

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES

ELECTRÓNICA APLICADA II

SLEW - RATE

**Elaboro: Luciano Martin De Corso bajo la supervisión y corrección de los
docentes Ing. Eduardo Marchionni e Ing. Hugo Aparicio.**

Contenido

INTRODUCCIÓN.....	3
DE QUE DEPENDE EL SLEW-RATE	6
COMO MEDIR DE FORMA PRÁCTICA EL SLEW-RATE.....	11
CONCLUSIONES.....	12
BIBLIOGRAFÍA.....	12

INTRODUCCIÓN.

Para comenzar a entender el SR primero vamos a dar una definición de este y luego se realizarán algunas demostraciones de fórmulas que nos darán una mayor comprensión de este parámetro y la importancia de este a la hora de seleccionar un amplificador.

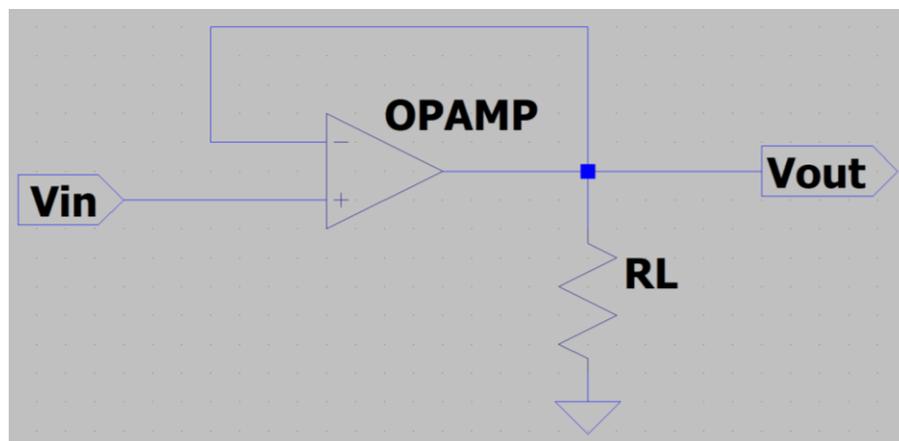
La definición formal del SLEW RATE es la velocidad con la que varía la señal de salida para un determinado amplificador. Su unidad es [V/uS] (Volts / tiempo). Matemáticamente lo podemos expresar como:

$$SR = \frac{dV_{out}(t)}{dt}$$

Porque es importante esto, básicamente para entender porque se producen deformaciones en nuestra señal de salida. Hasta el momento se habló en otras materias de amplificadores de baja señal donde este parámetro no se trató, pero cuando uno quiere diseñar amplificadores de señales fuertes es uno de los principales parámetros a tener en cuenta ya que, como veremos más adelante, nos pone limitaciones a la hora de seleccionar un dispositivo.

Como se menciona en el párrafo anterior, al momento no se ha tratado amplificadores de señales fuertes. ¿Pero que son señales fuertes? para explicarlo vamos a plantear un ejemplo y al mismo tiempo analizaremos las fórmulas llegando a una segunda definición de SR.

El esquema propuesto para analizar el SR y cerrar la parte introductoria es un amplificador operacional en modo seguidor.



Este tipo de amplificador al ser de ganancia unitaria nos asegura una máxima respuesta en frecuencia.

Para poder aprovechar al máximo un amplificador operacional debemos mantenernos en la zona de la pendiente de un polo único. Por lo que al momento de diseñarlos los fabricantes intentan que la respuesta del operacional tenga un solo polo. Con más de un polo puede haber problemas de estabilidad.

