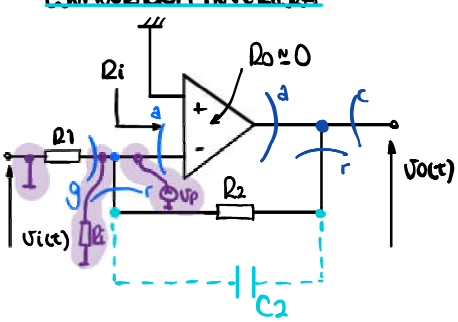
20/05

Compensación en el realimentador

CONFIGURACIÓN INVERSORA



MV
SI

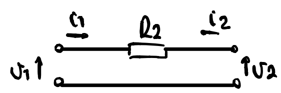
$PE = \frac{v_o}{i_N}$

$$PE = \frac{V_o}{I_N}(s) = \frac{1}{B(s)} \cdot \frac{T(s)}{1+T(s)}$$

$$i_N = \frac{v_i}{R_1}$$

$$\frac{V_o}{V_i}(s) = \frac{PE(s)}{R_1}$$

Sin C_2 conectado: $B = \left.\frac{i_1}{v_2}\right|_{v_1=0} = -\frac{1}{R_2}$



- MÉTODO DE RECORRIDA DE LAZO -

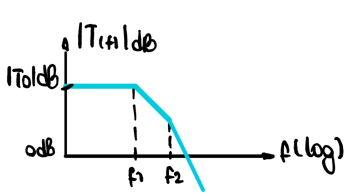
$$T(s) = \frac{V}{V_P}(s) = -A_{VOL}(s)\,\frac{(R_1 /\!/ R_i)}{(R_1 /\!/ R_i)+R_2}$$

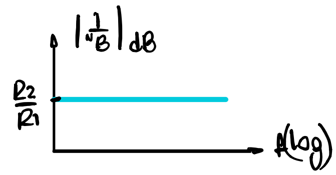
$$|T_o| = |A_{VOL\,o}| \cdot \frac{(R_1 /\!/ R_i)}{(R_1 /\!/ R_i)+R_2}$$

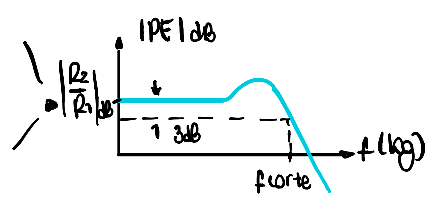
Volviendo a PE: es necesario normalizarlo para poder hacer bode

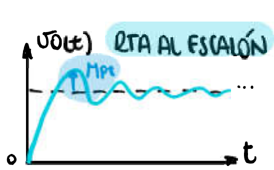
$$\frac{V_o}{V_i}(s) = \frac{PE(s)}{R_1} = {}^{N}PE(s) = \underbrace{\left(-\frac{R_2}{R_1}\right)}_{=\frac{1}{^{N}B}} \cdot \frac{T(s)}{1+T(s)} \qquad \left({}^{N}B = B \cdot R_1 = -\frac{R_1}{R_2}\right)$$

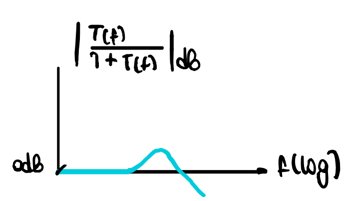
$$|{}^{N}PE_o| = \left|\left(-\frac{R_2}{R_1}\right)\right| \cdot \frac{|T_o|}{1+|T_o|} \underset{|T_o| \gg 1}{\simeq} \frac{R_2}{R_1}$$



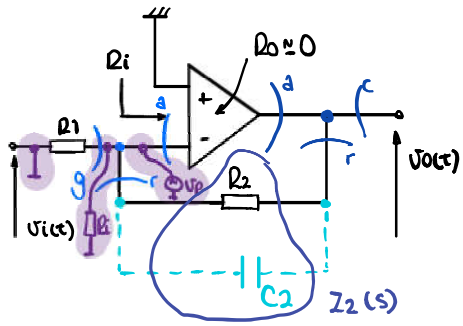








Con C_2 conectado:



