

Díodos e aplicações

Física e modelos do díodo de **junção p-n**.

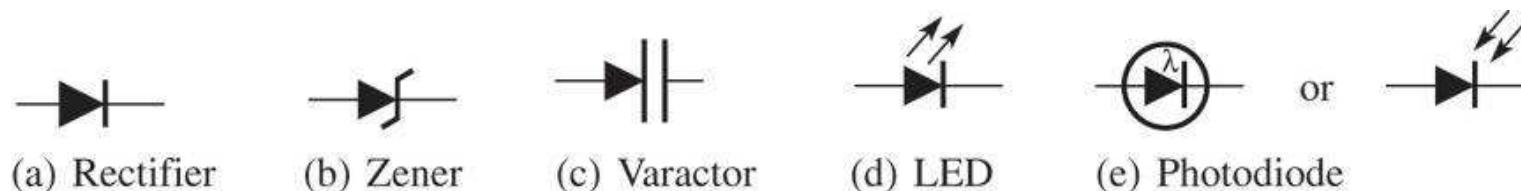
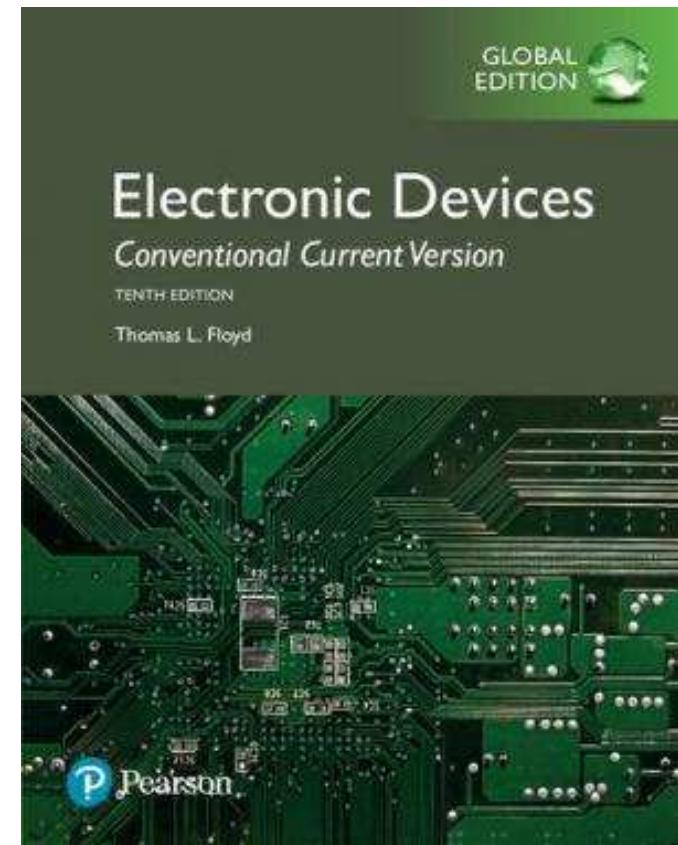
Circuitos com díodos:

- Retificadores;

Díodo de Zener.

Reguladores de tensão com Zener.

Díodo emissores de luz (LED).



JF

As figuras apresentadas nestes slides são, na sua maioria, retiradas do manual *Electronics Fundamentals: Circuits, Devices & Applications*, By Thomas L Floyd, David Buchla Pearson New International Edition (8e) – ver bibliografia.

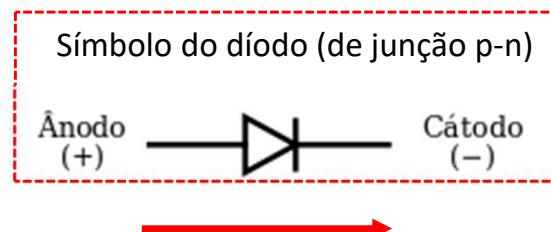
Física Experimental (LEI)

2023-2024 - 1.º Semestre

Díodos e aplicações

O díodo de junção é um elemento básico para quase todos os dispositivos semicondutores que usam uma junção P-N.^[1]

Embora num sentido mais geral, o termo díodo possa representar qualquer componente que tenha dois terminais (Do grego *di*, por *dís*, «duas; duas vezes» + *hodós*, «via»), genericamente, e no contexto de circuitos e eletrónica, um díodo (semicondutor) é um elemento ou componente semicondutor (geralmente implementado em silício ou germânio, ou em ligas semicondutoras no caso dos LEDs) com contactos óhmicos em cada uma das suas extremidades (**ânodo** e **cátodo**), que permite a passagem de corrente apenas num sentido quando a diferença de potencial (ddp) entre o ânodo e o cátodo é positiva, i.e., só há passagem de corrente quando o terminal ânodo está a um potencial superior ao cátodo; a diferença de potencial de “condução” depende do material de que é feito o díodo.



Só deixa passar corrente neste sentido

Com díodos pode-se retificar corrente, isto é obter corrente continua (corrente só num sentido) a partir de corrente alternada; pode-se também obter conversores de energia elétrica em energia luminosa (LEDs e díodos laser), converter energia luminosa em energia elétrica (fotodetectores/foto-díodos e células solares – células fotovoltaicas)

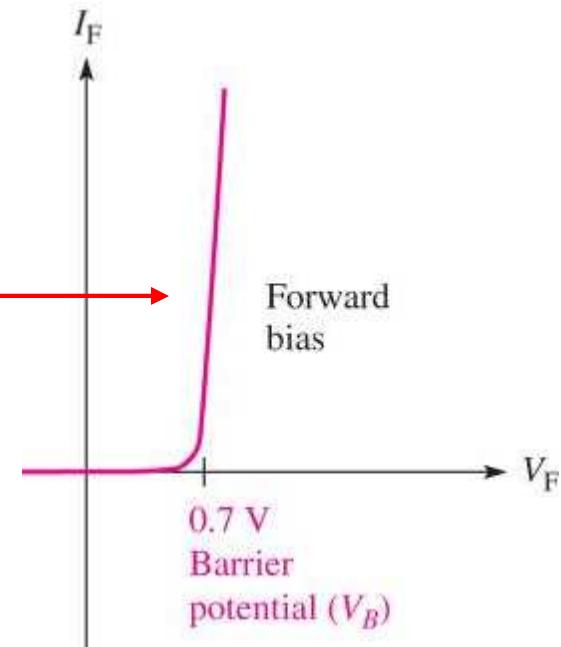
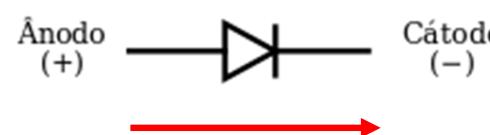
Elementos e circuitos não-lineares

Até agora foram estudados circuitos com **elementos lineares** (e.g., fontes de tensão e de corrente, resistências, condensadores, bobinas). Entre os circuitos lineares contam-se, por exemplo, circuitos divisores de tensão e divisores de corrente, circuitos RC integradores e diferenciadores, filtros RC.

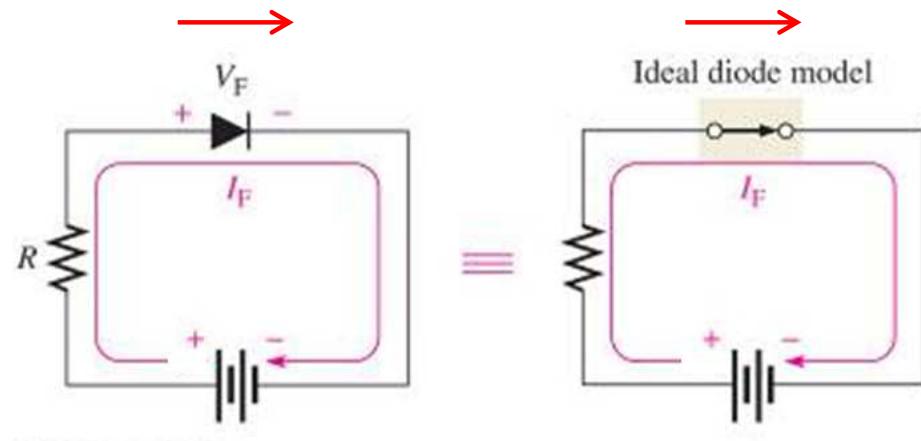
Contudo, há várias funções que só podem ser desempenhadas por **elementos/circuitos não-lineares**. Um dos exemplos clássicos é a geração de uma corrente direta (contínua) a partir de uma corrente alternada, bem como de outras formas de onda de tensão e de corrente. O elemento **não-linear** mais comum, e fundamental, de um circuito não-linear é o **díodo semicondutor**, baseados numa “junção” entre materiais semicondutores com propriedades distintas, designada junção p-n.

Tal como uma resistência, o díodo tem dois terminais. Porém, e ao contrário de uma resistência que apresenta uma relação/característica corrente-tensão linear, o **díodo apresenta uma característica I-V não-linear**: a característica tensão-corrente de um díodo é **exponencial**.

Como veremos mais tarde, os circuitos digitais são implementados com elementos não-lineares (essencialmente díodos e, principalmente, transístores).

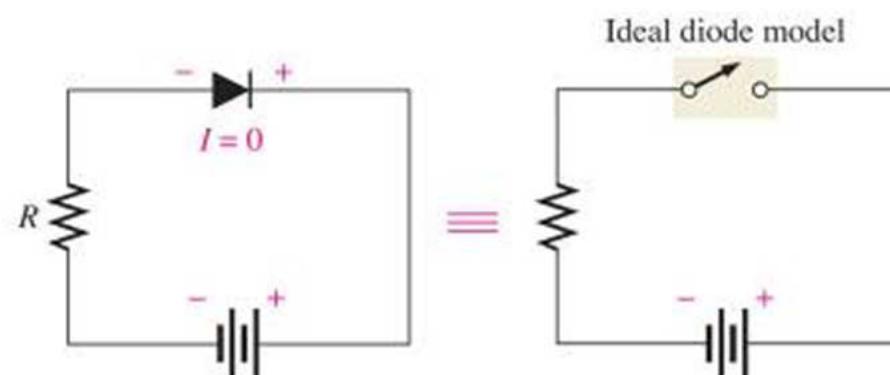


Modelo do díodo ideal: o díodo como interruptor

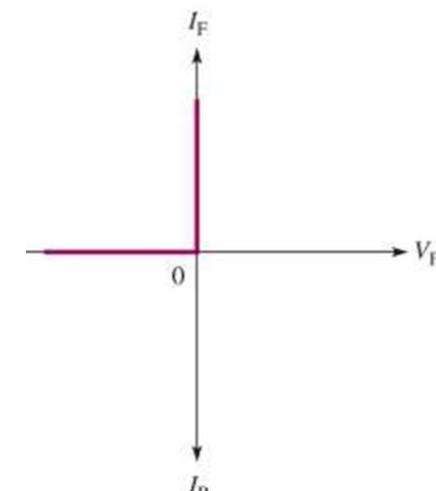


Num díodo ideal a corrente apenas pode ter o sentido do ânodo para o cátodo, e quando está em condução a diferença de potencial aos seus terminais (i.e. a ddp entre o ânodo e o cátodo) é zero – quando em condução um díodo ideal comporta-se como um curto-círcito.

Se a ddp entre o ânodo e o cátodo for menor que zero (e pode tomar qualquer valor menor que zero), o díodo ideal não permite a passagem de corrente, comportando-se como um circuito aberto.



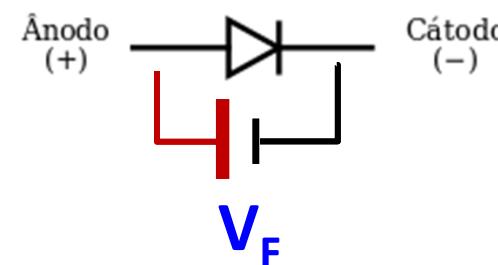
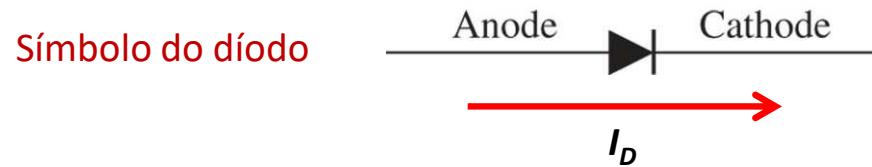
Característica corrente-tensão de um díodo ideal



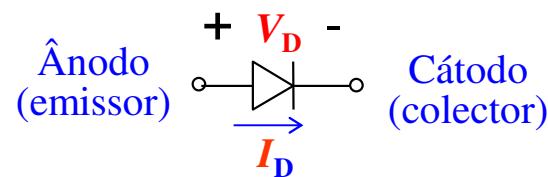
(c) Ideal V - I characteristic curve (red)

Modelo do díodo ideal: o díodo como interruptor

Na análise de circuitos com diodos podem-se considerar vários graus de aproximação ao comportamento do diodo real. Numa primeira abordagem, pode-se considerar o modelo do diodo ideal; para maior aproximação à realidade pode-se considerar, de seguida, o modelo do diodo ideal em série com uma bateria (que representa a queda de tensão do diodo quando em franca condução, e que depende “apenas” do material de que é feito o diodo); pode também incluir-se, para mais rigor, a resistência diferencial do diodo; por fim pode considerar-se o modelo gráfico: trança-se a reta de carga do circuito e a curva I-V do real do diodo. O ponto de interceção da reta de carga com a característica do diodo dá-nos o ponto de funcionamento do diodo, isto é, a corrente que o percorre e a tensão aos seus terminais.



Modelo do diodo IDEAL

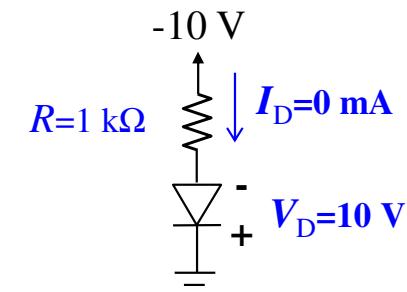
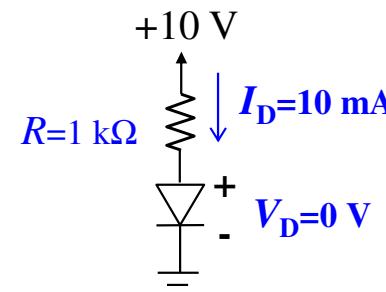
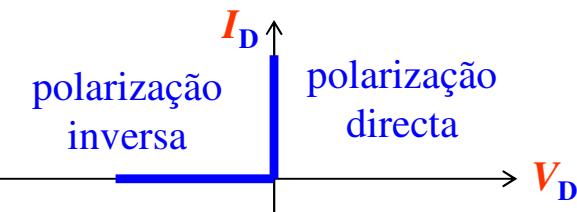


resistência
muito pequena (na prática = zero)

$$I_D > 0, V_D = 0:$$

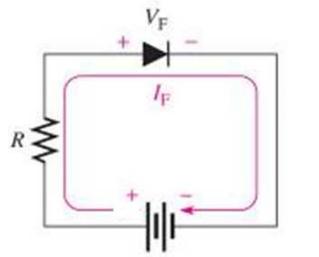
resistência
muito elevada (infinita)

$$V_D < 0, I_D = 0:$$

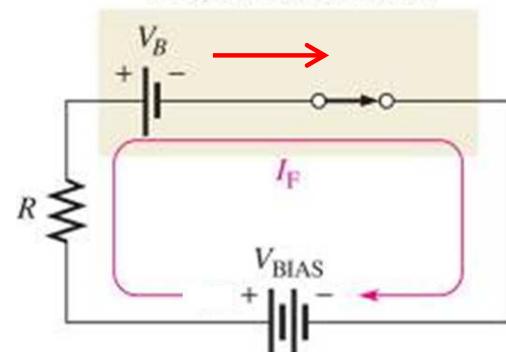


Modelo prático do díodo:

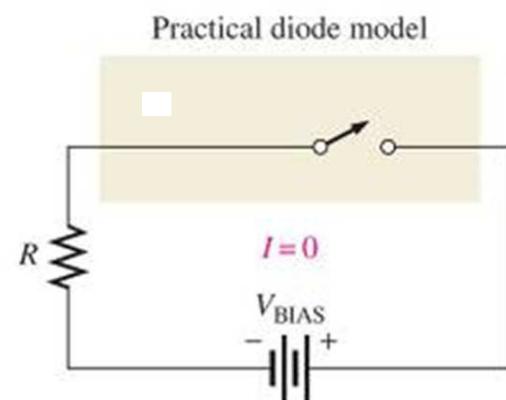
díodo ideal em série com a queda de tensão de condução (V_D)



Practical diode model



(a) Forward bias

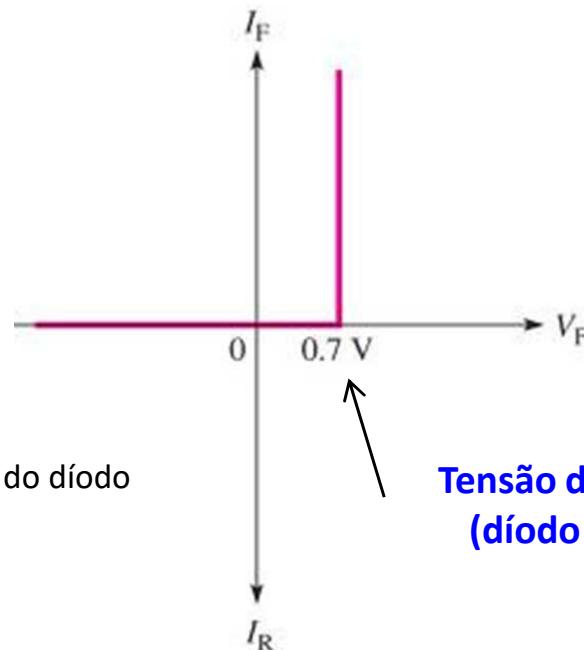


(b) Reverse bias

Um díodo real em franca condução é percorrido por uma corrente no sentido do ânodo para o cátodo, e a diferença de potencial aos seus terminais (i.e. a ddp entre o ânodo e o cátodo) é praticamente constante – tensão de condução (\sim igual a 0.7 V, se for de silício; 0.3 V, se for de germânio) – i.e., a corrente pode ser considerada independente da tensão.

Se a ddp entre o ânodo e o cátodo for menor que 0.7 V, o díodo comporta-se como um resistência elevada, na prática (na maioria das aplicações), como um circuito aberto.

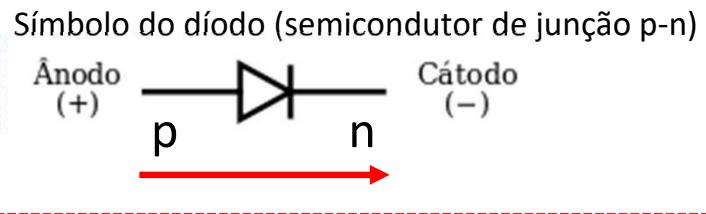
Característica corrente-tensão + próxima da de um díodo real – modelo prático



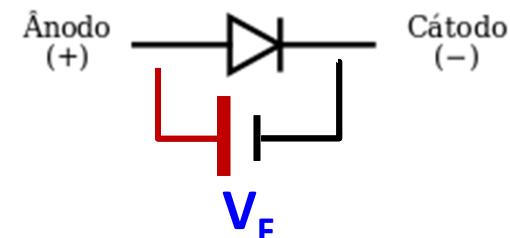
$V_{F,D,B}$: tensão aos terminais do díodo

(c) V - I characteristic curve

Ilustração da operação de um díodo de silício

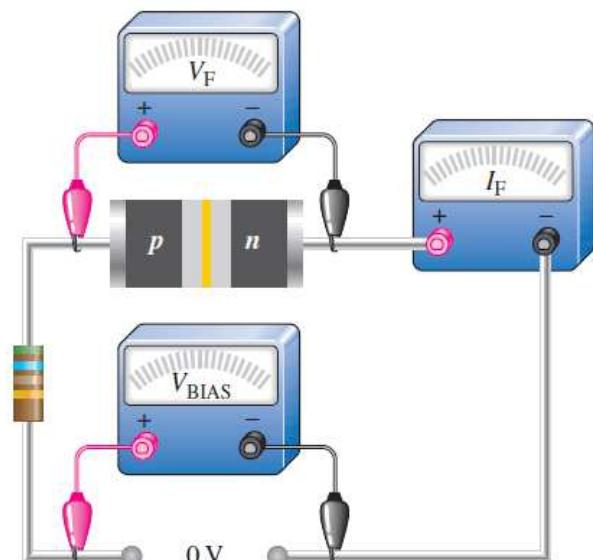


Só deixa passar corrente no sentido da seta



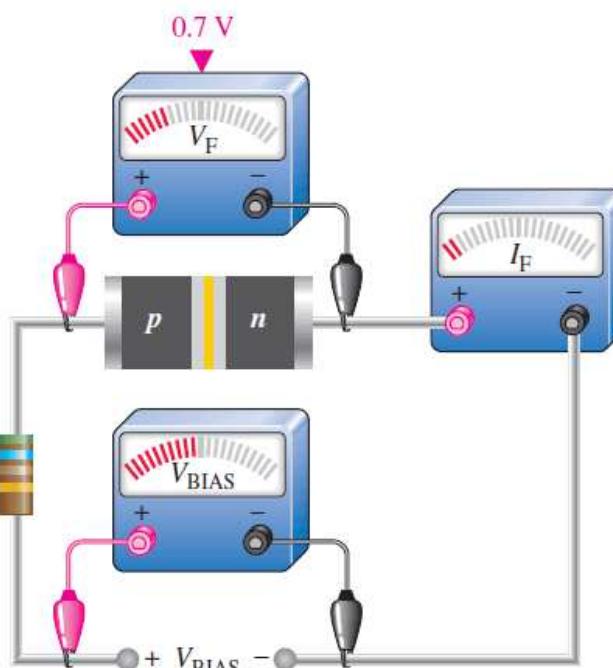
$$V_F = V_{BIAS}$$

Díodo não polarizado ($V_F \approx 0$ V)
ou polarizado inversamente
($V_F < 0$ V)



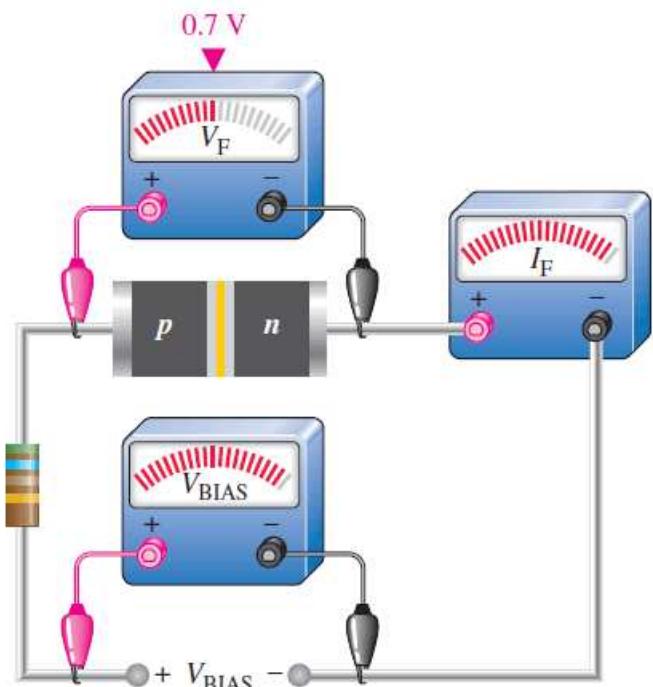
(a) No bias voltage. The pn junction of the diode is at equilibrium.

Díodo polarizado diretamente com $V_F \approx 0.7$ V (corrente > 0)



(b) Small forward-bias voltage ($V_F < 0.7$ V), very small forward current.

Díodo polarizado diretamente ($V_F = 0.7^+$ V) (corrente $>> 0$)

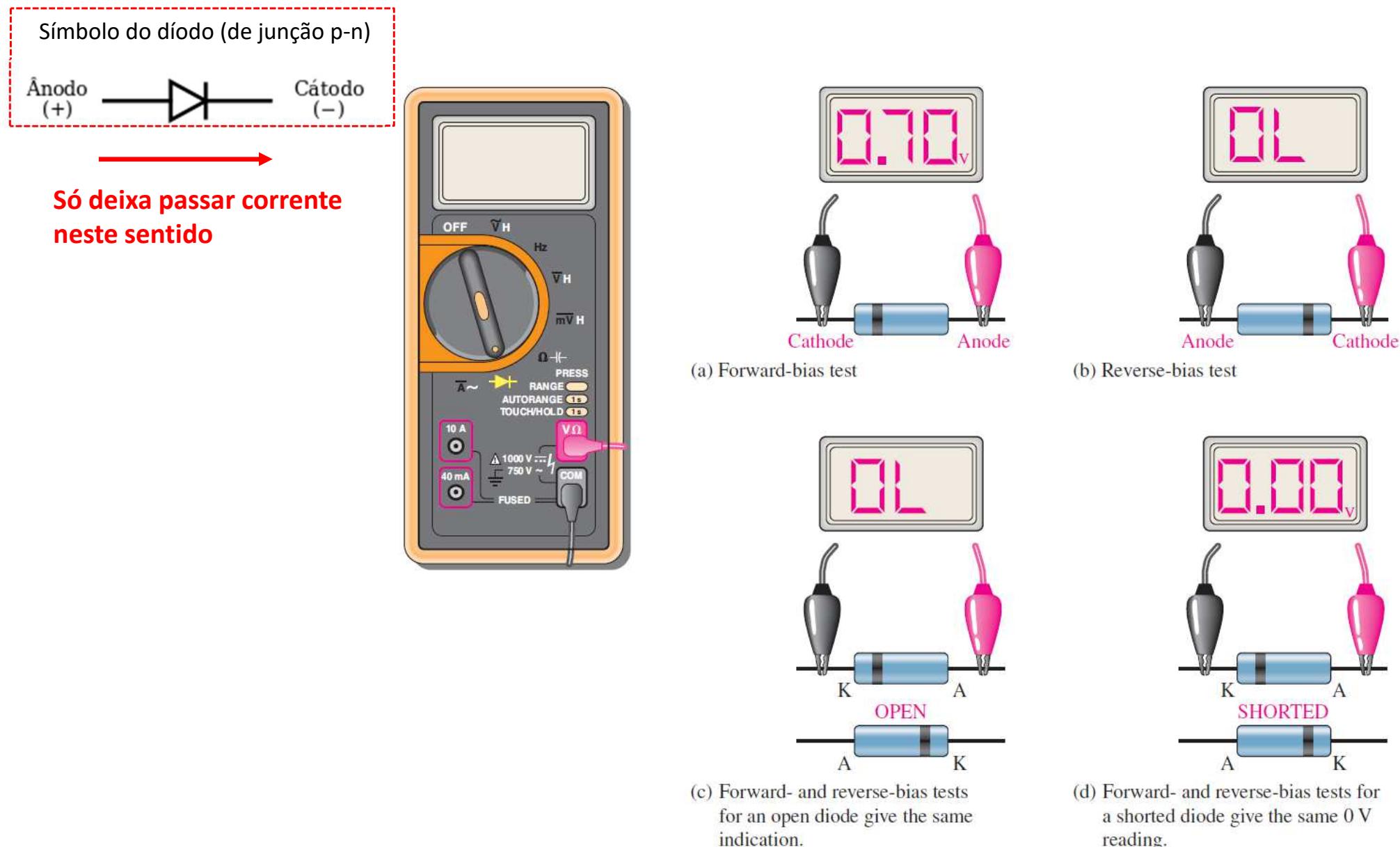


(c) Forward voltage reaches and remains at approximately 0.7 V. Forward current continues to increase as the bias voltage is increased.

$$V_F = V_{BIAS}$$

Mas a tensão aos terminais do díodo mantém-se (na verdade aumenta ligeiramente).

Testar um díodo usando um multímetro



▲ FIGURE 2-76

Testing a diode out-of-circuit with a DMM.

Curva característica corrente-tensão (I-V) de um díodo real

F: forward; R: reverse

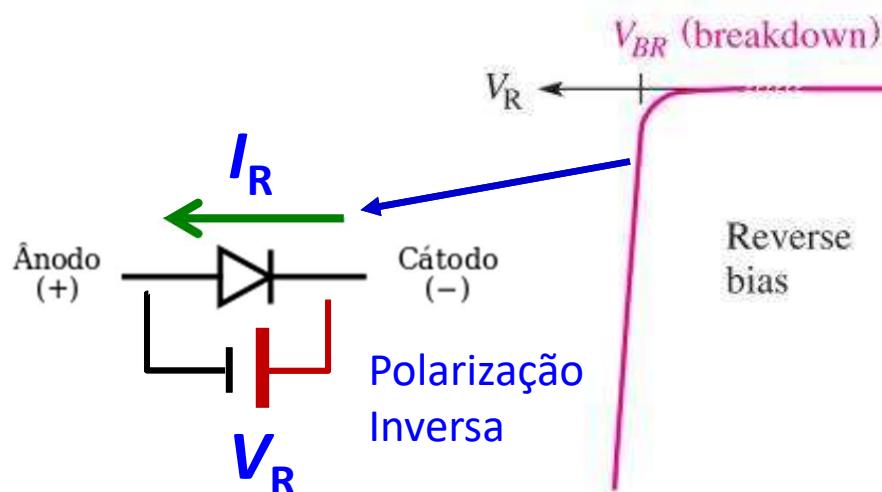
D: diode/direct “D=F”

V_F : tensão aos terminais do díodo (polarização direta)

V_R : tensão aos terminais do díodo (polarização inversa)

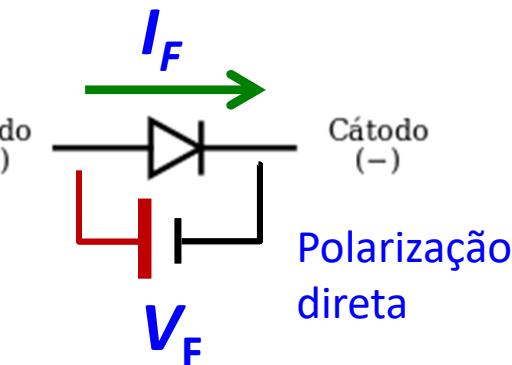
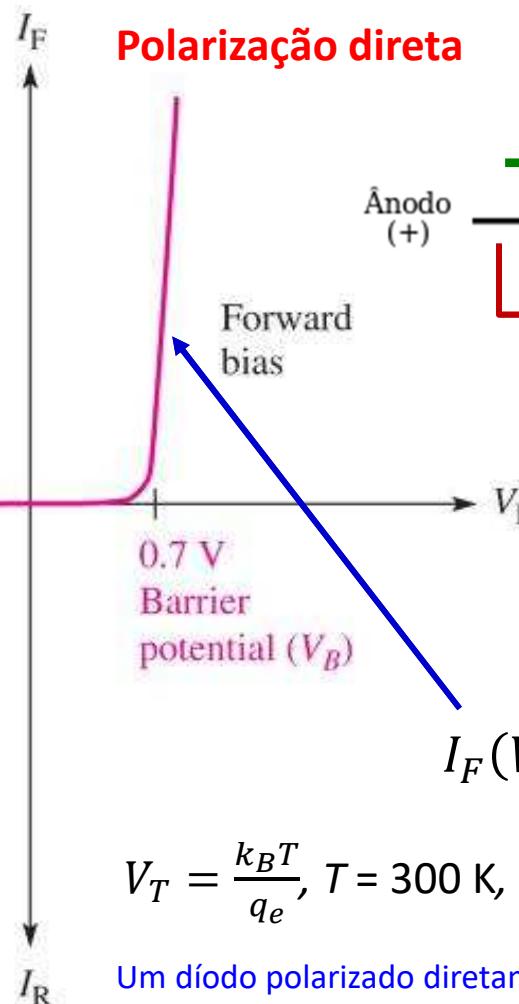
Polarização inversa

$$I_R(V_R < V_{BR}) = I_S \left(e^{-\frac{V_R}{nV_T}} - 1 \right) \approx -I_S$$



Um díodo polarizado inversamente atua na prática como um isolador (circuito aberto), até que seja atingida uma dada tensão, designada tensão de rutura V_{BR} .

Polarização direta



$$I_F(V_F) = I_S \left(e^{\frac{V_F}{nV_T}} - 1 \right)$$

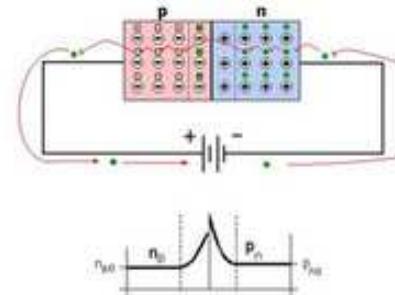
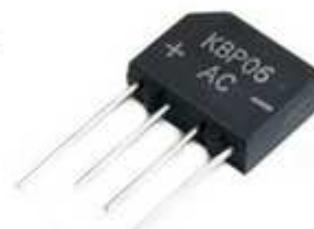
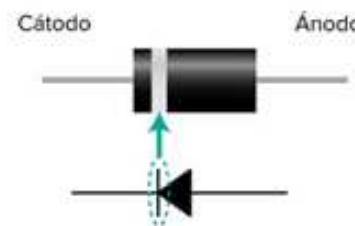
$$V_T = \frac{k_B T}{q_e}, \quad T = 300 \text{ K}, \quad V_T = 26 \text{ mV}, \quad n \approx 1.5 - 2$$

Um díodo polarizado diretamente atua na prática como um fio (curto-circuito), se for submetido a tensão igual à “tensão de condução”. Até que seja atingida essa tensão podemos assumir que o díodo funciona como um circuito aberto.

Para díodos de silício assume-se que a tensão de condução é 0.7 V.

Exemplos de díodos semicondutores

O díodo de junção é um elemento básico para quase todos os dispositivos semicondutores que usam uma junção P-N.^[1]



TIPOS DE DIODOS



RECTIFICADOR DE SILICIO



EMISORES DE LUZ (LED)



ZENER



SCHOTTKY



RECTIFICADOR DE GERMANIO



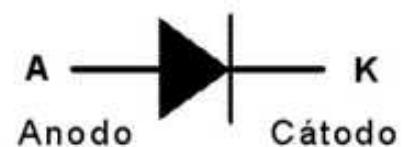
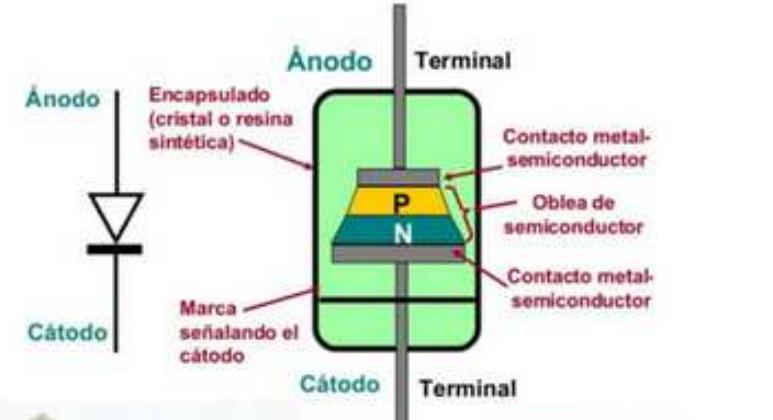
FOTODIODOS



VARICAP



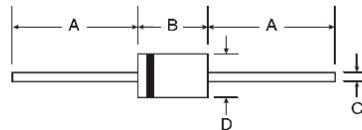
TÚNEL



<https://www.fluke.com/pt-pt/saber-mais/blog/aplicacoes-eletricas/o-que-e-um-diodo>

As figuras apresentadas nestes slides são, na sua maioria, retiradas do manual *Electronics Fundamentals: Circuits, Devices & Applications*, By Thomas L Floyd, David Buchla Pearson New International Edition (8e) – ver bibliografia.

