

I) Introdução e Revisão:

Componentes: → podendo ser reais ou ideais

- Passivos: não adicionam energia ao circuito.

Exemplo: resistor, capacitor, indutor

- Ativos: adicionam energia ao circuito

Exemplo: fonte de tensão (ou corrente), transistores

→ Resistor:

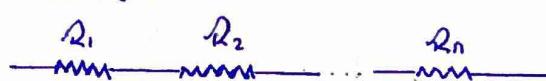
$$\text{Lei de Ohm: } V = I \cdot R \quad [V] = [A] \cdot [Ω]$$

Símbolos: ;

$$\text{Potência: } P = VI = RI^2 = \frac{V^2}{R}$$

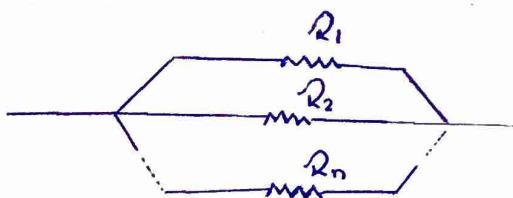
Associação:

- Série:



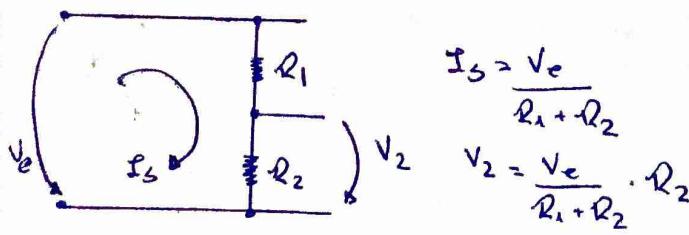
$$R_{eq} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

- Paralelo:

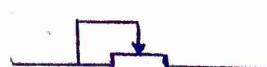
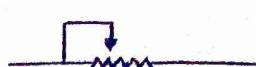
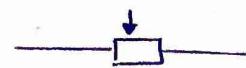


$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

- Divisor de tensão:



- Potenciómetro (resistor de resistência variável)



Ver cadernos de PEA

$$\frac{dQ}{dt} = I = C \frac{dV}{dt} \Rightarrow \text{equação diferencial}$$

Símbolos: ; ;
 padrão com polaridade variável

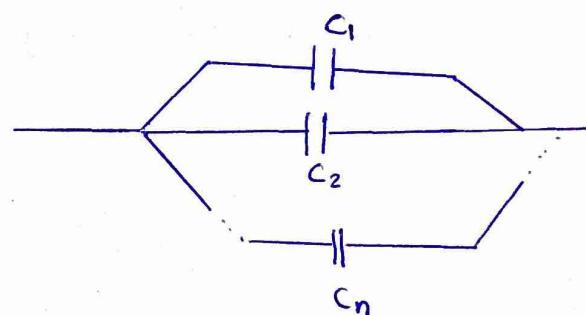
Associação:

- Série:



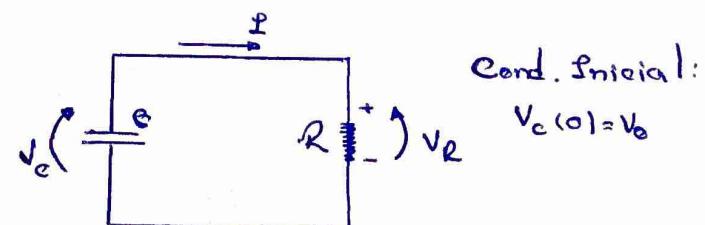
$$C_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}}$$

- Paralelo:



$$C_{eq} = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

Exemplo:



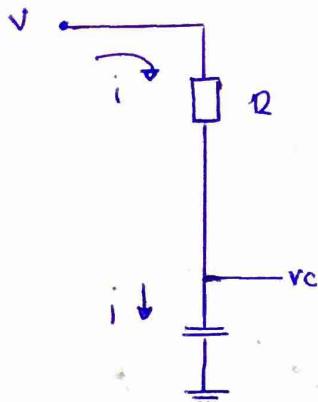
Solução: corrente que passa pelo capacitor é a mesma que passa no resistor.

$$C \frac{dV_c}{dt} = -\frac{V_c}{R} \quad \text{2º Lei de Kirchhoff}$$

$$V_c = -V_e \quad \text{Lei de Ohm}$$

$$EDO: \frac{dV_c}{dt} = -\frac{1}{RC} \cdot V_c \Rightarrow V_c = V_0 \cdot e^{-t/RC}$$

Exemplo:



Condigo inicial:
 $V_c(0) = 0$

Solução:

$$i = \frac{C d(V_c - 0)}{dt} = \frac{V - V_c}{R} \quad \text{Corrente é a mesma na capacidade e no resistor}$$

$$\Rightarrow \frac{dV_c}{dt} = \frac{V - V_c}{RC} \Rightarrow \frac{dV_c}{dt} + \frac{V_c}{RC} = \frac{V}{RC} \quad \text{EDO}$$

$$\therefore V_c = \alpha e^{-t/RC} + \beta$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} V_c(t) = V$$

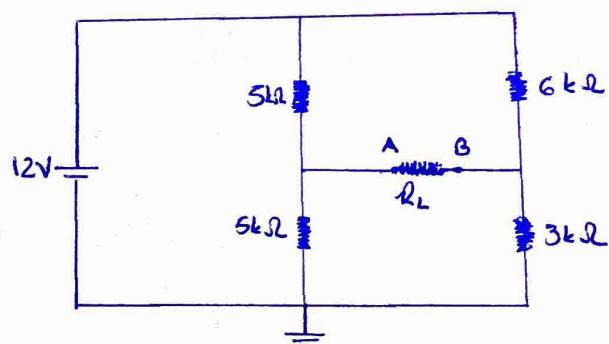
$$V_c(0) = 0 \Rightarrow V_c(t) = V(1 - e^{-t/RC})$$

Indutores- Ver cadernos de PEA

Transformadores- Ver caderno de PEA
(saber que $V1/V2 = N1/N2$)

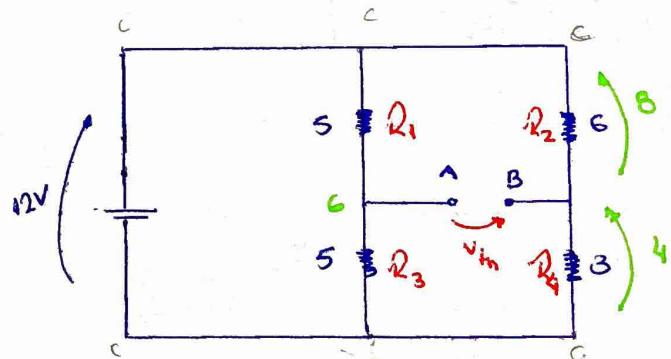
Teorema de Thevenin:

Exemplo:



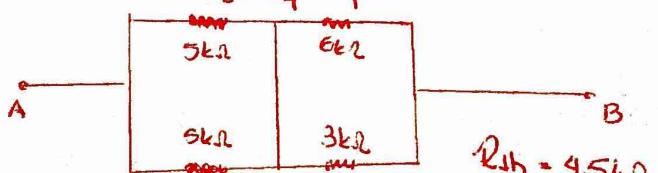
Solução:

$$V_{CA} = 6$$



$$V_A = R_3 \cdot \frac{V}{R_1 + R_3}$$

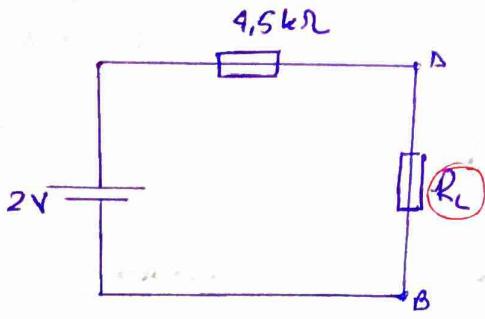
$$V_B = R_4 \cdot \frac{V}{R_2 + R_4}$$



Tensão de equivalente

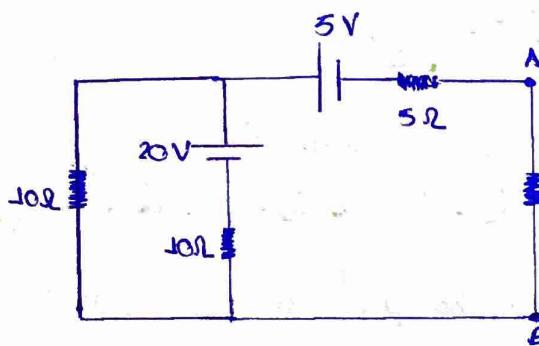
$$V_{th} = V_A - V_B = 2V$$

$$R_{th} = 4,5k\Omega$$

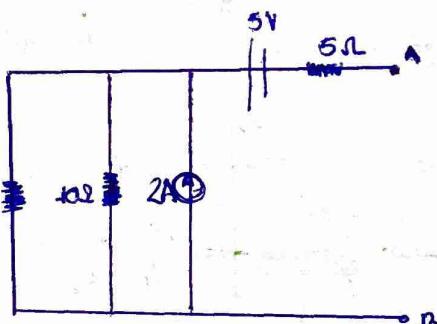


Teorema de Thévenin afirma que do ponto de vista de qualquer par de terminais pode ser sempre substituído por uma fonte de tensão com resistência interna.

Exemplo: calcular a tensão entre A e B se R_L for nulo.

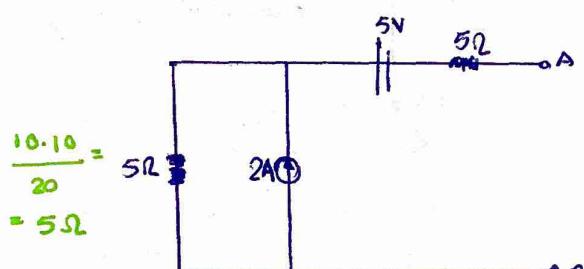


Solução:

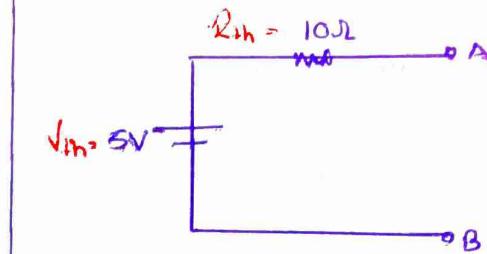
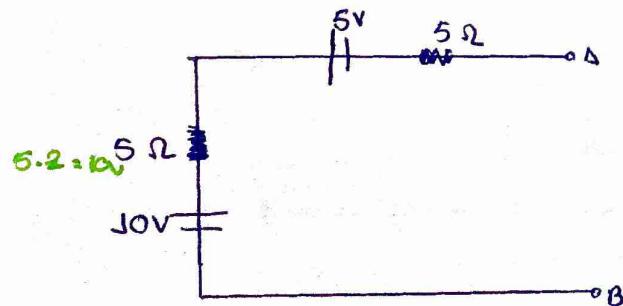


$$20 = 10i$$

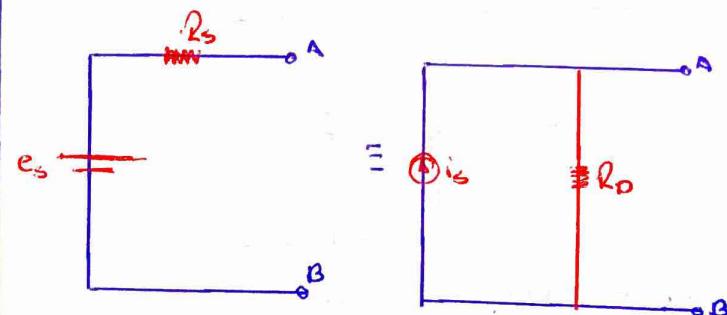
$$i = 2A \quad 10\Omega \parallel 2A \quad \text{circled '2'}$$



$$\frac{10 \cdot 10}{20} = 5\Omega$$

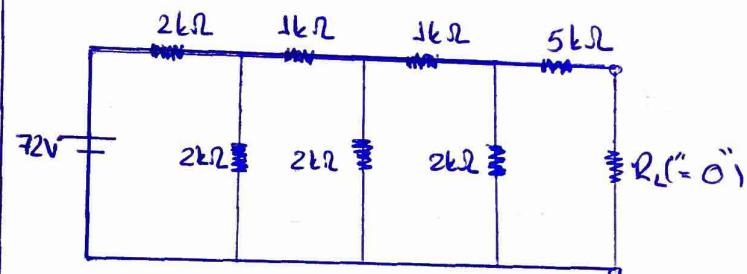


Obs: fontes equivalentes



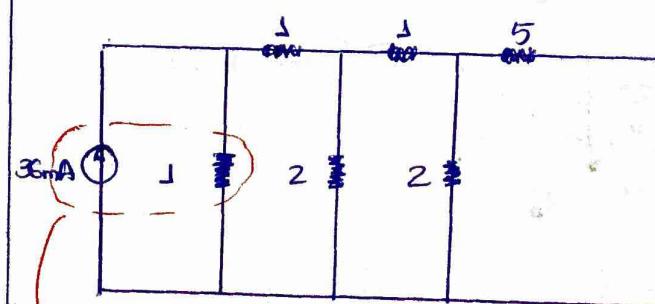
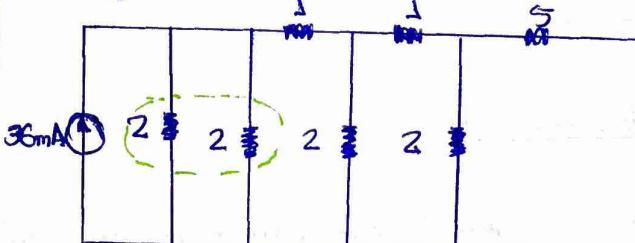
Obs: no Teorema de Thévenin devemos "circularizar" as fontes de tensão e abrir as fontes de corrente.

