

# Cap.1 - Diodos

## Agenda:

- ✓ **1.1 – O Essencial da Física de Semicondutores**
- ✓ **1.2 – Da Física de Semicondutores aos Diodos de Junção**
- ✓ **1.3 – Modelo de Diodos, Ponto P e Reta de Carga**
- ✓ **1.4 – Sistemática de Análise de Diodos**
- ✓ **1.5 – Retificadores e Filtragem**
- ✓ **1.6 – Diodo Zener**

# Dispositivos Eletrônicos

## O início de tudo

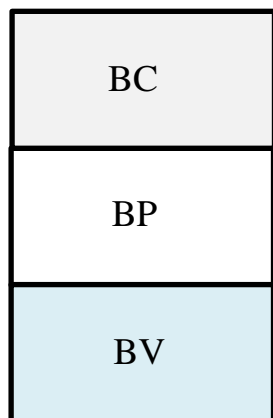
- A Eletrônica é resultado de uma forma particular de tratar materiais que apresentam certas propriedades convenientes para a condução de corrente de forma controlada
- Estes tais materiais são os **semicondutores**. Com respeito a condução elétrica, os materiais podem ser classificados conforme os níveis de energia dos portadores de carga da camada de **valência** (última camada do átomo, por ora, pense nos elétrons) em relação aos níveis de energia dos **elétrons livres** (que não estão mais fixos no átomo), estes podem transitar livremente no material e assim ... **produzir corrente elétrica**.
- Desde o tempo do vestibular você deve saber que os **níveis de energia são quânticos**, portanto têm faixas de energia que podem ter elétrons e outras faixas que não podem ter elétrons. Nos interessa a última faixa, aquela com os elétrons na camada de valência – BV, **banda de valência** – e os elétrons que estão livres – BC, **banda de condução**. Entre estas duas faixas existe a BP, **banda proibida**. Exatamente a largura desta banda é que vai definir o tipo de material quanto as suas propriedades elétricas!
- Vejamos tudo isto esquematicamente.  
*(Os alunos que seguirão nas especialidades Eletrônica ou Telecomunicações terão uma cadeira específica, onde tudo isto será tratado mais detalhadamente. Para nós agora só interessa o uso disto!)*



# Física dos Semicondutores

## Tipos de materiais

### ■ Isolantes

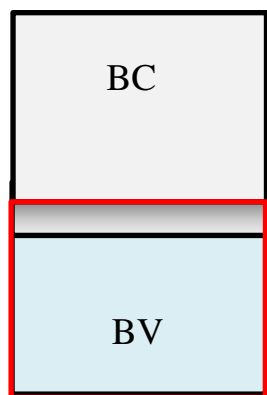


↑  
grande  
 $\approx 6\text{eV}$   
↓

A energia necessária para fazer um elétron sair da BV (onde está fixo ao átomo, não produzindo corrente) e chegar a BC (onde ele está livre e poderia produzir corrente!) é tanta que, antes, destruiria a estrutura cristalina do material ...

O material que tivesse estas propriedades, portanto, não seria candidato a ser um dispositivo eletrônico, mas poderia ser útil para blindagens entre dispositivos elétricos!

### ■ Condutores



Aqui a situação seria dual da anterior. A BV “avançaria” na BC, ou seja, na prática, mesmo o elétron se situando na BV, ele já estaria livre e poderia produzir corrente, não existe uma BP!

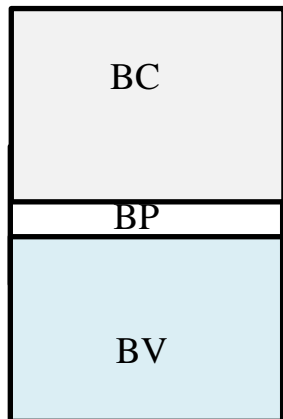
O material que tivesse estas propriedades, portanto, também não seria candidato a ser um dispositivo eletrônico, mas poderia ser útil para interligar dois deles!



# Física dos Semicondutores

## Tipos de materiais

### ■ Semicondutores



A energia necessária para fazer um elétron sair da BV seria pequena, mas agora existe uma BP. Neste cenário é possível produzir corrente elétrica de forma controlada, como veremos.

Quando existe energia suficiente, então um elétron que estava na BV alcança BC e fica livre, deixando uma lacuna, dual, na BV. Esta lacuna (ou buraco) na BV também é portador de carga. Por convenção, se diz que **o elétron livre** na BC tem carga **negativa**, enquanto **lacuna** na BV tem, por dualidade, carga **positiva**.

- Quando acontece este fato se diz que houve uma geração de um par lacuna-elétron. Se por algum motivo o elétron livre perde energia, ele “cai” para a BV e ocupa a lacuna. Este fenômeno se chama **recombinação**. Podemos imaginar que nas CNTP o sistema está em equilíbrio, de modo que geração e recombinação são em mesma quantidade.
- Vamos chamar  **$n$**  a concentração de elétrons livres na BC e  **$p$**  a concentração de lacunas na BV (ambas em  $\#/cm^3$ ). Até aqui, é claro que  **$p = n$**  (mas aguarde, vai mudar!)



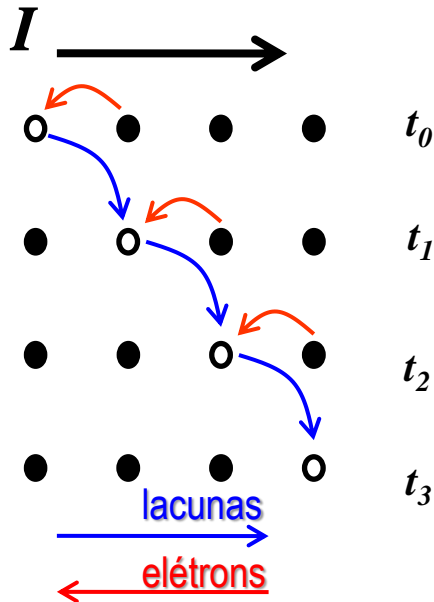
# Física dos Semicondutores

## Corrente de Portadores e Lei da Ação de Massas

- Primeiramente vamos quantificar os portadores por tipo de material (CNTP):

	ISOLANTE	CONDUTOR	SEMICONDUTOR
$n$ (elétrons/m <sup>3</sup> )	$10^3$	$10^{28}$	$10^{16}$

- Com os portadores que definimos, ao longo do tempo a corrente de lacunas se justifica assim (elétrons na BV são “chupados” para os buracos):



- A Física dos Semicondutores prova que dentro de um material a relação entre os portadores é hiperbólica. O principal para nós é que não importa o processo que o material base é submetido, vale a relação:

$$(n_i)^2 = n \times p$$

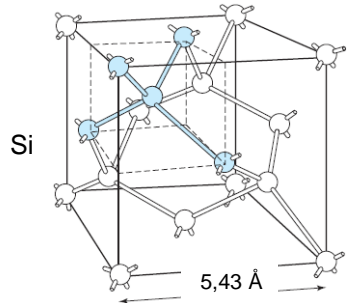
Lei da Ação de Massas

onde  $n_i$  é a concentração intrínseca do material (tabelada)

A criação de **corrente** na Eletrônica é fenômeno proveniente tanto de **portadores elétrons na BC** quanto de **lacunas na BV**

● elétrons  
○ lacunas

# Física dos Semicondutores



## Semicondutores Intrínsecos (ou Puros)

- São aqueles que não sofreram qualquer processo de transformação como aqueles que veremos a seguir. Os materiais mais usados apresentam:

	Si	Ge
$n_i$ (/cm <sup>3</sup> )	$1,5 \times 10^{10}$	$2,5 \times 10^{13}$
$E_G$ (0° C, eV)	1,21	0,78
$E_G$ (300° C, eV)	<b>1,1</b>	<b>0,72</b>

- Vejamos a estrutura atômica do Ge e do Si (estes os clássicos, existem outros substratos – GaAS, GaN, etc.):

Ge → 32

**(4 camadas, 4 elétrons na última)**

~~1s<sup>2</sup>~~

~~2s<sup>2</sup> 2p<sup>6</sup>~~

~~3s<sup>2</sup> 3p<sup>6</sup> 3d<sup>10</sup>~~

~~4s<sup>2</sup> 4p<sup>2</sup> ...~~

⋮

⋮

Si → 14

**(3 camadas, 4 elétrons na última)**

~~1s<sup>2</sup>~~

~~2s<sup>2</sup> 2p<sup>6</sup>~~

~~3s<sup>2</sup> 3p<sup>2</sup>~~

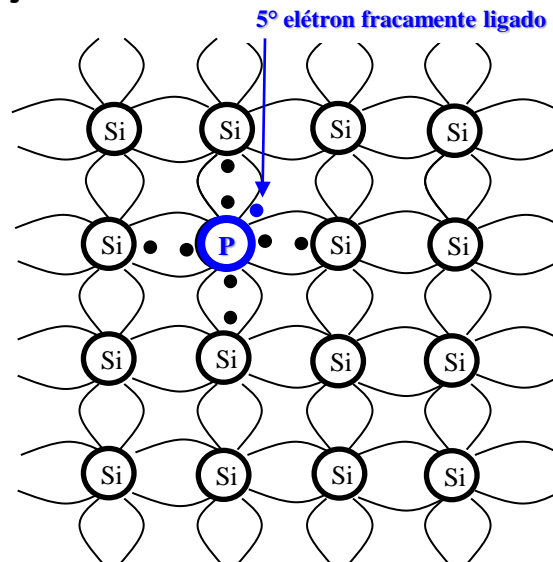
⋮

⋮

ambos elementos são propícios para a relação de covalência!

## Dopagem Tipo n

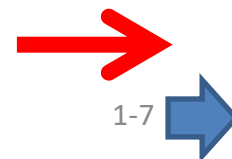
- O processo de dopagem significa inserir átomos de elementos diferentes com características apropriadas (são chamadas impurezas). Uma base pura (onde valem todas aquelas características que mencionamos antes!) apresenta a relação de covalência como na figura:



A relação de covalência implica emparelhar elétrons entre átomos vizinhos. Um átomo alcança a estabilidade que dentro da estrutura cristalina ele mantém 8 elétrons na camada de valência.

Uma dopagem Tipo n consiste em inserir impureza **pentavalentes**, como é o caso do Sb (antimônio), **P** (Fósforo) ou Ar (Arsênio).

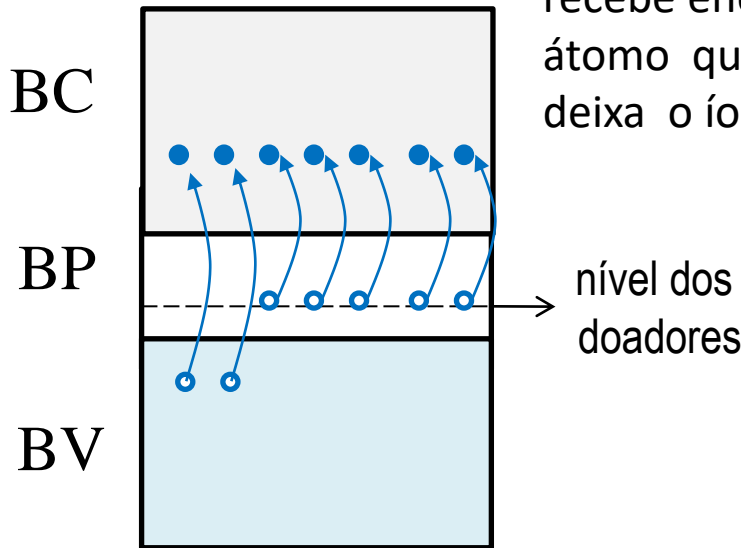
Dos cinco elétrons da impureza, quatro deles podem manter a relação de covalência do Si, mas o quinto ficará mais fracamente ligado!



# Física dos Semicondutores

## Dopagem Tipo n (... continuação)

- A impureza é pentavalente (P, por exemplo), então o nível de energia daquele quinto elétron fracamente ligado vai superpor a faixa BP do Si, como ilustrado abaixo. Vale dizer, menos energia se faz necessária para torná-lo elétron livre. Quando aquele quinto elétron



recebe energia suficiente e torna-se livre (está agora em BC!), o átomo que ele deixou passa a ter carga positiva, ou seja, ele deixa o íon DOADOR (diz-se que doou elétron para BC).

Observe outro aspecto que mudou: neste cenário temos mais portadores de carga elétrons que portadores de carga lacunas, ou seja,  $n \gg p$ .

Vamos representar a dopagem tipo n assim:

Por fim, observe que neste tipo de dopagem ainda restam lacunas na BV proveniente do equilíbrio entre geração-recombinação

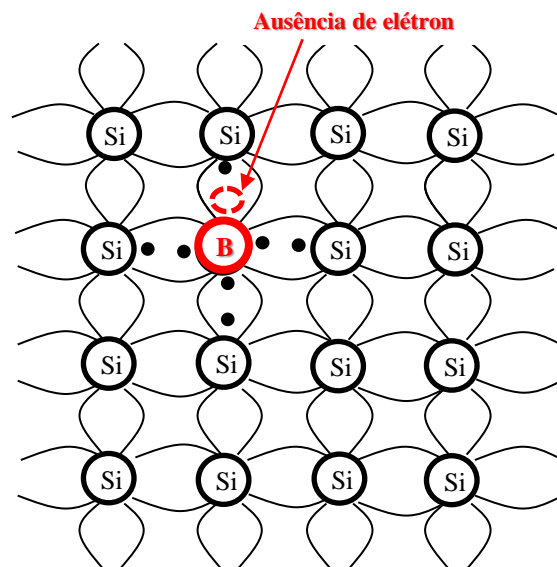
- representa portadores majoritários, os **elétrons** carga -
- ⊕ representa íon **doador**, têm carga +, mas não produz corrente elétrica, (concentração,  $N_D$ )



# Física dos Semicondutores

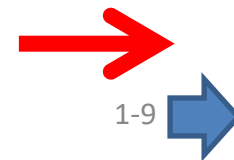
## Dopagem Tipo p

- Uma dopagem Tipo p consiste em inserir impureza **trivalentes**, como é o caso do Ga (Gálio), **B** (Boro) ou In (Índio).



Agora a situação é outra. O Boro só contribui com 3 elétrons, portanto, existe uma carência de um elétron no seu átomo para alcançar a estabilidade.

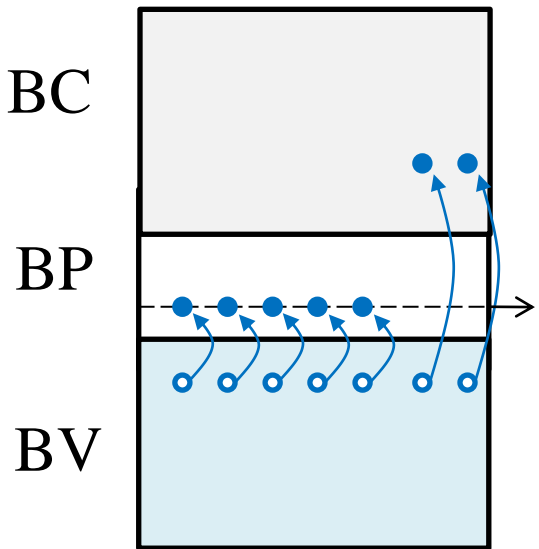
Dentre os elétrons prestes a subir de nível de energia a partir da banda de valência é mais fácil preencher o sorvedouro de elétrons do átomo da impureza, um nível de energia inferior ao da BC. Ou seja, é mais provável um elétron vindo da BV preencher a carência de elétrons do Boro.



# Física dos Semicondutores

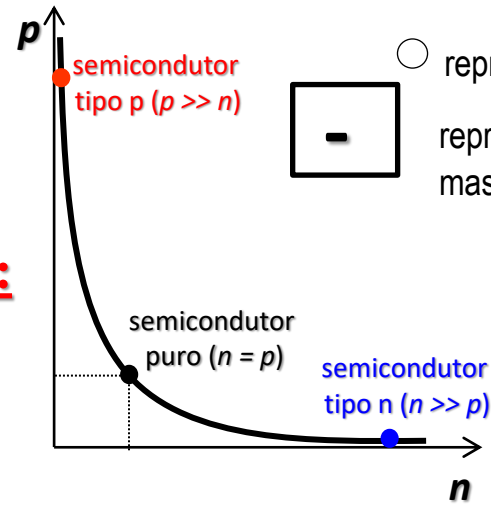
## Dopagem Tipo p (... Continuação)

- O cenário é o dual do tipo n. Na banda proibida do Si vai se alocar o nível de energia necessário para absorver elétrons para a impureza trivalente. Por “aceitar” elétrons vindos de BV é que se diz que este é o nível dos ACEITADORES.