La ganancia de un amplificador con un solo polo en el dominio de Laplace está dada por la fórmula:

$$A(S) = \frac{V_{in}(S)}{V_{out}(S)} = \frac{A}{1+S\tau} \text{ [Ec. 1]}$$

Siendo:

A= Ganancia (Unitaria en el caso de análisis)

τ = Constante de tiempo del circuito. La podemos obtener sabiendo la frecuencia de operación como:

$$\tau = \frac{1}{2\pi f_o} \text{ [Ec. 2]}$$

Como se ha visto en otras materias, para que estemos trabajando en régimen permanente es necesario que hayan transcurrido 5τ .

Despejando de la Ecuación 1 la tensión de salida obtenemos:

$$V_{out}(S) = \frac{1}{1+S\tau} V_{in}(S) \text{ [Ec. 3]}$$

Suponiendo como señal de entrada un escalón unitario:

$$V_{in}(t) = V u(t)$$

Llevándola al dominio de Laplace:

$$V_{in}(S) = \frac{V}{S}$$

Reemplazando en la ecuación 3 nos queda:

$$V_{out}(S) = \frac{1}{1+S\tau} \frac{V}{S}$$

Y por último anti transformando para llevar al dominio del tiempo nos queda:

$$V_{out}(t) = V(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

Lo cual nos indica que nuestra tensión de salida ira creciendo exponencialmente llegando a un máximo de V en un determinado tiempo. Como mencionamos anteriormente, se considera que el tiempo en el que la señal queda establecida es en 5τ .

Para entender qué papel juega en esto el SR vamos a plantear un ejemplo numérico teniendo en consideración los valores típicos del operacional 741. Donde:

SR=0.5V/us (Dato del fabricante)

PGB=1Mhz (Considerando ganancia unitaria nuestra frecuencia máxima es 1 MHz)

Y como señal de entrada se propone un escalón unitario de 5V. Entonces con estos valores obtenemos:

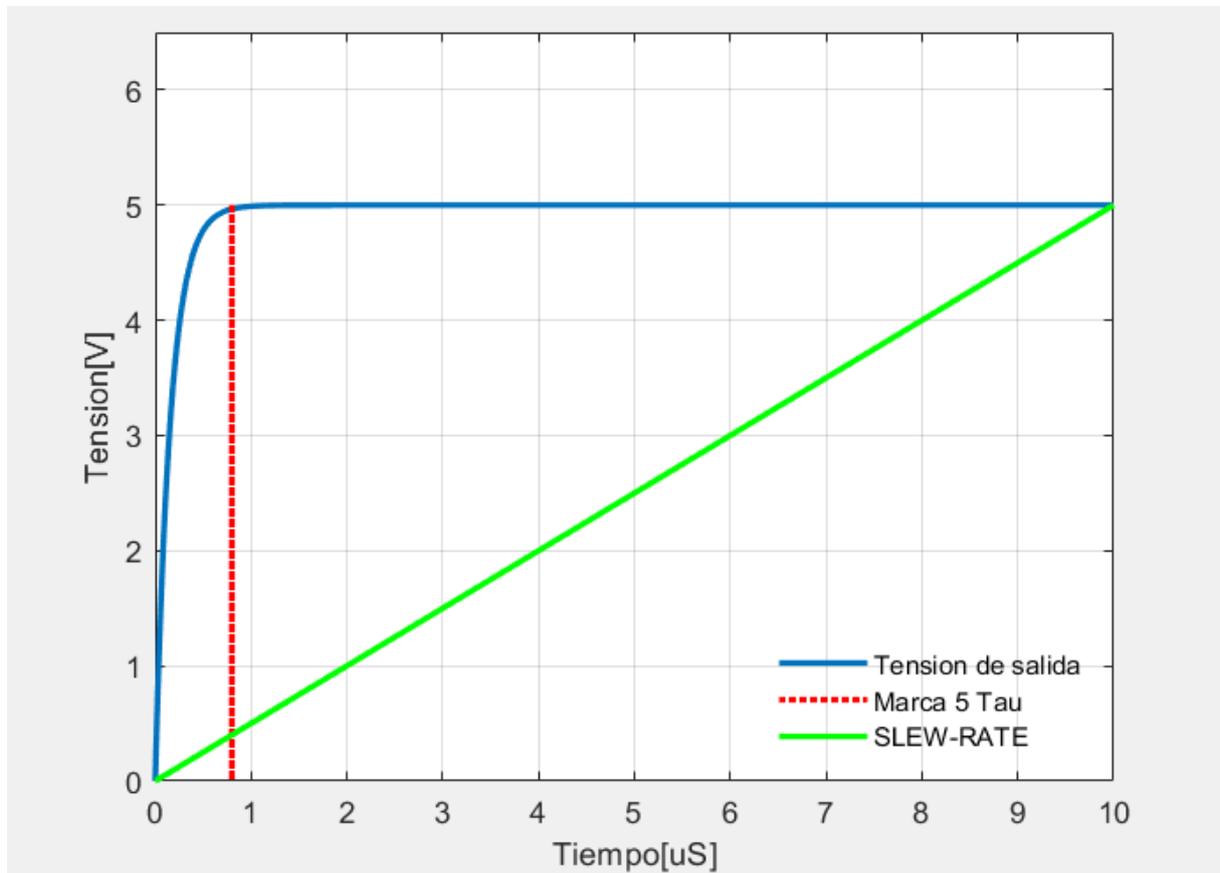
Con el Ecuación 2:

$$\tau = \frac{1}{2\pi f_o} = \frac{1}{2\pi 1\text{Mhz}} = 0.16\mu\text{S}$$

$$5\tau = 0.8\mu\text{S}$$

$$V_{out}(t) = 5V(1 - e^{-\frac{t}{0.16}})$$

Llevando esto a una grafica



En la gráfica podemos observar, en azul la tensión de salida en función del tiempo, observamos con la línea roja punteada que, transcurridos los 5 Tau, nuestra señal de salida aproximadamente alcanzo su valor.

Pero en la realidad esto no sucede y el motivo es debido al SR, este se dibujó con línea verde en el gráfico y como vimos en la primera definición que dimos de forma matemática es una recta con determinada pendiente que nos dice la velocidad de variación de nuestra señal de salida en función del tiempo. En este caso la señal de salida debe alcanzar 5V en un tiempo de 0.8 uS pero en ese lapso según el SR nuestra señal llegaría a 0.4V, una valor completamente alejado de lo que debería ser. Alcanzaría los 5V en 10uS, 10 veces más de lo que suponíamos.

Hasta ahora cuando trabajamos con un amplificador operacional al cual queremos sacarle una buena excursión a la salida y con valores de señal grande se limitaba el ancho de banda y la señal se deformaba. Justamente el problema radica en que la pendiente de la señal de salida depende de la frecuencia y de la amplitud de esta y en cierto punto el amplificador no puede seguir esa pendiente lo cual provoca esa deformación en la señal de salida. Es decir, nuestra señal de salida va a seguir la forma de la pendiente que tiene el SLEW RATE, si el valor de esta es superior.

Con esta demostración se explica o entiende porque se producen deformación en las señales de salida cuando trabajamos con amplificadores si no consideramos el SR.

