Universidad Tecnológica Nacional
Facultad Regional Haedo
Departamento Ing. Electrónica
Electrónica Aplicada II

RESPUESTA EN FRECUENCIA DE UN CIRCUITO REALIMENTADO

Análisis de estabilidad para la configuración inversora y no inversora con AO.

Análisis de un circuito derivador ideal y real.

Diseño de un circuito derivador.

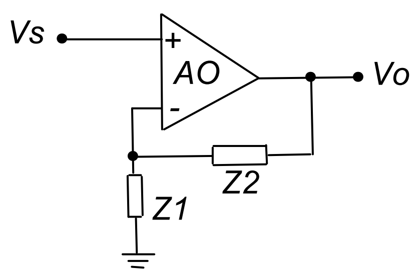
Análisis de un circuito integrador ideal y real.

PROFESOR: ING. HUGO APARICIO

J.T.P.: ING. ALEJANDRO POHL

RESPUESTA EN FRECUENCIA DE UN CIRCUITO REALIMENTADO

NO INVERSOR

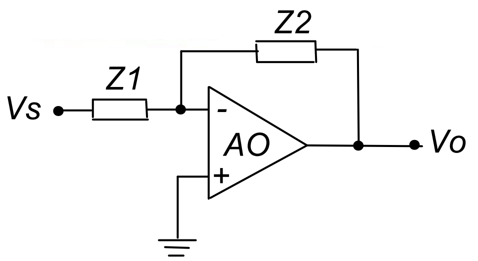


$$Aft = \frac{Vo}{Vs} = \frac{Z1+Z2}{Z1} = 1+\frac{Z2}{Z1}$$

$$\beta = \frac{1}{Aft} = \frac{Z1}{Z1+Z2}$$

$$\boxed{Af = \frac{Aft}{1+\frac{1}{\beta A}}} \quad (1)$$

INVERSOR



$$Aft = -\frac{Z2}{Z1} \qquad \beta' = \frac{Z1}{Z1+Z2}$$

$$\boxed{Af = \frac{Aft}{1+\frac{1}{\beta' A}}} \quad (2)$$

Vemos que el denominador de la ganancia realimentada se mantiene. Recordemos que β es real, pero A es complejo, tiene módulo y fase. Si analizamos el denominador de (1) y (2) y tratamos de buscar una singularidad estaremos en presencia de un oscilador pues Af tiende a infinito.

Condiciones de un oscilador.

Condición de Barkhausen (simultanea)

$$\begin{cases} |\beta . A| = 1 \\ \phi_{\beta A} = +/- 180^{o} \end{cases}$$

$$\boxed{1+\frac{1}{|\beta|.e^{j\phi_\beta}.\,|A|.e^{j\phi_A}} = 1+\frac{1}{\underbrace{|\beta|.|A|}_{1}.e^{\underbrace{j(\phi_\beta+\phi_A)}_{180^{o}}}} = 1-1=0}$$

Para determinar cuan lejos estoy de la condición de Barkhausen:

Margen de fase (MF): diferencia de fase del circuito respecto de +/- 180º cuando el módulo de β.A = 1 = 0dB

Margen de ganancia: cuan lejos estoy de la ganancia a 0dB.

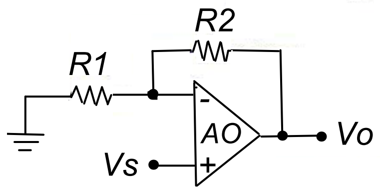
Condición de estabilidad

Se considera estable a un circuito si el MF $\geqslant$ 45º

Se propuso 45º debido a que en 30º la oscilación amortiguada es inestable desde el punto de vista de la distorsión, por lo tanto se adoptó 45º.