Por analogía:

$$B^c(s) = -\frac{1}{Z_2(s)} \quad ; \quad Z_2(s) = R_2 \,//\, \frac{1}{sC_2} = \frac{R_2}{1+sR_2C_2}$$

$$B^c(s) = -\frac{(1+sR_2C_2)}{R_2} \left[\frac{1}{\Omega}\right]$$ → Ahora el realimentador tiene un cero.

$$^N B^c(s) = B^c(s) \cdot R_1 = -\frac{R_1}{R_2}(1+sR_2C_2)$$

$$T^c(s) = -A_{VOL}(s) \cdot \frac{(R_1//R_i)}{(R_1//R_i)+Z_2(s)} = -A_{VOL}(s) \frac{(R_1//R_i)\ (1+sR_2C_2)}{(R_1//R_i)\ (1+sR_2C_2)+R_2}$$

$$T^c(s) = \frac{-A_{VOL}(s)\cdot(R_1//R_i)\,(1+sR_2C_2)}{[(R_1//R_i)+R_2]+s\,(R_1//R_i)\cdot R_2 \cdot C_2} = \underbrace{\frac{-A_{VOL}(s)\,(R_1//R_i)}{(R_1//R_i)+R_2}}_{T(s)} \frac{(1+sR_2C_2)}{\left[1+s\underbrace{\frac{(R_1//R_i)\cdot R_2}{(R_1//R_i)+R_2}}_{R_1//R_i//R_2}C_2\right]}$$

$$T^c(s) = T(s) \cdot \frac{(1+sR_2C_2)}{[1+s(R_1//R_i//R_2)C_2]}$$

$$f_p^c = \frac{1}{2\pi\,(R_1//R_i//R_2)C_2} \quad \wedge \quad f_z^c = \frac{1}{2\pi\,R_2C_2}$$

$B_o^c = B_o = -1/R_2$

$T_o^c = T_o$

$$^N PE(s)^c = \frac{PE^c(s)}{R_1} = \frac{1}{R_1\cdot B^c(s)} \cdot \frac{T^c(s)}{1+T^c(s)} \Rightarrow {}^N PE_o^c = \frac{1}{R_1\cdot B_o^c}\cdot\frac{T_o^c}{1+T_o^c} = {}^N PE_o$$

Quiero que predomine en la respuesta en frecuencia

$$|^N PE_o^c| \overset{|T_o|\gg 1}{\approx} \left|\frac{1}{R_1\cdot B_o}\right| = \frac{R_2}{R_1}$$

Hay dos casos de diseño

CASO 1) EL REALIMENTADOR DETERMINA LA RESPUESTA DEL CIRCUITO.

Condiciones:

1) $f^c_{CORTE} \ll f_{CORTE} \iff \tau_r^c \gg \tau_r$ Sacrifico ancho de banda

2) $|T_o| \gg 1$

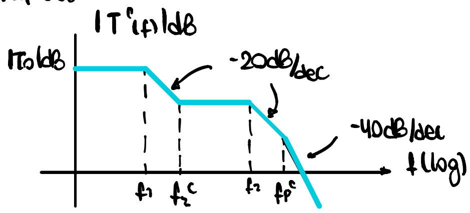
Entonces la respuesta en frecuencia y la respuesta en el tiempo del circuito serán independientes del OPAMP:

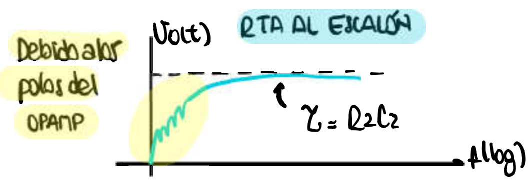
$$^N PE^c(s) \approx \frac{1}{^N B^c(s)} = \frac{-(R_2/R_1)}{1+sR_2C_2}$$ → Donde estaba el cero, ahora está el polo.