Díodo D1N4148 (PLs) – ver modelo no LTPSPICE



1N4148 / 1N4448

FAST SWITCHING DIODE

Maximum Ratings @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified

Characteristic	Symbol	1N4148	1N4448	Unit
Non-Repetitive Peak Reverse Voltage	V_{RM}	100		V
Peak Repetitive Reverse Voltage	V_{RRM}			
Working Peak Reverse Voltage	V_{RWM}	75		V
DC Blocking Voltage	V_R			
RMS Reverse Voltage	$V_{R(RMS)}$	53		V
Forward Continuous Current (Note 1)	I_{FM}	300	500	mA
Average Rectified Output Current (Note 1)	I_O	150		mA
Non-Repetitive Peak Forward Surge Current @ $t = 1.0\text{s}$	I_{FSM}	1.0		A
Non-Repetitive Peak Forward Surge Current @ $t = 1.0\mu\text{s}$		2.0		

Thermal Characteristics

Characteristic	Symbol	Value	Unit
Power Dissipation (Note 1)	P_D	500	mW
Derate Above 25°C		1.68	$\text{mW}/^\circ\text{C}$
Thermal Resistance, Junction to Ambient Air (Note 1)	$R_{\theta JA}$	300	$^\circ\text{C}/\text{W}$
Operating and Storage Temperature Range	T_J, T_{STG}	-65 to +175	$^\circ\text{C}$

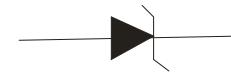
Electrical Characteristics @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified

Characteristic	Symbol	Min	Max	Unit	Test Condition
Maximum Forward Voltage 1N4148 1N4448 1N4448	V_{FM}	—	1.0	V	$I_F = 10\text{mA}$
		0.62	0.72		$I_F = 5.0\text{mA}$
		—	1.0		$I_F = 100\text{mA}$
Maximum Peak Reverse Current	I_{RM}	—	5.0	μA	$V_R = 75\text{V}$
			50	μA	$V_R = 70\text{V}, T_J = 150^\circ\text{C}$
			30	μA	$V_R = 20\text{V}, T_J = 150^\circ\text{C}$
			25	nA	$V_R = 20\text{V}$
Total Capacitance	C_T	—	4.0	pF	$V_R = 0, f = 1.0\text{MHz}$
Reverse Recovery Time	t_{rr}	—	4.0	ns	$I_F = 10\text{mA} \text{ to } I_R = 1.0\text{mA}$ $V_R = 6.0\text{V}, R_L = 100\Omega$

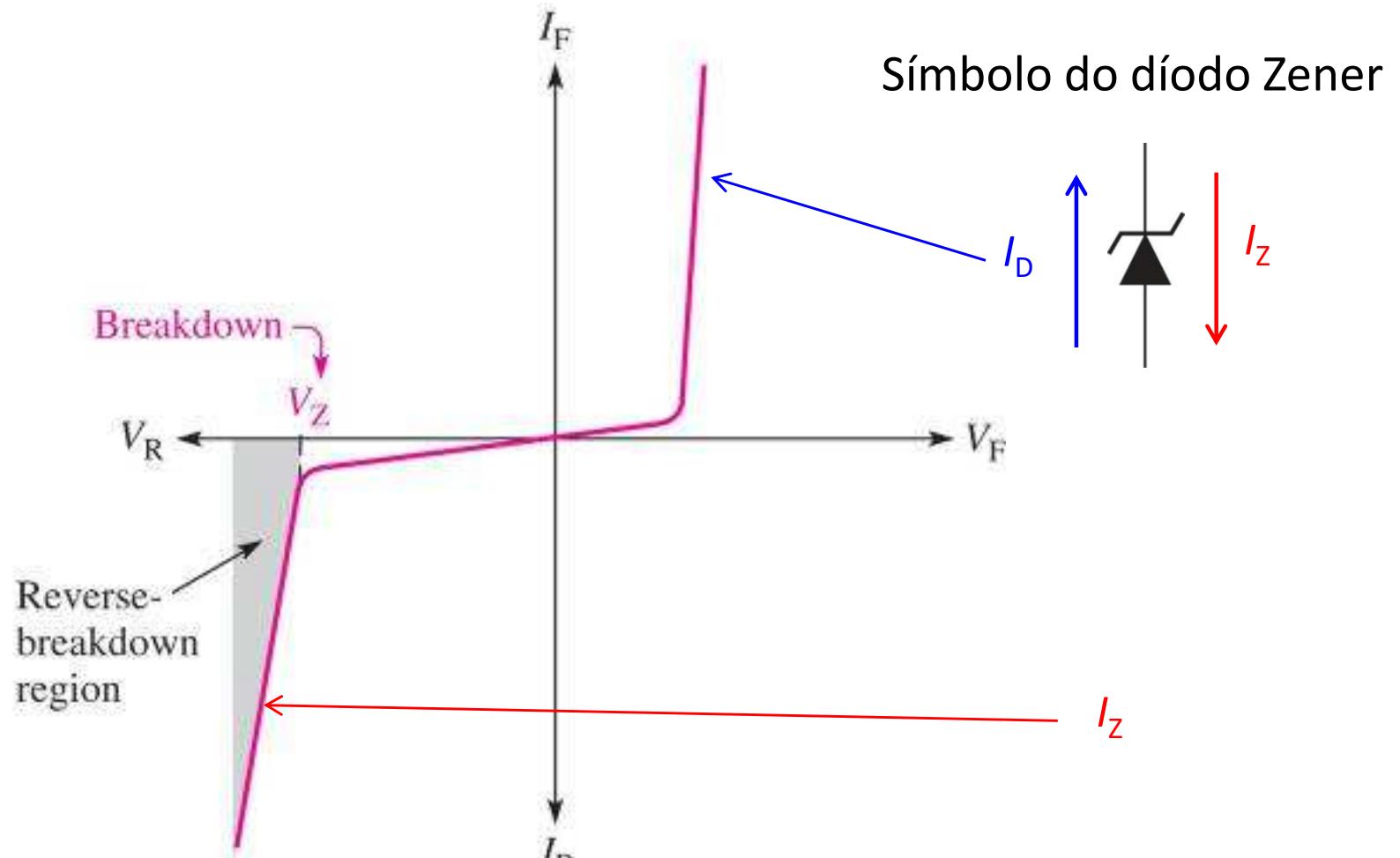
- Notes:
- Valid provided that device terminals are kept at ambient temperature.
 - EC Directive 2002/95/EC (RoHS) revision 13.2.2003. Glass and high temperature solder exemptions applied where applicable, see EU Directive Annex Notes 5 and 7.

Díodo Zener

Díodos Zener são usados para estabelecer uma tensão de referência

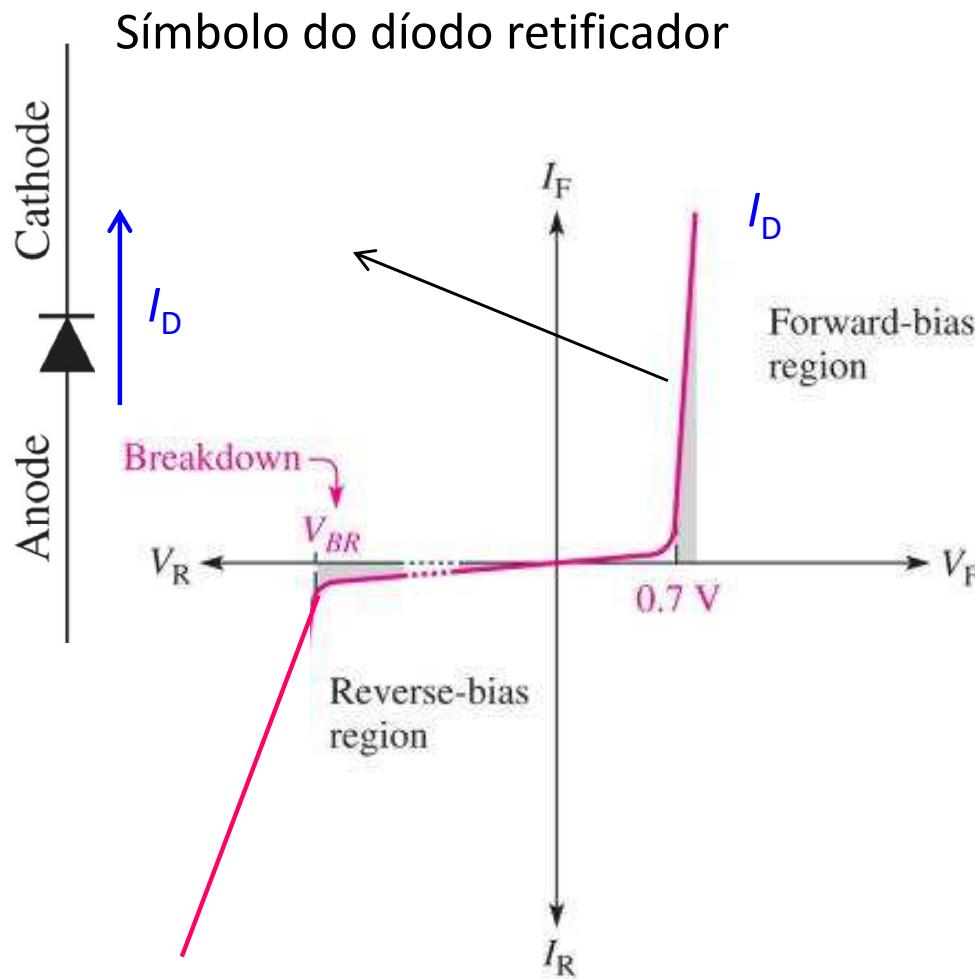


Curva I-V de um díodo Zener

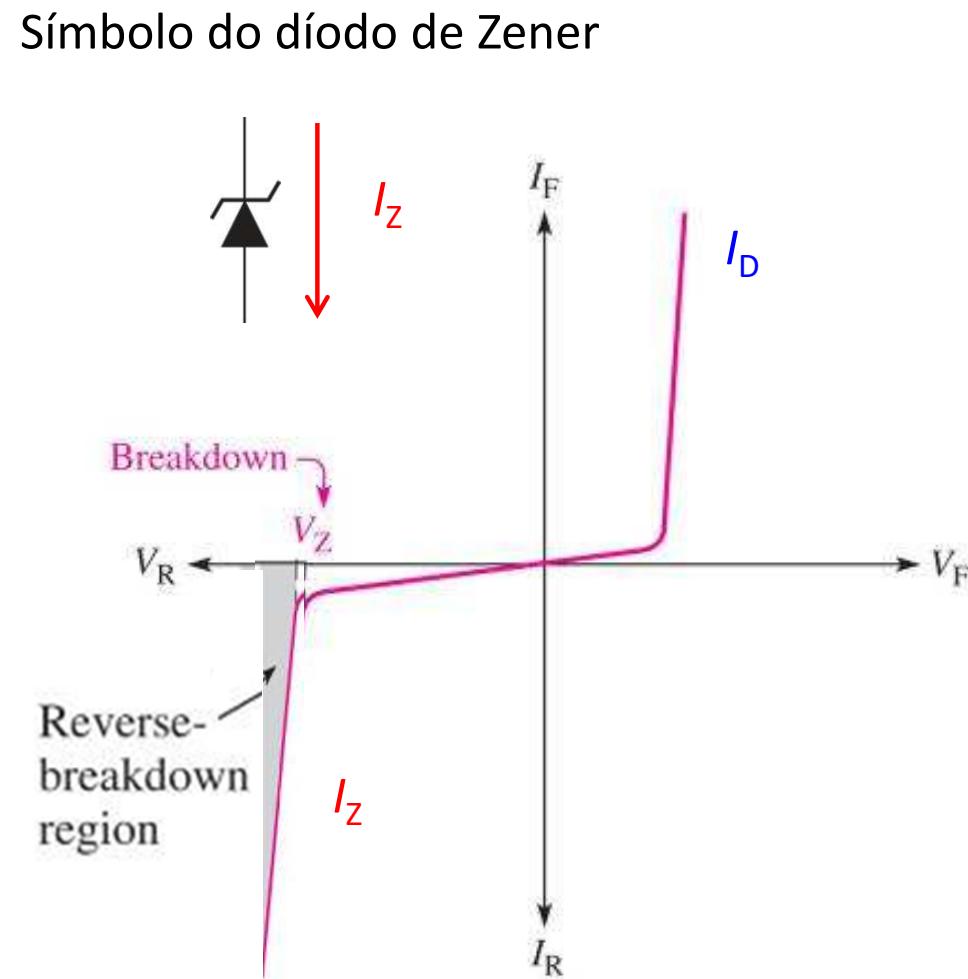


(b) The normal operating region for a zener diode is shaded.

Característica do díodo Zener comparada com o díodo normal

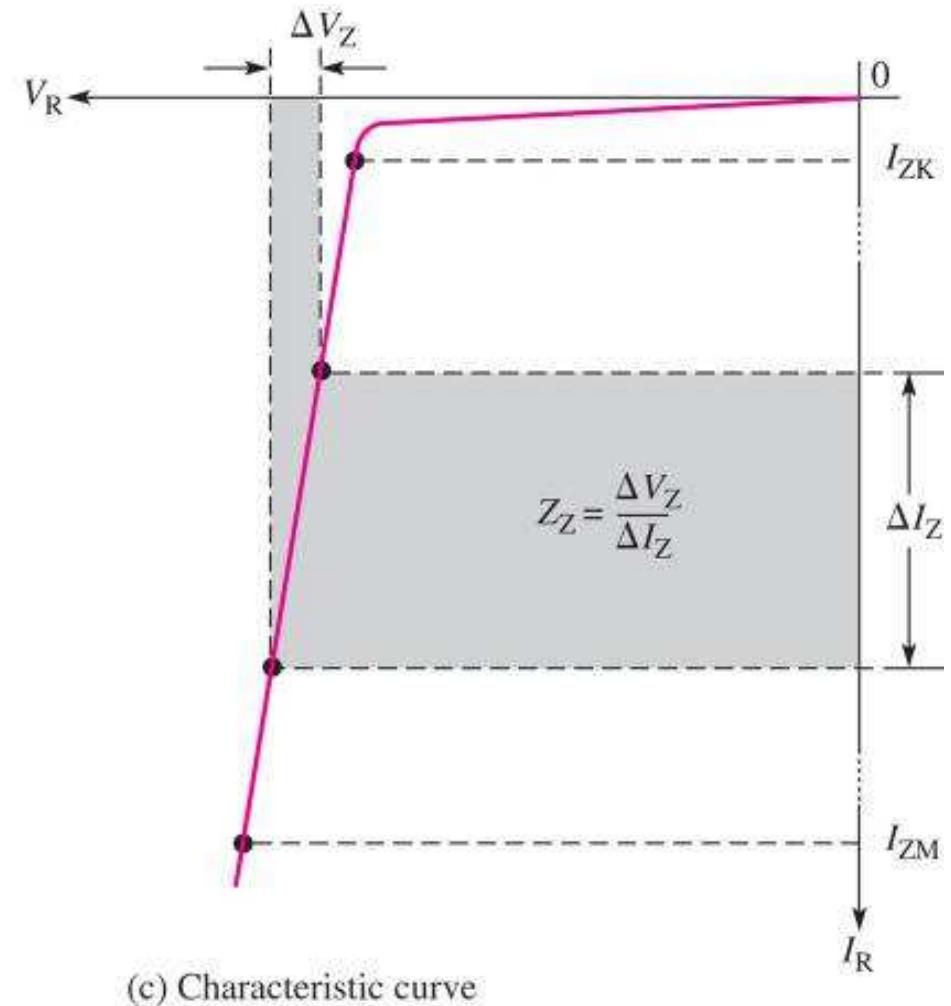
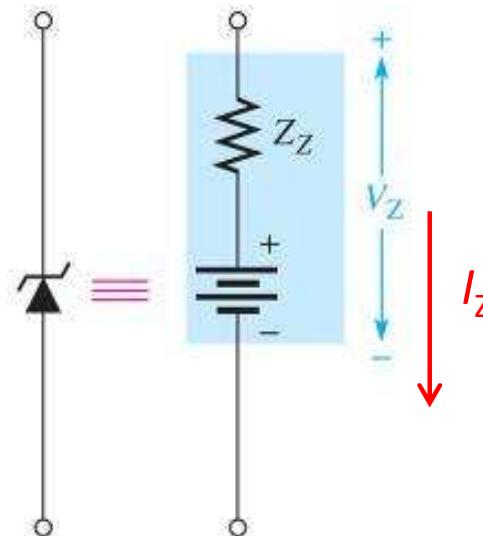
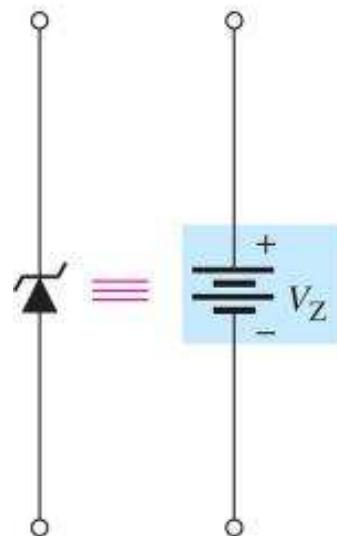


(a) The normal operating regions for a rectifier diode are shown as shaded areas.

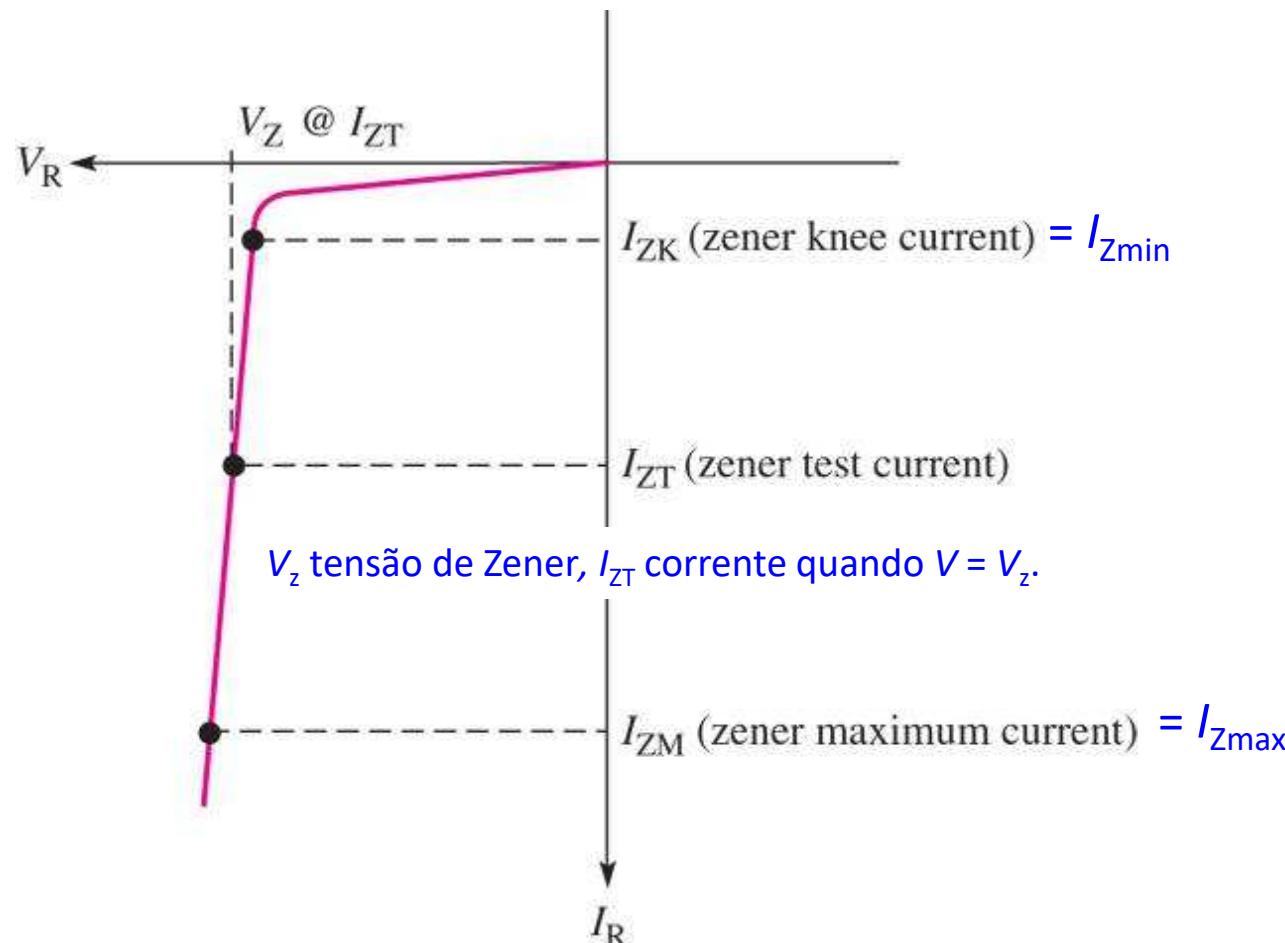


(b) The normal operating region for a zener diode is shaded.

Circuitos equivalentes de um díodo Zener



Característica do díodo Zener na região de polarização inversa.

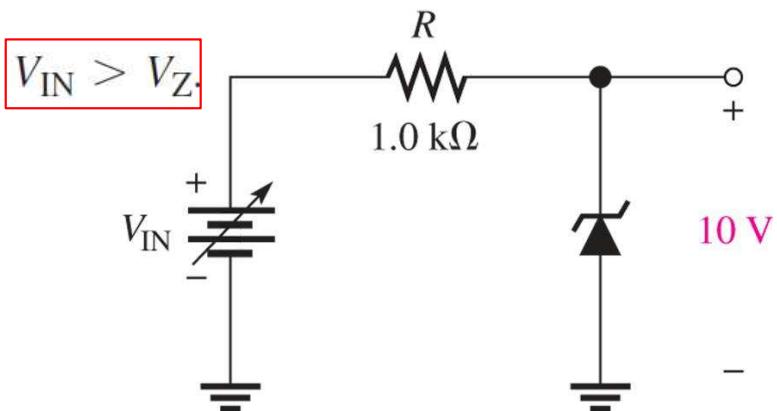


Um díodo Zener polarizado inversamente na tensão de Zener, V_z , pode ser usado como regulador de tensão se a corrente que o percorre for superior a um dado valor, I_{Zmin} , e inferior um valor máximo I_{Zmax} ,(para não destruir o díodo), definidos aquando da fabricação.

Regulação de tensão usando um díodo Zener

Um díodo Zener polarizado inversamente na tensão de Zener, V_Z , pode ser usado como regulador de tensão se a corrente que o percorre for superior a um dado valor, $I_{Z\min}$, e inferior um valor máximo $I_{Z\max}$,(para não destruir o díodo), definidos aquando da fabricação.

Exemplo: Seja um díodo Zener que assegura uma tensão constante de 10 V (Tensão de Zener, V_Z) aos seus terminais se a corrente que o percorre estiver compreendida entre 4 mA e 40 mA. No caso do circuito abaixo, qual será o intervalo de tensão que ele pode regular?

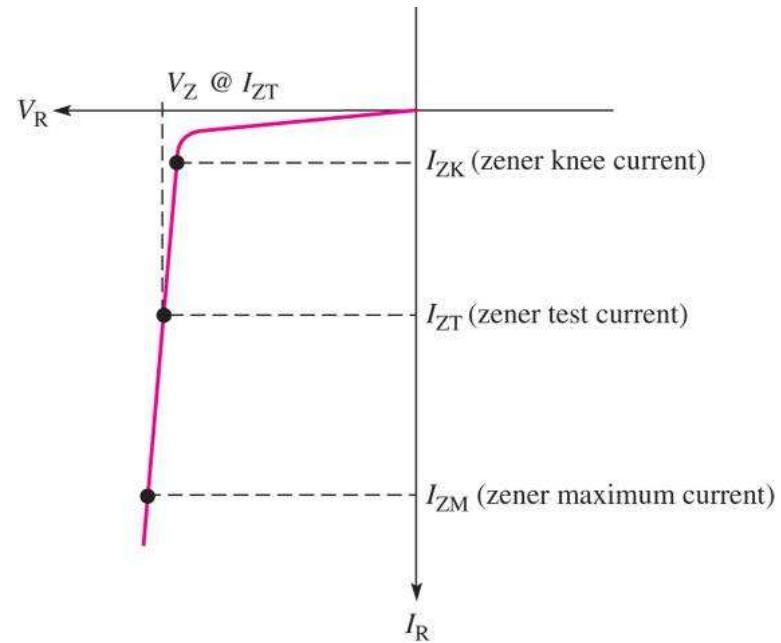


Consideremos o valor mínimo de corrente: 4 mA

$$V_R = (4 \text{ mA})(1.0 \text{ k}\Omega) = 4 \text{ V}$$

$$V_R = V_{IN} - V_Z$$

$$V_{IN\min} = V_{IN} = V_R + V_Z = 4 \text{ V} + 10 \text{ V} = 14 \text{ V}$$



Consideremos agora o valor máximo de corrente: 40 mA

$$V_R = (40 \text{ mA})(1.0 \text{ k}\Omega) = 40 \text{ V}$$

$$V_R = V_{IN} - V_Z$$

$$V_{IN\max} = V_{IN} = 40 \text{ V} + 10 \text{ V} = 50 \text{ V}$$

Díodos com funcionalidades específicas

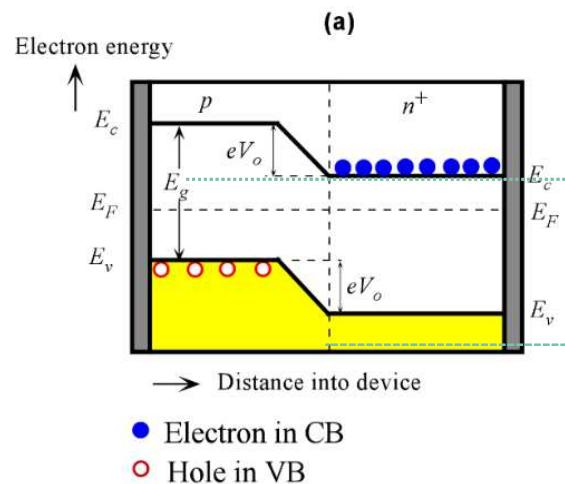
**Díodo emissor de luz
("Light Emitting Diode", LED)**

e

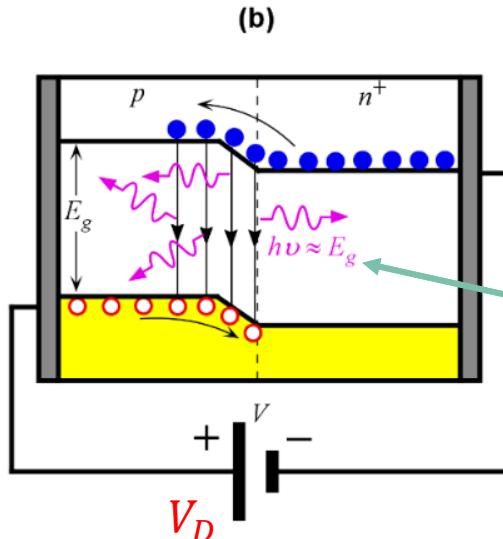
Fotodíodo (fotodetector)

Light Emitting Diode, LED*

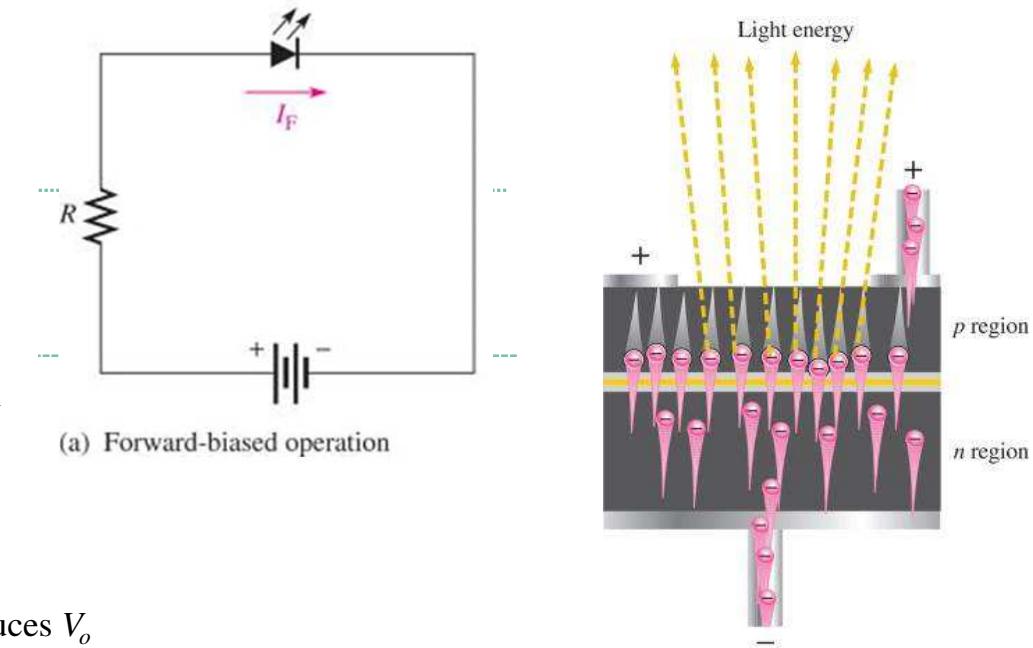
Princípio básico de funcionamento de um díodo emissor de luz



(a) The energy band diagram of a pn^+ (heavily n -type doped) junction without any bias. Built-in potential V_o prevents electrons from diffusing from n^+ to p side.



(b) The applied bias reduces V_o and thereby allows electrons to diffuse, be injected, into the p -side. Recombination around the junction and within the diffusion length of the electrons in the p -side leads to photon emission.



A cor da luz emitida por um LED depende do material de que é feito. Tecnicamente depende do valor do hiato de energia entre a banda de condução e banda de valência (para metro E_g na figura). Os fotões emitidos têm energia próxima de E_g , que se relaciona com o comprimento de onda (cor) através da relação:

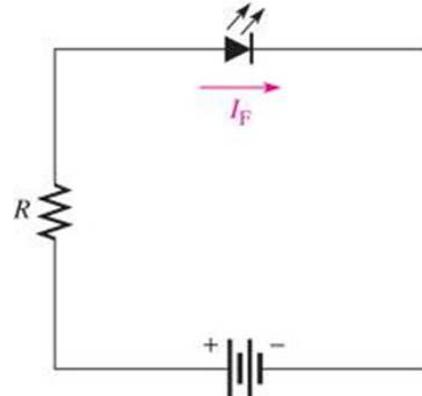
Energia (cor) dos fotões:

$$E(J) = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \approx E_g;$$

Características corrente-tensão (I-V) e irradiância-corrente (L-I) dos LEDs

L: luz (irradiância)

(Em radiometria, a irradiância é o fluxo radiante recebido por uma superfície pela unidade de área, W/m²)



(a) Forward-biased operation

Potência ótica (P)



(b) Typical light output versus forward current

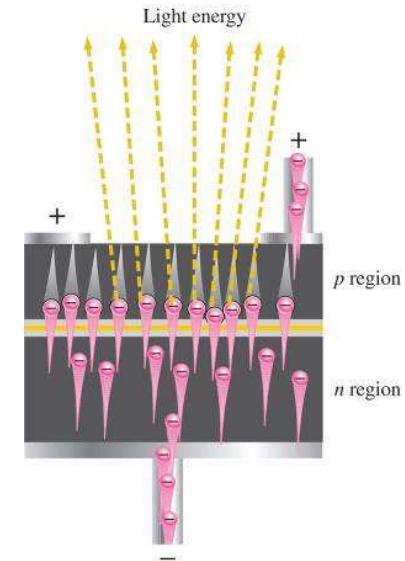
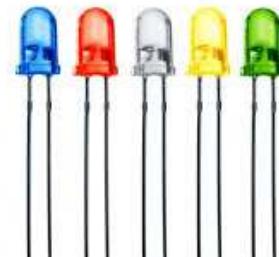
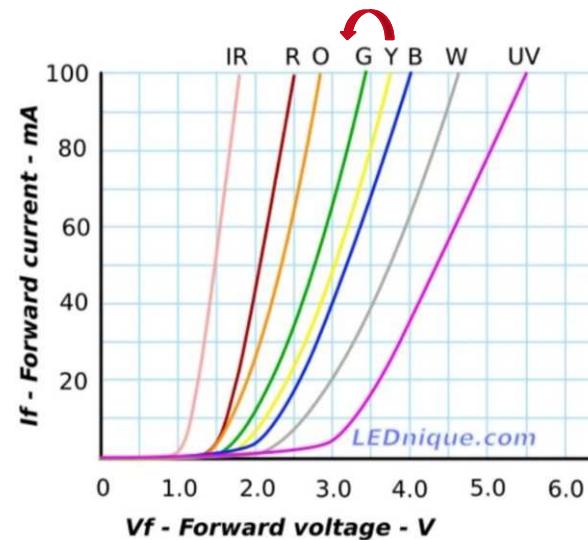


Table 8.1 LED materials and wavelengths

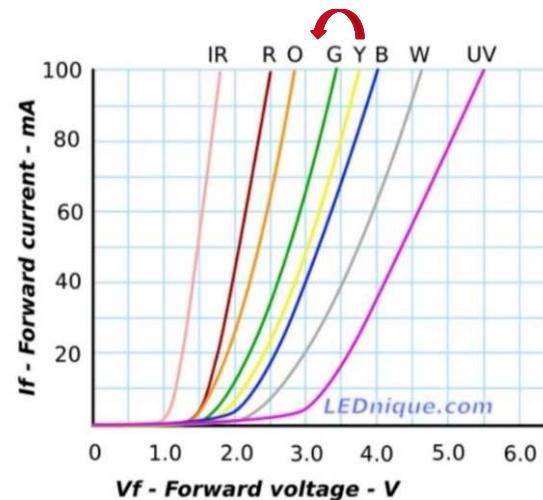
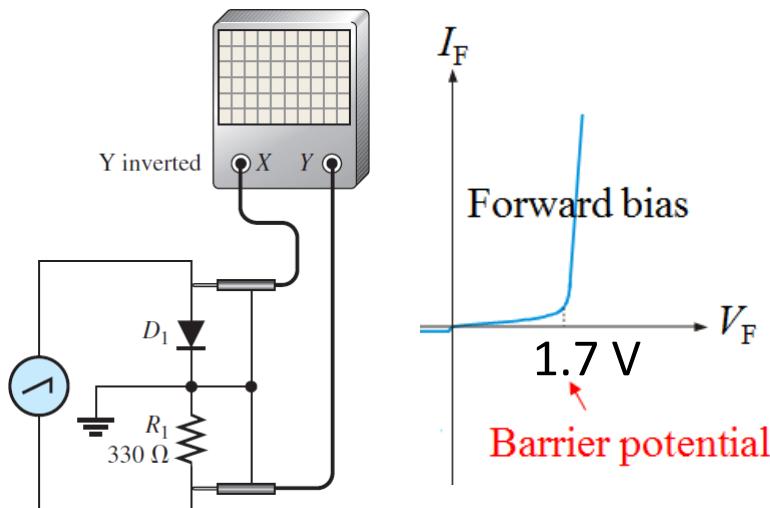
Material	Dopant	Wavelength (nm)	Color
GaAs	Zn	900	Infrared
GaAs	Si	910–1,020	Infrared
GaP	N	570	Green
GaP	N	590	Yellow
GaP	Zn, O	700	Red
GaAs _{0.8} P _{0.2}		650	Red
GaAs _{0.35} P _{0.65}	N	632	Orange
GaAs _{0.15} P _{0.85}	N	589	Yellow



* Potencialmente relevante para os trabalhos de Física Experimental III

Light Emitting Diode, LED*

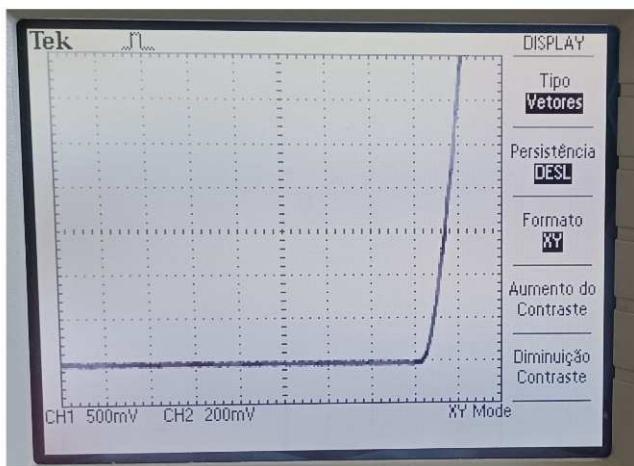
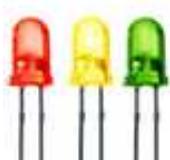
Princípio básico de funcionamento de um díodo emissor de luz



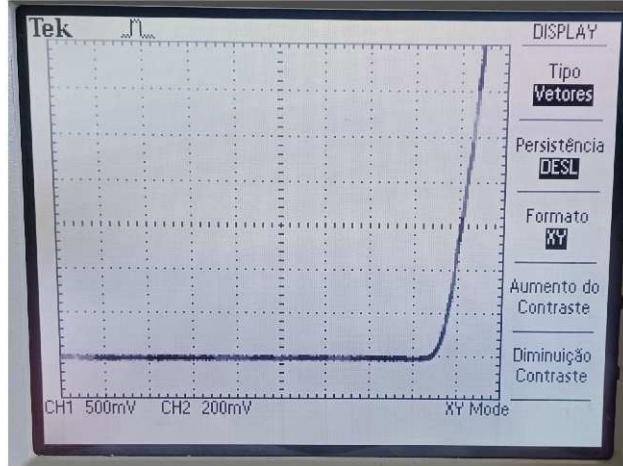
A tensão V_D para a qual o LED entra em condução é $\approx E_g/e$
(E_g - energia do hitao em joule;
 e =carga do electrão)

Energia dos fotões emitidos
("cor" do LED) é $h\nu \approx E_g$

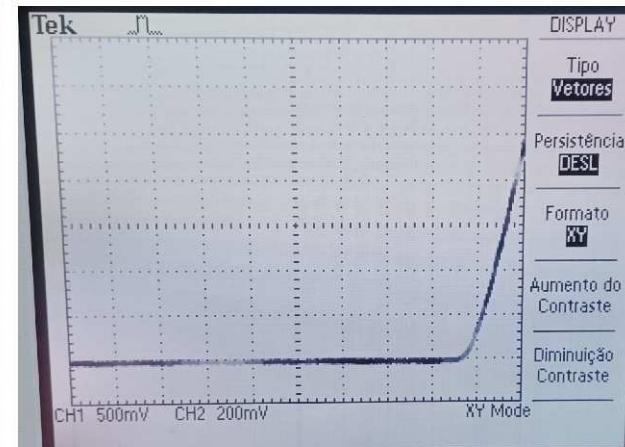
Visualização no osciloscópio da característica corrente-tensão de LEDs (verde, amarelo e vermelho)