Por se situarem na BP do Si, estes elétrons não são portadores de carga, porém as lacunas deixadas na BV, sim, estas são! Deste modo,  $p \gg n$ .

Vamos representar a dopagem tipo p assim:



- representa portadores majoritários, as lacunas, carga +
- - representa ion aceitador, têm carga -, mas não produz corrente elétrica (concentração,  $N_A$ )

## Dopagem e Hipérbole:

$$(n_i^2) = n \times p$$

## Equilíbrio Elétrico:

$$n + N_A = p + N_D$$



# Física dos Semicondutores

## Correntes de Deriva e de Difusão

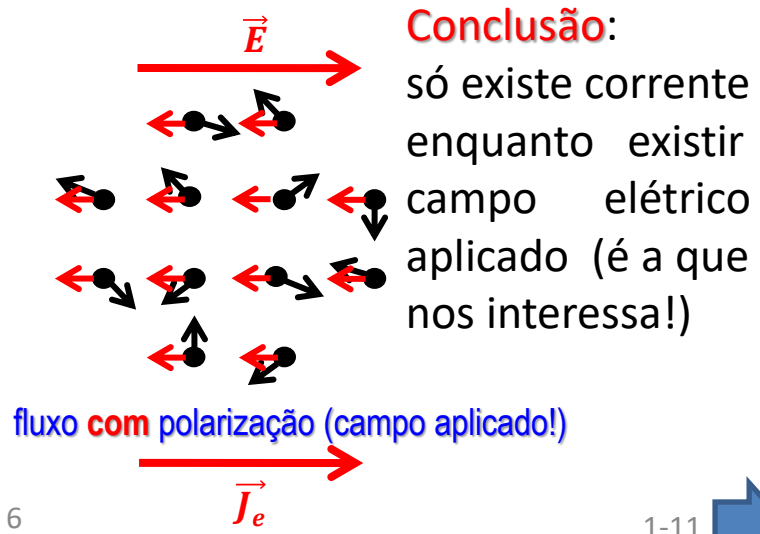
- Corrente elétrica é fluxo de portadores de carga. Agora sabemos que é fluxo de elétrons na BC ou de lacunas na BV quando usamos (e usaremos!) dispositivos eletrônicos semicondutores. Como tal fluxo ocorrerá atravessando a seção reta de um material, então será conveniente nos referir a ela com densidade de corrente, A/cm<sup>2</sup>.
- Em resumo, existem dois tipos: corrente de deriva e corrente de difusão.
- 1. Corrente de Deriva

Proveniente de campo elétrico aplicado. Imaginemos elétrons livres no interior de um material semicondutor. Seu fluxo pode ser representado assim:



aplicando agora um campo elétrico:

raciocínio análogo pode ser feito com lacunas

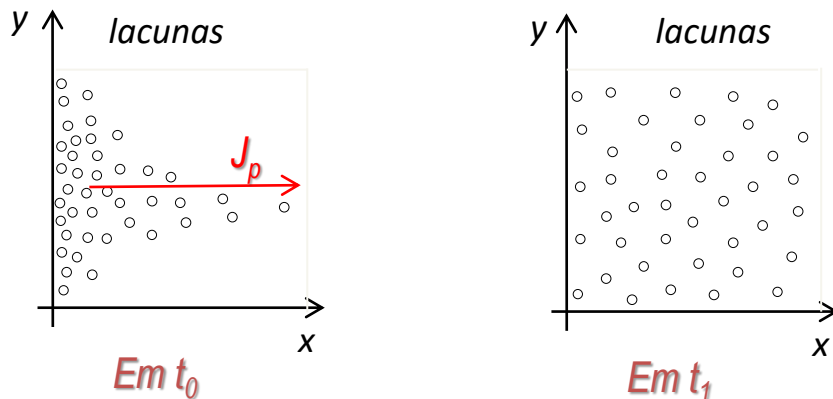


# Física dos Semicondutores

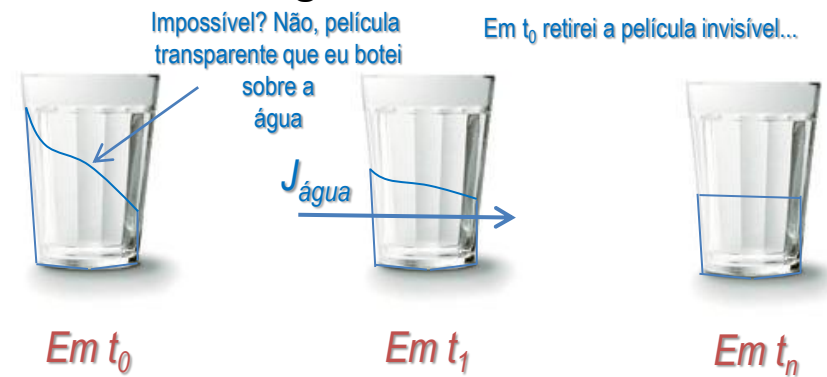
## Correntes de Deriva e de Difusão (continuação)

### 2. Corrente de Difusão

Proveniente de gradiente de concentração. Imaginemos agora uma distribuição espacial de lacunas:



Metáfora da água:



**Conclusão:** Trata-se de uma corrente transitória (até acabar o gradiente!). Ela interessará particularmente aos alunos de elétrica, os outros, regime permanente.

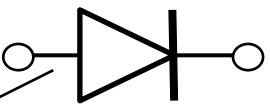
**Quantificando corrente de deriva:** se  $\sigma$  é condutividade do material,  $\vec{E}$  é o campo elétrico, então  $\vec{J} = \sigma \vec{E}$ , mas  $\sigma = qn\mu_n$ , onde  $\mu_n$  é a mobilidade dos elétrons. Considerando elétrons e lacunas finalmente  $\sigma = qn\mu_n + qp\mu_p$ .  $q$  é a carga do elétron, que junto com  $\mu_n$  e  $\mu_p$  são valores tabelados por material (vide apostila!)



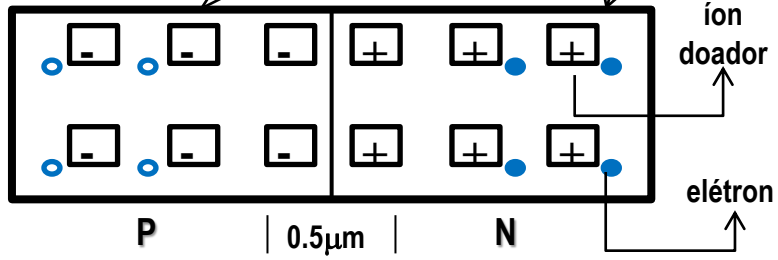
# Física dos Semicondutores

- .Tipo n /Eletrons/Pentav/ $N_D$
- .Tipo p/Lacunas/Triv/ $N_A$
- . Deriva e Difusão

## O Diodo de Junção



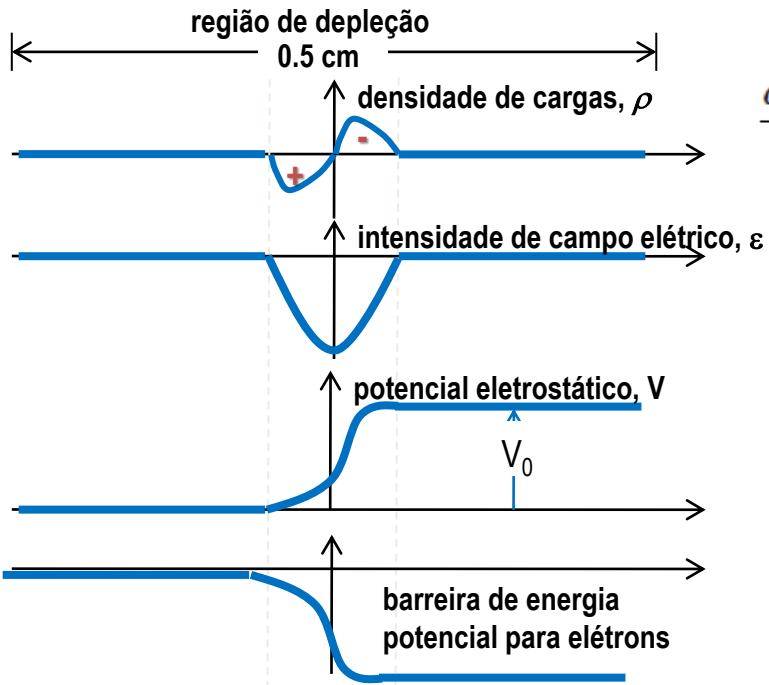
- Num mesmo substrato de Si ou Ge, dopa *tipo p* de um lado e *tipo n* do outro.
- Na figura abaixo aparecem também a região de depleção e os gráficos indicados.



Região de depleção significa região com ausência de portadores, **Por quê?**

A ligação entre cada uma das variáveis indicadas:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon}; \quad \epsilon = \frac{dV}{dx}; \quad V = -\int \epsilon dx; \quad \text{barreira} = -V$$



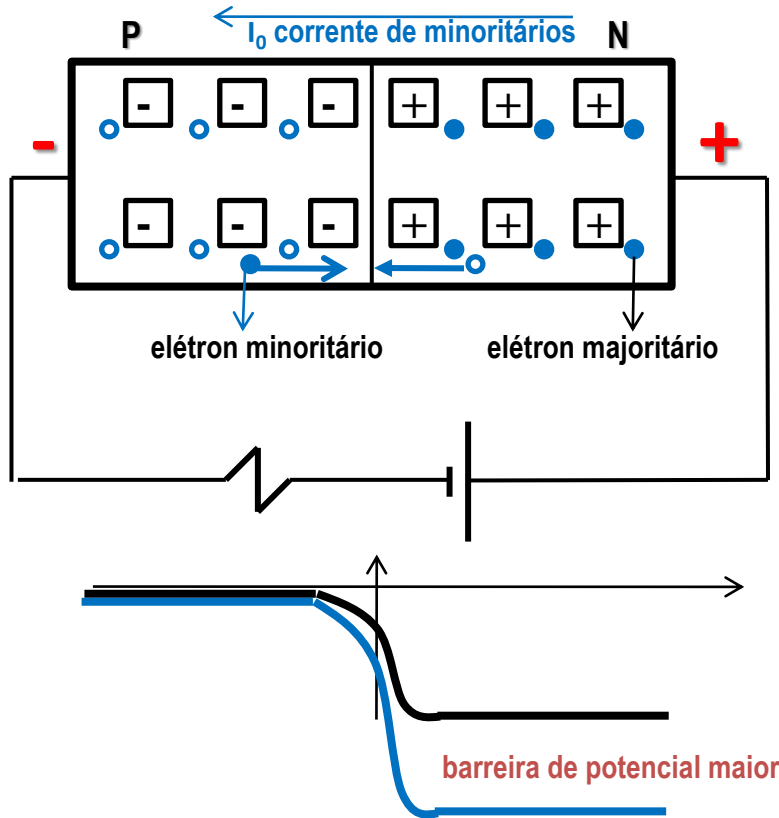
Observe que desta forma o diodo apresenta algum parentesco com o capacitor, existe uma tensão entre os dois lados, a barreira de potencial, que depende do substrato utilizado, Ge ou Si.

**Obs: Semicondutores de GaN prenunciam o futuro. P.ex., portas USB atuais carregam a 5W, comparado com os 240W que os USB-PD (USB Power Delivery) são capazes! A diferença será o tempo de carregamento.**



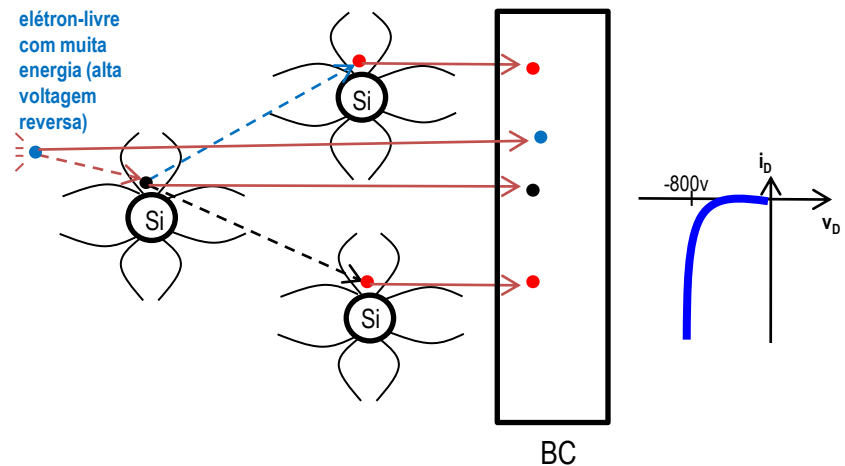
# Física dos Semicondutores

## Junção P-N Polarização Reversa



Aumenta a barreira de potencial, a corrente produzida é de minoritários, portanto é pequena.

Pode acontecer um efeito indesejado, o "Efeito Avalanche":

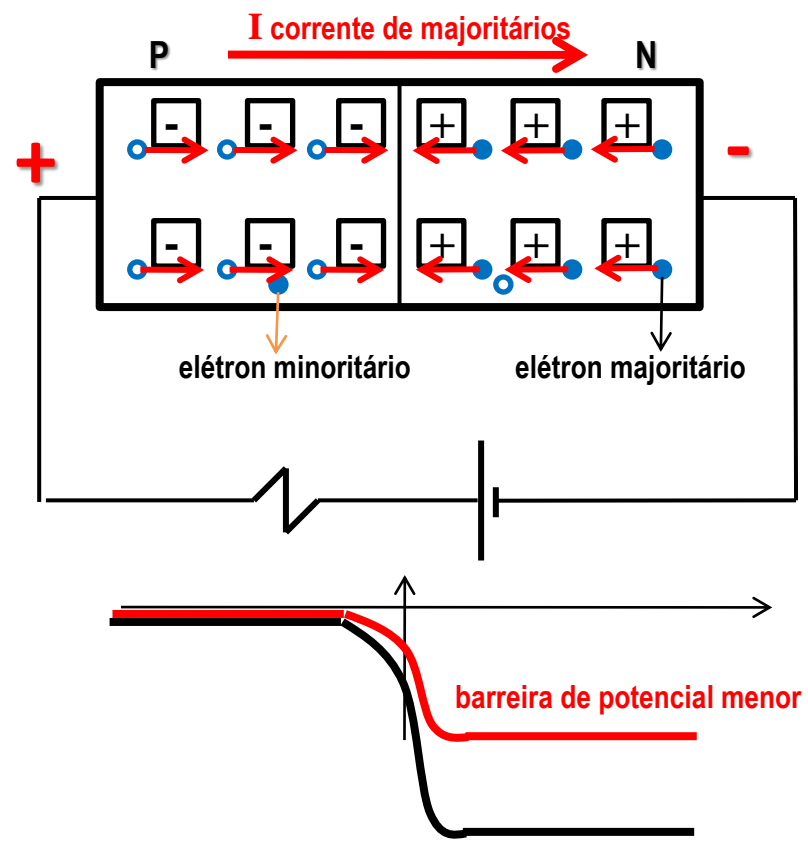


Uma baixa corrente de minoritários com o aumento da voltagem reversa pode **umentar explosivamente**. **Fugir disto!**



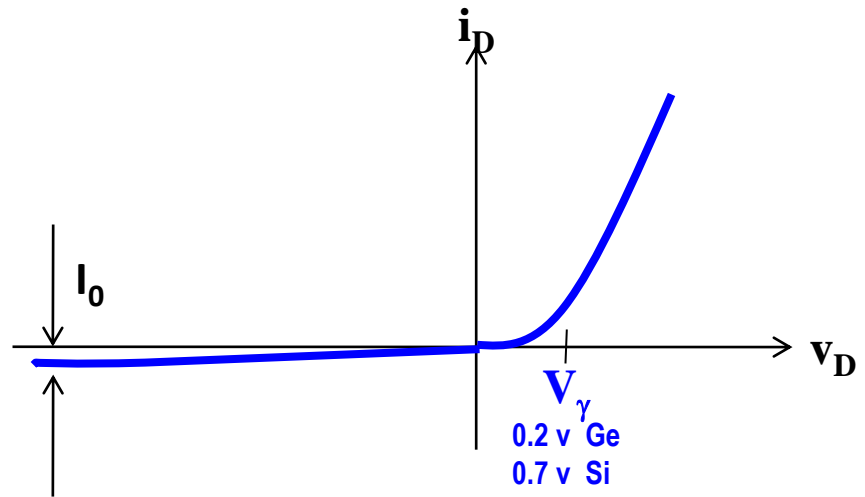
# Física dos Semicondutores

## Junção P-N Polarização Direta



Diminui a barreira de potencial, a corrente produzida é de majoritários, portanto pode ser grande.