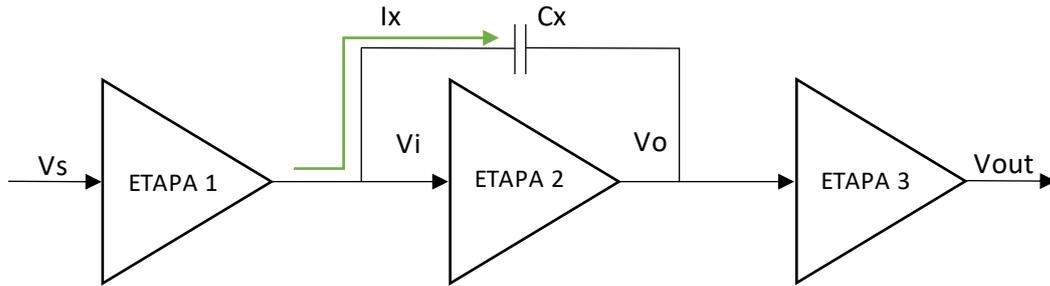
Cualquier señal de valor por debajo del SR no se vería deformada a la salida. Por lo que el SR nos da un límite cuando nos referimos a SEÑALES DÉBILES (por debajo del SR) o SEÑALES FUERTES (por encima del SR). Una gran incógnita que siempre se planteó hasta este momento, hasta donde se consideran señales débiles, la respuesta correcta es: "DEPENDE", el valor es relativo y va a estar dado en función del SR del dispositivo. Es importante tener en cuenta esta definición para seleccionar un amplificador ya que si estamos trabajando por encima de esta barrera que nos da el SR tenemos que considerar señales fuertes y el tratamiento de estas es diferente a los conceptos que se tienen para señales débiles.



DE QUE DEPENDE EL SLEW-RATE

Hasta acá, se demostró la importancia del SR a la hora de seleccionar un amplificador operacional, pero al ser un parámetro propio del dispositivo depende básicamente de como este diseñado.

Para analizar de que depende se plantea el siguiente diagrama en bloques simplificado de un amplificador operacional, como puede ser el 741:



La primera etapa, corresponde a un amplificador diferencia y es la que suministra la I_x a la segunda etapa.

La segunda etapa corresponde a la etapa de ganancia muy elevada y además contiene el capacitor de compensación de realimentación y este es el que fija el polo dominante del amplificador operacional.

La ultima etapa corresponde a un amplificador clase AB de ganancia complementaria.

Haciendo las siguientes consideraciones:

1 – I_x es la corriente de fuente de la etapa diferencial. Si tenemos en cuenta que la salida del diferencial es con carga activa toda la corriente se deriva a la segunda etapa.

2- La segunda etapa tiene elevada resistencia de entrada, por lo que la corriente circula solo por C_x y como la ganancia de esta etapa es muy elevada (10000 veces) consideramos la V_i (su tensión de entrada) tendiendo a 0.

Entonces tenemos:

La corriente en el capacitor responde a:

$$I_c(t) = C \frac{dV_c(t)}{dt}$$

Y teniendo:

$$I_c(t) = I_x \quad V_c(t) = V_o - V_i \text{ (Si consideramos } V_i = 0) \rightarrow V_c(t) = V_o \quad C = C_x$$

Nos queda entonces:

$$I_x = C_x \frac{dV_o(t)}{dt}$$

Recordando que:

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

Nos queda:

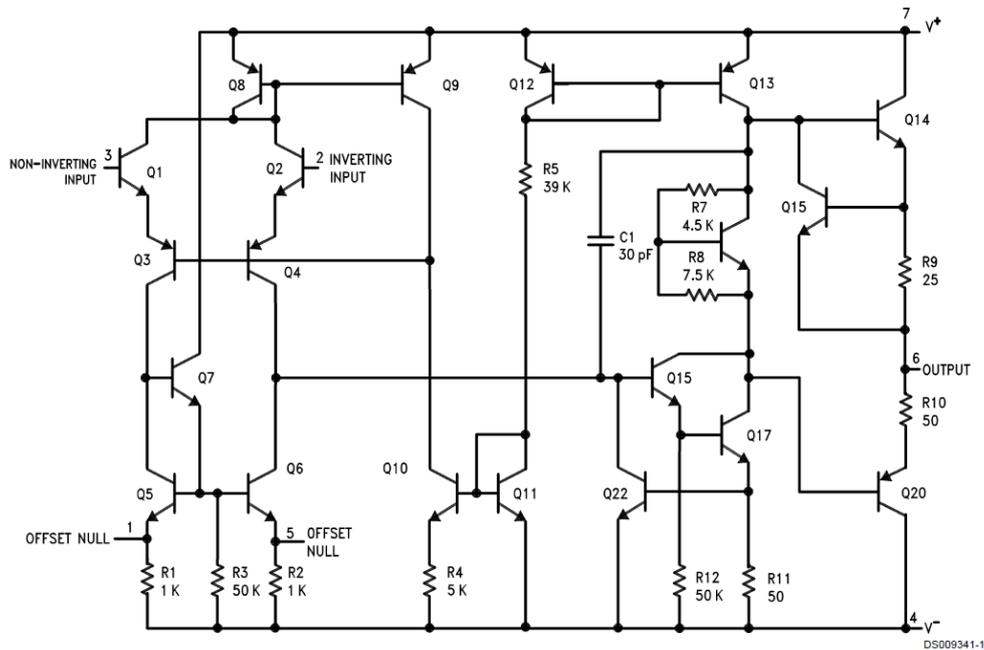
$$SR = \frac{dV_o(t)}{dt} = \frac{I_x}{C_x}$$