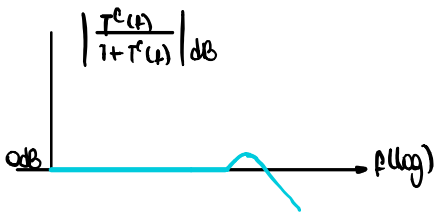
El amplificador se comportará como un sistema de 1° orden con: $f^c_{CORTE} = f_2^c = \frac{1}{2\pi R_2 C_2}$

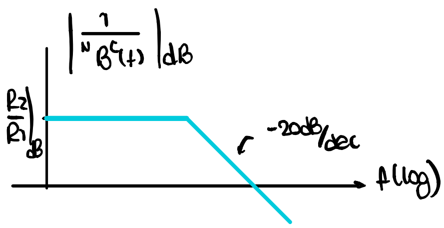
IMP! No olvidar verificar las condiciones antes de hacer un ejercicio.

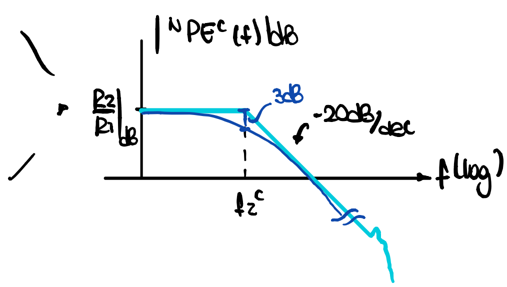
Gráficos:









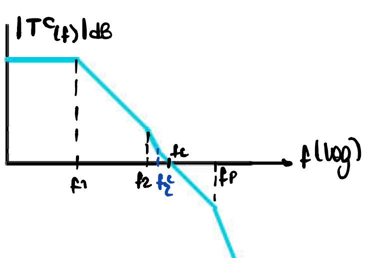


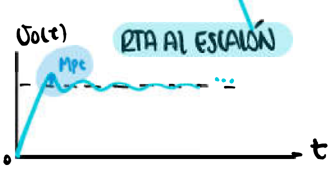
CASO 2) EL REALIMENTADOR ES AJUSTADO PARA LOGRAR BAJO τ_r^c CON MÍNIMO Mp_t^c

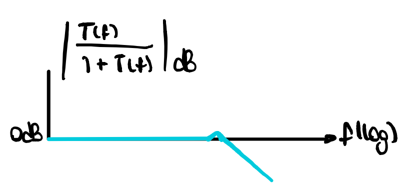
Condición: $f_2^c \approx f_c$ → Empiezo por esto, mido y voy ajustando.

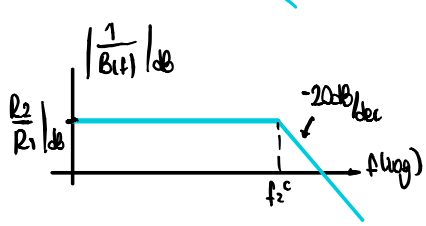
- El circuito se va a comportar como de 2do orden.

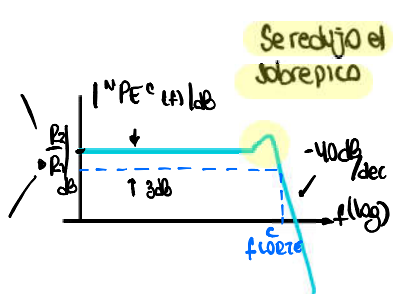
Gráficos:



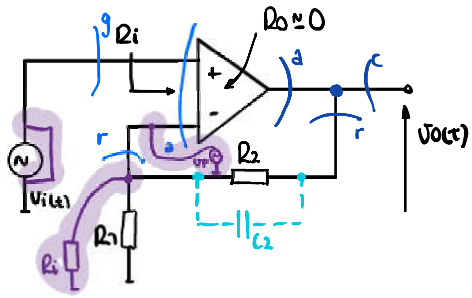






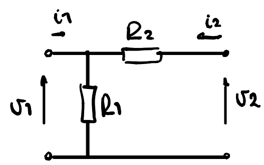


CONFIGURACIÓN INVERSORA



MV / SV $\Big\{ \; PE(s) = \frac{V_o}{V_i}(s) = \frac{1}{B(s)} \cdot \frac{T(s)}{1+T(s)}$