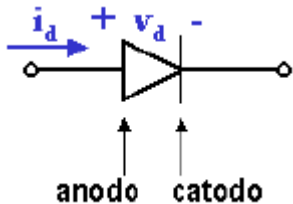
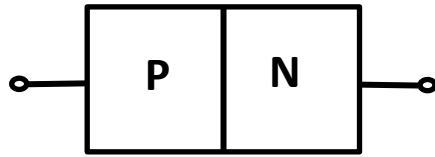
- Característica V-I do diodo:



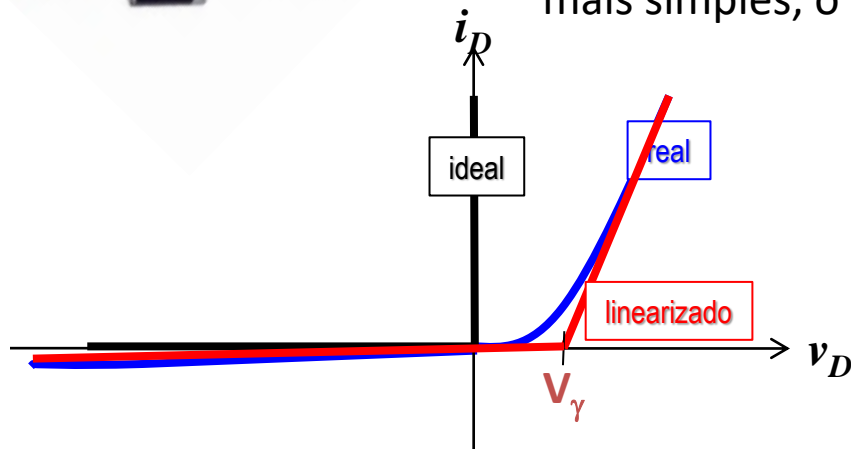
	$V_\gamma$ (tensão limiar), volts	$r_d$ (resistência direta), $\Omega$	$R_r$ (resistência reversa), $\Omega$
Ge	0.2	10 – 20	100M – 500M
Si	0.7	5 - 15	100M – 500M



# Modelos do Diodo



- Só de observar a característica V-I do diodo fica claro que ele é uma boa chave ON-OFF, coisa muito útil para os humanos! Símbolo, o que representa e aspecto:
- A característica V-I mostra na região ON um aspecto **não-linear**. Modelar característica não-linear não é conveniente para o uso. Na prática, se usa aproximações mais ou menos fidedignas: ideal, linearizada ou híbridas. Conforme o contexto, qualquer destas aproximações são apropriadas. A (grande) maioria das aplicações vale a pena usar o modelo mais simples, o ideal.



- Também só de observar as três alternativas dá pra ver que o modelo ideal é o mais diferente da realidade e o linearizado o mais próximo.
  - Não se esqueça que os híbridos são misturas entre estes dois extremos.



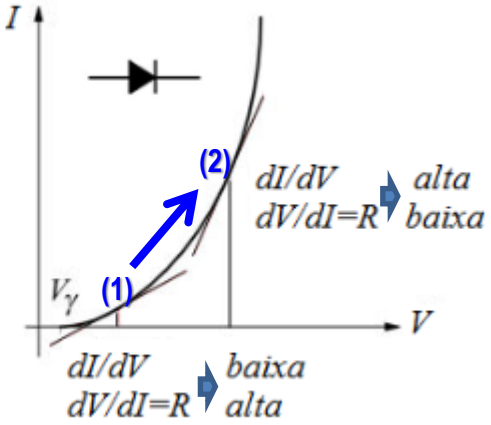
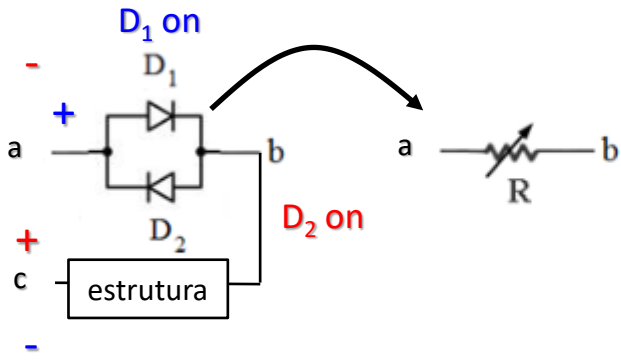


# Diodo é Não-Linear

Linearidade



- Antes de começar a detalhar como usar o diodo vejamos algumas consequências de sua **característica V-I ser não-linear** (ou seja, ela ser de fato arredondada e não reta)
- A primeira consequência – e mais importante – é que na **maioria** dos casos vamos fazê-la aproximadamente **linear por segmentos**. Então este enfoque é o que veremos a seguir e será assim a análise de 99% do seu uso.
- No entanto, em algumas aplicações, será exatamente **a não linearidade que nos interessará**. Vejamos o conceito. Observe a figura a seguir:

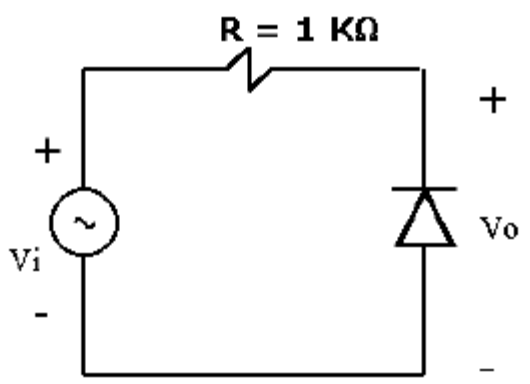


- Nesta conformação sempre terá algum diodo na região **ON em série com alguma estrutura** e ao conjunto imaginemos uma tensão que sobe...
- Vamos do ponto (1) para o ponto (2) onde a **resistência do diodo é mais baixa**.  
Então a queda de tensão no diodo diminui. Então **a soma de tensão** na estrutura em série com os diodos **diminui**. E vice-versa.

O que acabamos de descrever é o princípio do **CAG** ou **estabilizador** ou do que brevemente chamaremos “efeito mola”: **A tensão vai para um lado, o circuito puxa para o outro**. Aguarde o futuro próximo...

# Modelo Ideal

- Trace o gráfico da saída, modelo ideal.

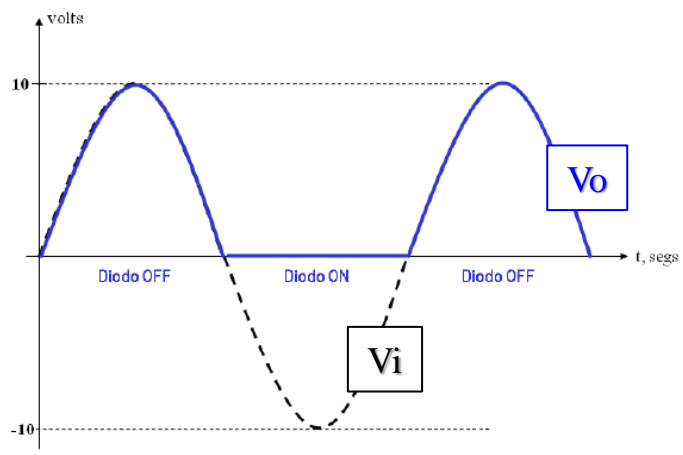
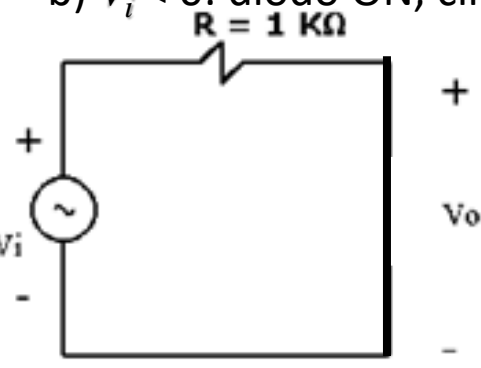
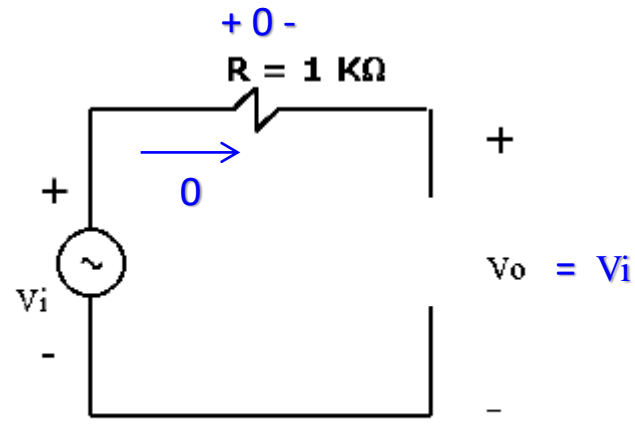


A estratégia geral de análise é “dividir para conquistar”. Significa dividir o problema segundo cada estado(s) do(s) diodo(s). E confrontar com a entrada respectiva.

a)  $V_i > 0$ : diodo OFF, circuito **aberto**.

$V_i = 10 \text{ sen } t$

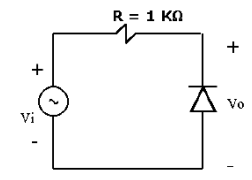
b)  $V_i < 0$ : diodo ON, circuito **em curto**.



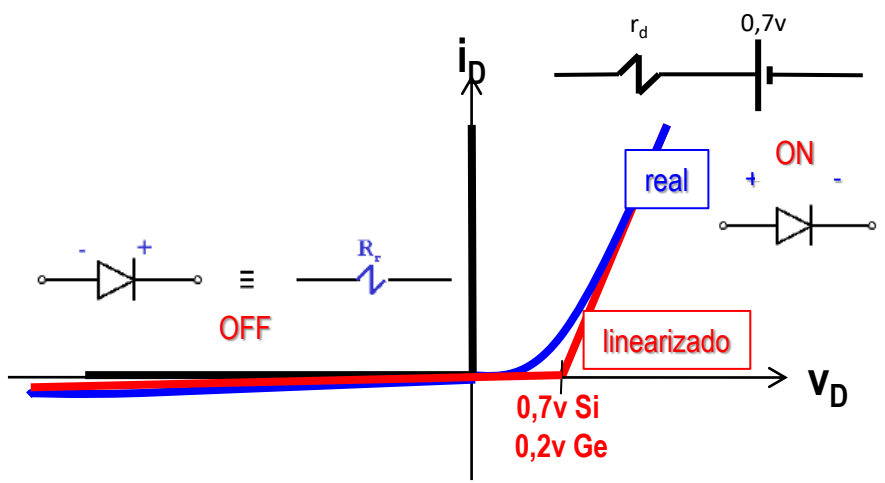
Muito simples tudo!



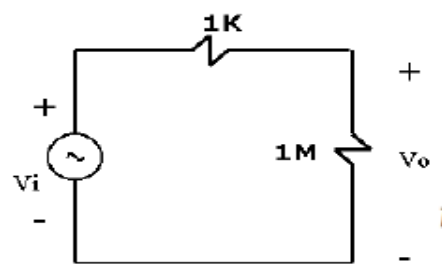
# Modelo Linearizado



- O mesmo problema. Modelo linearizado, diodo de Si.  $R_r = 1M\Omega$ ,  $V_\gamma = 0,7v$ ,  $r_d = 10\ \Omega$   
 Antes, vamos ver os circuitos equivalentes no modelo linearizado.

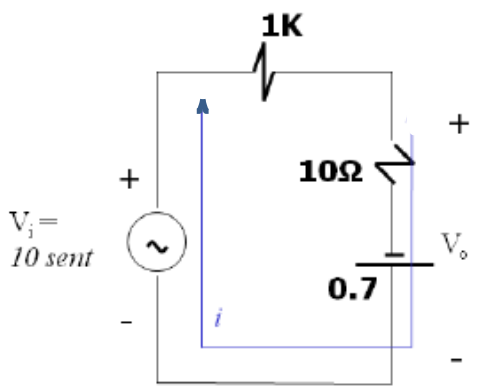


a)  $V_i > -0,7v$ : diodo OFF.



$$V_0 = \frac{10^6 V_i}{10^6 + 10^3} = \frac{1000 V_i}{1010} = 0.99 V_i$$

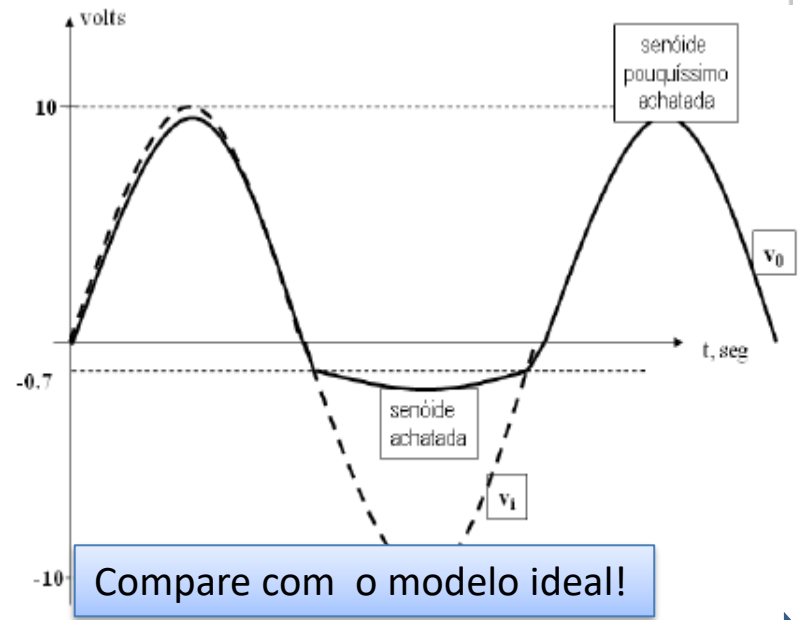
b)  $V_i < -0,7v$ : diodo ON.



$$V_i + 0.7 = (1 + 0.01)i$$

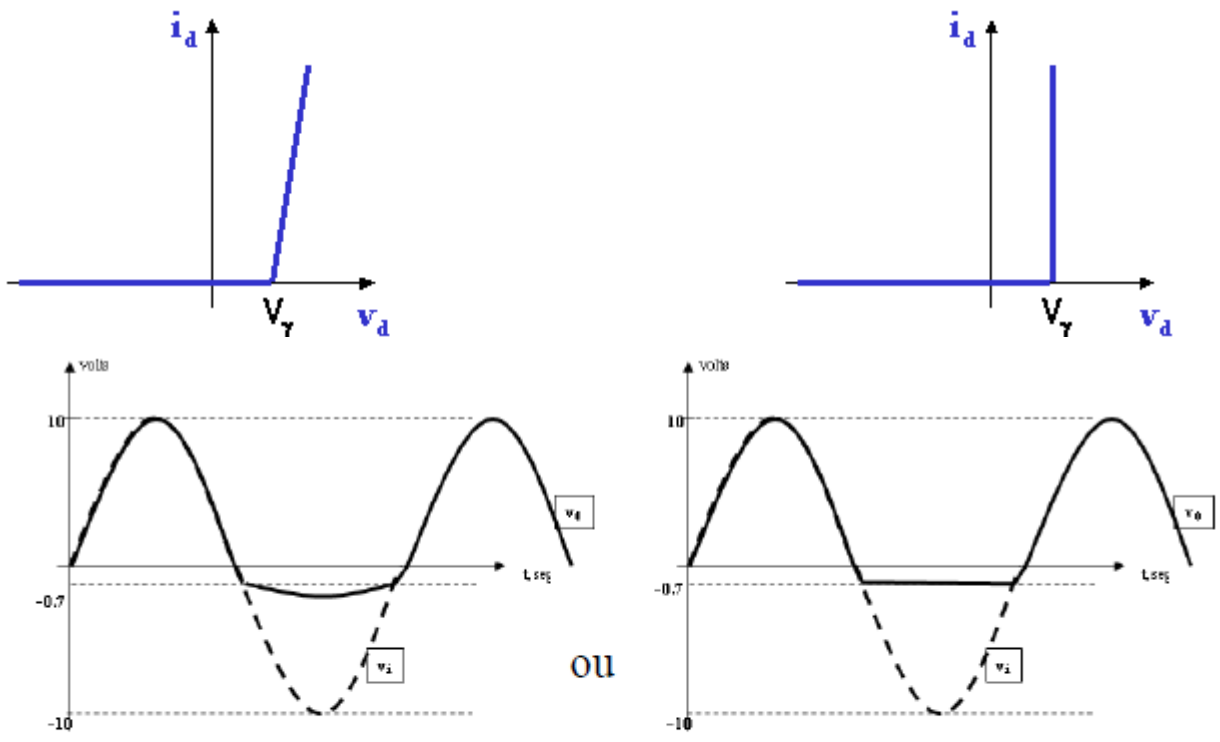
$$i = \frac{V_i + 0.7}{1.01} \therefore V_0 \approx -0.7 + 0.01i$$

$$V_0 = -0,7 + 0,001V_i$$



# Modelos Híbridos

- Dois exemplos de modelos híbridos e seus respectivos resultados para o mesmo circuito.



