

Aula 21

Semicondutores Introdução

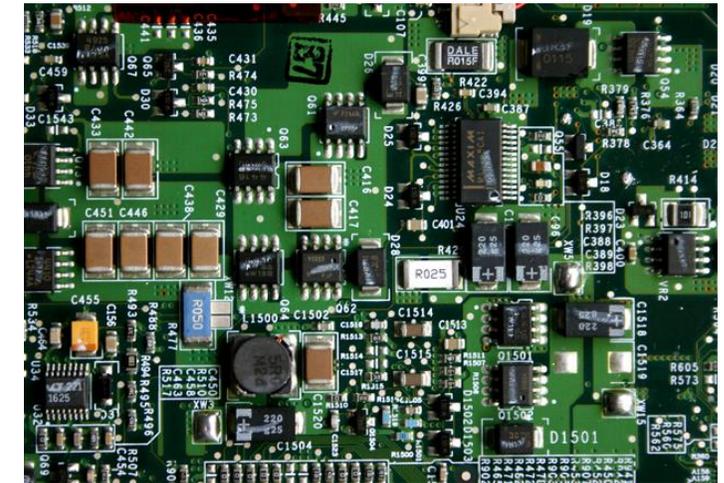
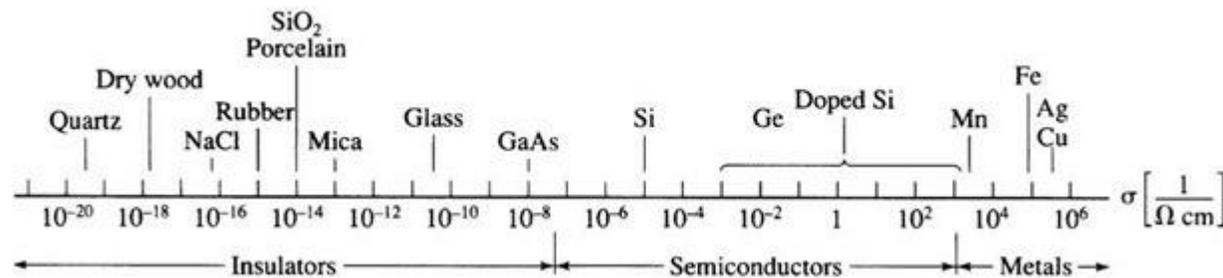
Circuitos Elétricos II

Prof. Henrique Amorim - UNIFESP - ICT

Semicondutores

Os elementos considerados ótimos bons condutores possuem 1 ou 2 elétrons de valência (i.e. prata, ouro e cobre), por outro lado os isolantes possuem mais que 4 elétrons de valência

Os semicondutores possuem propriedades elétricas entre as dos condutores e dos isolantes com 4 elétrons de valência

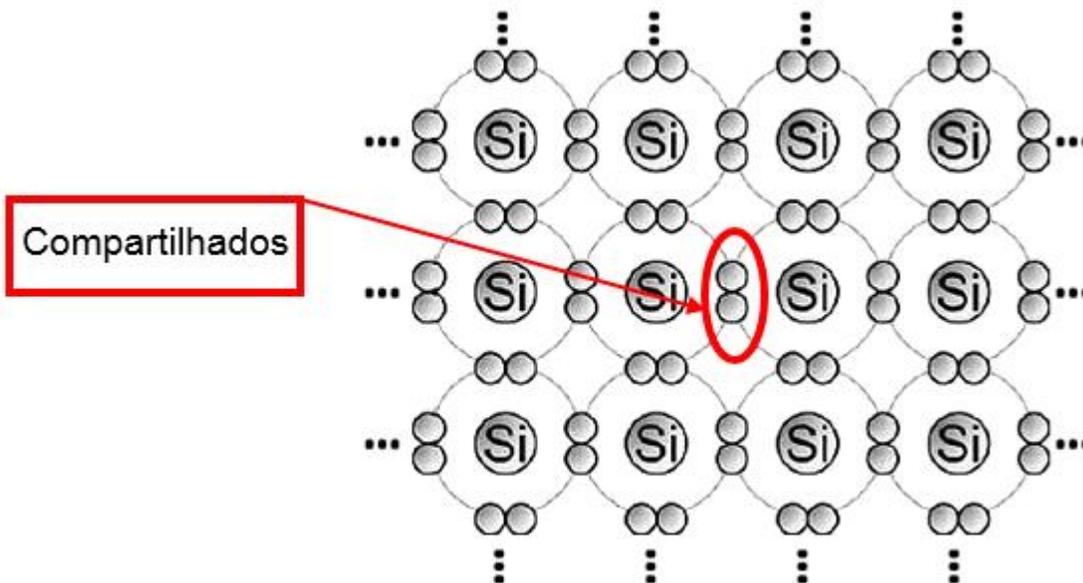


Os dois semicondutores mais utilizados na eletrônica são os formados por ligações de **Silício** (Si) e os formados por ligações de **Germânio** (Ge).

- **Semicondutores de Germânio** são menos utilizados, possuem corrente reversa excessiva
- **Semicondutores de Silício** são mais utilizados

Semicondutores

Quando os átomos de Ge ou Si são agrupados, formam uma estrutura cristalina onde compartilham pares de elétrons (ligação covalente).



- Se o Si “ganha” +1 elétron se torna um íon negativo com carga -1
- Se o Si “perde” -1 elétron se torna um íon positivo com carga +1



Semicondutores - SI

SI – Silício

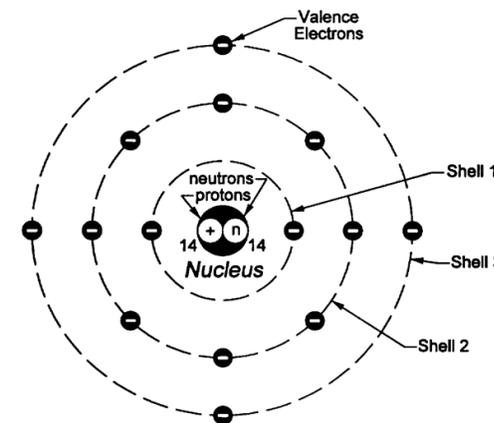
O silício é o segundo elemento mais abundante em nosso planeta, representa 28% de sua massa. Pode ser encontrado na argila, granito, quartzo e areia. Normalmente na forma de dióxido de silício (também conhecido como sílica) e silicatos (compostos contendo silício, oxigênio e metais).

Vantagens do Silício no emprego de semicondutores

- O silício permite a mudança de condutividade (por meio da dopagem) muito mais facilmente que os demais semicondutores
- Demais semicondutores não são tão duráveis e estáveis como o silício
- O silício monocristalino (cristais organizados) é a base para a microeletrônica (componente base das "bolachas")

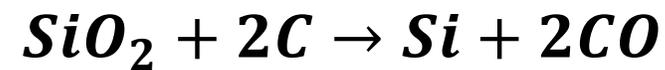
Tabela periódica

1																	2	
H 1,008 hidrogênio																	He 4,0026 hélio	
3	4											5	6	7	8	9	10	
Li 6,94 lítio	Be 9,0122 berílio											B 10,81 boro	C 12,011 carbono	N 14,007 nitrogênio	O 15,999 oxigênio	F 18,998 flúor	Ne 20,180 neônio	
11	12											13	14	15	16	17	18	
Na 22,990 sódio	Mg 24,305 magnésio											Al 26,982 alumínio	Si 28,085 silício	P 30,974 fósforo	S 32,06 enxofre	Cl 35,45 cloro	Ar 39,948 argônio	
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
K 39,098 potássio	Ca 40,078 cálcio	Sc 44,956 escândio	Ti 47,887 titânio	V 50,942 vanádio	Cr 51,996 cromo	Mn 54,938 manganês	Fe 55,845 ferro	Co 58,933 cobalto	Ni 58,693 níquel	Cu 63,546 cobre	Zn 65,382 zinco	Ga 69,723 galíio	Ge 72,630 germânio	As 74,922 arsênio	Se 78,96 selênio	Br 79,904 bromo	Kr 83,798 criptônio	
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	
Rb 85,468 rubídio	Sr 87,62 estrôncio	Y 88,906 ítio	Zr 91,224 zircônio	Nb 92,906 nióbio	Mo 95,94 molibdênio	Tc [98] tecnécio	Ru 101,07 rútenio	Rh 101,07 ródio	Pd 106,42 paládio	Ag 107,87 prata	Cd 112,41 cádmio	In 114,82 índio	Sn 118,71 estanho	Sb 121,76 antimônio	Te 127,60 telúrio	I 126,90 iodo	Xe 131,29 xenônio	
55	56	57 a 71		72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
Cs 132,91 césio	Ba 137,33 bário			Hf 178,49 hafnício	Ta 180,95 tântalo	W 183,84 tungstênio	Re 186,21 rênio	Os 190,23 osmio	Ir 192,22 íridio	Pt 195,08 platina	Au 196,97 ouro	Hg 200,59 mercúrio	Tl 204,38 talio	Pb 207,2 chumbo	Bi 208,98 bismuto	Po [209] polônio	At [210] astato	Rn [222] radônio
87	88	89 a 103		104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
Fr [223] frâncio	Ra [226] rádio			Rf [261] rúterfórdio	Db [262] dubnio	Sg [266] seabórgio	Bh [264] bohrio	Hs [265] hásio	Mt [268] meitnário	Ds [285] darmstádio	Rg [281] roentgênio	Cn [285] copernício	Nh [286] nihônio	Fl [289] fleróvio	Mc [288] moscóvio	Lv [293] livermório	Ts [294] tenessino	Og [294] oganessônio
89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103				104
La 138,91 lantaníio	Ce 140,12 cério	Pr 140,91 praseodímio	Nd 144,24 neodímio	Pm [145] promécio	Sm 150,36 samário	Eu 151,96 europio	Gd 157,25 gadolínio	Tb 158,93 terbio	Dy 162,50 disprócio	Ho 164,93 hólio	Er 167,26 érbio	Tm 168,93 túlio	Yb 173,05 ítrbio	Lu 174,97 lutécio				105
Ac [227] actínio	Th 232,04 tório	Pa 231,04 protactínio	U 238,03 urânio	Np [237] netúnio	Pu [244] plutônio	Am [243] américio	Cm [247] cúrio	Bk [247] berquílio	Cf [251] califórnio	Es [252] einstenício	Fm [257] fermío	Md [261] mendelévio	No [261] nobélio	Lr [260] lawrêncio				106

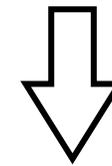


SI – Purificação

O oxigênio reage muito rápido com o SI, mesmo em temperatura ambiente, desta forma o primeiro processo para a purificação do SI consiste na remoção do silício oxidado (SiO_2). O quartzo bruto de SI é submetido a uma temperatura de $1460^{\circ}C$, em fornalhas com carbono, logo acima do ponto de fusão do SI ($1414^{\circ}C$).