- **Sin C_2 conectado:**



$$B = \frac{v_1}{v_2}\Big|_{i_1=0} = \frac{R_1}{R_1+R_2}$$

$$T(s) = -A_{VOL}(s) \cdot \frac{(R_1 \parallel R_i)}{(R_1 \parallel R_i)+R_2}$$

$$|PE_o| = \left|\frac{1}{B_o}\right| \cdot \left|\frac{T_o}{1+T_o}\right| \simeq \frac{1}{B_o} \overset{|T_o|\gg 1}{\simeq} 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Gráficos: ÍDEM ANTES

- **Con C_2 conectado:**

$$B^c(s) = \frac{R_1}{R_1 + Z_2(s)} \quad , \quad Z_2(s) = R_2 \parallel \frac{1}{sC_2}$$

$$= \frac{(1+sR_2C_2)\,R_1}{R_1(1+sR_2C_2)+R_2} = \frac{R_1(1+sR_2C_2)}{(R_1+R_2)+sR_1R_2C_2} = \frac{R_1}{R_1+R_2} \cdot \frac{(1+sR_2C_2)}{\left[1 + s\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}C_2\right]}$$

$R_1 \parallel R_2$

↓ Aparece un cero y un polo (finitos)

$$= B \cdot \frac{(1+sR_2C_2)}{[1+s(R_1\parallel R_2)C_2]}$$

$$T^c(s) = -A_{VOL}(s) \cdot \frac{(R_1\parallel R_i)}{(R_1\parallel R_i)+Z_2(s)} = T(s)\,\frac{(1+sR_2C_2)}{[1+s(R_1\parallel R_2\parallel R_i)C_2]}$$

$$f_z^c = \frac{1}{2\pi R_2C_2}$$

$$f_p^c = \frac{1}{2\pi (R_1\parallel R_2)C_2}$$

Luego: $PE^c(s) = \dfrac{1}{B^c(s)} \cdot \dfrac{T^c(s)}{1+T^c(s)}$

Hay dos casos de diseño

CASO 1) EL REALIMENTADOR DETERMINA LA RESPUESTA DEL CIRCUITO.

Hacer muchos amplificadores idénticos: mismo ancho de banda y ganancia

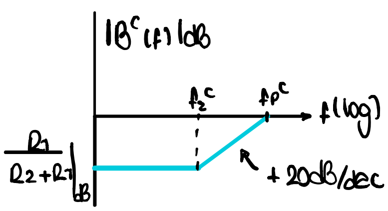
<u>Condiciones</u>:

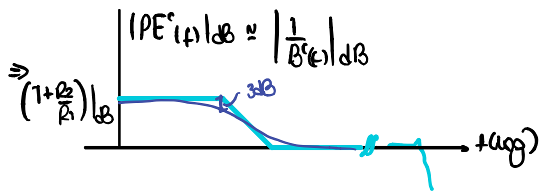
1) $f^c_{CORTE} << f_{CORTE} \Leftrightarrow \tau_r^c >> \tau_r$ → Por lo menos 10 veces más chica.

2) $|T_0| >> 1$

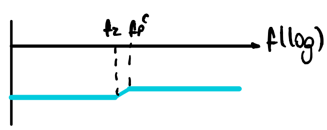
3) $\dfrac{f_p^c}{f_z^c} \geq 10 \Leftrightarrow 1 + \dfrac{R_2}{R_1} \geq 10$

Se tenderían a cancelar si están muy cerca ⇒ $\frac{1}{B}$ sería constante y no estoy teniendo compensación. No puedo fijar nada.