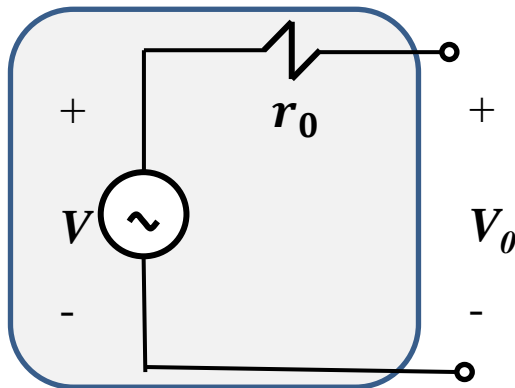
praticamente idêntico ao do modelo linearizado

praticamente idêntico ao do modelo ideal, só que a ceifagem ocorre em 0.7v



# Gerador de Funções: questões práticas

- Um gerador de funções oferece ondas senoidais, quadradas e triangulares. Serão usadas intensamente em Eletrônica. Como todo equipamento eletrônico terá uma impedância de saída, normalmente baixa, algo entre 40 e 150  $\Omega$ .
- Para determinar esta impedância de saída você pode usar um método indireto:



- Se medíssemos na saída e o circuito fosse aberto então na saída obteríamos a tensão prometida (nominal):

$$V_0 = V$$

**Atenção:** Podemos usar outra proporção. Esta de 50% é apenas a mais simples

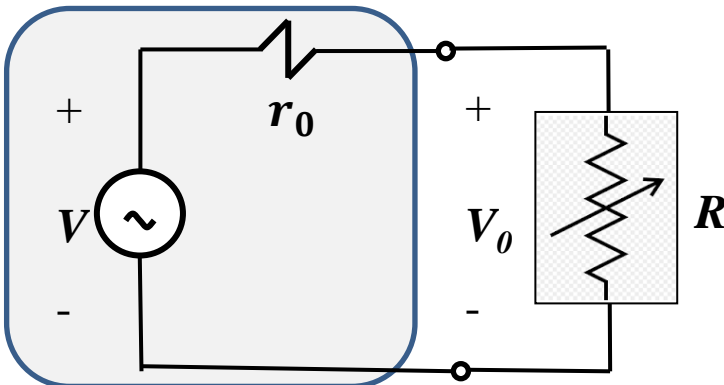
- Porém a realidade NUNCA é assim. Sempre alimentamos uma carga. Uma carga alimentada pelo gerador e aqui representada pelo potenciômetro receberá a tensão:

Se ajustarmos  $R = r_0$ , então

$$V_0 = \frac{R}{R + r_0} V$$

$$V_0 = \frac{1}{2} V$$

Ou seja, temos um método indireto de obter a impedância interna deste equipamento!!! As turmas farão este experimento. (acha  $R$  que faça a senóide cair à metade)



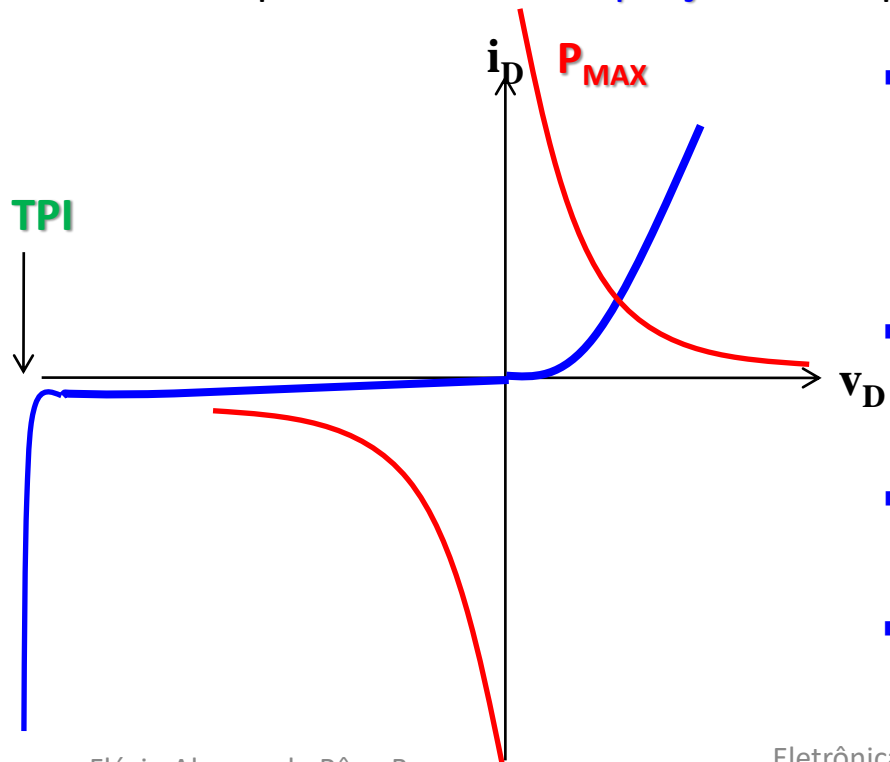
# Diodos: questões práticas

- Quando se vai ao mercado comprar o componente diodo deve-se ter em mente basicamente duas informações de projeto.

1) Qual a máxima tensão inversa (**TPI**)? O problema aqui é o “efeito Avalanche”.

2) Qual a máxima potência ( **$P_{MAX}$** ) que o componente aguenta sem queimar?

Ambas as questões afetam o **preço** do componente. Vejamos:

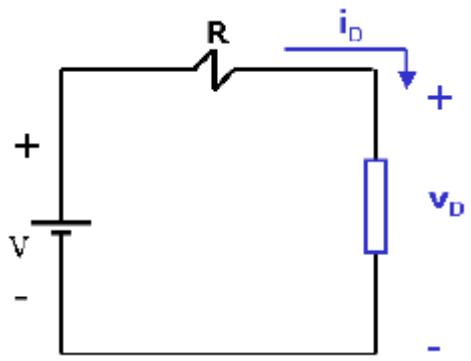


- Observe que a curva de potência máxima é uma hipérbole. Ela pode, inclusive, cortar na polarização reversa a região de avalanche (isto, veremos, é crítica com zener)
- Na região ON a hipérbole de potência limita corrente e tensão máximas
- Se for além de  **$P_{MAX}$**  o componente queima!
- Na prática a potência máxima limita  $I_{DMAX}$



# Reta de Carga

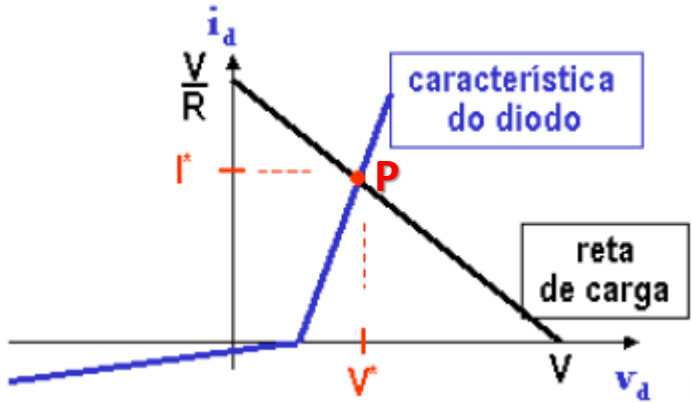
- Vimos a característica V-I do componente (diodo até aqui, mas se estenderá para os demais dispositivos eletrônicos). Ela **só depende do componente**. Vejamos agora a reta de carga que **só depende do circuito envolvente**. Considere o circuito:



$$V = Ri_D + v_D \Rightarrow i_D = \frac{V}{R} - \frac{1}{R} v_D$$

(reta de carga)  
 ↑ coeficiente angular  
 ↓ coeficiente linear

Supondo modelo linearizado, a confluência entre a reta de carga e a característica V-I nos dá o ponto P ou ponto de operação do dispositivo eletrônico (aqui, diodo):



- Observe que se a alimentação ao invés de uma *pilha* for uma *senóide*, o ponto P vai se deslocar dinamicamente por sobre a característica V-I, as retas de carga sempre paralelas. Então a reta de carga é o lugar geométrico do ponto P

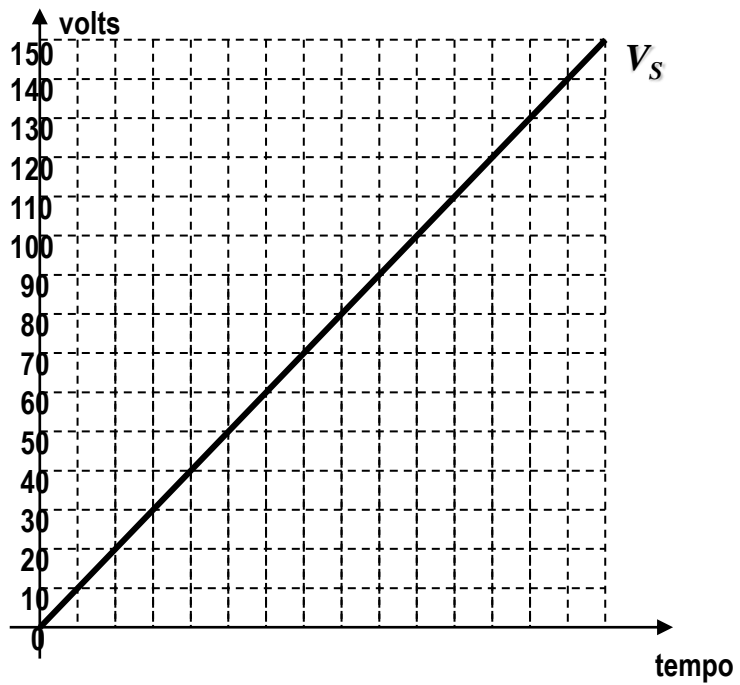
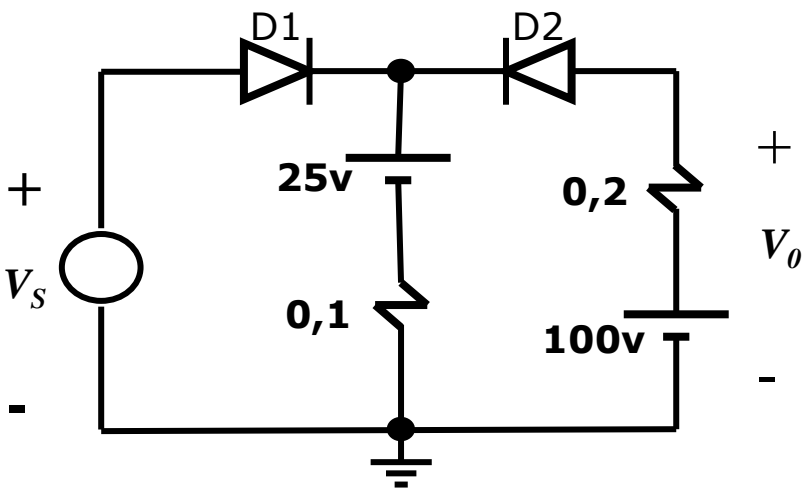
Este é um método gráfico alternativo de solução de circuitos



# Circuitos Ceifadores

- Neste ponto podemos ter um método genérico de análise de qualquer circuito eletrônico. Aproveitamos para estabelecer uma convenção: correntes em mA e resistências em  $K\Omega$ , então voltagens serão em volts.

Exemplo: Se  $V_s$  é uma rampa até 150 volts, use modelo ideal, descubra os estados do diodo e trace a saída  $V_o$



a) Hipótese:  $0 < V_s < V_a$  (a calcular!): D1 OFF D2 ON (100 volts prevalece!); Modelo Ideal

D1 aberto; D2 curto

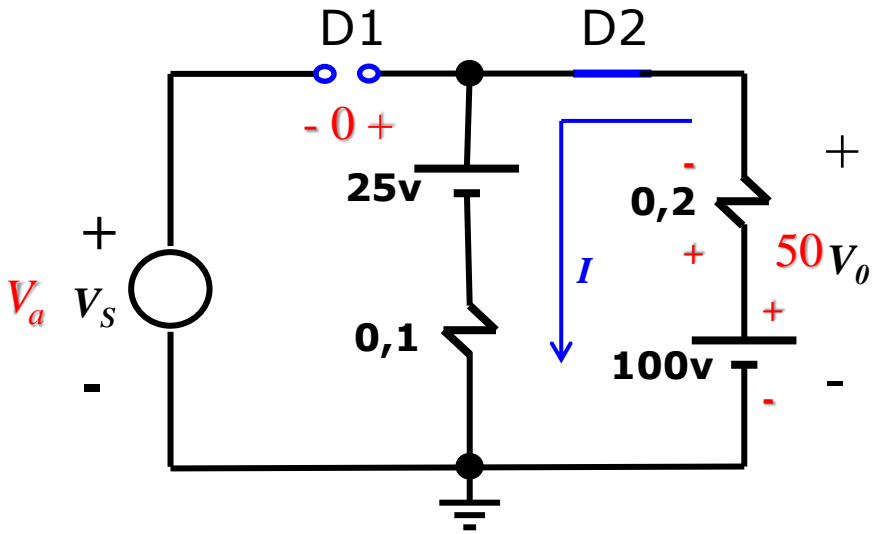
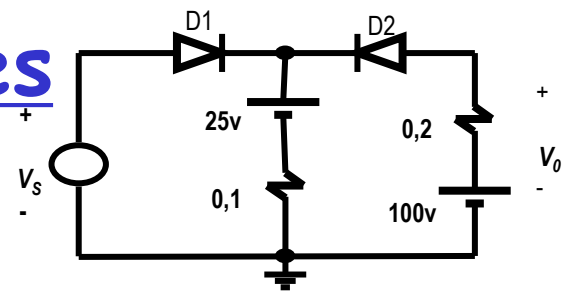
Nunca é demais lembrar que uma hipótese pode estar errada! Os resultados é que demonstrarão!





# Circuitos Ceifadores

(... continuação)



$$I = \frac{100 - 25}{0,2 + 0,1} = 250 \therefore V_0 = 100 - (0,2)250$$

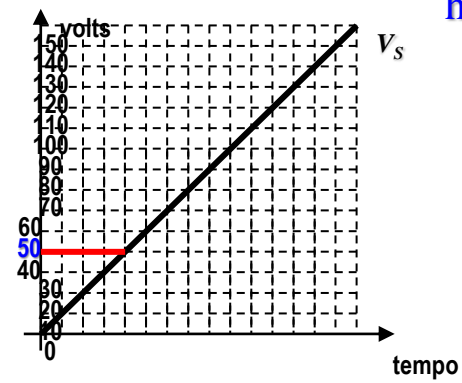
$$\therefore V_0 = 50 \text{ volts}$$

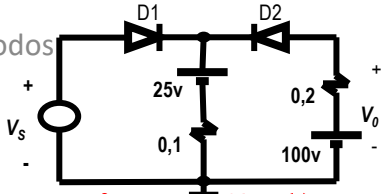
Então D2 está realmente em curto (50v no anodo, 50v no catodo) e D1 aberto (50 v no catodo, tensão baixa no anodo, diodo reverso cada vez menos) – hipótese certa!