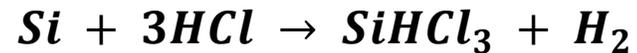


Nesta temperatura, o monóxido de carbono está em estado gasoso e pode ser facilmente separado do SI fundido. Entretanto, o SI bruto ainda está fortemente poluído. Cerca de 5% de impurezas, como, por exemplo, ferro, alumínio, fósforo e boro. Essas substâncias devem ser removidas em processos adicionais.



SI – Purificação

A próxima etapa de filtragem consiste no processo de Triclorossilano ($SiHCl_3$). O SI bruto e o HCL reagem a uma temperatura de $300^{\circ}C$, resultando em:

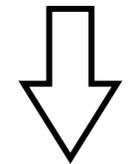


Em altas temperaturas os contaminantes que reagiram com o cloro passam para o estado gasoso. Somente carbono, fósforo e boro, que possuem temperaturas de condensação semelhantes, não podem ser filtrados neste processo.

O processo de Triclorossilano pode ser revertido, o silício purificado condensa na forma de policristalina. Isto é feito aproximadamente a $1100^{\circ}C$, adicionando hidrogênio dentro de uma câmara de quartzo, em que são colocadas as finas hastes de silício:



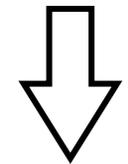
O silício reflete sobre as hastes de silício que crescem para barras com um diâmetro superior a 300 mm. Este processo já poderia ser transformado em um único cristal usando o processo Czochralski, no entanto, o grau de pureza para a fabricação de semicondutores ainda não é suficientemente alto.



SI – Purificação

Para garantir o maior índice possível de pureza, as barras de SI passam mais um processo de purificação. Nesta etapa as barras são envolvidas por uma bobina, submetidas a um alto fluxo de cargas. O efeito Joule, faz com que as barras de SI passem para a fase líquida. Por possuírem um maior grau de solubilidades, os contaminantes restantes se acumulam na base da haste. A tensão superficial do SI evita que ele flua. Por fim a base é removida. Todos os processos são realizados no vácuo.

Ao final do processo o SI alcança um grau de pureza de 99,9999999%, o que significa que restará 1 átomo de contaminante para cada 1 bilhão de átomos de SI.



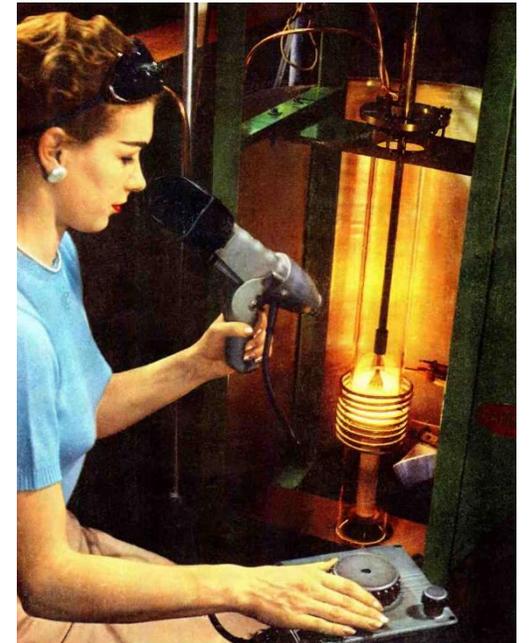
SI – Processo Czochralski

O SI policristalino já purificado é derretido a uma temperatura logo acima da temperatura de fusão. Nesta etapa do do processe podem ser adicionados os dopantes, por exemplo o boro ou fósforo.

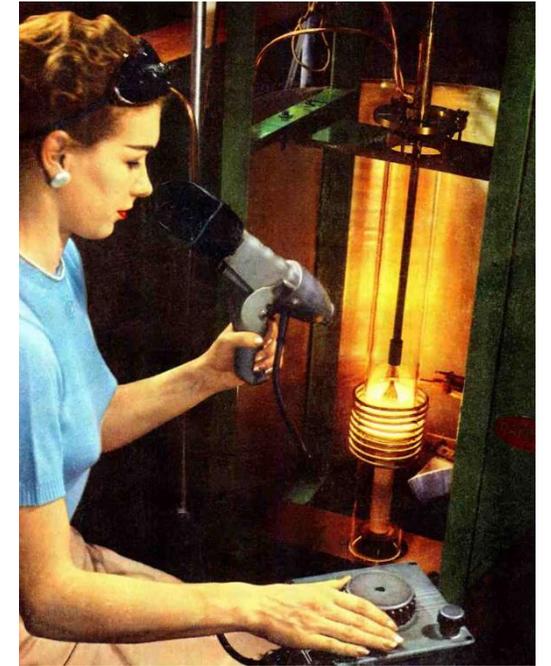
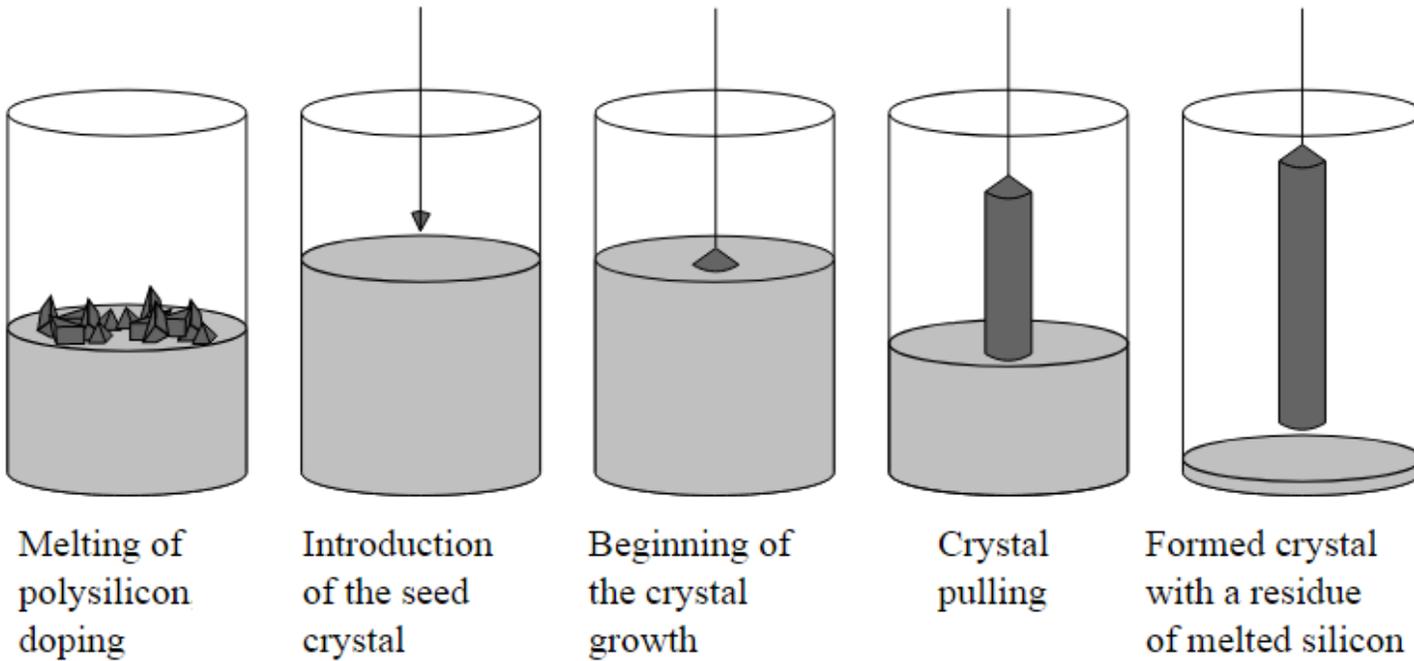
Um cristal de SI (semente), com elevadíssimo grau de pureza e estrutura molecular organizada é colocado na superfície do SI fundido em uma haste rotativa. O semiconductor se deposita neste cristal seguindo a estrutura molecular da semente, como o SI é fundido a uma temperatura ligeiramente superior ao ponto de fusão, o SI solidifica imediatamente sobre a semente.

A semente é puxada a uma rotação constante. O diâmetro do cristal formado é proporcional a velocidade de remoção da semente, algo em torno de 2 a 25cm/h

Este não é o único processo na manufatura de SI, atualmente existem processos que garantem um controle muito mais preciso para o deposito de agentes dopantes. ** Este processo foi tratado de forma ilustrativa, as etapas não foram precisamente detalhadas.



SI – Processo Czochralski



<https://www.youtube.com/watch?v=F2KcZGwntgg> - How Microchips are made

<https://www.youtube.com/watch?v=qfdIMZ09KaA> - Microchip manufacturing plant

https://www.youtube.com/watch?v=ar7xDMR4P_U - PN Junction

As propriedades elétricas dos materiais semicondutores podem ser modificadas pela adição de impurezas, esse processo é conhecido por **DOPAGEM**.