Exemplo: aplicar o Teorema de Thévenin.

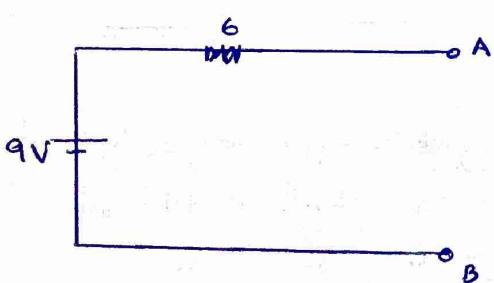
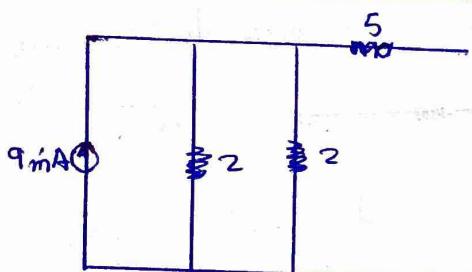
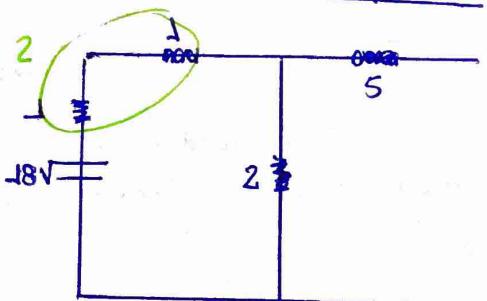
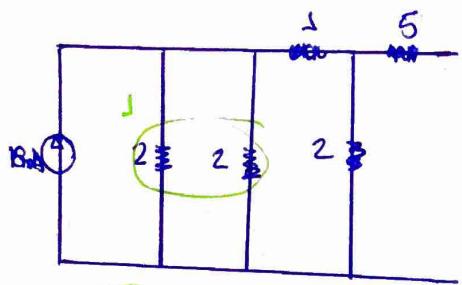
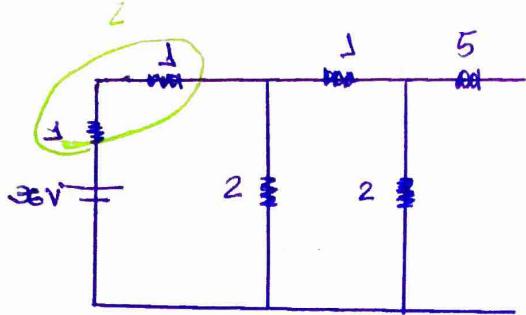


Solução:

Note que utilizando a equivalência de fontes já chegamos no equivalente de Thévenin

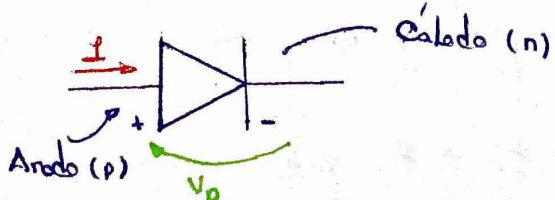


→ Voltar para a fonte de tensão!

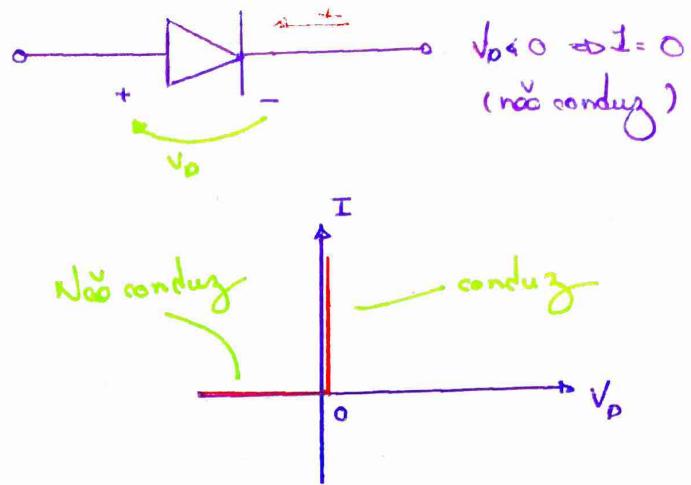
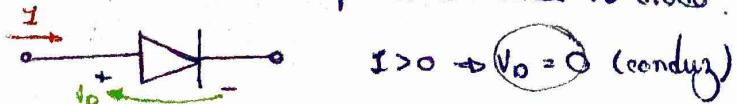


II) Diodos Redificadores

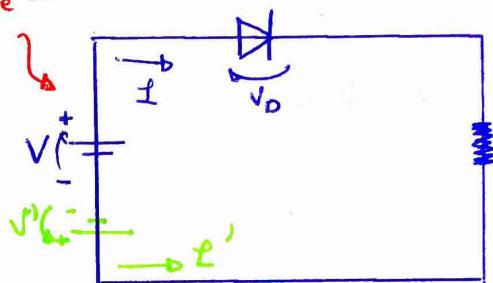
Diodo: é um componente que permite passagem em um único sentido.



Diodo Ideal: não há queda de tensão no diodo.



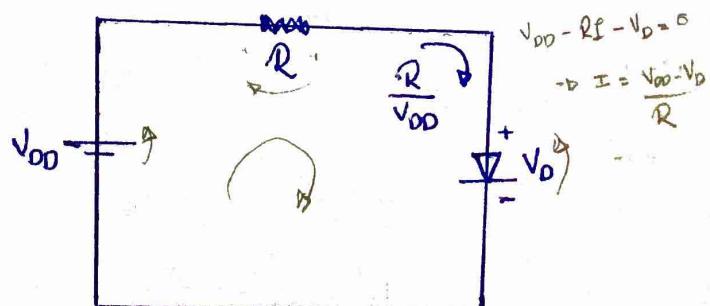
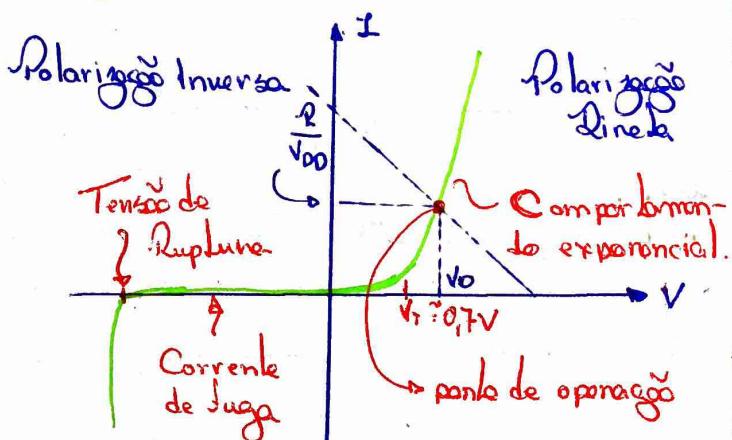
Pode ser AC!



$Z \approx LK : V_D - V = 0 \Rightarrow V_D = V$ (conduz)

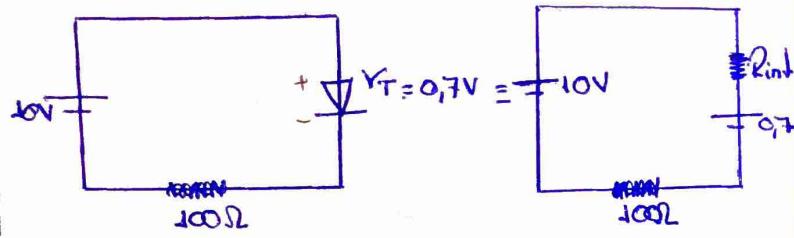
$Z \approx LK : V_D + V = 0 \Rightarrow V_D = -V$ (não conduz)

Diodo Real: há queda de tensão no diodo e este só conduz a partir de certa potencial.



Obs: quando estarmos na região de corrente de suga temos uma corrente muito baixa devido ao inversor do diodo que permite sua passagem.

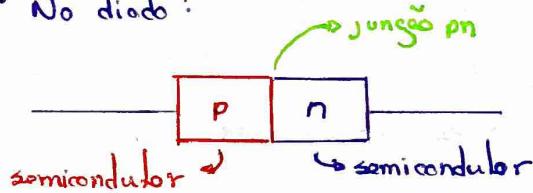
Podemos representar o diodo real como uma resistência interna e uma fonte.



→ Semicondutores em componentes eletrônicos

- Componentes semicondutores são baseados em materiais com 4 elétrons: silício e germanio
- Os cristais dos materiais semicondutores são "dopados" com elétrons de outro material
- A dopagem é do tipo p quando o material dopante é trivalente e do tipo n quando o dopante é pentavalente.

• No diodo:



- A corrente flui de p para n e não flui na direção oposta. Na junção, existe um fenômeno de difusão de elétrons que ocasiona um campo elétrico na junção.

→ Retificadores:

Um circuito eletrônico normalmente recebe energia da linha via forma de tensão alternada, e processa essa tensão em blocos:



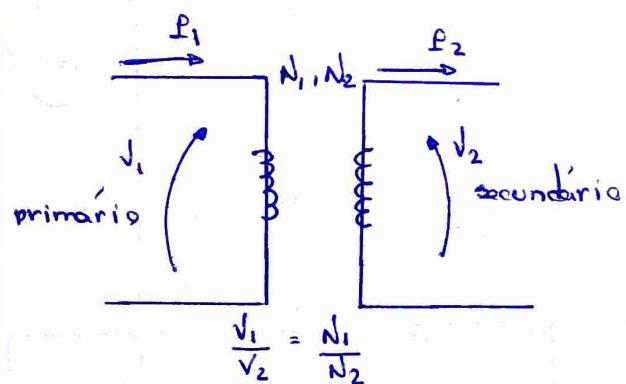
A tensão de linha é alterna e simétrica:

$$V(t) = V_p \cos(\omega t), \text{ onde } V_p \text{ é a tensão de pico.}$$

Normalmente uma tensão alternada é especificada pelo seu valor eficaz, ou seja, o valor constante que entregaria mesma potência média para uma carga resistiva. Para o caso simétrico:

$$\begin{aligned} P_m &= \frac{V_{eq}^2}{R} = \frac{1}{T} \int_0^T V_p^2 \cos^2(\omega t) dt \Rightarrow \\ &\Rightarrow V_{eq}^2 = V_p^2 \left(\frac{1}{T} \int_0^T \cos^2(\omega t) dt \right) \Rightarrow \\ &\Rightarrow V_{eq}^2 = \frac{V_p^2}{2} \Rightarrow V_{eq} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \end{aligned}$$

Existem muitos tipos de circuitos retificadores e muitos deles utilizam diodos. Um transformador é um tipo de circuito retificador.

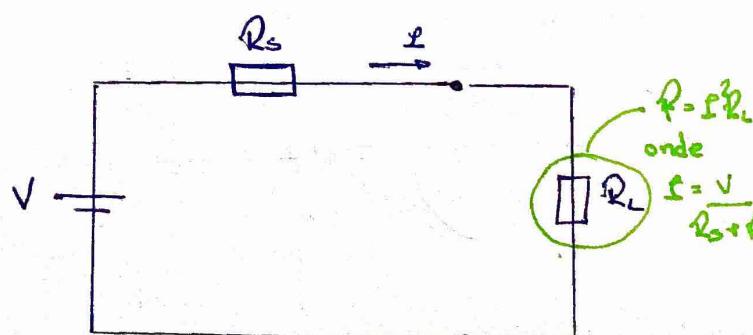


O circuito retificador transforma uma tensão alternada em uma tensão em um único sentido.

Existem três tipos básicos:

- Retificadores de meia-onda
- Retificadores de onda completa com derivação central.
- Retificador de onda completa em ponte.

