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

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

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

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

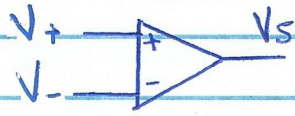
(o primeiro termo tende a 1 e o segundo tende a 0)

13/09/16 - ELETRÔNICA ANALÓGICA - AULA 11

CIRCUITOS COM TRANSISTORES

AMPLIFICADOR OPERACIONAL

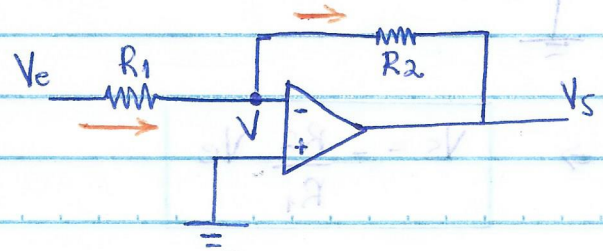
Um amplificador operacional amplifica a diferença das entradas, tal que: $V_S = A(V_+ - V_-)$. O ganho A é muito alto, da ordem de 10^6, por exemplo.



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



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

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

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

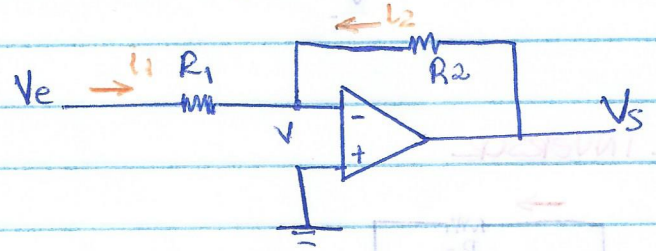
$$V_S - \frac{R_1 + R_2}{R_2}\left(-\frac{V_S}{A}\right) = -\frac{R_2}{R_1} V_e \Rightarrow V_S = \frac{(-R_2/R_1)\, V_e}{1 + (R_1 + R_2)/AR_2}$$

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



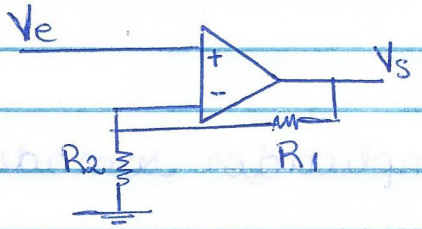
$$\frac{V_e}{R_1} = -\frac{V_S}{R_2} \Rightarrow \boxed{V_S = -\frac{R_2}{R_1} V_e}$$

14/09/16 - 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:

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

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

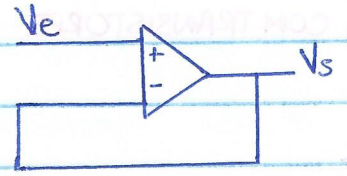
Devido à realimentação negativa temos:

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

CIRCUITO AMPLIFICADOR SEGUIDOR

Um seguidor tem como utilidade isolar

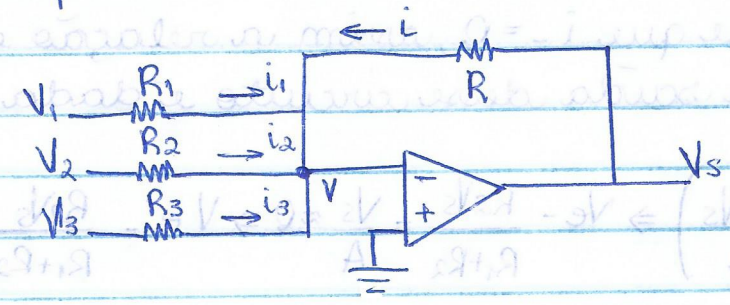
(desacoplar) um sinal.



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

SOMADOR

O circuito amplicador somador é da seguinte forma:



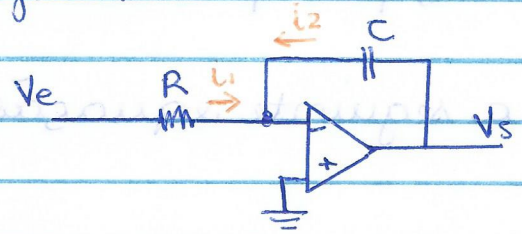
Devido à realimentação negativa, $V = 0$ e, portanto:

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

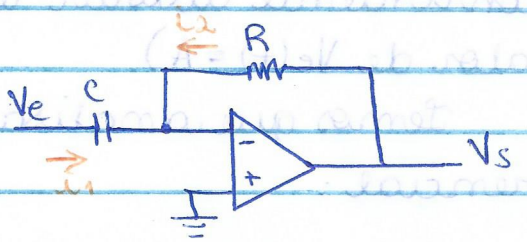
Se tivermos n entradas e todas as resistências são iguais, temos: $\boxed{V_S = -\sum_{i=1}^{n} V_i}$