Tais impurezas são átomos **trivalentes** ou **pentavalentes**, os quais alteram o equilíbrio de cargas dos semicondutores, aumentando a condutividade dos mesmos

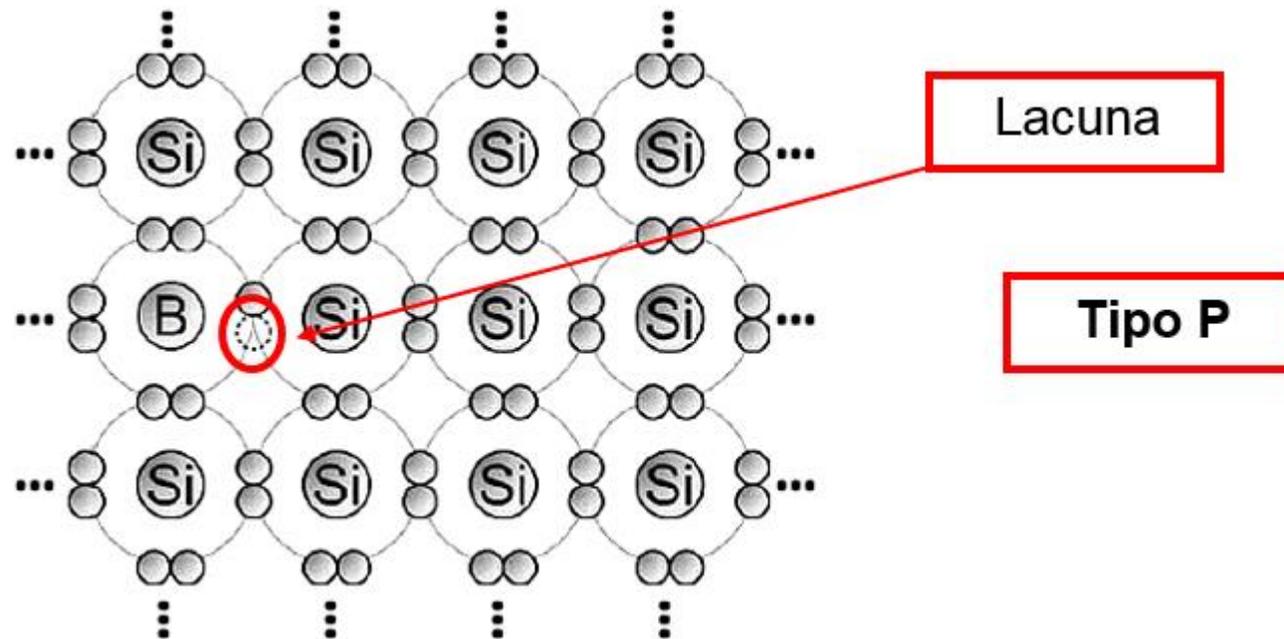
A adição de átomos trivalentes ou pentavalentes em cristais semicondutores intrínsecos tetravalentes, resulta em um cristal com excessos ou lacunas de elétrons.

Pentavalentes	Trivalentes
Arsênio	Boro
Fósforo	Alumínio
...	...

- Semicondutor intrínseco, razão de impureza = $1: 10^9$ (1ppb uma parte por bilhão)
- Semicondutor extrínseco, razão de impureza = $1: 10^6$ (1ppm uma parte por milhão)

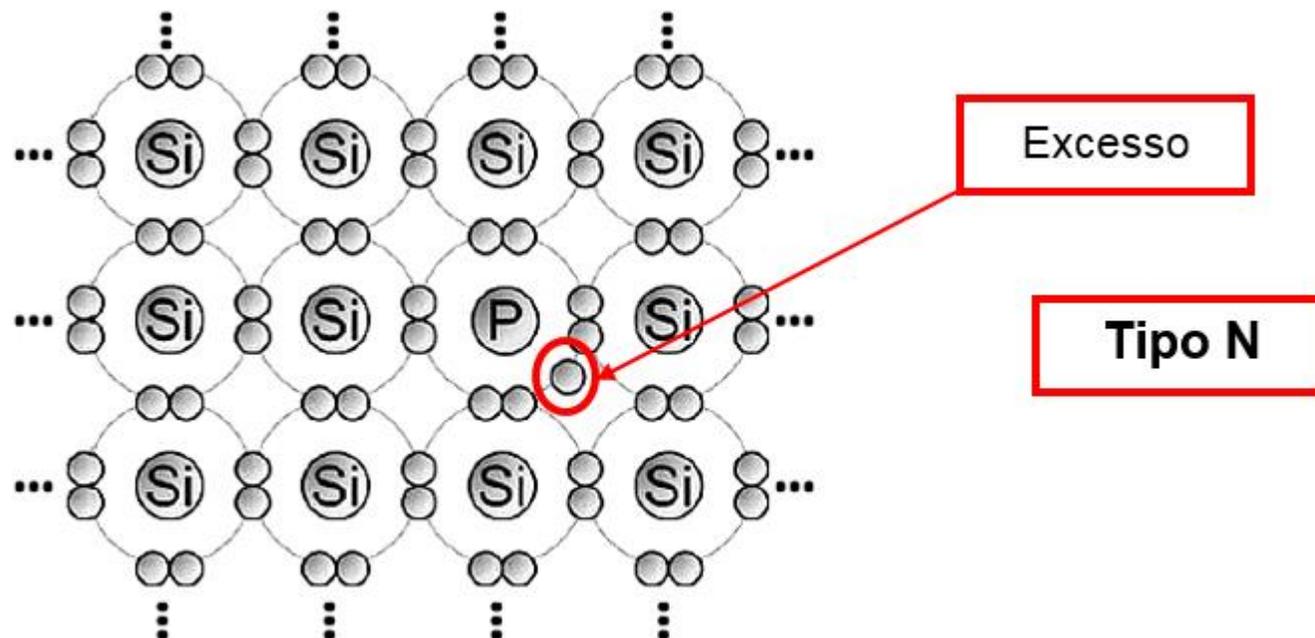
Semicondutor extrínseco do tipo P

Dopar um cristal semiconductor intrínseco com uma impureza trivalente (**Boro**) **desequilibra positivamente** as cargas de elétricas do cristal semiconductor, ou seja, a ausência de um elétron esperado em uma ligação covalente (lacuna). Como o elétron possui carga negativa, esse semiconductor está **dopado positivamente (Tipo P)**



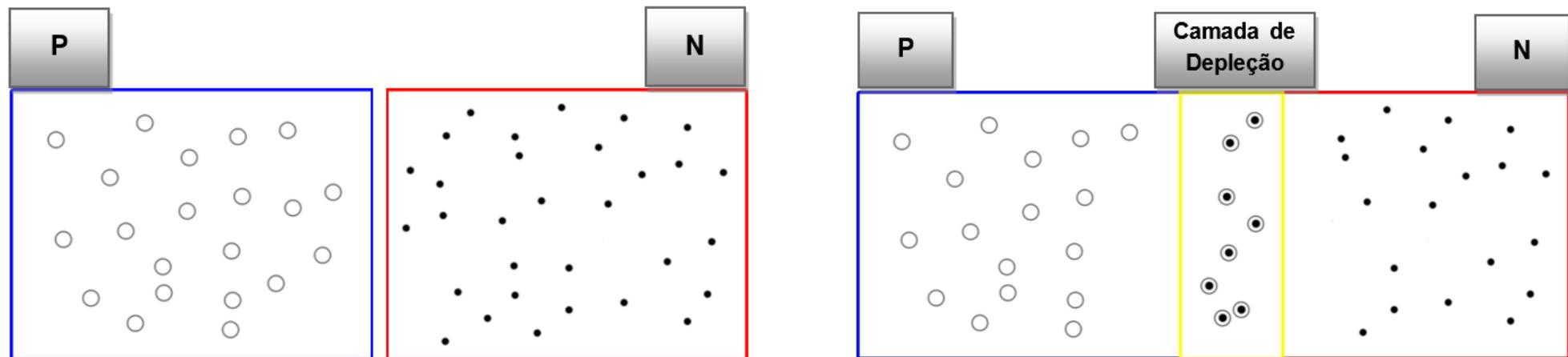
Semicondutor extrínseco do tipo N

Dopar um cristal semiconductor intrínseco com uma impureza pentavalente (**Fósforo**) **desequilibra negativamente** as cargas de elétricas do cristal semiconductor, levando a um excesso de elétrons (elétron livre). Esse semiconductor está **dopado negativamente (Tipo N)**.



Junção PN

Ao acoplar semicondutores extrínsecos do tipo P e do tipo N, criamos a junção PN, atribuída aos diodos. Imediatamente a esta "união" é formada uma camada de depleção. Os elétrons livres da região do semicondutor do tipo N que está em contato com a região do semicondutor do tipo P são atraídos pelas "lacunas elétricas" do semicondutor do tipo P, entretanto esse equilíbrio é observado apenas na porção próxima a junção.

