02/08/16 - ELETRÔNICA ANALÓGICA - AULA 1 ___/___/___

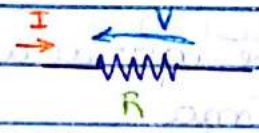
REVISÃO: COMPONENTES PASSIVOS E TEOREMA DE THEVENIN

DEFINIÇÃO DE ELETRÔNICA

A eletrônica consiste no uso de fenômenos elétricos, sobretudo para transmissão de informações

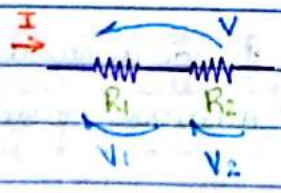
RESISTORES

Componente que obedece à lei de Ohm: $V = RI$ (a tensão elétrica é relacionada à corrente de acordo com uma constante de proporcionalidade, denominada resistência elétrica). Existem resistores que não obedecem essa proporção (não-lineares), porém não são de interesse para o curso



Símbolo para o resistor

Associação em série de resistores:



$V = V_1 + V_2$

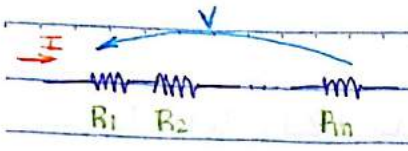
$V = R_1 I + R_2 I$

$V = (R_1 + R_2) I$

resistência equivalente

Para n resistores em série teremos:

Scanned by CamScanner



$V = (R_1 + R_2 + \dots + R_n) \cdot I$

resistência equivalente

Associação em paralelo de resistores:

$$I = I_1 + I_2 = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} \Rightarrow V\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) = I \Rightarrow$$

$$V = \frac{1}{1/R_1 + 1/R_2} \cdot I = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \cdot I$$

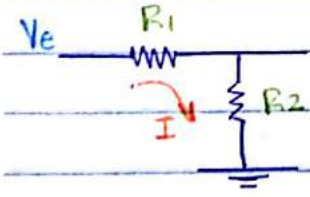
Para n resistores em paralelo

$$V\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}\right) = I \Rightarrow V = \frac{1}{1/R_1 + 1/R_2 + \dots + 1/R_n} \cdot I$$

resistência equivalente

DIVISOR RESISTIVO

Um divisor resistivo nada mais é que a associação de resistores da seguinte forma:



$$I = \frac{V_e}{R_1 + R_2} \Rightarrow V_s = R_2 \cdot I \Rightarrow$$

$$\boxed{V_s = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_e}$$ Tensão de saída do divisor resistivo

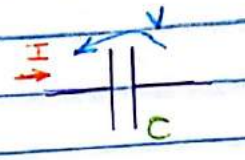
CAPACITORES

São componentes que armazenam carga elé-

Scanned by CamScanner

__/__/__

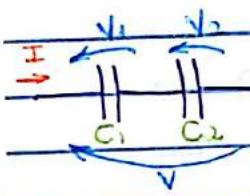
trica. São constituídos por um material dielétrico.



Símbolo para o capacitor

A carga acumulada em um capacitor é dada pela expressão $Q = CV$, onde C é a capacitância (medida em Faraday). Dessa forma, temos então que $I = C \cdot \frac{dV}{dt}$

Associação em série de capacitores:



$$V = V_1 + V_2$$

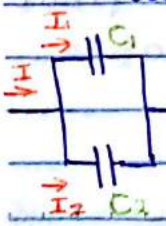
$$\frac{dV}{dt} = \frac{dV_1}{dt} + \frac{dV_2}{dt} = \frac{I}{C_1} + \frac{I}{C_2} = I\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}\right) \rightarrow$$

$$I = \left(\frac{1}{1/C_1 + 1/C_2}\right)\frac{dV}{dt} \Rightarrow I = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \cdot \frac{dV}{dt}$$

Para n capacitores em série:

$$I = \underbrace{\left(\frac{1}{1/C_1 + 1/C_2 + \ldots + 1/C_n}\right)}_{\text{capacitância equivalente}} \cdot \frac{dV}{dt}$$

Associação em paralelo de capacitores



$$I = I_1 + I_2 = C_1\frac{dV}{dt} + C_2\frac{dV}{dt} = (C_1 + C_2)\frac{dV}{dt}$$

Scanned by CamScanner

__/__/__

Para n capacitores em paralelo:

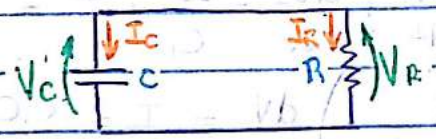
$$I = \underbrace{(C_1 + C_2 + \ldots + C_n)}_{\text{capacitância equivalente}} \frac{dV}{dt}$$

03/08/16 - ELETRÔNICA ANALÓGICA - AULA 2

REVISÃO: COMPONENTES PASSIVOS E TEOREMA DE THEVENIN

CIRCUITO RC: PARALELO

Um circuito RC é um circuito composto de resistores e capacitores, podendo ser esquematizado conforme abaixo:



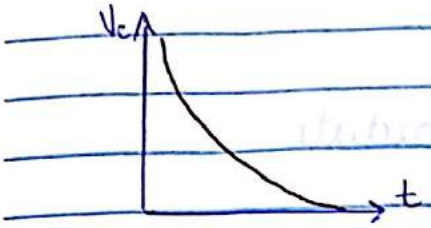
Supondo carga do capacitor no instante inicial:

$$I_C = -I_R \Rightarrow C\frac{dV_C}{dt} = -\frac{V_R}{R} = \frac{V_C}{R} \Rightarrow RC\frac{dV_C}{dt} + V_C = 0$$

A forma da solução dessa equação é: $V_C(t) = \alpha e^{-t/RC} + \beta$. Para $t = 0$, temos $V_C(0) = \alpha + \beta = V_0$ e para $t \to \infty$ temos $V_C(t) \to \beta = 0$ (o capacitor tende a se descarregar).

Scanned by CamScanner

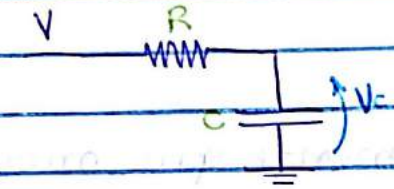
__/__/__



$$V_c(t) = V_0 e^{-t/RC}$$

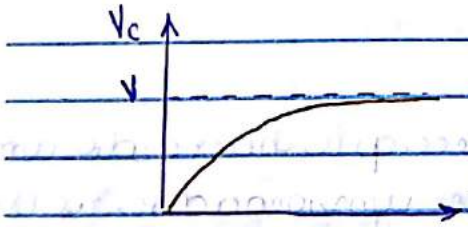
CIRCUITO RC: SÉRIE

Um circuito RC também possui uma configuração para resistores e capacitores em série:



$$I_C = I_R \Rightarrow C\frac{dV_c}{dt} = \frac{V_R}{R} \Rightarrow C\frac{dV_c}{dt} = \frac{V - V_c}{R} \Rightarrow RC\frac{dV_c}{dt} + V_c = V$$

Nesse caso a forma da solução é $V_c(t) = \alpha e^{-t/RC} + \beta$. Para $t = 0$, $V_c(0) = \alpha + \beta = 0$ (capacitor inicialmente descarregado) e para $t \to \infty$, $V_c(t) \to \beta = V$



$$V_c(t) = V - Ve^{-t/RC}$$

INDUTORES

Não entraremos muito em detalhe nesse tipo de componente pois já não são muito utilizados em

Scanned by CamScanner

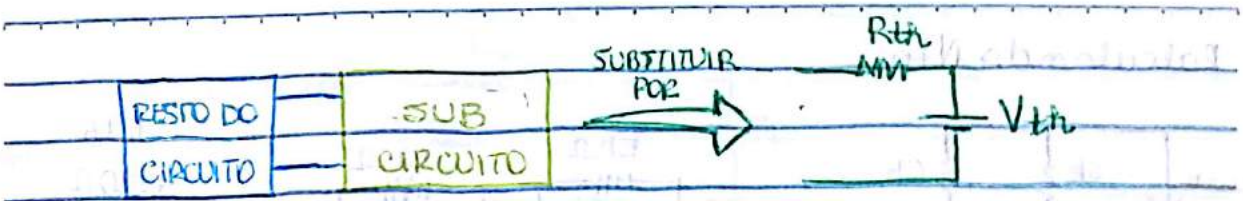
A constante que relaciona a tensão elétrica com a taxa de variação da corrente em relação ao tempo no indutor é chamada de indutância (medida em Henry).

GERADOR DE TENSÃO

Um outro componente que merece ser recordado são as fontes, ou geradores de tensão:

Símbolo para gerador de tensão contínua

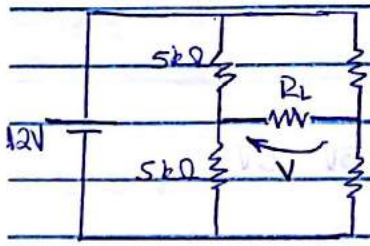
Scanned by CamScanner



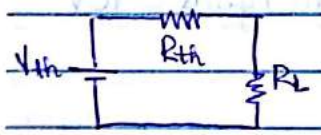
R_{th} é a chamada resistência de Thevenin, obtida cortando as ligações com o sub-circuito, curto-circuitando geradores e calculando a resistência entre os terminais do sub-circuito.

V_{th} é a tensão de Thevenin, obtida cortando as ligações com o subcircuito e calculando a tensão entre os terminais do subcircuito

• Exemplo: considerando circuito abaixo, calcule V para $R_L = 100\,\Omega$, $R_L = 500\,\Omega$ e $R_L = 1\,k\Omega$

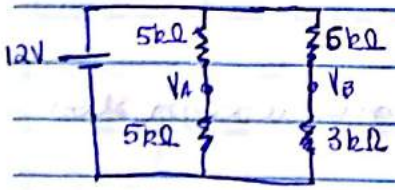


Resolução: podemos considerar R_L como o "resto" do circuito e aplicar Thevenin



Temos um divisor resistivo $\Rightarrow V = \frac{R_L}{R_{th}+R_L} \cdot V_{th}$

Calculando V_{th}:



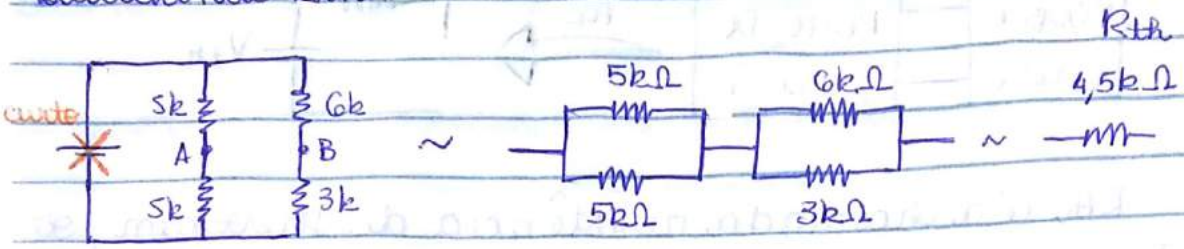
$V_A = 12 \cdot \frac{5k}{5k+5k} = 6V$

$V_B = 12 \cdot \frac{3k}{3k+6k} = 4V$

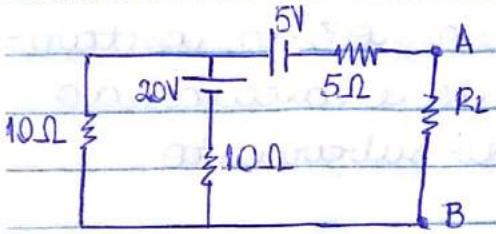
$V_{th} = V_A - V_B = 6 - 4 = 2V$

Scanned by CamScanner

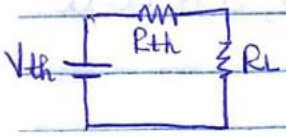
Calculando Rth:



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

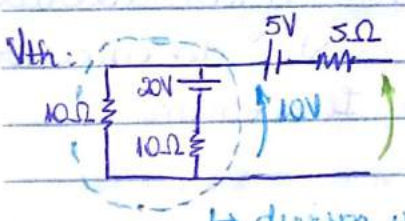


Vamos aplicar Thevenin da mesma maneira



$V_{AB} = V_{th}$, pois $R_L = 0$

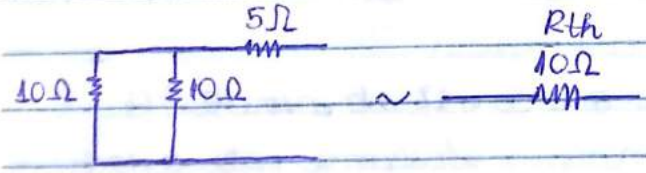
Vth:



$V_{th} = 10V - 5V = 5V$

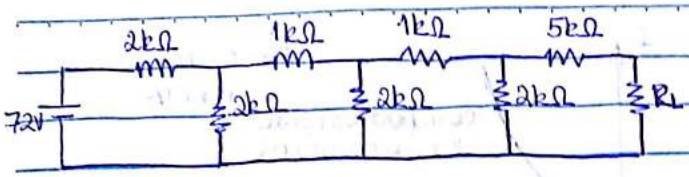
↳ divisor resistivo com tensão de saída igual a 10V

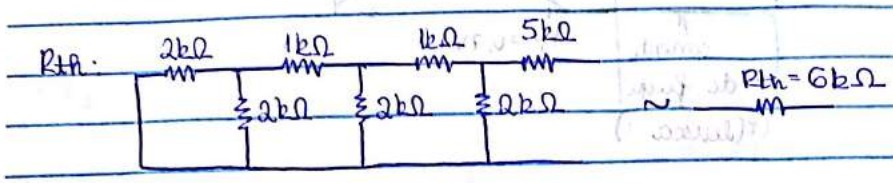
Rth:



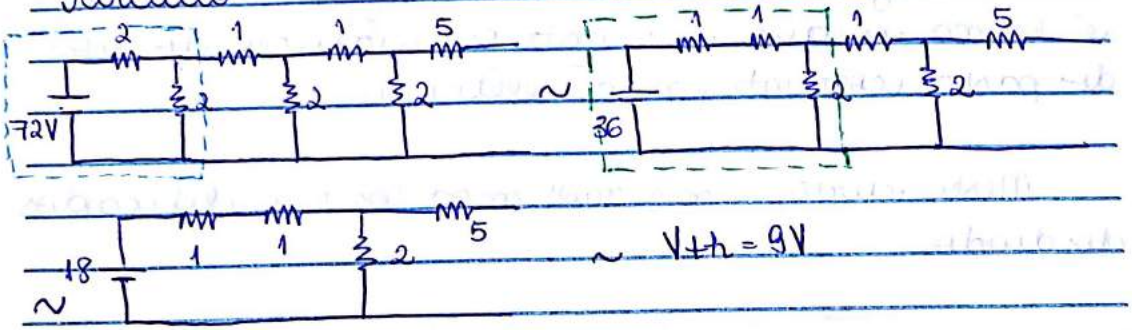
• Exemplo: aplicar Thevenin como nos exemplos anteriores.