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

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



(INTEGRADOR)

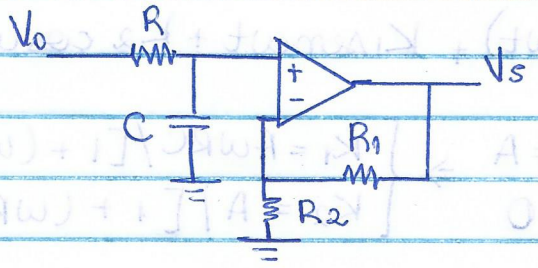


(DIFERENCIADOR)

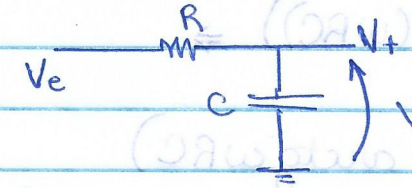
1) $i_1 = -i_2 \Rightarrow \frac{V_e}{R} = -C\frac{dV_s}{dt} \Rightarrow \boxed{V_s = -\frac{1}{RC}\int V_e\,dt}$

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

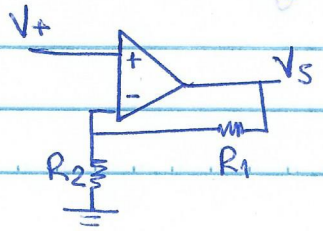
FILTRO DE PRIMEIRA ORDEM



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



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



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

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:

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

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

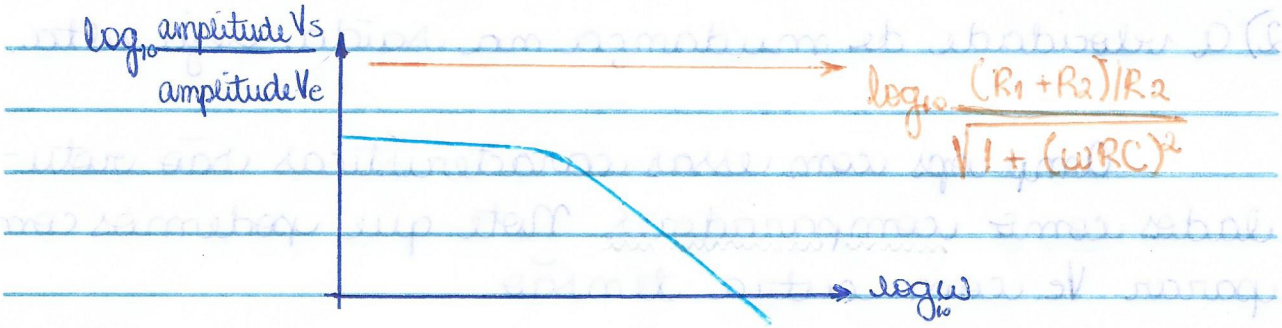
Portanto,

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

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

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

Considere um gráfico,



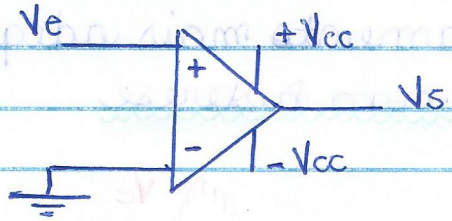
Observação: isso é um filtro passa-baixa, ou seja, atenua o sinal para ω maiores.

27/09/16 - ELETRÔNICA ANALÓGICA - AULA 13

AMPLIFICADORES

COMPARADOR

Comparadores são circuitos que comparam a tensão de entrada Ve com o terra.



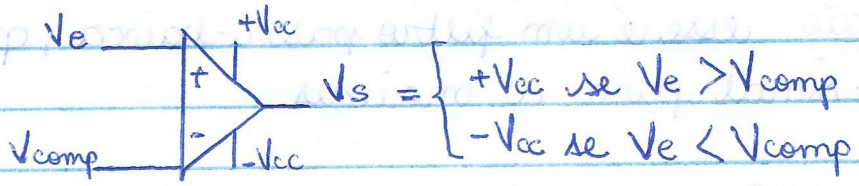
A saída "indica" se Ve>0: se Ve>0, temos que Vs = +Vcc. Se Ve<0, Vs = -Vcc. Quando a saída do Amp op está em +Vcc ou -Vcc dizemos que o amp op está saturado.