Con esta fórmula podemos concluir que el SR depende de la corriente que suministra la primera etapa y del capacitor de compensación.

SI BAJA EL CAPACITOR DE COMPENSACIÓN, SUBE EL SR.

Una aclaración importante en esta instancia es que, tal mencionamos anteriormente el SR en un operacional 741 es de $0.5V/\mu S$, pero recordando de EAI, la primera etapa nos daba una corriente de $18\mu A$, el capacitor complementario tiene un valor de $30pF$, si calculamos el SR nos da $0,6V/\mu S$. Valor que difiere de lo especificado en la hoja de dato, esto tiene una explicación y es la siguiente:

Recordando el esquemático:



Cuando forzamos al amplificador a dar señales elevadas, y al tenerlo en configuración seguidor, es decir la entrada inversora a la salida. Q2 pasa a un estado de saturación y entra a jugar un papel importante la capacidad parasita que hay en el colector, si bien es una capacidad baja 3 o 4 pF queda en paralelo con C1 (capacitor de compensación) y de un valor comparable con este y como vimos antes, la relación $Cx - SR$ es inversamente proporcional, en este caso aumentaríamos la capacidad por lo que el SR bajaría. Este es el valor que especifica el fabricante de $0.5V/\mu S$, que viene a ser el peor caso. Notar además si se observan las hojas de datos que el SR especificado por el fabricante también se mide a ganancia unitaria. Máximo ancho de banda.

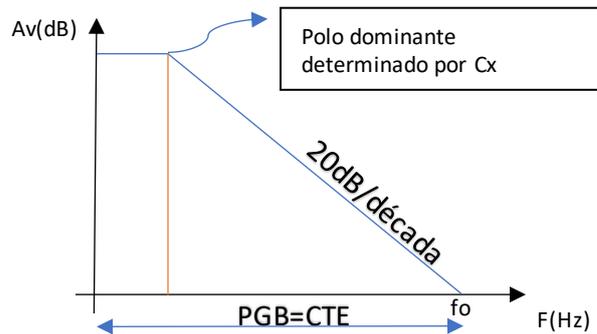
Otro ejemplo es el amplificador operación OP37, corresponde a un amplificador de bajo ruido, con mucha aplicación en instrumentación presenta un SR de $17V/\mu S$ con un PGB de 64MHz. Bastante elevado, pero requiere una ganancia mínima de 5 veces. Este integrado está diseñado a partir del OP27, su hermano menor, que presenta un SR de $2.8V/\mu S$ y un PGB de 8MHz. Como se puede observar entre estos integrados de la misma familia, hay versiones optimizadas para ganancias elevadas donde se mejora ampliamente el SR pero en ocasiones se deben cumplir algunos requerimientos.