Scanned by CamScanner





Vth : podemos aplicar o teorema em trechos do sub-circuito



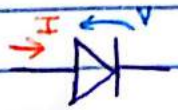
Vth = 9V

09/08/16 - ELETRÔNICA ANALÓGICA - AULA 3

DIODOS RETIFICADORES

DIODO

É um componente que permite passagem de corrente em um único sentido

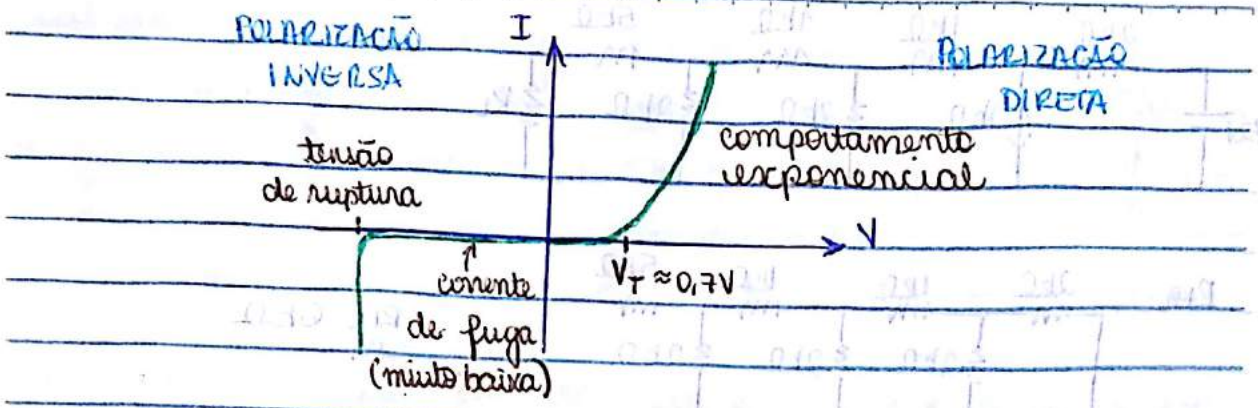


Símbolo para o diodo

As curvas adiante mostram o comportamento de um diodo real.

Scanned by CamScanner

__/__/__



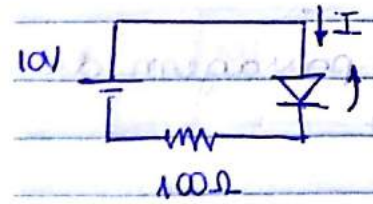
Observação: na tensão de ruptura o diodo queima. Na região de corrente de fuga a corrente é baixa porque somente o invólucro do diodo permite passagem de elétrons

Nesse curso, usaremos modelos simplificados do diodo.

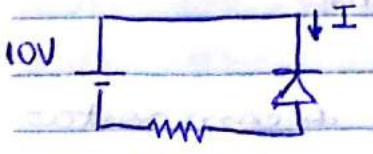
DIODO IDEAL

Para $V>0$, a corrente flui, sem resistência e para $V \leq 0$, não passa corrente.

• Exemplo:



$I = \frac{10}{100} = 0,1A$



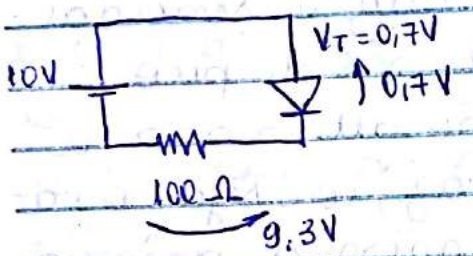
$I = 0V$

Scanned by CamScanner

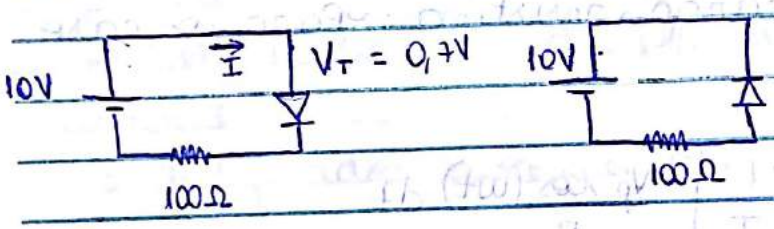
COMPORTAMENTO DO DIODO "REAL"

Usaremos o modelo simplificado do diodo real, mas que não é o ideal ainda. Para $V < 0$, não passa corrente e para $V > 0$, corrente só passa se $V > V_T$, e nesse caso há queda de V_T no diodo.

• Exemplo:

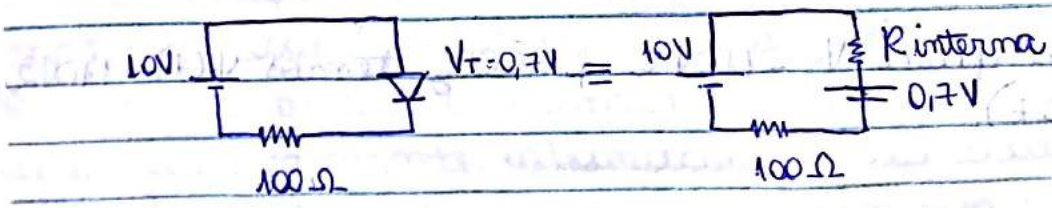


$$I = \frac{9,3}{100} = 0,093A = 93mA$$



$I = 0\ A$

Um modelo mais sofisticado poderia adotar uma resistência interna em polarização direta (apesar de na prática essa resistência ser relativamente menor quando comparada a dos demais componentes de um circuito).

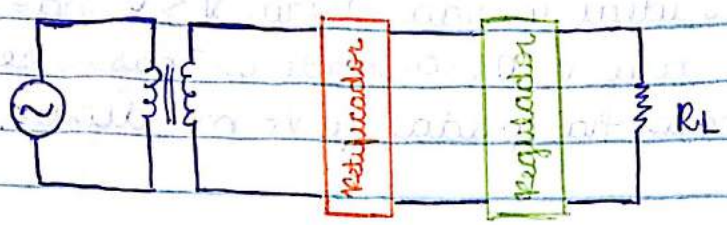


CIRCUITOS RETIFICADORES

Scanned by CamScanner

__/__/__

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



A tensão de linha é alternada e senoidal: $V(t) = V_p \cdot \cos(\omega t)$, onde V_p 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 senoidal:

$$P_m = \frac{V_{ef}^2}{R} = \frac{1}{T}\int_0^T \frac{V_p^2 \cos^2(\omega t)}{R}\, dt$$

$$\Rightarrow V_{ef}^2 = V_p^2 \left(\frac{1}{T}\int_0^T \cos^2(\omega t)\, dt\right)$$

$$\Rightarrow V_{ef}^2 = \frac{V_p^2}{2}$$

$$\Rightarrow V_{ef} = \frac{V_p}{\sqrt{2}}$$

• Exemplo: para $V_{ef} = 110V$ e $f = 60Hz$ temos $V(t) = 110\sqrt{2}\cos(2\pi 60 t)$.

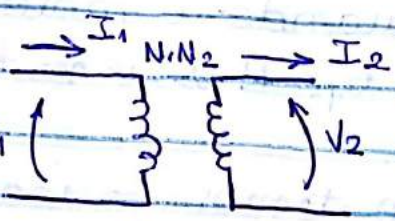
Existem diferentes tipos de circuitos retificadores e muitos deles utilizam diodos. Um trans-

Scanned by CamScanner

13

__/__/__

formador é um tipo de circuito retificador



$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

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

Existem três tipos básicos:

1) Retificador de meia-onda
2) Retificador de onda completa com derivação central
3) Retificador de onda completa em ponte

10/08/16 - ELETRÔNICA ANALÓGICA - AULA 4

RETIFICADORES

SEMICONDUTORES EM COMPONENTES ELETRÔNICOS

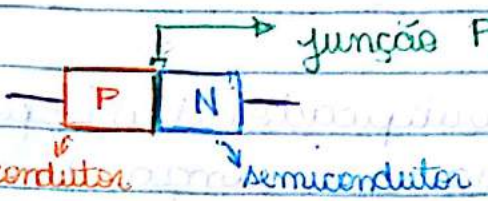
Componentes semicondutores são baseados em materiais com 4 elétrons na camada de valência. O material mais comumente utilizado é o silício, que relativamente abundante na natureza, porém há outros tipos como o germânio.

Os cristais dos materiais semicondutores

Scanned by CamScanner

são "dopados" com elétrons de outro material. A dopagem é do tipo P quando o material dopante é trivalente e é do tipo N se o material dopante é pentavalente.

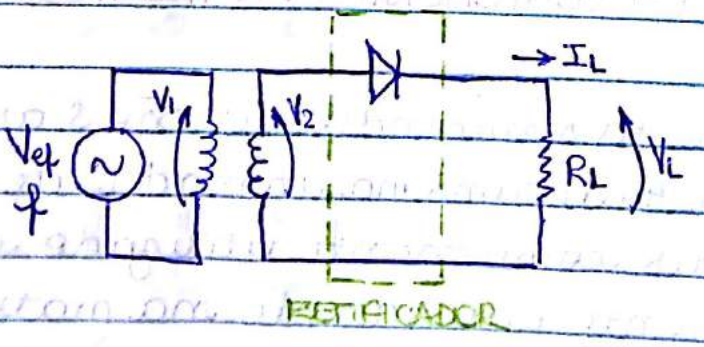
Em um diodo temos basicamente a seguinte estrutura:



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 região. A energia necessária para vencer esse campo elétrico é indicada por V_T.

RETIFICADOR DE MEIA-ONDA

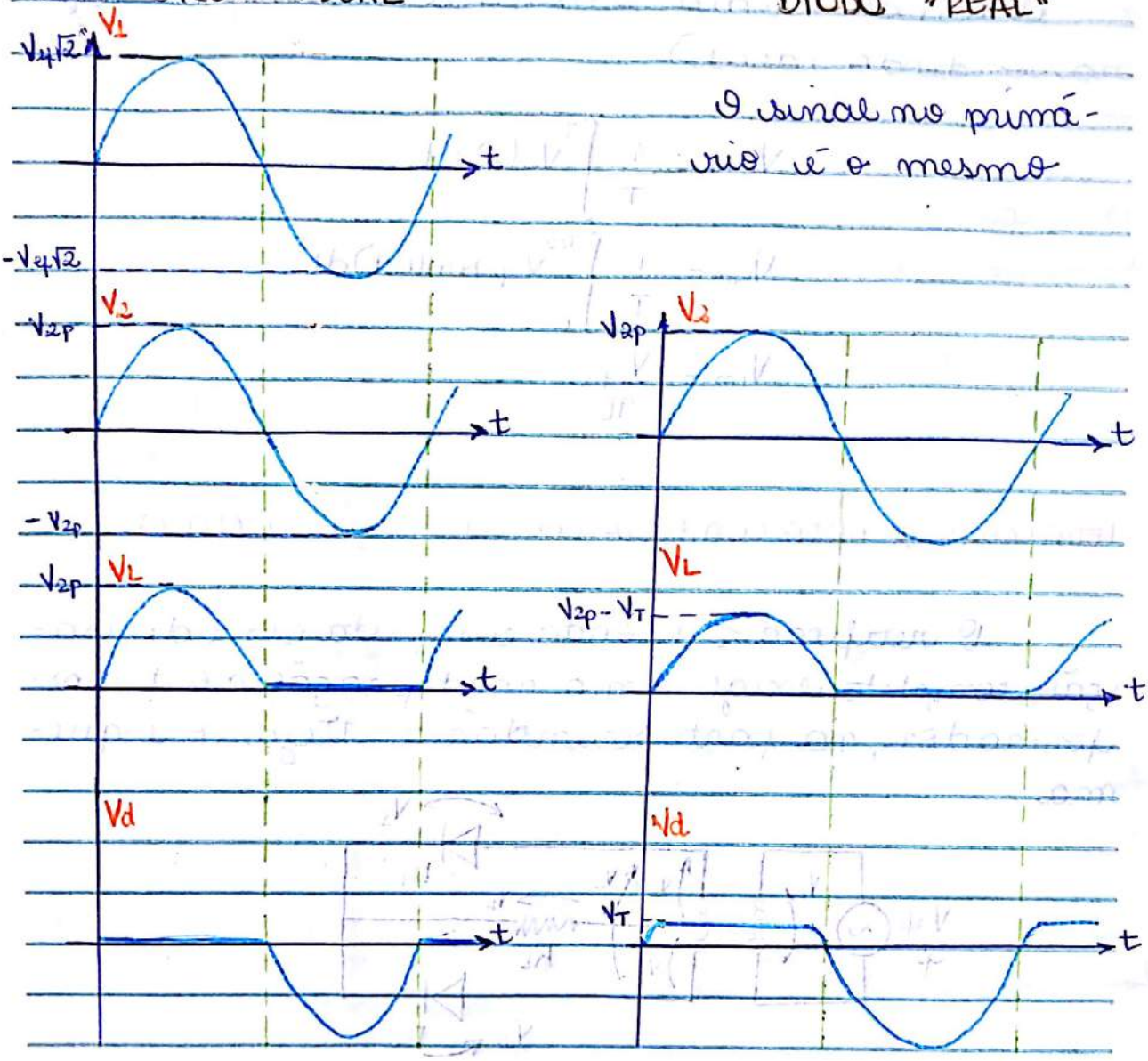
O retificador de meia-onda pode ser representado da seguinte forma



Vamos estudar como a tensão varia em

Scanned by CamScanner

cada trecho do circuito:



O sinal no primário é o mesmo

O diodo não conduz no semiciclo negativo, entregando corrente à carga apenas no semiciclo positivo (sempre no mesmo sentido).