Cálculo de \$V\_a\$: à medida que \$V\_s\$ vai subindo o ponto P em D1 vai se aproximando de zero volts. No limite D1 estará no “bico” de sua característica V-I,

$$V_a = 50 \text{ volts e a faixa é } 0 < V_s < 50\text{v (D1 OFF D2 ON)}$$

A transição será para D1 ON, D2 ON





# Circuitos Ceifadores

(... continuação1)

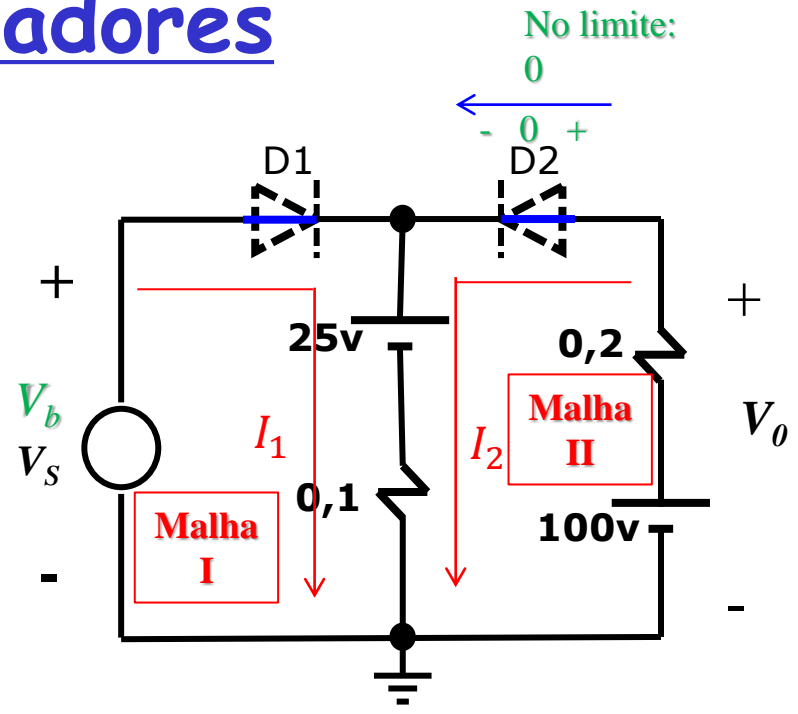
b) Hipótese:  $50 < V_s < V_b$  (a calcular!): D1 ON; D2 ON (a fonte variável de entrada ainda é fraca para virar D2!)

Malha I:  $V_s - 25 = 0,1(I_1 + I_2) \dots(1)$

Malha II:  $100 - 25 = 0,2I_2 + 0,1(I_1 + I_2) \dots(2)$

Saída:  $V_0 = 100 - 0,2I_2 \dots(3)$

Resolvendo (1), (2) e (3);  $V_0 = v_s$



Observe que nenhuma destas contas precisaria ser feita (a fizemos para efeito de generalidade!), bastava notar que os diodos em curto levam a entrada até a saída!

Vejam agora até onde vale este par de estados do diodo. As pilhas são valores constantes, mas  $V_s$  vai crescendo. O diodo D1 cada vez mais está ON, mas o diodo D2 estará CADA VEZ MENOS ON. No limite, D2 não tem corrente e a tensão é zero:  $V_b = 100v$

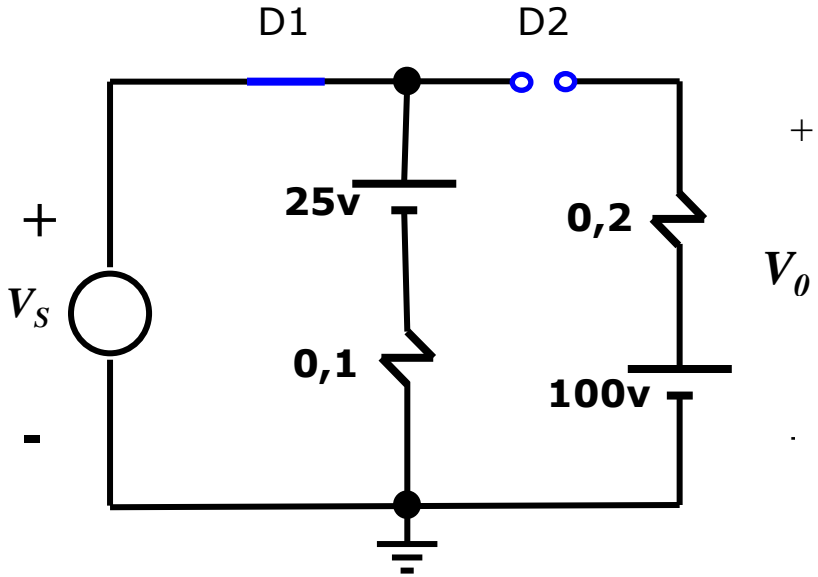
A transição, portanto, será em D2 que de ON vira para OFF, o próximo e último par de estados.



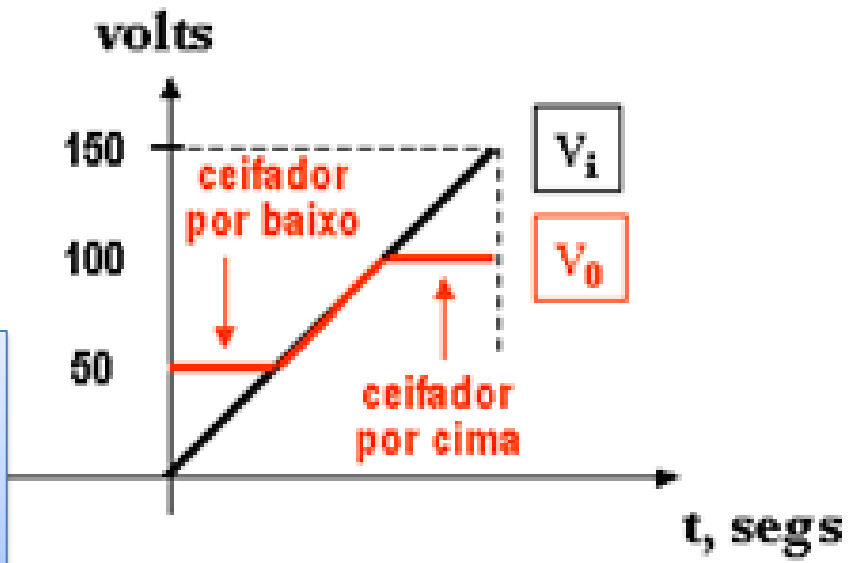
# Circuitos Ceifadores

(... continuação2)

c) Hipótese:  $V_S > 100$ : D1 ON; D2 OFF



$V_0 = 100 \text{ volts}$



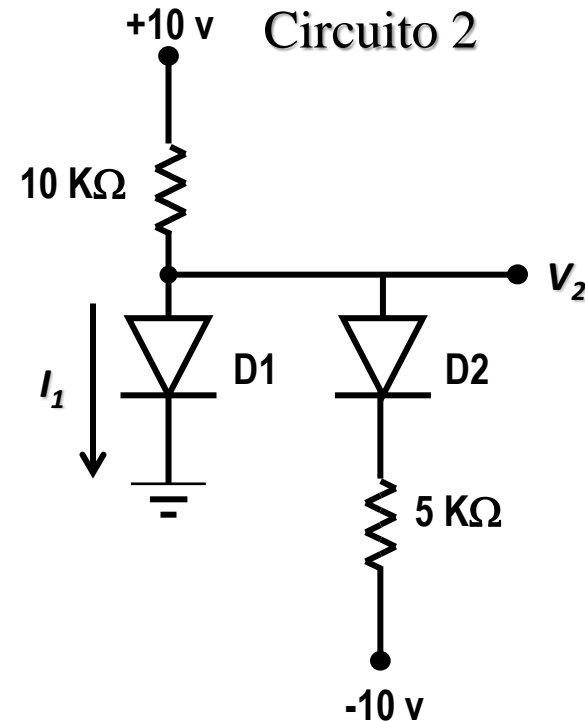
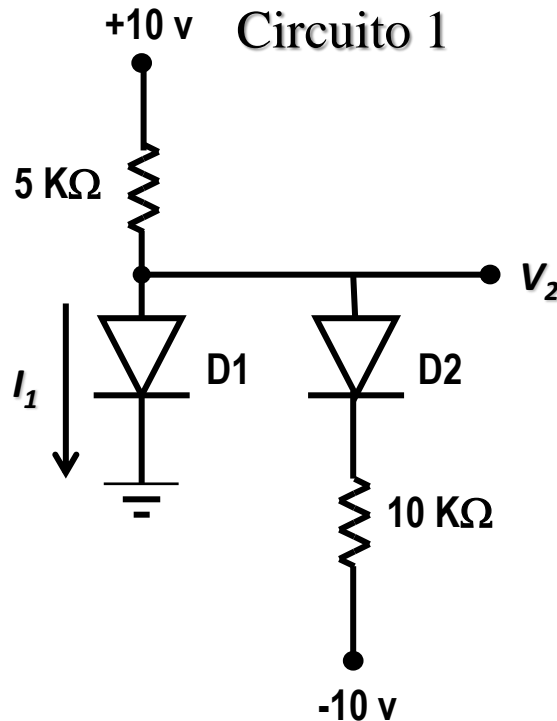
**Conclusão:** o circuito em questão é um duplo ceifador, em 50 volts por baixo e 100 volts por cima. Mais uma vez lembre que a função deste circuito é sempre esta, não depende da entrada! O comportamento do circuito é o mesmo.



# A Questão da Hipótese Certa

- Nos circuitos anteriores um raciocínio simples nos levou ao(s) estado(s) do(s) diodo(s). Nem sempre é simples assim. Via de regra se faz uma hipótese, os resultados o verificam ou não. Vejamos isto via exemplos:

Exemplo: Aproveitaremos este exemplo para iniciar uma representação mais enxuta de circuitos eletrônicos. Considere os circuitos e ache a tensão e a corrente assinalada. (Obs: esta forma de representar circuitos será muito usada em transistores. Aguarde!)



# Exemplo: Diodo como Chave

- Comecemos com o **Circuito 1**. D2 tem do lado do anodo uma pilha de +10v e no lado do catodo -10v. Seria lógico ele estar ON. Se D2 é um curto é razoável pensar que o catodo de D1 é negativo, então D1 poderia estar OFF:

Hipótese: D1 OFF, D2 ON

Se isto ocorre, de cara  $I_1 = 0$

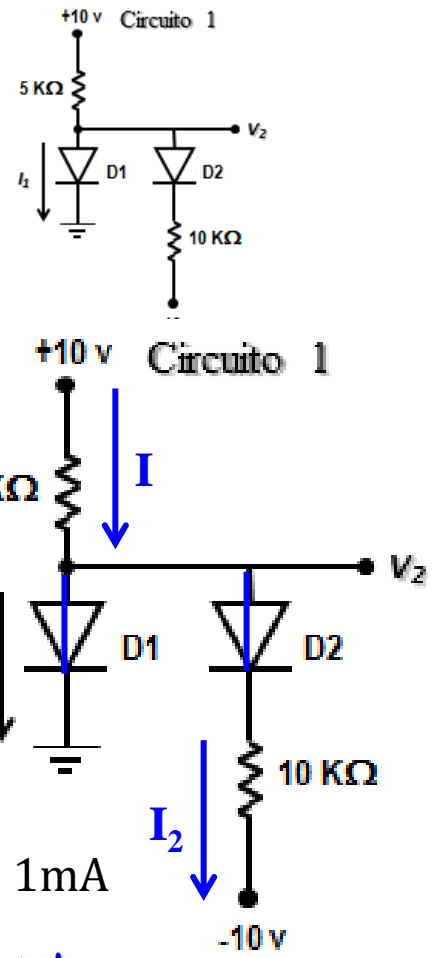
$$I_2 = \frac{10 - (-10)}{10 + 5} = \frac{4}{3} \text{ mA}$$

$$V_2 = 10 - (5) \left( \frac{4}{3} \right) = \frac{10}{3} \text{ v}$$

Se o anodo de D1 é positivo e catodo é terra é claro que D1 NÃO PODE estar OFF  $\Rightarrow$  **Hipótese errada!**

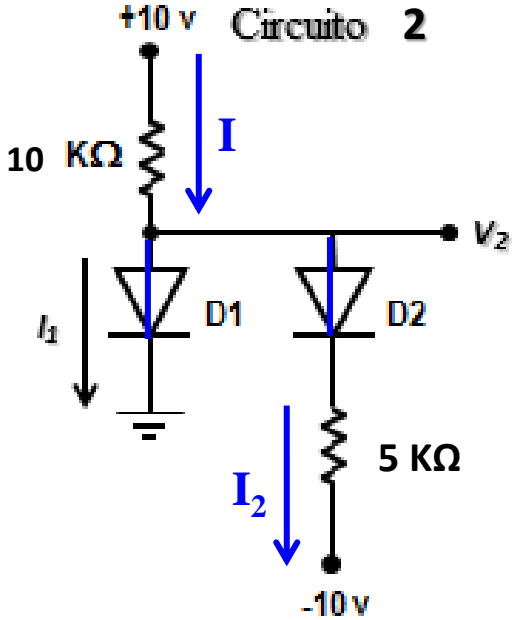
- Na realidade **D1 ON, D2 ON**:  $V_2 = 0$   $I_2 = \frac{0 - (-10)}{10} = 1 \text{ mA}$   
 (teste)  $I = \frac{10}{5} = 2 \text{ mA}$  Kirchoff:  $I = I_1 + I_2 \therefore 2 = I_1 + 1 \rightarrow I_1 = 1 \text{ mA}$

O que comprova que D1 está realmente ON e a **hipótese está certa!**



# Exemplo: Diodo como Chave

- Agora o **Circuito 2**. Tentemos a hipótese que deu certo no Circuito 1 – D1 e D2 ON:



$$I_2 = \frac{0 - (-10)}{5} = 2\text{mA}$$

$$I = \frac{10}{10} = 1\text{mA}$$

Kirchoff:  $I = I_1 + I_2 \therefore 1 = I_1 + 2 \rightarrow I_1 = -1\text{mA}$

⇒ **Hipótese errada!**

- Na realidade **D1 OFF, D2 ON:**

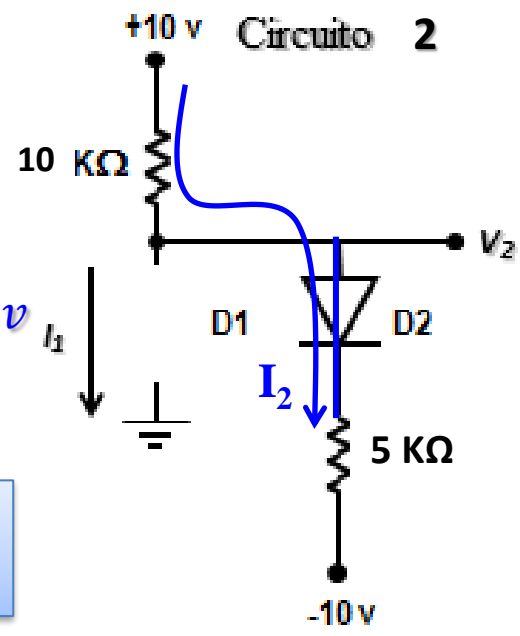
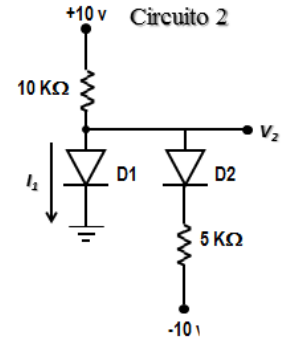
Só observar que  $I_1 = 0$

$$I_2 = \frac{10 - (-10)}{10 + 5} = \frac{4}{3}\text{mA}$$

$$V_2 = 10 - (10) \left(\frac{4}{3}\right) = -\frac{10}{3}\text{V}$$

Tensão negativa no anodo de D1 confirma esta hipótese!