↓ Se tienden a cancelar si están muy cerca

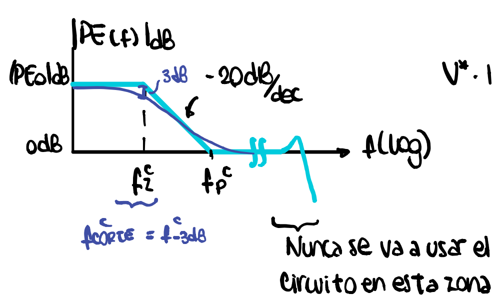


EL SISTEMA SE COMPORTARÁ COMO DE 1° ORDEN

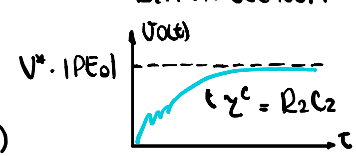
$$PE^c(s) \simeq \frac{1}{B^c(s)} = \underbrace{\left(1+\frac{R_2}{R_1}\right)}_{PE_0} \left[\frac{1 + sC_2(R_1 // R_2)}{1 + sC_2R_2}\right]$$

$$f_z^c = \frac{1}{2\pi C_2 R_2}$$

$$f_p^c = \frac{1}{2\pi C_2 (R_1 // R_2)}$$



RTA AL ESCALÓN



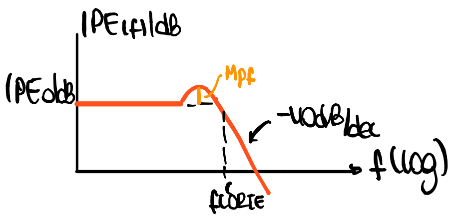
$\tau_r^c = 2.2\,\tau^c$

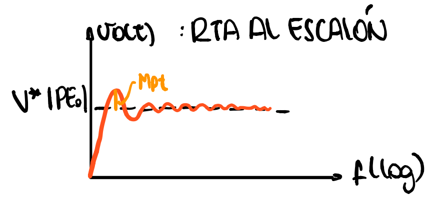
CASO 2) EL REALIMENTADOR ES AJUSTADO PARA LOGRAR BAJO τ_r^c CON MÍNIMO M_{pt}^c
↓
equivalente a tener f_{CORTE} alta.

Condiciones:

1) $f_z^c \simeq f_c$

2) $\frac{f_p^c}{f_z^c} \geq 10 \iff 1 + \frac{R_2}{R_1} \geq 10$





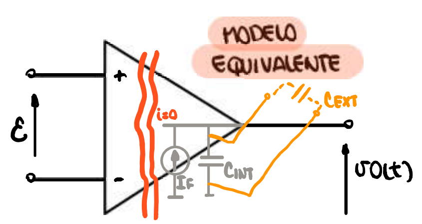
- SE COMPORTA COMO DE ORDEN 2.

'SLEW-RATE' (SR)

Variación máxima en la respuesta al escalón. Distorsiona la señal.

$$SR \triangleq \left| \frac{dv_o(t)}{dt} \Big|_{MAXIMA} \right|$$

Cuando se manifiesta este fenómeno, el OPAMP deja de funcionar linealmente. La salida no sigue a la entrada

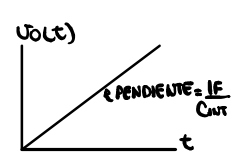


Es como si se fracturase el OPAMP. Alguno de los transistores internos se rompe.

(SLEWRATE IDEAL = ∞)

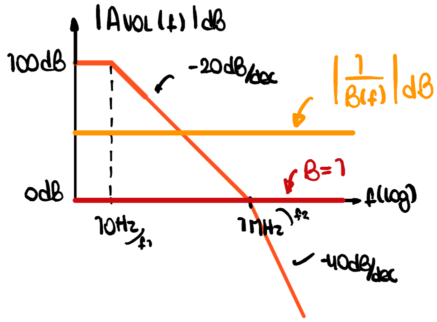
$$v_o(t) = \frac{1}{C_{INT}} \int_0^t I_F \, du = \frac{I_F}{C_{INT}} \int_0^t du = \frac{I_F}{C_{INT}} \cdot t$$

ENTONCES: $SR \triangleq \left| \frac{dv_o(t)}{dt} \Big|_{MAXIMA} \right| = \frac{I_F}{C_{INT}}$ → Cuando la pendiente alcanza ese valor no sube más.