LED vermelho



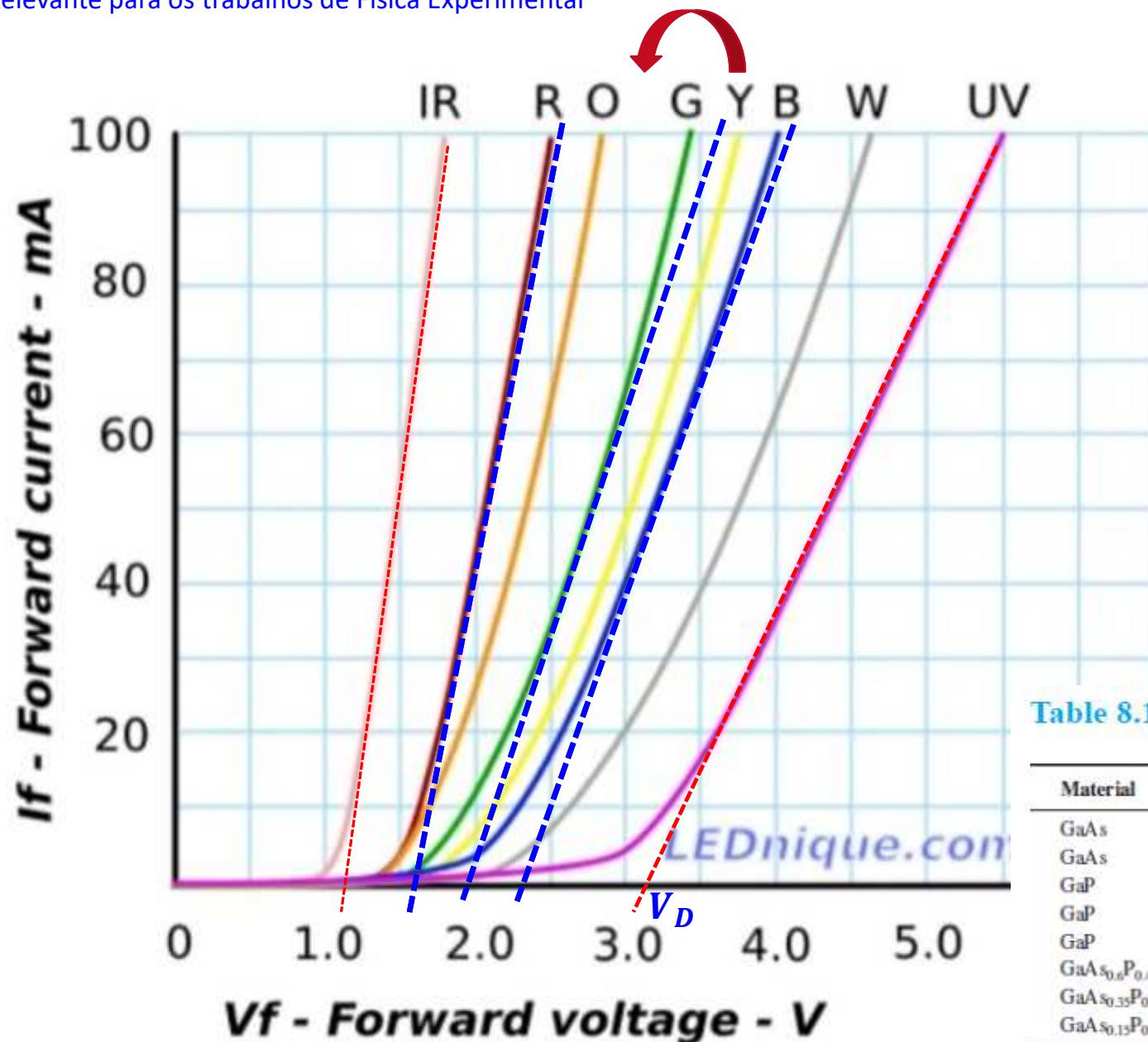
LED amarelo



LED verde

Características corrente-tensão (I-V) e a energia do hiato

Relevante para os trabalhos de Física Experimental



Energia dos fotões:

$$E(J) = h\nu = \frac{hc}{\lambda};$$

"Tensão de emissão":

$$V_D(\lambda) \propto h \frac{c}{e} \frac{1}{\lambda}$$

$V_{D,\text{vermelho (R)}} = 1.7 \text{ V}$

$V_{D,\text{verde (G)}} = 2 \text{ V}$

$V_{D,\text{azul(B)}} = 2.3 \text{ V}$

Table 8.1 LED materials and wavelengths

Material	Dopant	Wavelength (nm)	Color
GaAs	Zn	900	Infrared
GaAs	Si	910–1,020	Infrared
GaP	N	570	Green
GaP	N	590	Yellow
GaP	Zn, O	700	Red
$\text{GaAs}_{0.6}\text{P}_{0.4}$		650	Red
$\text{GaAs}_{0.35}\text{P}_{0.65}$	N	632	Orange
$\text{GaAs}_{0.15}\text{P}_{0.85}$	N	589	Yellow

λ

$\lambda: \text{wavelength}$

* Relevante para os trabalhos de Física Experimental

THE PHYSICS OF LED LIGHTS

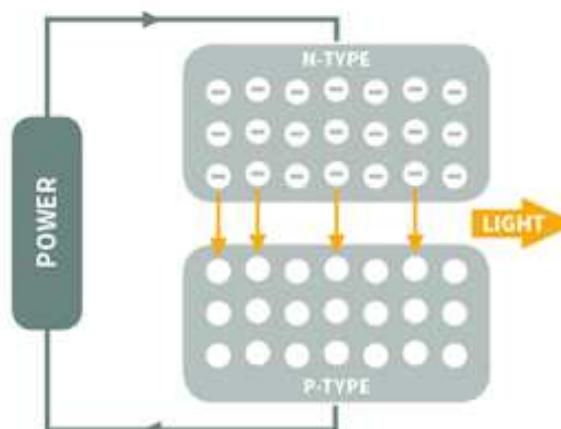
LED lights come in a full range of colours – this graphic takes a closer look at the chemistry behind how their light and varied hues are achieved.



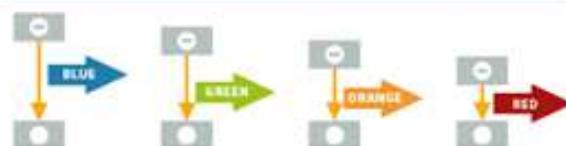
HOW DO LEDs WORK?

Light emitting diodes (LEDs) use semiconducting materials to produce light and colour. Many of the materials used are based on gallium, such as gallium phosphide (GaP) and gallium nitride (GaN).

Layers of the semiconductor are "doped" with impurities. This creates an n-type layer, which has electrons spare, and a p-type layer, which has electron "holes". When a current is applied, electrons from the n-type layer combine with the "holes" in the p-type layer. When the electrons fall into these holes, they release energy in the form of visible light.



HOW ARE DIFFERENT COLOURS MADE?



A variety of colours are made possible by the use of different semiconducting materials, and "doping" them with different types and amounts of impurities. This affects the energy gap between the n-type and p-type layers, affecting the wavelength of light produced when a current passes through the LED.



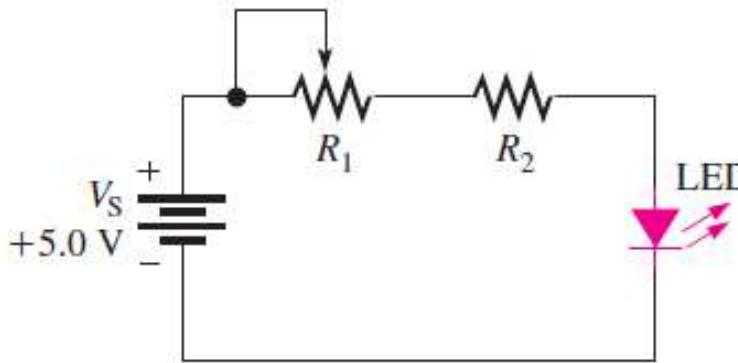
© COMPOUND INTEREST 2016 - WWW.COMPOUNDCHEM.COM | Twitter: @compoundchem | Facebook: www.facebook.com/compoundchem
This graphic is shared under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives International 4.0 licence.



Círculo de polarização de um díodo (e.g., LED*)

Series connections often involve using resistance to limit current to some level. For example, it is necessary to limit current to a light-emitting diode (LED) to prevent the LED from burning out. The circuit in Figure 21 shows a basic application, where a red LED is used as an indicator as part of a more complicated circuit. The rheostat is

► FIGURE 21



included to dim the LED, depending on ambient conditions. We will focus on just these two current-limiting resistors.

A red LED will always have a voltage across it of about +1.7 V when it is on and working within its normal operating range. The remaining voltage from the power supply will be across the two series resistors. Together, the rheostat and the fixed resistor will have a total of 3.3 V across them.

Assume you want current in the LED to range from a minimum of 2.5 mA (dim) to a maximum of 10 mA (bright). What values of R_1 and R_2 would you choose to accomplish this?

* Relevante para os trabalhos de Física Experimental

Exercício 2: circuito de polarização de um díodo (e.g., LED*)

Solution Start with the brightest condition when the resistance of the rheostat is adjusted for $0\ \Omega$. In this case, there will be no voltage across R_1 and 3.3 V will be across R_2 . Because it is a series circuit, the same current is in R_2 as the LED. Therefore,

$$R_2 = \frac{V}{I} = \frac{3.3\text{ V}}{10\text{ mA}} = 330\ \Omega$$

Now determine the total resistance required to limit the current to 2.5 mA . The total resistance is $R_T = R_1 + R_2$, and the voltage drop across R_T is 3.3 V . From Ohm's law,

$$R_T = \frac{V}{I} = \frac{3.3\text{ V}}{2.5\text{ mA}} = 1.32\text{ k}\Omega$$

To find R_1 , subtract the value of R_2 from the total resistance.

$$R_1 = R_T - R_2 = 1.32\text{ k}\Omega - 330\ \Omega = 990\ \Omega$$

Choose a **1.0 k** Ω rheostat as the nearest standard value.

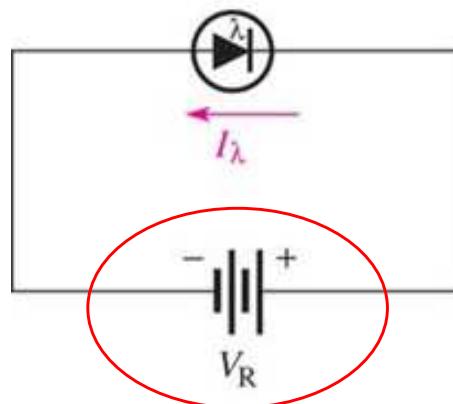
Related Problem What is the value of R_2 if the highest current is 12 mA ?

What size should a series current-limiting resistor be to limit the current to a red LED to 10 mA from a 3.0 V source? Assume the LED drops 1.7 V .

* Relevante para os trabalhos de Física Experimental

Fotodíodo*

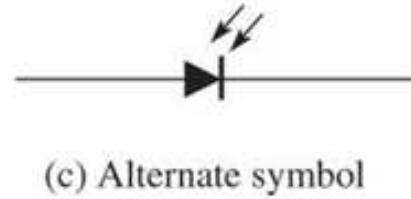
O fotodíodo é um componente eletrónico e um tipo de fotodetector (dispositivo que converte luz em corrente elétrica). É, em geral, formado por junção pn desenhada para absorver sinais óticos. A corrente é gerada quando os fotões são absorvidos na região ativa do fotodíodo (junção pn ou junção pin, i=material intrínseco), gerando pares electrão-buracos que se deslocam sob a ação do campo elétrico aplicado (ver abaixo, V_R). Os fotodíodos possuem uma "janela" ou uma conexão de fibra ótica, que "coleta e transmite" a luz para a parte fotosensível do dispositivo. As **células solares** convencionais, usadas para converter energia solar em energia elétrica, são fotodíodos de grande superfícies.



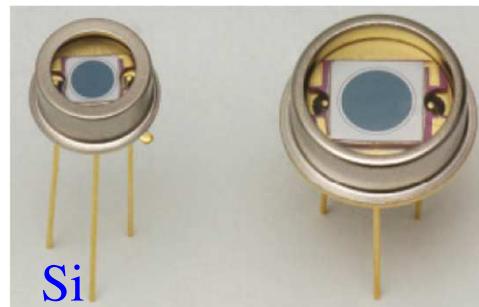
(a) Reverse-bias operation



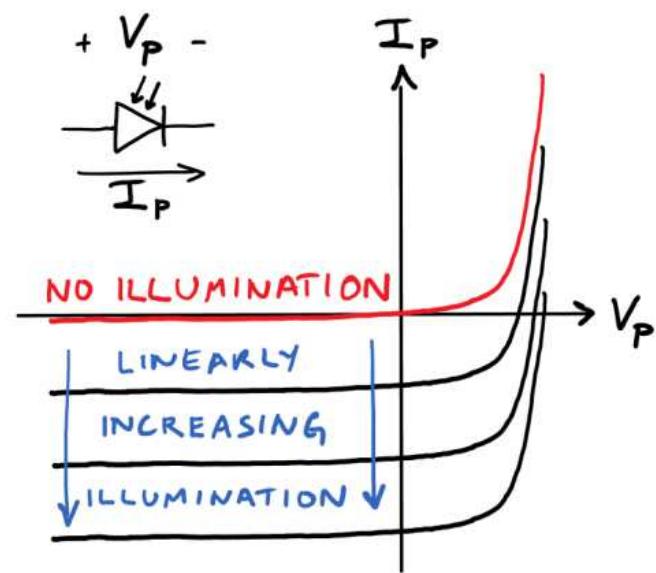
(b) Typical devices



(c) Alternate symbol



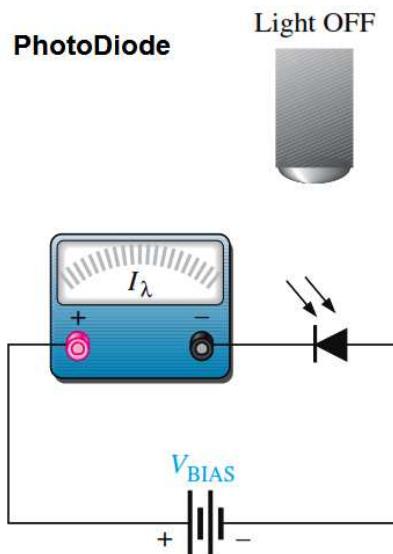
Courtesy of Hamamatsu



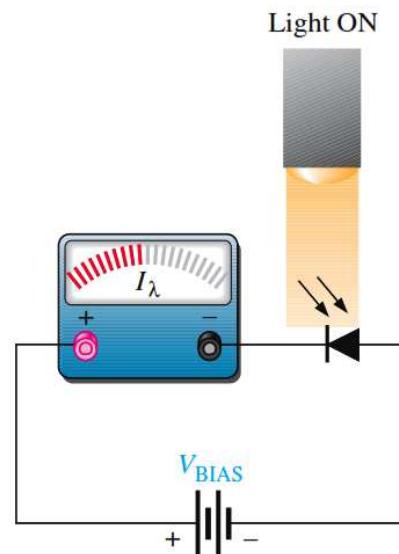
* Potencialmente relevante para os trabalhos de Física Experimental III

Fotodíodo*

Corrente num fotodíodo em função da irradiância

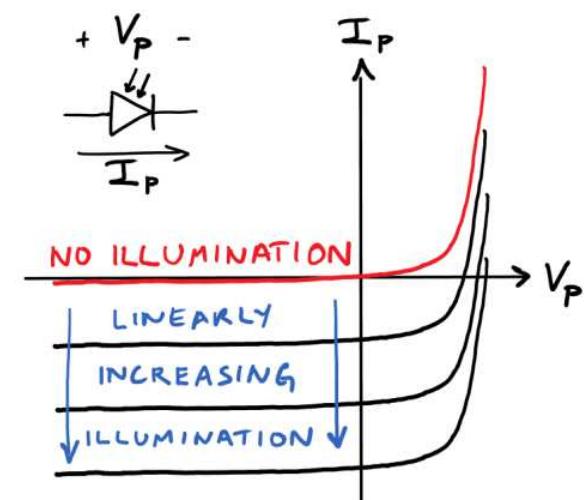
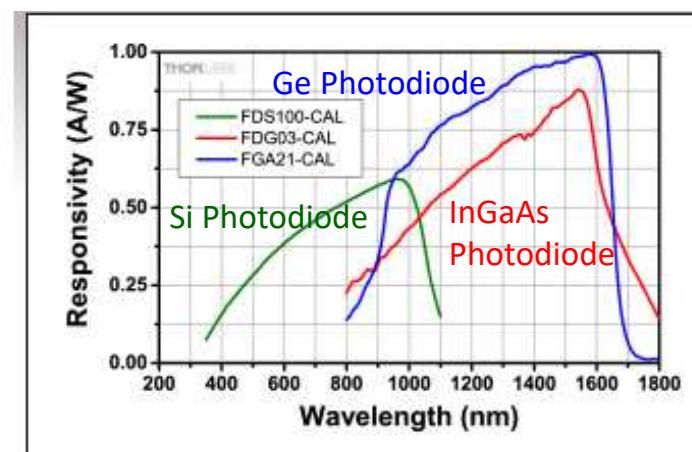
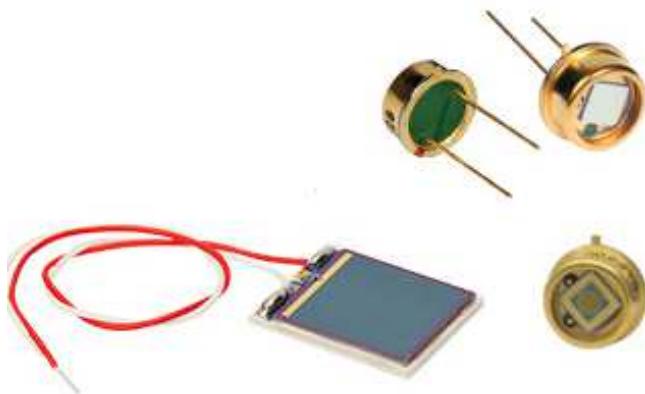
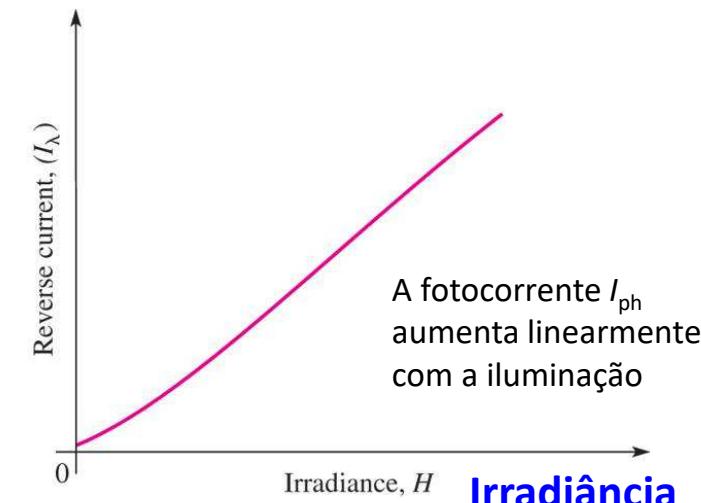


(a) No light, no current except negligible dark current



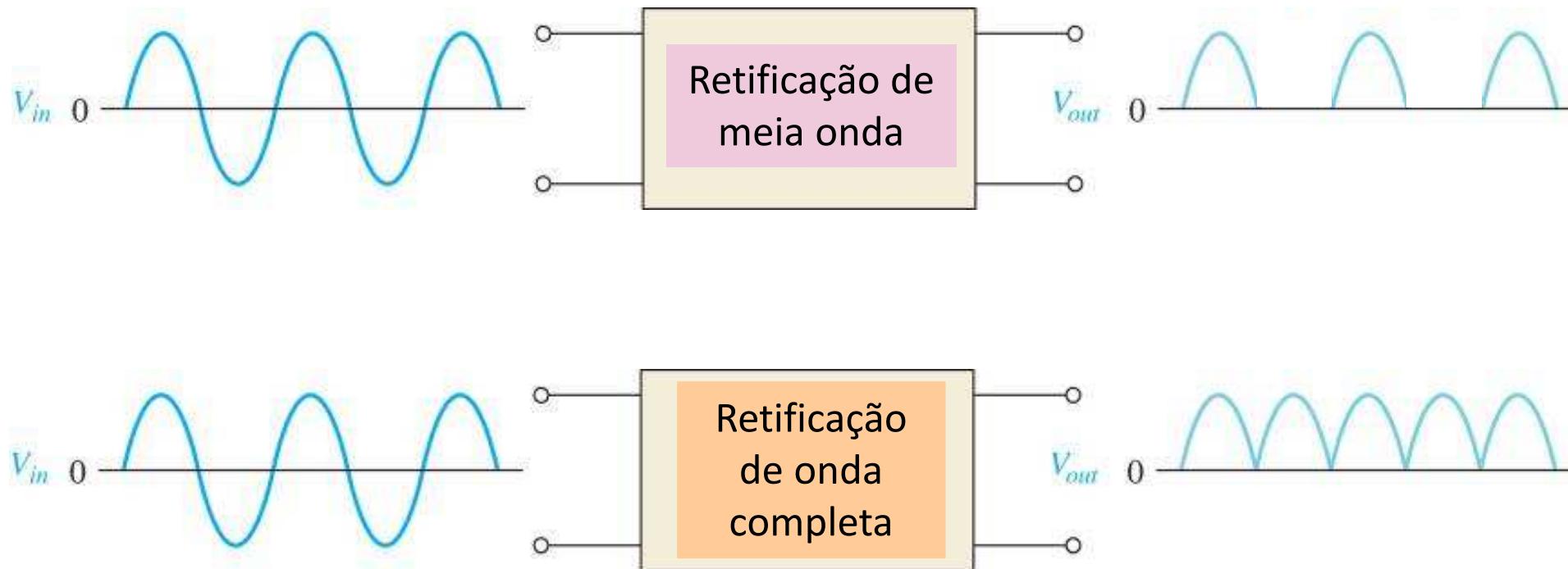
(b) Where there is incident light, resistance decreases and there is reverse current.

Fotocorrente



* Potencialmente relevante para os trabalhos de Física Experimental III

Exemplo de aplicação do díodo de sinal: Retificação de sinais

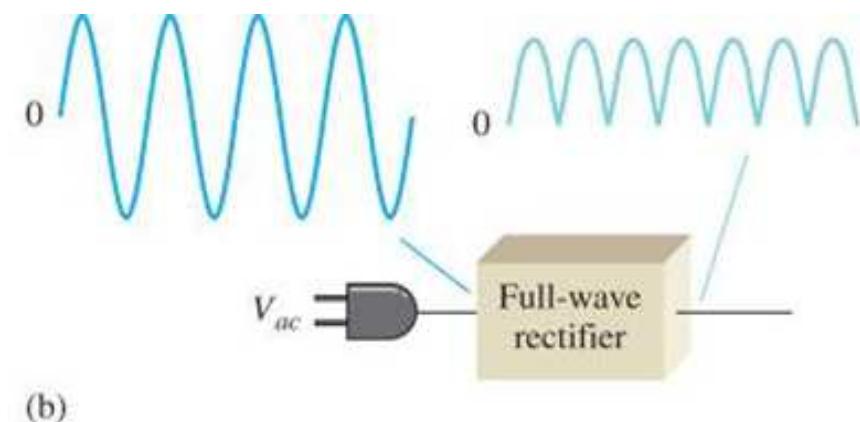
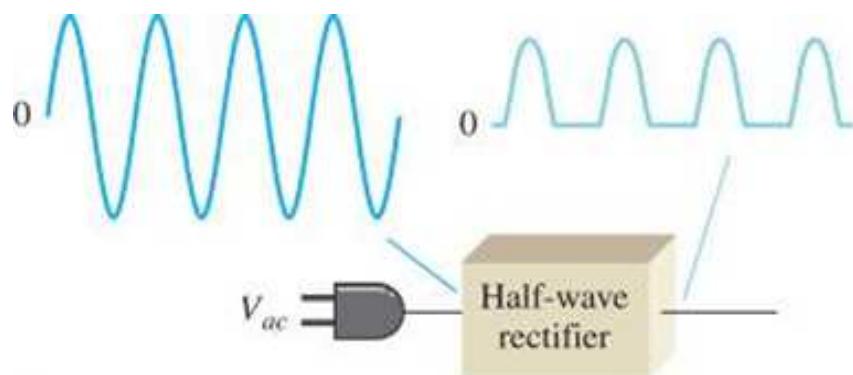


Retificar: Transformar uma corrente alternada em corrente contínua.

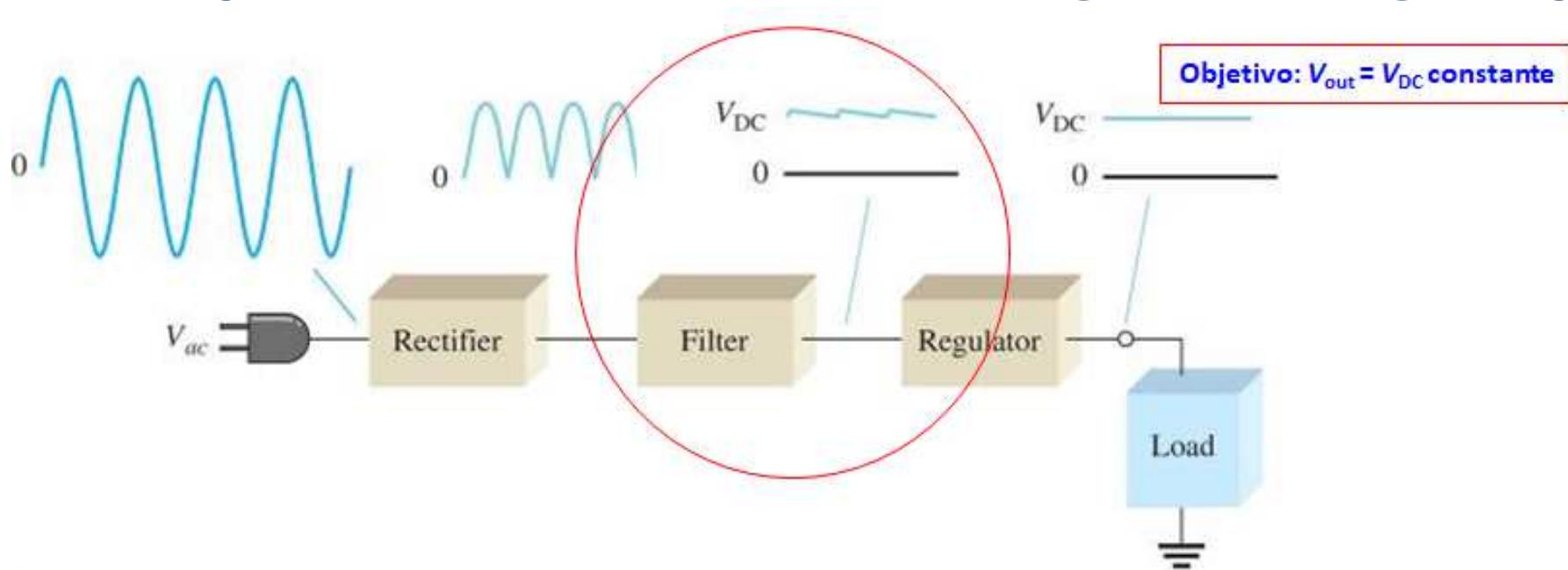
“Retificar”, in Dicionário Priberam da Língua Portuguesa [em linha], 2008-2020,

<https://dicionario.priberam.org/rectificar> [consultado em 17-11-2020].

Retificação de meia onda e de onda completa



Retificação de sinais com filtragem e regulação

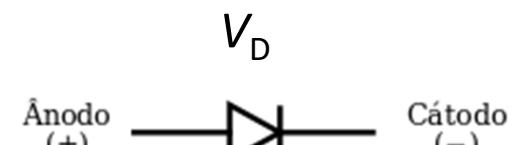
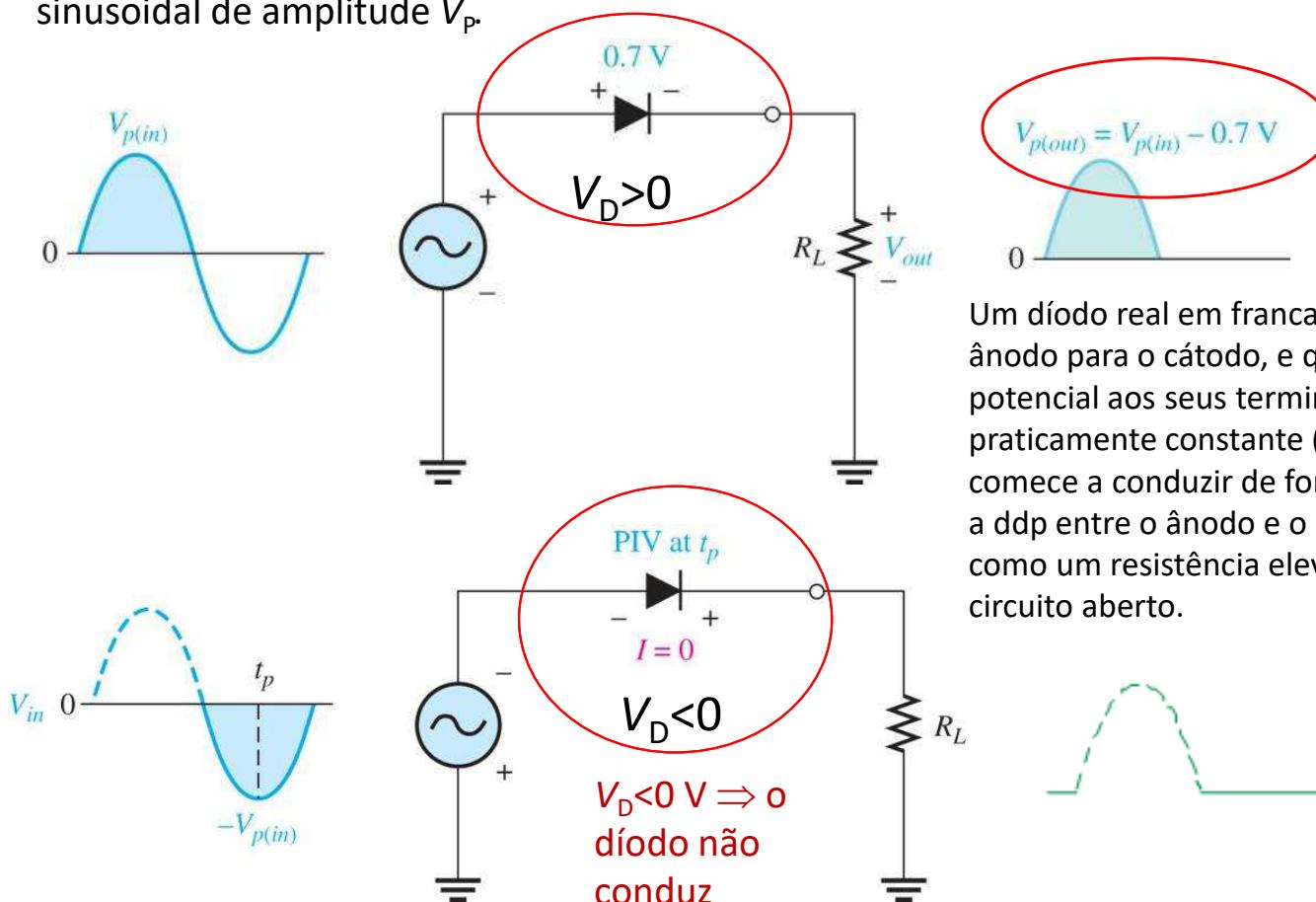


Retificação de meia onda

Num díodo em **franca condução** a corrente tem o sentido do ânodo para o cátodo.

Um **díodo de silício** em franca condução apresenta aos seus terminais uma queda de tensão de, aproximadamente, **0.7 V** ($\approx 0.6\text{-}0.8\text{ V}$).

Entre outras aplicações, o díodo é usado como retificador de corrente elétrica, como é exemplificado na figura abaixo: aplica-se à série díodo + resistência uma tensão sinusoidal de amplitude V_p .



CORRENTE

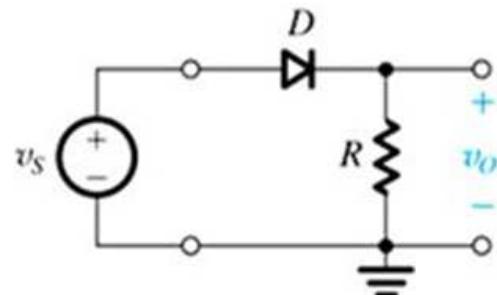
V_D : tensão aos terminais do díodo

$$V_{p(out)} = V_{P(in)} - 0.7\text{ V}$$

Um díodo real em franca condução é percorrido por uma no sentido do ânodo para o cátodo, e quando em franca condução a diferença de potencial aos seus terminais (i.e. a ddp entre o ânodo e o cátodo) é praticamente constante (igual a 0,7 V se for de silício). Contudo, para que comece a conduzir de forma clara é necessário que a ddp seja $\approx 0.7\text{ V}$. Se a ddp entre o ânodo e o cátodo for menor que 0 V, o díodo comporta-se como um resistência elevada, comportando-se, na prática, como um circuito aberto.

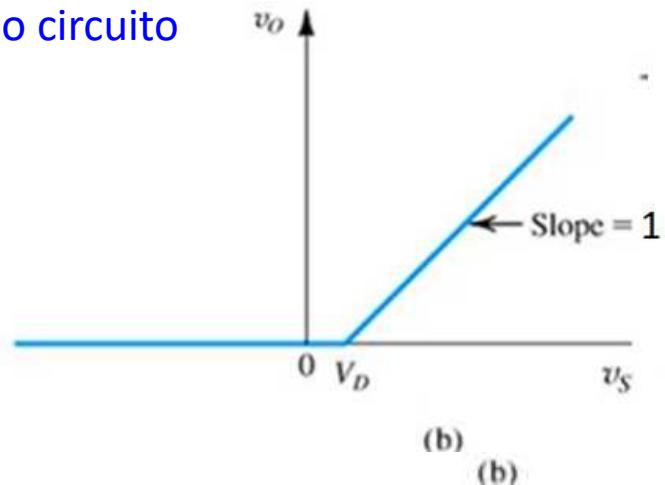
Sugestão: montar os circuitos no Pspice e verificar o funcionamento. Procurar Diode e escolher e.g. o díodo ideal e depois o díodo D1N4148. Escolher VSIN com amplitude 5 V, e frequência 50 Hz.