A diferença entre o diodo ideal e o "real" é que no primeiro não há perda, enquanto

no seguinte há queda V_T no semiciclo positivo.

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

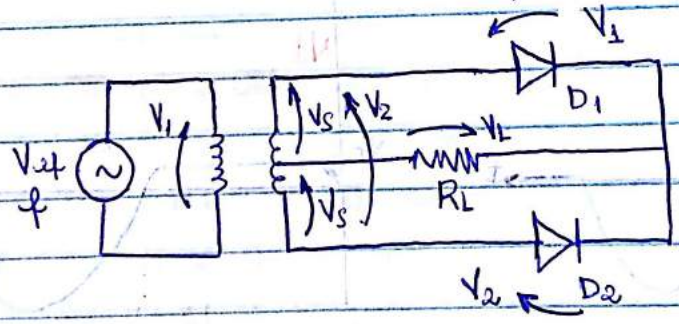
$$V_{Lm} = \frac{1}{T}\int_0^T V_L(t)\,dt$$

$$V_{Lm} = \frac{1}{T}\int_0^{T/2} V_{2p}\,\mathrm{sen}(\omega t)\,dt$$

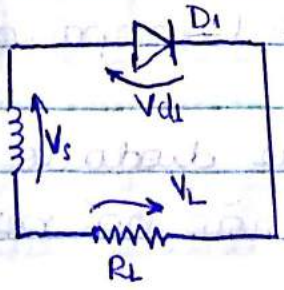
$$V_{Lm} = \frac{V_{2p}}{\pi}$$

RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA COM DERIVAÇÃO CENTRAL

O retificador de onda completa com derivação central exige uma modificação no transformador, na parte secundária. Veja o esquema:



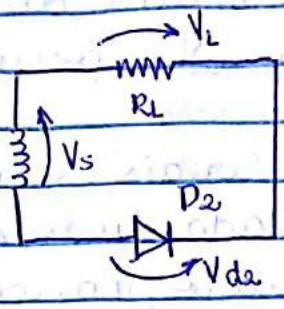
No semiciclo positivo D_1 conduz e D_2 corta a corrente. Portanto, $V_L = V_S$



Scanned by CamScanner

__/__/__

No semiciclo negativo D_1 corta e D_2 conduz:

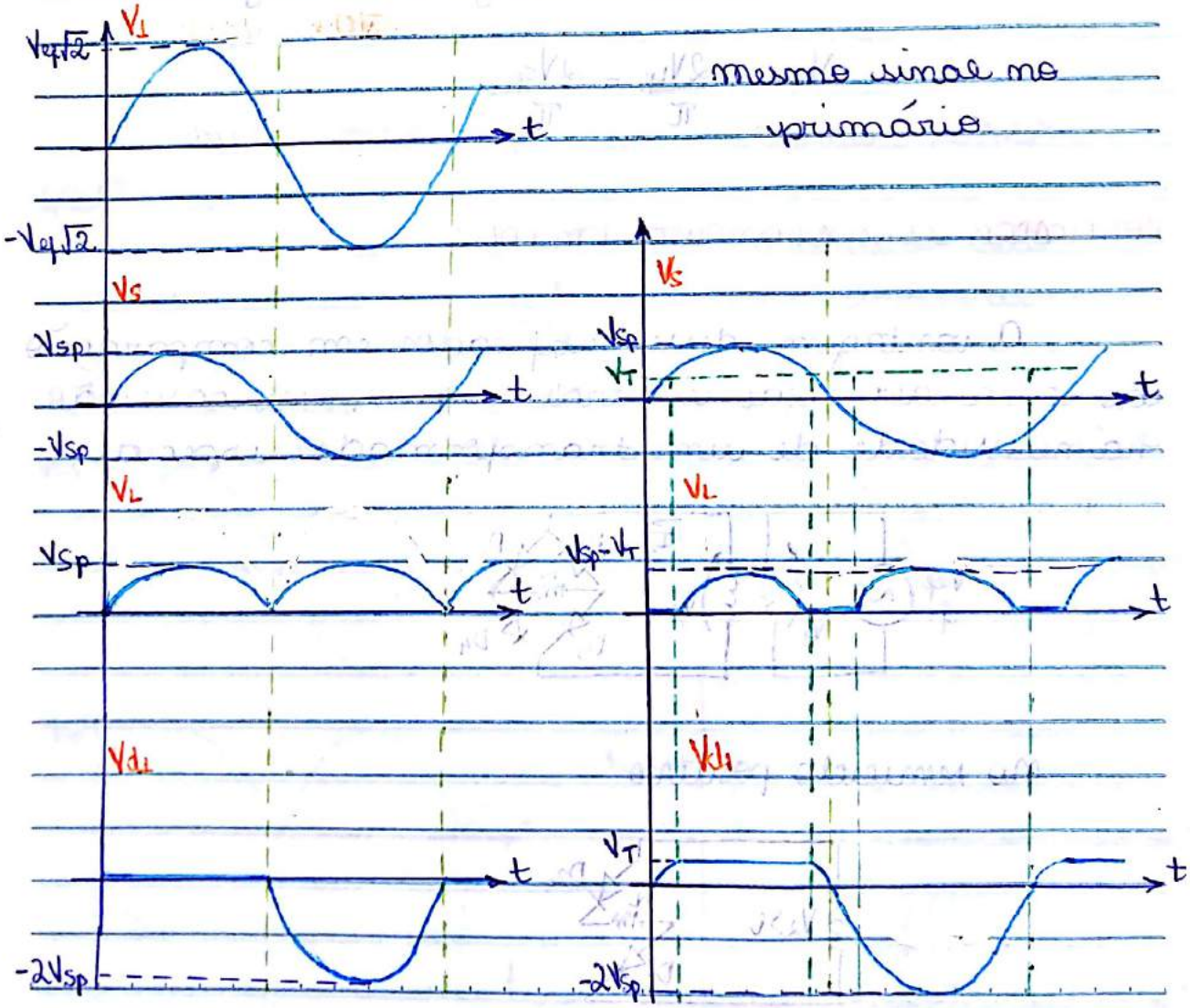


Nesse caso $V_L = -V_S$ (novamente considerando os diodos ideais). Vejamos a tensão em cada trecho:

DIODO IDEAL

DIODO "REAL"

Mesmo sinal no primário



Scanned by CamScanner

__/__/__

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

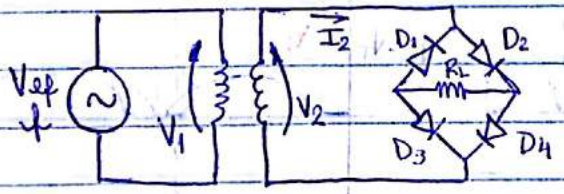
Se os diodos são "reais", com $V_T > 0$, temos quedas nos semiciclos. Cada diodo conduz em um semiciclo e corta no outro; na carga a corrente sempre passa no mesmo sentido (a tensão é sempre positiva nesse tipo de retificador, diferentemente do anterior).

A tensão média entregue à carga é:

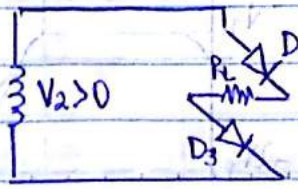
$$V_{Lm} = \frac{2V_{Lp}}{\pi} = \frac{2V_{sp}}{\pi}$$

RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA EM PONTE

A vantagem desse retificador em comparação ao com derivação central é que nesse caso não há necessidade de um transformador especial.



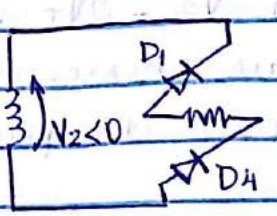
No semiciclo positivo



Scanned by CamScanner

__/__/__

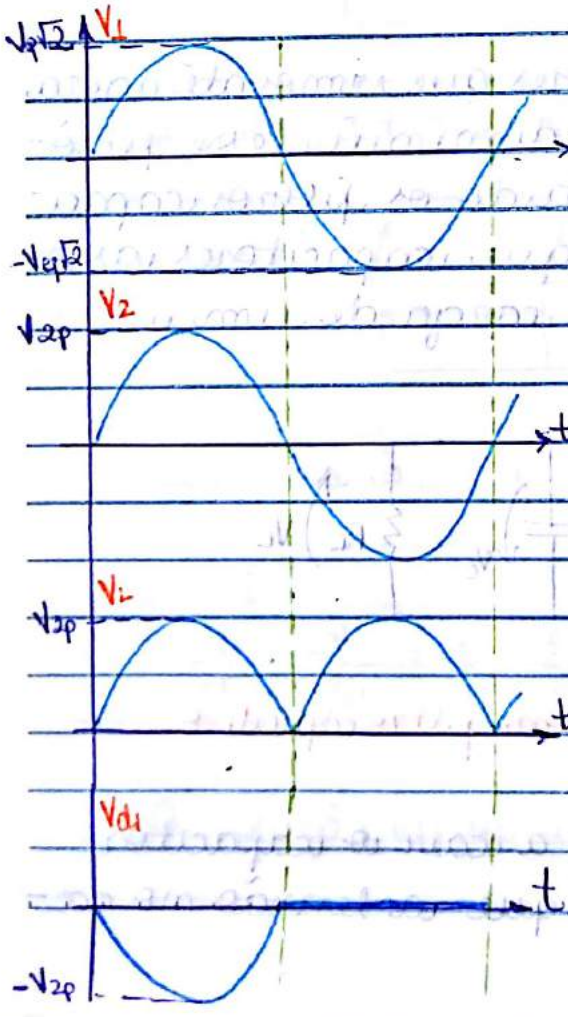
No semiciclo negativo:



Cada par de diodos conduz em um semiciclo e certa em outro, e na carga corrente sempre passa no mesmo sentido. Portanto:

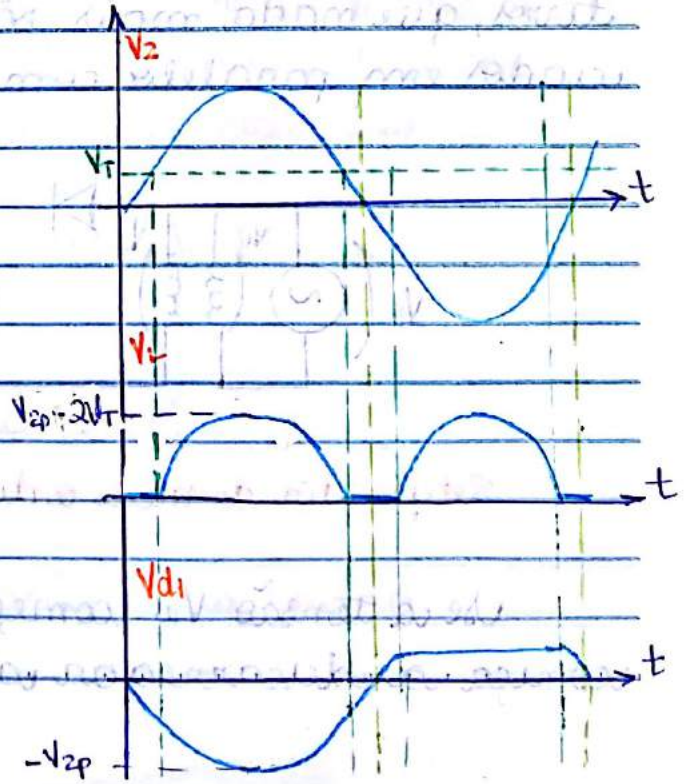
$$V_{Lm} = \frac{2V_{Lp}}{\pi}$$

DIODOS IDEAIS



DIODOS "REAIS"

mesma tensão no primário



Scanned by CamScanner

__/__/__

Repare que para considerarmos a tensão de pico da carga igual a $V_{2p} - 2V_T$ estamos admitindo que os diodos "reais" nesse caso são idênticos em termos da tensão de queda V_T.

