



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

**AMPLIFICADOR OPERACIONAL**

***Slew-rate.***

***PROFESOR: ING. HUGO APARICIO***

***J.T.P.: ING. ALEJANDRO POHL***

Slew-rate

El slew-rate es una característica de los AO y representa la velocidad de variación de la tensión de salida del AO o sea:

$$SR = \frac{dV_o(t)}{dt}$$

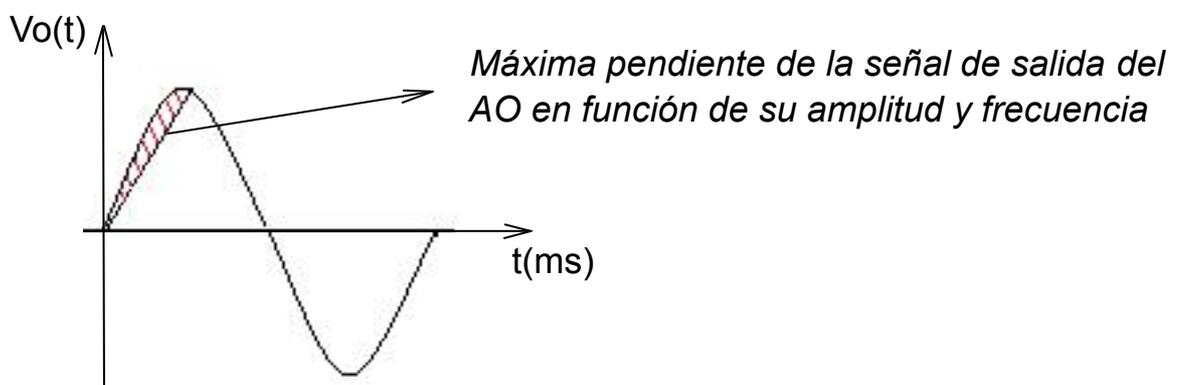
Dicho parámetro se mide en (V/ $\mu$ s) y cuanto mayor es el mismo, mejor es el AO, lo cual vamos a demostrar más adelante.

Veamos las características de los siguientes AO:

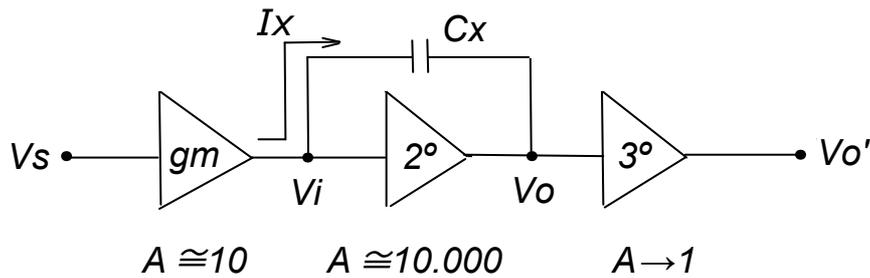
LM741 (AD bipolar)	}	$A_{VOL} > 100.000$	CA3140 (AD unipolar)	}	$A_{VOL} > 100.000$
		$R_i \text{ típ.} = 2M\Omega$			$R_i \text{ típ.} = 1,5T\Omega$
		$R_o = 75\Omega$			$R_o = 60\Omega$
		$PGB = 1MHz$			$PGB = 4,5MHz$
		$f_p = 10Hz \quad C_x = 30pF$			$f_p = 30Hz \quad C_x = 12pF$
		$I_{inp} \text{ típ} = 80nA$			$I_{inp} \text{ típ} = 0,5pA$
		$SR \geq 0,5V/us$			$SR \geq 9V/us$

En los AO, cuando se pide elevada excursión de salida o sea que se trabaja con señales de gran amplitud, se limita el ancho de banda y comienza a deformar la señal de salida.

Esto se debe a que la pendiente de la señal de salida depende de la frecuencia y amplitud de la misma, llegando un momento a partir del cual el AO no puede seguir la pendiente de dicha señal, observándose la siguiente deformación:



Veamos a continuación de quién depende el slew-rate.