Retificação de meia onda com um díodo real

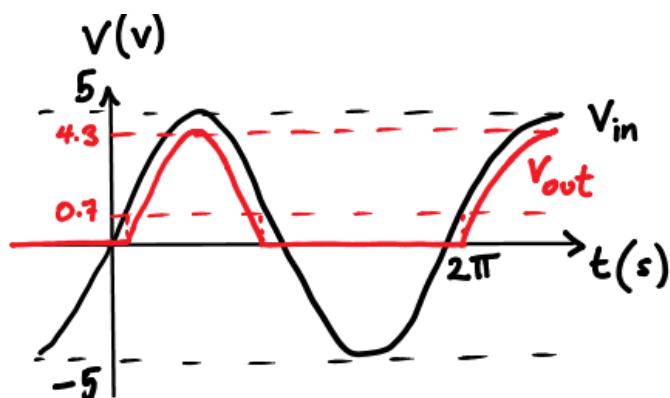
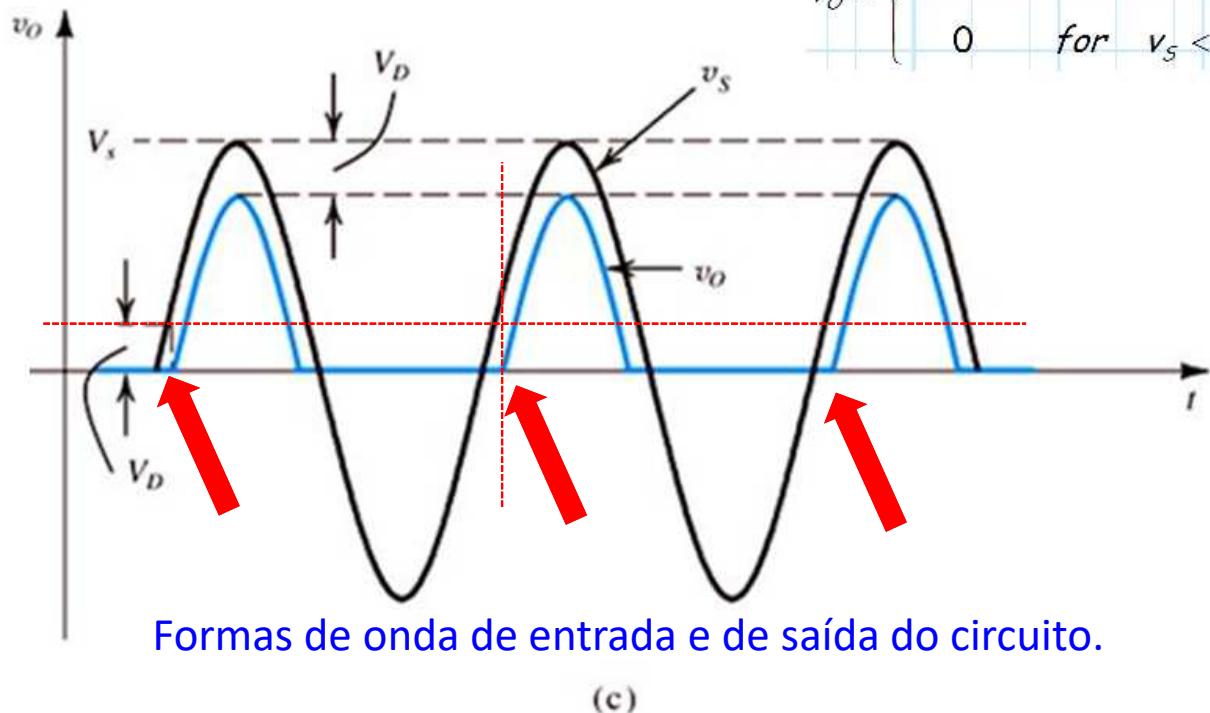


(a)

Característica de transferência do circuito

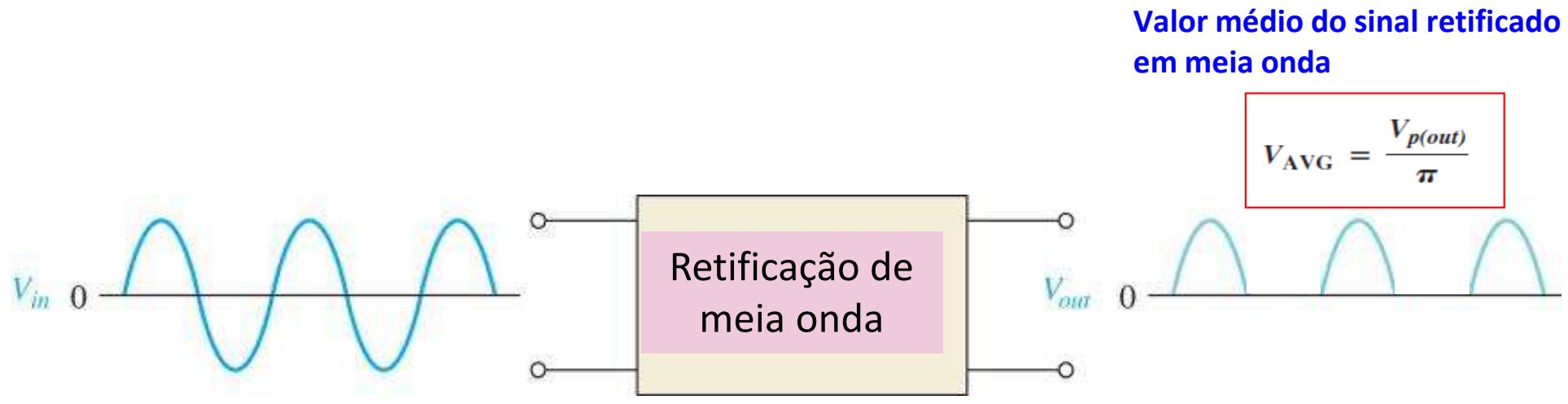


$$v_o = \begin{cases} v_s - 0.7 & \text{for } v_s > 0.7 \\ 0 & \text{for } v_s < 0.7 \end{cases}$$



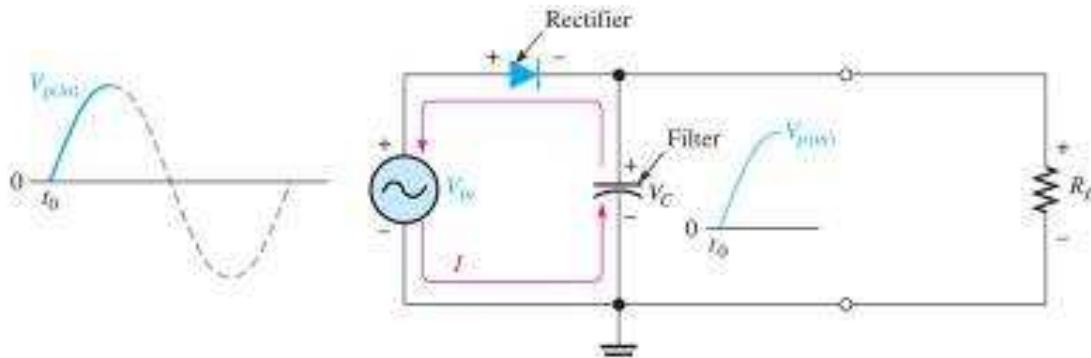
Quando a ddp aos terminais do díodo está compreendida entre 0 V e 0.7 V (no caso de díodos de silício), o díodo comporta-se como uma resistência cujo valor vai diminuindo à medida que a ddp se aproxima de 0.7 V, a partir do qual o díodo entra em franca condução.

Eficiência da retificação de meia onda

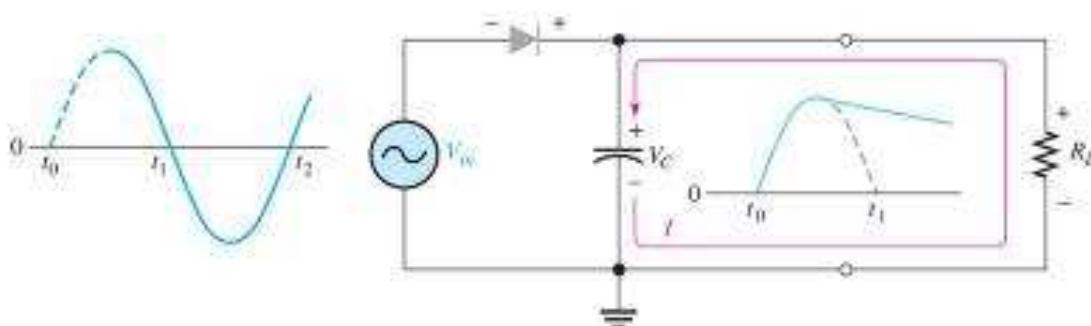


Eficiência do retificador - Valor máximo: 40.6%

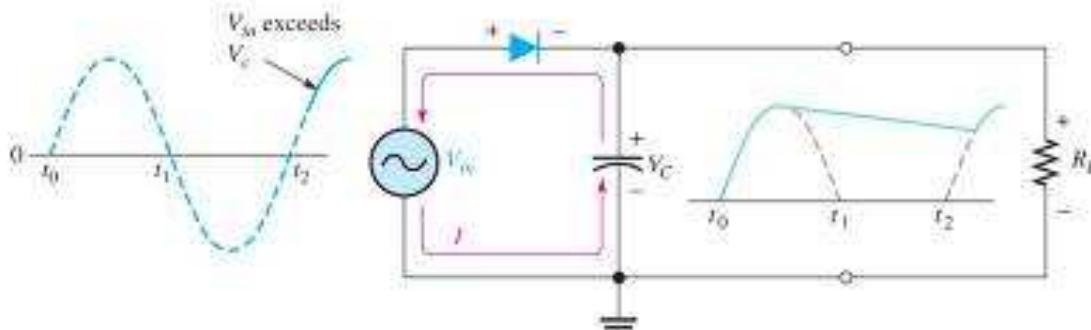
Retificação de meia de onda com filtro capacitivo



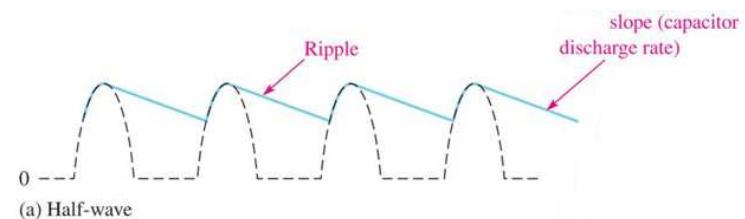
(a) Initial charging of capacitor (diode is forward-biased) happens only once when power is turned on.



(b) The capacitor discharges through R_L after peak of positive alternation when the diode is reverse-biased. This discharging occurs during the portion of the input voltage indicated by the solid dark blue curve.

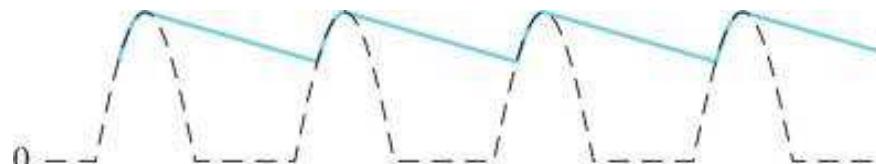


(c) The capacitor charges back to peak of input when the diode becomes forward-biased. This charging occurs during the portion of the input voltage indicated by the solid dark blue curve.

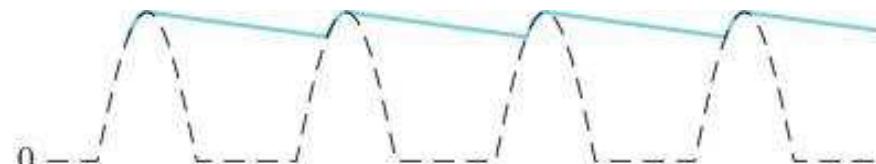


(a) Half-wave

Tensão de ondulação no retificador com filtro capacitivo

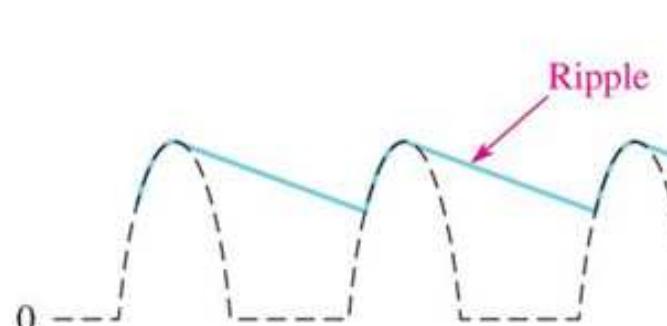


(a) Greater ripple means less effective filtering.



(b) Smaller ripple means more effective filtering.

Regra de ouro prática: para obter uma filtragem efetiva devemos fazer $R_L C$ igual ou superior a 10 vezes o período T da onda a retificar: $R_L C \geq 10 \times T$.



(a) Half-wave

slope (capacitor discharge rate)

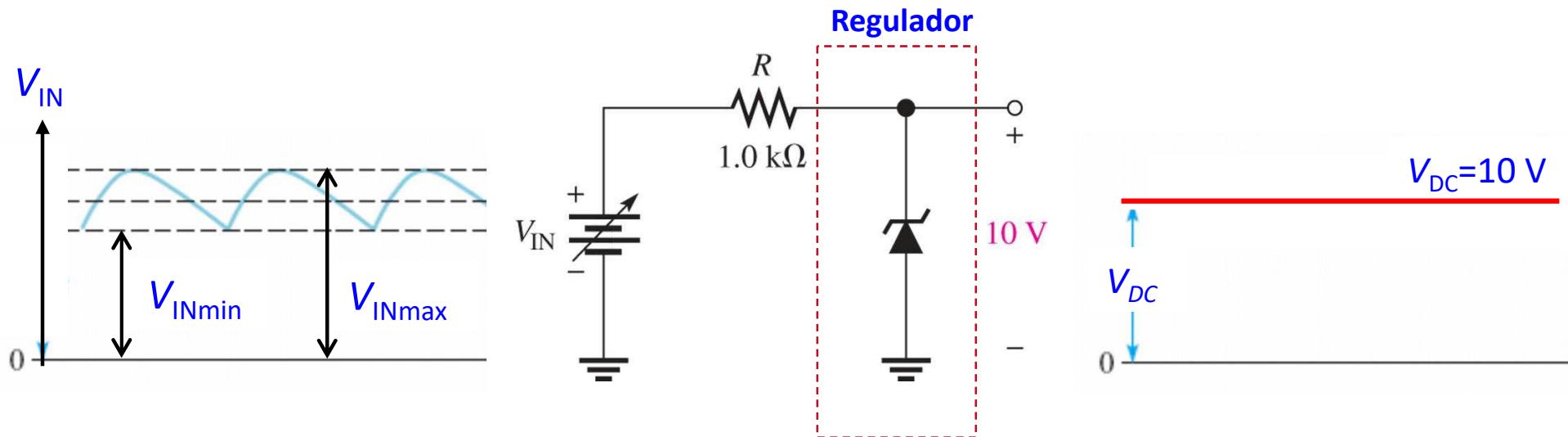
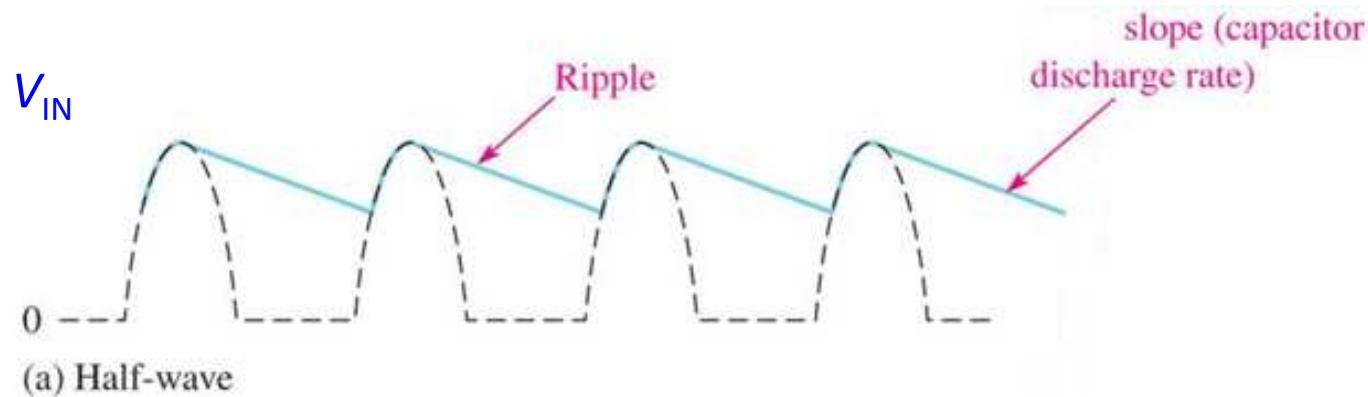
Tensão de *ripple* (ondulação)

$$V_r = \frac{Q}{C} = \frac{I \cdot T}{C}$$

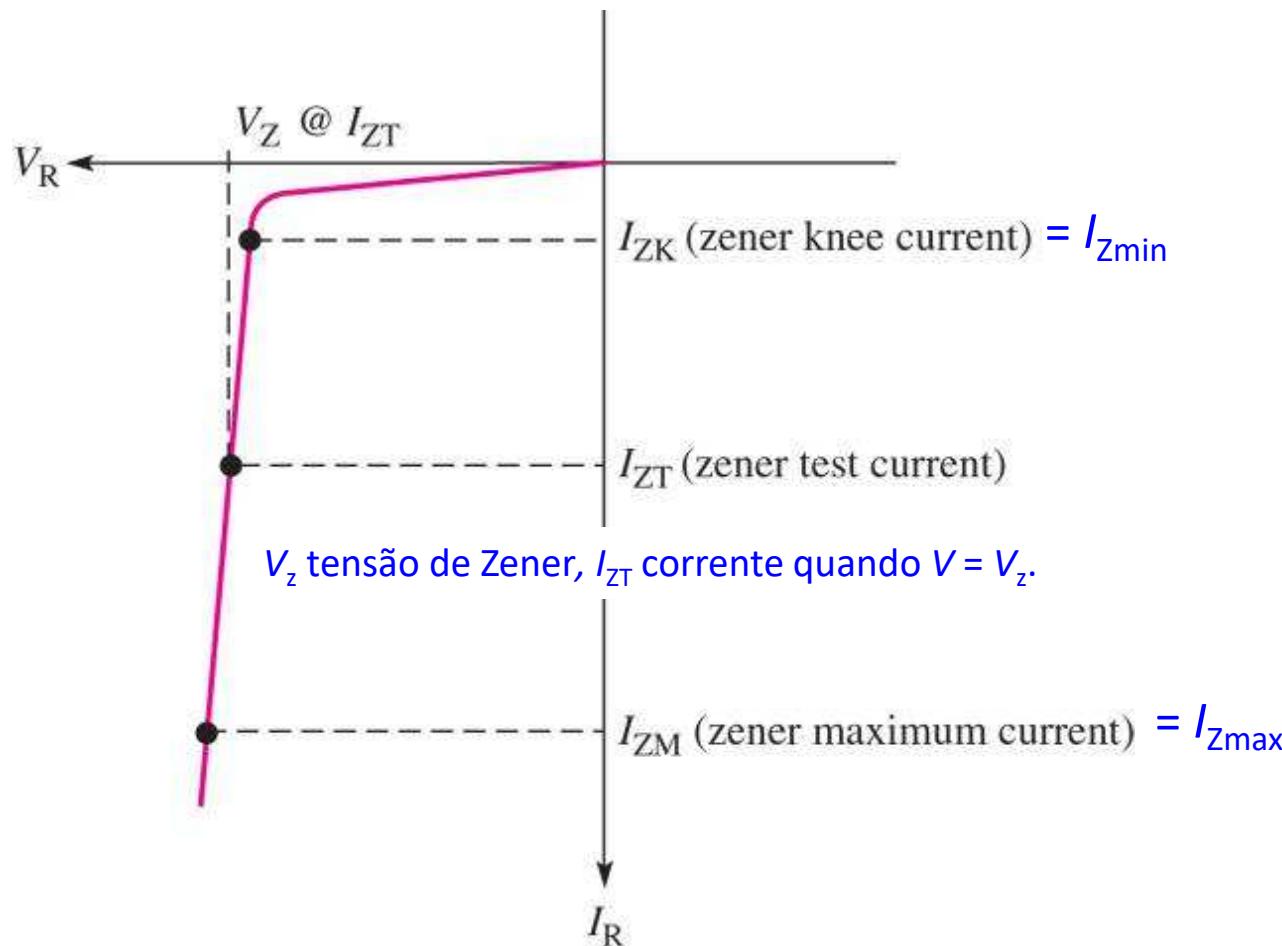
I : corrente máxima; T : período da onda;
 Q : carga máxima; C : capacidade do condensador

Regulação de tensão usando um díodo Zener

O objetivo é obter um valor de tensão constante (que não varia no tempo), exemplo: ex. 10 V. Para tal o mais indicado é usar um regulador de tensão como, por exemplo, um díodo Zener cuja tensão de Zener é igual à tensão que pretendemos obter.



Característica do díodo Zener na região de polarização inversa.

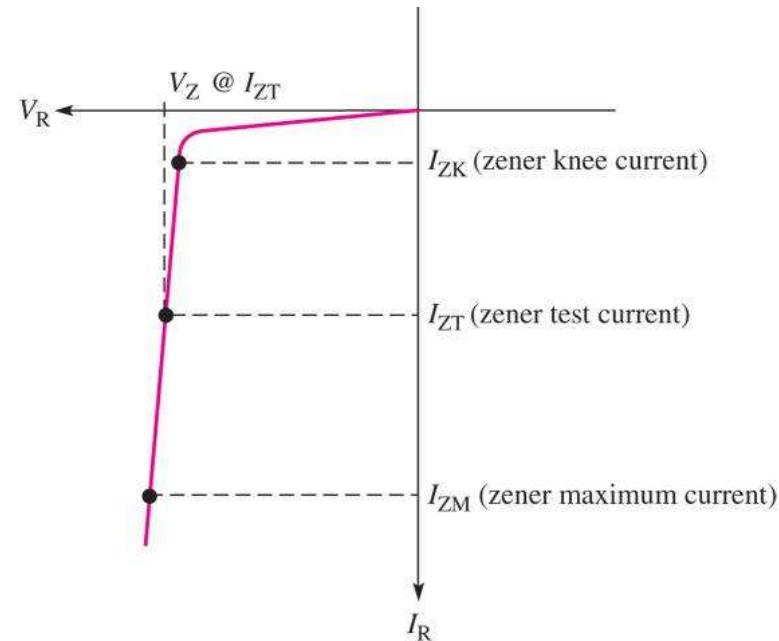
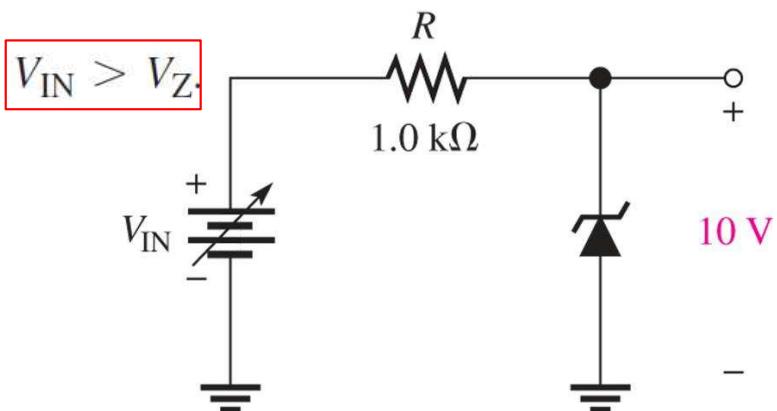


Um díodo Zener polarizado inversamente na tensão de Zener, V_z , pode ser usado como regulador de tensão se a corrente que o percorre for superior a um dado valor, I_{Zmin} , e inferior um valor máximo I_{Zmax} ,(para não destruir o díodo), definidos aquando da fabricação.

Regulação de tensão usando um díodo Zener

Um díodo Zener polarizado inversamente na tensão de Zener, V_Z , pode ser usado como regulador de tensão se a corrente que o percorre for superior a um dado valor, $I_{Z\min}$, e inferior um valor máximo $I_{Z\max}$,(para não destruir o díodo), definidos aquando da fabricação.

Exemplo: Seja um díodo Zener que assegura uma tensão constante de 10 V (Tensão de Zener, V_Z) aos seus terminais se a corrente que o percorre estiver compreendida entre 4 mA e 40 mA. No caso do circuito abaixo, qual será o intervalo de tensão que ele pode regular?



Consideremos o valor mínimo de corrente: 4 mA

$$V_R = (4 \text{ mA})(1.0 \text{ k}\Omega) = 4 \text{ V}$$

$$V_R = V_{IN} - V_Z$$

$$V_{IN\min} = V_{IN} = V_R + V_Z = 4 \text{ V} + 10 \text{ V} = 14 \text{ V}$$

Consideremos agora o valor máximo de corrente: 40 mA

$$V_R = (40 \text{ mA})(1.0 \text{ k}\Omega) = 40 \text{ V}$$

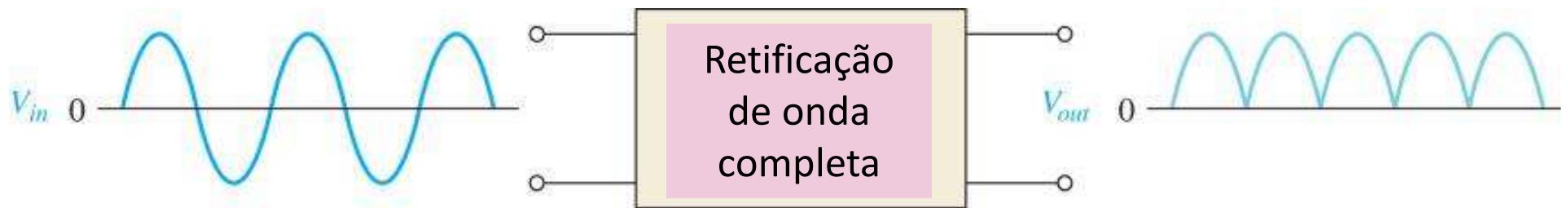
$$V_R = V_{IN} - V_Z$$

$$V_{IN\max} = V_{IN} = 40 \text{ V} + 10 \text{ V} = 50 \text{ V}$$

Eficiência da retificação de onda completa

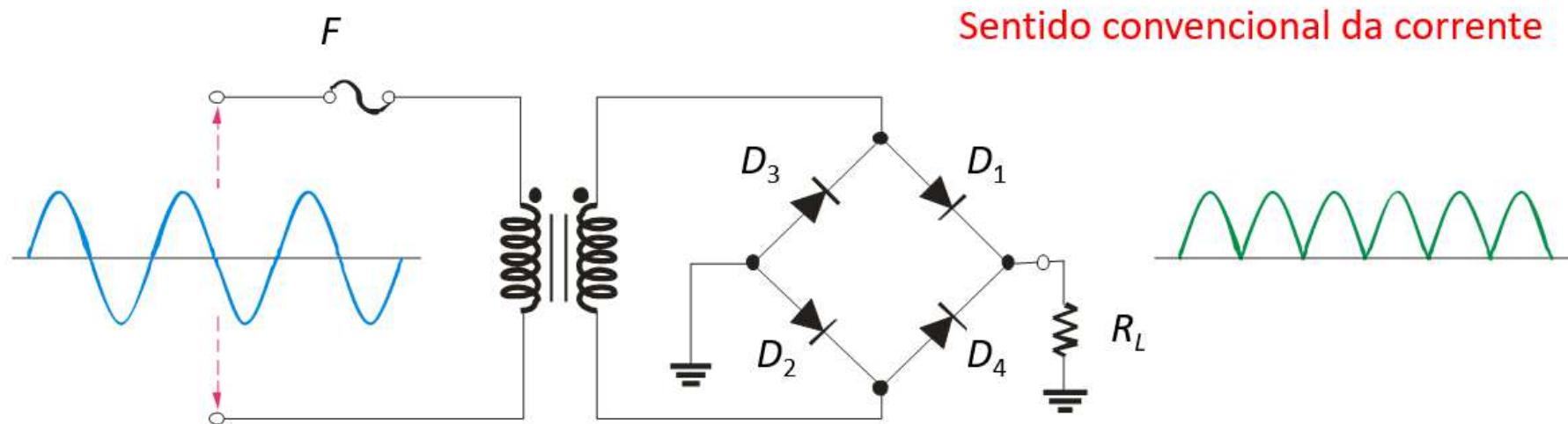
Valor médio do sinal retificado em onda completa

$$V_{AVG} = \frac{2V_{p(out)}}{\pi}$$



Eficiência do retificador - Valor máximo: 81.2%

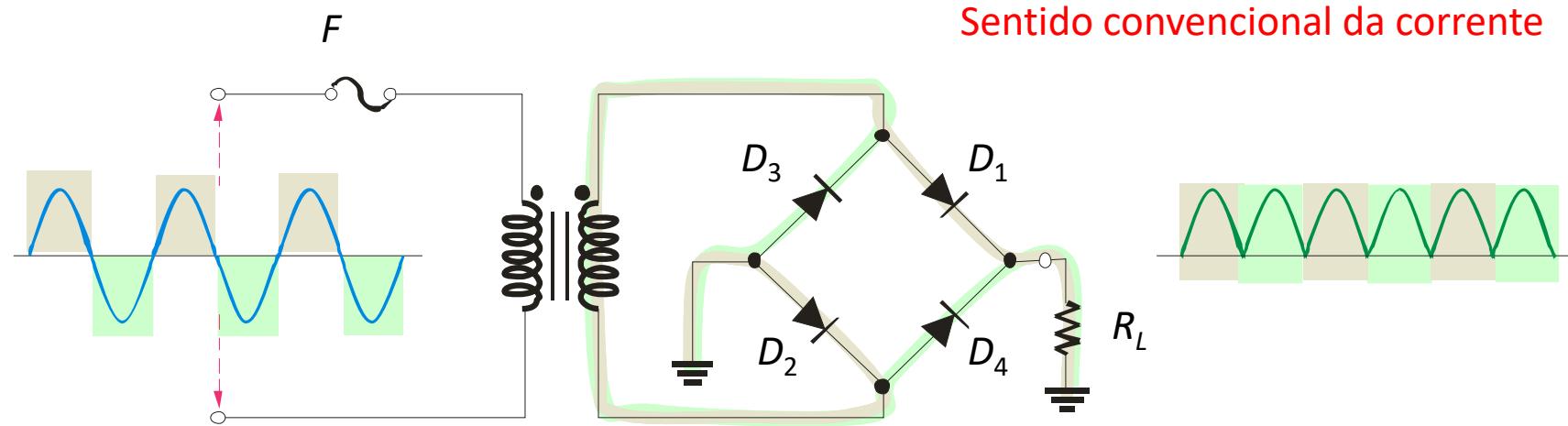
Retificação de onda completa com ponte 4 díodos



Valor médio do sinal retificado em onda completa

$$V_{AVG} = \frac{2V_{p(out)}}{\pi}$$

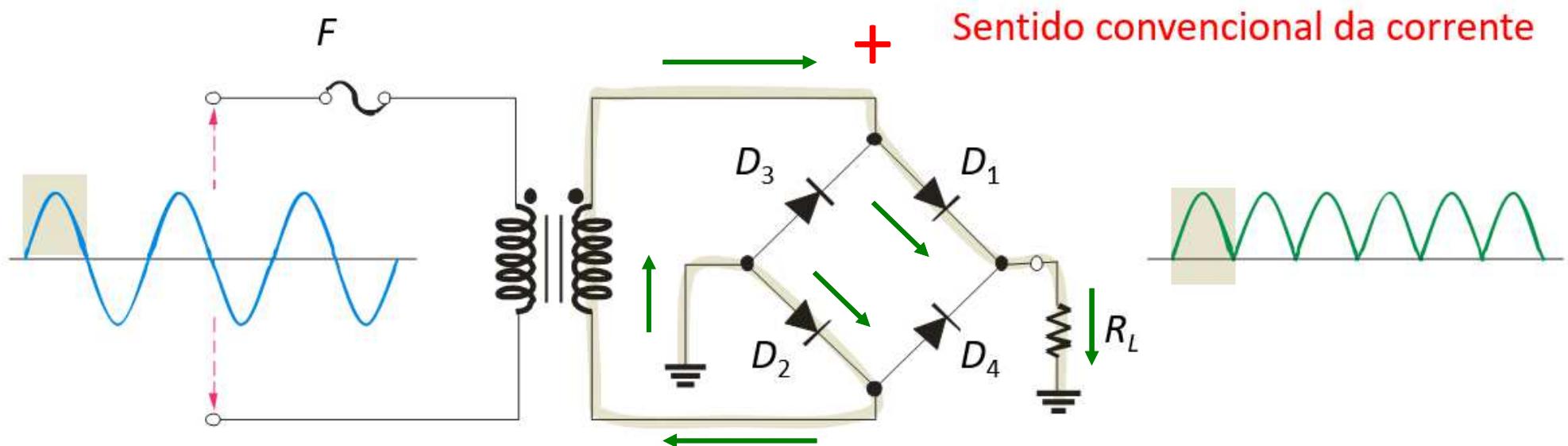
Retificação de onda completa com ponte 4 díodos



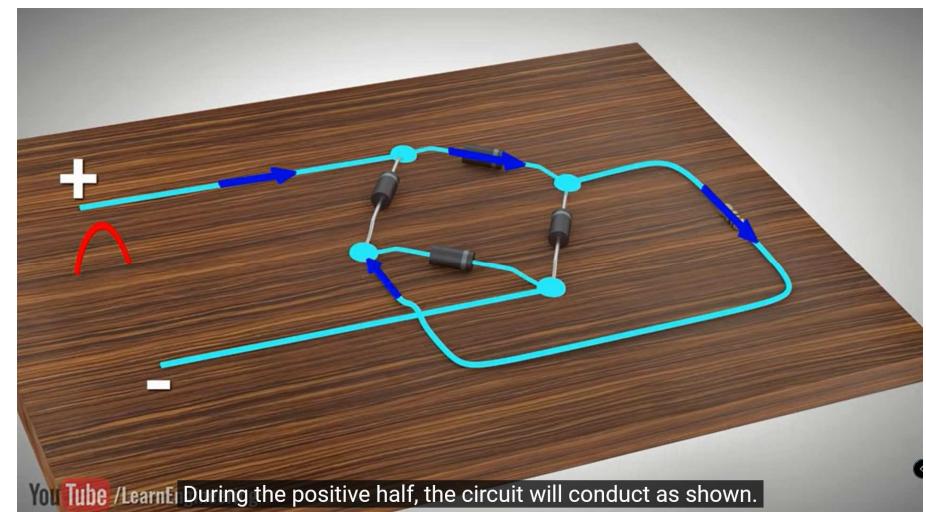
Valor médio do sinal retificado em onda completa

$$V_{AVG} = \frac{2V_{p(out)}}{\pi}$$

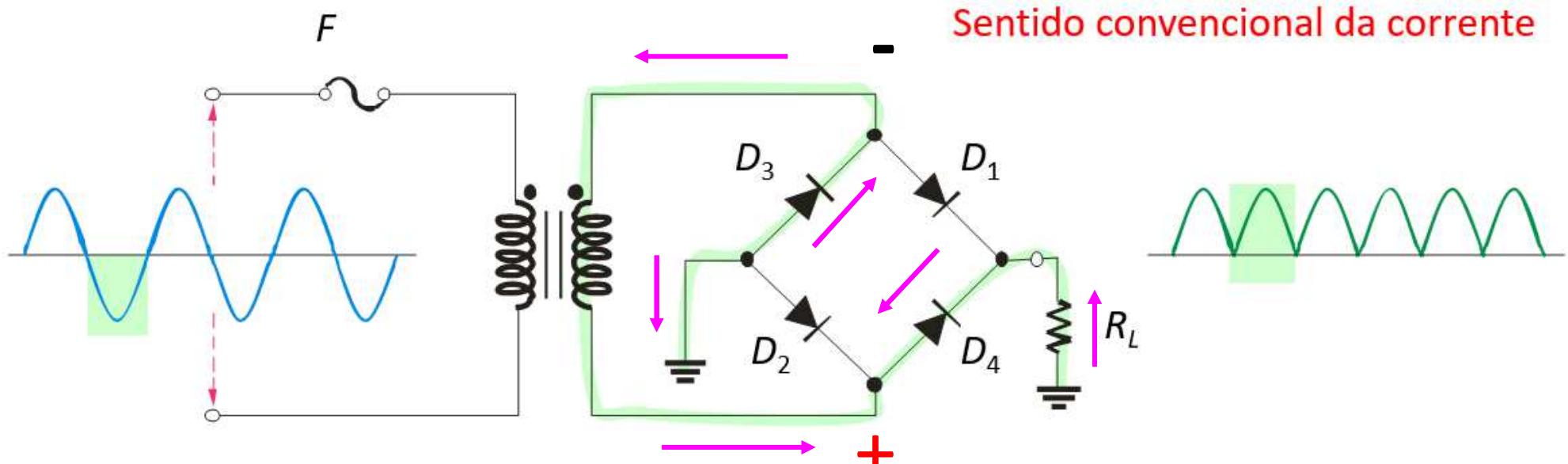
Retificação de onda completa com ponte 4 díodos



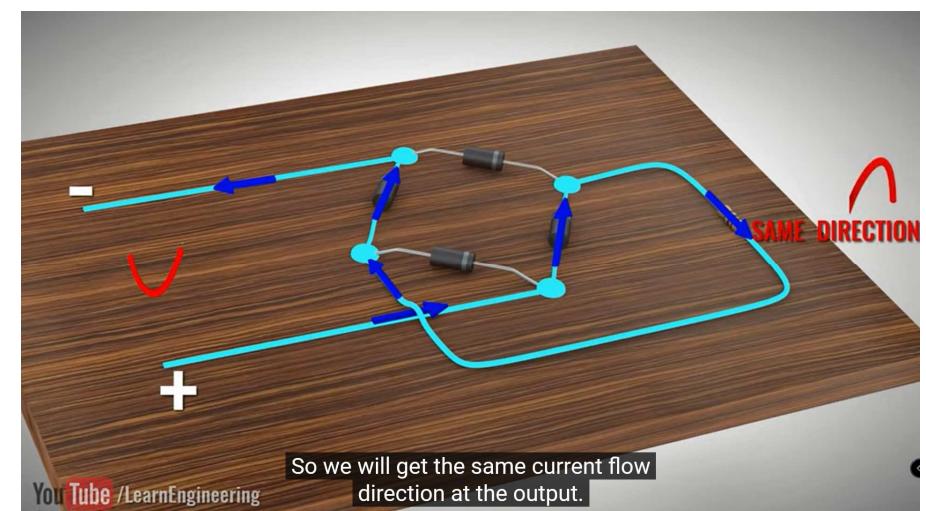
Os díodos D3 e D4 não conduzem
(não deixam passar corrente)