Ejemplo:

Circuito no inversor con Z1 y Z2 perteneciente a los reales.



a) Z1 = R1 Z2 = R2 R2 = 9.R1

AO = LM741 Av_{OL} = 100.000 fp = 10Hz

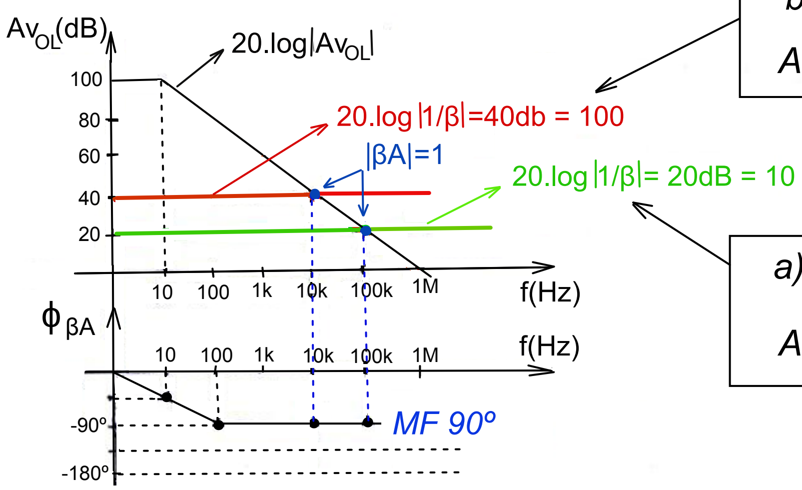
$$\boxed{Aft = \frac{R1+R2}{R1} = 1+\frac{R2}{R1} = 1/\beta = 10 \qquad \beta = 1/10 = 0{,}1}$$

$$\boxed{Af = \frac{Aft}{1+\frac{1}{\beta.A}}}$$

Donde: $\beta.A = |\beta.A|.e^{j\phi_{\beta A}}$

$$20.\log|\beta A| = 20.\log|A| + 20.\log|\beta|$$

$$\boxed{20.\log|\beta A| = 20.\log|A| - 20.\log|1/\beta|}$$



b) R2 = 99.R1

Aft = 100 = 1/β β = 0,01

a) R2 = 9.R1

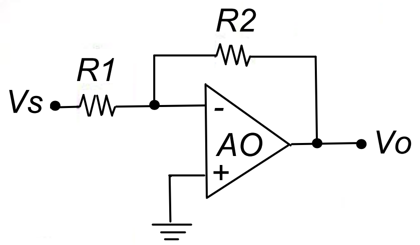
Aft = 10 = 1/β β = 0,1

Vemos que el circuito es estable hasta Aft=1=0dB, pues siempre el MF>45°, por lo tanto la conclusión es:

Si β pertenece a los reales y la ganancia a lazo abierto tiene un único polo, el circuito es estable.

Ejemplo

Circuito inversor

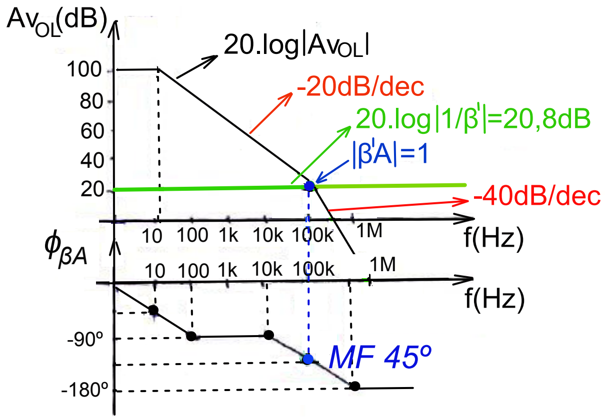


$R1 = 1K\Omega \quad R2 = 10K\Omega$

$Av = 100.000 \quad fp1 = 10Hz \quad fp2 = 100kHz$

$$\boxed{|Aft| = \frac{R2}{R1} = 10} \qquad \boxed{|Af| = \frac{Aft}{1 + \frac{1}{\beta' A}}}$$

$$\beta' = \frac{R1}{R1+R2} = 0{,}0909 \qquad 1/\beta' = 11 = 20{,}8dB$$



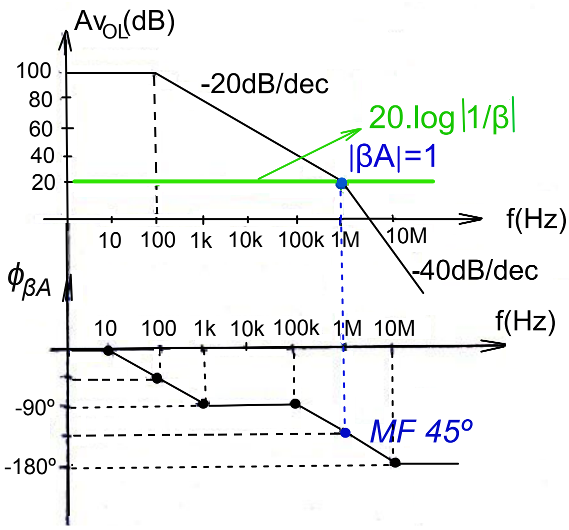
$$\boxed{20.\log|\beta' A| = 20.\log|A| - 20.\log|1/\beta'|}$$