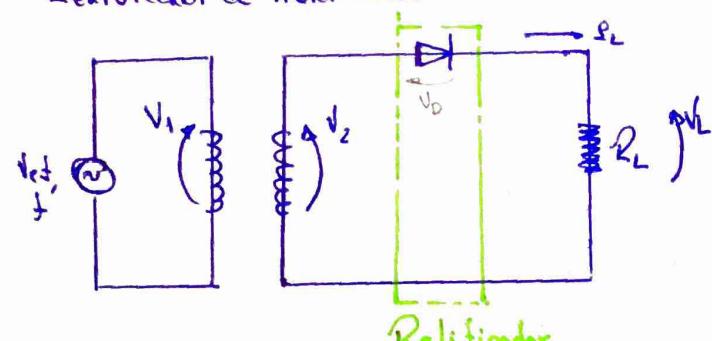
→ Teorema da Máxima Transferência de Potência



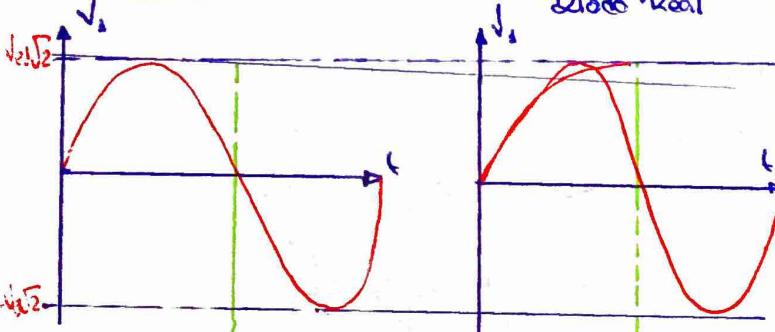
$$P_L = \frac{V^2}{(R_L + R_S)^2} R_L$$

$$\frac{\partial P_L}{\partial R_L} = 0 \Rightarrow R_S = R_L$$

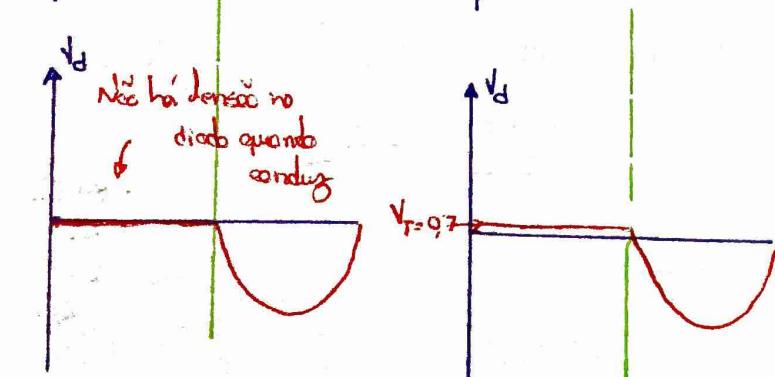
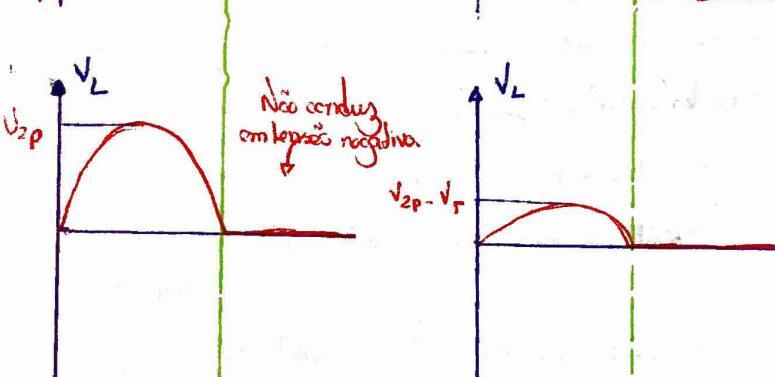
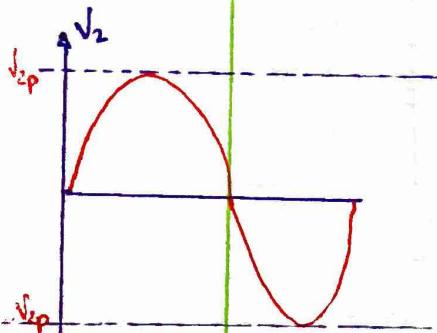
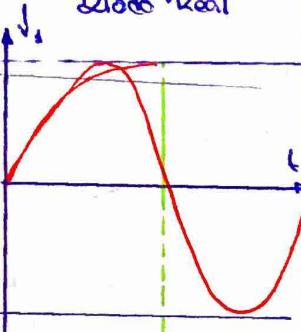
→ Redutor de onda-onda



Diodo Ideal



Diodo Real



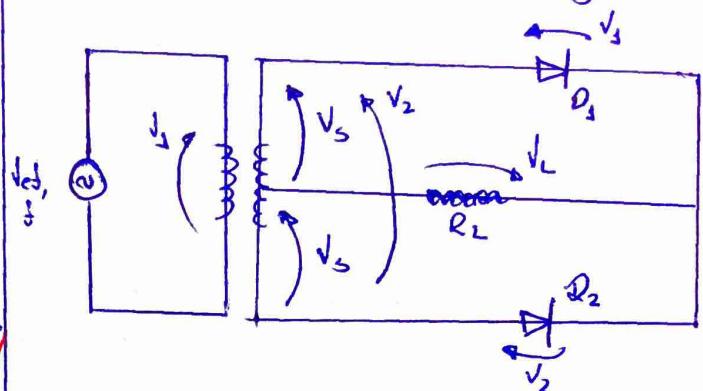
Síntese de corrente e tensão no semiciclo positivo!!!

A tensão média entregue à carga é (para o diodo ideal)

$$V_{Lm} = \frac{1}{T} \int_0^T V_L(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} V_{2p} \sin(\omega t) dt \Rightarrow$$

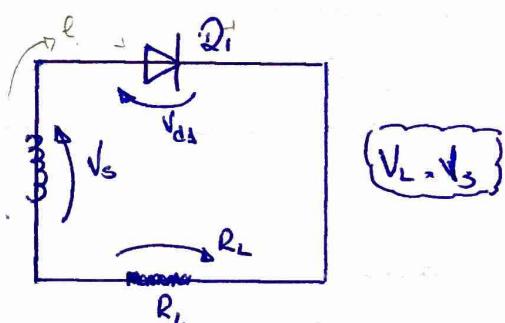
$$\Rightarrow V_{Lm} = \frac{V_{2p}}{\pi} \therefore I_{Lm} = \frac{V_{Lm}}{R_L}$$

→ Redutor de onda completa com derivado central



Quando temos uma tensão positiva na secundária e D2 conduz. Já quando a tensão é negativa D2 conduz ($\Rightarrow D_1$ corta a corrente).

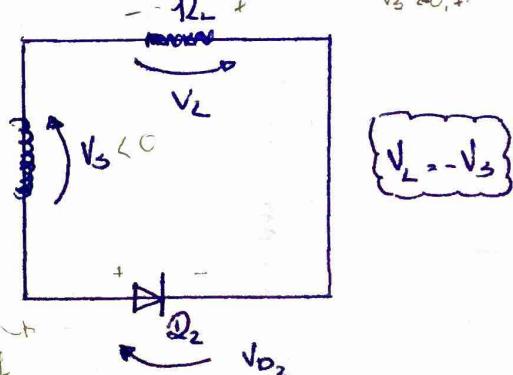
No semiciclo positivo:

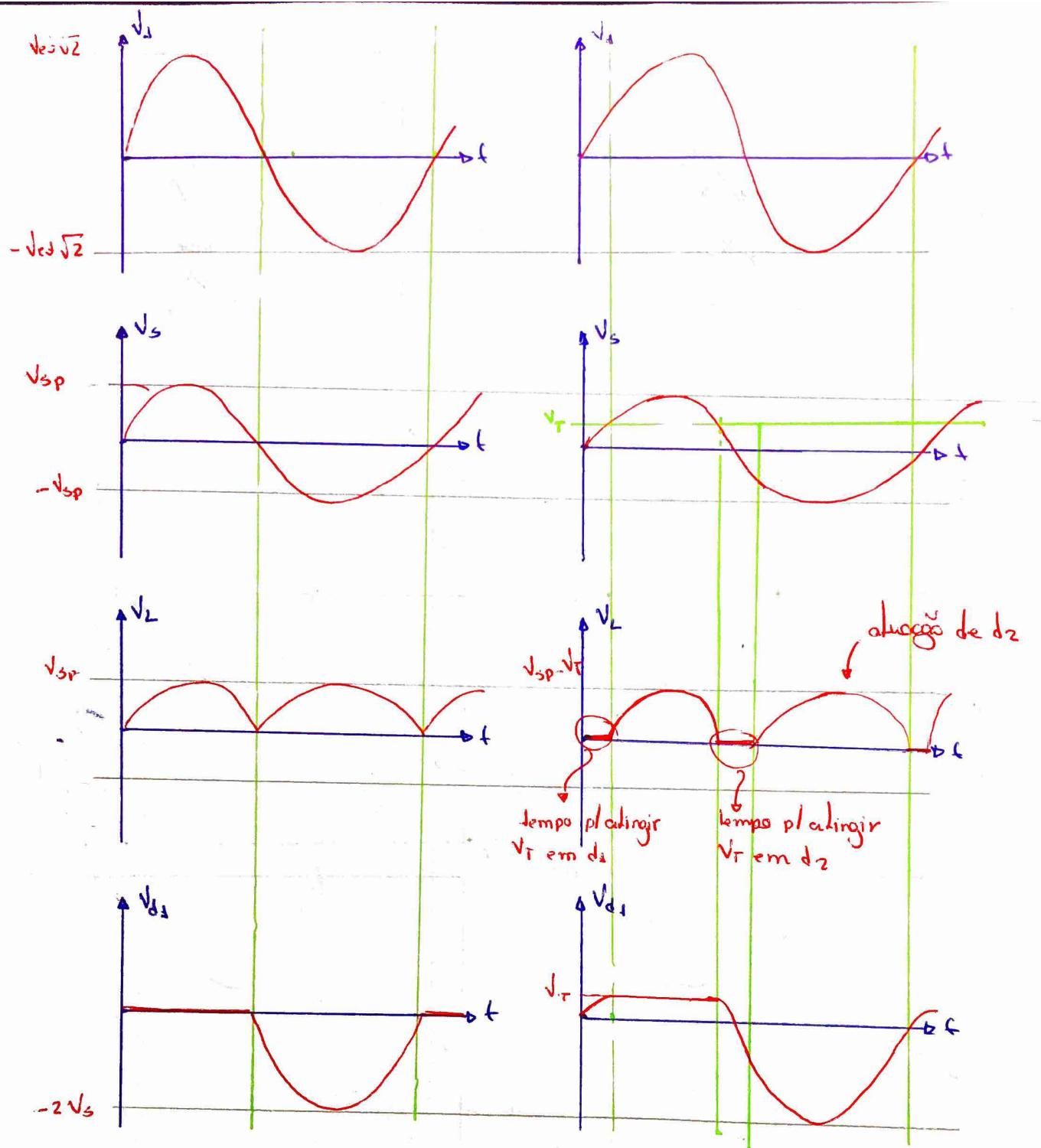


No semiciclo negativo:

$$V_L = -V_S - V_{D2}$$

$$V_S \approx 0,7$$





Note que V_{sp} é a metade da tensão de pico no secundário ($V_{sp}/2$). V_{d1} e V_{d2} possuem pico de módulo igual a $2V_s$.

Nesse tipo de retificador a tensão na carga é majoritariamente positiva.

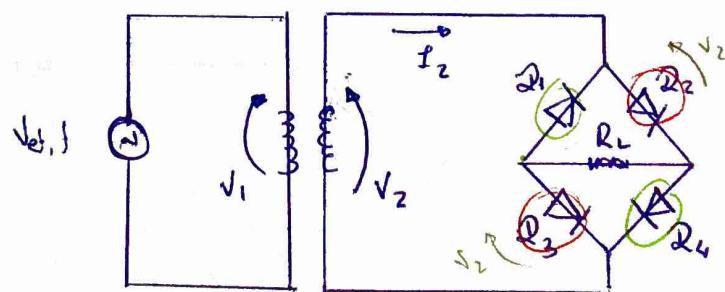
A tensão média entregue a carga é:

$$V_{Lm} = \frac{2V_{sp}}{\pi} = \frac{2V_s}{\pi}$$

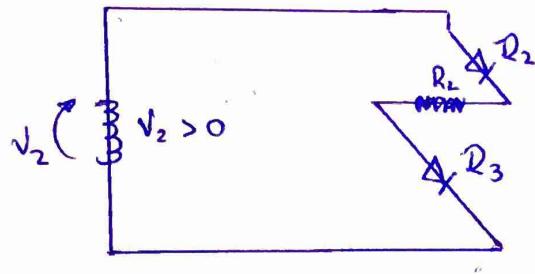
$$\therefore I_{Lm} = \frac{V_{Lm}}{R_L} \quad \text{e} \quad I_O = \frac{I_{Lm}}{2}$$

→ Retificador de onda em ponte.