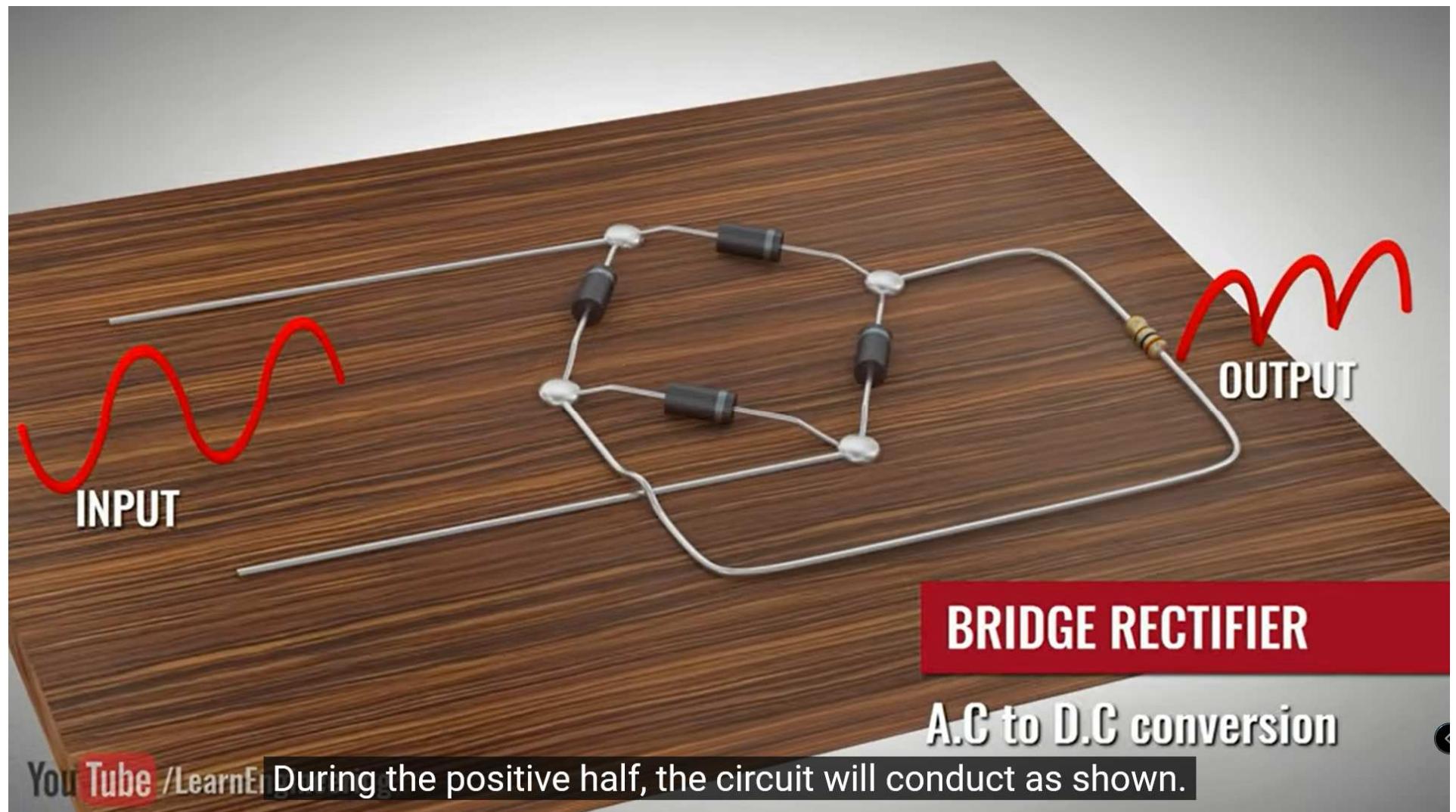
Retificação de onda completa com ponte 4 díodos



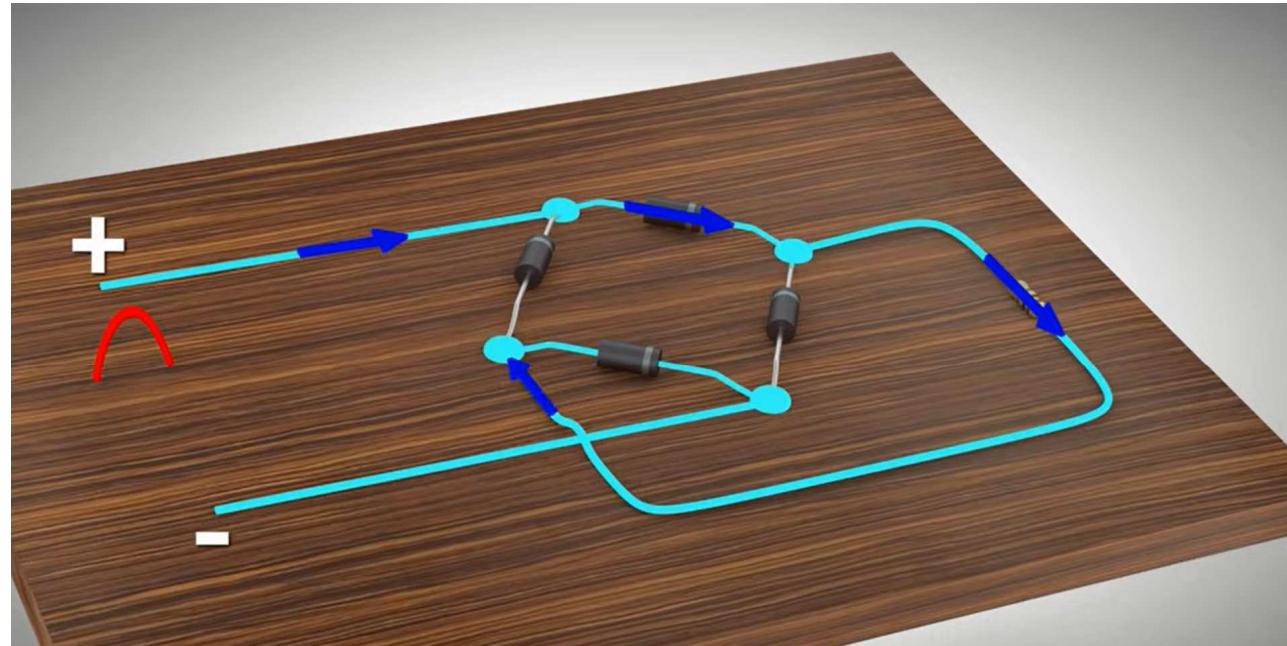
Os díodos D1 e D2 não conduzem
(não deixam passar corrente)



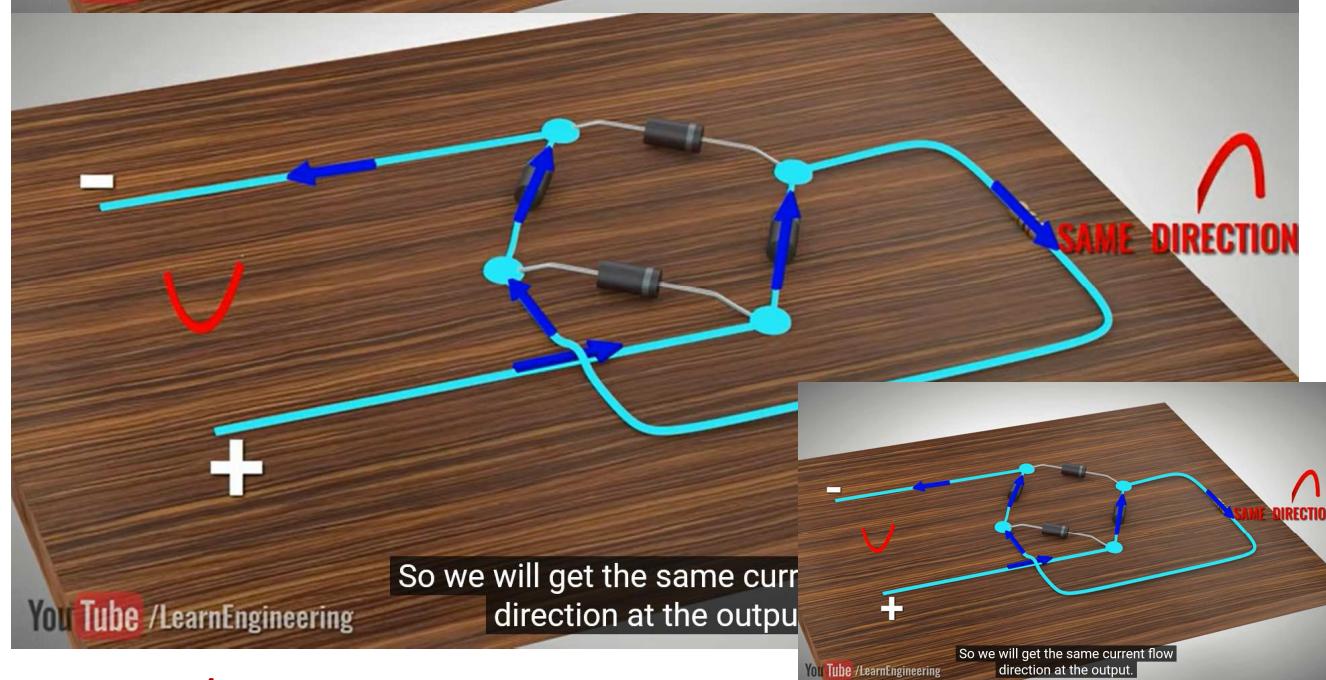
Retificação de onda completa com ponte de díodos



<https://www.youtube.com/watch?v=JNi6WY7WKAI>

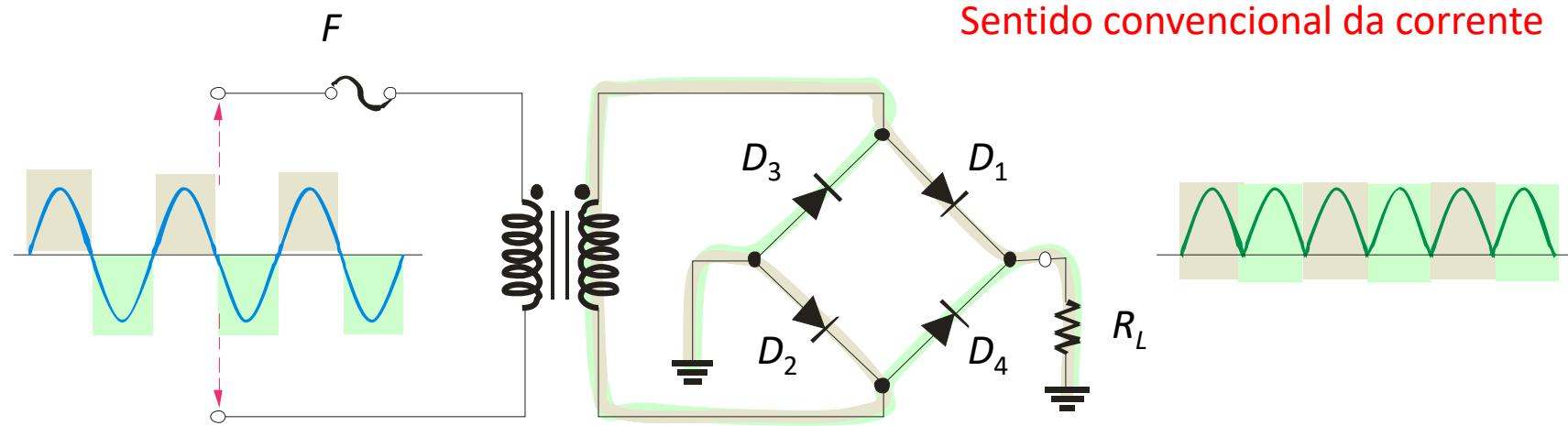


YouTube /LearnEngineering During the positive half, the circuit will conduct as shown.



<https://www.youtube.com/watch?v=JNi6WY7WKAI>

Retificação de onda completa com ponte 4 díodos

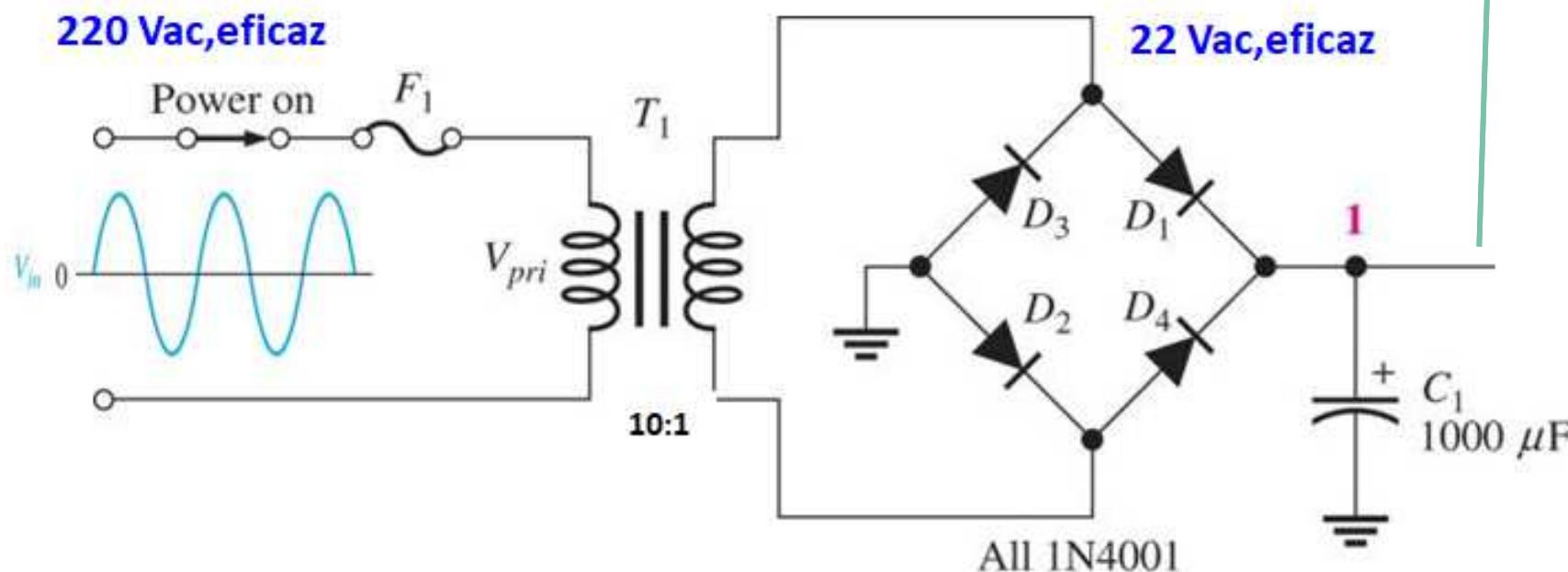
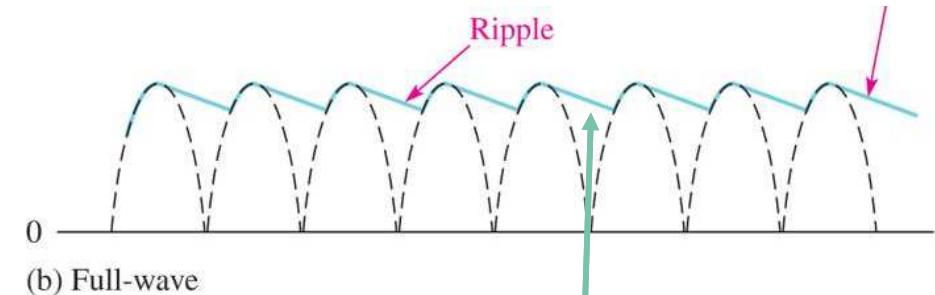


Valor médio do sinal retificado em onda completa

$$V_{AVG} = \frac{2V_{p(out)}}{\pi}$$

Eficiência do retificador - Valor máximo: 81.2%

Retificação de onda completa com filtragem



Tensão de *ripple* (ondulação)

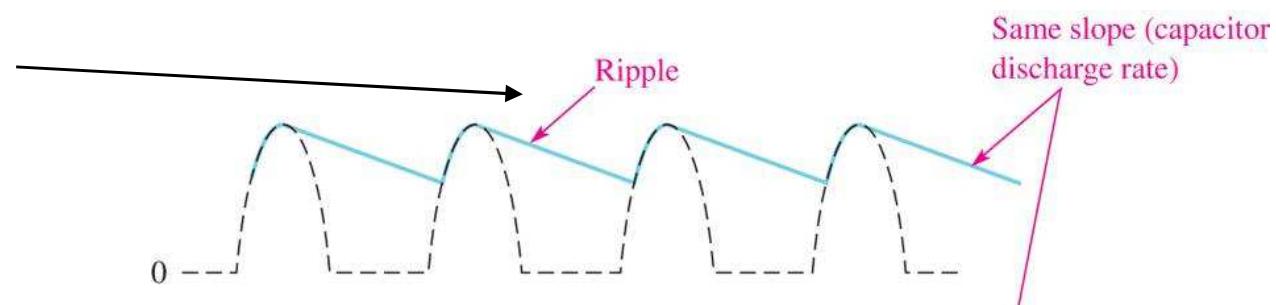
$$V_r = \frac{Q}{C} = \frac{I \cdot T}{C}$$

I : corrente máxima; T : período da onda;
 Q : carga máxima; C : capacidade do condensador

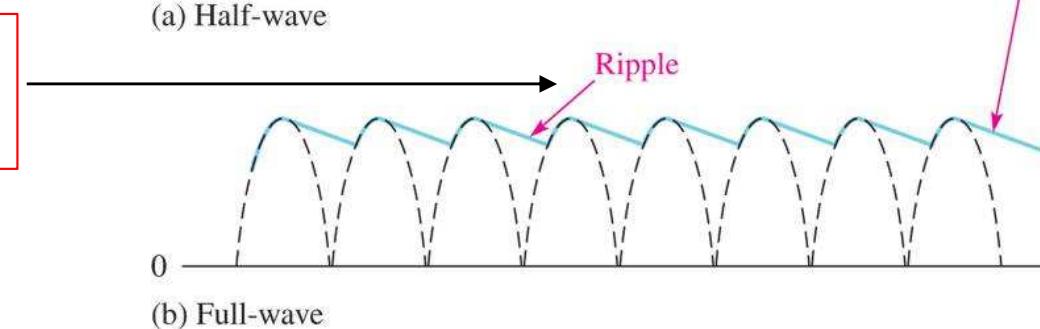
Retificação meia onda e onda completa com filtragem

Tensão de ondulação (ripple)

$$V_r = \frac{Q}{C} = \frac{I \cdot T}{C}$$

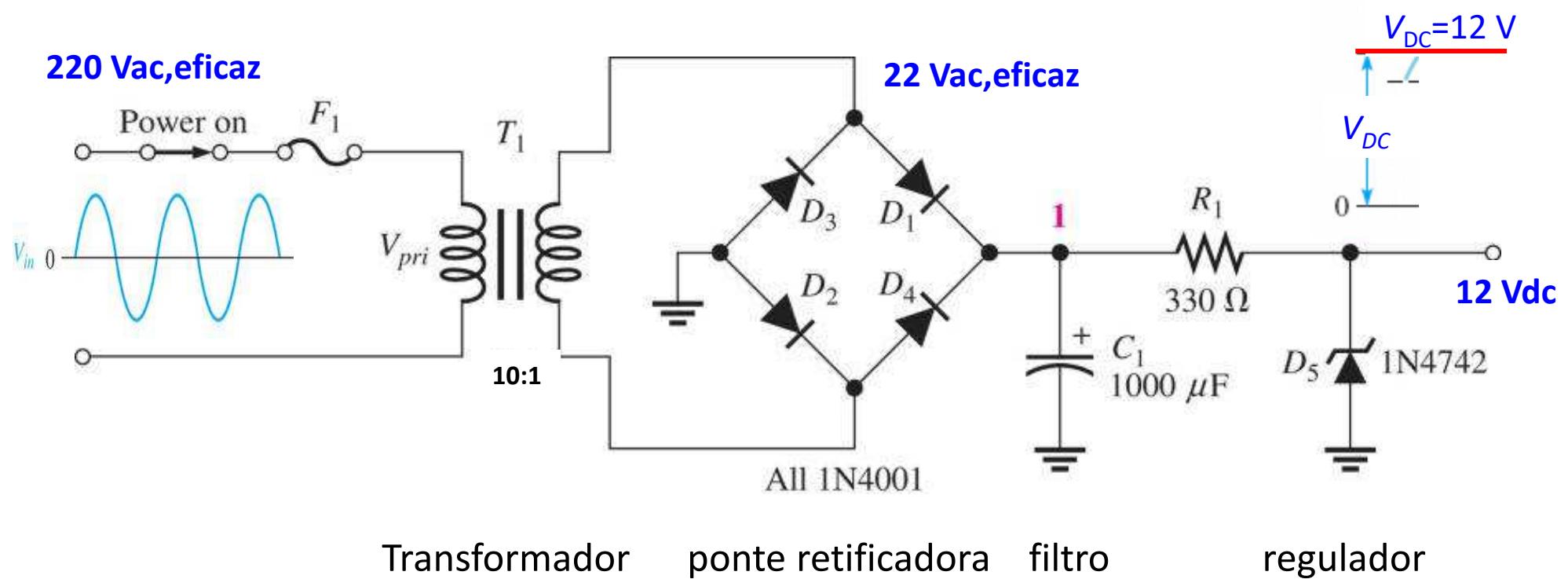


$$V_r = \frac{Q}{C} = \frac{I \cdot T}{2C}$$



Regulação de tensão com filtragem e díodo Zener

Exemplo de fonte de tensão dc com díodo Zener ($V_Z = 12 \text{ V}$)



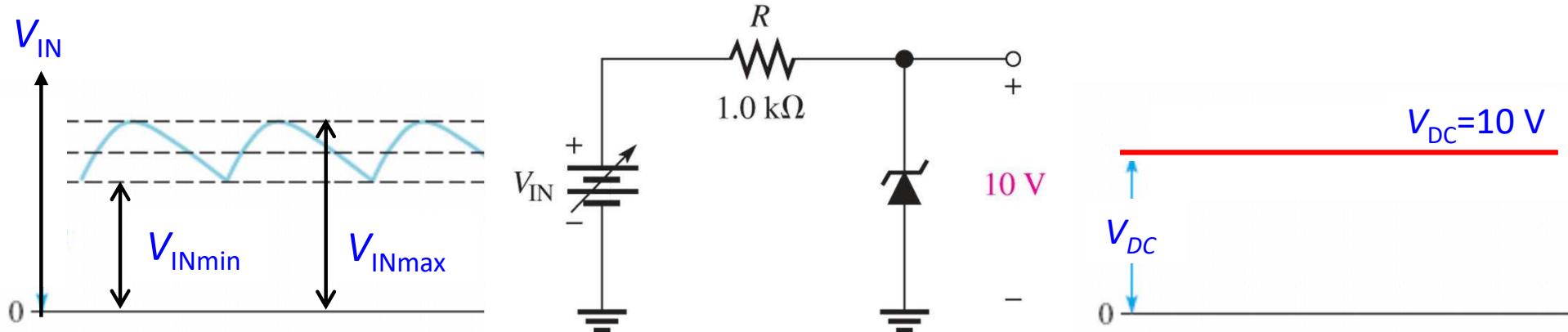
Fontes de tensão dc com reguladores de tensão integrados

Normalmente usam-se reguladores de tensão integrados (circuitos integrados, CI), que são capazes de proporcionar uma tensão constante e regulável entre o terminal de saída e o terminal comum, à entrada e à saída, dependendo da interação com o circuito exterior.

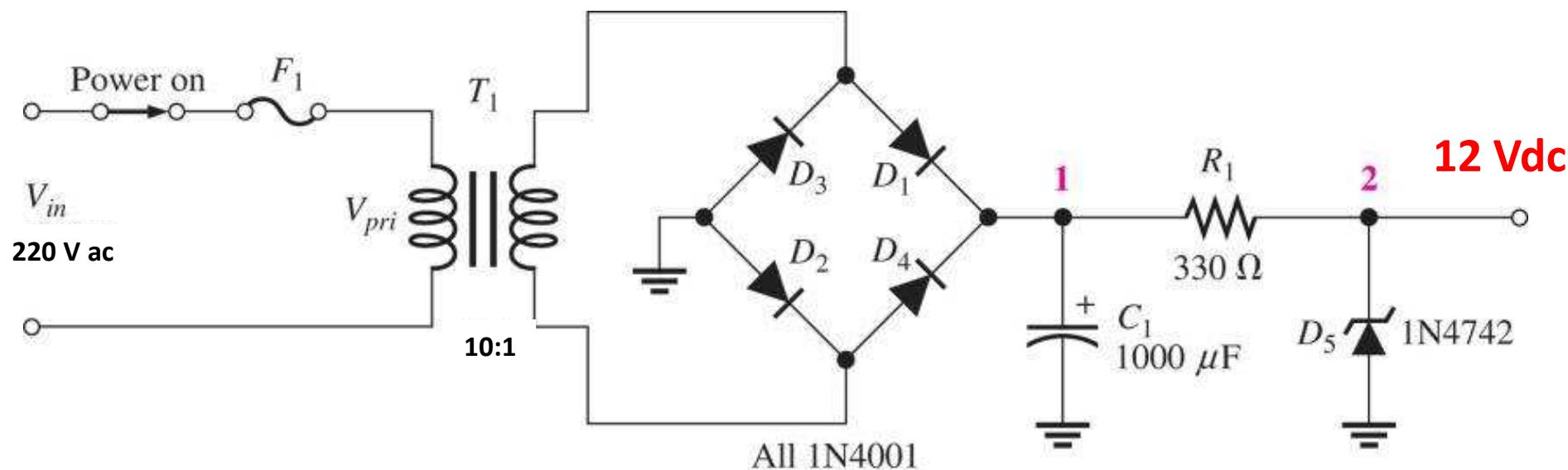
Um conjunto de reguladores de uso geral é a série de reguladores 78XX, onde XX representa os valores da tensão de saída (XX V). Por exemplo, o regulador 7815 apresenta na sua saída uma tensão de 15 V. Em geral, a atenuação da ondulação (ripple) é bastante elevada, várias dezenas de dB. Estes dispositivos estão protegidos internamente contra curto-circuitos e sobrecargas.

As características destes dispositivos podem ser consultadas em catálogos de eletrónica linear (assim como as de outros elementos lineares). Nos catálogos são fornecidas, pelos fabricantes, sugestões de circuitos de aplicação.

Regulação de tensão usando um díodo Zener

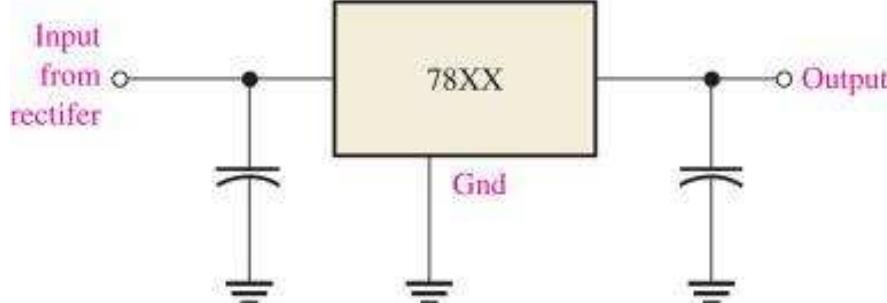


Exemplo de fonte de tensão dc com díodo Zener



Reguladores de tensão integrados

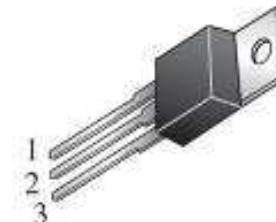
The 7800 series regulador



(a) Standard configuration

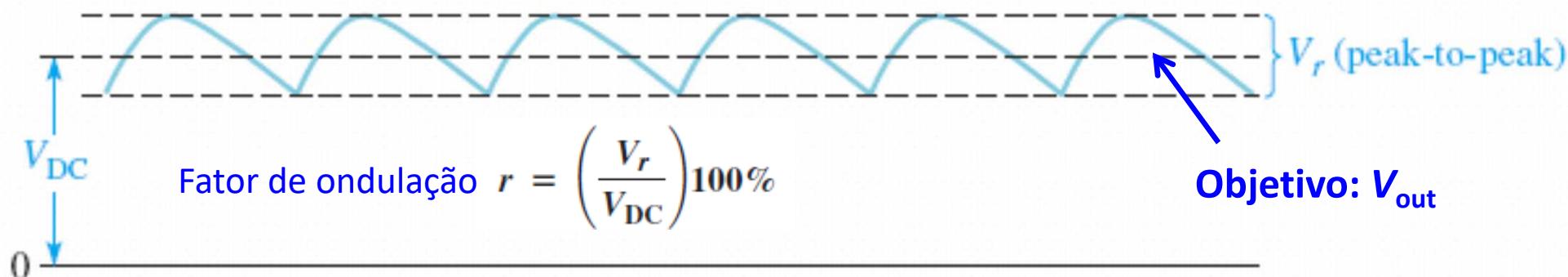
Type number	Output voltage
7805	+5.0 V
7806	+6.0 V
7808	+8.0 V
7809	+9.0 V
7812	+12.0 V
7815	+15.0 V
7818	+18.0 V
7824	+24.0 V

(b) The 7800 series

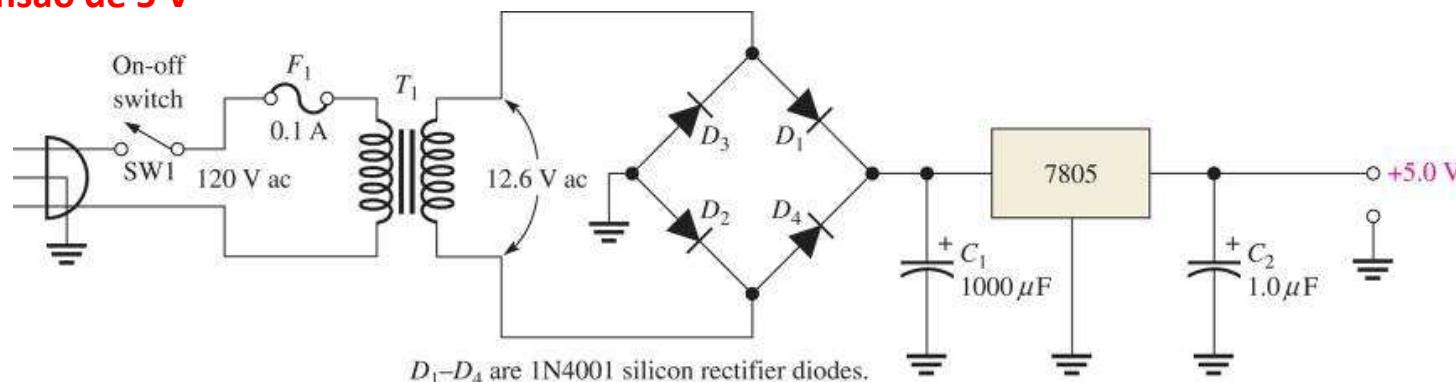


(Heatsink surface connected to Pin 2)

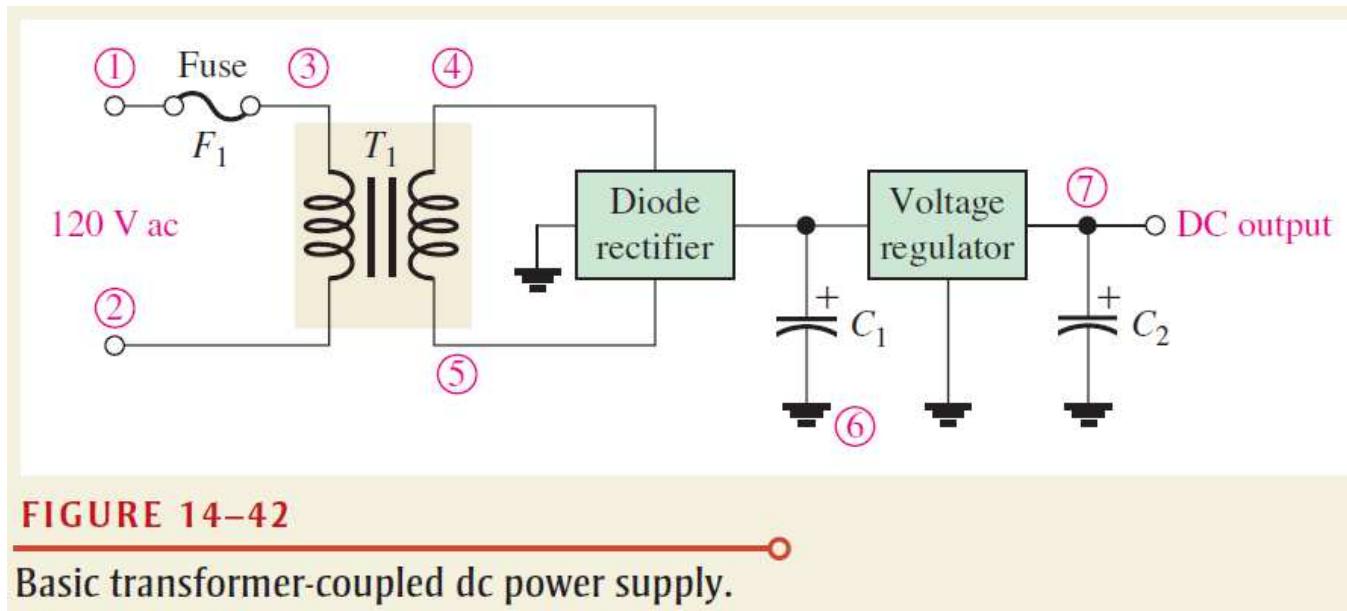
(c) Typical package



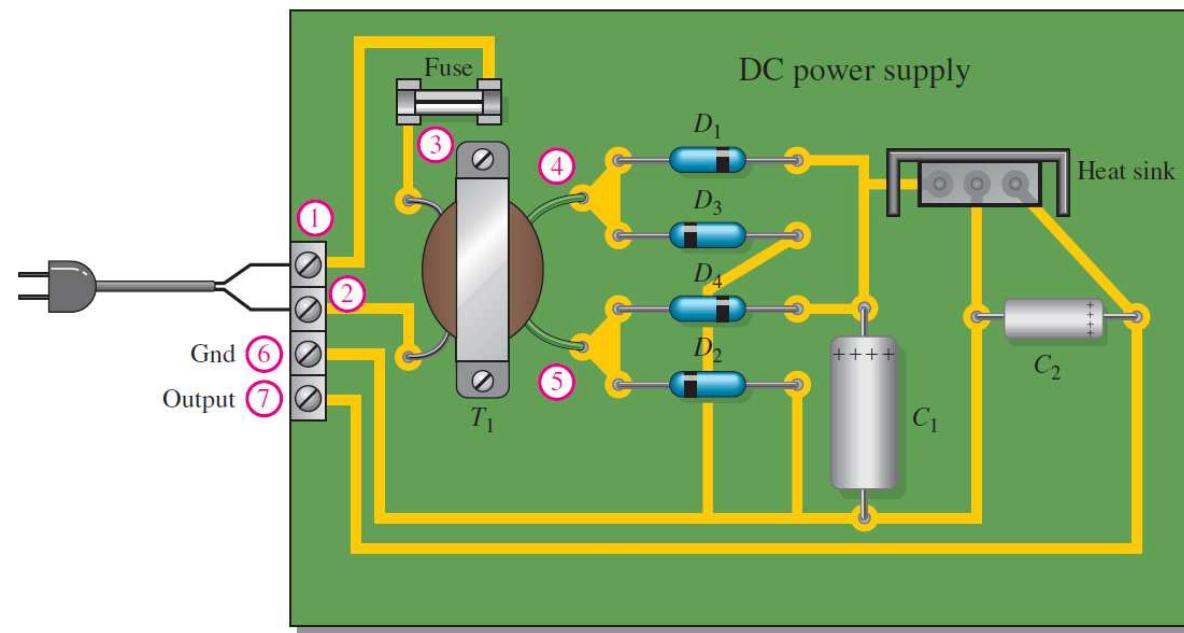
Fontes de tensão de 5 V



Esquema de fonte de tensão



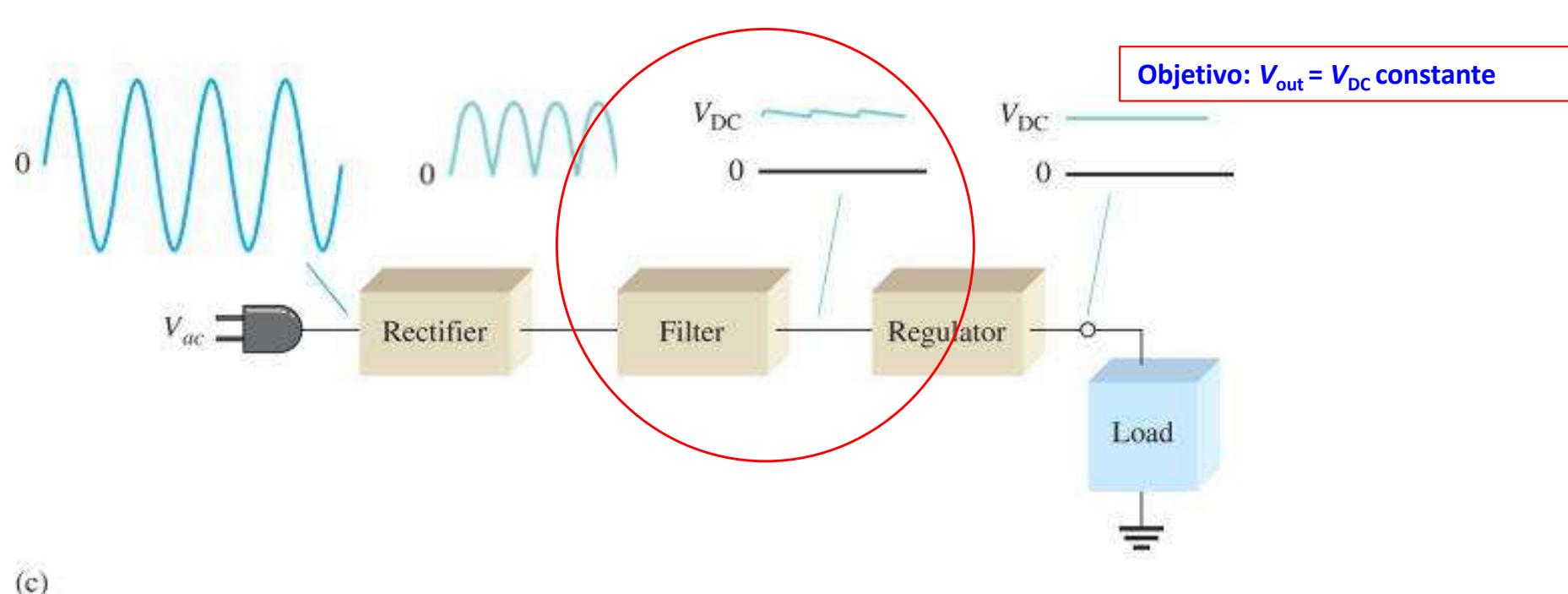
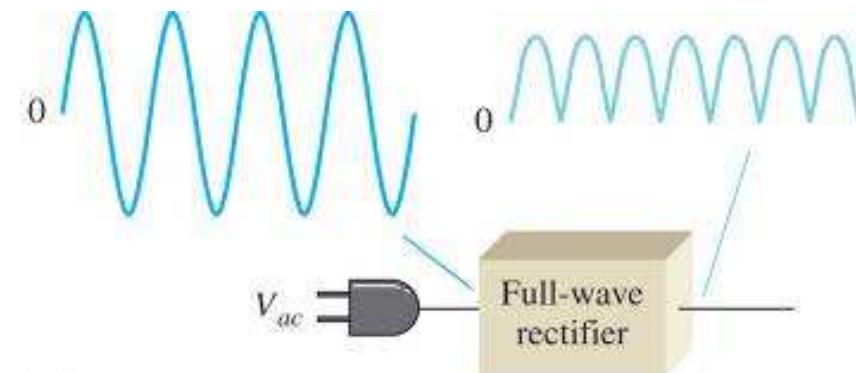
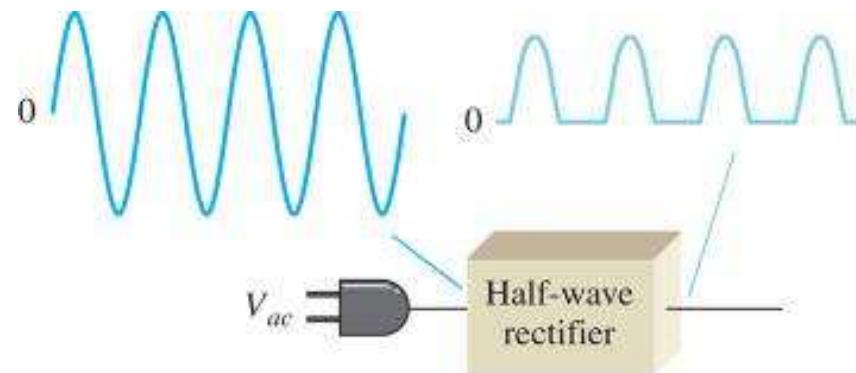
► **FIGURE 14-43**
Power supply board (top view).