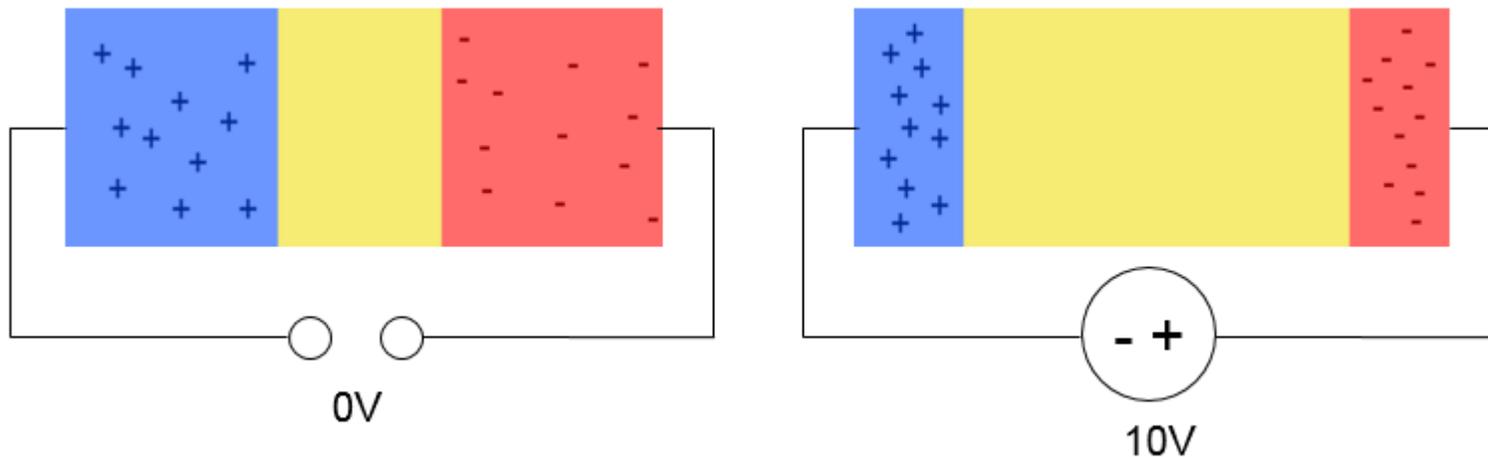


Podemos observar o comportamento característico da Junção PN através da **polarização reversa** e da **polarização direta**.

Polarização da Junção PN

Polarização reversa

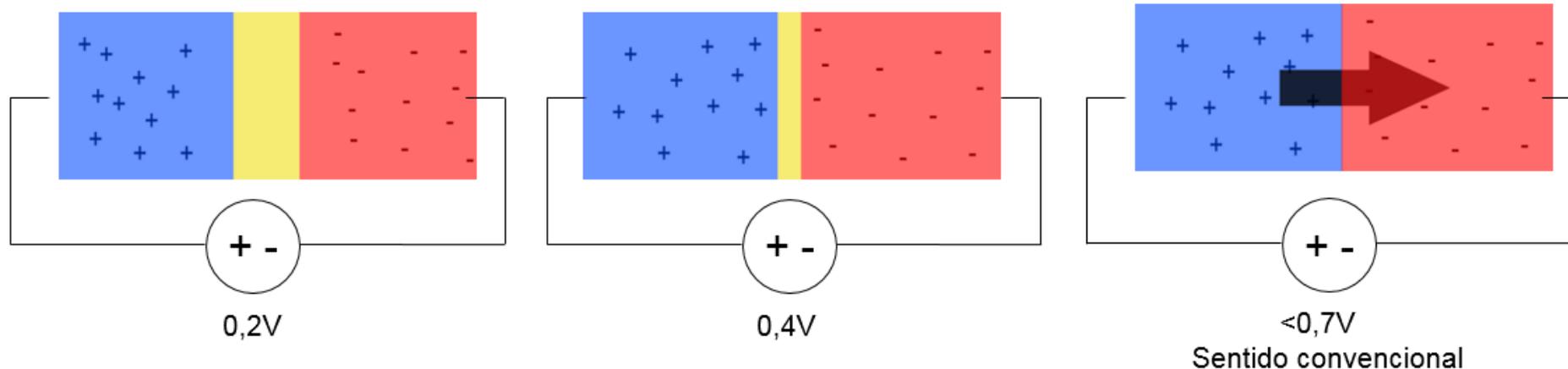
Se um potencial externo é aplicado através da junção PN em que o terminal negativo é conectado ao material do tipo P e o positivo ao material do tipo N, a região de depleção será abruptamente acentuada, uma vez que cargas opostas se atraem. Com essa configuração cria-se uma barreira ocasionando no bloqueio da corrente elétrica.



Polarização da Junção PN

Polarização direta

Se a tensão da fonte geradora for maior que a tensão interna da junção (varia de acordo com o semicondutor), os portadores livres se repelirão a barreira depletores, em função da polaridade da fonte geradora, e ultrapassar a junção P-N, permitindo a passagem de corrente elétrica.

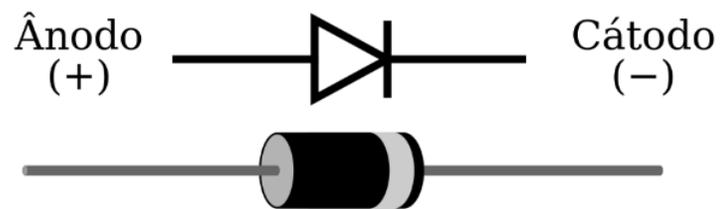


O exemplo acima ilustra didaticamente o comportamento de um semicondutor de Si. A passagem de cargas não ocorre de forma abrupta quando a tensão ultrapassa 0.7V, entretanto a passagem de cargas sobe exponencialmente a partir da tensão de aproximadamente 0.7V. A análise da resposta do diodo irá detalhar o comportamento.

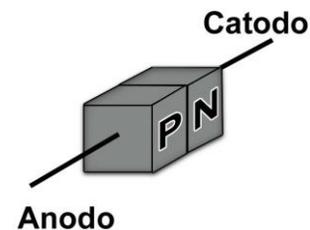
O diodo semicondutor é o componente eletrônico formado pela junção PN de cristais semicondutores de Ge ou Si

A queda de tensão do diodo de Germânio é de aproximadamente 0,3V, enquanto da do diodo de Silício é de aproximadamente 0,7V

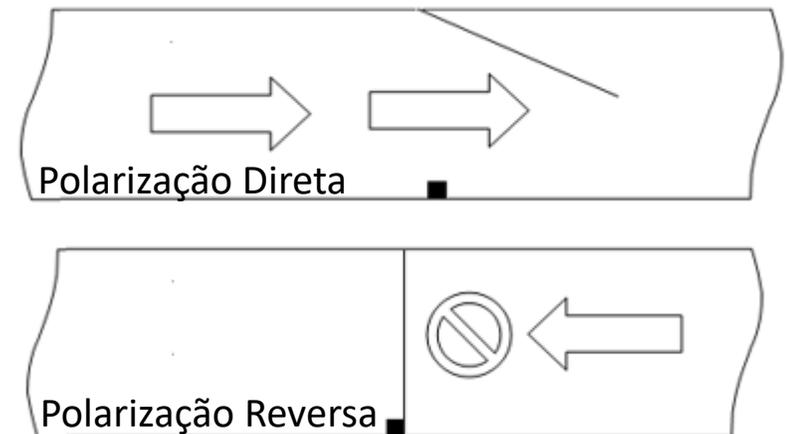
Símbolo/Componente



Junção PN

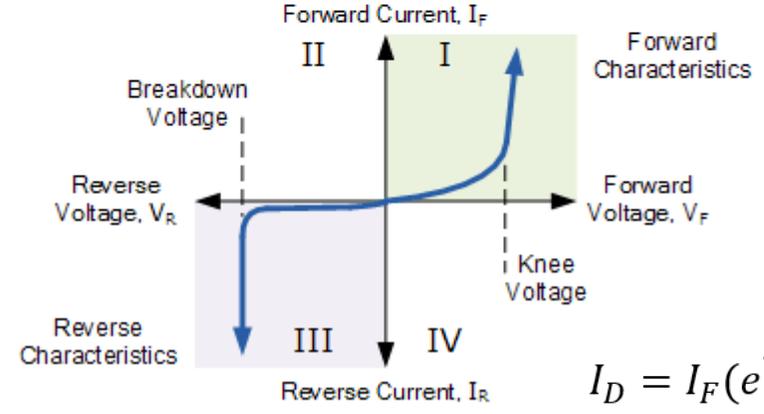
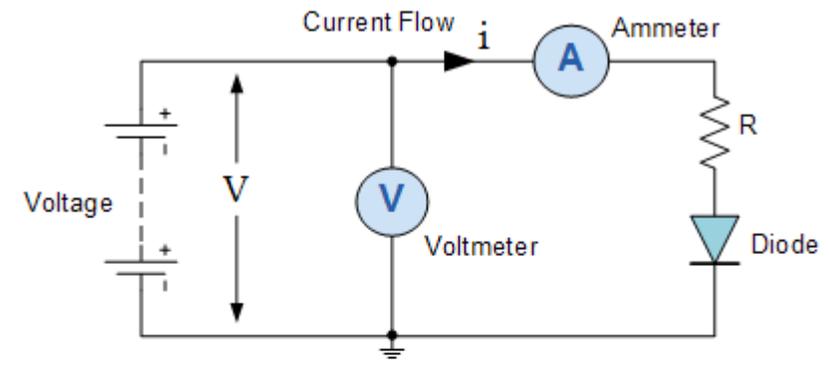
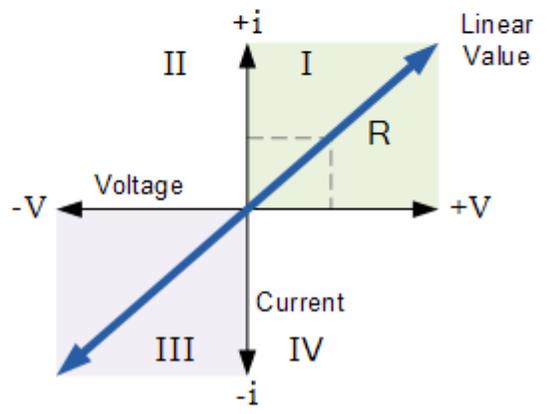
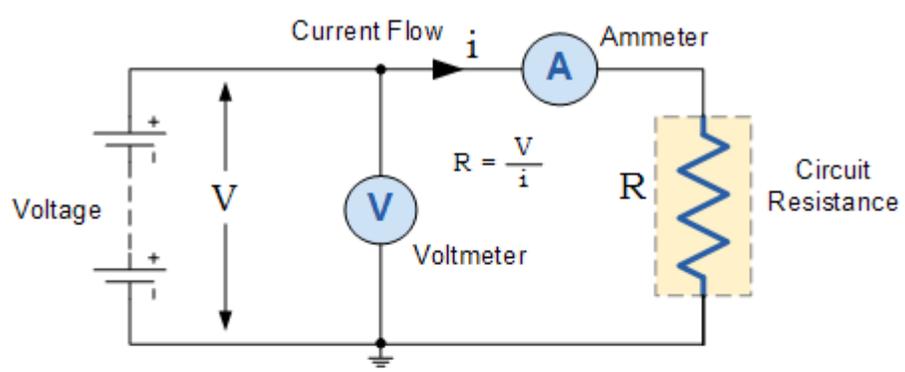