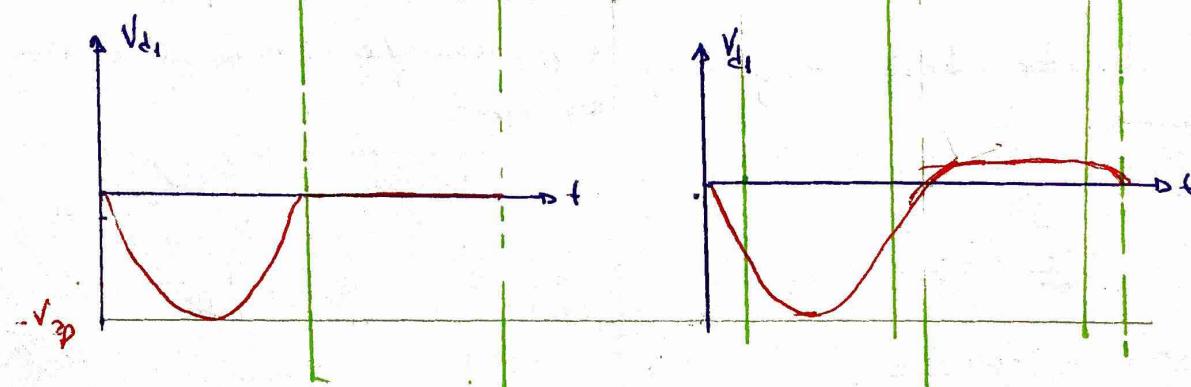
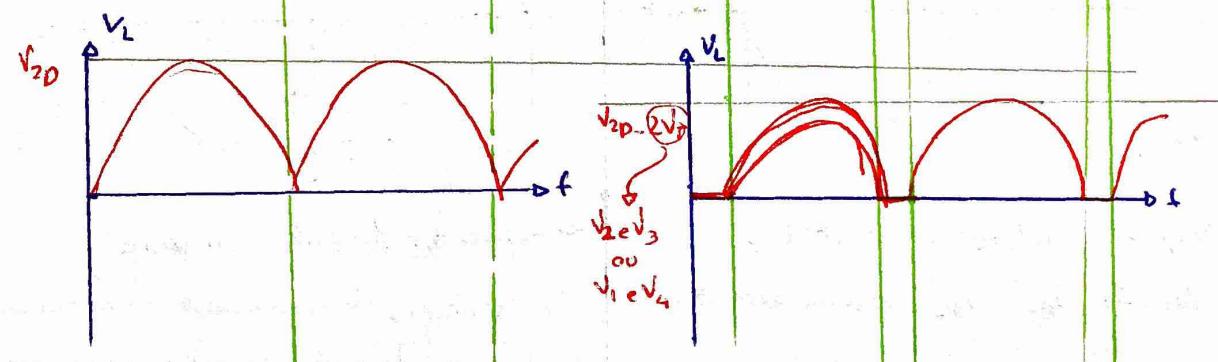
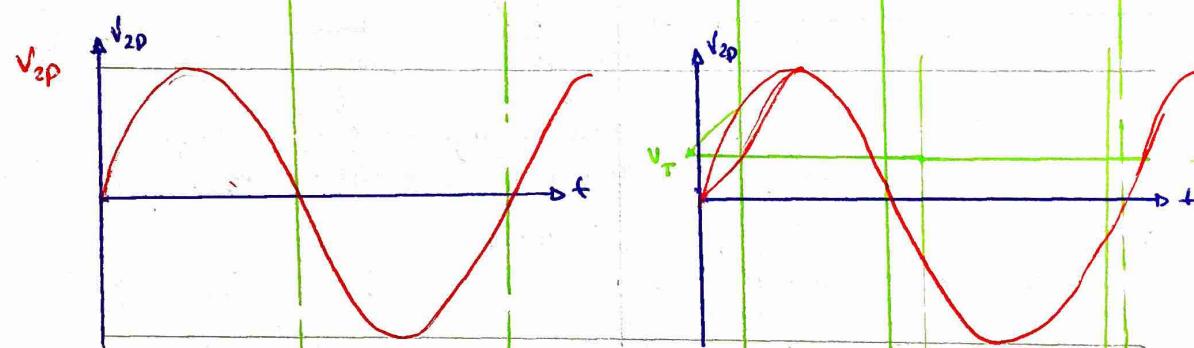
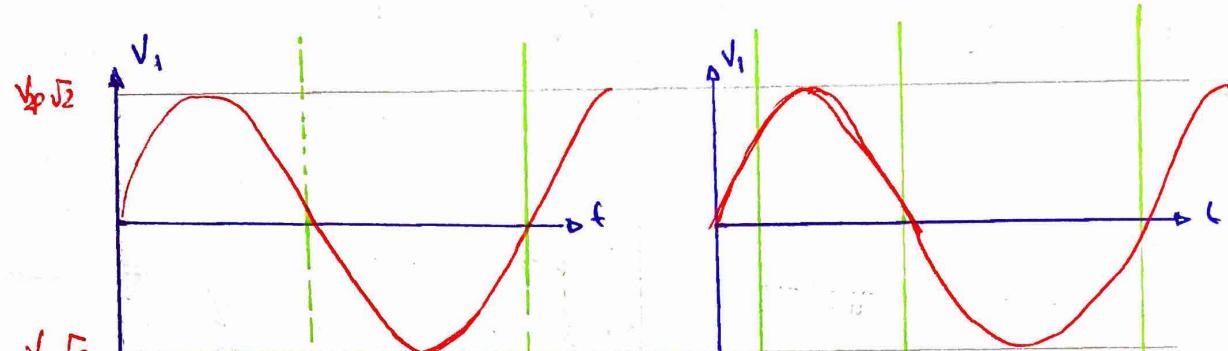
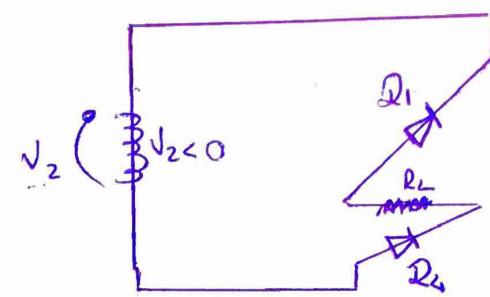
A vantagem desse retificador em comparação com o retificador de onda completa com derivação central, é que nesse caso não há necessidade de um transformador especial:



No semicírculo positivo D_2 e D_3 conduzem.



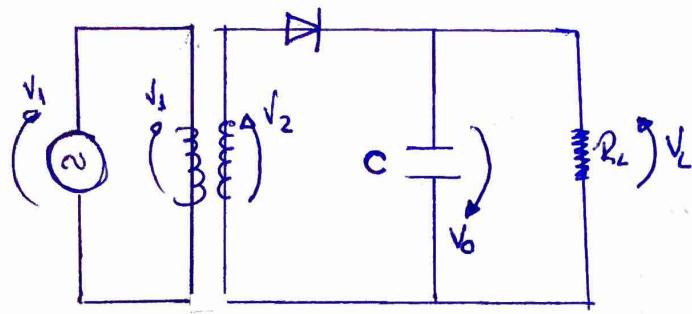
No semicírculo negativo D_1 e D_4 conduzem.



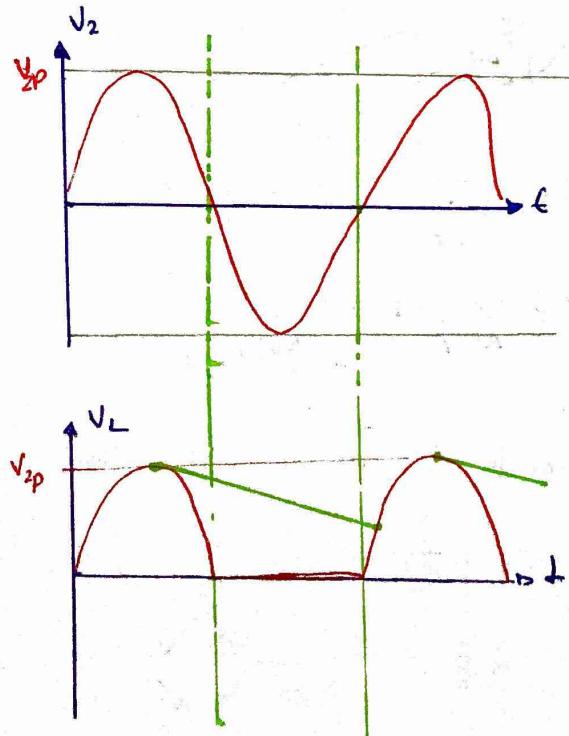
III) Redidicadores e Filtros

As saídas dos redidicadores visam a agarrar tom alta ondulação. Para diminuir esse fenômeno usam-se filtros, sobretudo os filtros capacitivos (são capacitores associados em paralelo com a carga).

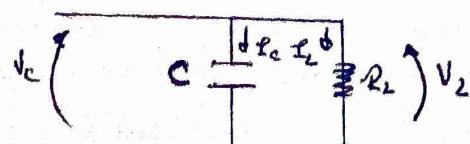
→ Redidicador de meia onda com filtro capacitivo:



Se a tensão V_2 começar a sair, o capacitor começa a descarregar até que a tensão no capacitor seja igual a V_2 . Em outras palavras, suponha que o circuito foi ligado no início de um semicírculo positivo, com o capacitor descarregado. O capacitor se carrega acompanhando a tensão secundária até seu pico.



Quando a tensão V_2 cai, o diodo corta e temos:



Tensão $V_c = V_{2p}$ no início do descarregamento.

$$I_c = -I_2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow C \frac{dV}{dt} = -\frac{V_c}{R_L} \Rightarrow R_L C \frac{dV}{dt} + V_c = 0$$

A solução da EDO é da forma:

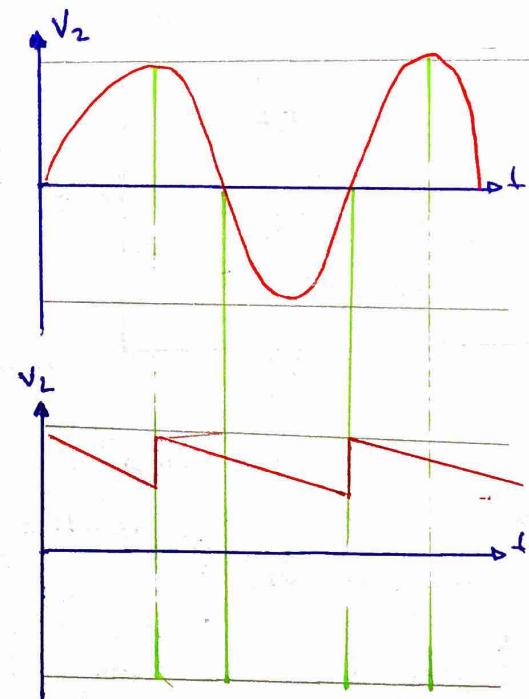
$$V_c(t) = \alpha e^{-t/R_L C} + \beta$$

Pensando no regime permanente, como $V_c(t) \rightarrow 0$ quando $t \rightarrow \infty$, temos $\beta = 0$. Com $V_c(0) = V_{2p}$,

$$V_c(t) = V_{2p} e^{-t/R_L C}$$

↳ Comportamento do capacitor!

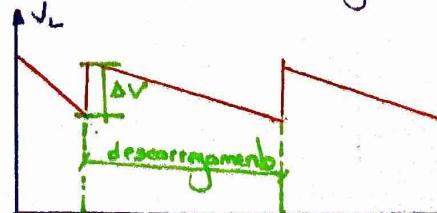
Para seguir a análise desse circuito, consideraremos uma aproximação linear para o comportamento do capacitor.



→ Aproximação linear para o capacitor.

Essa aproximação é válida para capacitores "grandes", ou seja, que possuem capacância elevada, armazenam mais carga e assim não são descarregados com facilidade.

Consideraremos que o descarregamento acontece instantaneamente, de forma linear, e o carregamento é instantâneo. Dessa forma, obtemos o gráfico visto anteriormente:



Chamaremos (ΔV) de ondulação de V_L e $\Delta t = 1/f$, onde f é a frequência de sinal da fonte.

No capacitor, teremos:

$$C \frac{dV_L}{dt} = C \left(\frac{\Delta V}{\Delta t} \right) = I_C = -I_L \Rightarrow$$

descarregamento

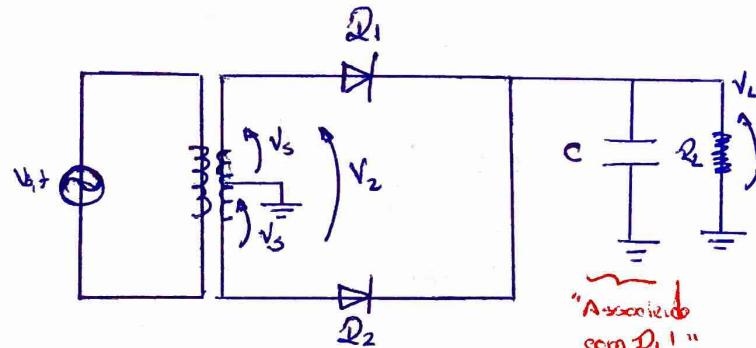
$$\Rightarrow CV \cdot \frac{1}{\Delta t} = I_L \Rightarrow C \Delta V \cdot f = I_L$$

A corrente na carga permanece constante.