Hasta acá, obtuvimos una formula y se demuestra que el SLEW- RATE depende fuertemente de la corriente suministrada por la primera etapa y del capacitor de compensación de la segunda etapa. Al

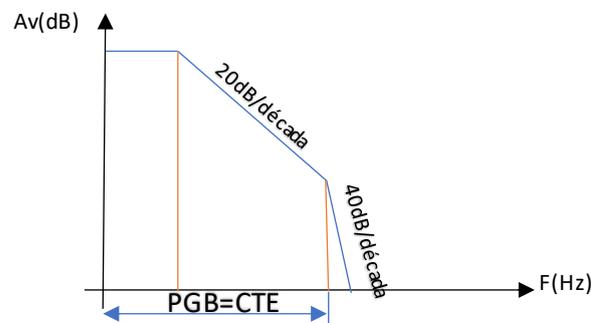
depender del capacitor de compensación, el cual nos determina el polo dominante del amplificador operacional, el SR también dependerá del ancho de banda.

A continuación, se demuestra cómo se relacionan el SR con el ancho de banda y cómo influye la primera etapa sobre el mismo.

Como ya se sabe, el PGB es constante mientras estemos trabajando en la zona de la pendiente de un solo polo, para verlo gráficamente



Este primer grafico representa un BODE de un sistema con un polo único, y se representa el PGB constante hasta la frecuencia de corte en donde la ganancia es unitaria.



Este segundo grafico representa un sistema con dos polos, el PGB será constante solo hasta la frecuencia del segundo polo.

Recordando la expresión:

$$PGB = Av \cdot BW = CTE$$

Sube la ganancia, baja el ancho de banda, y aumentamos el ancho de banda disminuimos la ganancia.

Retomando con el amplificador vamos a plantear una serie de ecuaciones para demostrar cómo se relación el SR con el ancho de banda y cómo influye la primera etapa.

Ya habíamos mencionado, que la corriente que se deriva a la segunda etapa era I_x , el valor de ella dependerá de la primera etapa y su valor se obtiene como:

$$I_x = V_s G_m \text{ (Ec.4)}$$

Siendo V_s la tensión de entrada de la primera etapa y G_m la transconductancia también de la primera etapa.

Y si planteamos la ganancia como incrementos de las señales tenemos:

$$A_v = \frac{\Delta V_o}{\Delta V_s} \text{ (Ec. 5)}$$

Además, la tensión a la salida (teniendo en cuenta las consideraciones que hicimos antes)

$$V_o = \frac{I_x}{j\omega C_x} \text{ (Ec.6)}$$

Entonces planteado las ecuaciones 4 y 6 como incrementos, e introduciendo 4 en 6 llegamos a:

$$\Delta V_o = \frac{\Delta V_s G_m}{j\omega C_x}$$

Si trabajamos esta ecuación:

$$\frac{\Delta V_o}{\Delta V_s} = \frac{G_m}{j\omega C_x}$$

Lo cual es igual a la ganancia tal como se planteó en la ecuación 5, y volviendo a que nuestra ganancia es unitaria para $\omega = \omega_o$;

$$A_v = 1 = \frac{G_m}{\omega_o C_x} \text{ (Ec. 7)}$$

Si reordenamos esta ecuación y multiplicamos ambos miembros por I_x nos queda:

$$SR = \frac{I_x}{C_x} = \frac{I_x \omega_o}{G_m}$$

Llegamos a una nueva expresión de SR que nos confirma lo que habíamos visto antes, que, si aumentaba I_x , aumentaba el SR pero además nos da otra información:

- Si aumentamos el PGB del amplificador aumentamos SR
- Si disminuimos el G_m de la primera etapa, también aumentamos el SR

Esto nos dice que una primera etapa con transistores de efecto de campo tendrá un SR mejor que en el caso de usar bipolares. O en el caso de los bipolares, se podía reducir G_m incorporando resistencias en los emisores del par diferencial.

Si reescribimos la ecuación 7:

$$\frac{1}{C_x} = \frac{\omega_o}{G_m}$$

Vemos que si achicamos la capacidad de compensación aumentamos el PGB del amplificador ya que estamos desplazando el polo que impone el capacitor.