Cuando compensamos por polo dominante agregando un Cext, disminuye el SLEW-RATE porque las capacidades se suman ⇒ mi pendiente máxima es más chica lo cual empeora las cosas

En el OPAMP 741 el fabricante colocó un $C_{INT} = 30pf$ para producir un polo dominante en $f_1 = 10Hz$



YA VIENE COMPENSADO INTERNAMENTE

Resulta estable hasta con ganancias tan bajas como la unidad.

Puedo bajar hasta con una ganancia unitaria y mi sistema sigue siendo estable (B=1)
$\downarrow$ PM = 45°

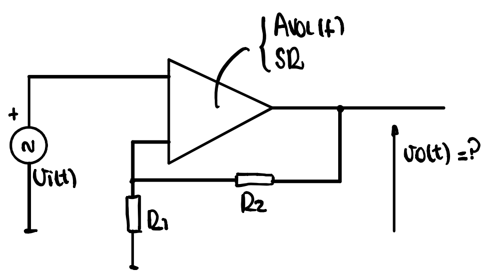
↳ Me despreocupo de las oscilaciones.

↳ Pero, me afecta el SLEW-RATE : $SR \simeq 1V/\mu seg$

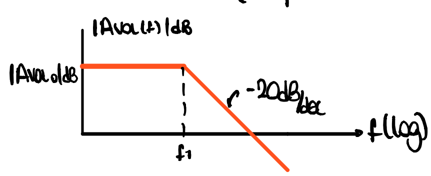
Impacto del SLEW-RATE en el circuito

"Indicar las características de la señal de salida".

Si el SLEW-RATE domina todo el tiempo, voy a tener una señal triangular todo el tiempo, en lugar de una sinusoide.



$v_i(t) = \hat{V}_i \operatorname{sen}(2\pi f^* t)$



$\left.\begin{matrix} MV \\ SV \end{matrix}\right\} PE = \frac{V_o}{V_i}$

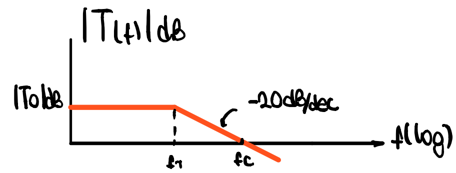
REGLA NEMOTÉCNICA:

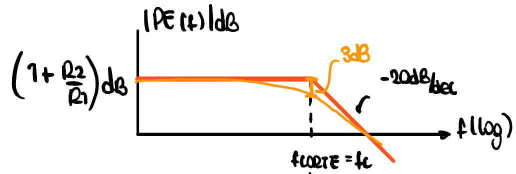
Siempre que $\left\{\begin{matrix} MV \\ SV \end{matrix}\right.$, $\left.\begin{matrix} R_i = \infty \\ R_o = 0 \end{matrix}\right\}$ el $A_{VOL} \equiv a$

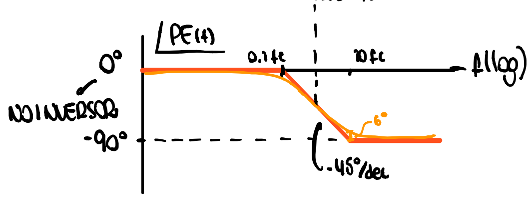
$\uparrow$ ganancia del nuevo amplificador básico

$$|T(f)| = \overbrace{A_{VOL}(f)}^{\equiv a(f)} \cdot \underbrace{\left(\frac{R_1}{R_1 + R_2}\right)}_{}^{B}$$

$$|T_o|_{dB} = |A_{VOLO}| \cdot \frac{R_1}{R_1+R_2}$$







Genéricamente:

$$|PE(f)| = \frac{|PE_0|}{\sqrt{1+\left(\frac{f}{f_{CORTE}}\right)^2}}$$ → Cuánto amplifica el sistema.