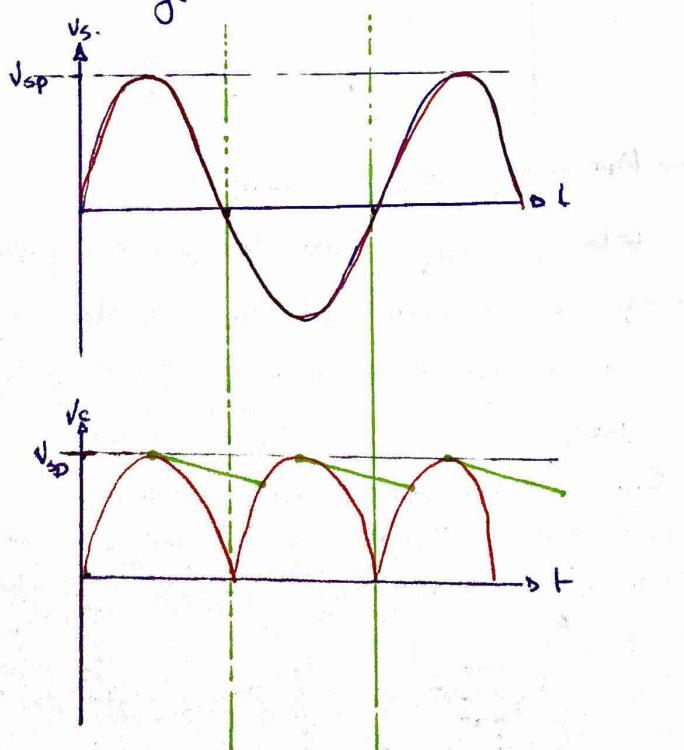
Temos então que:

$$I_L = \frac{V_{L\text{média}}}{R_L} = \frac{V_{sp} - \Delta V/2}{R_L} \Rightarrow C \Delta V f = \frac{V_{sp} - \Delta V/2}{R_L}$$

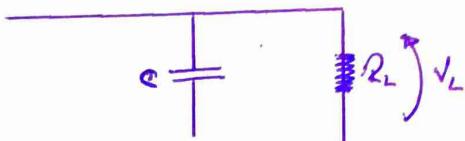
→ Retificador de onda completa el derivado central
→ Filtro capacitivo



Suponha que o circuito seja ligado ao capacitor descarregado e no início do semicírculo positivo. O capacitor se carrega via D_1 .



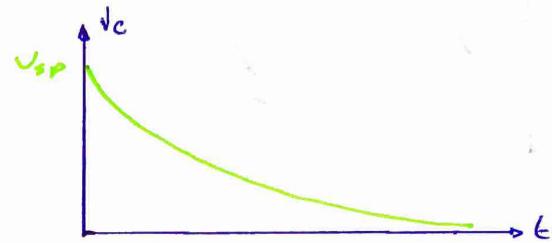
Após a tensão de pico V_{sp} passar, o diodo D_1 corta e temos o capacitor se descarregando a partir de uma tensão V_{sp} .



Equacionando novamente:

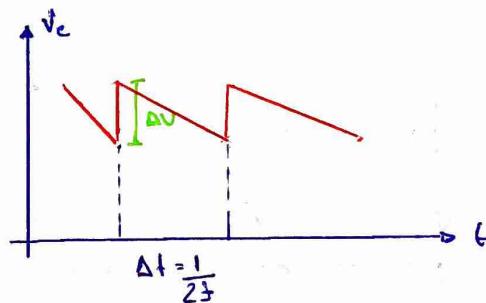
$$C \frac{dV_L}{dt} = -\frac{V_L}{R_L} \Rightarrow \frac{dV_L}{dt} + \frac{1}{R_L C} V_L = 0$$

Temos, então: $V_L(t) = V_{sp} \cdot e^{-t/R_C}$



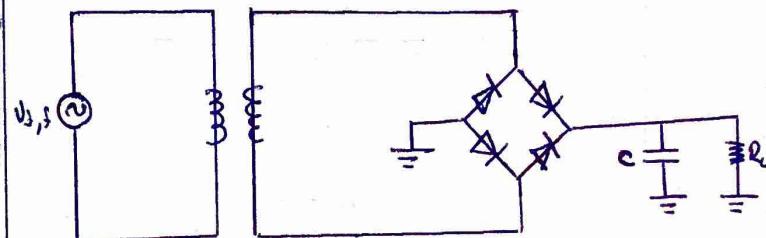
Quando a tensão no secundário for maior que V_{sp} , o capacitor se carrega novamente e o processo se repete a cada semicírculo.

Para analisar o circuito, faremos a mesma aproximação linear para o capacitor.



$$\left. \begin{aligned} C \frac{dV}{dt} &= C \left(-\frac{\Delta V}{\Delta t} \right) = I_C \\ I_C &= -I_L \end{aligned} \right\} C \Delta V f = I_L$$

→ Retificador de onda completa em ponte e filtro capacitivo



Novamente para se obter o circuito neste caso, basta adicionar o capacitor em paralelo com a carga.

Como o comportamento de V_L (no modelo de diodo ideal)

é homólogo do retificador de onda completa considerando central, a análise do circuito é idêntica em anterior

Obs: o retificador de meia onda impõe uma queda de tensão de apenas V_T e precisa apenas de um diodo. Portanto, o capacitor necessário para se obter ΔV é maior do que nos retificadores de onda completa.

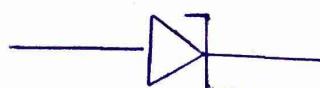
Obs: o retificador de onda completa com derivador central impõe queda V_T e precisa de dois diodos, mas exige um transformador especial.

Obs: o retificador de onda completa em ponte impõe queda de $2V_T$ (uma desvantagem), entretanto, necessita de um transformador comum e um capacitor menor que o retificador de meia onda (vantagem).

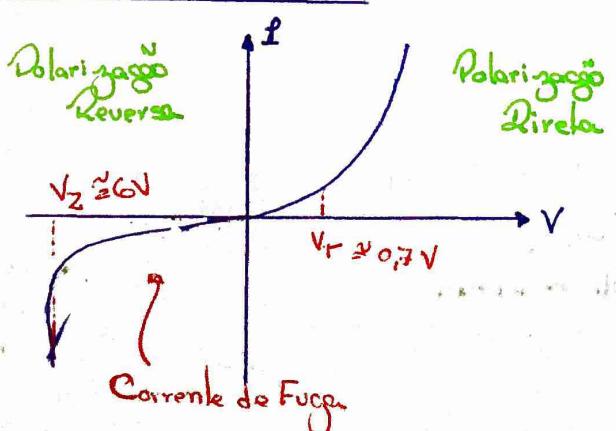
→ Diodo Zener

É um tipo de diodo especial que sob certas circunstâncias, pode conduzir em polarização reversa.

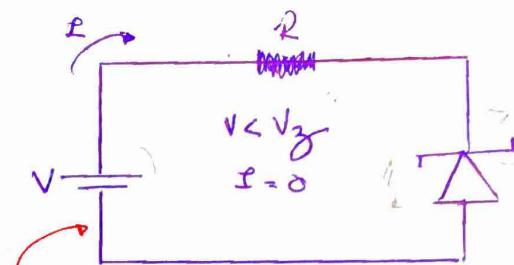
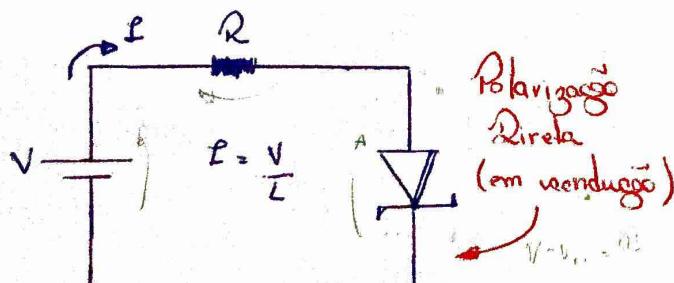
Símbolo:



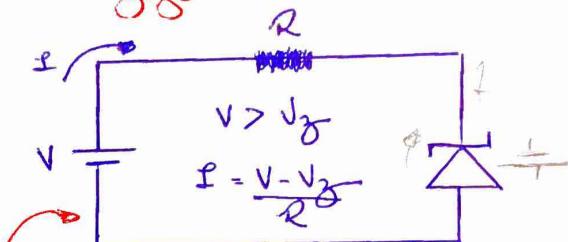
Comportamento real do diodo Zener:



Primeiramente vamos considerar o diodo Zener ideal

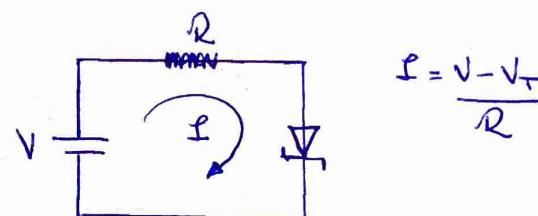


Polarização reversa (conduto)



Polarização reversa (em regulagem)

O diodo Zener real tem o mesmo comportamento em sinal e em regulagem, mas tem queda V_T em condução:

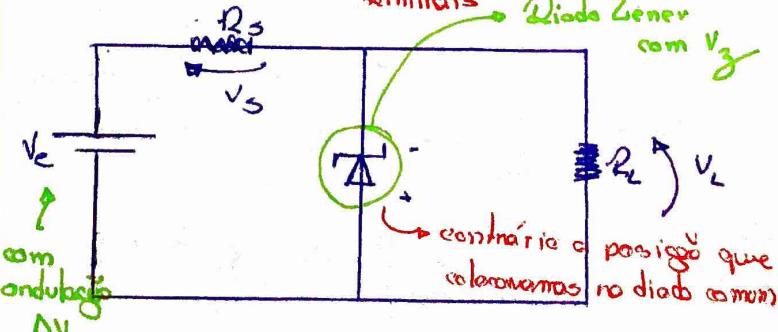


O diodo Zener é usado para regular tensão, ou seja, para receber tensão com ondulação (tensão de ripple)

ΔV e entregar tensão etc.

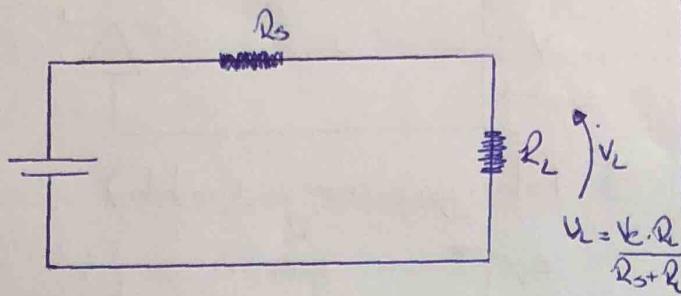
→ ondulação da tensão fornecida pela fonte, está associado a fontes de tensão contínua (quando utilizamos retificadores em fontes de tensão alternada, ela também aparece.)

Regulador Simples: deixar a tensão de entre os terminais → Diodo Zener com V_Z



Utilizaremos o diodo Zener para estabilizar o valor na saída, ou seja, a tensão na saída será $V_S > V_Z$. O Zener deve estar na polarização reversa.

Supondo que V_e tenha um valor baixo tal que o diodo Zener esteja cortado.

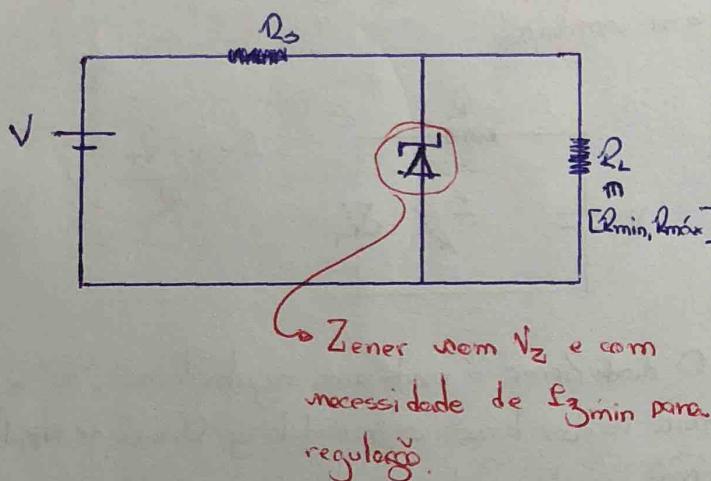


O diodo Zener passa a regular quando:

$$V_L > V_Z \Rightarrow \frac{V_e \cdot R_L}{R_L + R_s} > V_Z \Rightarrow V_e > V_Z \frac{(R_s + R_L)}{R_L}$$

Nesse caso temos V_Z uma carga!

Exemplo:



Zener com V_Z e com necessidade de $I_{Z\min}$ para regulagem.

Qual a menor tensão que ainda garante regulagem?