Para que isso se realize, é necessário que:

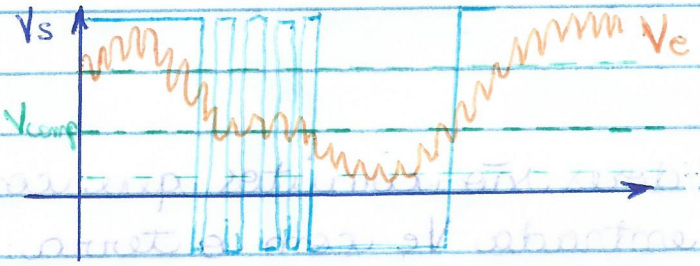
1) O ganho seja muito alto.

2) A velocidade de mudança na saída seja alta.

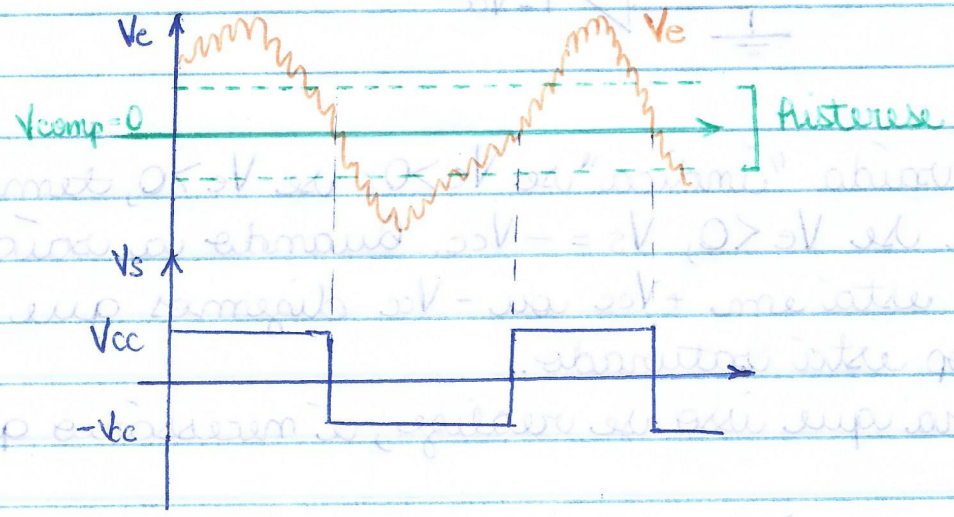
Amp ops com essas características são rotulados como comparadores. Note que podemos comparar Ve com outra tensão.



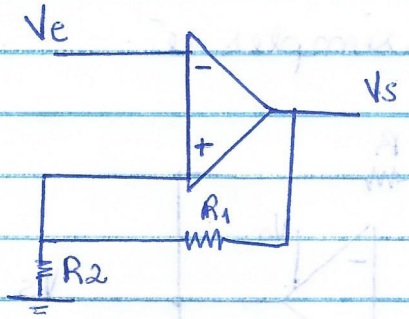
Esse tipo de comparador enfrenta problemas se a entrada tem ruído.



Um comportamento mais adequado é dado pela comparação com histerese.



Um circuito comparador com histerese:



Suponha que o circuito foi ligado com $V_e = V_s = 0$. Esse é um ponto de equilíbrio. Porém se Ve cai, a realimentação positiva leva Vs a Vcc (da mesma forma, se Ve sobe, Vs vai a $-V_{cc}$).

Se Vs está em Vcc, a entrada Ve é comparada com $V_{cc} R_2/(R_1+R_2)$. Nesse caso a saída continua em Vcc enquanto $V_e < V_{cc}R_2/(R_1+R_2)$

Se Ve atinge $V_{cc}R_2/(R_1+R_2)$, a saída cai para $-V_{cc}$ por realimentação positiva.

Se Vs está em $-V_{cc}$, a entrada é comparada com $-V_{cc}R_2/(R_1+R_2)$

28/09/16 - ELETRÔNICA ANALÓGICA - AULA 14

AMPLIFICADORES

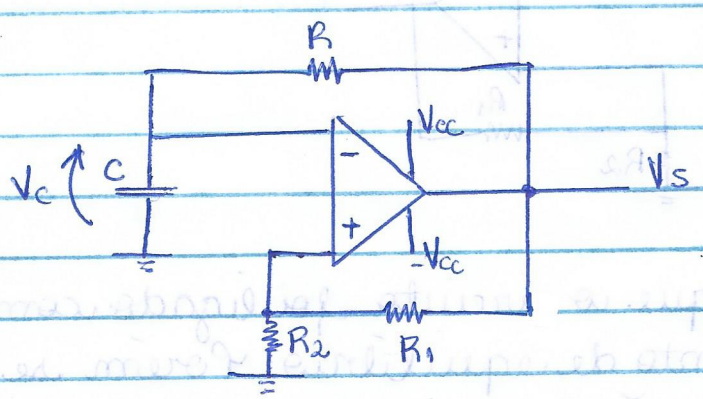
OSCILADORES

São circuitos cuja função é produzir um sinal periódico na saída.