Vemos en este ejemplo que las restricciones del MF, para que sea estable, estará en las ganancias pequeñas (< 20dB), puesto que si intersectamos una recta de mayor pendiente (-40dB/dec) el circuito se vuelve inestable, siempre considerando Z1 y Z2 resistivos.

En el ejemplo para Avf < 10 el circuito es inestable. Existen AO en los cuales el fabricante indica cual es la mínima ganancia que se puede utilizar.

La estabilidad de un circuito se analiza sin señal, con todas las entradas a masa, por lo tanto es independiente de la configuración utilizada.

La línea de AO LM101- 201- 301 tiene un pin-out que deja 2 patas para colocar un capacitor que genera el polo dominante. Si el capacitor es 10 veces menor que el usual (Cx=30pF en el LM741) o sea de 3pF se desplaza el polo una década con lo cual se aumenta el BW.

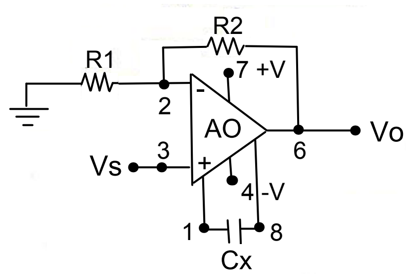


Configuración no inversora:

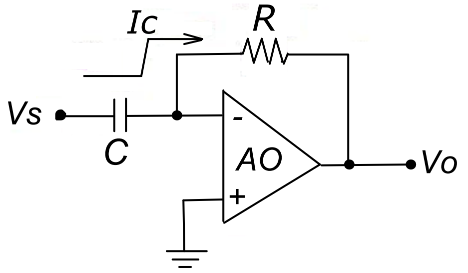
$R2 = 9.R1 \quad Av = 100.000 \quad Cx = 3pF$

$fp1 = 100Hz \quad fp2 = 1MHz$

1- 8 = terminales para capacitor polo dominante



Derivador ideal



$Z1 = 1/SC \qquad Z2 = R$

$$\boxed{Aft = -\frac{Z2}{Z1} = -SCR = \frac{Vo}{Vs}(s)}$$

$$\boxed{\left|Aft\right|_{dB} = \left|\frac{Vo}{Vs}\right|_{dB} = 20.\log\frac{\omega}{\omega o}}$$

$Vo(s) = -SCR.\ Vs(s)$

$$\boxed{Vo(t) = -CR.\frac{dVs(t)}{dt}}$$

Equivale a amplificar a cada frecuencia de forma diferente

Análisis de estabilidad

Ejemplo AO = LM741 C = 4,7nF R = 22kΩ

$$\boxed{\beta' = \frac{Z1}{Z1+Z2} = \frac{1/SC}{1/SC + R} = \frac{1}{1+SCR}}$$

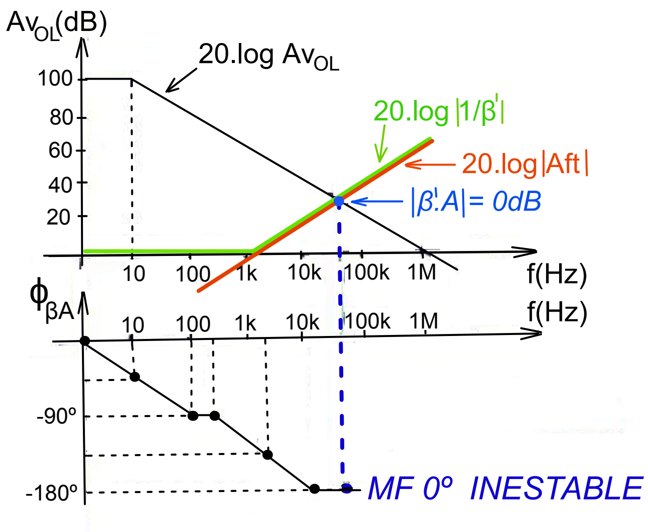
$\omega = 1/\tau = 9{,}67$ krad/s

$\tau = R.C = 103{,}4us$

$fp = 1{,}54kHz$

$$\boxed{1/\beta' = 1+SCR}$$

$$\boxed{\left|1/\beta'\right|_{dB} = 20.\log\sqrt{1+\left(\frac{\omega}{\omega o}\right)^2}}$$



En Av=f(frec) graficamos $|1/\beta'|$ para obtener el cruce con Av donde $|\beta'.A| = 0dB$.