Solução:

$$I_Z = \frac{V - V_Z}{R_s} - \frac{V_Z}{R_L} \geq I_{Z\min}$$

$$\frac{V - V_Z}{R_s} \geq \frac{V_Z}{R_L} + I_{Z\min} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V \geq V_Z + R_s \left(\frac{V_Z}{R_L} + I_{Z\min} \right)$$

$$\therefore V \geq V_Z + \frac{R_s V_Z}{R_L} + R_s \cdot I_{Z\min}$$

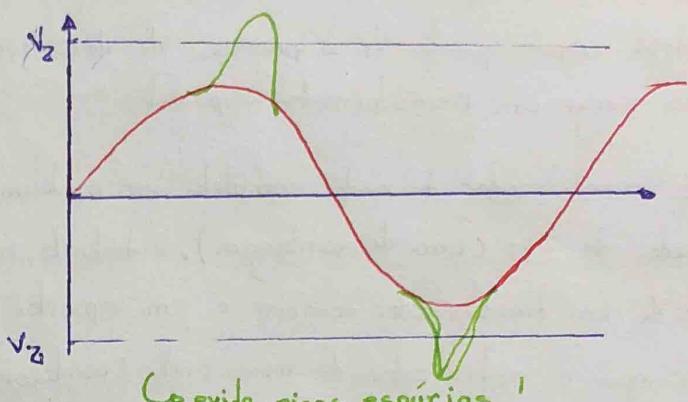
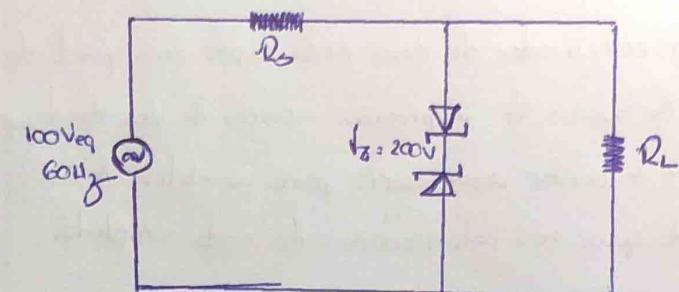
A menor tensão é aquela que garante regulagem

Envolvemos que $V_{\min} = V_Z + \frac{R_s V_Z}{R_L} + R_s \cdot I_{Z\min}$.

Limitador de tensão:

O circuito do limitador de tensão e seu comportamento são apresentados adiante.

Utilizaremos dois diodos Zener para limitar a tensão proveniente de fontes de corrente alternada.

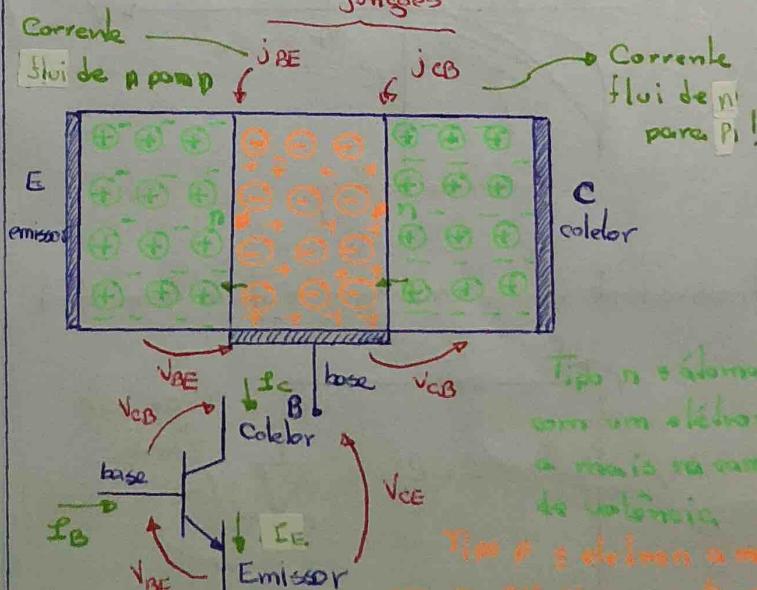


Evita picos espúrios!

IV) Transistor Bipolar:

Transistores são dispositivos semicondutores com três terminais. Os dispositivos de três terminais podem ter várias aplicações (de desde a amplificação de sinal até o projeto de circuitos lógicos digitais e de memória). O princípio básico envolvido nesses dispositivos é o uso de uma tensão entre esses dois terminais para controlar o fluxo de corrente no terceiro terminal. obs: $\oplus \rightarrow E \rightarrow \ominus$

→ Transistor Bipolar de Juncão (NPN) e



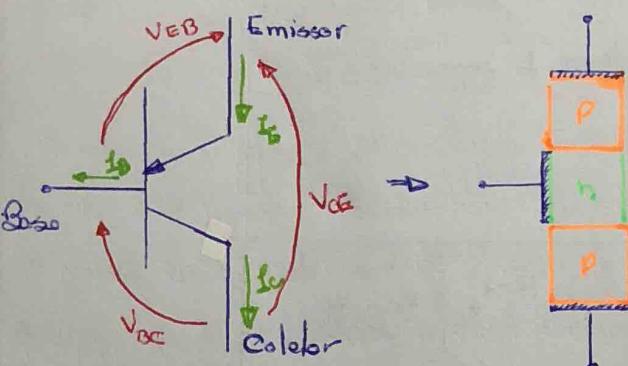
Tipo n + Átomos com um elétron a mais na camada de valência.

Tipo p + Átomos com um elétron a menos na camada de valência.

→ injecção de cargas + no n e cargas - no p
 $V_{CB} > 0 \rightarrow j_{CB} PR \rightarrow$ chave aberta que seria um campo elétrico, dificultando a passagem de corrente!
 $V_{CB} \leq 0 \rightarrow j_{CB} PR \rightarrow$ chave fechada

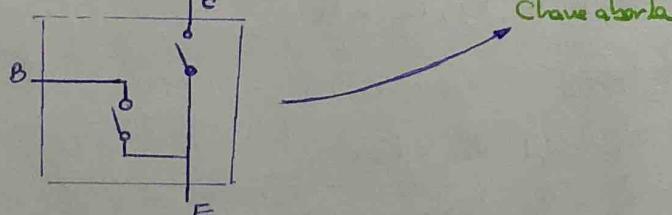
Pelas Leis de Kirchhoff, temos que: $I_E = I_C + I_B$
 $\text{e } V_{CE} = V_{BE} + V_{CB}$. A junção base-emissor funciona como um diodo, portanto, a corrente só sai pelo emissor e nunca pela base.

Obs: podemos ter transistores bipolares de junção do tipo pnp também



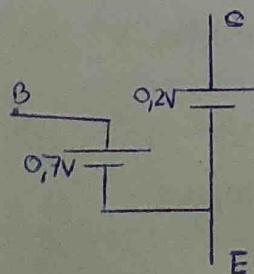
Polarizando o TB

• Corte: $\begin{cases} j_{BE} \rightarrow PR \quad (V_{BE} \leq 0) \\ j_{CB} \rightarrow PR \quad (V_{CB} > 0) \end{cases} \Rightarrow I_E = I_C = I_B = 0$

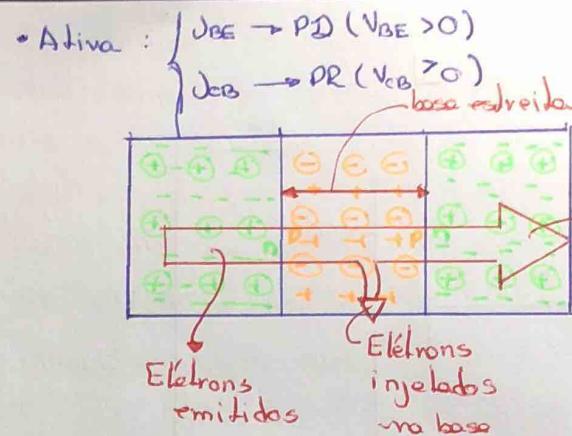


• Saturação: $\begin{cases} j_{BE} \rightarrow PD \quad (V_{BE} > 0) \\ j_{CB} \rightarrow PQ \quad (V_{CB} \leq 0) \end{cases} \Rightarrow$

$$\Rightarrow V_{BE} \approx 0,7V; V_{CB} \approx 0,5V; V_{CE} \approx 0,2V$$



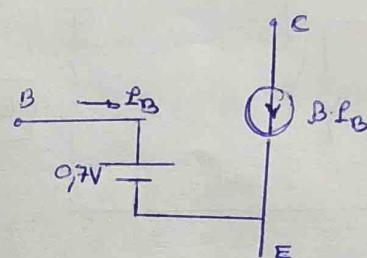
Em saturação temos que $I_C \ll B \cdot I_B$



A base estreita no tipo p faz com que a maioria dos elétrons emitidos sejam coleados e apenas alguns sejam injetados na base.

$$\Rightarrow V_{BE} \approx 0,7V, I_C = \alpha I_E \text{ e } I_C = \beta \cdot I_B$$

devido a *funciona como um*
base estreita! *amplificador*



Resumo:

• Modelo Ideal:

1) Corte: $I_B = I_C = I_E = 0$

2) Modo ativo: $I_B > 0, I_C = B \cdot I_B \text{ e } V_{BE} = 0$

3) Saturação: $V_{CE} = 0V$

• Modelo real:

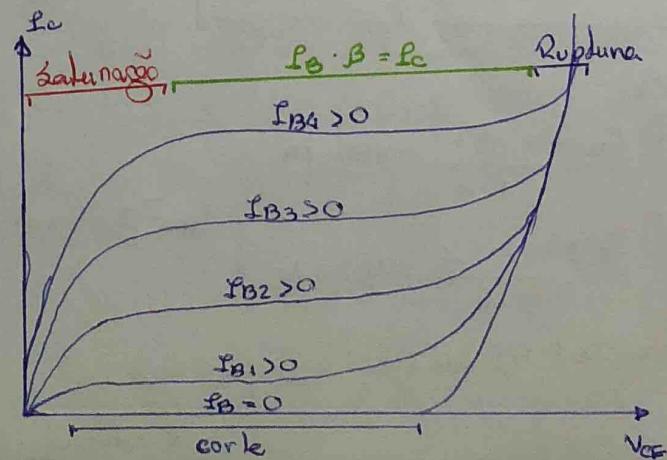
1) Corte: $I_B = I_C = I_E = 0$

Muitas vezes utilizaremos CV.

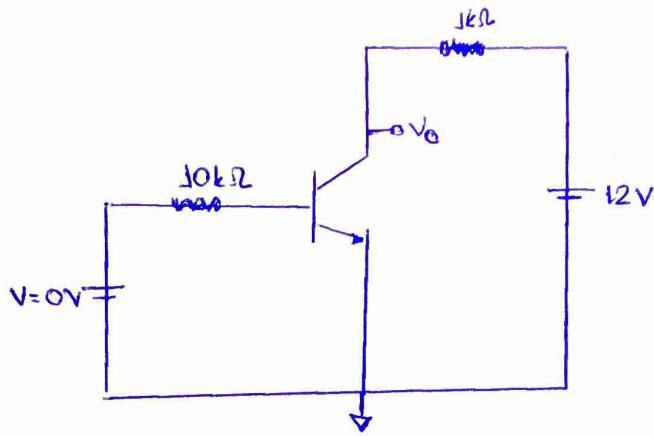
0,7V

2) Saturação: $I_B > 0, I_C < I_B, B < V_{CE} = V_{CE}^{\text{sat}}$

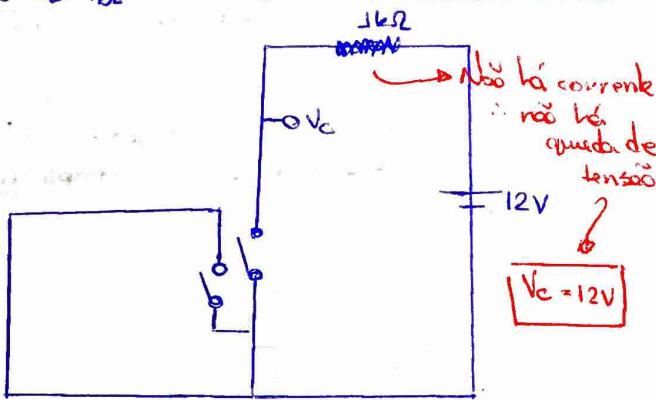
3) Ativo: $I_B > 0, I_C = B \cdot I_B \text{ e } V_{BE} = V_T = 0,7V$



Exemplo: $\beta = 220$, $V = 0V$

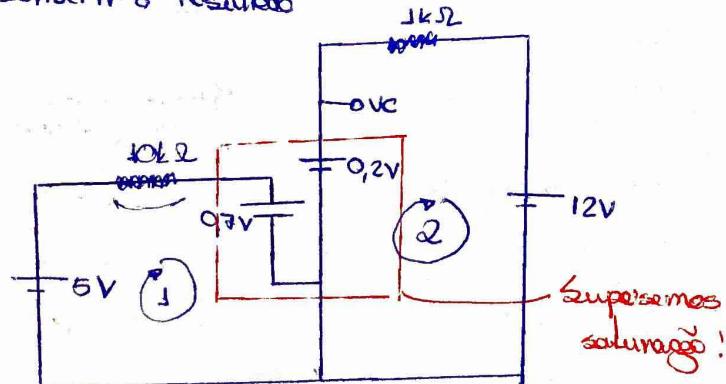


$V = 0 \Rightarrow V_{BE} = 0 \Rightarrow I_B = 0 \Rightarrow$ Transistor cortado



Exemplo: considerando o exemplo acima mas com $V = 5V$

Devemos superar uma situação (e.g. saturação) e considerar o resultado



2º LK:

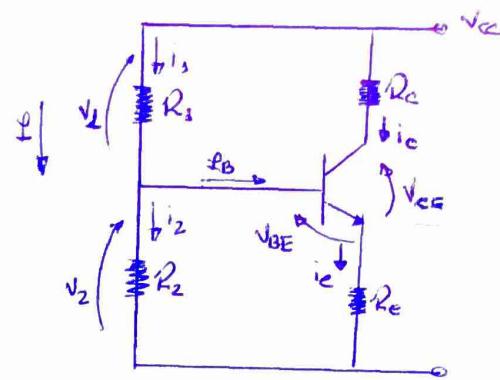
$$\begin{aligned} ① I_B &= \frac{5 - 0,2}{10k} = 430 \mu A \\ ② I_C &= \frac{12 - 0,2}{1k} = 11,8 \text{ mA} \end{aligned} \quad \left\{ \begin{array}{l} I_E \approx 11,85 \text{ mA} \end{array} \right.$$

Como $I_C = 11,8 \text{ mA} < 220 \cdot 430 \mu A = 99,6 \text{ mA}$

\therefore saturação!