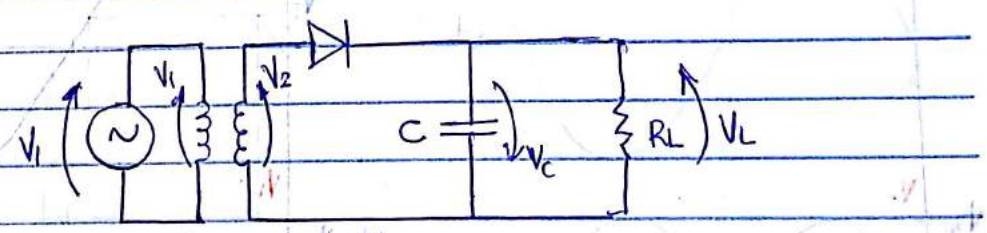
Observação: nos gráficos foram apresentadas as tensões apenas para D1, porém para os demais diodos o comportamento é análogo.

16/08/16 - ELETRÔNICA ANALÓGICA - AULA 5

RETIFICADORES E FILTROS

FILTROS CAPACITIVOS

As saídas dos retificadores que vimos até agora tem alta ondulação. Para diminuir esse fenômeno usa-se filtros, sobretudo os filtros capacitivos, que nada mais são que capacitores associados em paralelo com a carga.



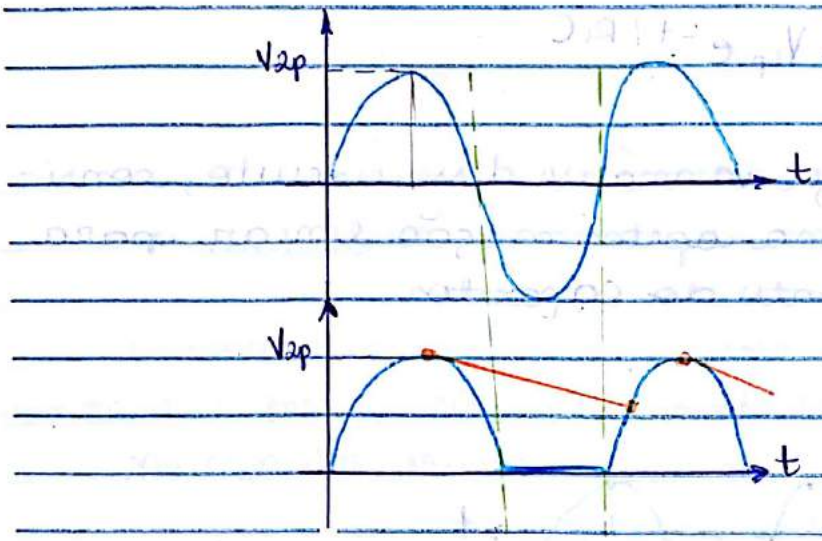
Retificador de meia onda com filtro capacitivo

Se a tensão V_2 começar a cair o capacitor começa a descarregar até que a tensão no ca-

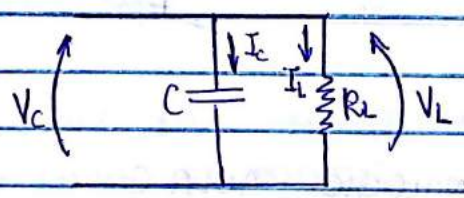
Scanned by CamScanner

__/__/__

capacitor seja igual a V_2. Em outras palavras: suponha que o circuito foi ligado no início de um semiciclo positivo, com o capacitor descarregado. O capacitor se carrega acompanhando a tensão do secundário, até seu pico.



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



Tensão $V_C = V_{Lp}$ no início do descarregamento

Vimos na análise desse circuito RC:

$$I_C = -I_L$$

$$C\frac{dV_C}{dt} = -\frac{V_C}{R_L} \Rightarrow R_L C\frac{dV_C}{dt} + V_C = 0$$

A solução dessa equação é da forma:

Scanned by CamScanner

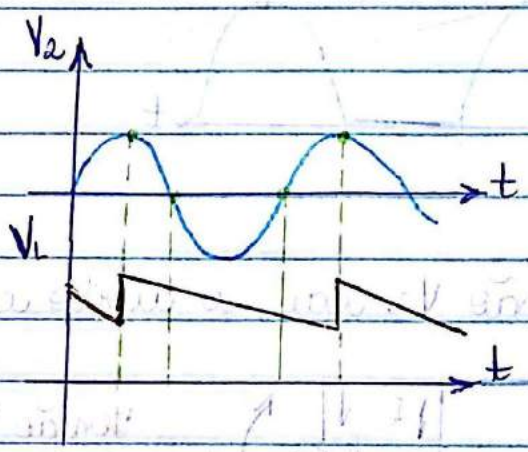
__/__/__

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

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

$$V_c(t) = V_{Lp} e^{-t/RC}$$

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



17/08/16 - ELETRÔNICA ANALÓGICA - AULA 6

RETIFICADORES E FILTROS

APROXIMAÇÃO LINEAR PARA O CAPACITOR

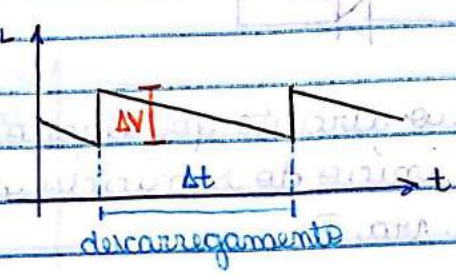
A aproximação linear para o comportamento do capacitor vale para capacitores "grandes", ou seja, que possuem capacitância elevada, armazenam mais carga e assim não vão descarre-

Scanned by CamScanner

__/__/__

gados com facilidade.

Nessa aproximação consideramos que o descarregamento ocorre lentamente de forma linear e o carregamento é instantâneo. Dessa forma, obtém-se o gráfico visto anteriormente



Chamaremos ΔV de "ondulação" de V_L e $\Delta t = 1/f$, sendo f a frequência de sinal da linha.

No capacitor, teremos:

$$C\frac{dV_c}{dt} = C\left(-\frac{\Delta V}{\Delta t}\right) = I_c = -I_L \Rightarrow CV\frac{1}{\Delta t} = I_L \Rightarrow \boxed{C\Delta V f = I_L}$$

ΔV: descarregamento; $\frac{1}{\Delta t}$: f

Isso significa que, na aproximação realizada, a corrente na carga permanece constante. Temos ainda que:

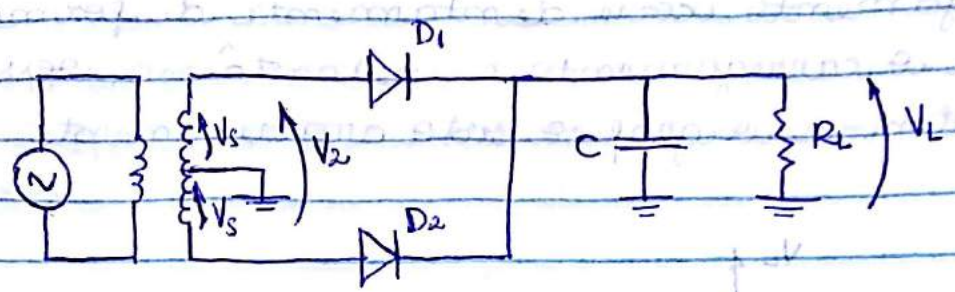
$$I_L = \frac{V_{L\,média}}{R_L} = \frac{V_{2p} - \Delta V/2}{R_L} \Rightarrow \boxed{C\Delta V f = \frac{V_{2p} - \Delta V/2}{R_L}}$$

RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA COM DERIVAÇÃO CENTRAL E FILTRO CAPACITIVO

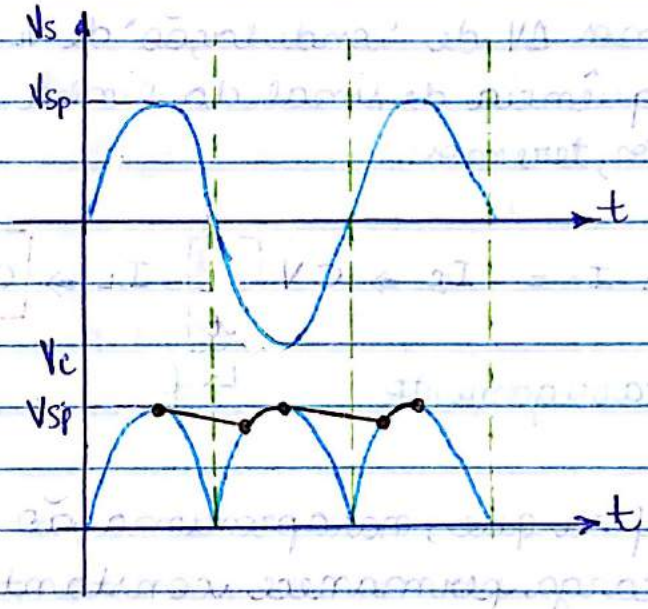
O circuito, nesse caso, analogamente ao anterior,

Scanned by CamScanner

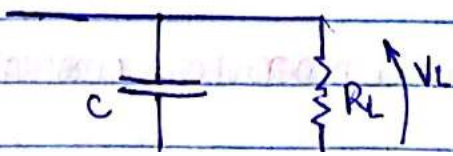
contará apenas com a adição de um capacitor em paralelo com a carga



Suponha que o circuito foi ligado ao capacitor descarregado e no início do semiciclo positivo. O capacitor se carrega via D1



Após a tensão de pico Vsp passar, o diodo D1 corta e teremos o capacitor se descarregando a partir de uma tensão Vsp



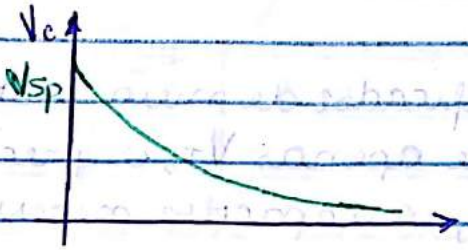
Scanned by CamScanner

__/__/__

Equacionando novamente:

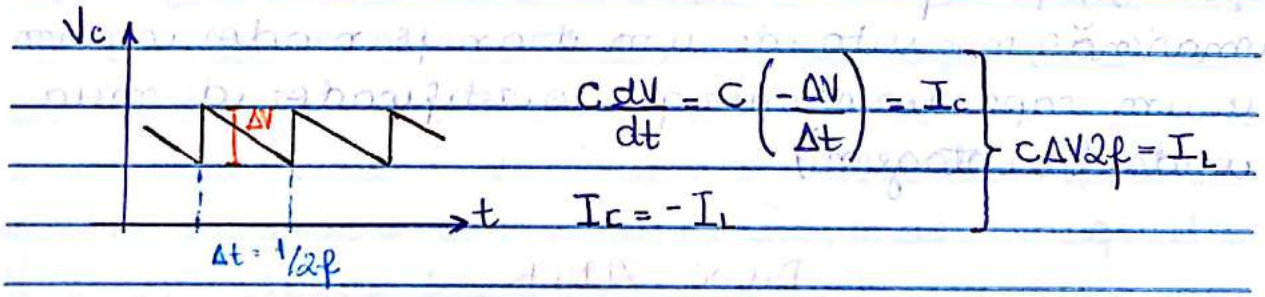
$$C\frac{dV_L}{dt} = -\frac{V_L}{R_L} \Rightarrow \frac{dV_L}{dt} + \frac{1}{R_L C} V_L = 0$$

Temos, então: $V_C(t) = V_{sp}\, e^{-t/RC}$

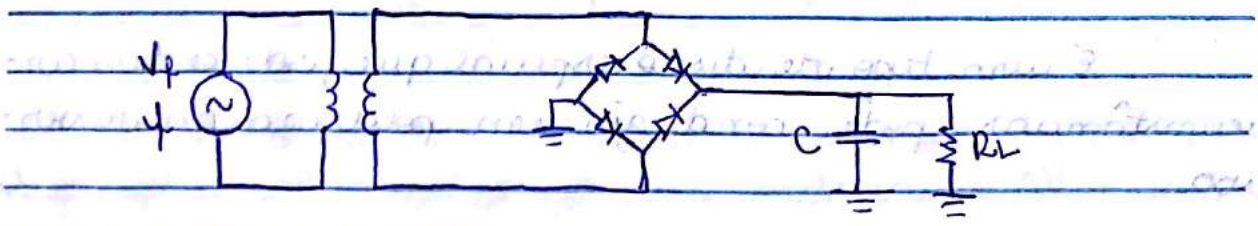


Quando a tensão no secundário forçar condução em Dz, o capacitor se carrega novamente e o processo se repete a cada semiciclo.

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



RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA EM PONTE E FILTRO CAPACITIVO



Scanned by CamScanner

__/__/__

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

Como o comportamento de V_L (no modelo de diodo ideal) é homólogo ao do retificador de onda completa com derivação central, a análise do circuito é idêntica à anterior.