$$\angle PE(f) = -\text{arctg}\left(\frac{f}{f_{CORTE}}\right)$$

Entonces:

Si es (-) quiere decir que está retrasada

$$v_o(t) = \hat{V}_i \cdot |PE(f^*)| \cdot \text{sen}\left(2\pi f^* t + \angle PE(f)\right)$$

Veo cómo afecta el SLEW-RATE:

$$\frac{dv_o(t)}{dt} = \hat{V}_i \cdot |PE(f^*)| \cdot 2\pi f^* \cdot \cos\left(2\pi f^* t + \angle PE(f)\right)$$

$$\left|\frac{dv_o(t)}{dt}\right|_{MAX} = \hat{V}_i \cdot |PE(f^*)| \cdot \underbrace{2\pi f^*}_{\omega^*} = \hat{V}_i \cdot |PE(f^*)| \cdot \omega^* \quad \begin{array}{l} \leq SR - \text{CASO 1} \\ > SR - \text{CASO 2} \end{array}$$

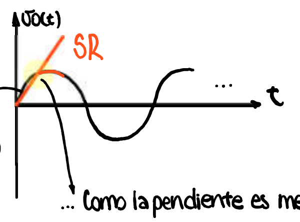
CASO 1) El SR no afecta a la señal de salida

$$v_o(t) = \underbrace{\hat{V}_i \cdot |PE(f^*)|}_{\hat{V}_o} \cdot \text{sen}\left(2\pi f^* t + \angle PE(f)\right)$$

CASO 2) El SR afecta a la señal de salida. Entonces:

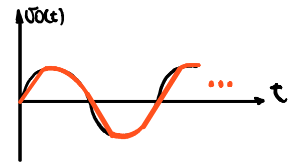
CASO 2.1.

Arranca dominando el SR...

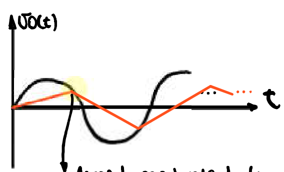


... Como la pendiente es menor al SR, entonces vuelve a retomar la señal

VOY A TENER PARTES RECTAS Y PARTES SINUSOIDALES. ⇒



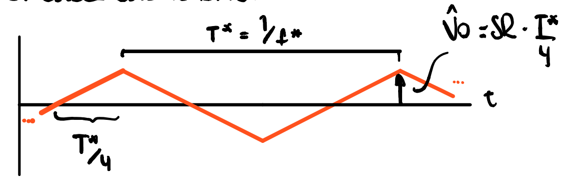
CASO 2.2.



Como la pendiente de la sinusoide es mayor al SR, vuelve el SR.

DOMINA TODO EL TIEMPO EL SR ⇒

En estado estacionario:

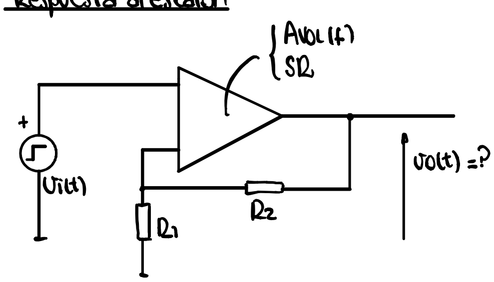


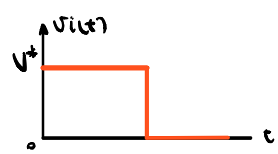
Señal triangular periódica con igual frecuencia de la entrada, período T^* y $V_P = \hat{V}_o = SR \cdot \frac{T^*}{4}$

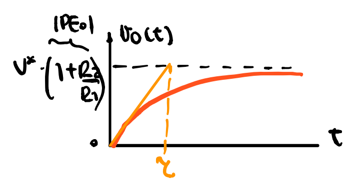
- Si se intersecan $v_o(t)$ con el SR, antes de $\frac{T^*}{4}$ es CASO 2.1., sino el CASO 2.2.

$$SR \cdot \frac{T^*}{4} \underset{2.1}{\overset{2.2}{\lessgtr}} \hat{V}_i \cdot |PE(f^*)|$$