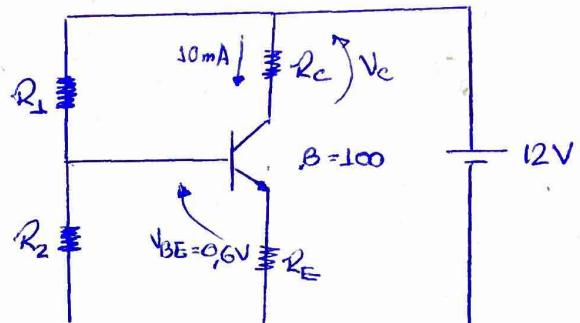
Logo, $V_E = 0,2V$ e $I_E = 11,85 \text{ mA}$

→ Método de polarização



1. Admindo $\beta > 100$ desprogramos I_B e escolhemos I_C
2. Escolhemos V_E como $10\% V_{CC}$
3. Escolhemos V_C como $50\% V_{CC}$
4. Considerar E como $10\% I_C$

Exemplo:



Projeto R_1, R_2, R_C e R_E :

Solução:

$$V_E = 0,1 \cdot V_{CC} = 1,2V$$

$$R_E = \frac{V_E}{I_E} \approx \frac{V_E}{I_C} = \frac{1,2}{10 \text{ mA}} = 120 \Omega$$

Adic. $I_{E2} \approx 0,1 I_C = 1 \text{ mA} \approx I_{R_1}$

$$V_{R2} = V_E \rightarrow 0,6 = 1,2 + 0,6 = 1,8V$$

$$R_2 = \frac{V_{R2}}{I_{R2}} = \frac{1,8}{1 \text{ mA}} = 1,8 \text{ k}\Omega$$

$$V_{R1} = V_{CC} - V_{R2} = 12 - 1,8 = 10,2V$$

$$R_1 = \frac{V_{R1}}{I_{R1}} = \frac{10,2}{1 \text{ mA}} = 10,2 \text{ k}\Omega$$

Adic. $V_C = 0,5 V_{CC} = 6V$

$$R_C = \frac{V_C}{I_C} = \frac{6}{10 \text{ mA}} = 600 \Omega$$

→ polarizações de corrente no modo ativo para BJT NPN

$$\bullet i_E = i_B + i_C$$

$$\bullet i_C = \alpha i_E$$

$$\bullet i_C = \beta i_B$$

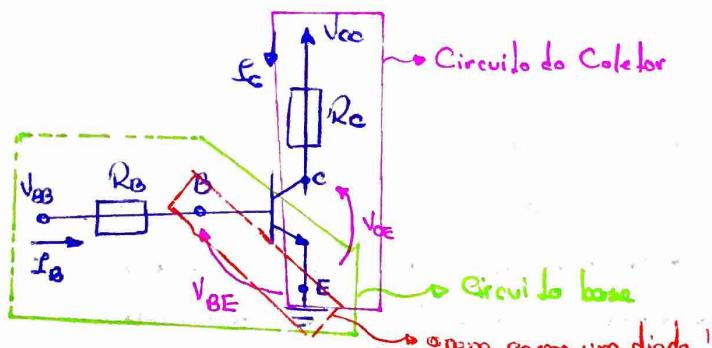
$$\bullet i_B = (1-\alpha) i_E = \frac{i_E}{\beta+1}$$

$$\bullet i_E = (\beta+1) i_B$$

$$\bullet \beta = \frac{\alpha}{1-\alpha} \quad \text{é o ganho da corrente}$$

$$\bullet \alpha = \frac{\beta}{\beta+1}$$

→ Transistor como chave:



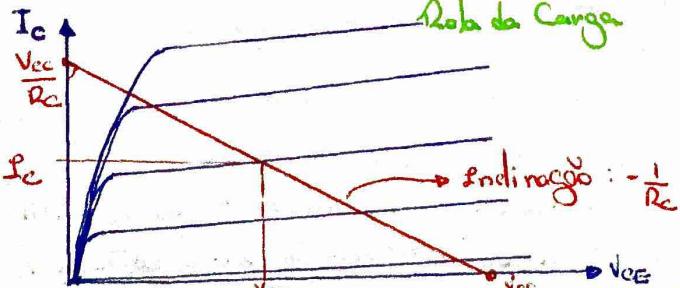
→ O circuito base é composto pela fonte V_{BB} , o resistor R_B e a junção base-emissor (j_{BE}) do transistor. A junção opera como um diodo dinâmicamente polarizado. Assim, V_{BE} é equivalente a tensão limiar de condução V_{DSS} dos diodos. Logo se $V_{BB} > V_{BE}$, a corrente base é dada por (2º LK)

$$V_{BB} - I_B R_B - V_{BE} = 0 \Rightarrow I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$$

Caso contrário ($V_{BB} < V_{BE}$) o diodo base-emissor não consegue e $I_B = 0$. Diodo não pode soltar energia no circuito!

→ O circuito do coletores compreende a fonte V_{CC} , o resistor R_C e os terminais coletores-emissor do transistor. A corrente I_C aumenta proporcionalmente entre o coletores e o emissor, fazendo a tensão V_{CE} cair e a corrente I_C aumentar. Pela 2º LK no circuito do coletores:

$$V_{CE} + R_C I_C - V_{CC} = 0 \Rightarrow V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C$$



O transistor é um elemento passivo e não pode fornecer energia ao sistema. De imediato, sabemos que V_{CC} não pode ser menor que a tensão de alimentação V_{CC} (caso contrário, seria uma fonte) e, portanto, a corrente I_C não pode ser menor que zero mas não negativa. Isto determina o ponto de corte da reta de carga em que o transistor funciona como uma chave aberta ($V_{CE} = V_{CC}$ e $I_C = 0$). Por outro lado, V_{CC} não pode ser maior no sentido positivo, pois, passaria a operar como um gerador.

Ideialmente, o limite inferior de V_{CE} seria 0, no entanto V_{CE} não consegue cair abaixo de uma tensão mínima conhecida como V_{CESAT} (tensão de saturação). O outro extremo da reta é o ponto de saturação no qual o transistor melhor se aproxima de uma chave fechada tal que $V_{CE} = V_{CESAT}$ e a corrente no coletores atinge a máxima $I_{CCSAT} = \frac{V_{CC} - V_{CESAT}}{R_C}$

→ Para um ponto qualquer entre os extremos e sabendo que $I_C = \alpha I_B$:

$$I_{CC} = \alpha \cdot \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - \alpha R_C \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$$

O ponto (V_{CEQ}, I_{CC}) é chamado de ponto quiescente e deve se situar entre os pontos de corte e saturação. Esta região é chamada de região linear.

Obs: podemos determinar a tensão V_{BB} que leva V_{CE} ao limiar de saturação

$$I_{CCSAT} = \frac{V_{CC} - V_{CESAT}}{\alpha R_B}$$

$$V_{BBSAT} = R_B I_{CCSAT} + V_{CESAT}$$

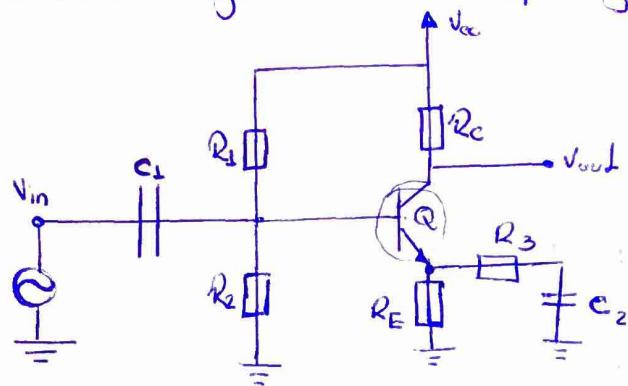
→ Amplificador de pequenos sinal

Pequenos sinal referem-se a sinais oscilatórios de pequena amplitude e média nula

Polarizar um transistor → fixa-lo num ponto de operação em corrente contínua. Este ponto de operação é chamado de ponto quiescente.

→ Ponto (V_{CEQ}, I_A) é calculado quando V_{CC} está desconectado.

Consideremos o seguinte circuito de amplificação:



Escrivhamos que a RE de modo a deixar a tensão do coletor (Vce) próxima a $Vcc/2$ e o emissor Vee próxima a 0.

Quando o amplificador estiver em operação, a tensão Vce poderá variar em uma faixa ampla.

Os resistores R_1 e R_2 devem ser escolhidos de forma que $I_B = \frac{R_{12}}{R_1} \approx \frac{V_{cc}}{R_1 + R_2}$

Quando aplicarmos V_{in} temos que o sinal oscila em torno de V_{ce} . O sinal V_{in} é injetado na base do transistor através de um capacitor de desacoplamento.

As componentes AC do sinal causam variações na tensão de base, que são amplificadas e modulam a tensão V_{ce} do transistor.

O fator de amplificação, neste caso, não é o gráfico da corrente, mas a relação exponencial entre a corrente I_E do emissor e a tensão V_{ce} , conhecido como modelo de Ebers - Moll:

$$I_E(V_{ce}) = I_S e^{\frac{V_{ce}}{V_T}} - I_S \quad \text{Corrente de saturação inversa}$$

pequenos sinais injetados em V_{be} causam grandes variações na corrente de coletor do transistor.

Como a relação não é linear, os flutuações em V_{ce} devem ser de pequena amplitude para que o sinal de saída não seja distorcido significantemente.

O sinal final pode ser dado por:

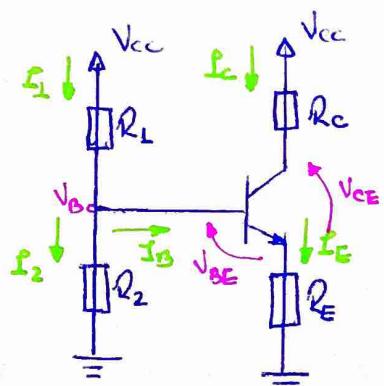
$$G = \frac{R_L}{r_{in} + r_{out}}, \text{ onde } r_{in} = \frac{V_T}{I_{ce}} \text{ e } r_{out} = \frac{R_E R_L}{R_E + R_L}$$

o sinal de saída será deslocado em 180° em relação ao sinal de entrada.

VI) Transistor de Efeito de Campo

Agora não mais controlaremos o transistor pela corrente mas sim por uma tensão!

aplicamos uma tensão no gate e, a partir, dessa controlaremos a corrente do source ao drain.



Assumiremos que B tem um valor elevado. A polarização deve manter o transistor na região linear, portanto, $I_c = B I_B$.

Se I_c não é muito elevado, podemos supor que I_B é muito pequena e desprezível em relação a I_1 e I_2 .

$$I_B \ll I_1 \Rightarrow I_1 \approx I_2 = \frac{V_{cc}}{R_1 + R_2} \quad \left\{ V_B \text{ quase não varia com } I_B \right.$$

$$V_B = R_2 \cdot I_2 \approx \frac{V_{cc}}{R_1 + R_2} \cdot R_2$$

Pela 2ª LK:

$$I_E = \frac{V_B - V_{BE}}{R_E} \quad (*)$$

Mas como $I_E = I_c + I_B \approx I_c$

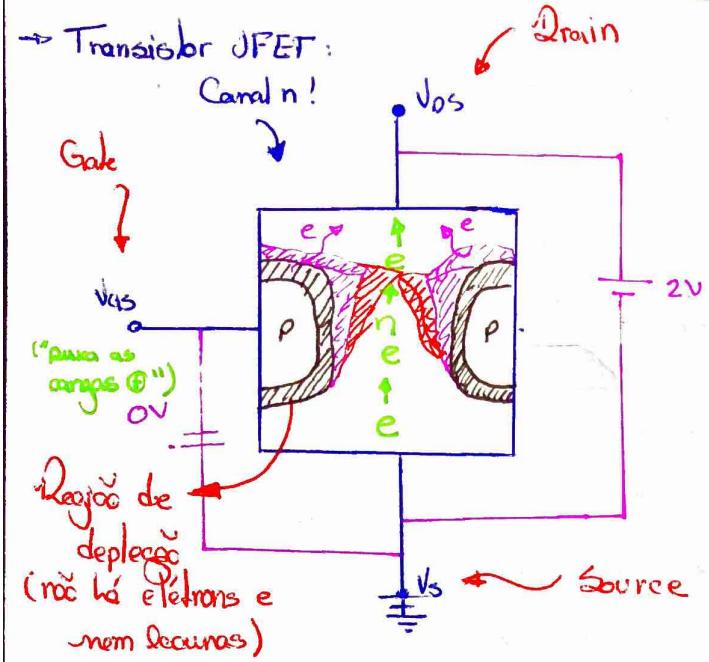
Novamente, pela 2ª LK:

$$V_{ce} = V_{cc} - R_E I_E - R_E I_E \Rightarrow V_{ce} \approx V_{cc} - I_E (R_E + R_E) \quad (**)$$

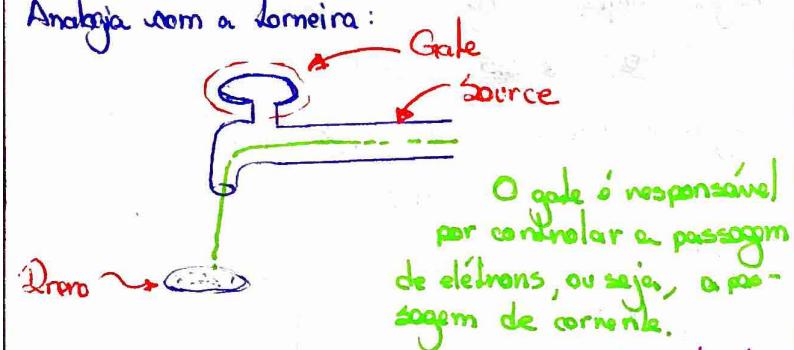
Com (*) e (**) podemos estimar o ponto de operação (I_{ceq} , V_{ceq}).