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

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

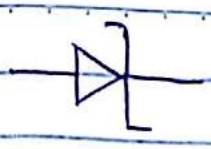
Observação: o retificador de onda completa em ponte, impõe queda de $2V_T$ (uma desvantagem), entretanto, necessita de um transformador comum e um capacitor menor que o retificador de meia onda: (vantagem)

DIODOS ZENER

O DIODO ZENER

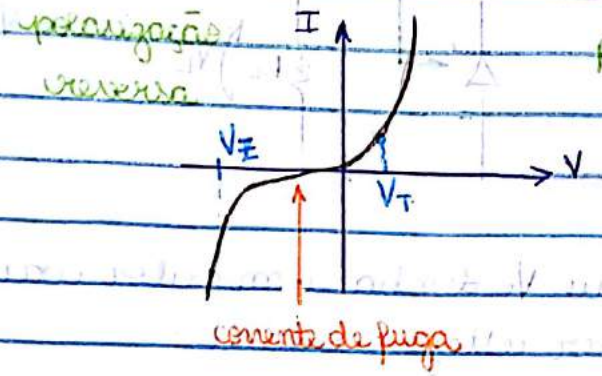
É um tipo de diodo especial que, sob certas circunstâncias, pode conduzir em polarização reversa.

Scanned by CamScanner

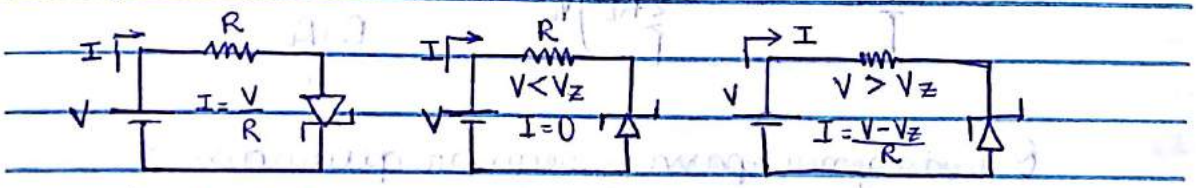


Símbolo para o diodo zener

Comportamento (real) do diodo zener:

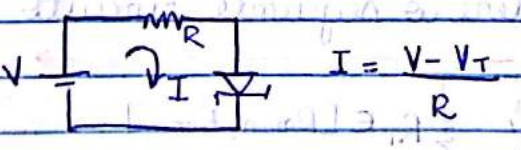


Primeiramente vamos considerar o diodo zener ideal:



polarização direta (em condução) | polarização reversa (cortado) | polarização reversa (em regulação)

O diodo zener "real" tem o mesmo comportamento em corte e em regulação, mas tem queda V_T em condução. Isto é:



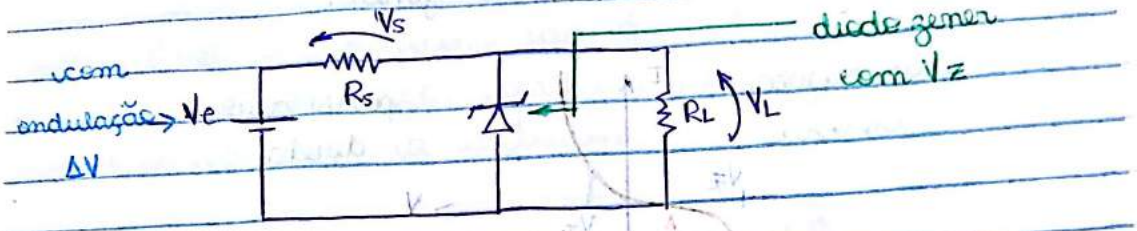
O diodo zener é usado para regular tensão, ou seja, para receber tensão com ondulação ΔV e entregar tensão constante.

Scanned by CamScanner

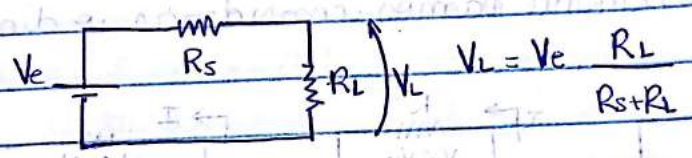
__/__/__

REGULADOR SIMPLES

Considere o circuito abaixo:



Suponha que Ve tenha um valor baixo tal que o diodo zener esteja cortado:



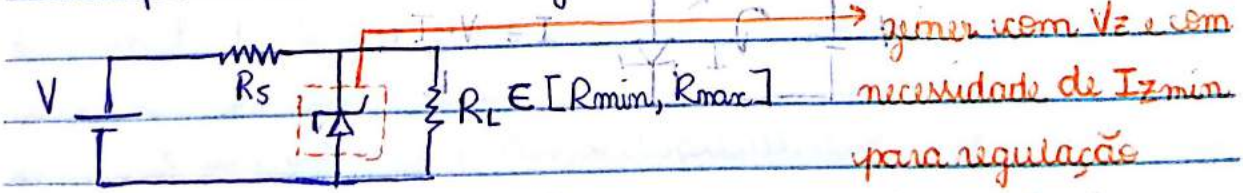
$$V_L = V_e \frac{R_L}{R_S + R_L}$$

O diodo zener passa a regular quando:

$$V_L > V_z \Rightarrow \frac{V_e R_L}{R_L + R_S} > V_z \Rightarrow V_e > V_z \frac{(R_S + R_L)}{R_L}$$

Nesse caso temos tensão Vz na carga.

• Exemplo: considere o seguinte circuito:



Qual a menor tensão que ainda garante regulação?

Scanned by CamScanner

__/__/__

Resolução:

$$I_z = \frac{V - V_z}{R_S} - \frac{V_z}{R_L} \geq I_{zmín} \Rightarrow$$

$$\frac{V - V_z}{R_S} \geq \frac{V_z}{R_L} + I_{zmín} \Rightarrow V \geq V_z + R_S\left(\frac{V_z}{R_L} + I_{zmín}\right)$$

$$\therefore V \geq V_z + \frac{R_S V_z}{R_L} + R_S I_{zmín}$$

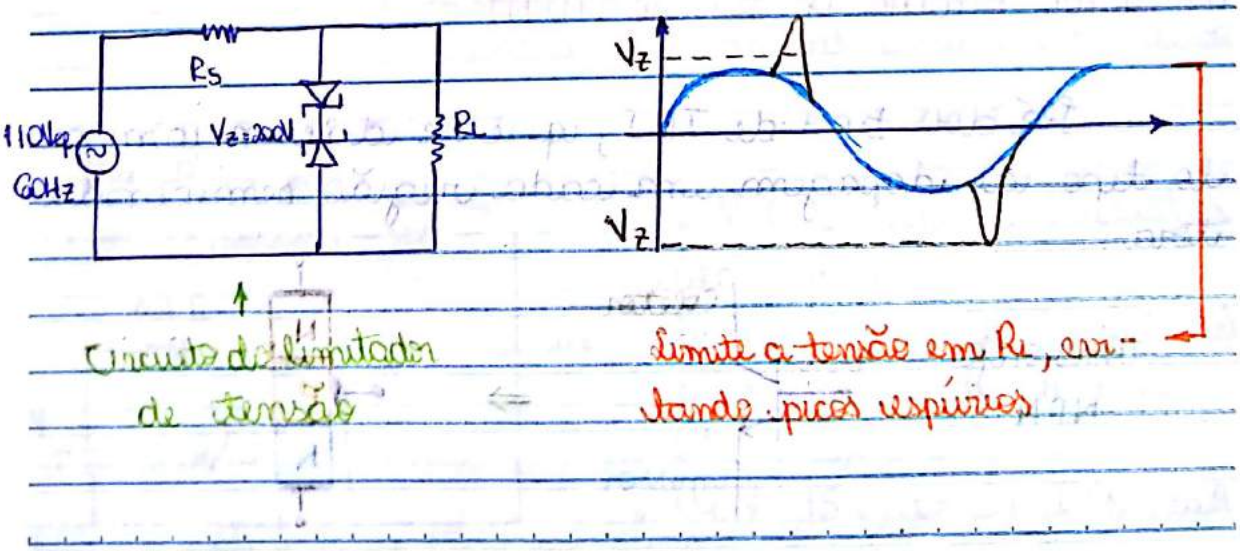
A menor tensão é aquela que garante regulação. Então temos que: $V_{min} = V_z + \frac{R_S V_z}{R_L} + R_S I_{zmín}$

23/08/16 - ELETRÔNICA ANALÓGICA - AULA 7

DIODOS ZENER

LIMITADOR DE TENSÃO

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



Scanned by CamScanner

__/__/__

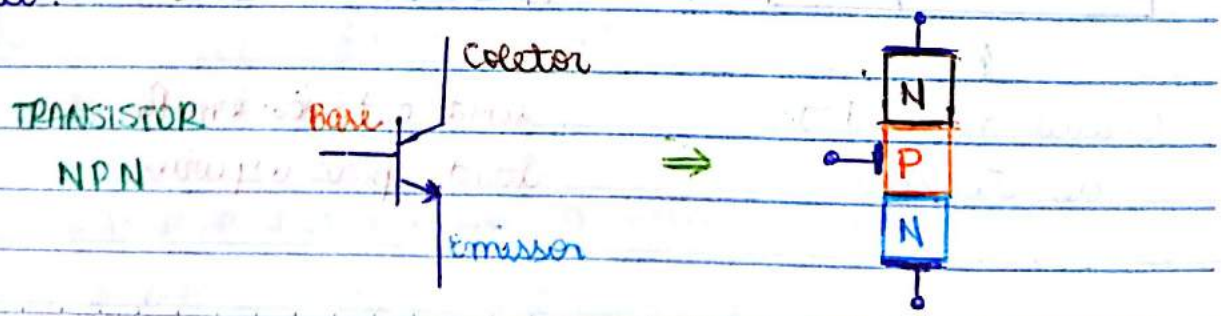
TRANSISTOR BIPOLAR

Após o estudo do diodo, que é o principal dispositivo semicondutor de dois terminais, vamos agora concentrar nossa atenção nos dispositivos semicondutores de três terminais. Os dispositivos de três terminais podem ter várias aplicações: desde a amplificação de sinais até o projeto de circuitos lógicos digitais e de memória. O princípio básico envolvido nesses dispositivos é o uso de uma tensão entre dois terminais para controlar o fluxo de corrente no terceiro terminal.

Existem dois tipos principais de dispositivos de três terminais: o transistor de efeito de campo metal-óxido-semicondutor (MOSFET) e o transistor bipolar de junção (TBJ). A princípio nos dedicaremos aos transistores do tipo TBJ, sobretudo os de junção NPN.

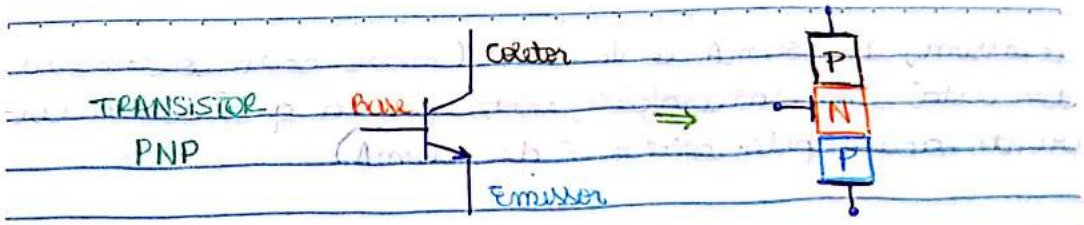
TRANSISTOR BIPOLAR DE JUNÇÃO (NPN)

Há dois tipos de TBJ, que se diferenciam pelo tipo de dopagem em cada região semicondutora:

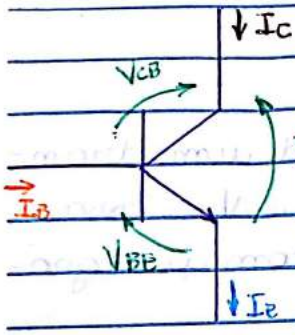


Scanned by CamScanner

__/__/__



Vamos nos concentrar no transistor bipolar do tipo NPN.

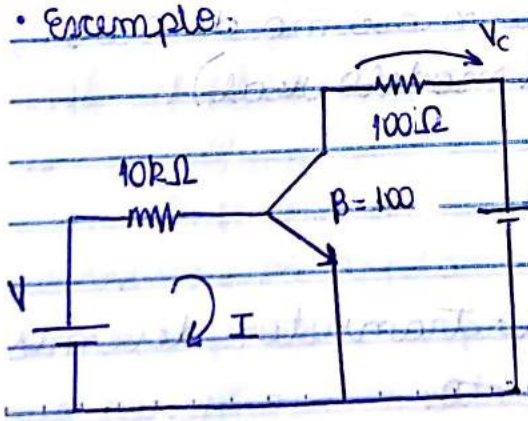


Pela lei de Kirchoff nós temos que: $I_E = I_C + I_B$ e $V_{CE} = V_{BE} + V_{CB}$. A junção base-emissor funciona como um diodo, portanto a corrente só sai pelo emissor e nunca pela base.