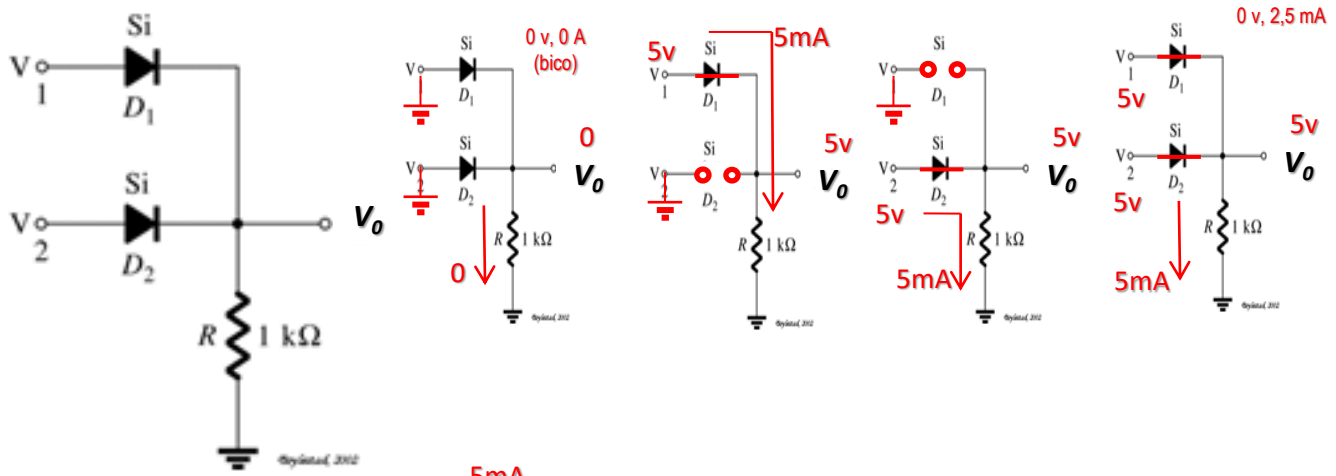
**Conclusão:** O que decidiu os estados dos diodos foi o balanceamento entre os resistores!



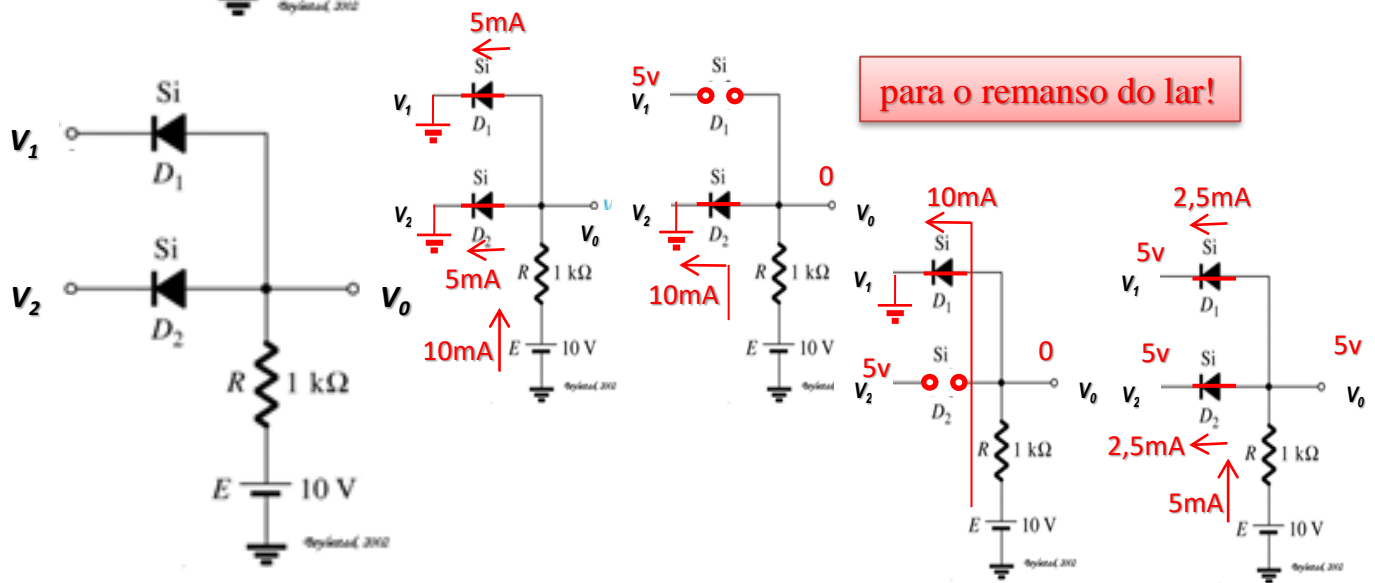
# Lógica com Diodos

Podemos construir duas dentre as três portas básicas com diodos: OR e AND

V2	V1	OR
0	0	0 ✓
0	1	1 ✓
1	0	1 ✓
1	1	1 ✓



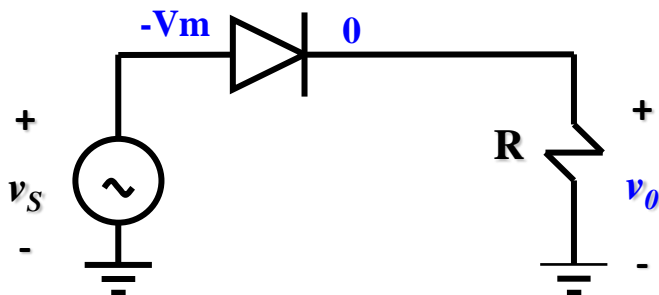
V2	V1	AND
0	0	0 ✓
0	1	0 ✓
1	0	0 ✓
1	1	1 ✓



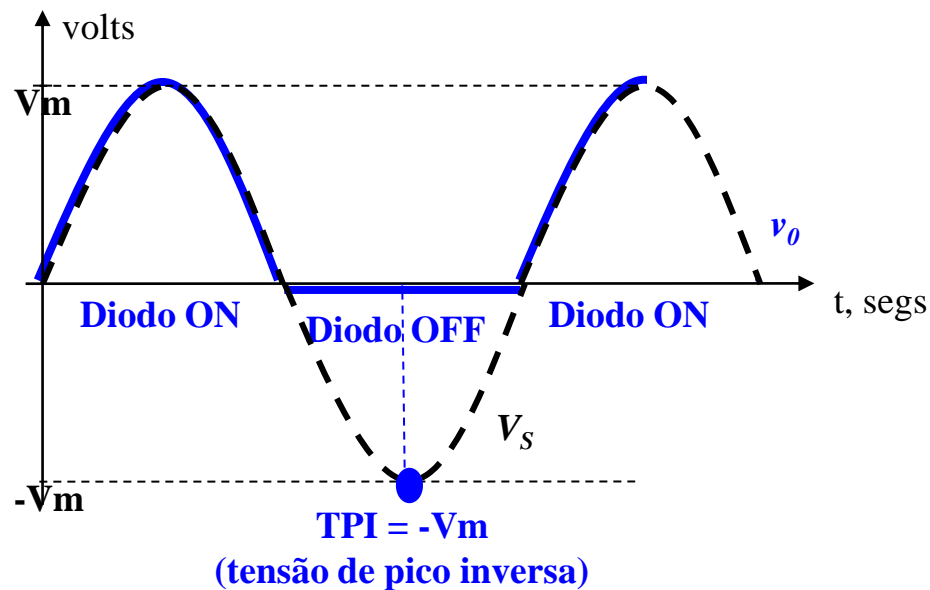
# Circuitos Retificadores

- **Objetivo:** transformar a tensão senoidal – AC – oferecida pela concessionária de energia em tensão constante – DC – necessário para a maioria dos aparelhos eletrônicos
- **Preliminar:** Por que chega AC e não já DC na sua casa e nos diversos lugares?
- **Ponto de partida:** circuitos retificadores: meia onda, onda completa e ponte de diodos.

## 1-Retificador de Meia Onda



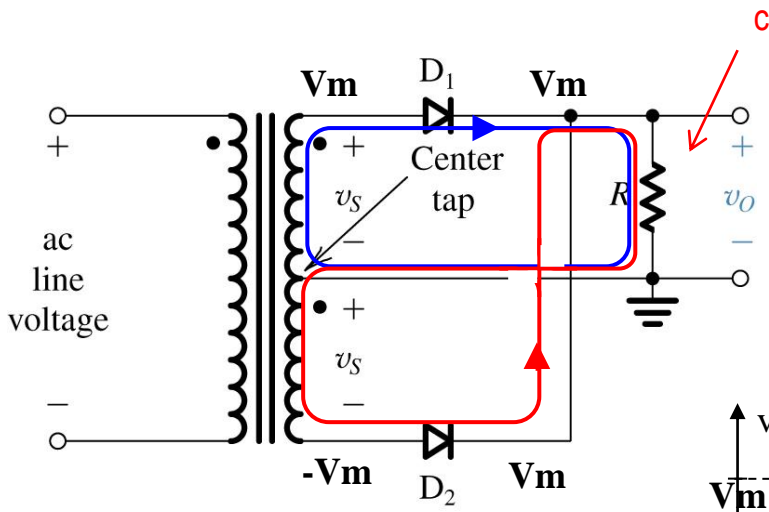
- Provisoriamente adotemos o modelo ideal
- Semiciclos de entrada positiva: diodo ON
- Semiciclos de entrada negativa: diodo OFF



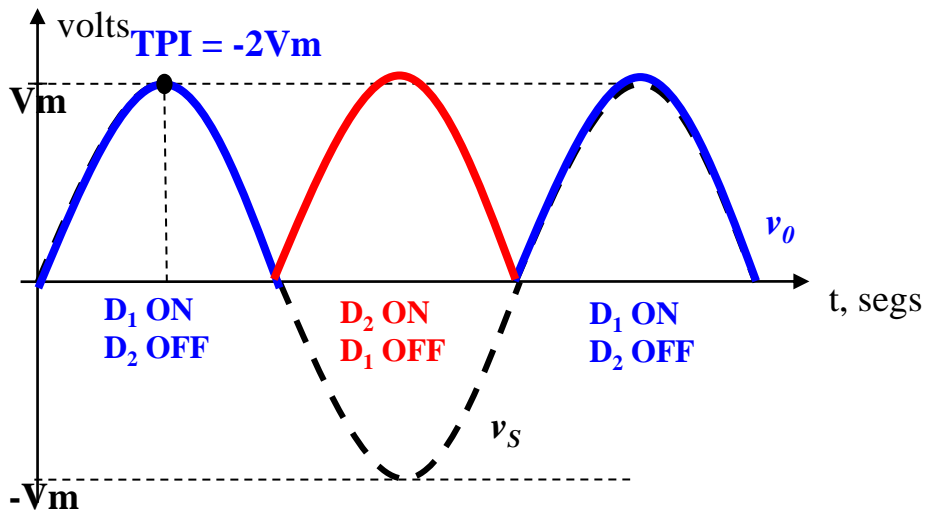


# Circuitos Retificadores

## 2-Retificador de Onda Completa (tap central)

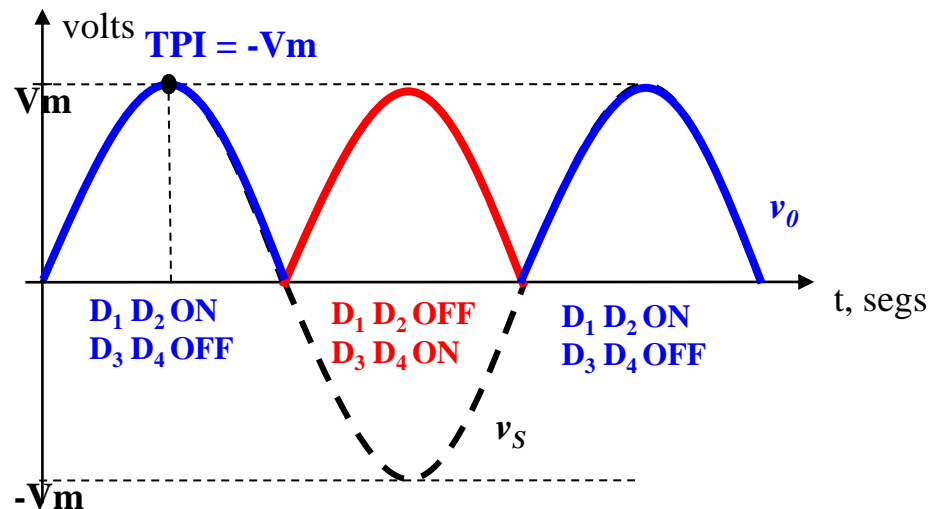
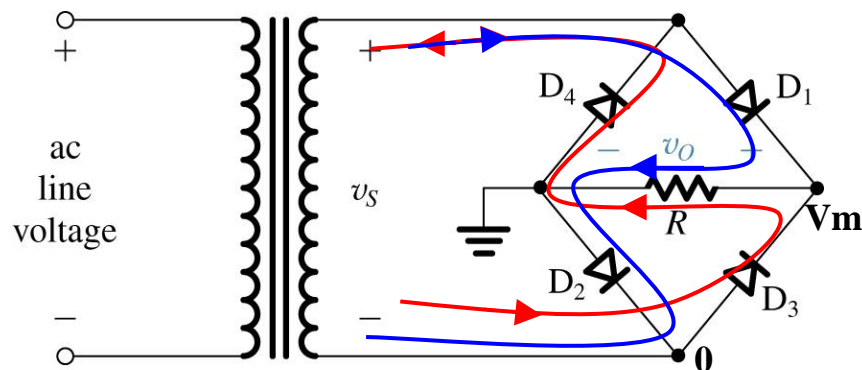


Significa que estes dois diodos serão mais caros que aquele da solução meia-onda



# Circuitos Retificadores

## 3-Ponte de Diodos ou Ponte Retificadora

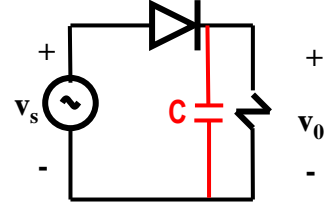


**Voltamos aqui a precisar de diodos baratos como o da solução meia-onda. O sinal obtido foi idêntico ao da onda completa**

- Até este ponto está claro que o mais **barato** é a solução meia-onda e a mais cara é a solução onda completa, se depender só dos diodos. Muitas aplicações podem precisar do transformador de tap central, mas ele é certamente mais uma razão para ser caro (e volumoso!).
- Porém, esta história não termina aqui. Outro critério tão ou mais importante terá que ser levado em conta: a **qualidade** do sinal que se quer.
- Vamos acrescentar na carga um capacitor...** Agora vale a pena usar um modelo híbrido de diodo: consideremos uma **resistência direta**  $r_d$  quando ele está ON...

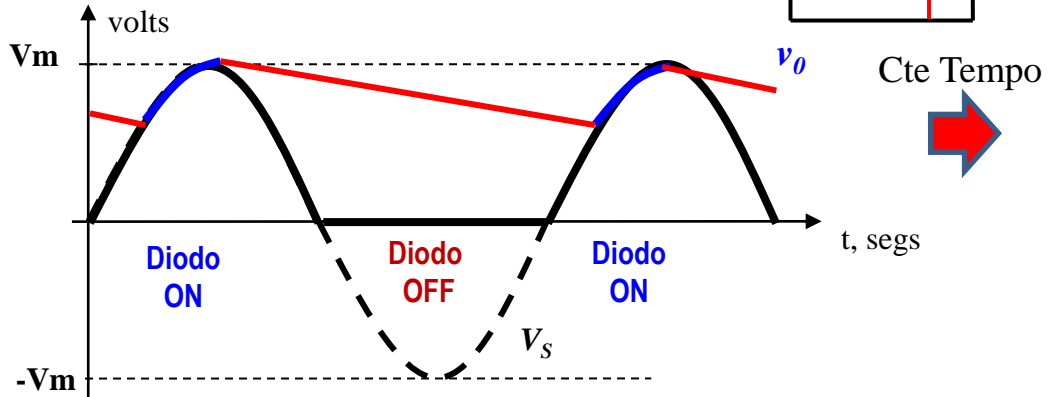


# Conversores AC-DC

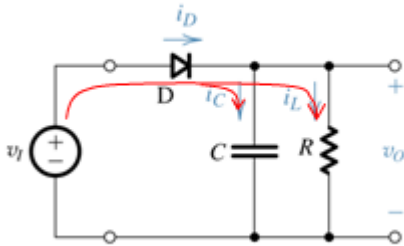


## Meia-onda com filtragem

- Em linha preta cheia o efeito sem capacitor
- **Com o capacitor**, enquanto a senóide está subindo o diodo está ON e o capacitor se carrega via  $r_d$ .