Vamos nos concentrar em sinais retangulares (que como vimos, em sistemas

digitais, podem ser aplicados para gerar o sinal de um clock.

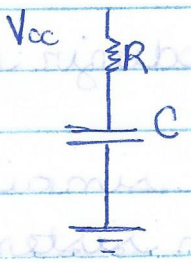
Um gerador simples é:



Dependendo das alterações nas entradas (carregamento ou descarregamento do capacitor) as saídas são modificadas de forma diferente.

Suponha que o circuito foi ligado com o capacitor descarregado (ou seja, $V_c = 0$). Caso $V_s = 0$, esse é um ponto de equilíbrio. Caso um ruído qualquer leve a $V_c < 0$, a realimentação positiva leva a saída a V_{cc} (caso o ruído leve a $V_c > 0$, a realimentação positiva leva a saída a $-V_{cc}$).

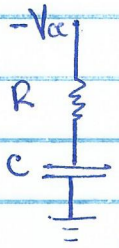
Suponha que a saída foi a V_{cc}. O capacitor se carrega via resistor R. (temos um circuito RC):



O carregamento é exponencial:

$$V_c(t) = V_{cc}\left(1 - e^{t/RC}\right)$$

Enquanto $V_c < V_{cc}R_2/(R_1+R_2)$, temos $V_s = V_{cc}$, e o capacitor continua se carregando. Caso V_c ultrapasse $V_{cc}R_2/(R_1+R_2)$, imediatamente a saída vai à $-V_{cc}$ por realimentação positiva. Agora temos:

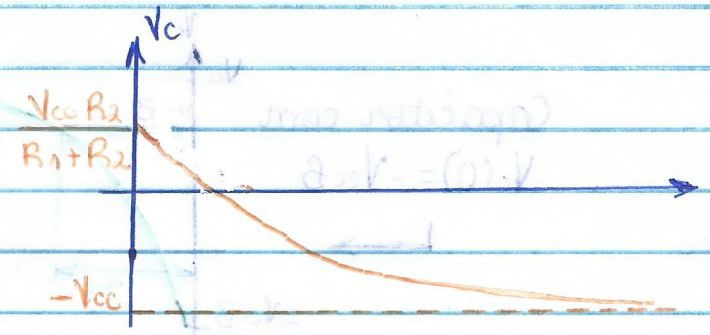


Capacitor com $V_c = V_{cc}R_2/(R_1+R_2)$ no início do descarregamento.

$$\Rightarrow C\frac{dV_c}{dt} = -\frac{-V_{cc}-V_c}{R} \Rightarrow RC\frac{dV}{dt} + V_c = -V_{cc}$$

A solução é da forma

$$V_c(t) = \alpha e^{-t/RC} + \beta \text{ com } \begin{cases} V_c(0) = V_{cc}R_2/(R_1+R_2) \\ V_c(t) \xrightarrow[t\to\infty]{} -V_{cc} \end{cases}$$



$$\Rightarrow \beta = -V_{cc} \Rightarrow \alpha+\beta = \frac{V_{cc}R_2}{R_1+R_2} \Rightarrow \alpha = V_{cc} + \frac{V_{cc}R_2}{R_1+R_2} \Rightarrow V_c(t) = \left(V_c + \frac{V_{cc}R_2}{R_1+R_2}\right)e^{-t/RC} - V_{cc}$$

Enquanto $V_c > -V_{cc}R_2/(R_1+R_2)$, a saída V_s continua em $-V_{cc}$ e o capacitor continua se descarregando.

