a magnitude de tensão sobre o diodo para um valor de corrente de 1A?
- A tensão no diodo obedece a formula $V_{\text{Diodo}} = V_{\text{Barreira}} + I_{\text{Diodo}} * R_{\text{Diodo}}$
- $V_{\text{Diodo}} = 0,745 + 1\text{A} * 4,568\Omega$

Exemplo 3

- Utilizando o diodo do exercício anterior, qual seria a magnitude de tensão sobre o diodo para um valor de corrente de 1A?
- A tensão no diodo obedece a formula $V_{\text{Diodo}} = V_{\text{Barreira}} + I_{\text{Diodo}} * R_{\text{Diodo}}$
- $V_{\text{Diodo}} = 0,745 + 1\text{A} * 4,568\Omega = 5,31\text{V}$

Exemplo 3

- Utilizando o diodo do exercício anterior, qual seria a magnitude de tensão sobre o diodo para um valor de corrente de 1A?
- A tensão no diodo obedece a formula $V_{\text{Diodo}} = V_{\text{Barreira}} + I_{\text{Diodo}} * R_{\text{Diodo}}$
- $V_{\text{Diodo}} = 0,745 + 1\text{A} * 4,568\Omega = 5,31\text{V}$

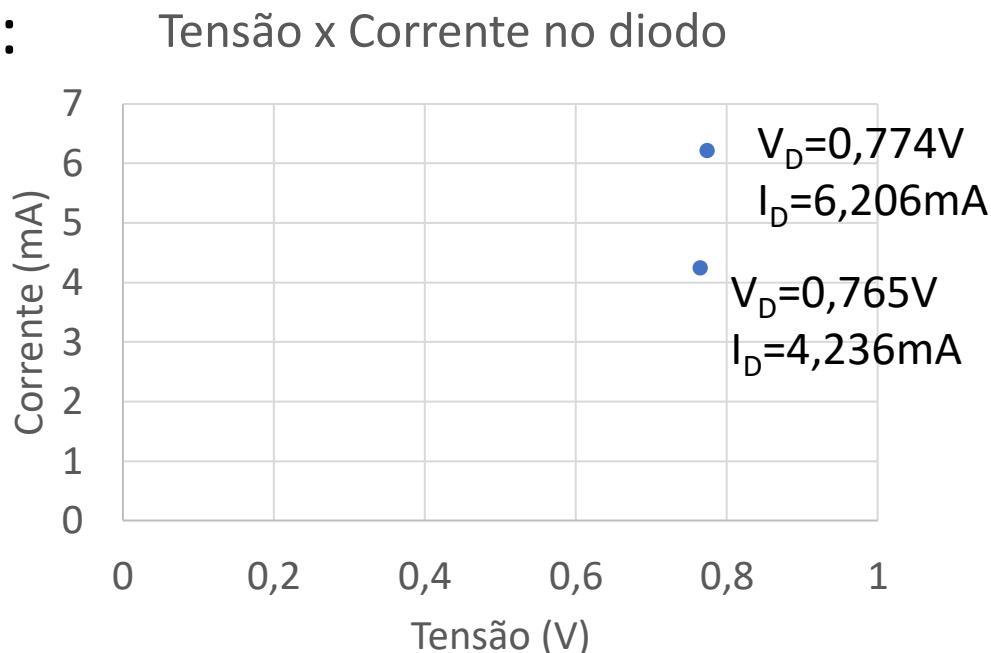
5,31V?????

Como um diodo pode apresentar toda essa tensão?

- Isso ocorre porque o modelo de dois segmentos só é valido dentro de uma pequena margem de operação
- Lembre-se que a curva real de um diodo é **exponencial** e não linear