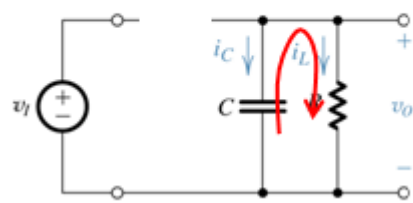
### 1 Carga do capacitor



- A corrente vinda do diodo carrega o capacitor exponencialmente segundo a constante de tempo  $r_d C$ . Como  $r_d$  é pequeno,  $\tau_1 = r_d C$  é **pequeno** e, enquanto a senóide de entrada sobe, o capacitor se carrega rapidamente!

- Após a senóide de entrada chegar ao pico, ela passa a cair. Um delta de tempo após o pico, o capacitor mantém  $V_m$  e a entrada caiu para  $V_m - \delta$ , ou seja, o **diodo fica OFF**

### 2 Descarga do capacitor

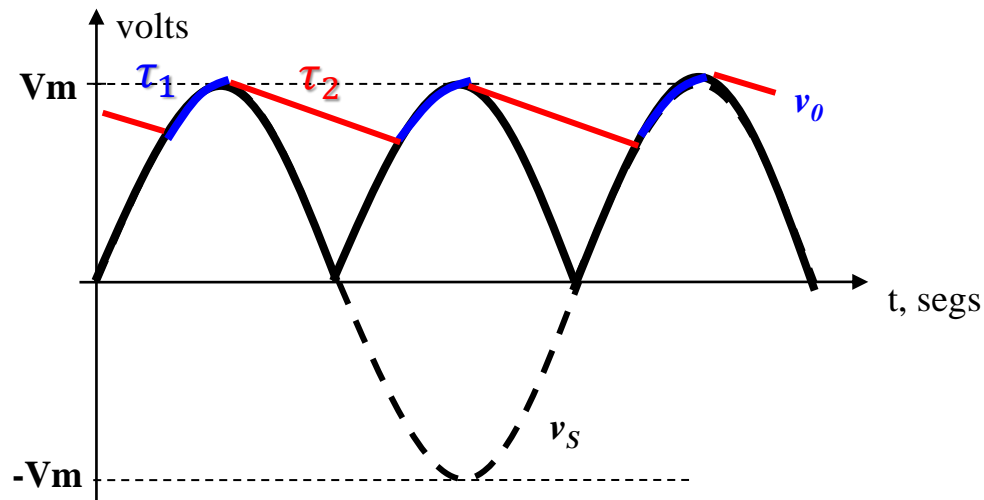


- O capacitor se descarrega segundo a constante de tempo  $RC$ . Como  $R$  é grande perante  $r_d$ ,  $\tau_2 = RC$  é **grande** e o capacitor se descarrega lentamente!

# Conversores AC-DC

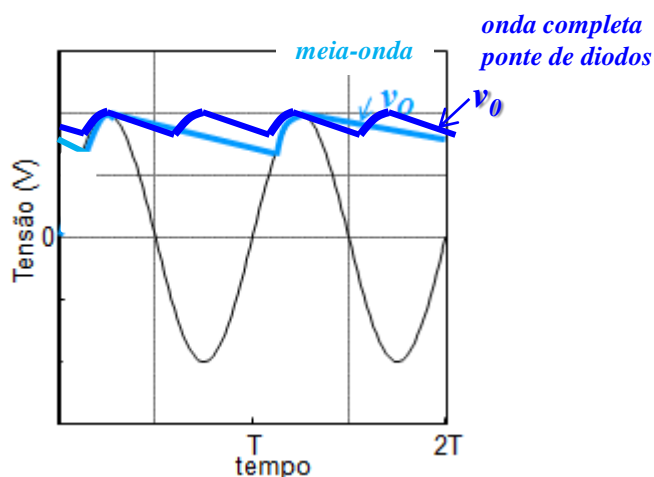
## ■ Onda completa e Ponte de diodos com filtragem

- Como os dois retificadores apresentaram o mesmo resultado, após colocar o capacitor de filtragem o resultado final será o mesmo.
- A lógica de carga e descarga do capacitor será idêntica ao caso de meia onda: entrada (retificada!) crescendo, então o(s) diodo(s) ON carregarão o capacitor **rapidamente** com a constante de tempo  $\tau_1 = r_d C$ ; quando a entrada retificada cai, então o capacitor se descarrega **lentamente** ( $\tau_2 = RC$ ).



# Ripple

- **Objetivo:** note que aparentemente já chegamos aqui aproximadamente ao valor DC procurado. Porém, observe que com soluções de diferentes qualidade! (*ripple* é defeito, quanto maior, pior!)



- Uma boa aproximação para contabilizar o *ripple* para o meia-onda é:  $\Delta V = \frac{V_m T}{RC} \approx \frac{V_m}{fRC}$ ; metade para os outros
- Um valor aproximado para a tensão DC obtida assim seriam, respectivamente

Meia onda: 
$$V_{cc} = \frac{2CR_L f V_m}{1 + 2CR_L f V_m}$$

Onda completa e Ponte retificadora: 
$$V_{cc} = \frac{4CR_L f V_m}{1 + 4CR_L f V_m}$$

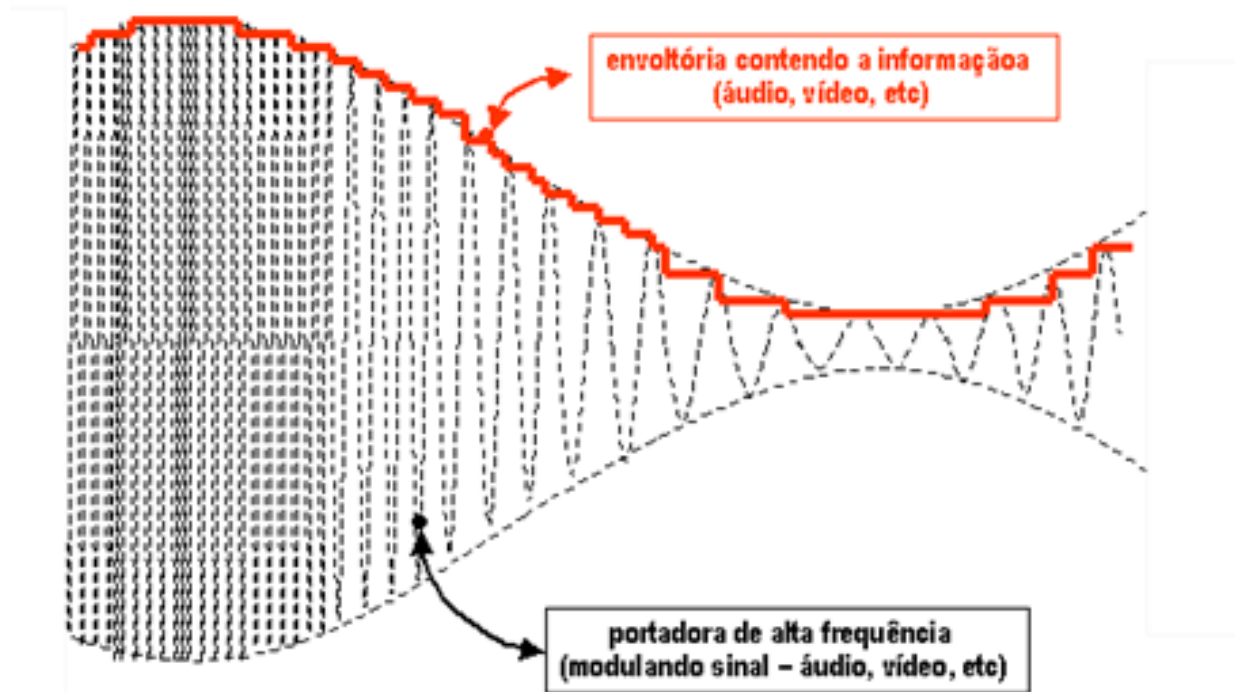
- **Objetivo:** Não é esta ainda a solução da fonte de tensão DC. Por quê? Porque depende da carga alimentada. Observe que conforme o valor de  $R_L$  acima, o valor de  $V_{cc}$  muda!!!

**Precisamos na realidade de uma fonte regulada de tensão. Para isto precisaremos zeners e transistores!**



# Aplicações Insuspeitadas

- Muitas vezes em Eletrônica um circuito com um intuito serve para outra coisa, diz-se “efeito Bombril”. É o caso do conversor AC-DC. Por exemplo, considere aquele baseado em meia-onda. Um sinal de transmissão AM tem o aspecto abaixo:

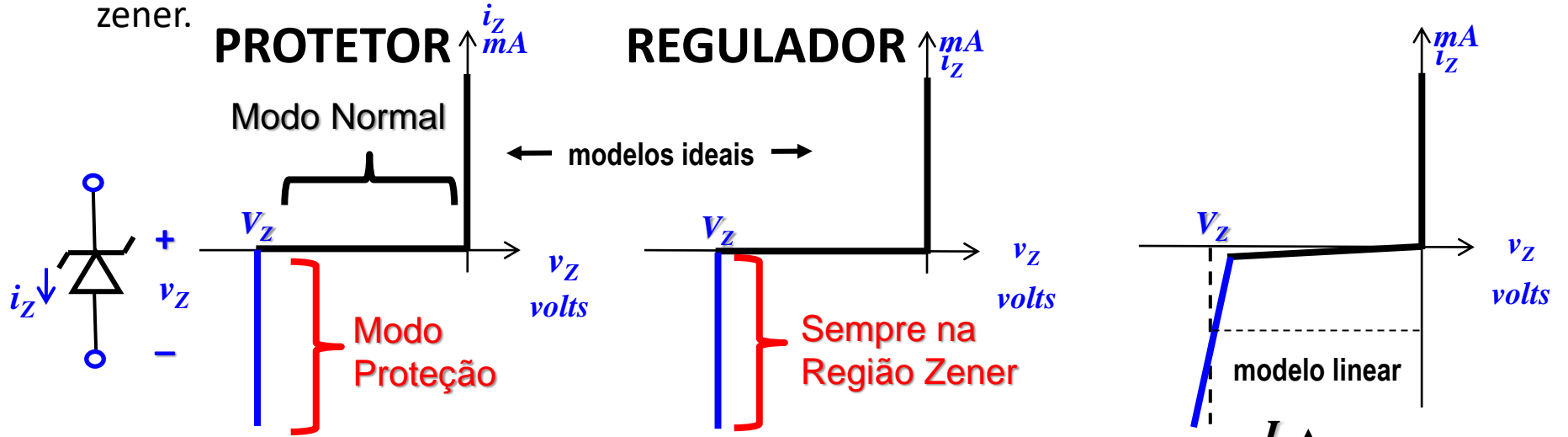


- Se este sinal entra no circuito de meia-onda, nas subidas da portadora a constante de tempo rápida copia o sinal, enquanto nas descidas a constante de tempo lenta mantém o sinal. Na prática, se recupera a envoltória que é o áudio transmitido! Então este circuito pode ser o de **Recepção AM!**

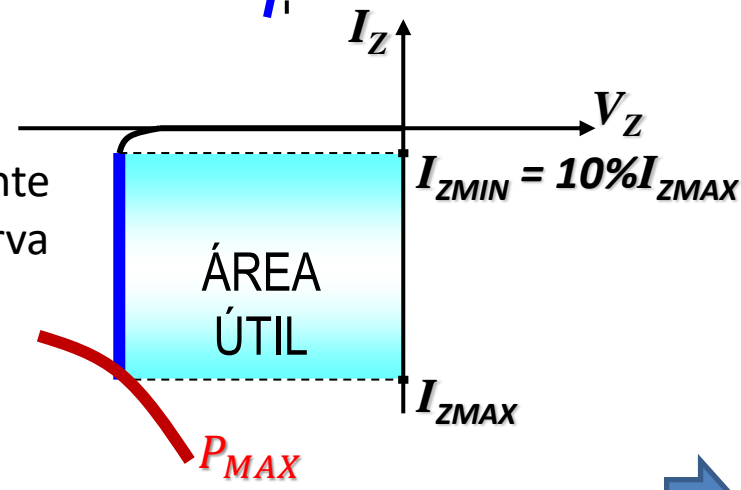
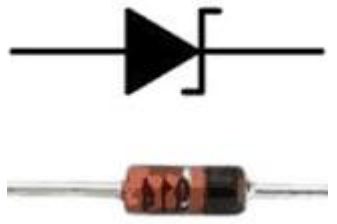


# Diodo Zener

- Circuitos usando zener ou são do tipo protetores ou do tipo limitadores. Como protetores eles pode trabalhar tanto na região OFF quanto na região zener, como veremos. Como regulador, o caso mais popular, o zener sempre estará na região zener.



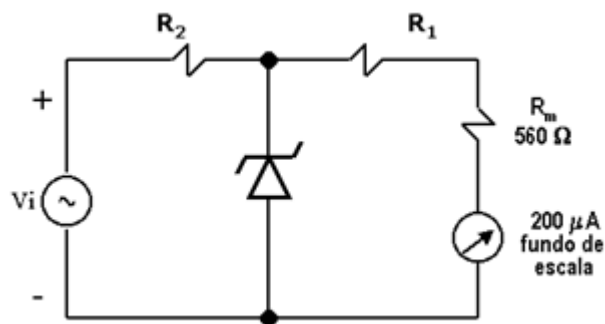
- Como se vê o zener funciona sempre reversamente polarizado. Outro aspecto relevante é que seu uso é limitado pela curva de potência máxima. Praxes:



# Diodo Zener

## Zener como Protetor

Exemplo: O circuito a seguir representa um voltímetro de **20 v** de fundo de escala. A resistência do medidor (galvanômetro) é de **560  $\Omega$** . Se o zener é de **16 v**, determine  **$R_1$**  e  **$R_2$**  de modo que se  **$V_i > 20$  v** o zener conduz e a sobrecarga de corrente será desviada do medidor. Por simplicidade considere  $i_{ZMIN} = 0$ .

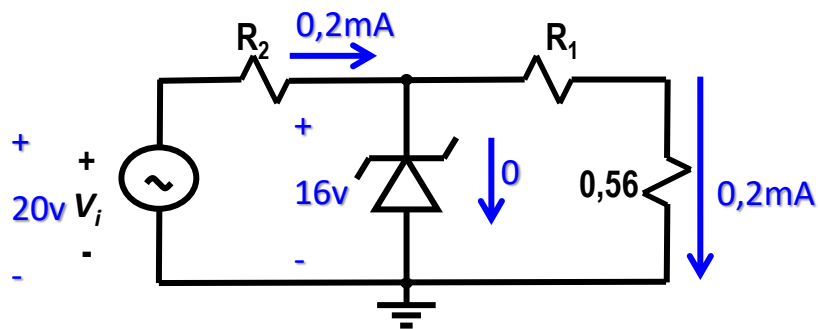


- a) Se  $V_i < 20$  v queremos que o zener não interfira (OFF) quanto maior  $V_i$ , maior a corrente no galvanômetro. No limite e com lei dos nós:

$$\frac{20-16}{R_2} = 0 + 0,2 \Rightarrow R_2 = 20 \text{ k}\Omega$$

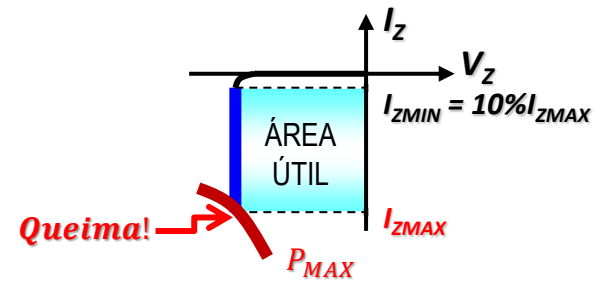
Na malha da direita:

$$16 = (R_1 + 0,56) \times 0,2 \Rightarrow R_1 = 74,44 \text{ k}\Omega$$





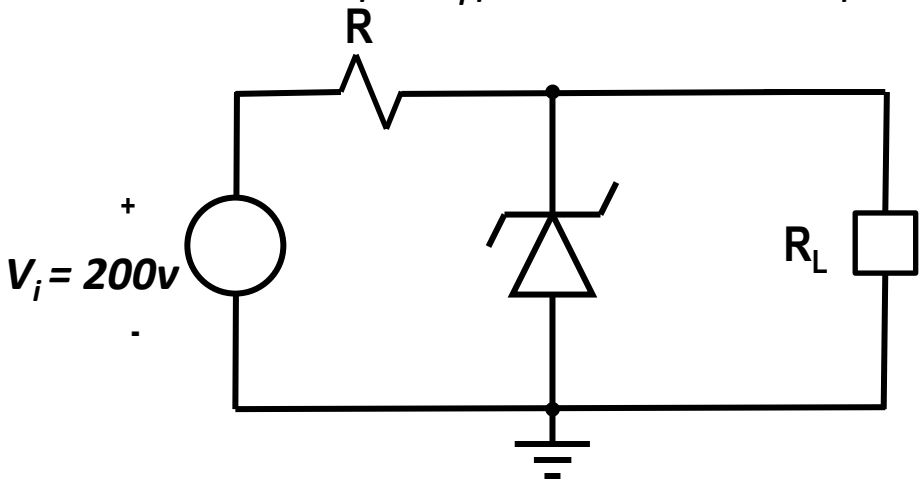
# Diodo Zener



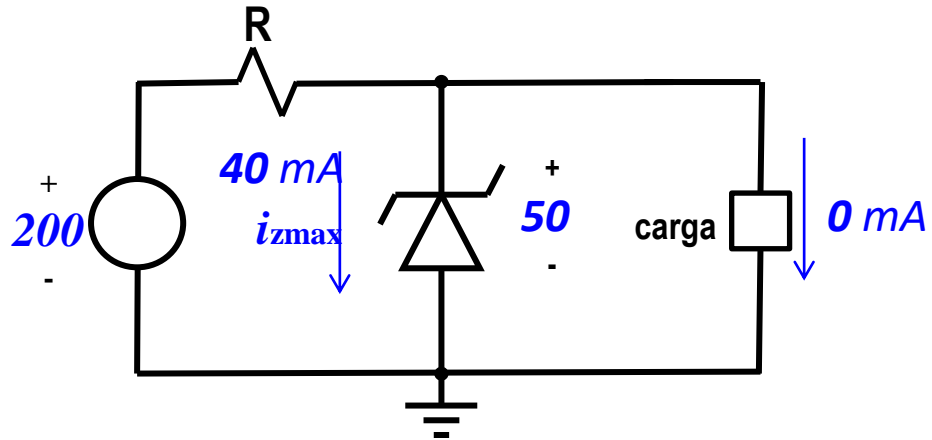
## Zener como Regulador

Exemplo: O zener no circuito abaixo mantém **50 v** em uma faixa de corrente que vai de **5 mA** até **40mA**. A fonte de alimentação é de  $V_i = 200 \text{ v}$ .