Analogia do comportamento



Diodo x Resistor

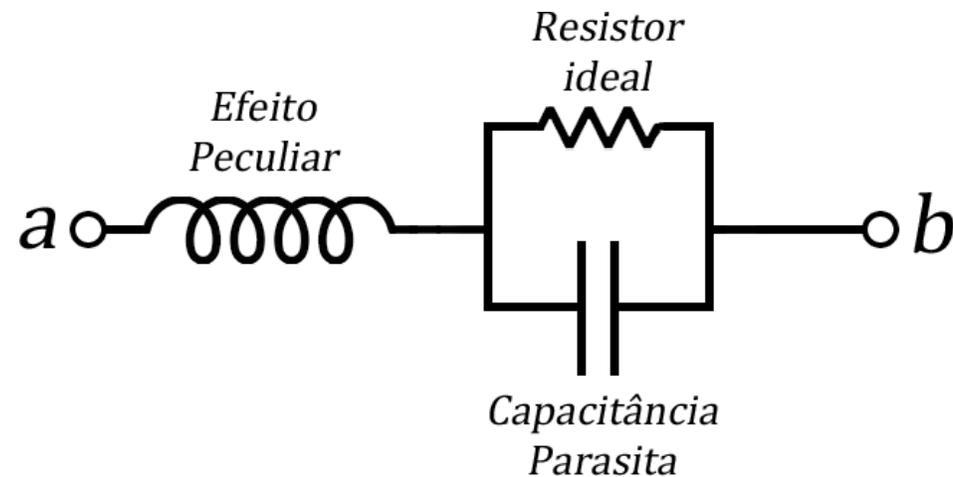
Abaixo as curvas características (tensão x corrente) de um resistor (comportamento ôhmico) e um diodo (comportamento não ôhmico)



$$I_D = I_F \left(e^{\frac{K \cdot V_D}{T_K}} - 1 \right)$$

Aproximações

Quando trabalhamos com formulações matemáticas de circuitos, utilizamos diversos graus de aproximação. Cada qual depende diretamente das características dos sistemas onde os circuitos serão aplicados (frequência, potência, efeitos de campo, entre outras). Um simples resistor pode ser utilizado como exemplo. Existe uma diferença entre a modelagem de um resistor e o componente físico resistor. Na grande maioria dos casos, utilizamos a aproximação ideal de um resistor, ou seja, o comportamento ôhmico puro, porém existem aproximações mais realistas, figura abaixo. O resistor, além de sua tolerância e potência de trabalho, possui em escala muito reduzida, propriedades capacitivas e indutivas. Nas aplicações vistas até o momento estas propriedades podem ser desprezadas sem influenciar a resposta dos circuitos. Para os diodos iremos estudar 3 graus de aproximação.

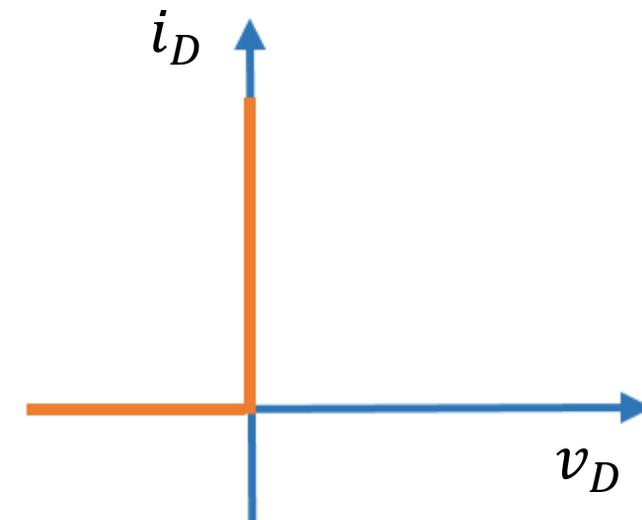
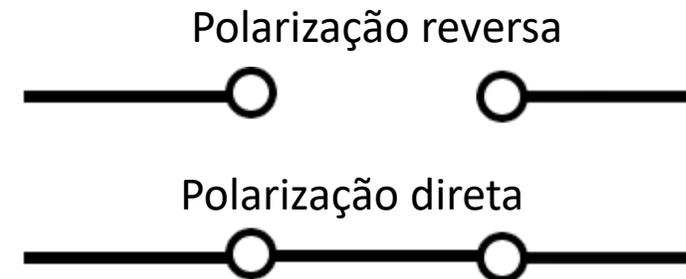
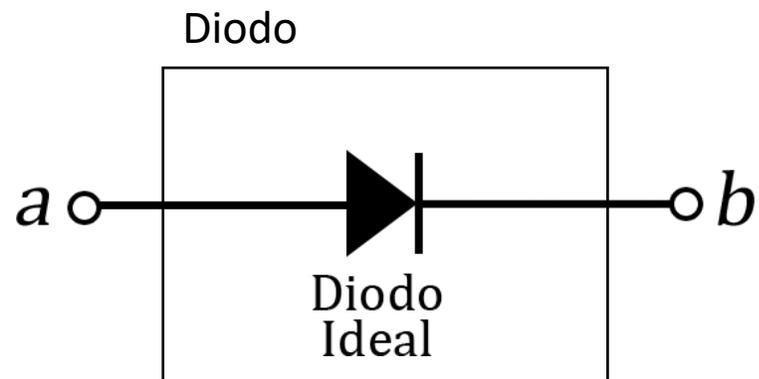


A primeira aproximação considera apenas a propriedade do diodo que limita o fluxo de corrente em apenas 1 sentido.

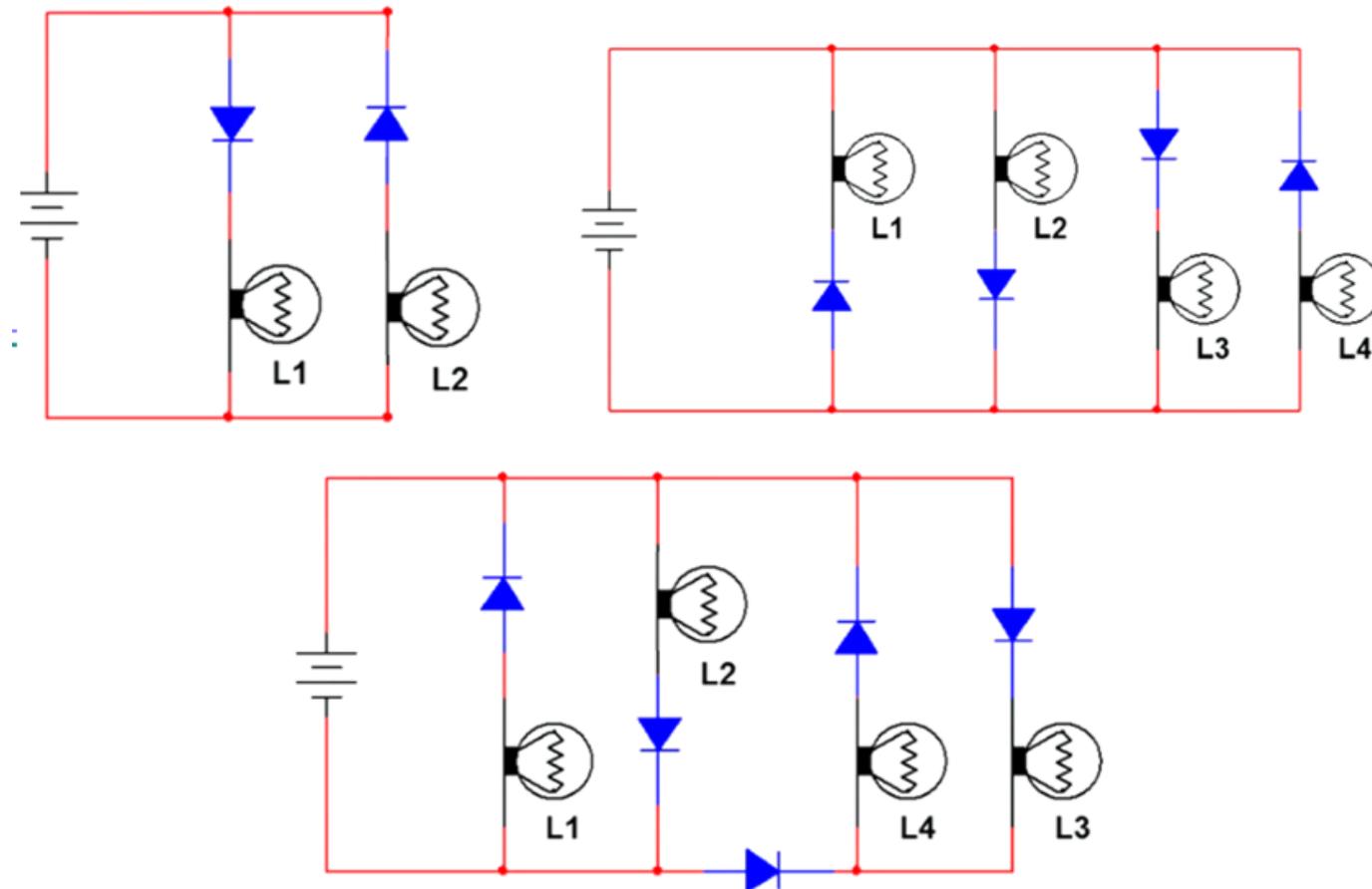
Modelo de diodo ideal:

Polarização reversa: não há fluxo de cargas

Polarização direta: fluxo máximo de cargas

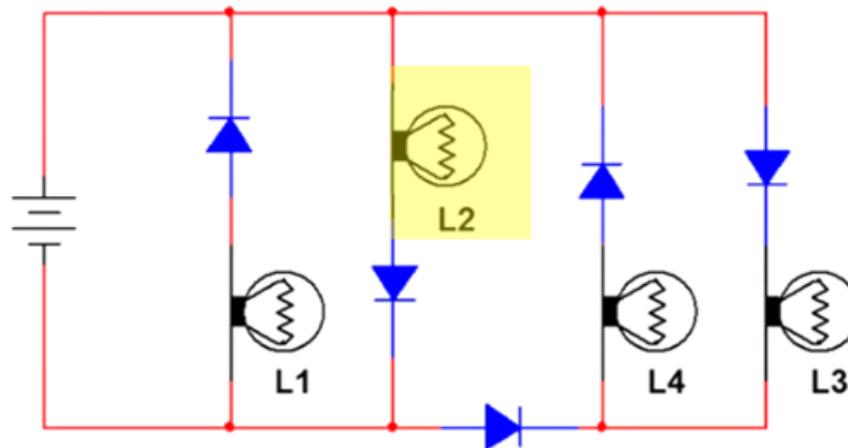
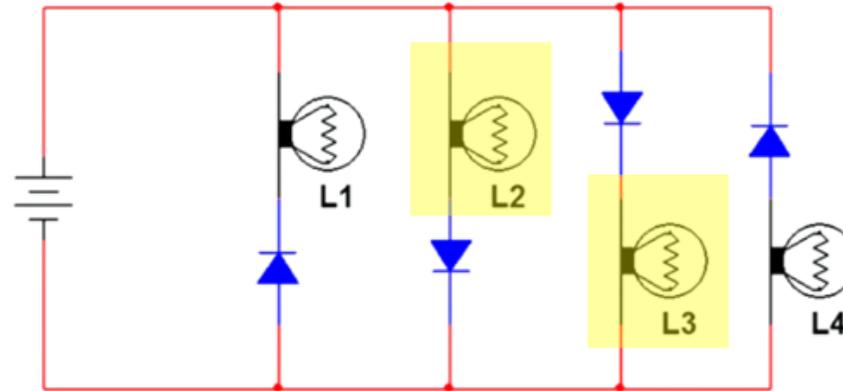
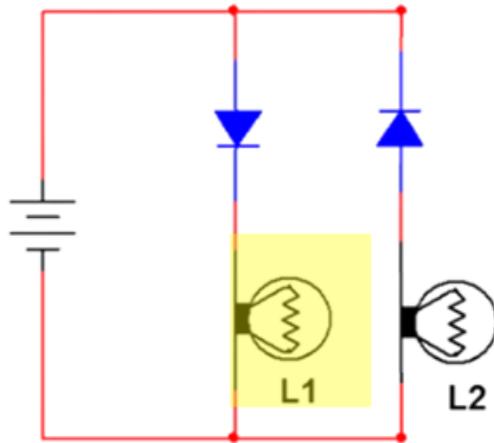


Exercício: Considerando a primeira aproximação, determine quais lâmpadas irão acender



Diodo ideal

Exercício: Considerando a primeira aproximação, determine quais lâmpadas irão acender

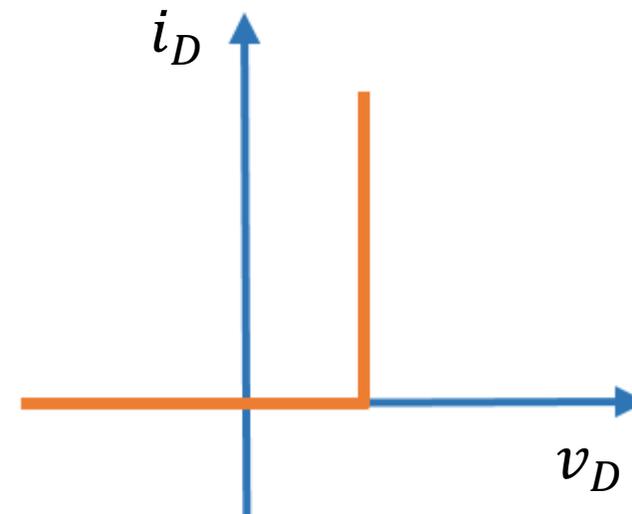
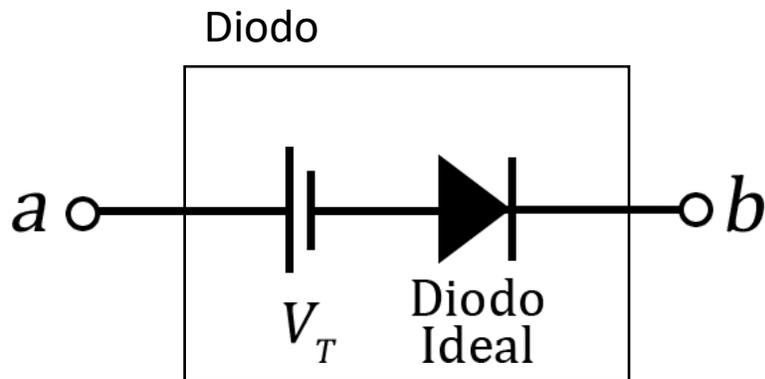


Diodo Simplificado

A segunda aproximação considera além do comportamento ideal do diodo, o potencial da camada de depleção do diodo. **Para Si 0,7V e para Ge 0,3V**

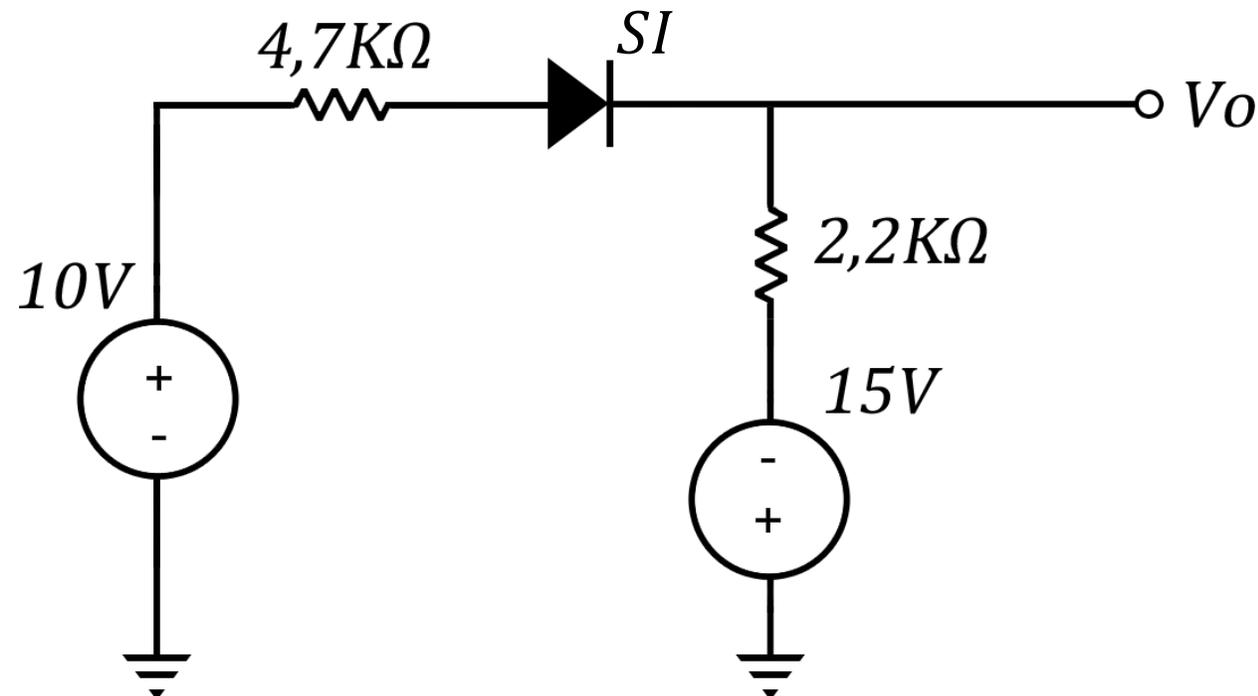
Modelo de diodo simplificado:

Há fluxo de cargas apenas quando o diodo está polarizado diretamente e a tensão da fonte geradora é capaz de superar o potencial da camada de depleção



Diodo Simplificado

Exercício: Considerando o modelo simplificado do diodo, calcule V_o .