TPC

Ver: <https://www.fluke.com/pt-pt/saber-mais/blog/aplicacoes-eletricas/o-que-e-um-diodo>

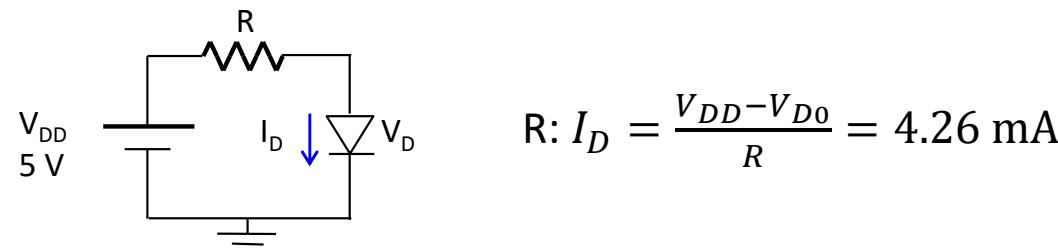
Exercício 1: explique como se pode obter um sinal DC constante a partir de um sinal alternado



Exercício 2: retificação de meia onda e de onda completa

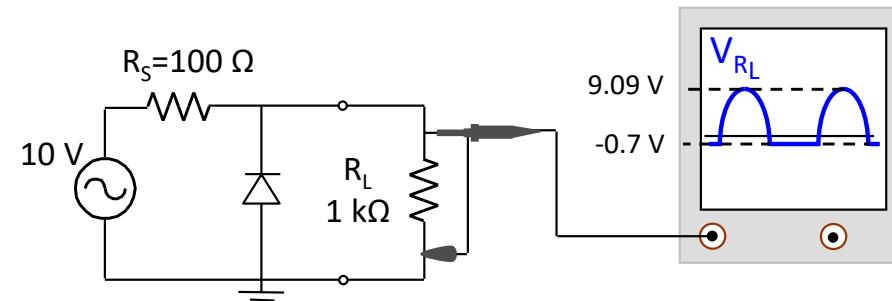
Determine a corrente I_D e a tensão aos terminais do diodo V_D ? Tome $V_D=0.65$ V

Sedra & Smith 3^aEd, Fig. 3.10, 3.14



Considere o circuito abaixo. O que é que espera observar no osciloscópio? Assuma que a base de tempo permite visualizar um ciclo e meio. Tome $V_D=0.7$ V.

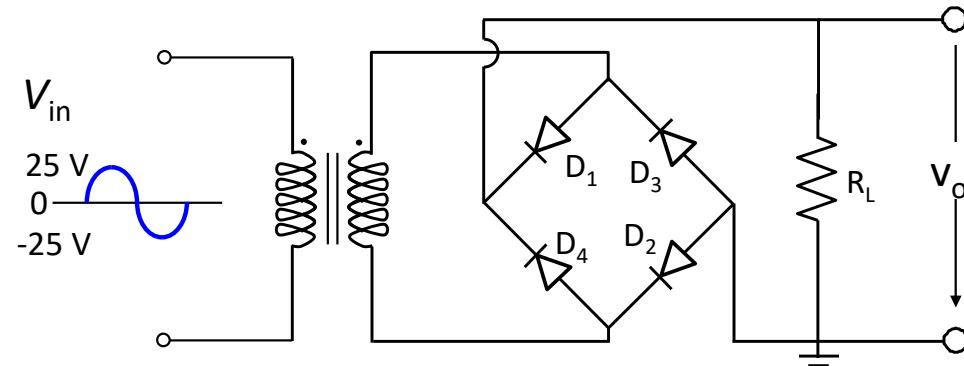
Sol: ver figura ao lado



Floyd 5^aEd, Fig. 17-29

Explique o funcionamento do circuito.
Determine a amplitude da tensão aos terminais de R_L . Assuma $V_D=0.7$ V

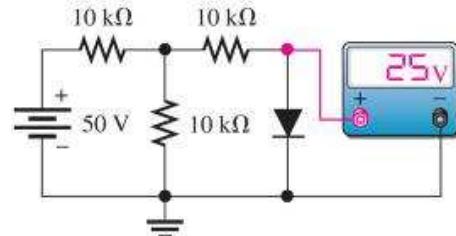
Sol: $V_0=23.6$ V.



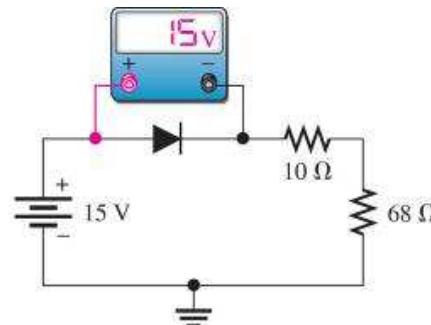
Floyd 5^aEd, Fig. 17-18

Exercício 3: Circuitos com díodos

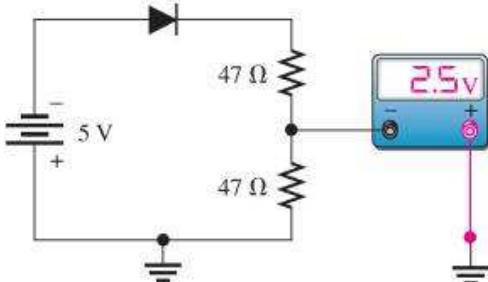
Considere os circuitos da figuras abaixo. Verificar se o valor indicado pelo voltímetro está correto.



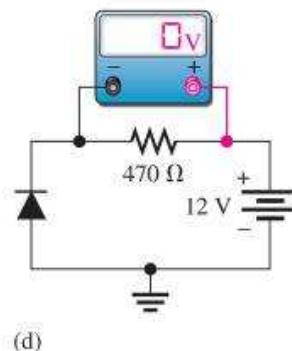
(a)



(b)



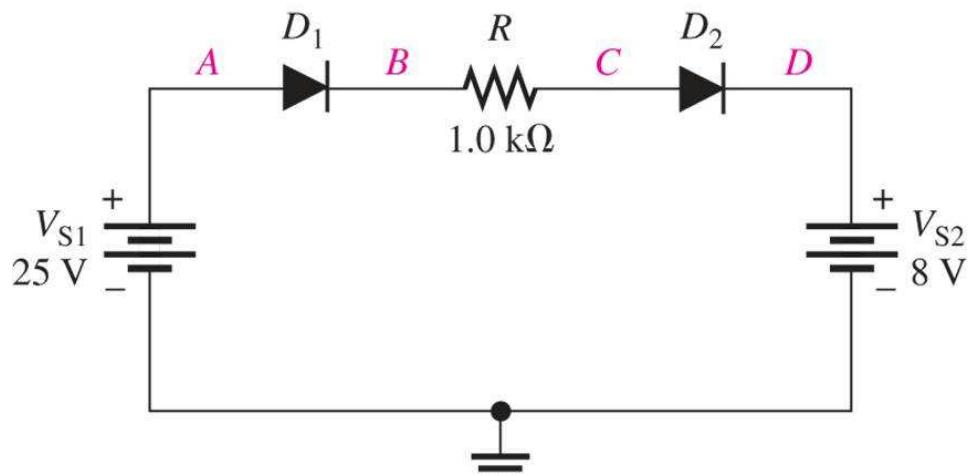
(c)



(d)



Determinar a tensão nos pontos A, B, C e D relativamente à terra /comum. Considere que quando em condução a tensão aos terminais do díodo é 0,7 V.



$$V_A = 25 \text{ V}; V_B = 24.3 \text{ V}; V_C = 8.7 \text{ V}; V_D = 8 \text{ V}$$

Sugestão: montar os circuitos no Pspice/LTSpice e verificar o funcionamento. Procurar Diode e escolher e.g. o díodo ideal e depois o díodo D1N4148

Exercício 4: Implementação das funções lógicas E e OU usando díodos

(como iremos ver, E e OU são duas operações elementares em eletrônica digital/sistemas digitais)

Em eletrônica digital/sistemas digitais as tensões nas entradas e nas saídas só podem estar compreendidas em duas gamas de tensão correspondentes aos valores lógicos ZERO (BAIXO, FALSO) e UM (ALTO, VERDADEIRO).

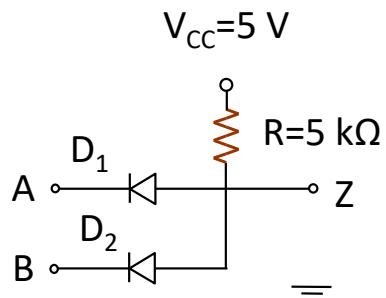
Temos “ZERO”: se o valor da tensão estiver entre 0 V e ≈ 0.8 V; temos “UM”: se estiver entre ≈ 2.4 V e 5 V.

Seja a função E com duas entradas A e B, e a saída Z:

Tabela de verdade da função E

A(V)	B(V)	Z
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	1

Implementação da porta E



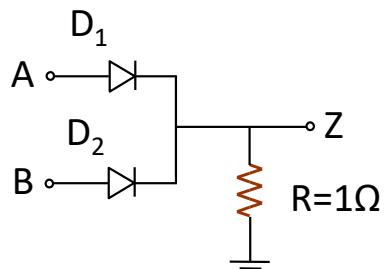
A(V)	B(V)	Z(V)	Valor lógico
0	0	0.7	0
5	0	0.7	0
0	5	0.7	0
5	5	5	1

Seja a função OU com duas entradas A e B, e a saída Z:

Tabela de verdade da função OU

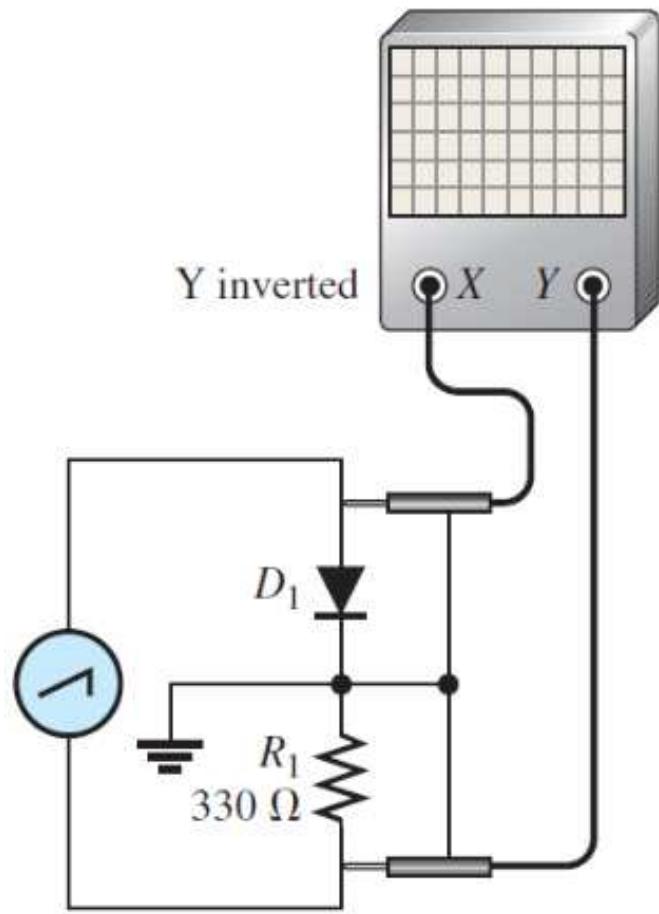
A(V)	B(V)	Z
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	1

Implementação da porta OU



A(V)	B(V)	Z(V)	Valor lógico
0	0	0	0
5	0	4.3	1
0	5	4.3	1
5	5	4.3	1

Exercício 5: Explique como se obtém a característica corrente-tensão de um diodo em polarização direta com a montagem da figura.



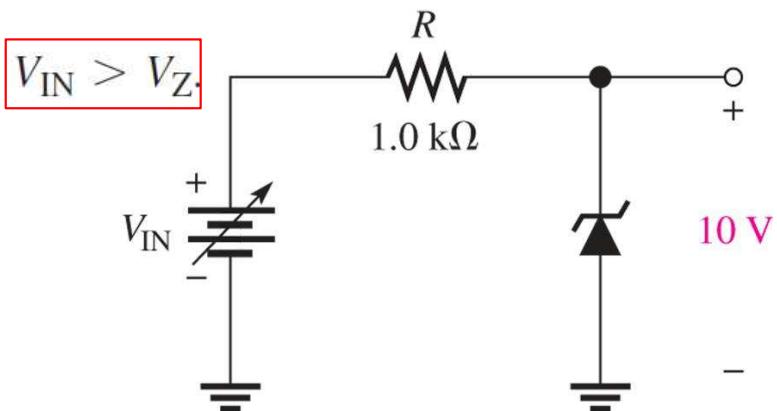
The diode forward V - I characteristic curve can be plotted on the oscilloscope using the circuit shown below. Channel 1 senses the voltage across the diode and channel 2 senses a signal that is proportional to the current. The scope must be in the X - Y mode. The signal generator provides a 5 Vpp sawtooth or triangular waveform at 50 Hz, and its ground must not be the same as the scope ground. Channel 2 (the Y channel) must be inverted for the displayed curve to be properly oriented.

Floyd 5^aEd, Fig. 16-7 (13)

Exercício 6: Regulação de tensão usando um díodo Zener

Um díodo Zener polarizado inversamente na tensão de Zener, V_Z , pode ser usado como regulador de tensão se a corrente que o percorre for superior a um dado valor, $I_{Z\min}$, e inferior a um valor máximo $I_{Z\max}$, (para não destruir o díodo), definidos aquando da fabricação.

Exemplo: Seja um díodo Zener que assegura uma tensão constante de 10 V (Tensão de Zener, V_Z) aos seus terminais se a corrente que o percorre estiver compreendida entre 4 mA e 40 mA. No caso do circuito abaixo, qual será o intervalo de tensão que ele pode regular?

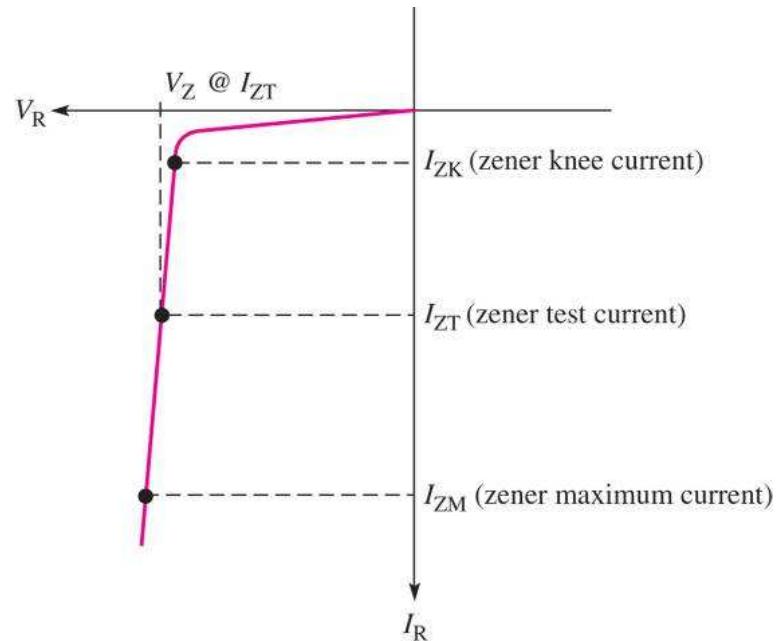


Consideremos o valor mínimo de corrente: 4 mA

$$V_R = (4 \text{ mA})(1.0 \text{ k}\Omega) = 4 \text{ V}$$

$$V_R = V_{IN} - V_Z$$

$$V_{IN\min} = V_{IN} = V_R + V_Z = 4 \text{ V} + 10 \text{ V} = 14 \text{ V}$$



Consideremos agora o valor máximo de corrente: 40 mA

$$V_R = (40 \text{ mA})(1.0 \text{ k}\Omega) = 40 \text{ V}$$

$$V_R = V_{IN} - V_Z$$

$$V_{IN\max} = V_{IN} = 40 \text{ V} + 10 \text{ V} = 50 \text{ V}$$

Para quem quer ficar a saber um pouco mais sobre junções p-n

O díodo de junção é um elemento básico para quase todos os dispositivos semicondutores que usam uma junção P-N.^[1]

O transistor (bipolar) é formado por duas junções p-n, formando junções p-n-p ou n-p-n.

Semicondutores extrínsecos. Impurezas.

Dopagem de semicondutores e dopantes aceitadores e dopantes dadores

Adicionando certos átomos (impurezas para o silício) ao silício puro (intrínseco), por exemplo, 1 impureza por cada 10 milhões de átomos de silício, pode-se aumentar a concentração de eletrões na banda de condução ou de vazios na banda de valência do cristal.

Para aumentar o número de eletrões na banda de condução são usados átomos pentavalentes (**impurezas dadoras - impurezas que aumentam o número de eletrões de condução**), formando um **cristal de silício tipo n**.

Para aumentar o número de vazios na banda de valência são usados átomos trivalentes (**impurezas aceitadoras - impurezas que aumentam o número de vazios na banda de valência**), formando um **cristal de silício tipo p**.

Quantos átomos de silício há em 1 cm cúbico de silício?

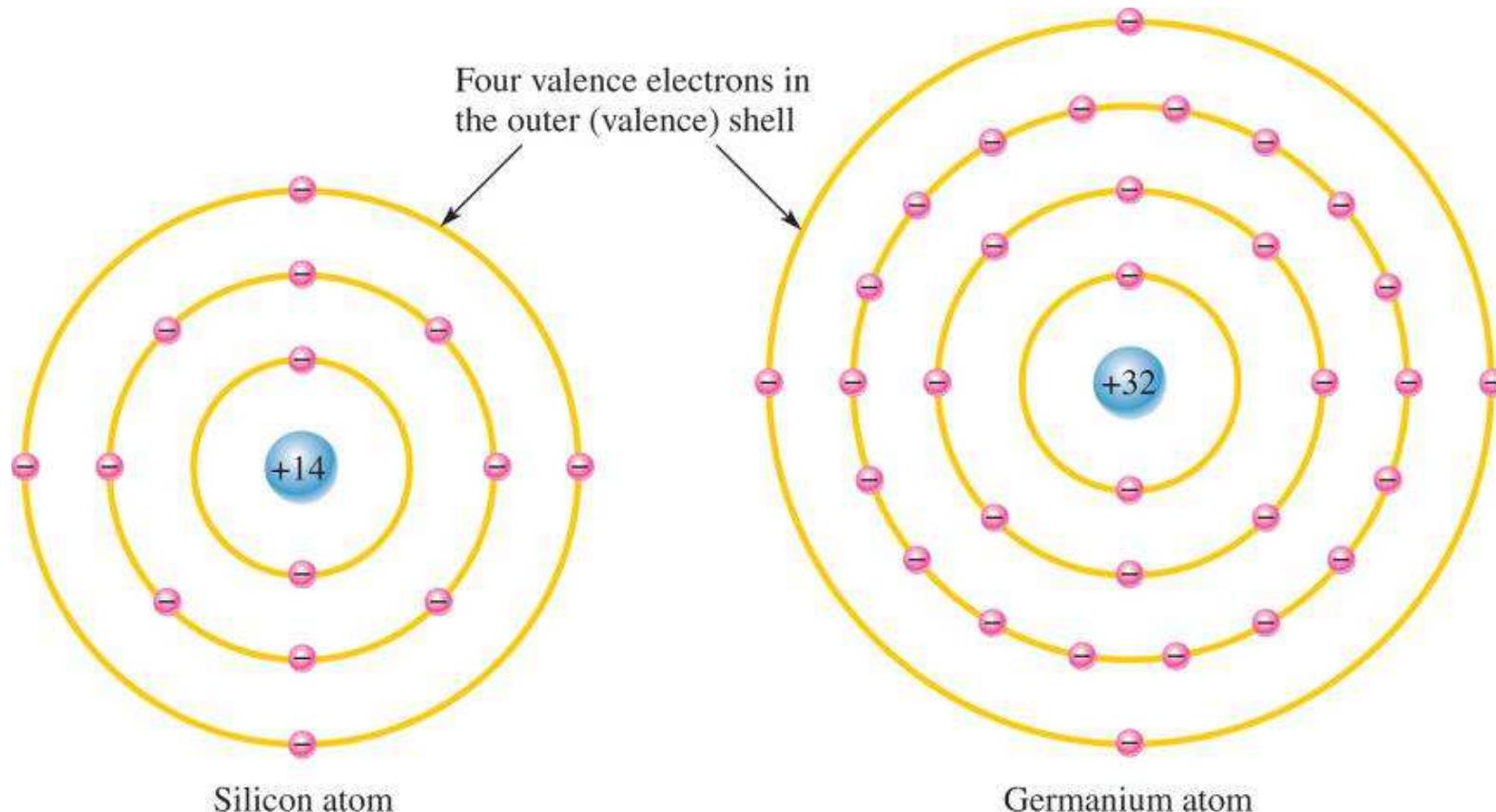
Massa atómica do silício: 28 g/mol; densidade do silício: 2.33 g/cm³

O número de átomos em 1 cm³ de silício = à massa de silício em 1 cm³ / número de átomos em 1 g de silício = $2.33 \text{ g} / (6 \times 10^{23} \text{ átomos} / 28 \text{ g}) \sim 5 \times 10^{22} \text{ átomos}$.

Se a dopagem for, por exemplo, com 1×10^{16} impurezas dadoras/cm³, a condutividade do silício aumenta, grosso modo, na mesma ordem de grandeza.

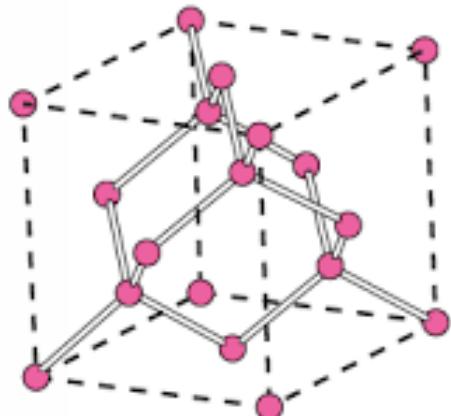
III	IV	V
B	C	N
Al	Si	P
Ga	Ge	As
In	Sn	Sb

Diagramas representando as distribuição eletrónica nos átomos de silício e de germânio

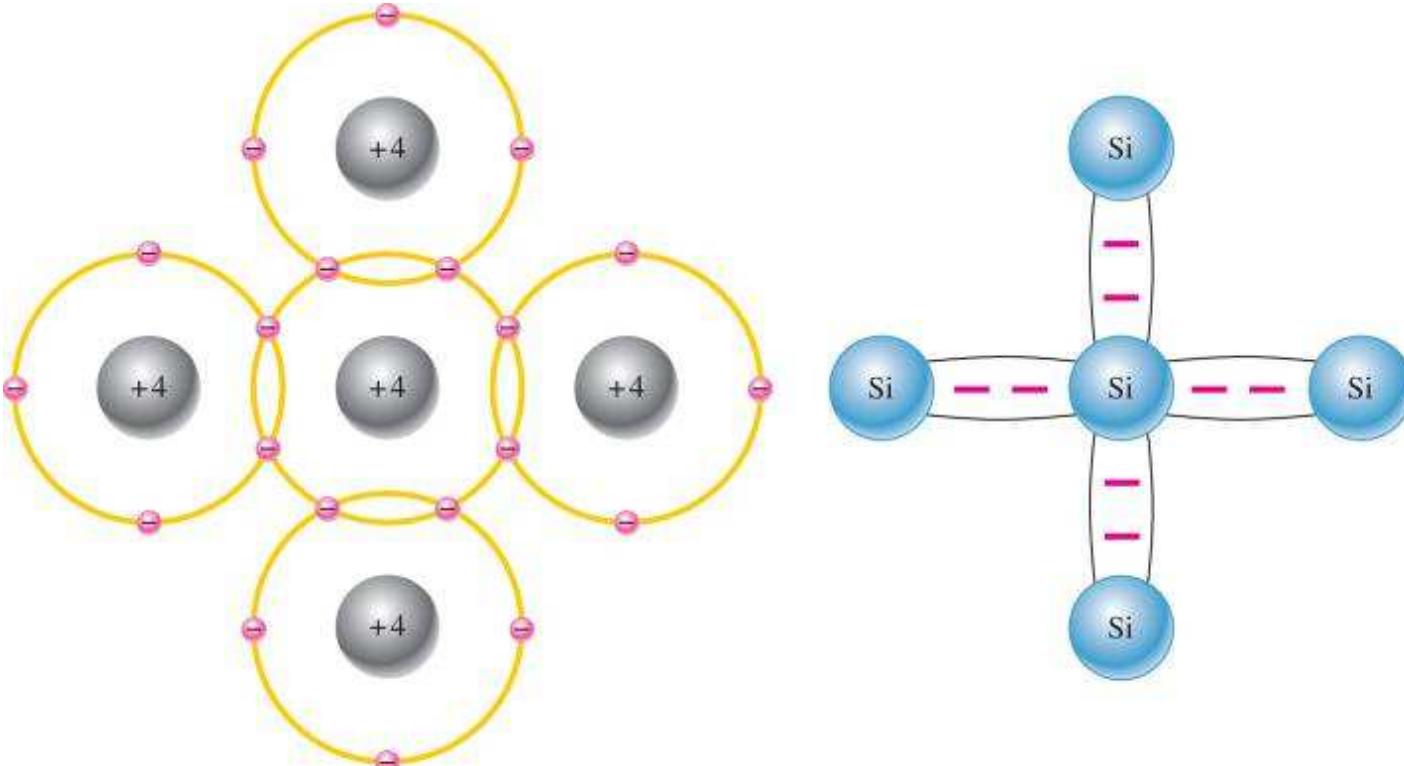
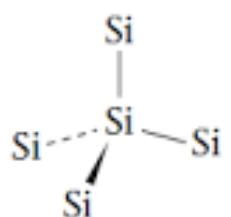


Representação 2D das ligações covalentes no silício cristalino

(o silício natural forma um cristal tridimensional, com estrutura cubica de faces centradas)



(a) The center silicon atom shares an electron with each of the four surrounding silicon atoms, creating a covalent bond with each. The surrounding atoms are in turn bonded to other atoms, and so on.

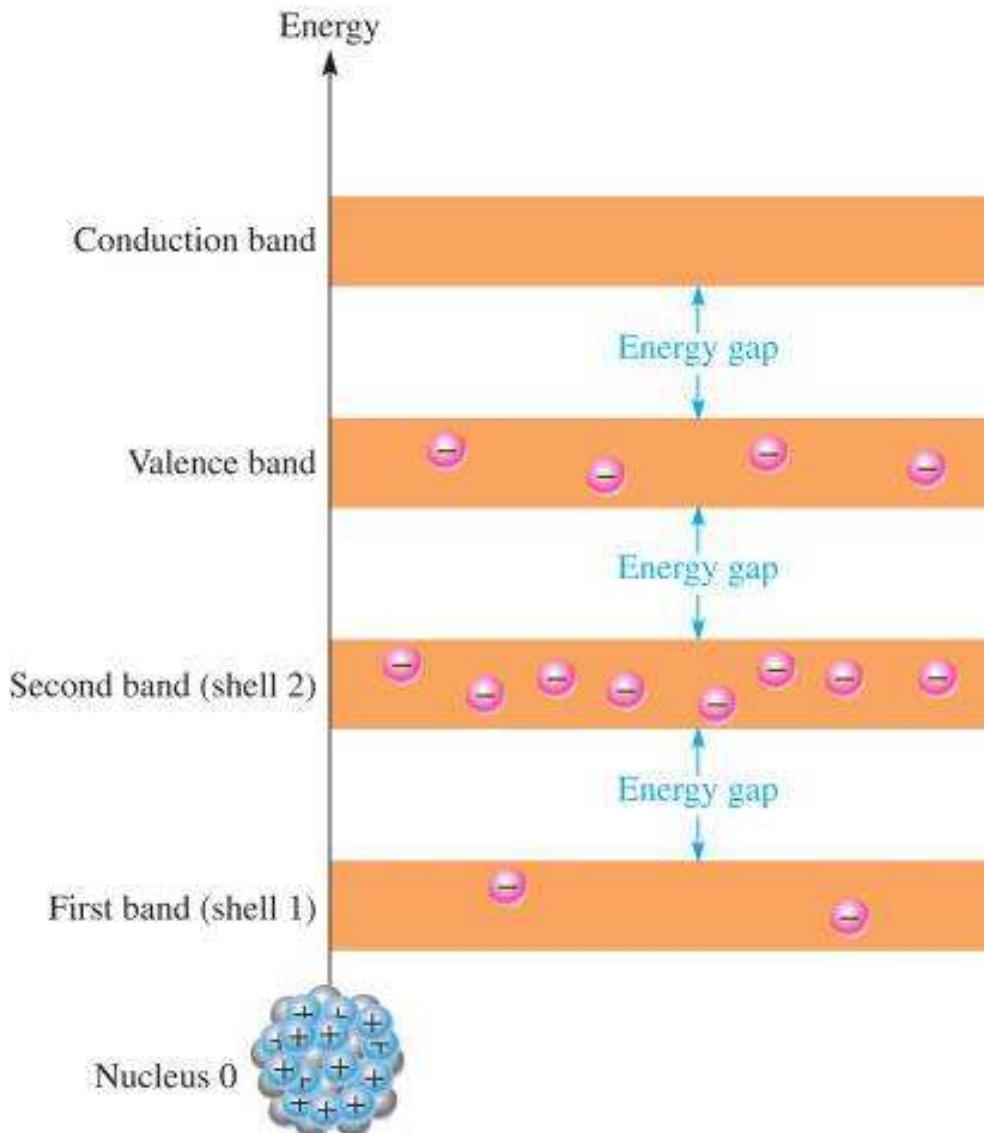


(b) Bonding diagram. The red negative signs represent the shared valence electrons.

<https://pt.wikipedia.org/wiki/Sil%C3%ADcio>

Diagrama das bandas de energia do silício cristalino puro a zero kelvin

(não há eletrões livres na banda de condução)



Entre as bandas de energia formadas pelos níveis de energia permitidos, há níveis de energia não permitidos. Esses níveis de energia não permitidos formam os hiatos de energia.

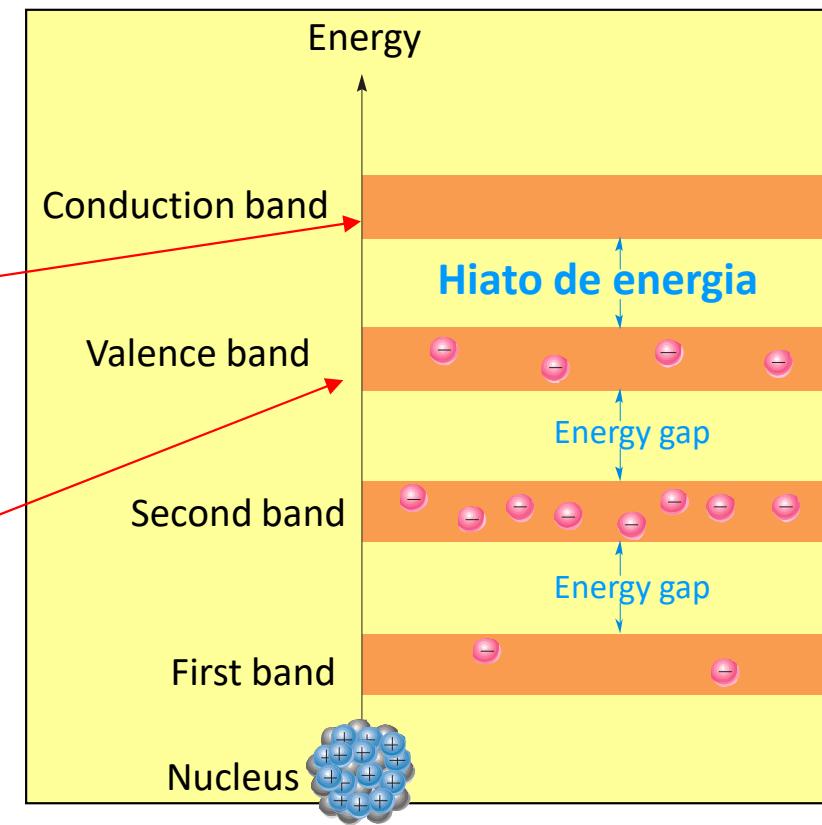
O hiato entre a banda de condução e a banda de valência tem particular relevância na definição de muitas das propriedades elétricas e óticas dos materiais semicondutores.

Hiato de energia (“band-gap”) em semicondutores

Entre as bandas de energia formadas pelos níveis de energia permitidos, há níveis de energia não permitidos. Esses níveis de energia não permitidos formam os hiatos de energia.

Os estados permitidos de maior energia formam a **banda de condução**, onde os eletrões se comportam como se fossem partículas quase livres.

A banda de energia imediatamente abaixo da banda de condução designa-se **banda de valência**, e corresponde à energia dos eletrões envolvidos nas ligações covalentes (no caso dos semicondutores elementares).



Quanto à condutibilidade elétrica os materiais podem ser: dielétricos, semicondutores e condutores

Além do efeito fotoelétrico propriamente dito, também chamado de efeito fotoelétrico externo, que consiste na emissão de eletrões pela matéria sob a ação da luz, existe também o **efeito fotoelétrico interno**, relevante, por exemplo, nos materiais semicondutores.