O descarregamento para quando $V_c(t)$ atinge $-V_{cc}R_2/(R_1+R_2)$. O tempo de descarregamento é

$$\left(V_{cc}+\frac{V_{cc}R_2}{R_1+R_2}\right)e^{-t_d/RC}-V_{cc}=\frac{V_{cc}R_2}{R_1+R_2}$$

Usando $B = R_2/(R_1+R_2)$, temos:

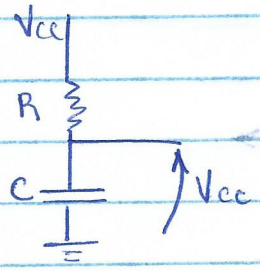
$$V_{cc}(1+B)e^{-t_d/RC}=V_{cc}(1-B)\Rightarrow e^{-t_d/RC}=(1-B)/(1+B)$$

$$\Rightarrow -\frac{t_d}{RC}=\ln\left(\frac{1-B}{1+B}\right)$$

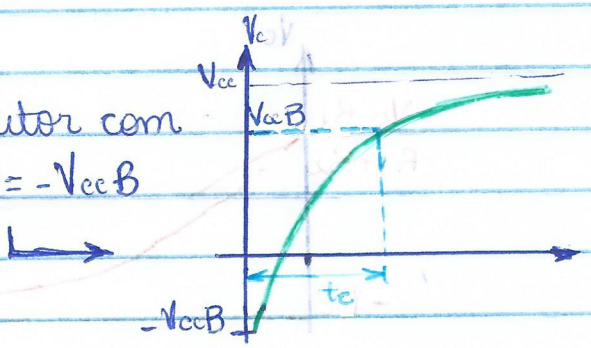
$$\Rightarrow t_d=RC\ln\left(\frac{1+B}{1-B}\right)$$

A partir do momento que o descarregamento atingiu $-V_{cc}B$, a saída vai a V_{cc} por meio da realimentação positiva.

Temos



Capacitor com $V_c(0) = -V_{cc}B$



$$C\frac{dV_c}{dt}=\frac{V_{cc}-V_c}{R}\Rightarrow RC\frac{dV_c}{dt}+V_c=V_{cc}$$, cuja solução é da forma:

$$V_c(t)=\alpha e^{-t/RC}+\beta \text{ com } \begin{cases} V_c(0)=-V_{cc}B \\ V_c(t)\xrightarrow{t\to\infty} V_{cc} \end{cases}$$

$\Rightarrow \beta = V_{cc}$ e $\alpha + \beta = -V_{cc}B \Rightarrow \alpha = -V_{cc}(1+B)$

$\Rightarrow V_c(t) = V_{cc} - V_{cc}(1+B)e^{-t/RC}$

O carregamento termina quando V_c atinge $V_{cc}B$, ou seja:

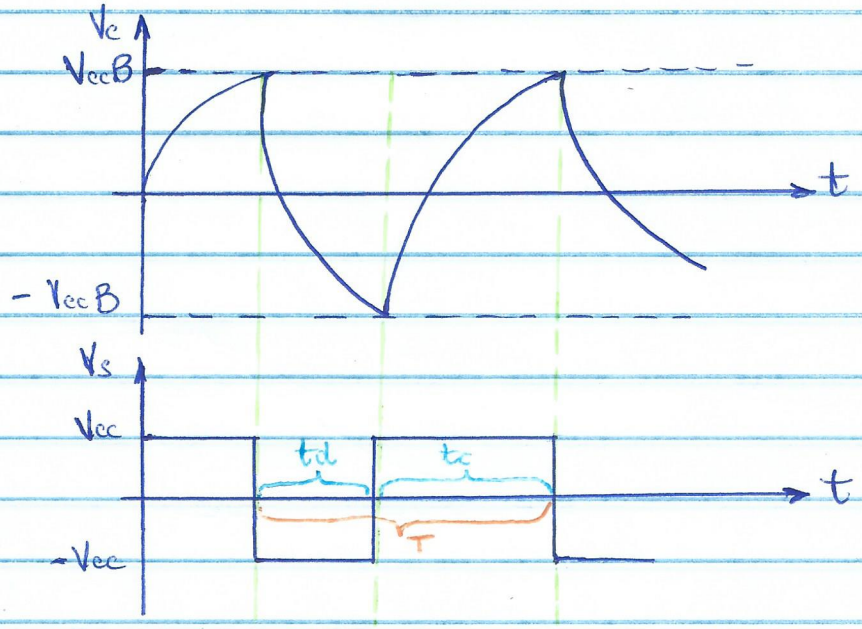
$$V_{cc} - V_{cc}(1+B)e^{-t_c/RC} = V_{cc}B$$

$$-(1+B)e^{t_c/RC} = -1+B$$

$$-\frac{t_c}{RC} = \ln\left(\frac{1-B}{1+B}\right)$$

$$\Rightarrow t_c = RC \cdot \ln\left(\frac{1+B}{1-B}\right)$$

Ou seja, em regime:



$$T = t_c + t_d = 2RC \cdot \ln\frac{(1+B)}{(1-B)}$$