En el gráfico de la fase representamos la fase de Av y de β'.

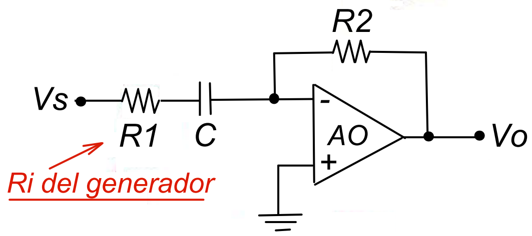
Vemos que es un oscilador, puesto que Z1 no es real, por lo tanto β tampoco es real, tiene parte compleja.

$\boxed{1/\beta' = (1+SCR)}$ no es la transferencia del circuito.

La transferencia del circuito es: $\boxed{Aft = \frac{Vo}{Vs}(s) = -SCR}$

Derivador real

El circuito debe tener un elemento que genere un cero en β' que compense la fase del polo y pueda recuperar el MF = 90º cuando $|\beta' A| = 1$.
Esto indica que el polo y cero deben estar a una década.



Si hacemos a Vs=0 vemos que oscilará, pero al inyectar señal no. Esto se debe a que la resistencia interna del generador produce un cero que compensa el polo de β'.

$$\beta' = \frac{Z1}{Z1+Z2} = \frac{R1+1/SC}{R1+R2+1/SC}$$

Si $\boxed{R2 \geqslant 10.R1 \rightarrow (R1+R2) \cong R2}$

$$\boxed{\beta' \cong \frac{R1+1/SC}{R2+1/SC} = \frac{1+SCR1}{1+SCR2}} \begin{array}{l} \rightarrow f_o = 15{,}4kHz \\ \rightarrow f_p = 1{,}54kHz \end{array}$$

Supongamos:

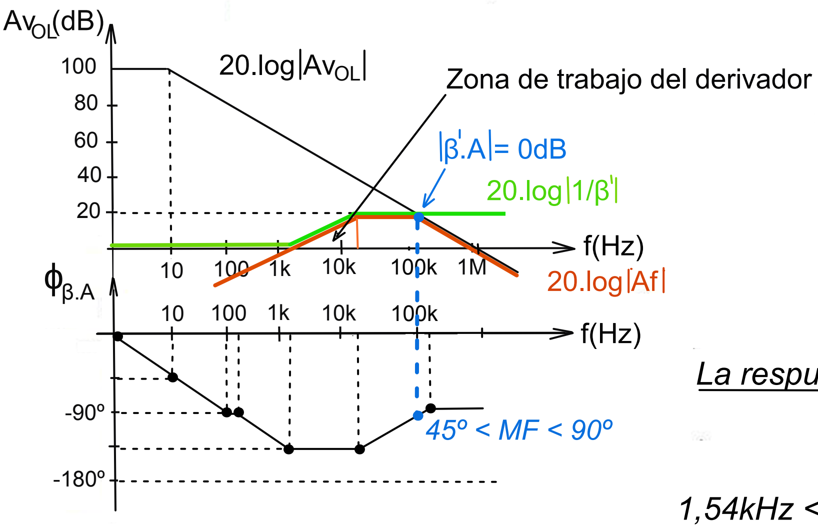
$R1 = 2{,}2k\Omega \quad R2 = 22k\Omega \quad C = 4{,}7nF$

$$\boxed{1/\beta' \cong \frac{1+SCR2}{1+SCR1}} \begin{array}{l} \rightarrow f_o = 1{,}54kHz \\ \rightarrow f_p = 15{,}4kHz \end{array}$$

La transferencia del circuito es:

$$Af = \frac{Vo}{Vs}(s) = -\frac{Z2}{Z1}$$

$$\boxed{Af = -\frac{R2}{R1+1/SC} = -\frac{SCR2}{1+SCR1}}$$



La respuesta en frec. del cto. es la siguiente:

f < 1,54kHz deriva y atenua

1,54kHz < f < 15,4kHz deriva y amplifica

15,4kHz < f < 100kHz amplifica

100kHz < f < 1MHz integra y amplifica

f > 1MHz integra y atenua

Los circuitos derivadores activos se utilizan en la gama de frecuencias que derivan y amplifican, por lo tanto si aplicamos un tren de pulsos rectangulares, el 98% de su potencia se encuentra en las 3 primeras armónicas.