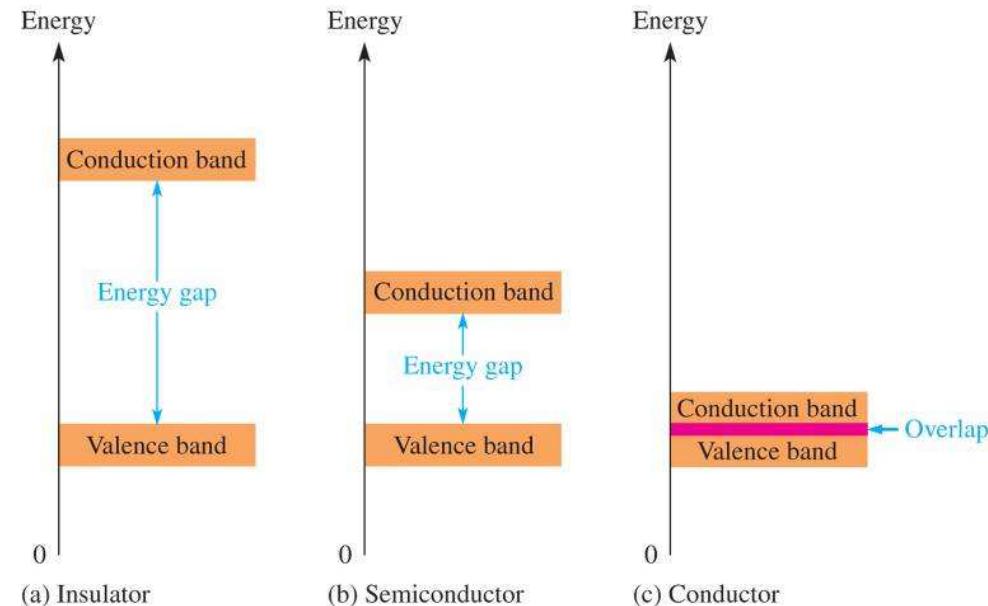
A absorção de radiação pelo material promove a transição de eletrões da banda de valência (das ligações covalentes) para a banda de condução do material, dando origem a eletrões de condução, e a vazio (ausência de eletrão na banda de valência).

O efeito fotoelétrico **interno** é usado, por exemplo, em células solares para produzir energia elétrica a partir da radiação solar.

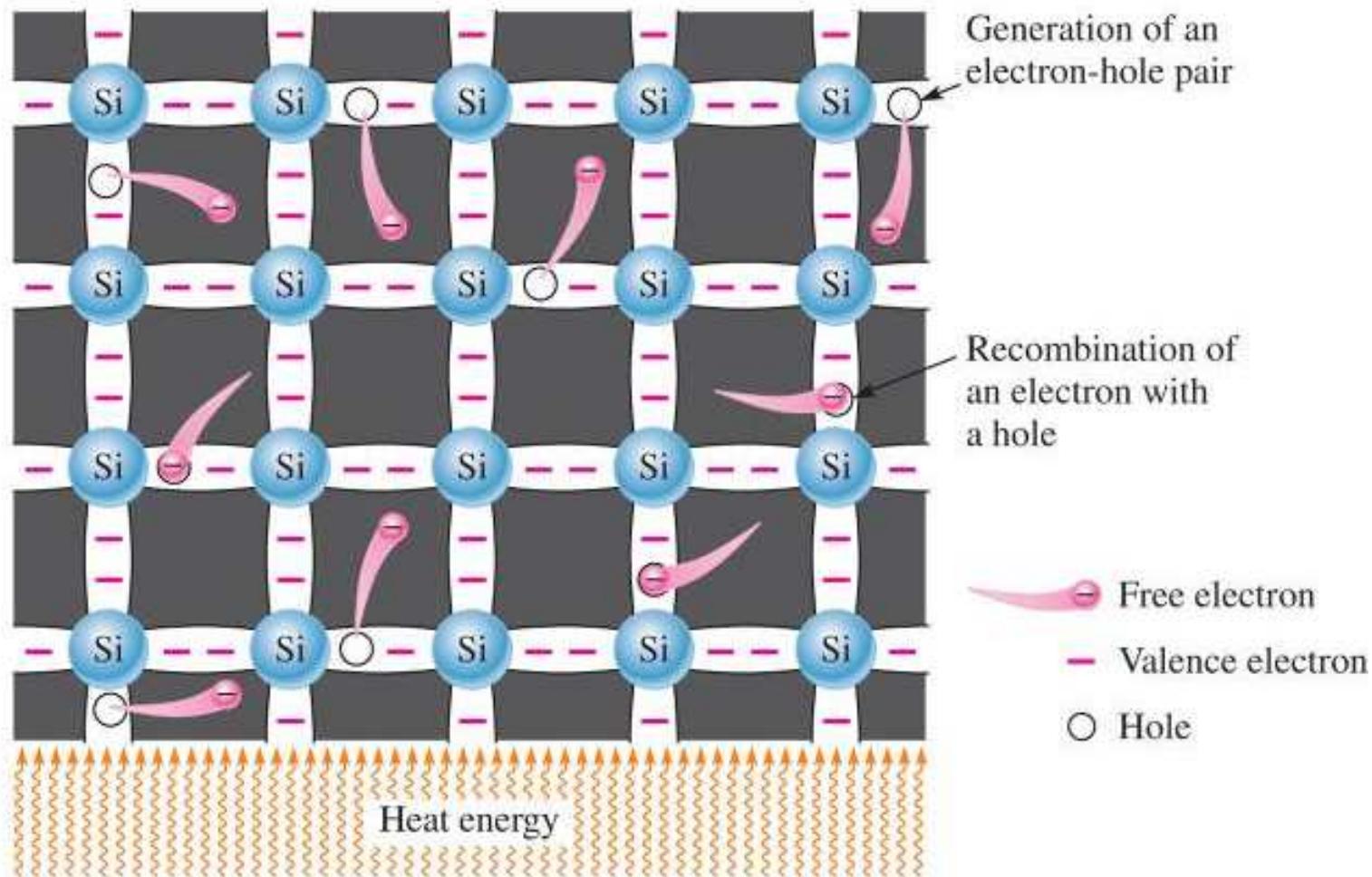
Semicondutor: substância cristalina cuja resistividade tem um valor compreendido entre o dos bons condutores metálicos e o dos isoladores, diferindo dos condutores metálicos pelo facto de aumentar a sua condutividade quando a temperatura aumenta.

Semicondutor intrínseco: material cuja condutividade resulta da existência de eletrões e de vazios em números iguais, provenientes da rutura das ligações de valência dos seus átomos.

Semicondutor extrínseco: semicondutor cuja condutividade resulta principalmente de eletrões ou vazios provenientes de átomos de impurezas existentes na rede cristalina. Podem ser do tipo n (impurezas: átomos do 5.º grupo da tabela periódica) ou do tipo p (do 3.º grupo).



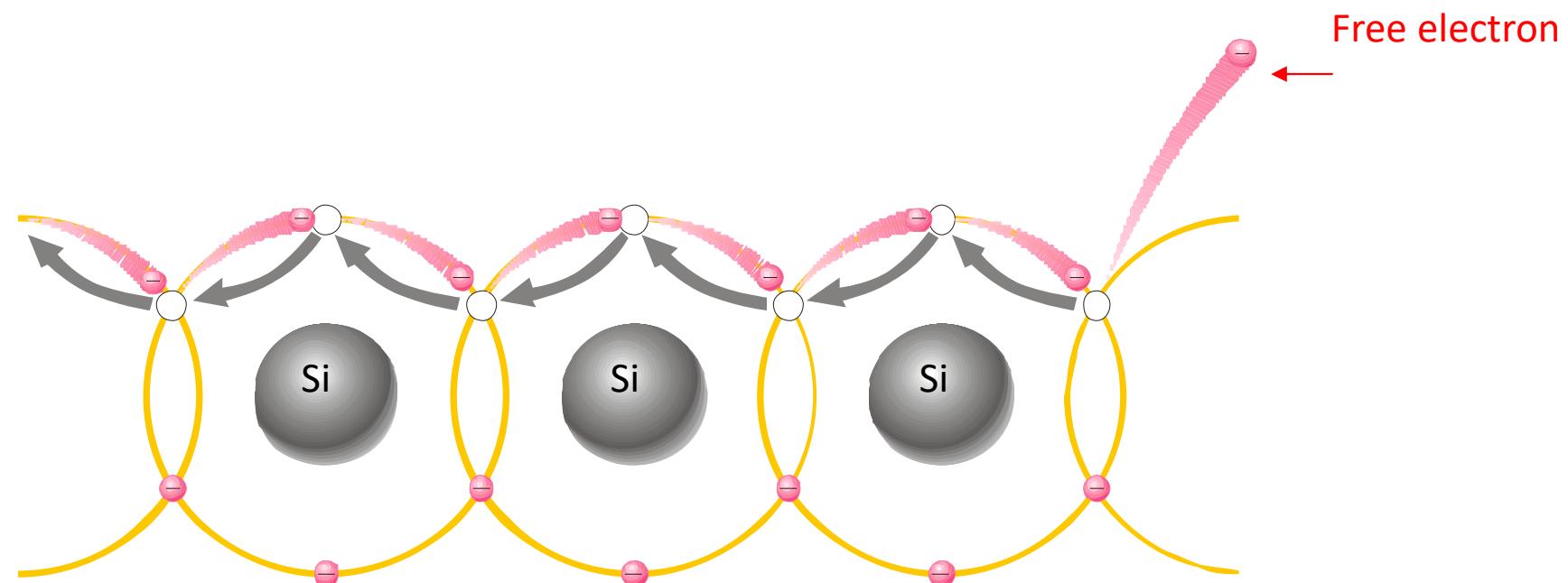
Num cristal semicondutores os pares eletrões-lacuna estão continuamente a ser criados e destruídos. Após algum tempo alguns eletrões livres recombinação com as lacunas.



Corrente eletrônica e corrente de buracos/vazios/lacuna

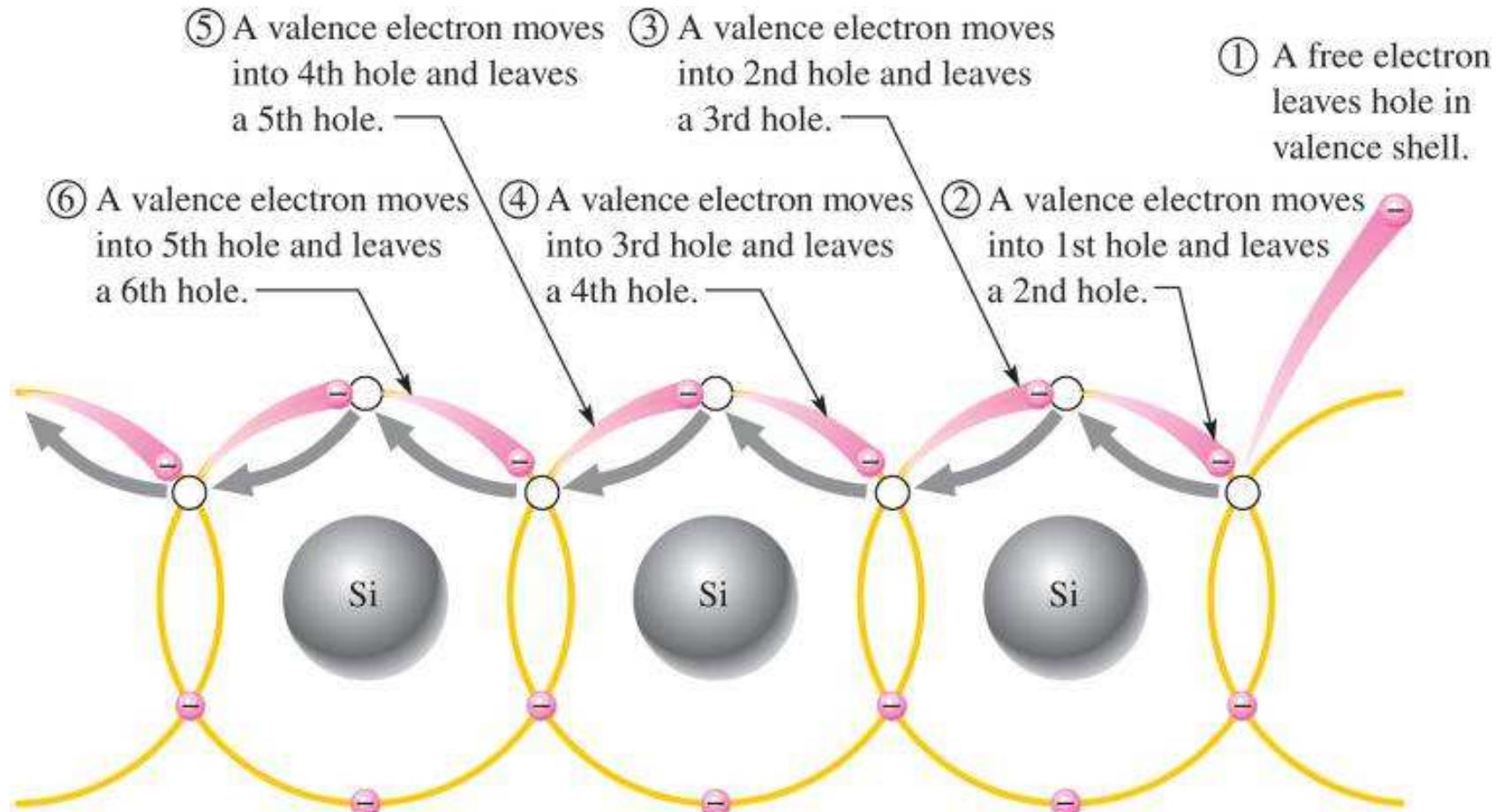
Os eletrões na banda de condução e os vazios na banda de valência comportam-se como portadores de carga. Isto é, a corrente na banda de condução é devida ao movimento dos eletrões, e a corrente na banda de valência é devida ao movimento dos vazios.

Na verdade a corrente de vazios na banda de valência corresponde ao movimento de eletrões de vazio para vazio, criando assim a corrente de vazios, como mostra as setas na figura.



Corrente de vazios no silício intrínseco

(i.e., silício não dopado)



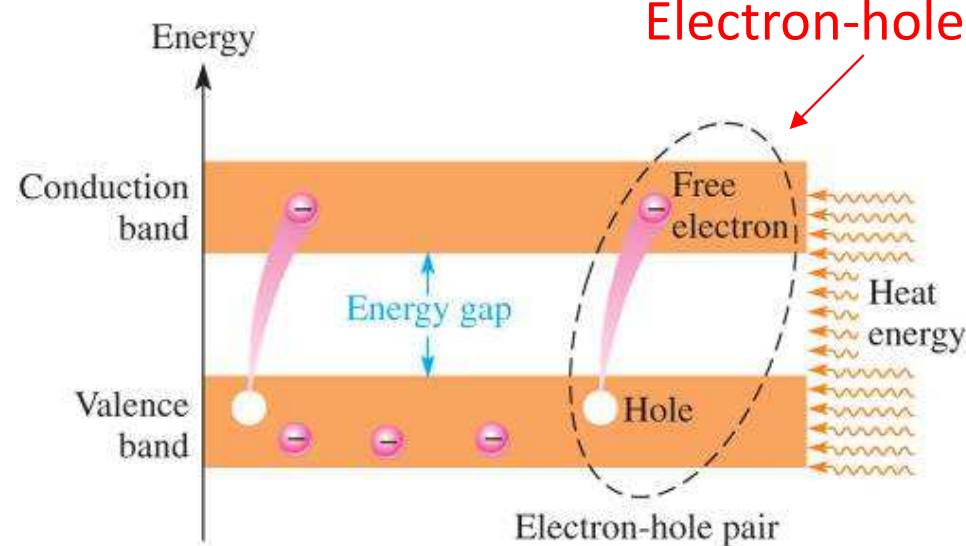
When a valence electron moves left to right to fill a hole while leaving another hole behind, the hole has effectively moved from right to left. Gray arrows indicate effective movement of a hole.

Pares-eletrão lacuna

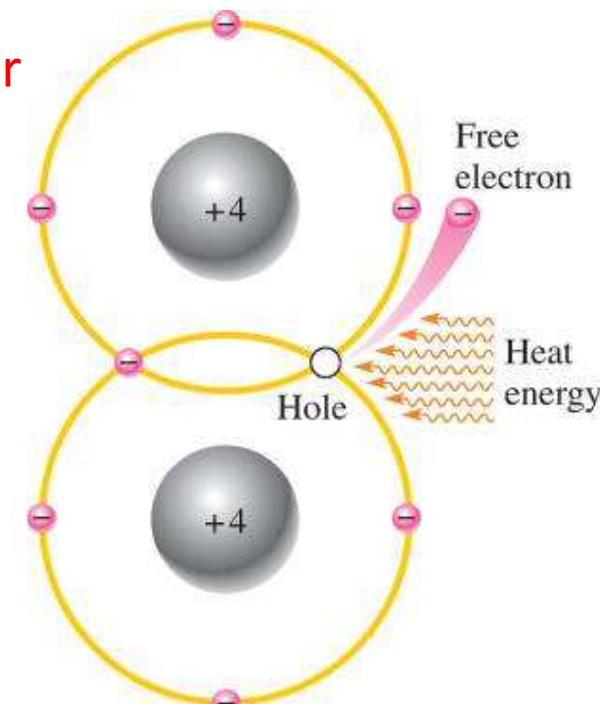
A agitação térmica dos iões da rede cristalina ou radiação podem originar a criação de pares-eletrão lacuna: um eletrão na banda de condução (que se pode mover LIVREMENTE) e um eletrão em falta na banda de valência (que se comporta como uma partícula de carga positiva, designada lacuna, vazio ou buraco, que TAMBÉM se pode mover LIVREMENTE)

À temperatura ambiente, a agitação térmica provoca a transição de alguns eletrões da banda de valência para a banda de condução, deixando um buraco na banda de valência.

Estes eletrões e vazios são livres de se moverem nas respetivas bandas. Sob a ação de uma tensão/campo elétrico originam a corrente eletrónica e a corrente de lacunas.



(a) Energy diagram



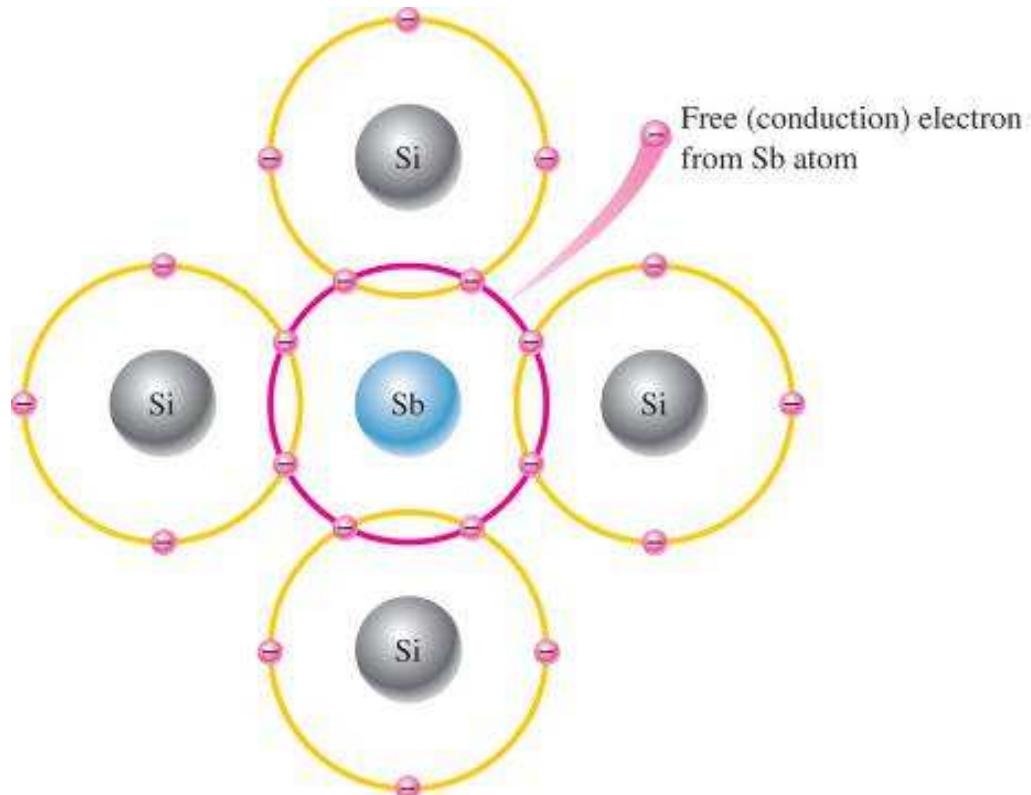
(b) Bonding diagram

Como se formam junções p-n?

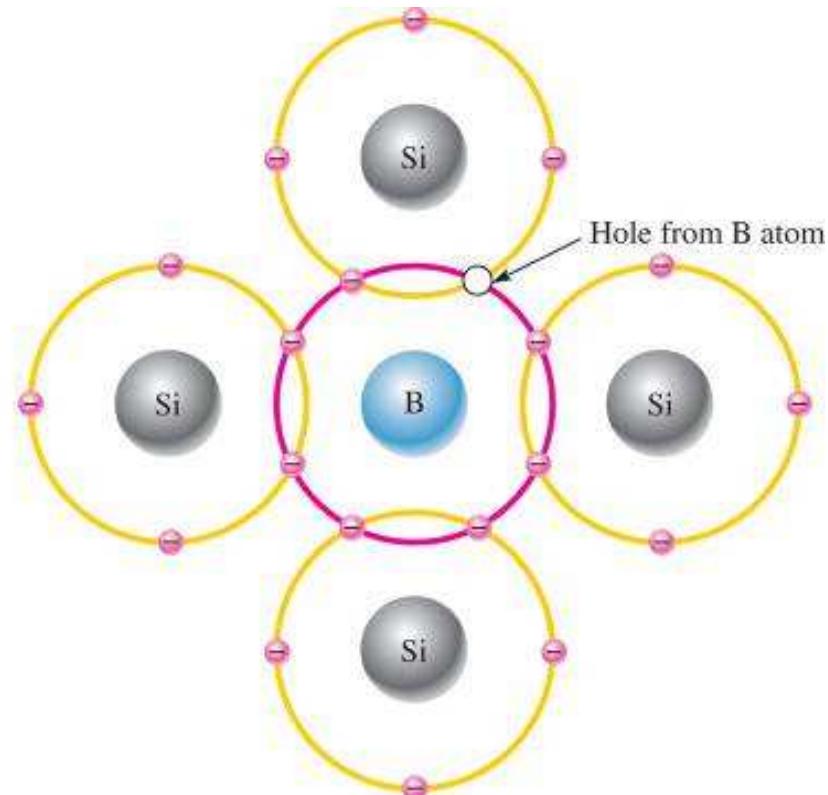
O díodo de junção é um elemento básico para quase todos os dispositivos semicondutores que usam uma junção P-N.^[1]

Semicondutores extrínsecos. Impurezas. Dopagem de semicondutores.

Impurezas dopantes aceitadores e dopantes dadores



(a) Pentavalent impurity atom in a silicon crystal. An antimony (Sb) impurity atom is shown in the center. The extra electron from the Sb atom becomes a free electron.

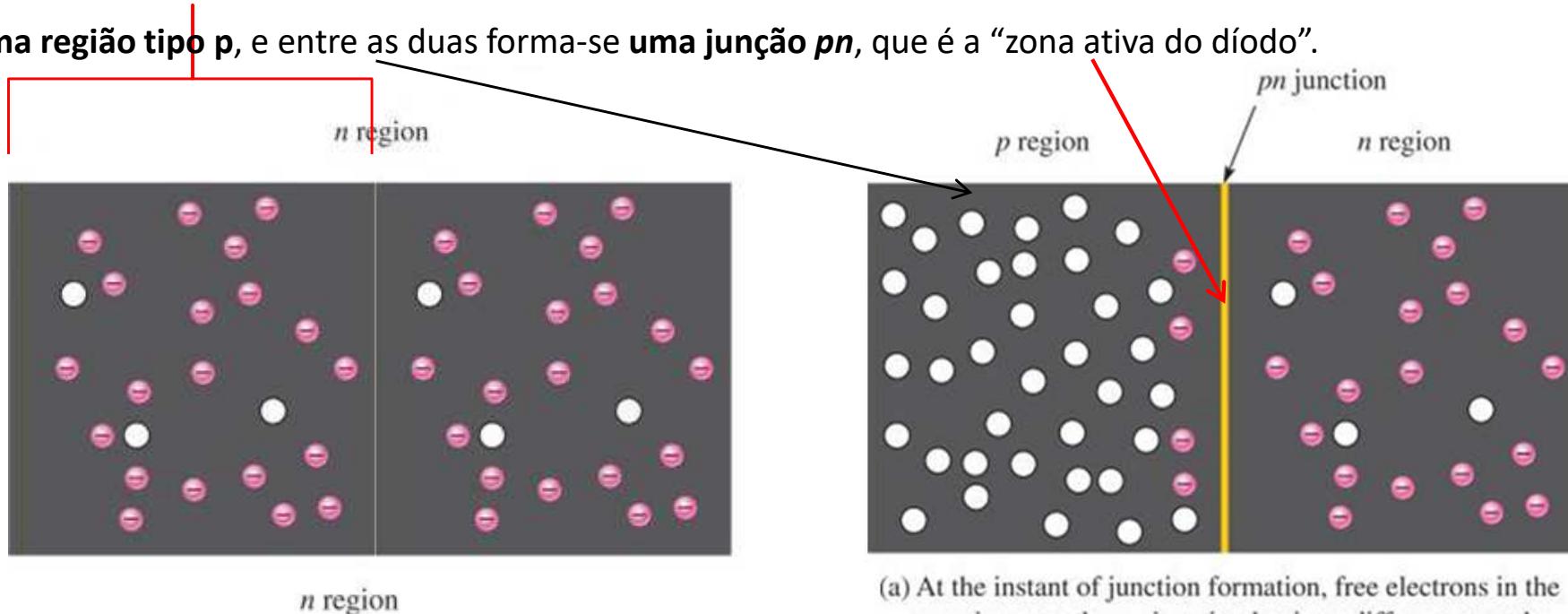


(b) Trivalent impurity atom in a silicon crystal. A boron (B) impurity atom is shown in the center.

Formação da junção pn e a tensão da barreira de potencial na junção V_0

Para a formação de uma junção p-n pode-se partir, por exemplo, de um material tipo n.

Se doparmos esta porção da esquerda, inicialmente tipo n, com impurezas do 3.º grupo da tabela periódica, obtemos uma região tipo p, e entre as duas forma-se uma junção pn, que é a “zona ativa do diodo”.



(a) At the instant of junction formation, free electrons in the n region near the pn junction begin to diffuse across the junction and fall into holes near the junction in the p region.

Diagrama de bandas antes da formação da junção pn:

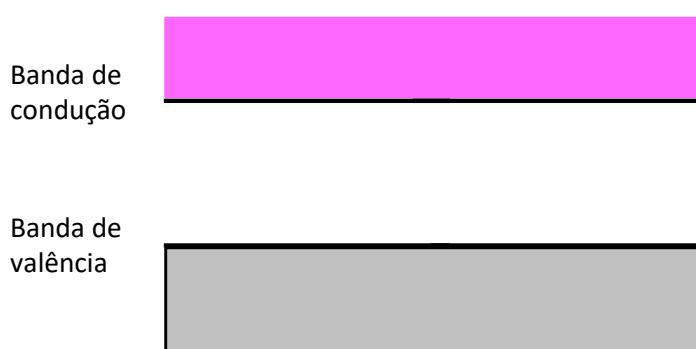
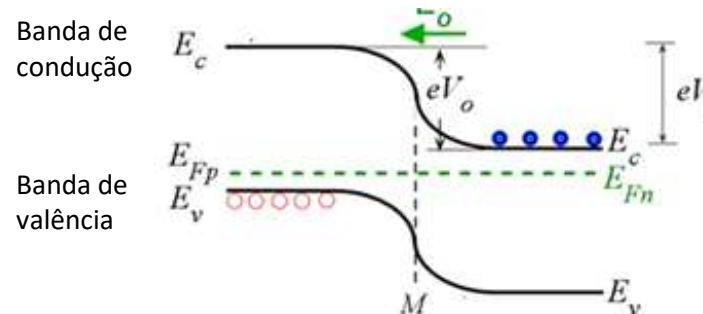
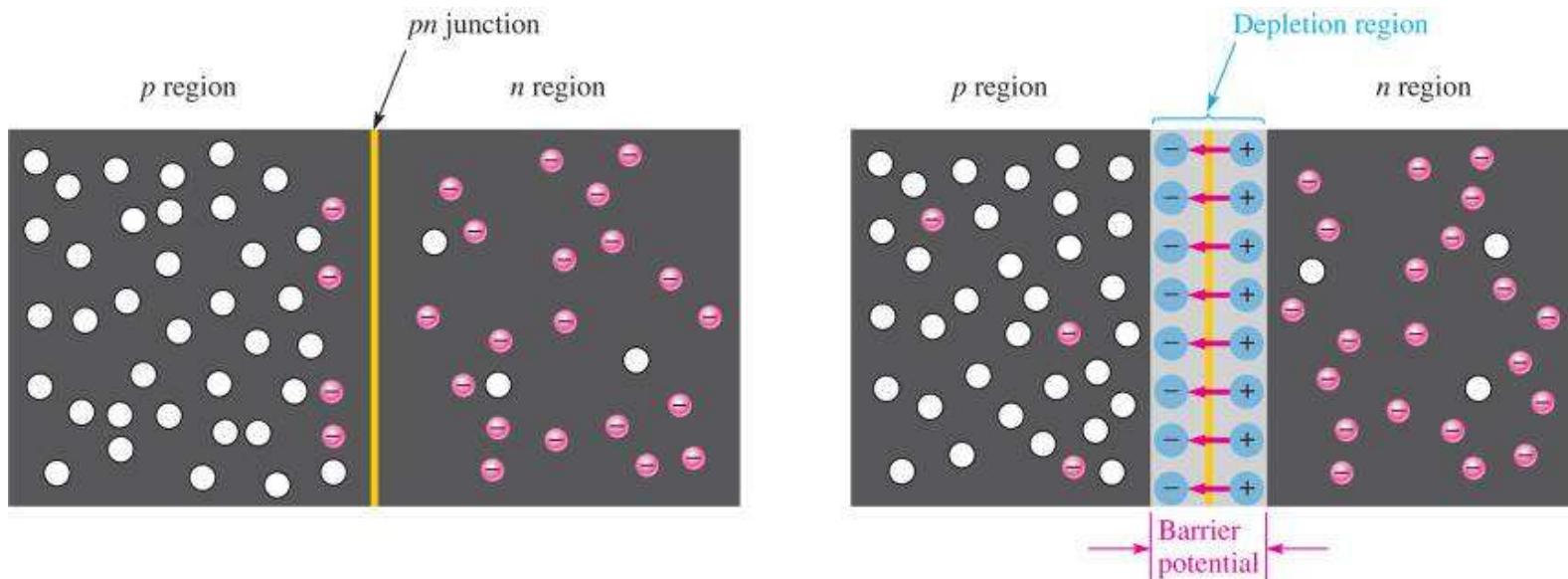


Diagrama de bandas após a formação da junção pn:



V_0 : Tensão da barreira de potencial, referido, por vezes, como potencial e difusão.

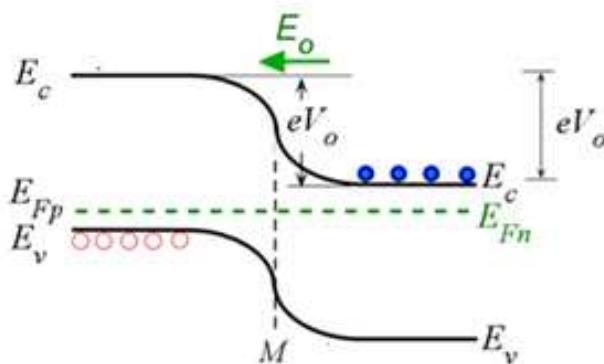
Formação da região de depleção e da barreira da potencial numa junção pn.



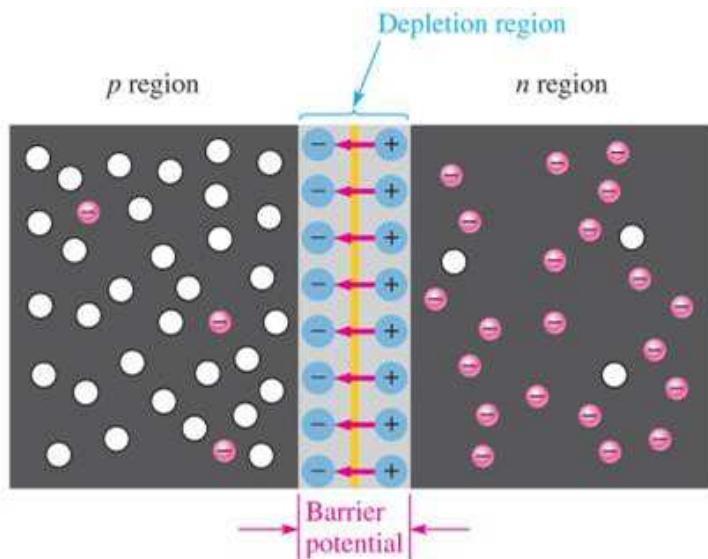
(a) At the instant of junction formation, free electrons in the *n* region near the *pn* junction begin to diffuse across the junction and fall into holes near the junction in the *p* region.

(b) For every electron that diffuses across the junction and combines with a hole, a positive charge is left in the *n* region and a negative charge is created in the *p* region, forming a barrier potential. This action continues until the voltage of the barrier repels further diffusion.

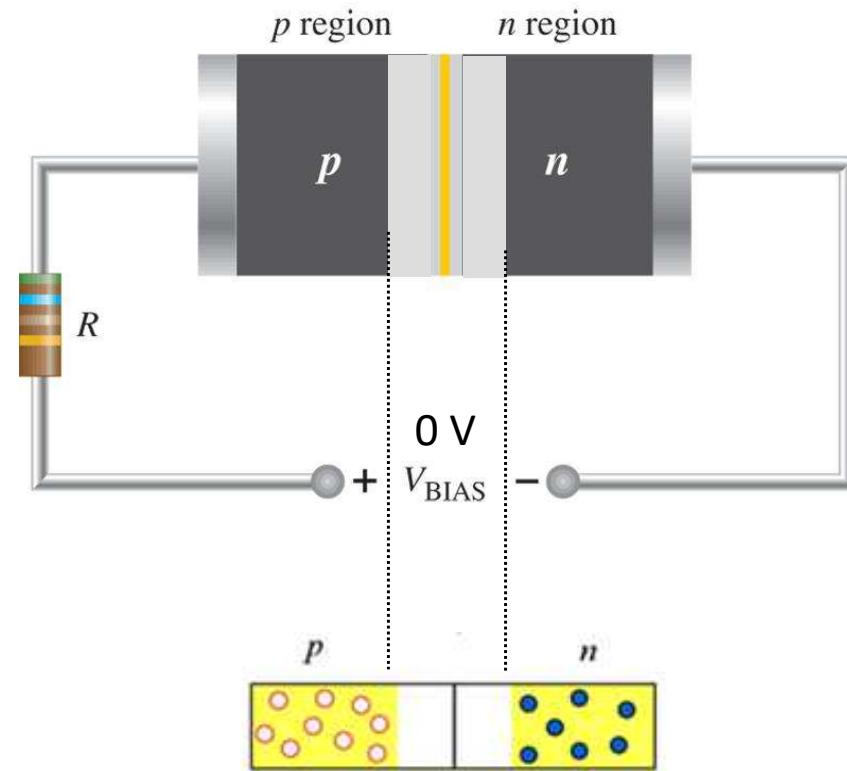
Diagrama de bandas após a formação da junção pn:



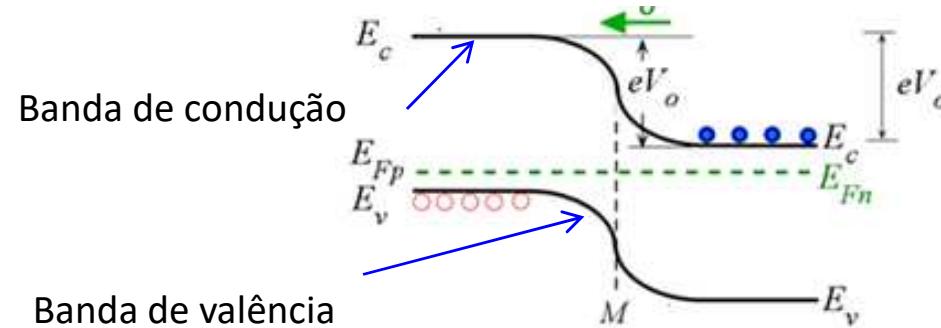
Junção pn não polarizada



(b) For every electron that diffuses across the junction and combines with a hole, a positive charge is left in the n region and a negative charge is created in the p region, forming a barrier potential. This action continues until the voltage of the barrier repels further diffusion.