Por ultimo y habiendo mencionado que el SR depende de la frecuencia, vamos a demostrar cómo se vinculan y a llegar a otra expresión conocida.

Usando como ejemplo en nuestra entrada una señal senoidal:

$$V_s(t) = V_s \cdot \text{Sen}(wt)$$

Por lo que nuestra salida será:

$$V_o(t) = A V_s \cdot \text{Sen}(wt)$$

$$V_o(t) = V_o \text{ Sen}(wt)$$

Entonces si derivamos esta expresión (por definición de SR como planteamos al principio) nos queda:

$$SR = \frac{dV_o}{dt} = w \cdot \text{Cos}(w \cdot t)$$

El SR es un dato del fabricante, y este siempre se debe cotejar con el peor caso. Para el ejemplo planteado el peor caso es cuando la señal cruza por 0, es decir cuando $t=0$ ya que el coseno vale 1.

$$SR = \widehat{V}_o \cdot w = 2\pi f \widehat{V}_o$$

Esta última expresión vincula el SR con la frecuencia y con el valor máximo a la salida, lo cual por lo que habíamos visto antes, nuestro SR debería superar lo que está a la derecha de la expresión.

Entonces conociendo la frecuencia de trabajo podemos obtener la máxima tensión que podemos tener a nuestra salida o sabiendo la tensión necesaria a la salida podemos saber con qué frecuencia máxima podemos trabajar

$$\widehat{V}_o = \frac{SR}{2\pi f_{MAX}}$$

$$f_{MAX} = \frac{SR}{2\pi \widehat{V}_o}$$

Esta última expresión se conoce como FULL POWER RESPONSE.

Queda demostrado que el SR nos vincula la frecuencia máxima de trabajo con la máxima tensión que puedo tener a la salida. Entonces conociendo las condiciones necesarias, puedo con un simple calculo verificar si el dispositivo cumple con los requisitos.

Este análisis es válido para cualquier señal que coloque a la entrada, simplemente debemos evaluar si nuestra señal a la salida cumple con la limitación del SR. En el caso de señales poli armónicas, deberíamos verificar para las primeras 3 armónicas, las cuales según el teorema de Parsevall representan el 98% de nuestra señal.

COMO MEDIR DE FORMA PRÁCTICA EL SLEW-RATE

Para poder medir el SR en un laboratorio, podemos simplemente con un osciloscopio analizar la señal de salida, inyectando una señal lo suficientemente elevada para romper la barrera y obtener la pendiente.

En el caso de una cuadrada, vamos a ver que la misma tendrá un determinado crecimiento hasta que se establezca y allí podemos sacar la pendiente.

En el caso de una senoidal, la misma tomará una forma triangular, lo cual nos dará la pendiente correspondiente al SR.

Esto es válido para el crecimiento de la señal como para la caída de esta. Puede que no sean iguales en ambos casos, pero la diferencia se puede deber a alguna capacidad parasita y es mínima.

CONCLUSIONES

Como se fue analizando, el SR es un parámetro fundamental a la hora de analizar un amplificador. Este nos limita las posibilidades de operar con determinadas frecuencias y tensiones a la salida si queremos estar dentro de la teoría de las señales débiles, que es lo que se fue aprendiendo a lo largo de la carrera en las diferentes materias.

Otras consideraciones es que el SR es un indicador de algunos parámetros del operacional.

Como fuimos viendo:

Mayor SR:

- Mayor PGB tendrá nuestro amplificador, por ende, posibilidad de operar con frecuencias mayores.
- Mayor excursión a la salida de nuestro dispositivo

BIBLIOGRAFÍA

El documento se realizó utilizando bibliografía brindada por la catedra de Electrónica Aplicada II.

LM741 Data Sheet – NATIONAL SEMICONDUCTOR.