Diodo Simplificado

Exercício: Considerando o modelo simplificado do diodo, calcule V_o

$$\frac{V_o + 15}{2,2 \cdot 10^3} + \frac{V_o + 0,7 - 10}{4,7 \cdot 10^3} = 0$$

$$V_o \left(\frac{1}{2,2 \cdot 10^3} + \frac{1}{4,7 \cdot 10^3} \right) = \frac{10 - 0,7}{4,7 \cdot 10^3} - \frac{15}{2,2 \cdot 10^3}$$

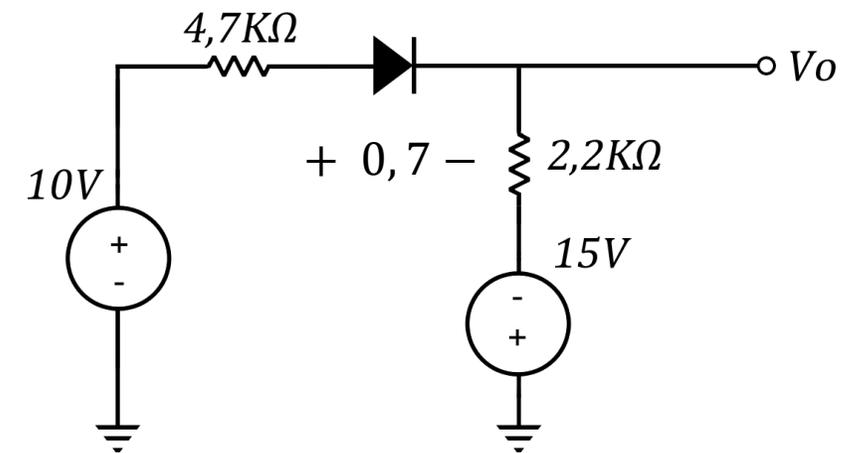
$$V_o = -7,25V$$

OU

$$-10 + i \cdot 4,7 \cdot 10^3 + 0,7 + i \cdot 2,2 \cdot 10^3 - 15 = 0$$

$$i = 3,53mA$$

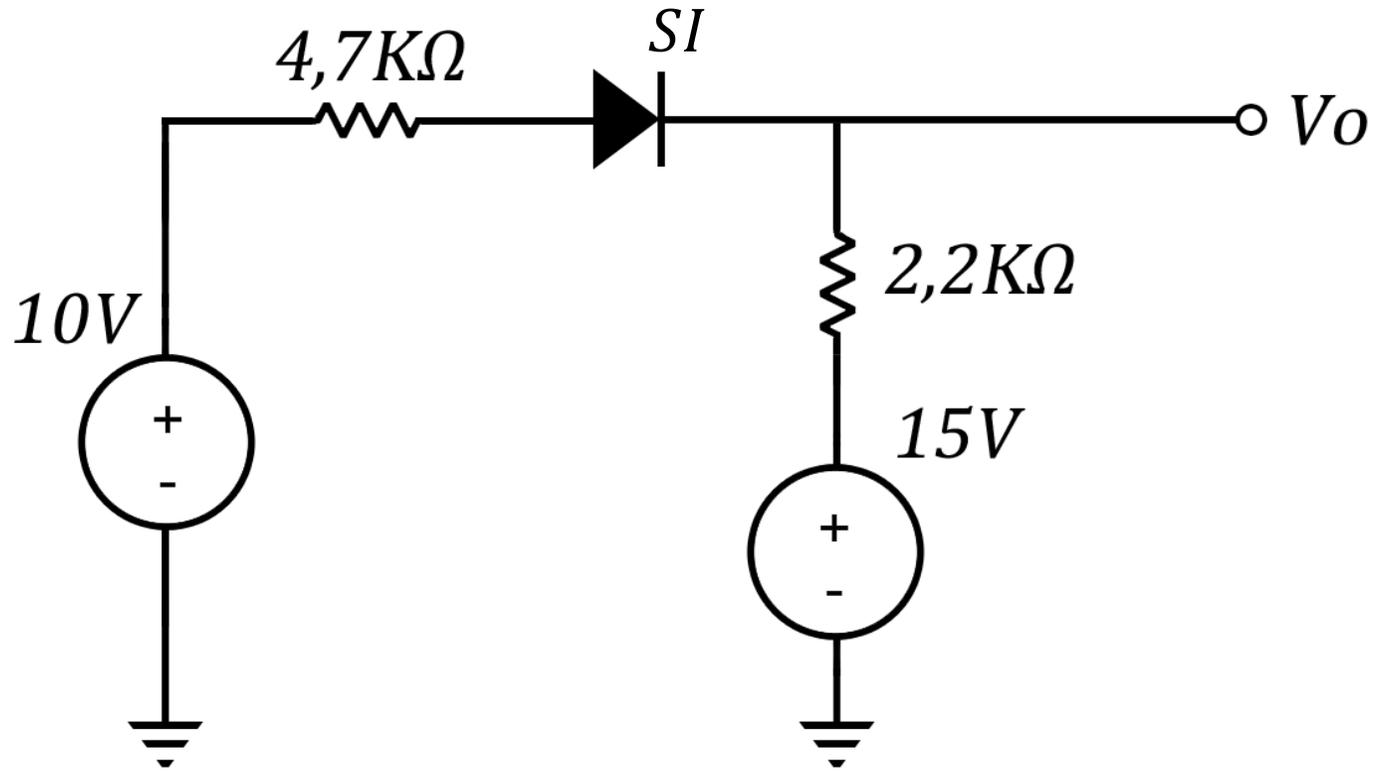
$$V_o = 3,53 \cdot 10^{-3} \cdot 2,2 \cdot 10^3 - 15 = -7,25V$$



Pelo segundo método é mais fácil visualizar que a polarização do diodo é direta, portanto há fluxo de corrente, assim: $V_o = -7,25V$

Diodo Simplificado

Exercício: Considerando o modelo simplificado do diodo, calcule V_o



Diodo Simplificado

Exercício: Considerando o modelo simplificado do diodo, calcule V_o

$$\frac{V_o - 15}{2,2 \cdot 10^3} + \frac{V_o + 0,7 - 10}{4,7 \cdot 10^3} = 0$$

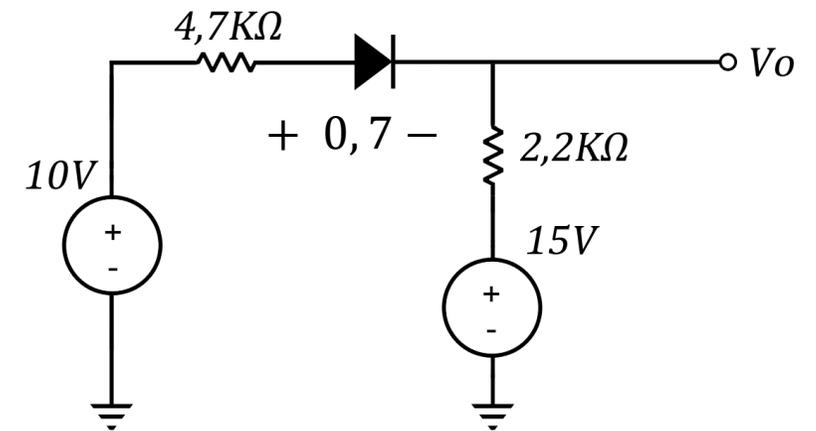
$$V_o \left(\frac{1}{2,2 \cdot 10^3} + \frac{1}{4,7 \cdot 10^3} \right) = \frac{10 - 0,7}{4,7 \cdot 10^3} + \frac{15}{2,2 \cdot 10^3}$$

$$V_o = 13,18V \rightarrow \textit{impossível}$$

OU

$$-10 + i \cdot 4,7 \cdot 10^3 + 0,7 + i \cdot 2,2 \cdot 10^3 + 15 = 0$$

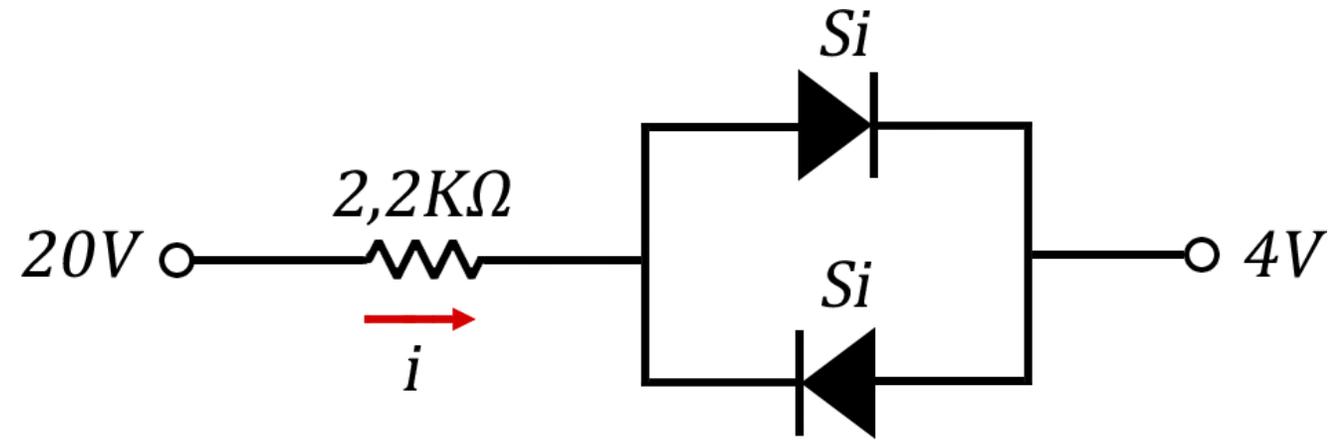
$$i = -0,826mA$$



Como temos um valor de corrente negativo, temos uma polarização inversa, portanto: $V_o = 15V$