En el caso de las señales cuadradas y triangulares se descomponen en armónicas impares.

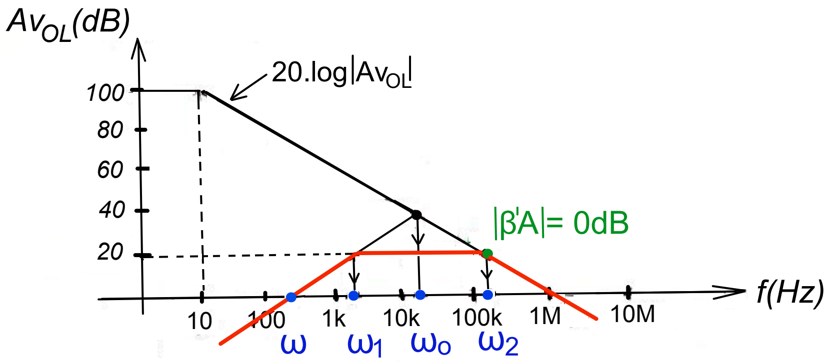
En todos los casos debe tenerse en cuenta que hasta la tercer armónica de la señal este dentro de la zona de trabajo en la cual el circuito deriva y amplifica.

Por lo tanto debemos conocer a la señal a derivar para poder trabajar dentro del rango de frecuencias de derivación y amplificación.

Diseño de un circuito derivador

Datos: Amplificador operacional y señal a derivar.

De lo visto anteriormente tenemos que:



ω = polo de $\beta' = (1+ SCR2)$

ω_1 = cero de $\beta' = (1+ SCR1)$

ω_2 = punto donde $|\beta' A| = 0dB$

ω_o = media geométrica de ω_1 y ω_2

Conviene que ω_2 este por lo mínimo a una década de ω_1 para que el cero de β' complete la fase de 90º, entonces en el punto de cruce de $|\beta'.A|$ el MF = 90º Si la distancia es mayor a una década el MF no aumenta y la ganancia disminuye. Si en cambio la distancia entre ω_1 y ω_2 es menor a una década, la ganancia aumenta y si el MF > 45º el circuito es estable.

Condiciones de diseño del derivador

$f_2 = 10\, f_1$

$f_o^2 = f_1 . f_2 \qquad f_o^2 = f_1 .10\, f_1 = 10\, f_1^2 \qquad f_1 = \dfrac{f_o}{\sqrt{10}}$

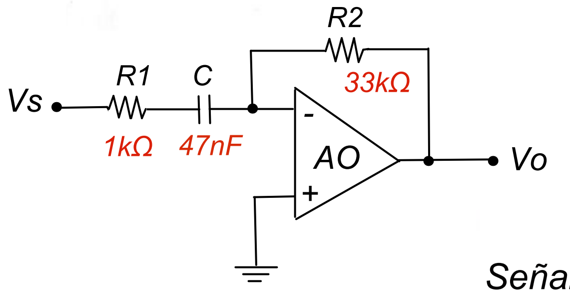
ω = (ω a derivar)/5 = ω'/5

ω' = pulsación angular o frec. de la señal a derivar

Ejemplo:

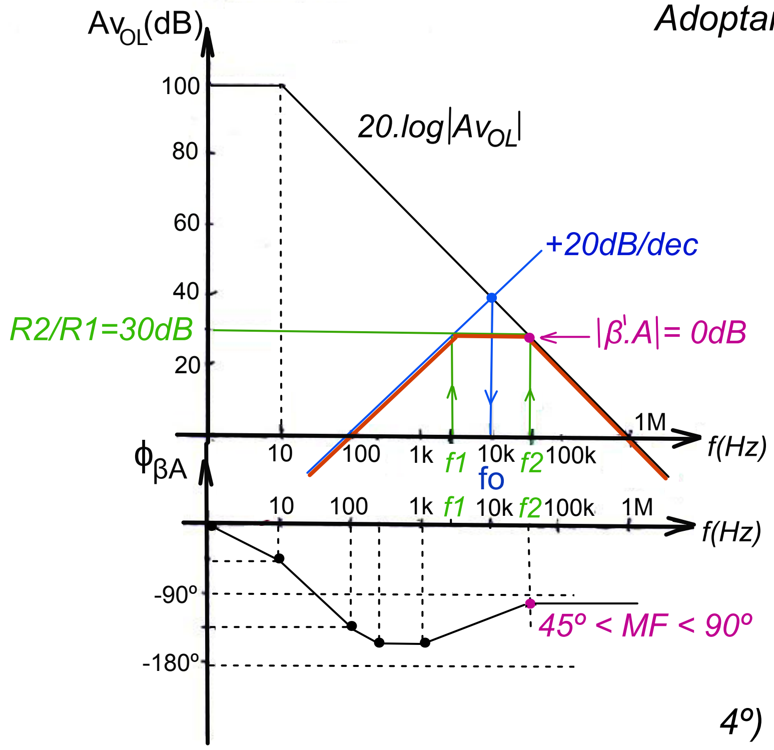
Datos: *AO: LM741* $\quad Av_{OL}$ *= 100.000* $\quad$ *fp = 10Hz*

Señal a derivar : 100.sen 3140 (rad/s).t (mV) $\quad$ *f = 500 Hz*



Señal a derivar f' = 500Hz

Adoptamos f = 100Hz



1º) En la frecuencia adoptada se traza una recta de +20dB/dec.

2º) Donde dicha recta corta a la ganancia del AO a lazo abierto obtenemos fo = 10kHz

$$\boxed{f1 = fo/\sqrt{10} = 3{,}16kHz \quad f2 = 31{,}6kHz}$$

3º) En f1 y f2 trazamos una vertical que cortan a las rectas de +20dB/dec y -20dB/dec

4º) En los puntos de intersección obtenidos trazamos una horizontal que determina la zona de solo amplificación obteniendo la relación R2/R1

De nuestro ejemplo:

R2/R1 = 30dB = 31,6

R2 = 31,6 R1 Adopto $\boxed{R2 = 33k\Omega \quad R1 = 1k\Omega}$

5º) Por último calculamos el valor de C a partir del polo o cero de β'

Polo de β'	ω_p= 1+SCR2	τ_p = C.R2	fp = 100Hz
Cero de β'	ω_o= 1+SCR1	τ_o = C.R1	fo = 3,16kHz

ω_p= 2.π.fp = 1/(C.R2)

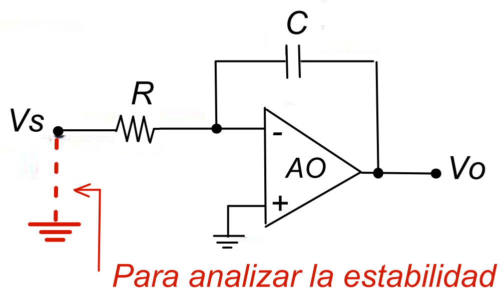
ω_o= 2.π.fo = 1/(C.R1)

$$\boxed{\begin{array}{l} C = 1/(2.\pi.fp.R2) = 48{,}2\ nF \\ C = 1(2.\pi.fo.R1) = 50{,}4\ nF \end{array}}$$

Señales de entrada y de salida del cto. derivador:

Entrada	Salida
seno	seno - 90º
cuadrada	tren de pulsos
triangular	cuadrada

Integrador ideal



$Z1 = R \qquad Z2 = 1/SC$

$$\boxed{Af = \frac{Aft}{1 + \frac{1}{\beta' A}}}$$

$$\boxed{Aft = -\frac{Z2}{Z1} = -\frac{1}{SCR}}$$

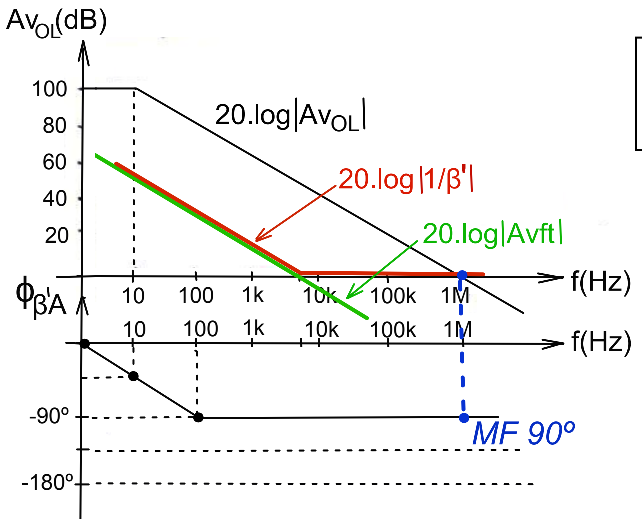
$$\boxed{\beta' = \frac{Z1}{Z1+Z2} = \frac{R}{R+1/SC} = \frac{SCR}{1+SCR}}$$

$$\boxed{1/\beta' = \frac{1+SCR}{SCR}}$$

Como β' tiene un polo y un cero el circuito es estable.

Ejemplo: AO = LM741 R = 1kΩ C = 22nF

$$\boxed{f = 1/(2.\pi.R.C) = 1/(6{,}28.1k\Omega.22nF) = 7{,}23kHz}$$



Transferencia del circuito:

$$\boxed{Aft = \frac{Vo}{Vs}(s) = -\frac{Z2}{Z1} = -\frac{1/SC}{R} = -\frac{1}{SCR}}$$

$$\boxed{Vo(s) = -\frac{1}{SCR}\, Vs(s)}$$

$$\boxed{Vo(t) = -\frac{1}{CR}\int Vs(t).dt}$$

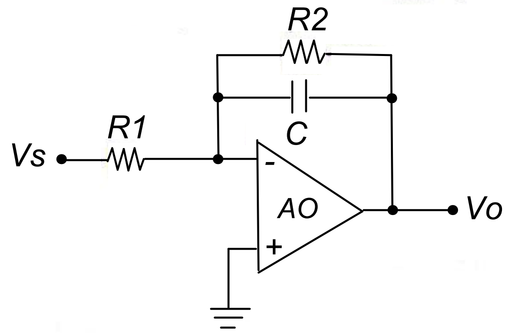
El hecho que sea "ideal" es debido a que al tener un capacitor entre la salida y la entrada, por la corriente de bias o de polarización del AO el capacitor se carga a Vcc y satura a la salida.

Señales de entrada y salida del circuito integrador:

Entrada	Salida
seno	seno +/-90º
cuadrada	triangular
triangular	senoidal

Integrador real

Para anular la carga del capacitor colocamos una R2 en paralelo al mismo, para que exista un camino para la continua.



R2 > R1 para que integre y amplifique

$$\boxed{Z1 = R1}$$

$$\boxed{Z2 = R2 // (1/SC) = \frac{R2/SC}{R2+1/SC} = \frac{R2}{1+SCR2}}$$

$$\beta' = \frac{Z1}{Z1+Z2} = \frac{R1}{R1+\dfrac{R2}{1+SCR2}} = \frac{R1.(1+SCR2)}{R2+R1.(1+SCR2)}$$

$$\beta' = \frac{R1+SCR1R2}{R1+R2+SCR1R2} \qquad \text{Si } \boxed{R2 \geqslant 10.R1 \rightarrow (R1+R2) \cong R2}$$

$$\boxed{\beta' \cong \frac{R1+SCR1R2}{R2+SCR1R2} \cong \frac{R1.(1+SCR2)}{R2.(1+SCR1)}} \qquad \boxed{1/\beta' \cong \frac{R2.(1+SCR1)}{R1.(1+SCR2)}} \quad (1)$$