O transistor pode estar em:

1) Corte: quando $I_B = I_C = 0$
2) Modo ativo: nesse caso, $I_C = \beta \cdot I_B$, onde β é uma corrente associada ao transistor
3) Saturação: é a situação em que $I_C < \beta I_B$, pois o transistor não consegue se manter no modo ativo

• Exemplo:



Se $V = 0$, então o transistor está em corte.
Se $V = 1V$, então $I = 0,1mA$ e assim $I_C = 10mA$ e $V_C = 1V$.
Se $V = 15V$, então $I = 1,5mA$

Scanned by CamScanner

__/__/__

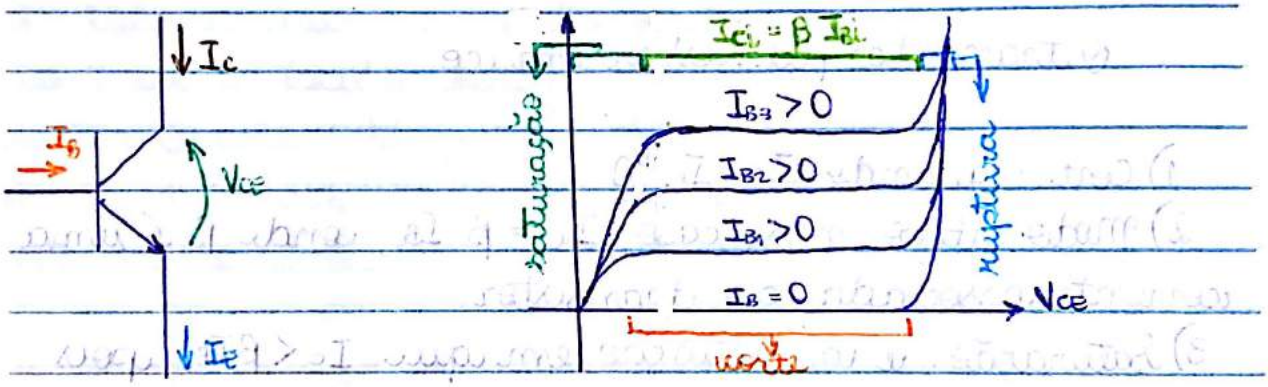
e assim, $I_c = 150mA$ e $V_c = 15V$ (nesse caso o transistor está em saturação, visto que a máxima corrente aceita pelo coletor é de 100mA)

24/08/16 - ELETRÔNICA ANALÓGICA - AULA 8

TRANSISTOR BIPOLAR

COMPORTAMENTO DO TRANSISTOR

Na folha de dados (datasheet) de um transistor serão fornecidos dois valores I_c e V_{ce}. Essas grandezas são mostradas de acordo com um gráfico conforme abaixo:



A região de saturação mostra que conforme o transistor vai chegando ao máximo de corte, I_c diminui igradualmente (modelo real)

MODELO IDEAL DO TRANSISTOR

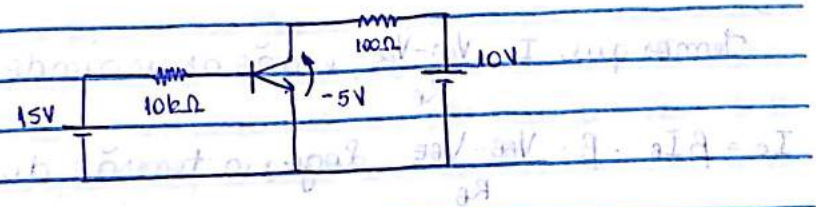
Para o modulo ideal do transistor devemos adotar o seguinte comportamento:

Scanned by CamScanner

__/__/__

1) Corte: $I_B = 0$ e $I_C = 0$
2) Modo ativo: $I_B > 0$, $I_C = \beta I_B$ e $V_{CE} = 0V$
3) Saturação: $V_{CE} = 0V$

Verificando o último caso do exemplo anterior, vemos que $V_{CE} = -5V$ e assim confirmamos novamente que o transistor está em saturação, de acordo com o modelo ideal.



MODELO "REAL" DO TRANSISTOR

Para esse modelo será adotado o seguinte comportamento:

1) Corte: $I_B = 0$, $I_C = 0$
2) Modo ativo: $I_B > 0$, $I_C = \beta I_B$ e $V_{BE} = V_T$ (parâmetro)
3) Saturação: $I_B > 0$, $I_C < \beta I_B$ e $V_{CE} = V_{CE\,sat}$ (parâmetro)

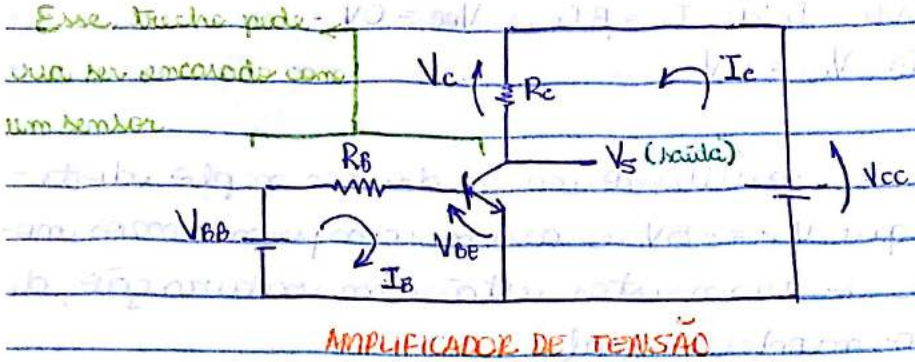
CIRCUITOS COM TRANSISTORES

AMPLIFICADOR TRANSISTORIZADO

O primeiro circuito que estudaremos com o transistor bipolar é o amplificador de tensão, cujo esquema é apresentado a seguir. Estamos interessados em amplificar o sinal de saída do

Scanned by CamScanner

transistor



AMPLIFICADOR DE TENSÃO

Temos que $I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$, então assumindo modo ativo:

$I_c = \beta I_B = \beta \cdot \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$ Logo, a tensão de saída V_s é:

$$V_s = V_{cc} - V_c = V_{cc} - R_c I_c \Rightarrow V_s = V_{cc} - \frac{R_c \beta}{R_B}(V_{BB} - V_{BE})$$

Para uma entrada $V_{BB} + \Delta$, temos:

$$V_s' = V_{cc} - \frac{R_c \beta}{R_B}(V_{BB} + \Delta - V_{BE})$$

A variação na saída é $\Delta V_s = V_s' - V_s$, ou seja

$$\Delta V_s = V_s' - V_s = V_{cc} - \frac{R_c \beta}{R_B}(V_{BB} + \Delta - V_{BE}) - \left[V_{cc} - \frac{R_c \beta}{R_B}(V_{BB} - V_{BE})\right]$$

$$\Rightarrow \boxed{\Delta V_s = -\frac{R_c \beta}{R_B} \cdot \Delta}$$

Dessa forma se pode definir o ganho AC de um

__/__/__

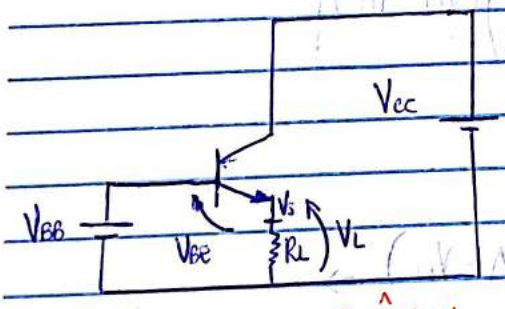
circuito amplificador como:

$$G_{AC} = \frac{\Delta V_s}{\Delta} \quad \begin{matrix} \leftarrow \text{variação na saída} \\ \leftarrow \text{variação na entrada} \end{matrix}$$

Para o circuito do amplificador de tensão o ganho AC é dado por: $G_{AC} = \beta R_C / R_B$

O valor de β varia com a temperatura e o fabricante não é capaz de uniformizá-lo (varia muito de componente para componente). O fato desse circuito depender diretamente de β não o torna um bom projeto, dessa maneira buscam-se alternativas para ele.

Vamos considerar um circuito distinto, que chamaremos de amplificador de potência



$V_L = V_{BB} - V_{BE}$

$V_L' = V_{BB} + \Delta - V_{BE}$

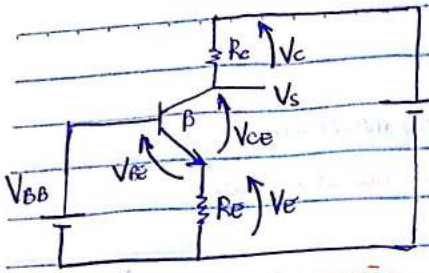
$G_{AC} = \frac{\Delta V_L}{\Delta V_{BB}} = \frac{\Delta}{\Delta} = 1$

AMPLIFICADOR DE POTÊNCIA

Esse circuito não pode ser considerado como um amplificador de tensão pois seu ganho AC é igual a 1. Ele é um amplificador de potência pois a corrente exigida na entrada é muito menor que a corrente entregue à carga.

Para obter um amplificador de tensão que independe do valor de β, considere:

Scanned by CamScanner



AMPLIFICADOR DE TENSÃO

$V_E = V_{BB} - V_{BE} \Rightarrow I_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_E}$

$V_S = V_{CC} - V_C \Rightarrow V_S = V_{CC} - R_C I_C$

$I_E = I_C + I_B \Rightarrow I_E = I_B \beta + I_B$

(assumindo modo ativo)

Temos então que:

$$I_E = I_B\beta + I_B = I_B(\beta+1) = (\beta+1)\frac{I_C}{\beta} = \frac{\beta+1}{\beta} I_C \Rightarrow$$

$$V_S = V_{CC} - R_C\left(\frac{\beta}{\beta+1}\right) I_E = V_{CC} - R_C\left(\frac{\beta}{\beta+1}\right)\frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_E}$$

Portanto,

$$\boxed{V_S = V_{CC} - \frac{R_C}{R_E}\left(\frac{\beta}{\beta+1}\right)(V_{BB} - V_{BE})}$$

Para $V_{BB} + \Delta$:

$$V_S' = V_{CC} - \frac{R_C}{R_E}\left(\frac{\beta}{\beta+1}\right)(V_{BB} + \Delta - V_{BE}) \Rightarrow$$

$$\Delta V_S = -\frac{R_C}{R_E} \cdot \frac{\beta}{\beta+1} \cdot \Delta \Rightarrow \boxed{G_{AC} = \frac{R_C}{R_E}\frac{\beta}{\beta+1}}$$

Se β é muito grande então não interfere substancialmente em G_{AC}, tal que $G_{AC} \approx \frac{R_C}{R_E}$.

Scanned by CamScanner

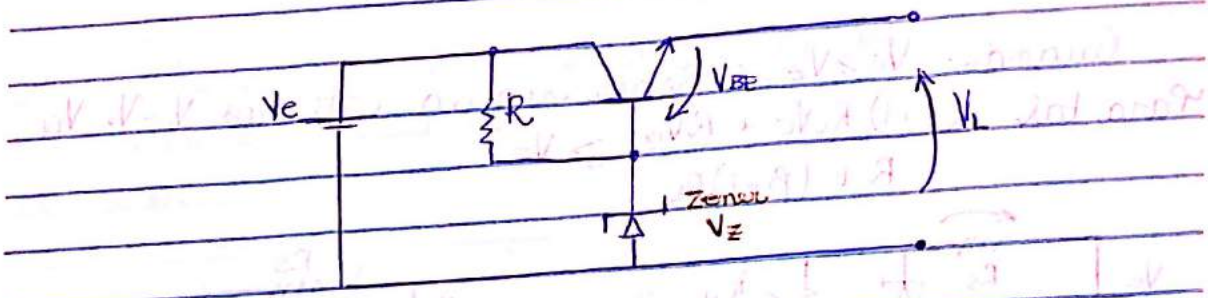
__/__/__

30108116 - ELETRÔNICA ANALÓGICA - AULA 9

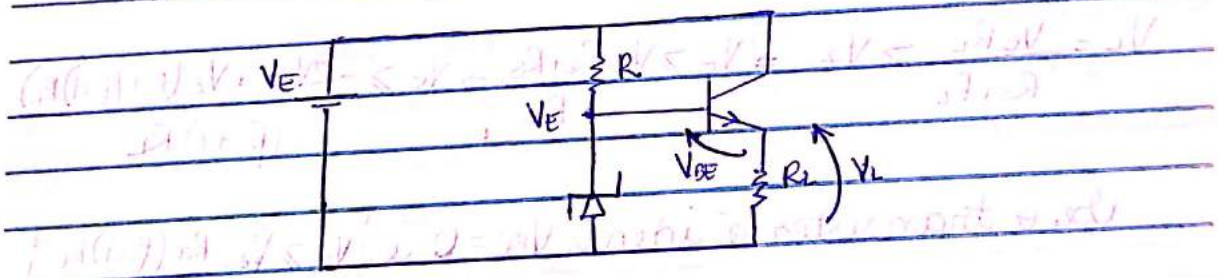
CIRCUITOS COM TRANSISTORES

REGULADOR TRANSISTORIZADO

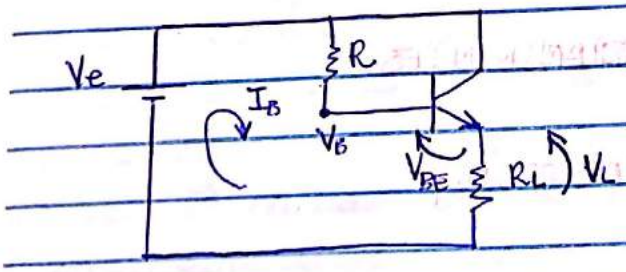
O circuito de um regulador transistorizado é mostrado a seguir:



Esse circuito pode ser redesenhado como:



Caso Ve seja baixa e não leve o zener à regulação, temos:



$$Ve = V_{BE} + R_1 I_B + R_L I_E$$

Desenvolvendo a expressão:

Scanned by CamScanner

$$V_e = V_{BE} + RI_B + R_L I_E$$

$$\Rightarrow V_e - V_{BE} = RI_B + (\beta+1) I_B R_L$$

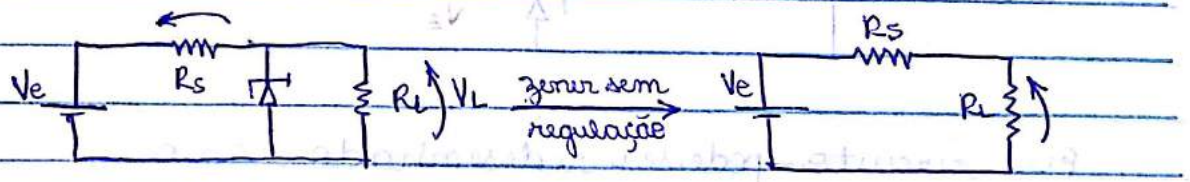
$$\Rightarrow I_B = \frac{V_e - V_{BE}}{R + (\beta+1) R_L} \Rightarrow V_L = R_L \frac{(\beta+1)(V_e - V_{BE})}{R + (\beta+1) R_L}$$

$$\Rightarrow V_B = V_L + V_{BE} = R_L \frac{(\beta+1)(V_e - V_{BE})}{R + (\beta+1) R_L} + V_{BE}$$

$$\Rightarrow V_B = \frac{(\beta+1) R_L V_e + R V_{BE}}{R + (\beta+1) R_L}$$

Quando $V_B \geq V_z$, o Zener regula e temos $V_L = V_z - V_{BE}$.