1° etapa = amplificador diferencial.

2° etapa = amplificador de ganancia elevada con el capacitor de compensación de realimentación que fija el polo dominante del AO.

3° etapa = buffer que permite obtener una baja R output.

- a)  $I_x$  es la máxima corriente que suministra la 1° etapa del AO o sea el amplificador diferencial.
- b) La 2° etapa tiene una elevada ganancia por lo que  $V_o \gg V_i$  o sea que podemos considerar que  $V_i$  tiende a cero. Además dicha etapa tiene una elevada  $R_{input}$  por lo que la  $I_x$  suministrada por el amplificador diferencial circulará a través de  $C_x$ .

Por lo tanto tenemos que:

$$i_c(t) = C_x \cdot \frac{dV_c(t)}{dt}$$

Donde:  $i_c(t) = I_x$      $V_c(t) = V_o - V_i$     como  $V_i \rightarrow 0$      $V_c(t) \cong V_o$

$$I_x = C_x \cdot \frac{dV_o(t)}{dt} \quad \boxed{\frac{dV_o(t)}{dt} = \frac{I_x}{C_x} = SR} \quad (1)$$

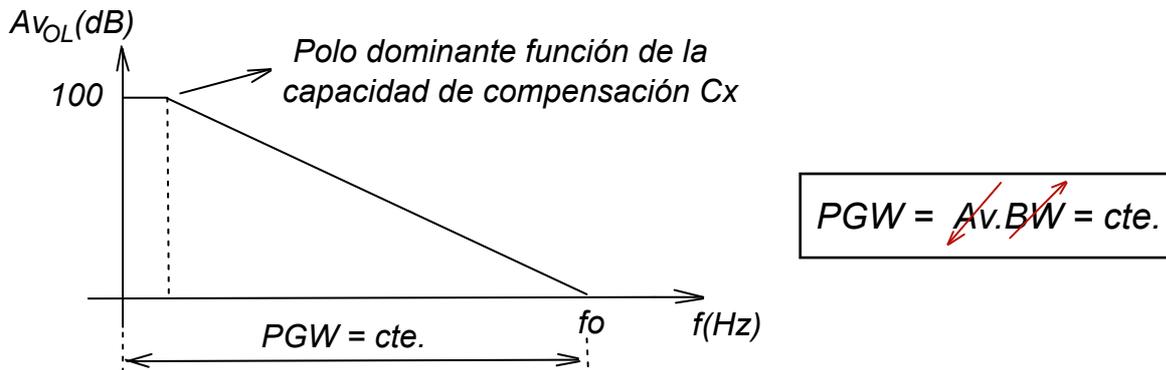
Para el AO LM741:     $I_x \cong 18\mu A$     y     $C_x = 30pF$

Por lo tanto: 
$$SR = \frac{I_x}{C_x} = \frac{18\mu A}{30pF} = 0,6V/\mu s$$

Vemos en la fórmula (1) que cuanto menor sea la capacidad de compensación  $C_x$  mayor es el SR.

A continuación obtenemos otra expresión de cálculo del SR.

En el siguiente gráfico vemos la respuesta en frecuencia del AO:



$PGW =$  producto ganancia por ancho de banda

$\omega_0$  o  $f_0$  es la frecuencia a la cual la ganancia de tensión es unitaria.

Del diagrama simplificado del AO:

$$\frac{\Delta V_o}{\Delta V_s} = A_v \quad V_o = \frac{I_x}{j\omega C_x} \quad I_x = V_s \cdot g_m$$

$$\Delta V_o = \frac{\Delta I_x}{j\omega C_x} \quad \Delta I_x = \Delta V_s \cdot g_m \quad \Delta V_o = \frac{\Delta V_s \cdot g_m}{j\omega C_x}$$

$$\frac{\Delta V_o}{\Delta V_s} = A_v = \frac{g_m}{j\omega C_x} \quad \left| \frac{\Delta V_o}{\Delta V_s} \right| = A_v = 1 = \frac{g_m}{\omega_0 \cdot C_x}$$

$$\boxed{\frac{1}{C_x} = \frac{\omega_0}{g_m}} \quad (2)$$

Reemplazamos (2) en (1) y nos queda:

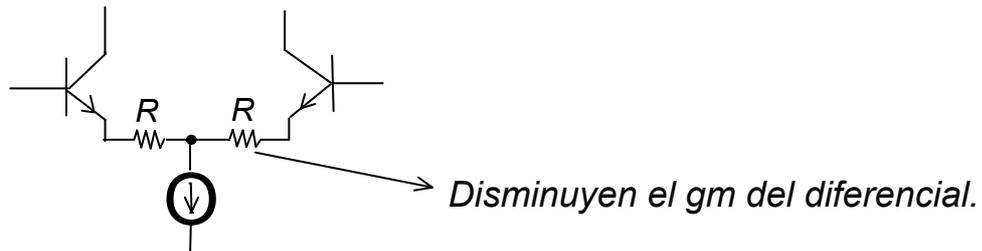
$$\boxed{SR = \frac{I_x \cdot \omega_0}{g_m}}$$

Vemos a partir de esta última ecuación, que cuanto mayor sea el SR mayor es el PGB del AO, o sea tenemos un mayor ancho de banda.

También observamos que cuanto menor sea el  $g_m$  mayor es el SR del AO.

Por lo tanto para aumentar el SR es conveniente que la 1° etapa del AO, o sea el amplificador diferencial, este hecho con transistores unipolares, pues el  $g_m$  el unipolar  $\ll$   $g_m$  del bipolar.

Otra solución es integrar resistencias en los emisores del amplificador diferencial, como se indica a continuación:



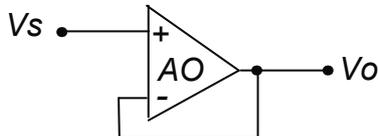
A través de la ecuación (2):

$$\frac{1}{C_x} = \frac{\omega_0}{g_m}$$

Vemos que al disminuir la capacidad de compensación, aumenta el PGB del AO, pues se desplaza el polo dominante que impone  $C_x$ .

Veamos a continuación como se vinculan la máxima frecuencia de trabajo sin deformación con el slew-rate del AO.

Para ello consideremos un buffer con AO:



$$V_s(t) = V_s \cdot \sin \omega \cdot t \text{ (v)}$$

$$V_o(t) = V_s \cdot \sin \omega \cdot t \text{ (v)}$$

$$V_o(t) = V_s(t)$$

$$SR = \frac{dV_o(t)}{dt} = \omega \cdot V_s \cdot \cos \omega \cdot t \text{ (v/s)}$$

La pendiente de la señal es máxima en el momento que cruza por 0V o sea cuando  $\omega \cdot t = 0$

$$\cos \omega \cdot t = \cos 0 = 1 \quad \rightarrow \quad SR = \omega \cdot \hat{V}_o = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \hat{V}_o$$

La ecuación anterior nos vincula el SR del AO con la  $\hat{V}_o$  y la máxima frecuencia a amplificar antes de la deformación producida por el SR.

$$\hat{V}_o = \frac{SR}{2 \cdot \pi \cdot f_{m\acute{a}x}}$$

$$f_{m\acute{a}x} = \frac{SR}{2 \cdot \pi \cdot \hat{V}_o}$$

Vemos que conocido el SR del AO,  $\hat{V}_o$  y  $f_{m\acute{a}x}$  son inversamente proporcionales, si deseamos mayor amplitud de  $V_o$  debemos limitar la  $f_{m\acute{a}x}$  y viceversa.

*Según lo visto, podemos obtener las siguientes conclusiones:*

*Cuanto mayor sea el slew-rate del AO tenemos:*

- 1º Mayor PGB (producto ganancia por ancho de banda)*
- 2º Posibilidad de trabajar con mayor excursión de señal de salida.*
- 3º Mayor frecuencia máxima de trabajo antes de la deformación.*

*Por lo tanto el slew-rate es un parámetro importante del AO.*