Diodo Simplificado

Exercício: Considerando o modelo simplificado do diodo, calcule i

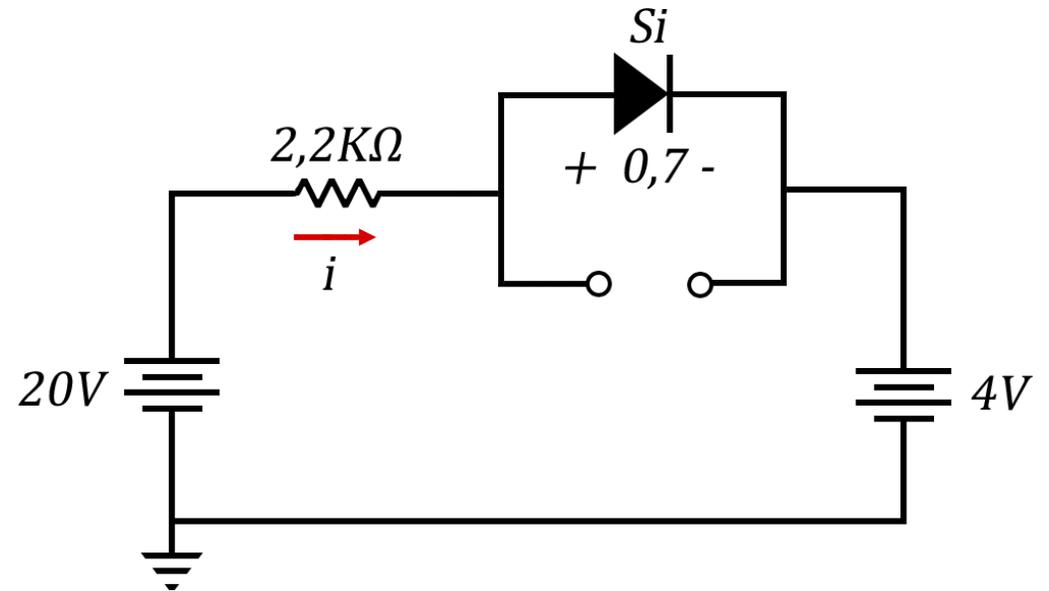


Diodo Simplificado

Exercício: Considerando o modelo simplificado do diodo, calcule i

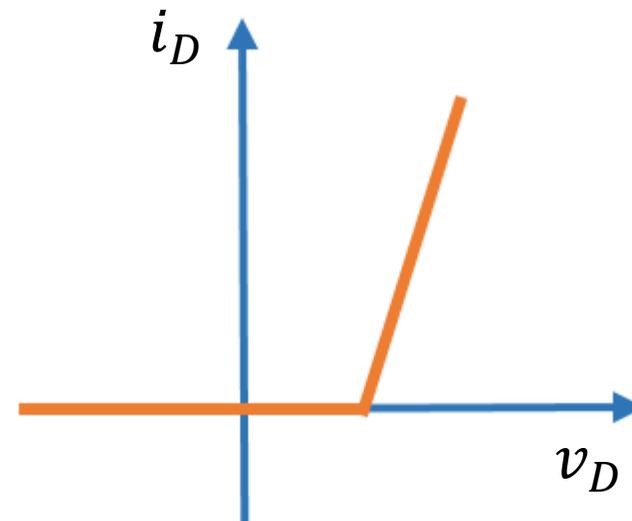
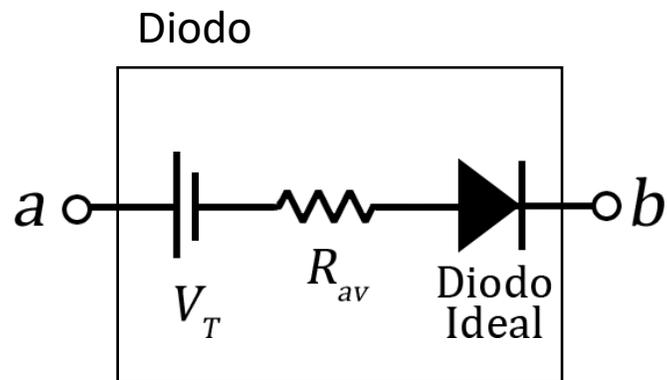
$$-20 + i \cdot 2200 + 0,7 + 4 = 0$$

$$i = 6,95mA$$



A terceira aproximação, consiste em determinar um intervalo na curva de resposta tensão x corrente do diodo para que a tensão aumente linearmente em relação a corrente. Esta aproximação é pouco utilizada, salvo em situações onde a corrente do circuito é muito baixa. Para calcular a resistência anexada ao modelo é necessário analisarmos as características do diodo.

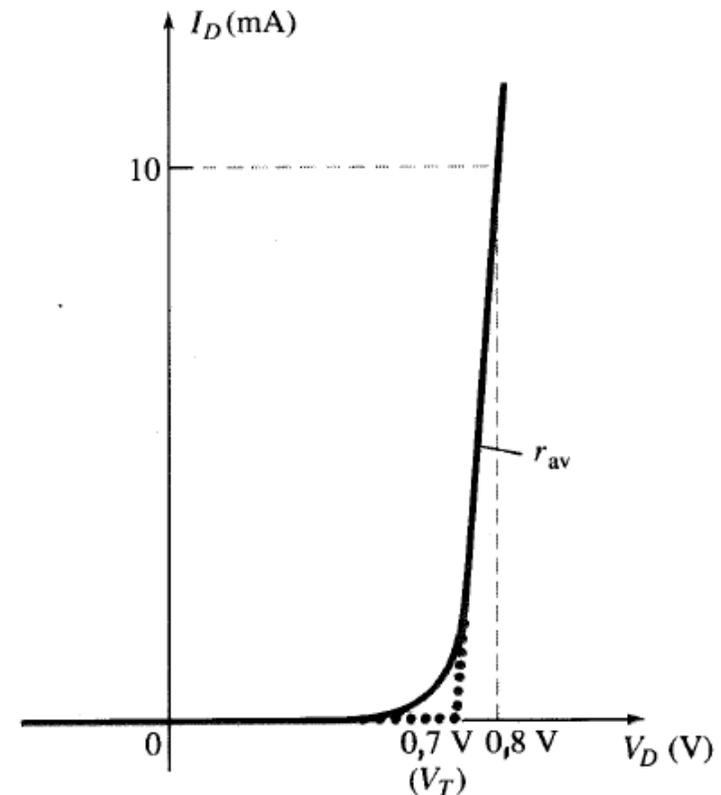
$$R_{av} = \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d}$$



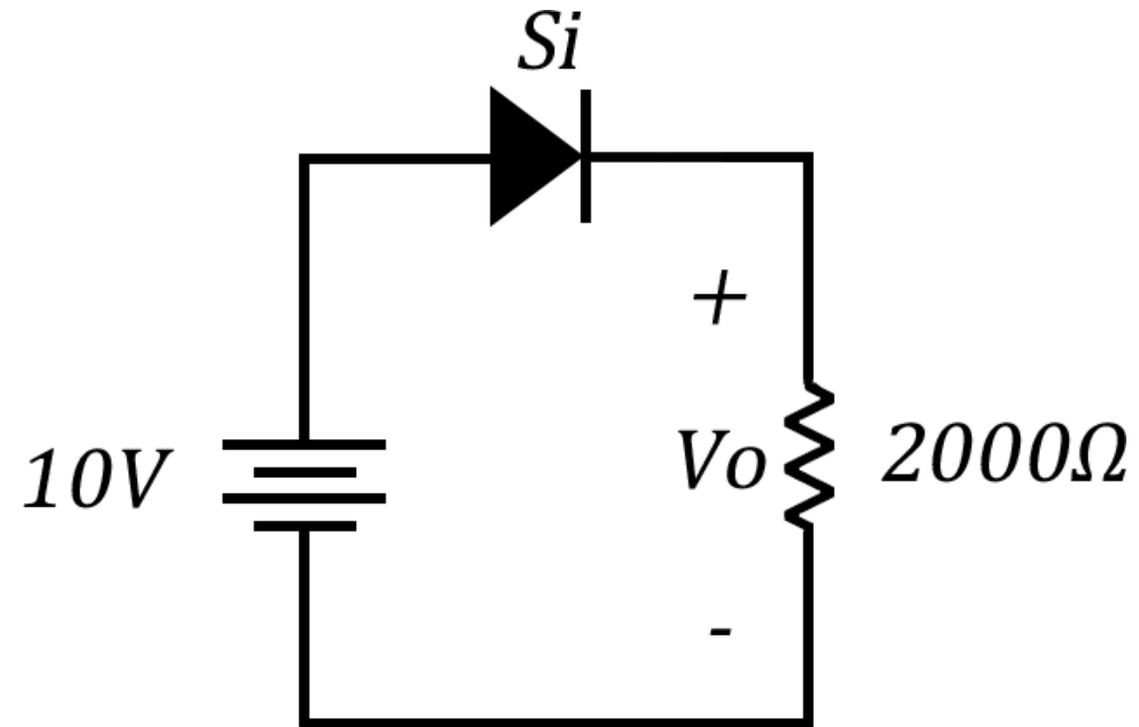
Para obtermos uma melhor aproximação entre o intervalo de 0 a 10mA, podemos adicionar um resistor ao modelo do diodo.

Com os dados obtidos no datasheet, ou analisando a resposta do diodo, concluímos que para uma queda de tensão de 0,7 a corrente se aproxima de zero e para uma queda de tensão de 0,8V a corrente que flui se aproxima de 10mA. Assim:

$$R_{av} = \frac{0,8 - 0,7}{10 \cdot 10^{-3} - 0} = 10\Omega$$

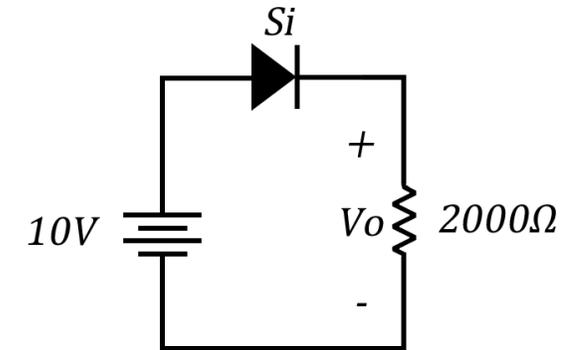


Exercício: Compare os 3 modelos de diodo para calcular V_o



Diodo Linear

Exercício: Compare os 3 modelos de diodo para calcular V_o



Modelo Ideal:	Modelo simplificado	Modelo Linear
$V_o = 10V$	$V_o = 9,3V$	$I_d = \frac{10}{2000} = 0,005A \text{ (OK)}$ $i = \frac{10 - 0,7}{2000 + 10} = 4,63mA$ $v_o = 4,63m \cdot 2000 = 9,25V$