Para tal $\frac{(\beta+1) R_L V_E + R V_{BE}}{R + (\beta+1) R_L} \geq V_z$



$$V_L = \frac{V_e R_L}{R_S + R_L} \geq V_z \Rightarrow V_e \geq V_z \frac{R_L + R_S}{R_S} \Rightarrow V_e \geq \frac{-R V_{BE} + V_z (R + (\beta+1) R_L)}{(\beta+1) R_L}$$

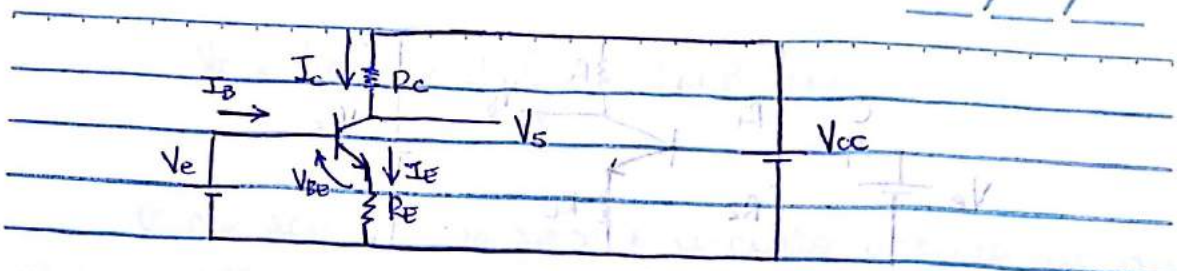
Se o transistor é ideal, $V_{BE} = 0$ e $V_e \geq V_z \cdot \frac{R + (\beta+1) R_L}{(\beta+1) R_L}$

31/08/16 - ELETRÔNICA ANALÓGICA - AULA 10

CIRCUITOS COM TRANSISTORES

AMPLIFICADOR DE TENSÃO INDEPENDENTE DE β

Scanned by CamScanner

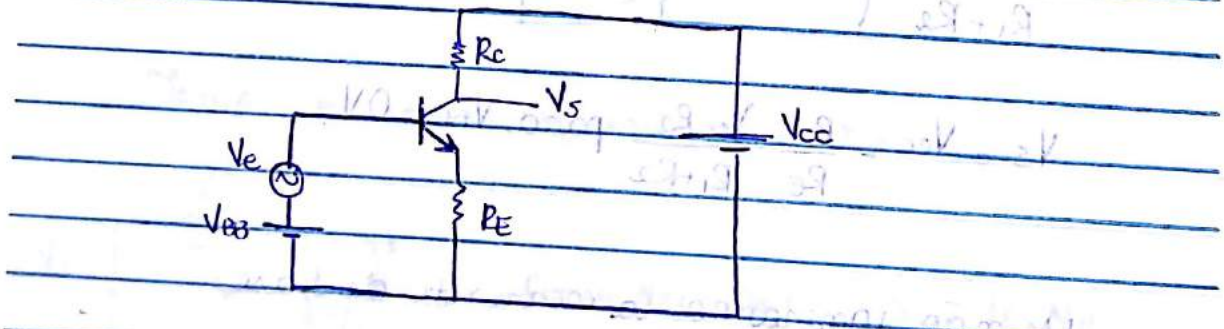


$$V_S = V_{CC} - R_C \frac{\beta}{\beta+1} \frac{V_e - V_{BE}}{R_E} \Rightarrow G_{AC} = \left| \frac{R_C \left(\frac{\beta}{\beta+1}\right) \Delta V_e / R_E}{\Delta V_e} \right| = \frac{\beta}{\beta+1} \frac{R_C}{R_E}$$

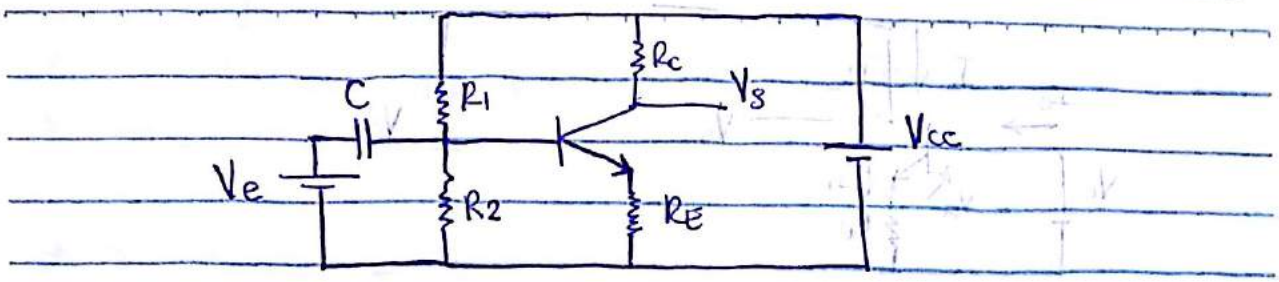
Se o valor de β é muito alto, $G_{AC} \cong R_C/R_E$. Para β muito alto, a corrente de base é praticamente zero.

$$V_S = V_{CC} - \frac{R_C (V_e - V_{BE})}{R_E} \quad \text{e} \quad G_{AC} = \frac{R_C}{R_E}$$

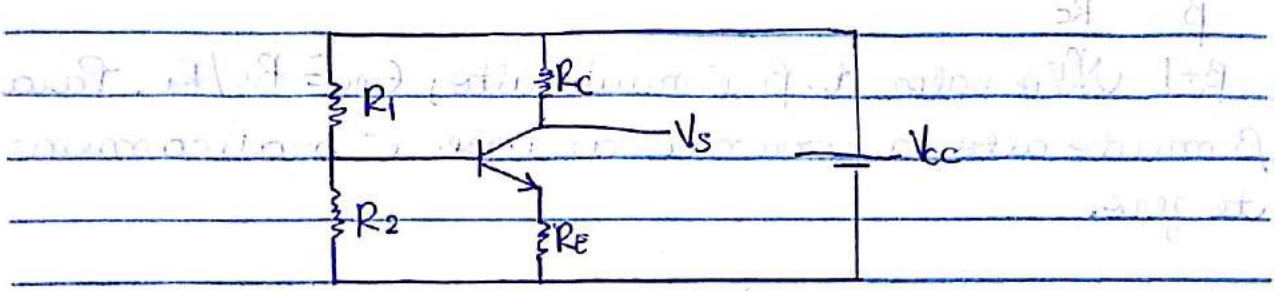
Esse amplificador tem um problema: se V_e não é suficiente para polarizar diretamente a junção base-emissor, o transistor corta. Uma solução para esse problema:



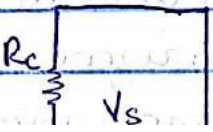
Para isso, temos que usar uma fonte adicional em série com V_e. Em geral, porém, a seguinte configuração é preferida (inclusive é a que será realizada em laboratório).



Vamos considerar inicialmente apenas R1 e R2 na entrada:



Suponha que β é muito alto e podemos ignorar a corrente de base:

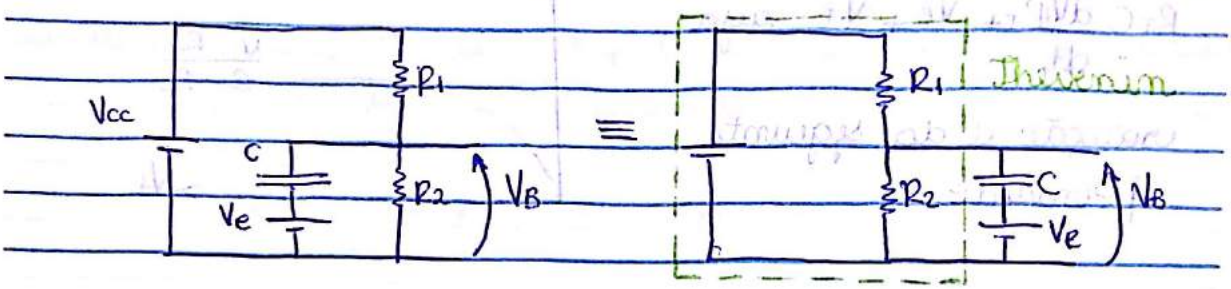


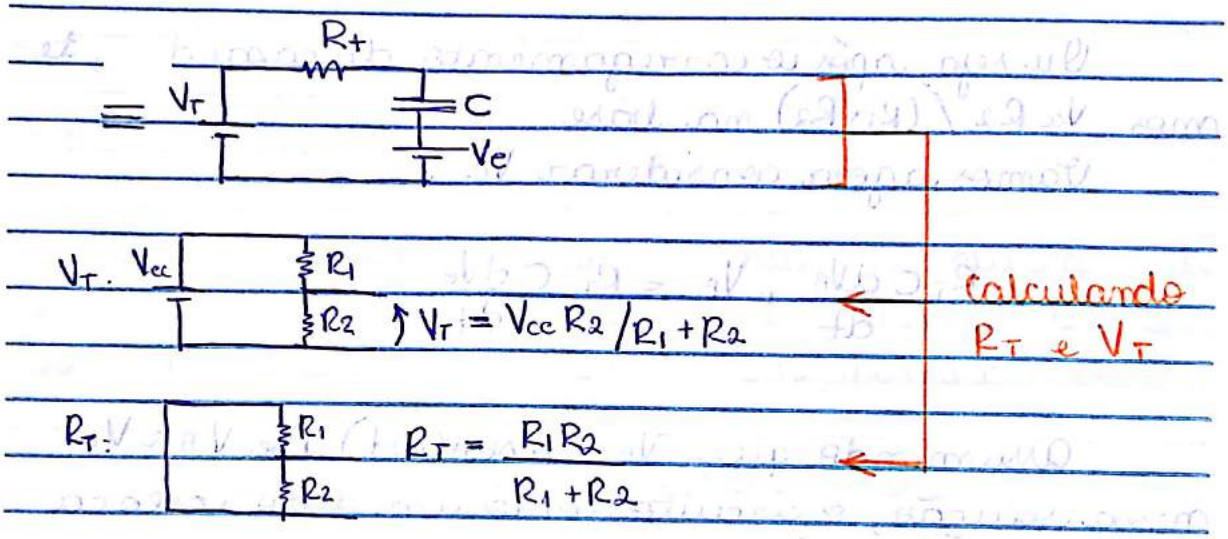
Scanned by CamScanner

__/__/__

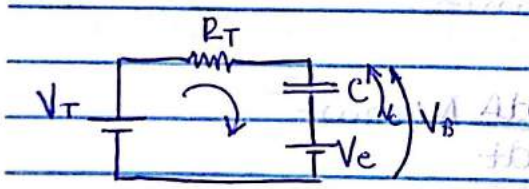
$$V_T = V_{BE} + I_B \frac{R_1 R_2}{R_1+R_2} + I_B(\beta+1)R_E$$

Vamos agora considerar o circuito inteiro ainda assumindo que I_B é desprezível:





Temos por fim o seguinte circuito:



Como $V_B = V_c + V_e \Rightarrow V_c = V_B - V_e$

$$\frac{C\,dV_c}{dt} = \frac{V_T - V_e - V_c}{R_T} \Rightarrow R_T C \frac{dV_c}{dt} + V_c = V_T - V_e \Rightarrow$$

$$R_T C \frac{dV_B}{dt} - R_T C \frac{dV_e}{dt} + V_B - V_e = V_T - V_e \Rightarrow$$

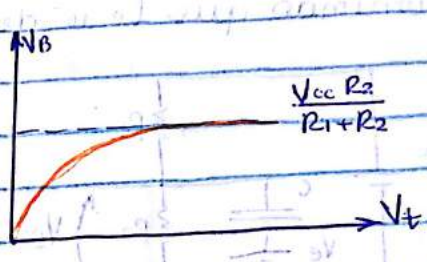
Scanned by CamScanner

__/__/__

$$R_T C \frac{dV_B}{dt} + V_B = V_T + R_T C \frac{dV_e}{dt}$$

Vamos considerar primeiro V_T:

$R_T C \frac{dV_B}{dt} + V_B = V_T$, cuja solução é da forma ao lado



Ou seja, após o carregamento do capacitor, temos $V_{cc} R_2 / (R_1 + R_2)$ na base.

Vamos agora considerar V_e:

$$R_T C \frac{dV_B}{dt} + V_B = R_T C \frac{dV_e}{dt}$$

Assumindo que $V_e = A \operatorname{sen}(\omega t)$. Use $V_B \approx V_e$ nessa solução, o circuito como um todo coloca $V_B = V_{cc} R_2 / (R_1 + R_2) + V_e$ na base.