- a) Calcule **R** de modo a permitir uma regulação de tensão para uma corrente de carga  $I_L = 0$  até  $I_{MAX}$ , que é o valor máximo possível de  $I_L$ .
- b) Qual é este valor máximo ( $I_{MAX}$ )?
- c) Com **R** calculado anteriormente e supondo corrente de carga igual a **25 mA**, quais são os limites que  $V_i$  poderá variar sem perda de regulação?



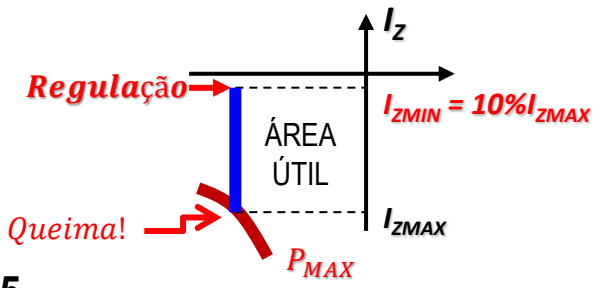
a) No limite da queima:



$$\frac{200-50}{R} = i_{zmax} + i_{Lmin} = 40 + 0 \Rightarrow R = 3,75 \text{ K}\Omega$$



# Diodo Zener

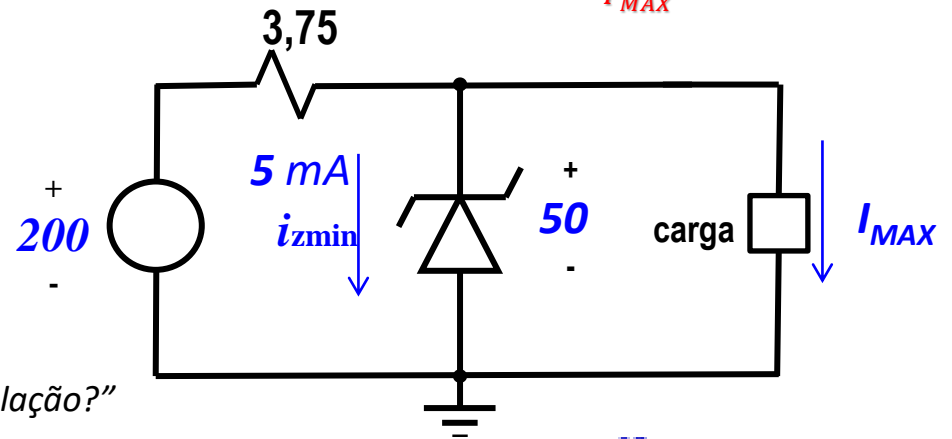


## Zener como Regulador (... continuação)

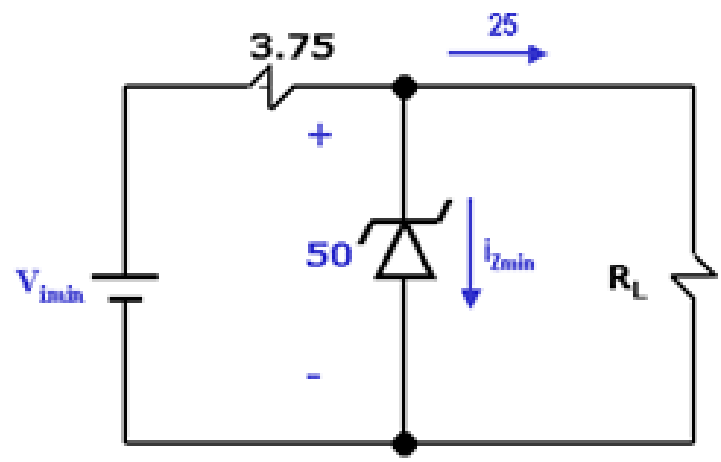
b) No limite da regulação:

$$\frac{200-50}{3,75} = i_{zmin} + I_{MAX} = 5 + I_{MAX} \Rightarrow$$

$$I_{MAX} = 35 \text{ mA}$$

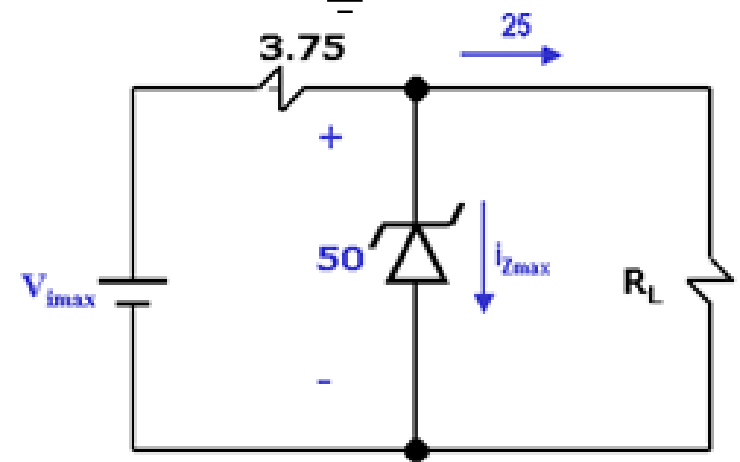


c) "...Limites que  $V_i$  poderá variar sem perda de regulação?"



$$V_{imin} - 50 = 3,75(i_{zmin} + 25) \Rightarrow$$

$$V_{imin} = 162,5 \text{ volts}$$



$$V_{imax} - 50 = 3,75(i_{zmax} + 25) \Rightarrow$$

$$V_{imax} = 293,75 \text{ volts}$$

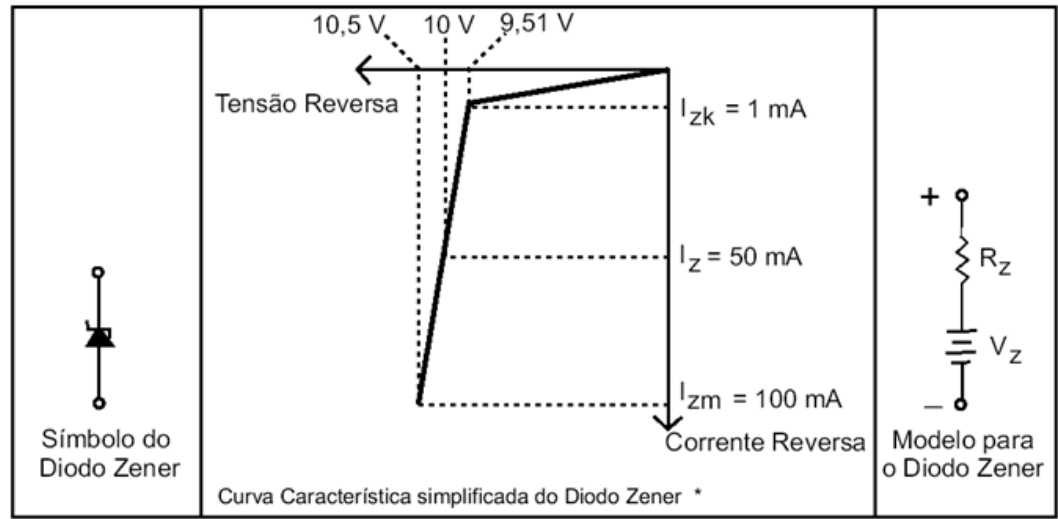


# Zener Linearizado

Exemplo: O diodo Zener é um dispositivo muito empregado no projeto de reguladores de tensão. A Fig. 1 apresenta o símbolo, a curva característica linearizada e o respectivo modelo de um diodo Zener de 10 V, onde na região ativa linear do zener, e onde  $I_Z$  é o valor médio de corrente do zener na região ativa linear.

### Dados / Informações Técnicas

- $I_{zk}$  = corrente mínima para o diodo Zener operar em sua faixa linear.
- $I_{zm}$  = corrente máxima que o diodo Zener suporta.
- $R_z$  = resistência interna do diodo Zener.



a) Usando a Curva Característica, calcule os valores de  $R_z$  e  $V_z$  apresentados no modelo.

\* Não está em escala.

Figura 1

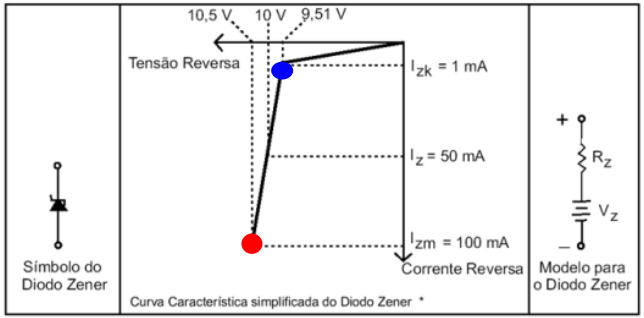
a) Temos aqui dois valores extremos do zener a considerar: regulação (min) e queima (max).

Escrevemos: 
$$R_z = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{10,50 - 9,51}{(100 - 1) \times 10^{-3}} = 10 \Omega$$

Regulação:  $9,51 = V_z + i_{zk}R_z = V_z + 1mR_z \dots (1);$

Queima:  $10,5 = V_z + i_{zm}R_z = V_z + 100mR_z \dots (2) \rightarrow$

$\rightarrow$  resolvendo (1) e (2):  $V_z = 9,5 \text{ volts}$



\* Não está em escala.

Figura 1



# Zener Linearizado-2

b) Para o circuito da Fig. 2 abaixo, calcule a faixa de valores de  $V_i$  dentro da qual o diodo Zener mantém a regulagem e indique a tensão de saída  $V_o$  para os extremos dessa faixa.

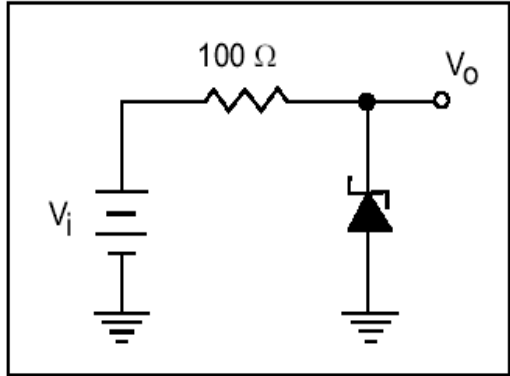


Figura 2

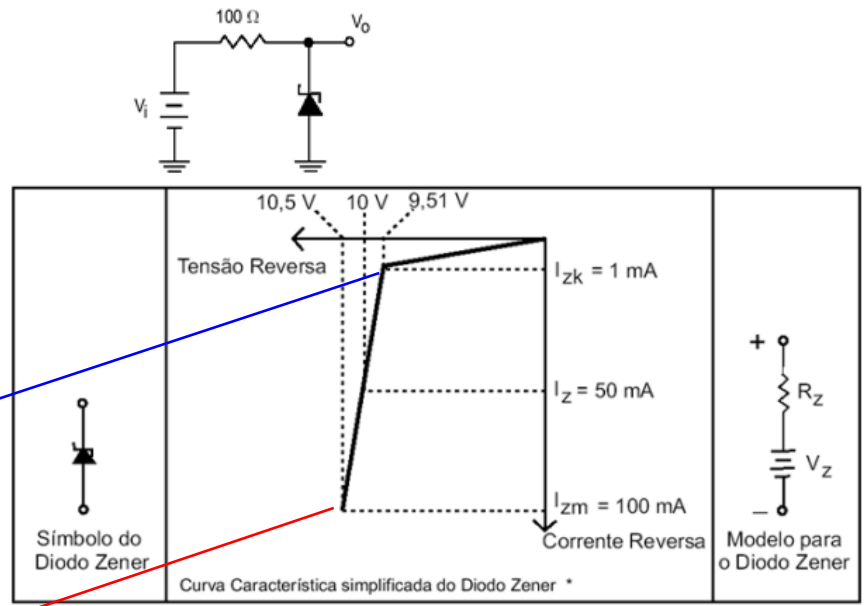


Figura 1

Corrente mínima pelo Zener:

$$I_{zk} = 1mA \rightarrow V_{imin} = 9,51 + (0,1)(1) \quad V_i = 9,61 V; V_o = 9,51 V$$

(poderia também  $I_{zk} = 1mA \rightarrow V_{imin} = 9,5 + (0,11)(1)$  usando a malha inteira)

$$\text{Corrente máxima pelo Zener: } I_{zm} = 100mA \rightarrow V_{imax} = 10,5 + (0,1)(100) \quad V_i = 20,5 V; V_o = 10,5 V$$



# Zener Linearizado-3

c) Para o esquema da Fig. 3, acima, calcule a faixa de valores em que  $R_L$ , a carga, pode excursionar sem que o Zener saia de sua faixa ativa linear.

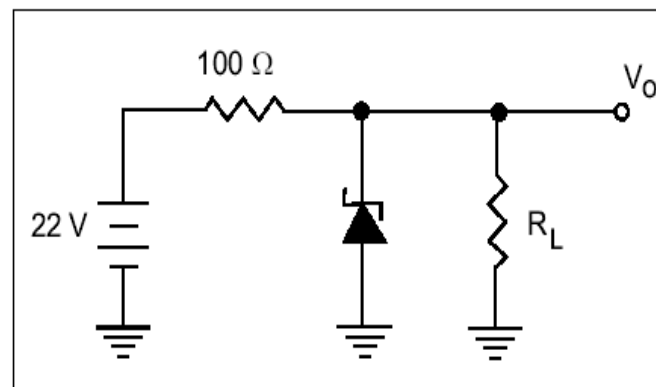


Figura 3

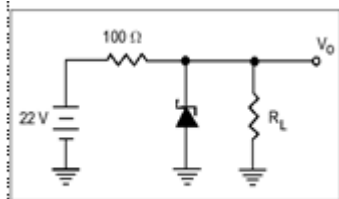


Figura 3

**Regulação:**  $V_o = 9,51 \text{ V}; I = \frac{22-9,51}{100} = 124,9 \text{ mA}$        $I_L = 124,9 - 1 = 123,9 \text{ mA}$

$$R_L = \frac{9,51}{123,9} \rightarrow R_L \approx 76,8 \Omega$$

**Queima:**  $V_o = 10,5 \text{ V}; I = \frac{22-10,5}{100} = 115 \text{ mA}$        $I_L = 115 - 100 = 15 \text{ mA}$

$$R_L = \frac{10,5}{15} \rightarrow R_L = 700 \Omega$$