Respuesta al escalón







$$v_o(t) = V^* \cdot |PE_o| \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \quad , \quad \tau = \frac{1}{2\pi f_{CORTE}}$$

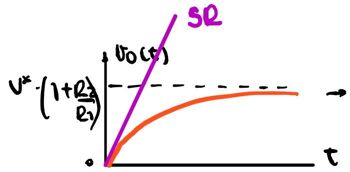
$$\frac{dv_o(t)}{dt} = V^* \cdot |PE_o| \cdot \left[-\left(-\frac{1}{\tau}\right)\right] e^{-t/\tau}$$

$$\left.\frac{dv_o(t)}{dt}\right|_{MAX} = \frac{V^* \cdot |PE_o|}{\tau} \underset{CASO\,2}{\overset{CASO\,1}{\lessgtr}} SR$$

↓ Igualo y despejo V^* p/ ver a partir de cuándo afecta el SR.

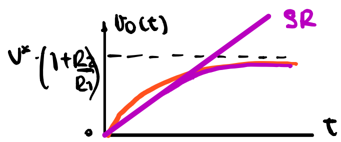
CASO 1) SR > MAX PENDIENTE

No afecta



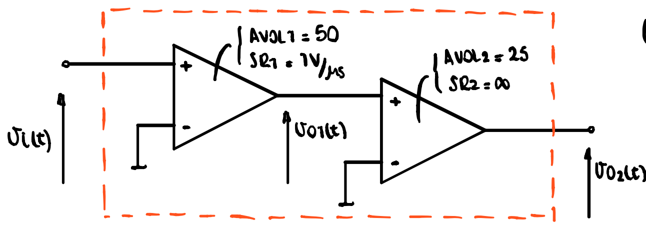
→ Queda igual

CASO 2) SR < MAX PENDIENTE



→ Al principio manda el SR y después sigue la curva.

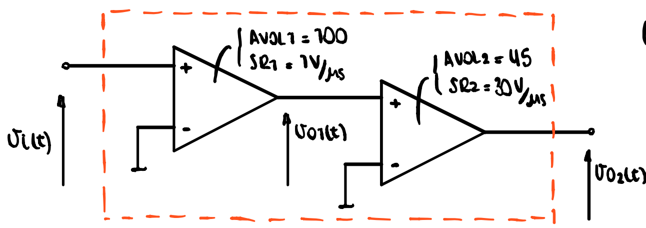
SLEW-RATE DE LA CASCADA DE OPAMPS



Calcular:

· $A_{VOL}\rfloor_{TOTAL} = A_{VOL1}\cdot A_{VOL2} = 1250$

· $SR\rfloor_{TOTAL} = SR_1\cdot A_{VOL2} = 25V/\mu s$



Calcular:

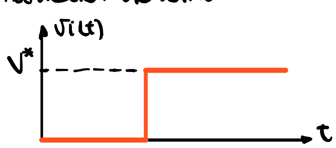
· $A_{VOL}\rfloor_{TOTAL} = A_{VOL1}\cdot A_{VOL2} = 4500$

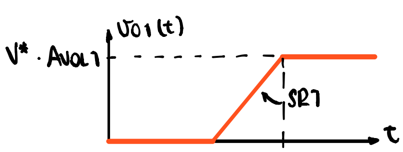
· $SR\rfloor_{TOTAL}$: evalúo $SR_1\cdot A_{VOL2} = 45V/\mu s > SR_2$

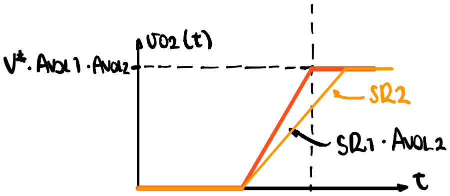
El mínimo es SR_2

$SR\rfloor_{TOTAL} = MIN\{SR_1\cdot A_{VOL2}, SR_2\} = 30V/\mu s$

Demostración SR TOTAL:







} Tengo que elegir el mínimo