Os transistores BJTs têm um maior custo e maior consumo de energia.

→ Transistor JFET:

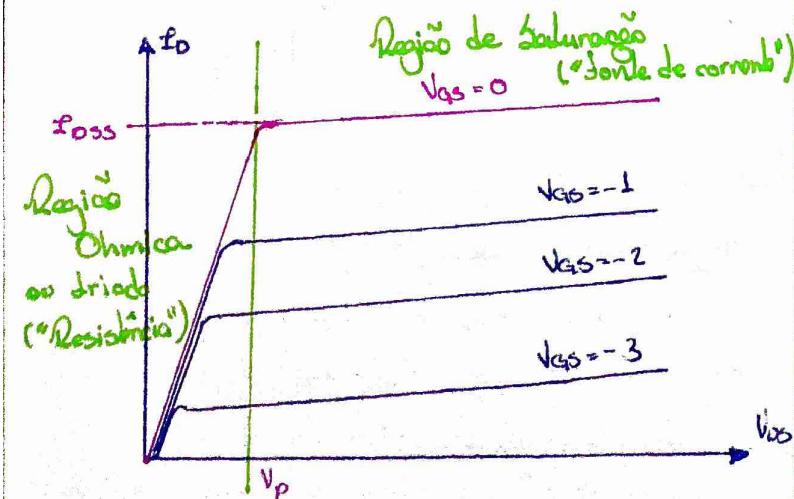


Analogia com a formiga:

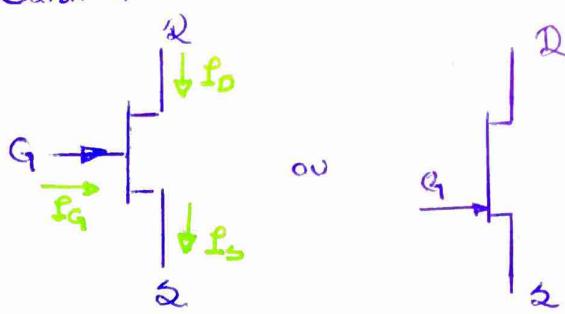


Eletrões tendem a ir para o dreno quando aplicada uma tensão V_{DS} . Quando menor a tensão em V_{GS} , menor será a tensão V_{DS} necessária para diminuir o fluxo de eletrões. → Região Ohmica

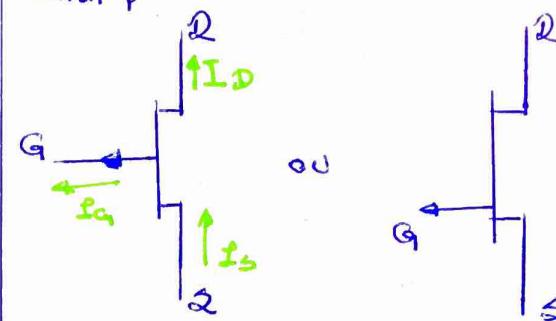
→ chega um hora que a camada de depilação aumentou tanto que o fluxo de eletrões passa a ficar constante ("pinch-off") → Região de saturação. A saturação ocorre devido ao aumento de V_{DS} .



Canal n



Canal p:



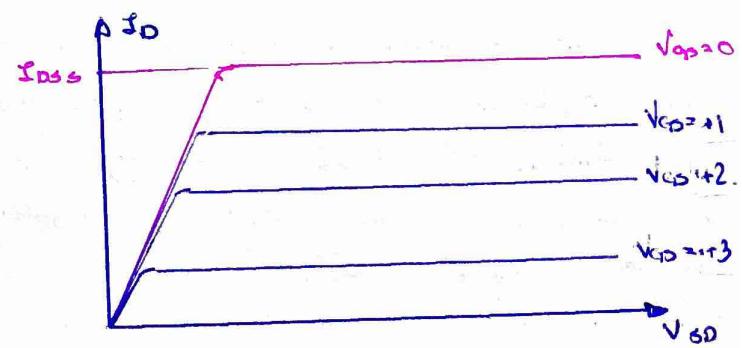
I_{DSS} = corrente de dreno na saturação quando $V_{GS} = 0$.

V_P = tensão para a qual houve o início da região de saturação.

$V_{GS,off}$ = mínima tensão para corrente de dreno nula.

Obs: V_P é um parâmetro (tensão de constrictão) e $V_{GS,off} = -V_P$.

Obs: para o canal p, os valores de V_{GS} devem ser positivos e a densidade no source será maior que a tensão no dreno (V_{DS}).



Transcondutância: relação f_0 com V_{GS} para V_{DS} fixo:

$$g_m = \frac{\partial f_0}{\partial V_{GS}} \Big|_{V_{DS}} = \frac{Q f_{DSS}}{V_{GS,off}} (V_{GS} - V_{GS,off})$$

• Corte: $V_{GS} < V_{GS,off}$

• Região Ohmica:

$$f_0 = f_{DSS} \left[2 \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS,off}} \right) \left(\frac{V_{DS}}{-V_{DS,off}} \right) - \left(\frac{V_{DS}}{V_{DS,off}} \right)^2 \right]$$

$$R_{DS} \approx \frac{V_{GS,off}}{2 f_{DSS} (V_{GS} - V_{GS,off})} = \frac{1}{g_m}$$

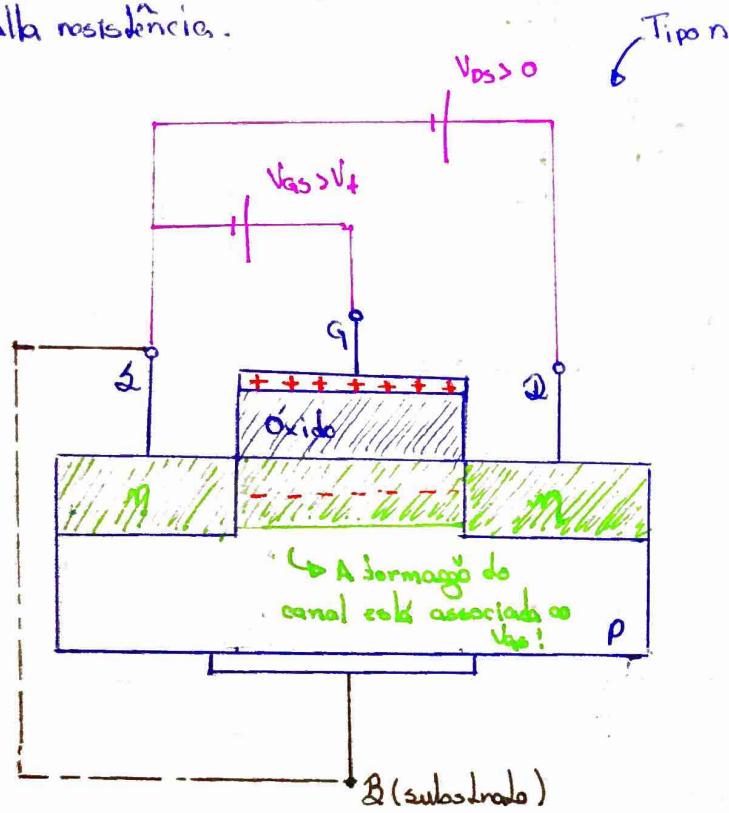
• Regiãoativa ou de saturação

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS,0SS}} \right)^2$$

→ Transistor MOSFET

MOSFET = Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor

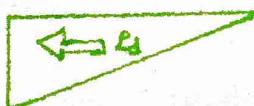
Na porta (gate) temos uma varredura com óxido de silício, consequentemente, a porta terá uma alta resistência.



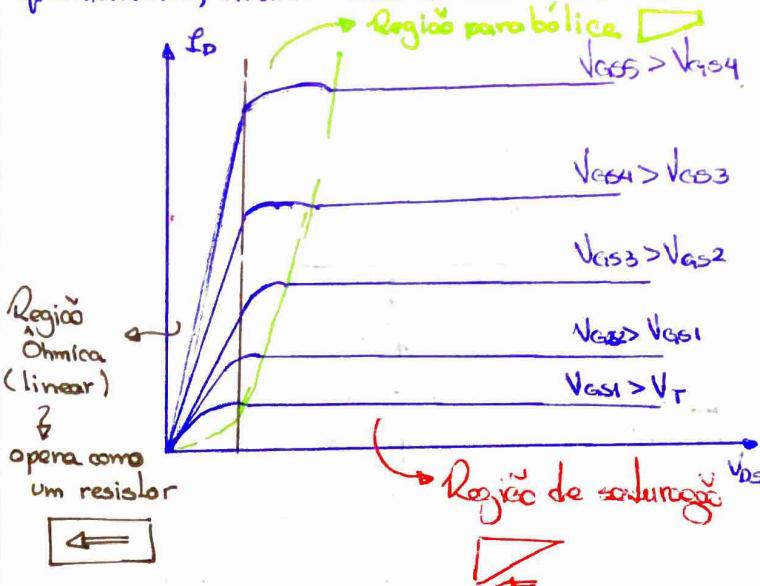
Se colocarmos uma tensão V_{GS} maior que uma tensão limite V_T , teremos a formação de um canal no material tipo p (silício). → "a tensão na porta fazem que este dique positivo e atrai eletrons que não passam pelo óxido, formando o canal".

Quando aplicamos $V_{DS} > 0$ temos que haverá um passagem de corrente pelo canal. Esta corrente vai do dreno para a fonte → ao aplicar V_{DS} , tiramos eletrons do lado direito, deixando com que eletrons atraçam o canal".

→ Conforme aumentarmos V_{DS} , a porta direita do canal vai ficando mais estreita de forma que o canal não fique saturado.



Não queremos maior $\Rightarrow V_{GS} > V_T$, maior de verá ser a V_{GS} para entrar em saturação, consequentemente, maior será a corrente.



• Corte: se $V_{GS} < V_T$:

$$I_G = I_D = I_S = 0$$

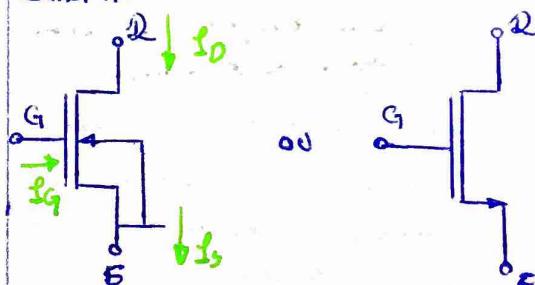
• Região Óhmica: $V_{GS} - V_T \geq V_{DS} \geq 0$

$$I_D = 2K [(V_{GS} - V_T)V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2}]$$

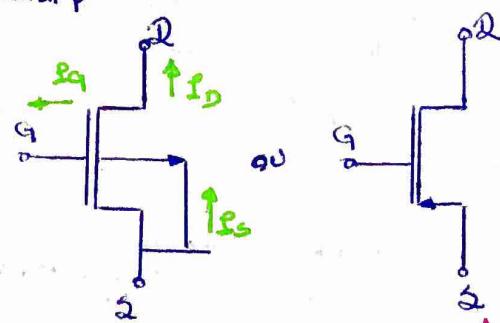
• Região de Saturação: $V_{DS} > V_{GS} - V_T \geq 0$

$$I_D = K (V_{GS} - V_T)^2$$

Canal n:



Canal p:



Obs: para o MOSFET tipo p:

• Região Óhmica: $V_{GS} - V_T \geq V_{DS}$

$$I_D = K_p [2(V_{GS} + V_T)]V_{SD} - \frac{V_{SD}^2}{2}$$

• Região de Saturação: $V_{SD} > V_{GS} - V_T \geq 0$

$$I_D = K_p (V_{GS} + V_T)^2$$

$\partial \mathcal{L}_D$