Falta verificar que realmente $V_B = V_e$ para entrada senoidal. Temos

$$R_T C \frac{dV_B}{dt} + V_B = R_T C \frac{d}{dt} A \operatorname{sen} \omega t$$

A forma da solução é $V_B(t) = \alpha \operatorname{sen}(\omega t) + \beta \cos(\omega t)$. substituindo na equação.

Scanned by CamScanner

$$\Rightarrow R_T C(\alpha\omega\cos\omega t - \beta\omega\operatorname{sen}\omega t) + \alpha\operatorname{sen}\omega t + \beta\cos\omega t = AR_T C\omega\cos\omega t$$

$$\Rightarrow \begin{cases} R_T C\alpha\omega + \beta = AR_T C\omega \\ -R_T C\beta\omega + \alpha = 0 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \alpha = \frac{A(R_T C\omega)^2}{1+(R_T C\omega)^2}, \quad \beta = \frac{AR_T C\omega}{1+(R_T C\omega)^2}$$

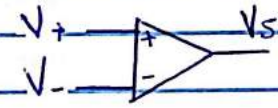
$$\Rightarrow V_B(t) = \frac{A(R_T C\omega)^{2\to 1}}{1+(R_T C\omega)^2}\operatorname{sen}\omega t + \frac{A(R_T C\omega)^{\to 0}}{1+(R_T C\omega)^2}\cos(\omega t) \approx A\operatorname{sen}(\omega t)$$

13/09/16 - ELETRÔNICA ANALÓGICA - AULA 11

CIRCUITOS COM TRANSISTORES

AMPLIFICADOR OPERACIONAL

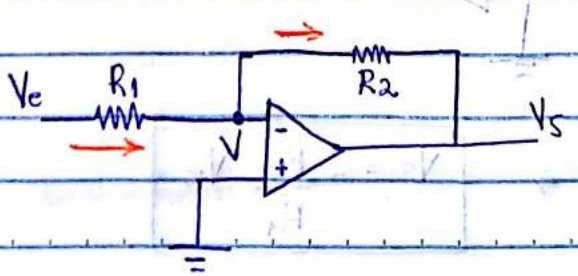
Um amplificador operacional amplifica a diferença das entradas, tal que: $V_S = A(V_+ - V_-)$. O ganho A é muito alto, da ordem de 10^6, por exemplo.



SÍMBOLO DO AMPLIFICADOR OPERACIONAL

Nas entradas não entra corrente (resistência de entrada é muito alta). Já na saída a resistência é baixa.

CIRCUITO AMPLIFICADOR INVERSOR



Scanned by CamScanner

__/__/__

No circuito do amplificador inversor devemos considerar que $i_- = 0$, assim:

$$\frac{V_S - V}{R} = \frac{V - V_e}{R_1} \Rightarrow V_S = V + \frac{R_2}{R_1}(V - V_2) \Rightarrow V_S = \frac{R_1 V + R_2 V}{R_1} - \frac{R_2}{R_1} V_e$$

Como $V_S = A(0 - V) = -AV$, temos $V = -V_S / A$:

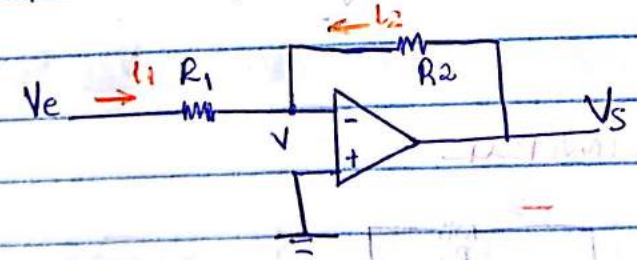
$$V_S - \frac{R_1 + R_2}{R_2}\left(-\frac{V_S}{A}\right) = -\frac{R_2}{R_1} V_e \Rightarrow V_S = \frac{(-R_2/R_1) \cdot V_e}{1 + (R_1 + R_2)/AR_2}$$

Como A é muito alto, podemos adotar

$$\boxed{V_S = -\frac{R_2}{R_1} V_e}$$

Observação: um amp op funciona somente com realimentação. Caso não haja realimentação a tensão de saída estoura para infinito.

Uma forma alternativa de equacionamento é assumir que, devido à realimentação negativa, temos $V \approx 0$ e portanto



$$\frac{V_e}{R_1} = -\frac{V_S}{R_2} \Rightarrow \boxed{V_S = -\frac{R_2}{R_1} V_e}$$

Scanned by CamScanner

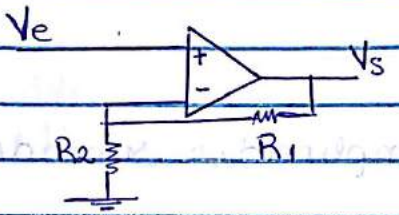
__/__/__

14109126 - ELETRÔNICA ANALÓGICA - AULA 12

CIRCUITOS COM TRANSISTORES

AMPLIFICADOR NÃO - INVERSOR

O circuito para o amplificador não inversor é apresentado a seguir:



Ainda vale que $i_- = 0$, assim a relação entre a entrada e a saída desse circuito é dada por:

$$V_s = A\left(V_e - \frac{R_2}{R_1+R_2} V_s\right) \Rightarrow V_e - \frac{R_2 V_s}{R_1+R_2} - \frac{V_s}{A} \approx 0 \Rightarrow V_e - \frac{R_2 V_s}{R_1+R_2} = 0 \Rightarrow$$

$$\boxed{V_s = \frac{R_1+R_2}{R_2} V_e}$$

Devido à realimentação negativa temos:

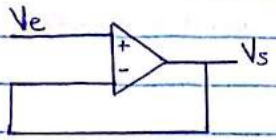
$$V_e = V_s \cdot \frac{R_2}{R_2+R_1} \rightarrow \boxed{V_s = \frac{R_1+R_2}{R_2} V_e}$$

CIRCUITO AMPLIFICADOR SEGUIDOR

Um seguidor tem como utilidade isolar.

Scanned by CamScanner

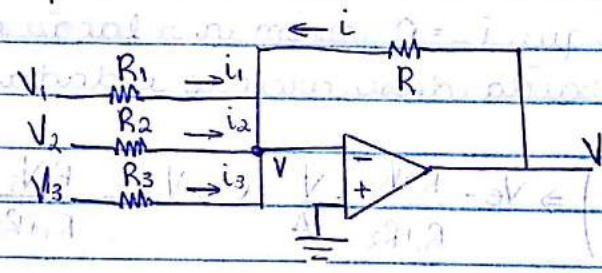
(desacoplar) um sinal.



Devido à realimentação negativa, $V_+ = V_-$ e, portanto, $\boxed{V_s = V_e}$

SOMADOR

O circuito amplificador somador é da seguinte forma:



Devido à realimentação negativa, $V = 0$ e, portanto:

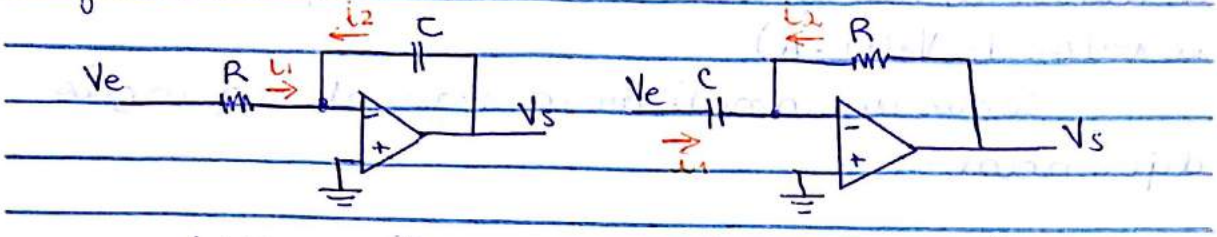
$$i = -(i_1 + i_2 + i_3) \Rightarrow \frac{V_s}{R} = -\left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3}\right) \Rightarrow \boxed{V_s = -R \sum_{i=1}^{3} \frac{V_i}{R_i}}$$

Se tivermos n entradas e todas as resistências são iguais, temos: $\boxed{V_s = -\sum_{i=1}^{n} V_i}$

• Exemplo: usando o mesmo raciocínio da realimentação negativa, encontrar a relação entre

__/__/__

a entrada e a saída para os dois circuitos a seguir:

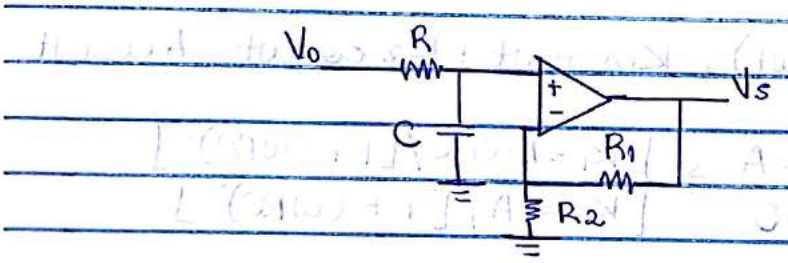


(INTEGRADOR) (DIFERENCIADOR)

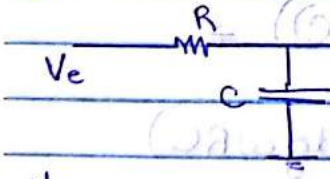
1) $i_1 = -i_2 \Rightarrow \frac{V_e}{R} = -C\frac{dV_s}{dt} \Rightarrow \boxed{V_s = -\frac{1}{RC}\int V_e\,dt}$

2) $i_1 = -i_2 \Rightarrow C\frac{dV_e}{dt} = -\frac{V_s}{R} \Rightarrow \boxed{V_s = -RC\frac{dV_e}{dt}}$.

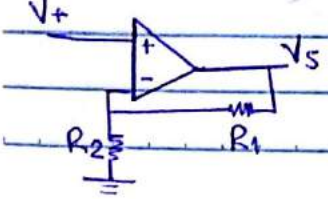
FILTRO DE PRIMEIRA ORDEM



O circuito pode ser dividido em duas partes para facilitar a análise. Dessa forma conseguimos achar a relação entre a entrada e a saída.



$$\frac{V_e - V_c}{R} = C\frac{dV_c}{dt} \Rightarrow RC\frac{dV_c}{dt} + V_c = V_e$$



$$V_s = \frac{R_1+R_2}{R_2}V_+ \Rightarrow V_s = \frac{R_1+R_2}{R_2}V_c$$

Scanned by CamScanner

Vamos supor que $V_e(t) = A\cos(\omega t)$ (note que é conveniente adotar cosseno, pois quando $\omega = 0$ o valor de $V_e(t) = A$)

Temos que analisar a seguinte equação diferencial:

$$RC\frac{dV_c}{dt} + V_c = A\cos(\omega t)$$

A solução é da forma:

$$V_c(t) = K_1 \operatorname{sen}\omega t + K_2 \cos\omega t$$

Substituindo essa expressão na equação:

$$\omega RC(K_1\cos\omega t - K_2\operatorname{sen}\omega t) + K_1\operatorname{sen}\omega t + K_2\cos\omega t = A\cos\omega t$$

$$\Rightarrow \begin{cases} K_1\omega RC + K_2 = A \\ -K_2\omega RC + K_1 = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} K_1 = A\omega RC/[1 + (\omega RC)^2] \\ K_2 = A/[1 + (\omega RC)^2] \end{cases}$$

Portanto,

$$V_c(t) = A\left(\frac{\omega RC}{1+(\omega RC)^2}\operatorname{sen}\omega t + \frac{1}{1+(\omega RC)^2}\cos\omega t\right) \Rightarrow$$

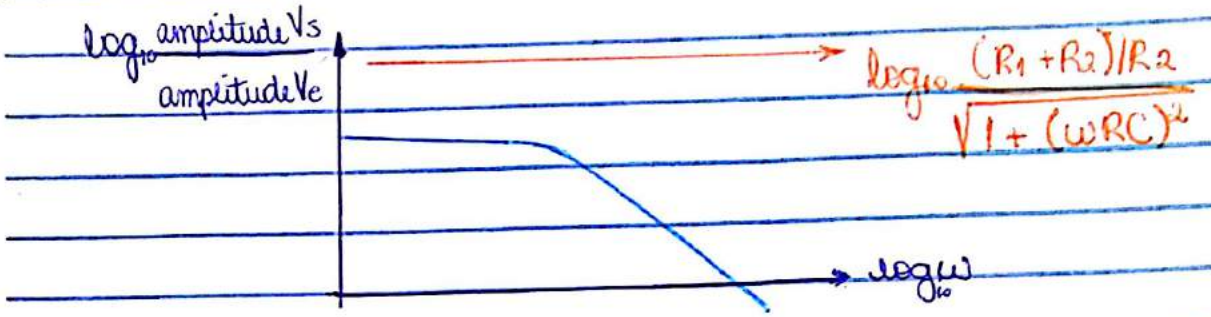
$$V_c(t) = \frac{A}{\sqrt{1+(\omega RC)^2}}\cos\left(\omega t - \operatorname{arctg}(\omega RC)\right) \Rightarrow$$

$$V_s(t) = \frac{A}{\sqrt{1+(\omega RC)^2}}\cdot\frac{R_1+R_2}{R_2}\cos\left(\omega t - \operatorname{arctg}\omega RC\right)$$

Considere um gráfico,

Scanned by CamScanner

__/__/__



Observação: isso é um filtro passa-baixa, ou seja, atenua o sinal para ω maiores.

Scanned by CamScanner