Diagramas de bandas da junção pn



Junção polarizada diretamente

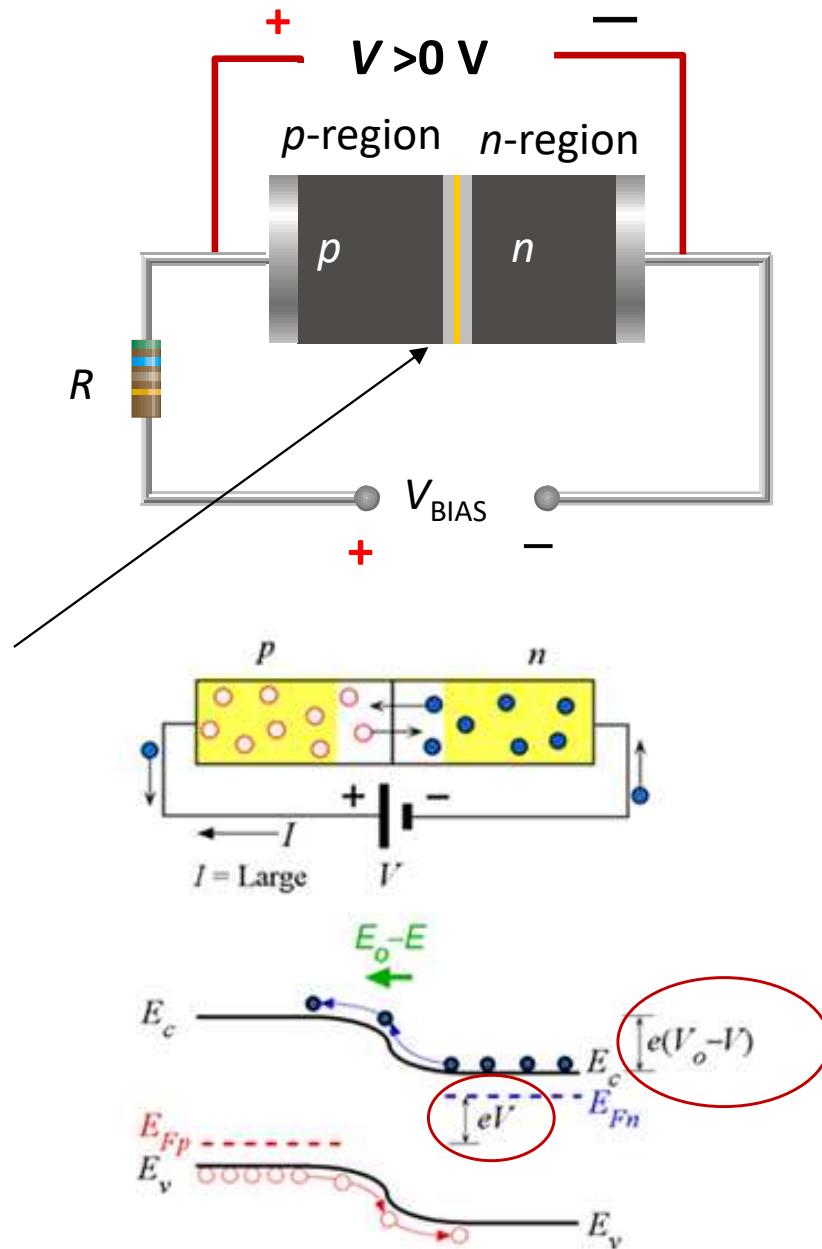
Forward-bias connection

Quando uma junção pn é polarizada diretamente (a região p está a um potencial superior à região n), a junção é atravessada por uma corrente que depende da diferença de tensão entre os lados p e n, e das características da junção.

A fração da tensão aplicada V_{BIAS} que aparece aos terminais da junção facilita passagem de eletrões do lado n para o lado p, e de vazios do lado p para o lado n, reduzindo a barreira de potencial existente através da junção, dando origem à corrente que atravessa a junção no sentido de p para n.

Quando a tensão aplicada é suficiente para anular a barreira de potencial que os eletrões e as lacunas enfrentam na passagem do lado n para o lado p, e do lado p para o lado n, respetivamente, diz-se que o díodo/junção está em franca condução.

Nas junções de silício esse valor corresponde a $V=V_0 \sim 0.7$ V.

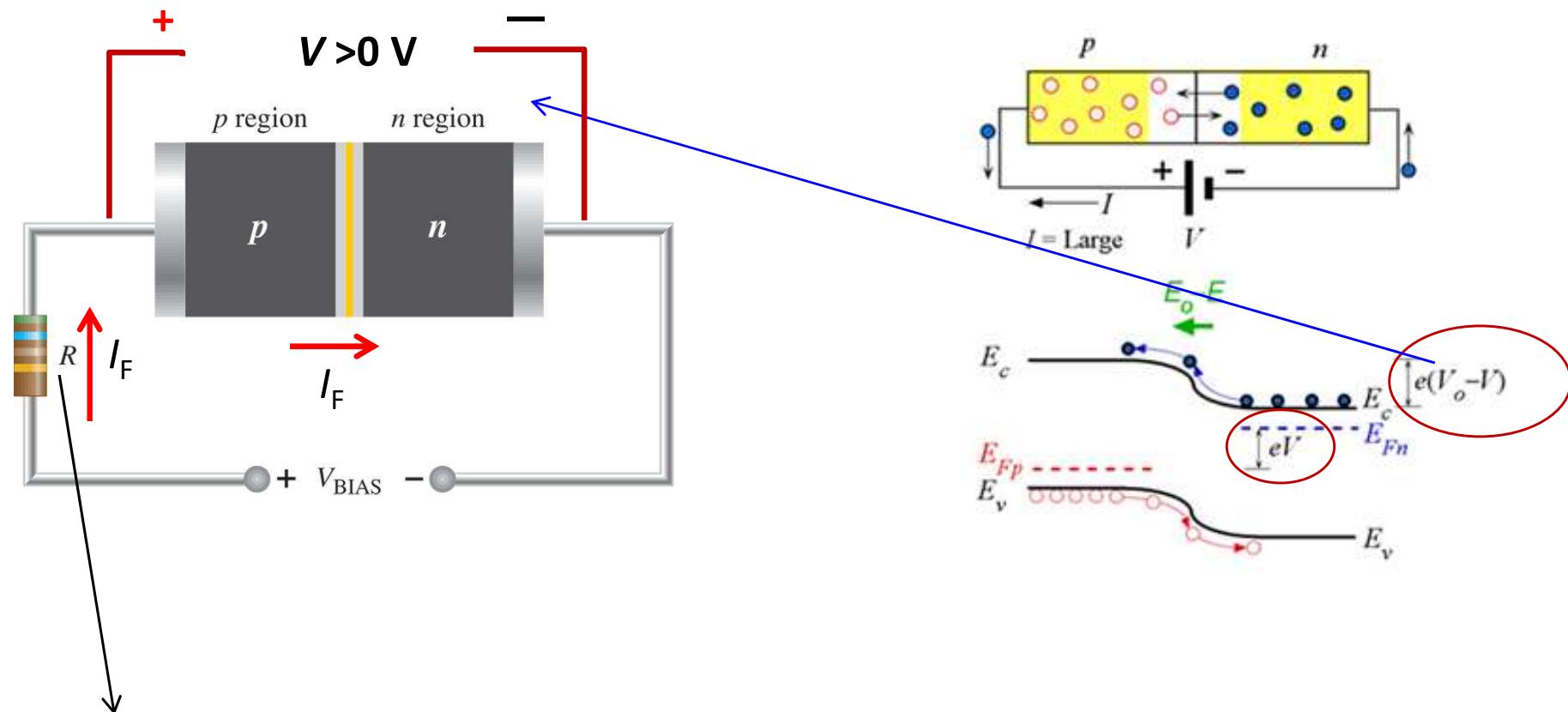


A aplicação de uma tensão direta faz diminuir a largura da região de depleção, e diminuir a barreira de potencial que o portadores de carga têm que transpor.

Junção pn polarizada diretamente

(Forward-bias connection)

Polarizar diretamente a junção p-n: aplicar uma diferença de potencial positiva entre o lado p e o lado n, i.e., colocar o lado p a um potencial superior ao lado n, origina uma corrente direta que percorre o díodo na direção do ânodo (lado p) para o cátodo (lado n).

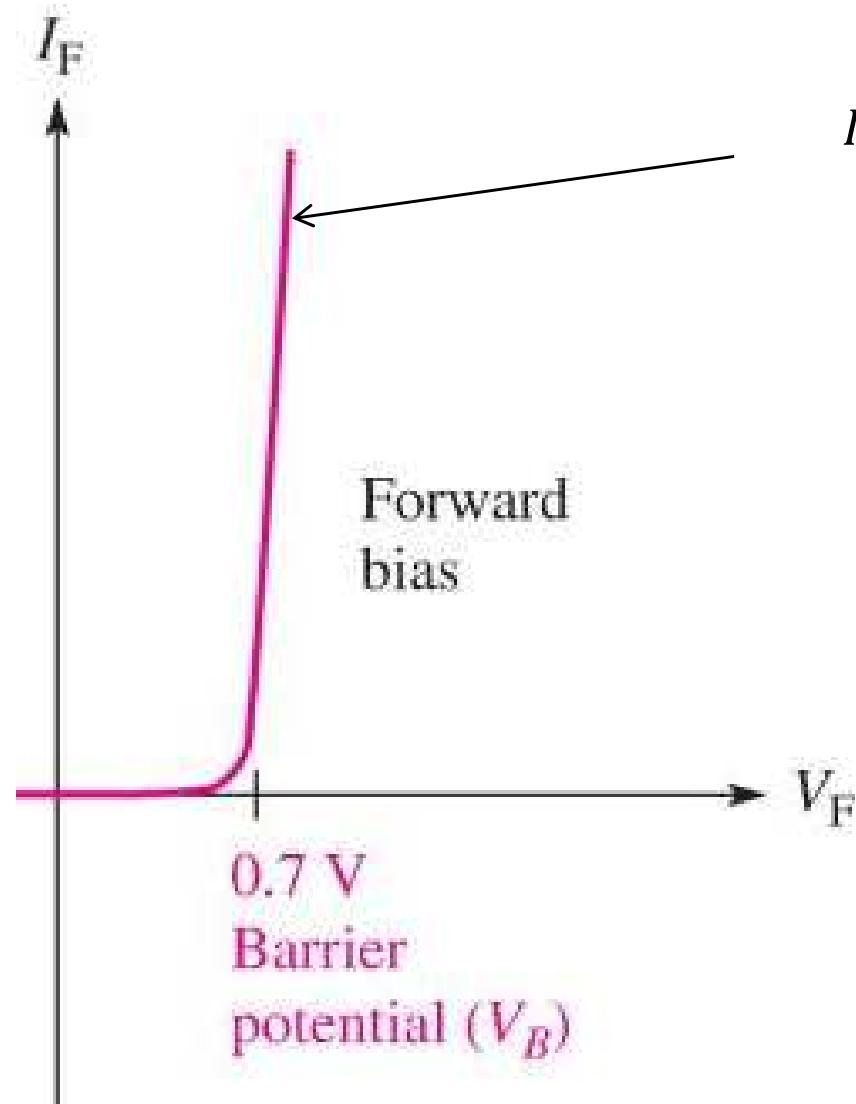
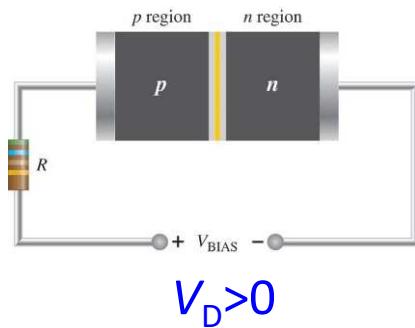


A resistência limita a corrente direta, de forma a prevenir que o díodo seja destruído. A resistência de um díodo quando em franca condução é baixa (tipicamente alguns ohms)

Curva geral da característica corrente-tensão (I-V) de um díodo:

Polarização direta ($V_D > 0$)

$V_{D,B,F}$: tensão aos terminais do díodo



$$I_F(V_F) = I_S \left(e^{\frac{V_F}{nV_T}} - 1 \right)$$

$$V_T = \frac{k_B T}{q_e}$$

$$T=300 \text{ K}$$

$$V_T=26 \text{ mV}$$

$$n \sim 1,5 - 2$$

F: forward; R: reverse
D: diode/direct “D=F”

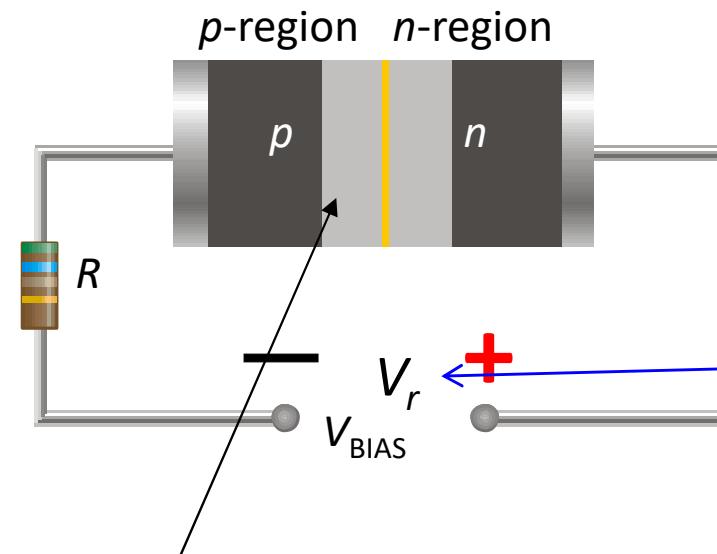
$$I_D(V_D) = I_S \left(e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1 \right)$$

Junção polarizada inversamente

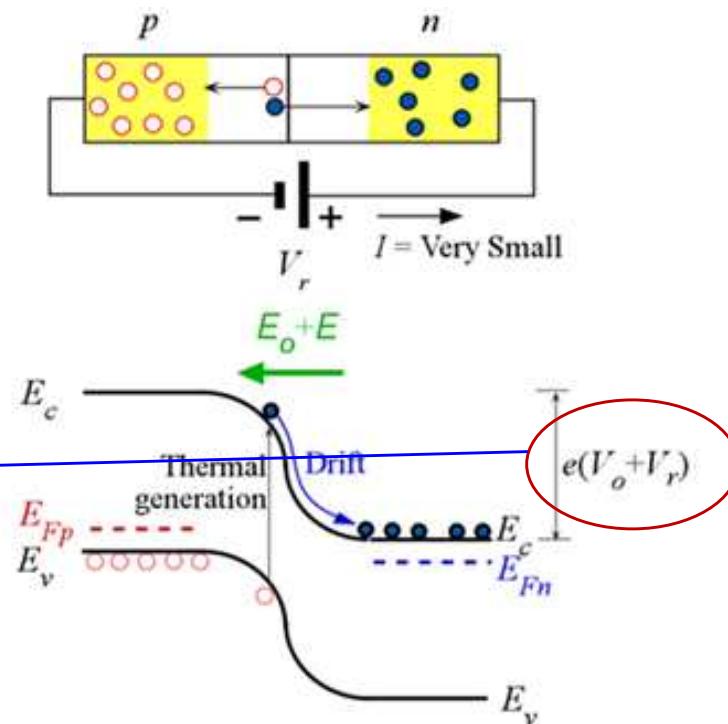
Polarizar inversamente a junção p-n é aplicar uma diferença de potencial negativa entre o lado p e o lado n, i.e., colocar o lado p a um potencial inferior ao lado n, origina uma corrente inversa muito pequena (corrente de saturação) que percorre o díodo do lado n (cátodo) para o lado p (ânodo).

A polarização inversa “afasta” os eletrões de condução e os vazios da zona da junção, aumentando a altera da barreira de potencial, dificultando ainda mais a passagem de corrente. A junção atua efetivamente como um isolador. Apenas um número reduzido de eletrões e de vazios consegue difundir-se através da junção, criando uma pequeniníssima corrente inversa (também conhecida como corrente de saturação ou corrente de fuga).

Um díodo polarizado inversamente atua na prática como um isolador, até que seja atingida uma dada tensão, designada tensão de rutura. Quando esta tensão é atingida a corrente inversa aumenta muito rapidamente com a tensão, e se não for limitada acaba por destruir o díodo.

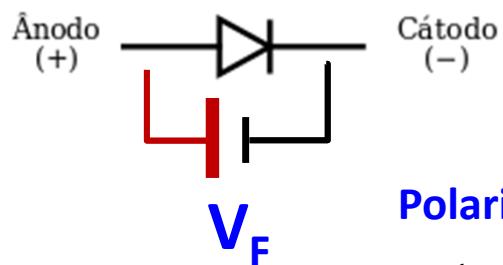


A polarização inversa provoca o alargamento da região de depleção.



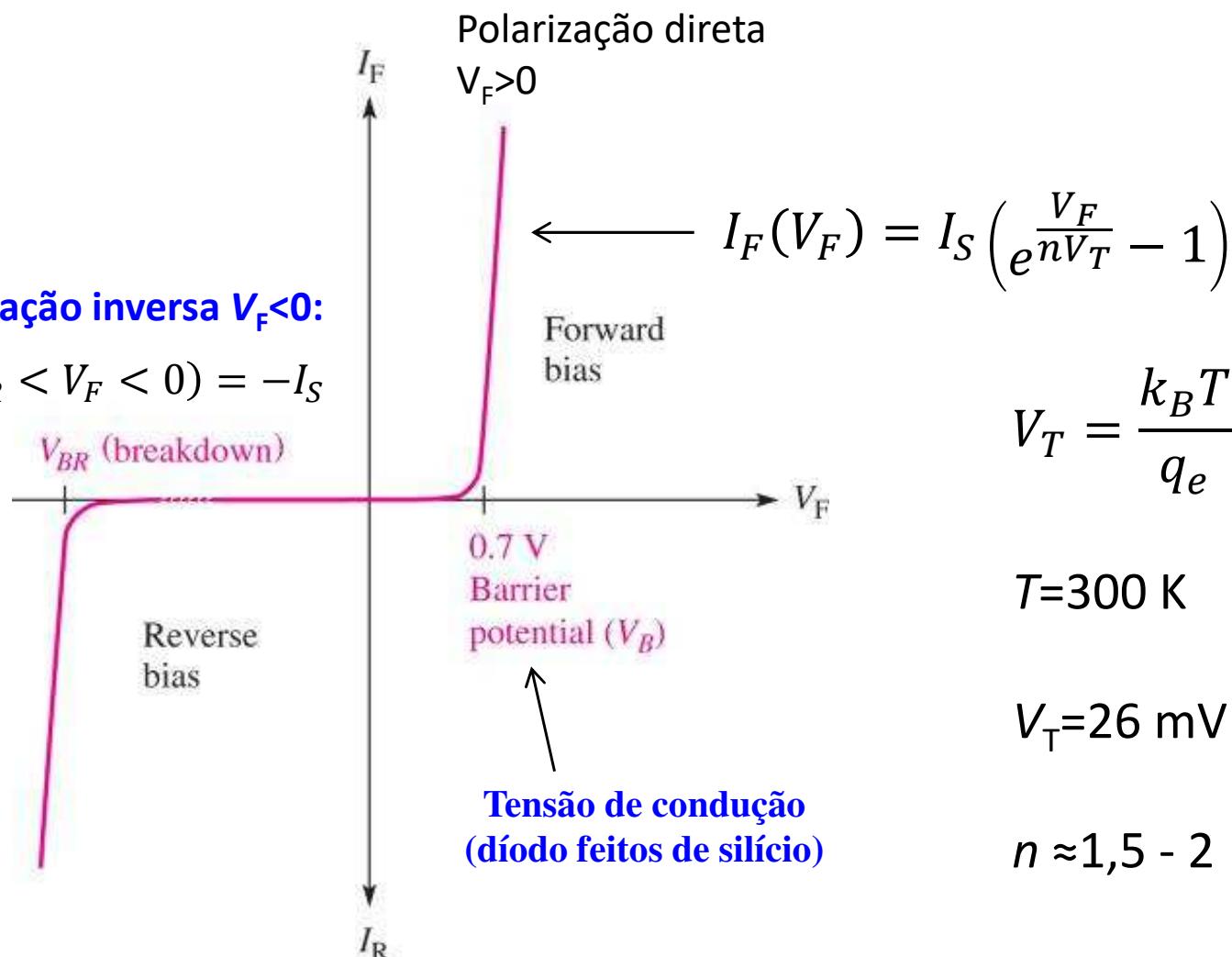
Curva característica corrente-tensão (I-V) de um díodo

$V_{D,B,F}$: tensão aos terminais do díodo



Um díodo polarizado inversamente atua na prática como um isolador (circuito-aberto), até que seja atingida uma dada tensão, designada tensão de rutura.

$$I_F(V_{BR} < V_F < 0) = -I_S$$



F: forward; R: reverse
D: diode/direct “D=F”

$$V_T = \frac{k_B T}{q_e}$$

$$T=300 \text{ K}$$

$$V_T=26 \text{ mV}$$

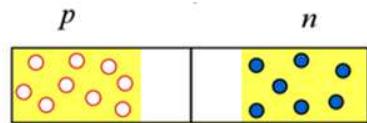
$$n \approx 1,5 - 2$$

Díodo de junção pn: resumo

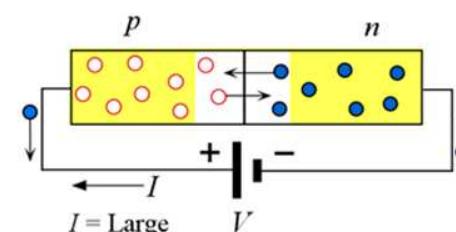
Esquemas e diagramas de bandas da junção pn

$V_{D,B,F}$: tensão aos terminais do díodo

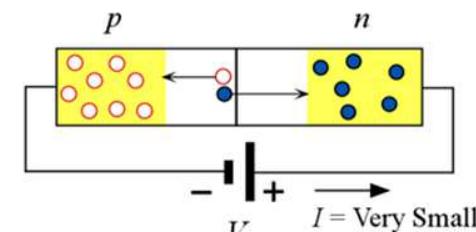
Não polarizada ($V_D=0$ V)



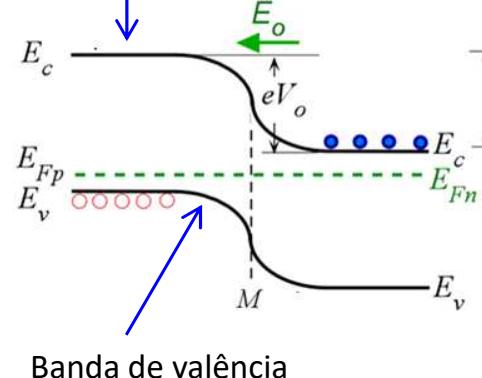
polarizada diretamente ($V_D > 0$ V)



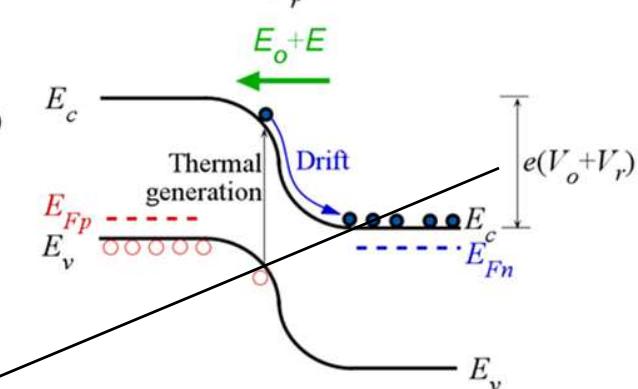
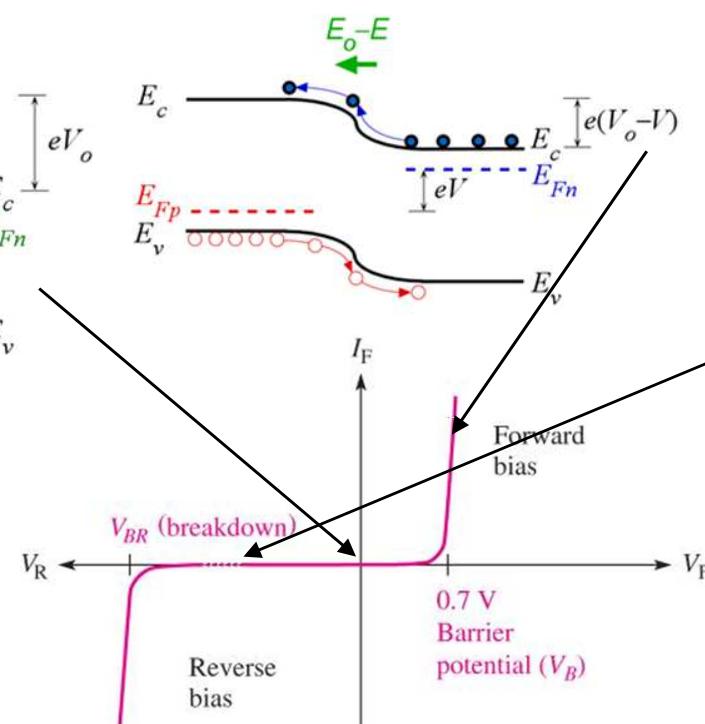
polarizada inversamente ($V_D < 0$ V)



Banda de condução



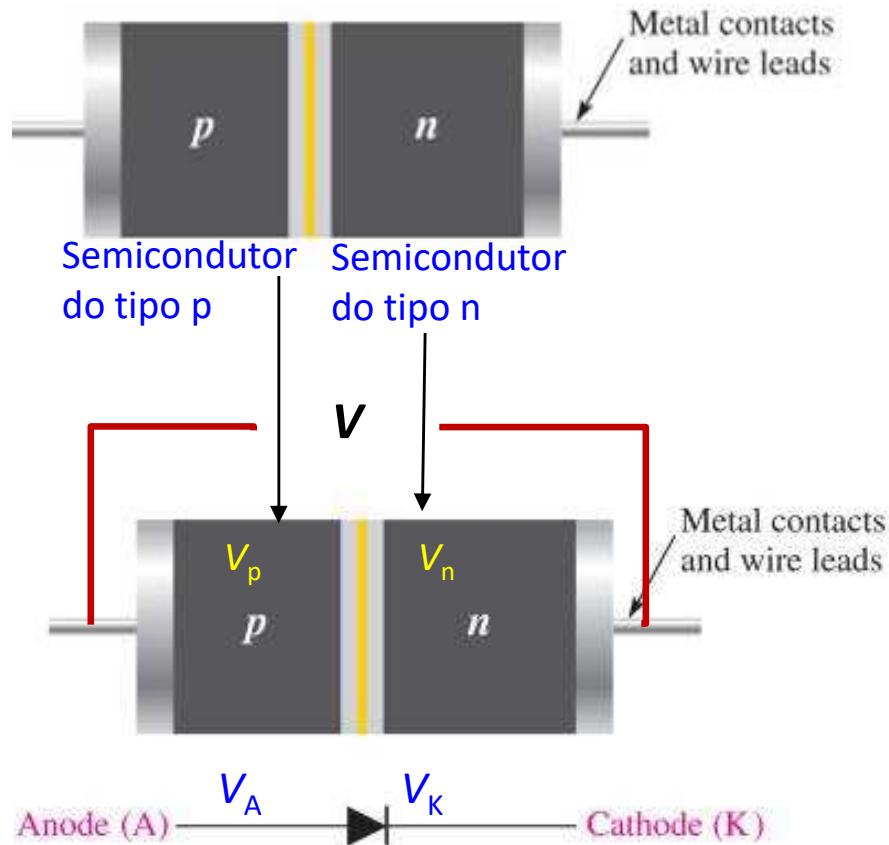
Banda de valência



Um díodo polarizado inversamente atua na prática como um isolador, até que seja atingida uma dada tensão, designada **tensão de ruptura**. Quando esta tensão é atingida a corrente inversa aumenta muito rapidamente com a tensão, e se não for limitada acaba por destruir o díodo.

Estrutura, símbolo, e circuito com um díodo

Junção p-n



(a) Basic diode structure and symbol

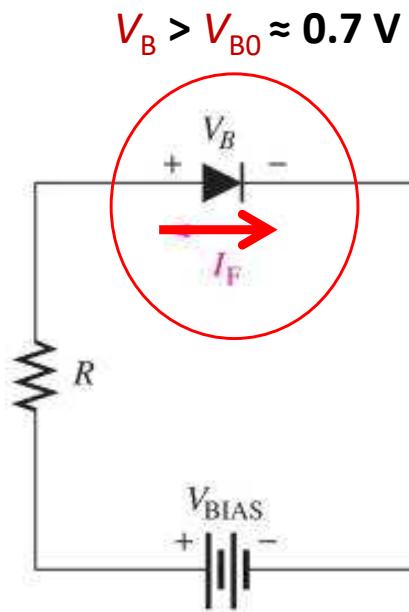
Polarização direta: $V > 0$, $V_A > V_K$, i.e., $V_p > V_n$

Polarização inversa: $V < 0$, $V_A < V_K$, i.e., $V_p < V_n$

Símbolo do díodo

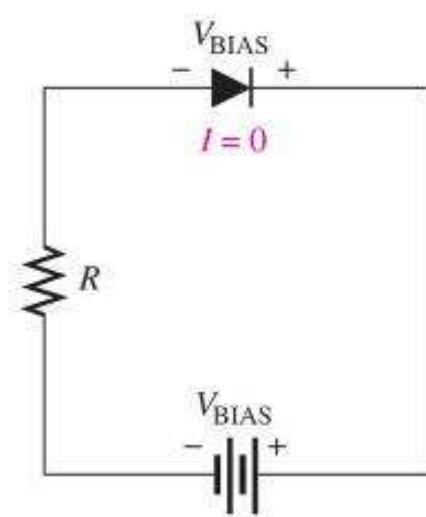


$$V_B > V_{B0} \approx 0.7 \text{ V}$$



(b) Forward bias

$$V_B = V_{\text{Bias}} < 0 \text{ V}$$



(c) Reverse bias

V_{BIAS} é tensão de alimentação, e

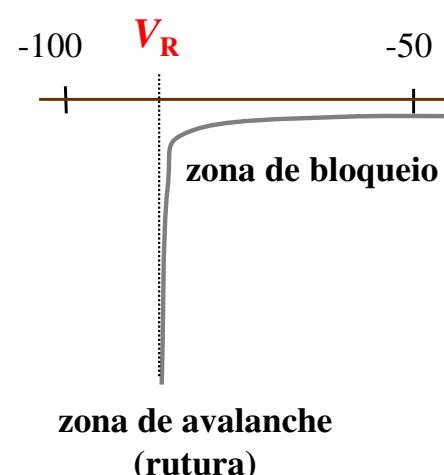
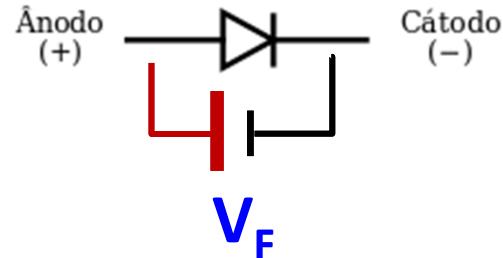
V_{B0} é a tensão de condução (para o silício $\approx 0.7 \text{ V}$).

Característica Corrente-Tensão (I-V) de um díodo de silício

A curva característica típica de um díodo de junção p-n apresenta três regiões distintas:

- região de polarização direta ($V_D > 0$)
- região de polarização inversa ($V_D < 0$)
- região de ruptura ou avalanche ($|V_D| \leq V_R$)

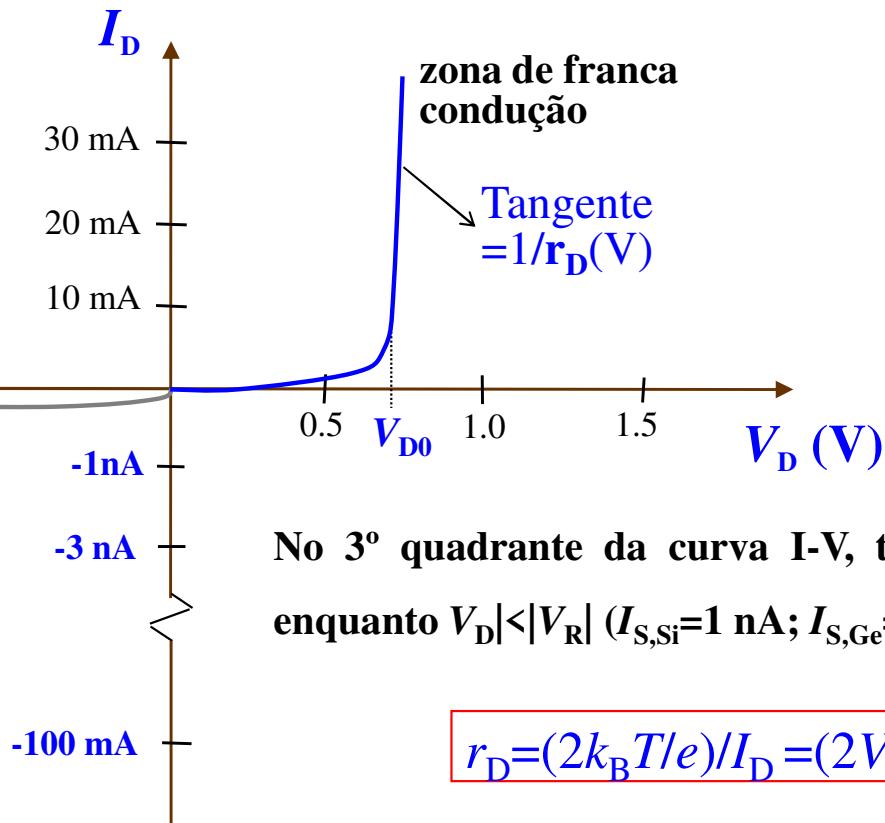
V_R : Tensão de ruptura



No 1º quadrante da característica I-V, a corrente é dada, aproximadamente, por:

$$I(V) \cong I_S \left[\exp\left(\frac{eV}{\eta k_B k_B T}\right) - 1 \right], \text{ com } I_S \propto \exp\left(-\frac{eV_{D0}}{\eta k_B T}\right)$$

$$\eta \sim 1 - 2$$



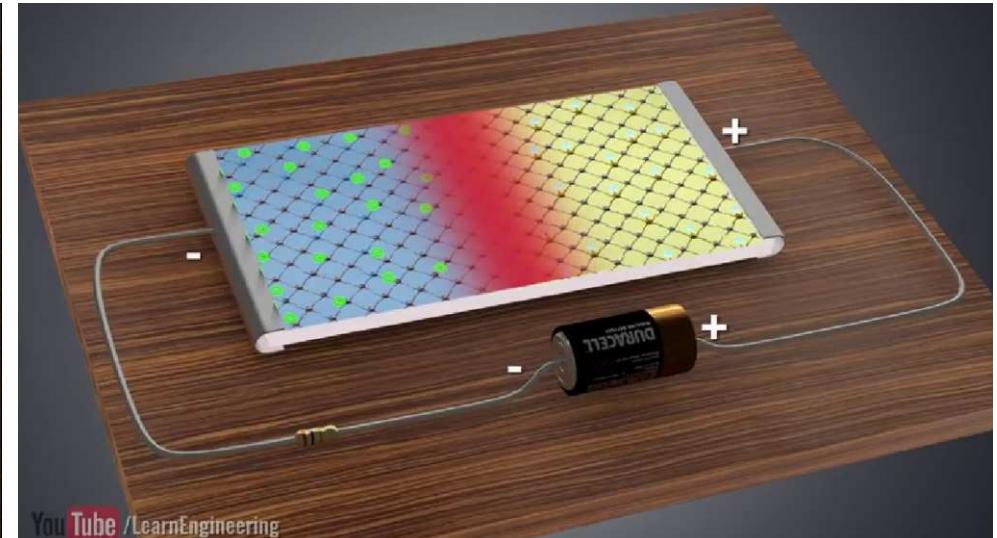
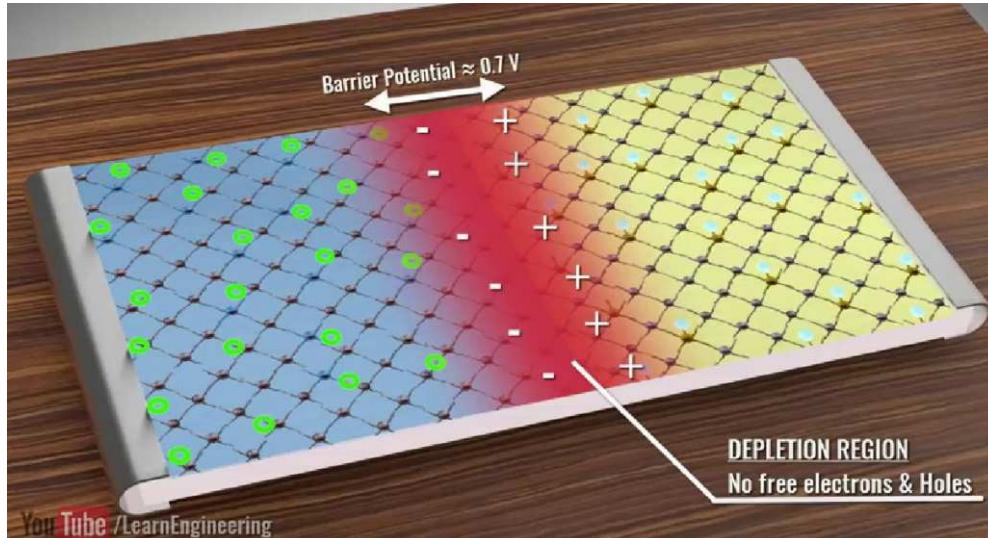
No 3º quadrante da curva I-V, têm-se $I = -I_S$, enquanto $|V_D| < |V_R|$ ($I_{S, Si} = 1 \text{ nA}$; $I_{S, Ge} = 1 \mu\text{A}$).

$$r_D = (2k_B T/e)/I_D = (2V_T)/I_D$$



Como é que o díodo funciona?

<https://www.youtube.com/watch?v=JNi6WY7WKAI>



How_does_a Diode_work.mp4