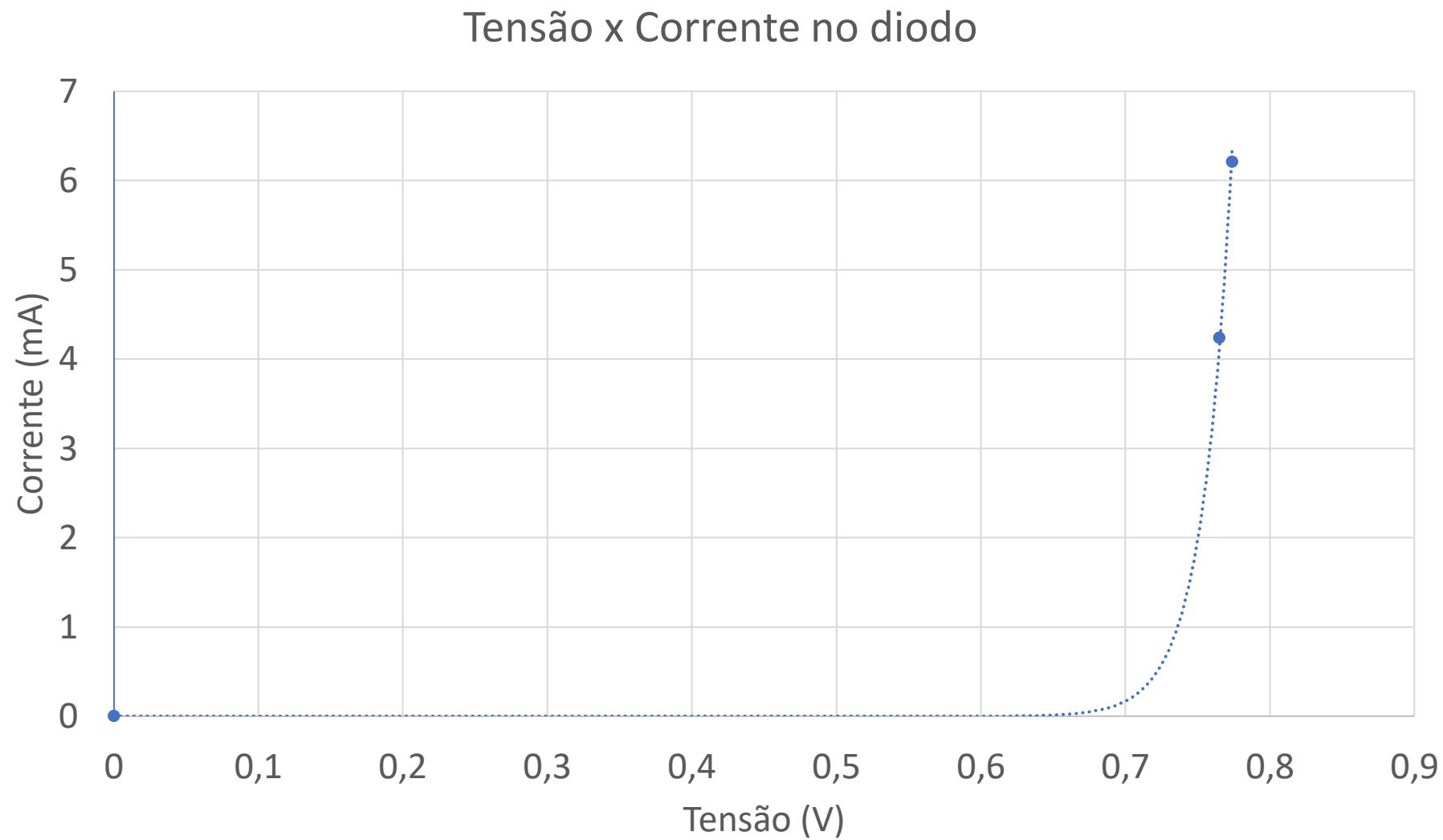
Como um diodo pode apresentar toda essa tensão?

- Isso ocorre porque o modelo de dois segmentos só é valido dentro de uma pequena margem de operação
- Lembre-se que a curva real de um diodo é **exponencial** e não linear
- Diodo do Exemplo 2:



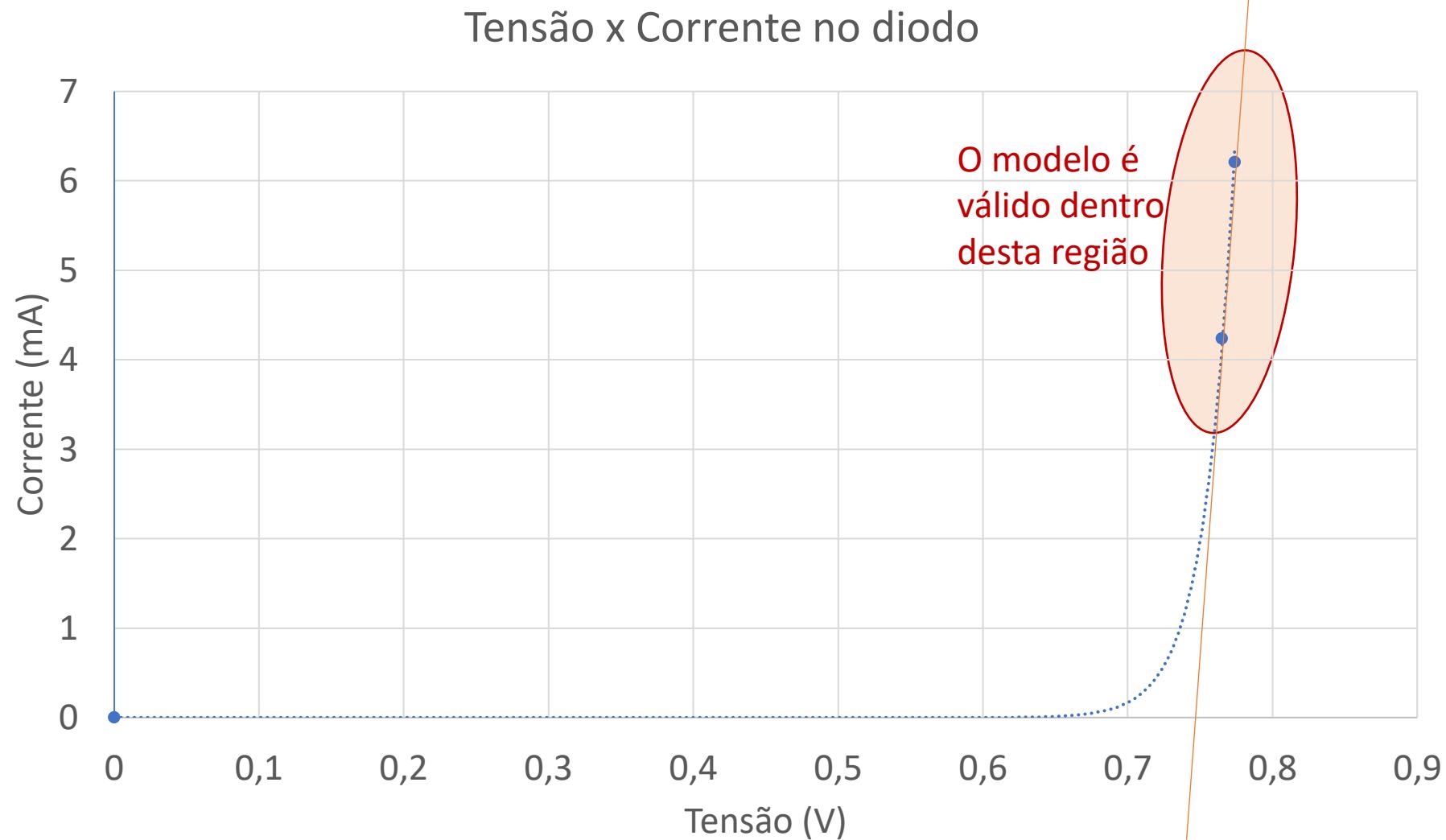
Diodo do exemplo 2

- Sobrepondo o comportamento exponencial da curva



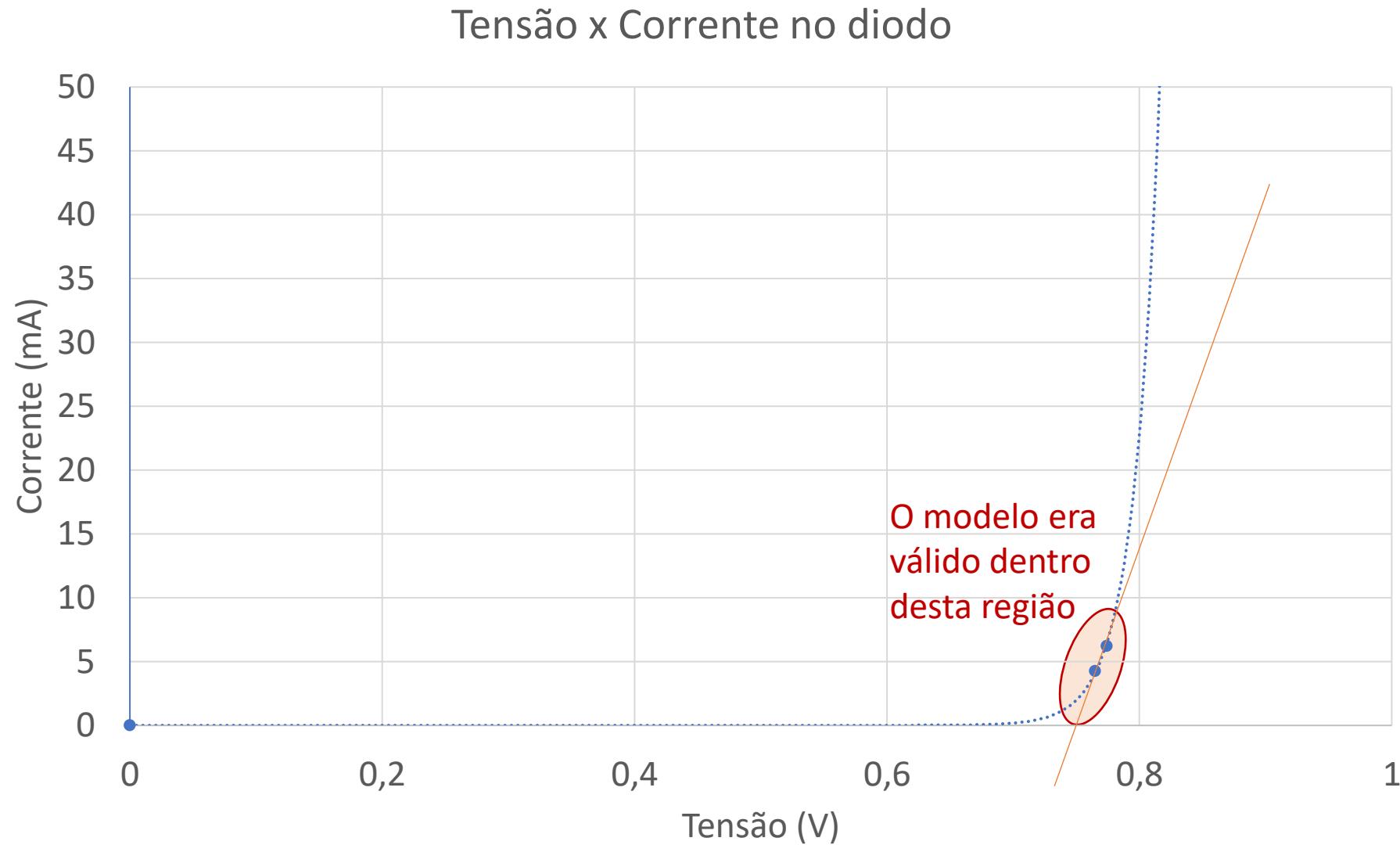
Diodo do exemplo 2

- Sobrepondo o comportamento exponencial da curva

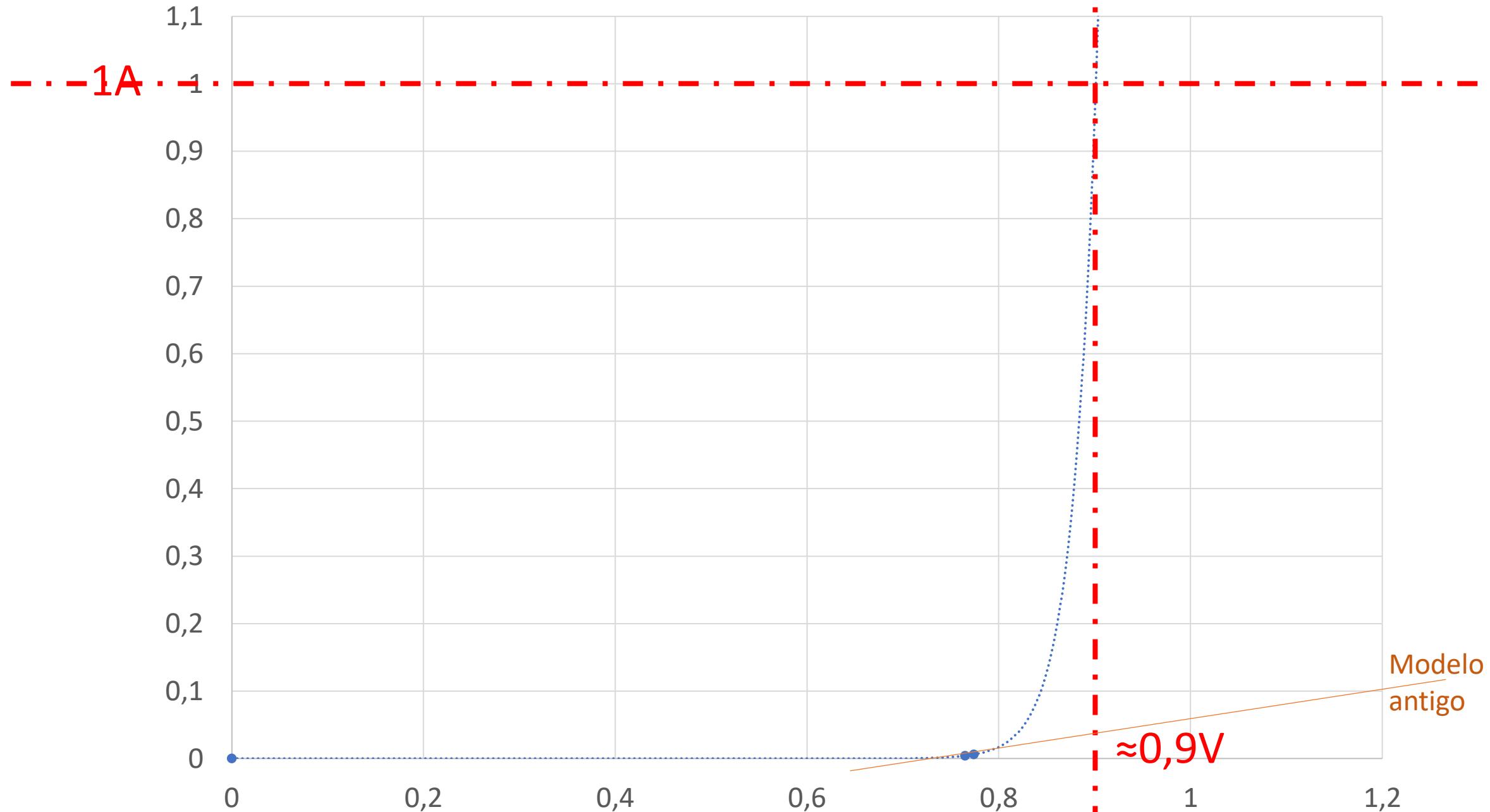


Diodo do exemplo 2

- Sobrepondo o comportamento exponencial da curva
- Extrapolando para magnitudes maiores de corrente (50mA)



Tensão x Corrente no diodo



Modelo exponencial do diodo

- O modelo mais exato para representar o diodo é derivado das características físicas dos semicondutores
- Modelo apresentado em [Sedra, Smith – Microeletrônica 5^aed.]
- Simplificadamente:

$$i_D = I_S e^{\frac{v_D}{V_T}}$$

$$i_D = I_S e^{\frac{v_D}{V_T}}$$

- i_D → Corrente no diodo
- v_D → Tensão no diodo
- I_S → Corrente de escala do diodo (Específico para cada diodo)
- V_T → Tensão térmica

- k = Constante de Boltzmann
- T = Temperatura em kelvin
- q = Carga fundamental do elétron

$$V_T = \frac{kT}{q}$$

Em temperatura ambiente:
 $V_T \approx 25\text{mV}$