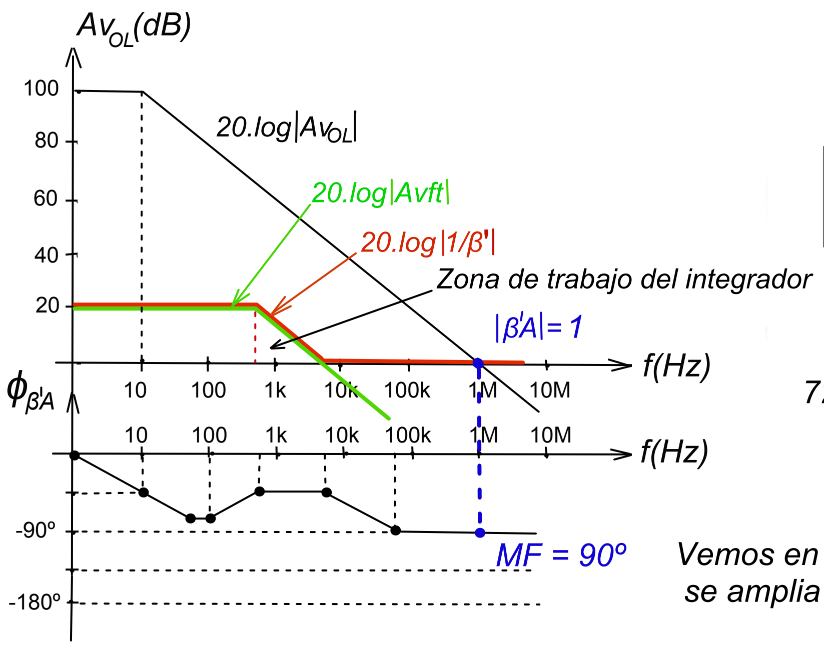
Ejemplo:

R1 = 1kΩ R2 = 10kΩ C = 22nF β' tiene: fo = 723Hz fp = 7,23kHz

De la fórmula (1) vemos que:

si S tiende a cero $1/\beta' = R2/R1 = 10 \rightarrow \boxed{20.\log|1/\beta'| = 20dB}$

si S tiende a infinito $1/\beta' = (R2/R1).(R1/R2) = 1 \rightarrow \boxed{20.\log|1/\beta'| = 0dB}$



La transferencia del circuito es:

$$\boxed{\frac{Vo}{Vs}(S) = -\frac{Z2}{Z1} = -\frac{R2}{R1}\cdot\frac{1}{(1+SCR2)}}$$

f < 723Hz	amplifica
723Hz < f < 7,23kHz	amplifica e integra
f > 7,23kHz	integra y atenua

Vemos en el gráfico que si la ganancia es >20dB se amplia la zona de trabajo del cto. integrador.

Vemos que en altas frecuencias el circuito integra la señal.
Esto significa amplificar a cada armónica con distintas amplitudes, a mayor frecuencia menor amplitud.
El circuito será utilizado con señales no senoidales.
Como a partir de una determinada frecuencia comienza a integrar, una señal triangular podrá tener mayor amplitud que la cuadrada inicial, puesto que el hecho de integrar es hacer una sumatoria a pesar que atenua.

Características del AO LF411: operacional con entrada de Jfet.

Igual pin-out que el LM741

$Iio = 25pA$ $Ibias = 50pA$ $Rinp = 10T\Omega$

$Av_{OL} = 200.000 = 106dB$ $RRMC = 100dB$

$SR = 15V/us$ $GWB = 4MHz$ $Cx = 10pF$ $Low\ Iout = 1{,}8mA$

Armónicos señal cuadrada, triangular y diente de sierra:

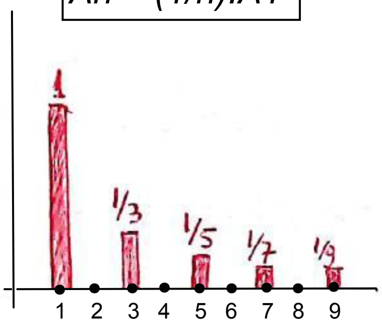
Cuadrada: contiene solo armónicos impares.

Triangular: contiene solo armónicos impares.

Diente de sierra: contiene todos los armónicos.

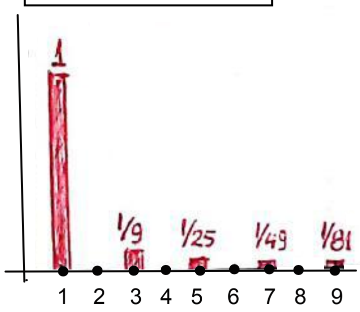
Señal cuadrada

$\boxed{An = (1/n).A1}$



Señal triangular

$\boxed{An = (1/n^2).A1}$



Señal diente de sierra

$\boxed{An = (1/n).A1}$