



**Objetivos**

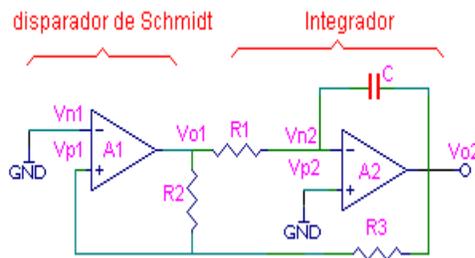
- Estudiar algunos circuitos de relajación.
- Estudiar aplicaciones para generadores de onda triangular y cuadrada.

**Equipo necesario**

- Osciloscopio con los accesorios necesarios.
- Multímetro.
- Fuente DC de 35volt.
- Cables.
- Resistencias.
- Amplificador 741.
- Condensador.

**Generador de onda triangular**

El siguiente circuito es un generador de onda triangular, está formado por una etapa (A1) donde hay un amplificador con realimentación positiva y una segunda etapa (A2) donde tenemos un circuito integrador.



**Figura 1.** Circuito que permite obtener una señal triangular

El voltaje de salida para el circuito integrador como se ha estudiado está dado por:

$$v_{02} = -\frac{1}{CR_1} \int v_{01} dt \quad (1)$$

En el primer amplificador se presenta una doble realimentación Vo1 a través de R2 y Vo2 a través de R3. Como se puede ver en el circuito la corriente que pasa por las resistencias R2 y R3 es la misma, entonces:

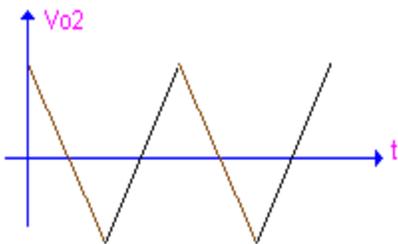
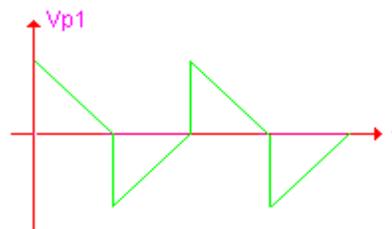
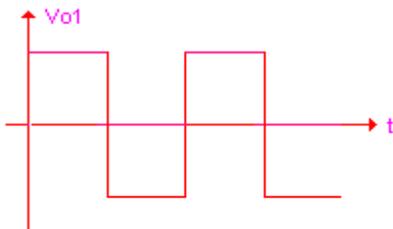
$$\frac{v_{02} - v_{p1}}{R_3} = \frac{v_{p1} - v_{01}}{R_2}$$

de donde: 
$$v_{p1} = \frac{R_2 v_{01}}{(R_2 + R_3)} - \frac{R_3}{CR_1(R_2 + R_3)} \int v_{01} dt \quad (2)$$

Para hacer un análisis es necesario suponer que la salida del primer amplificador A1 está a Vo1 = +Vcc. (Voltaje de saturación). Como se puede observar en el circuito integrador Vo2 es una señal variable en el tiempo (recta de pendiente positiva), que para un determinado instante de tiempo t, hace que la señal que Vp1 sea nula, quedando el voltaje Vp2 dado por:

$$v_{p1} = \frac{R_2 v_{01}}{(R_2 + R_3)} - \frac{R_3 K t}{CR_1(R_2 + R_3)} \quad (3)$$

Siendo K la pendiente de la recta. Esto ocasiona un cambio en la salida del primer amplificador a -Vcc (Vo1=-Vcc) que al ser integrado produce una señal lineal de pendiente negativa. Este hecho se repite cada vez que Vp1 pasa por cero.



El período de la señal triangular es dos veces el tiempo necesario para producir una conmutación del primer amplificador, esto es:

$$t = \frac{2C R_1 R_2}{R_3} \quad (4)$$

### Análisis práctico

- Monte el circuito anterior con los siguientes valores:

$$R_1 = 10K\Omega$$

$$R_2 = 33K\Omega$$

$$R_3 = 10K\Omega$$

$$C = 0.01mF$$

- Dibuje las señales  $V_{o1}$ ,  $V_{o2}$  y  $V_{p1}$ .
- Mida los voltajes de pico y la frecuencia de cada una de las señales obtenidas.
- Repita los numerales anteriores para un condensador mayor y otro menos a  $C=0.01\mu F$ .
- Para el circuito donde obtuvo mejor la onda triangular. Cambie la resistencia de  $33 K\Omega$  por un potenciómetro de este valor o cercano a este valor. Grafique la amplitud de la señal triangular en función de la frecuencia.
- Calcule el ancho de banda del generador (intervalo de frecuencias donde se observa una señal triangular bien definida y no atenuada a la mitad del valor de amplitud máximo).

### Generador de onda cuadrada

El siguiente circuito es un oscilador de relajación hecho con un amplificador operacional con realimentación positiva. La tensión en la entrada no inversora del amplificador operacional es el resultado de acoplar la tensión de salida a través de un divisor de resistencias compuesto de  $R_1$  y  $R_2$ . La tensión en la entrada inversora se desarrolla como parte de una combinación  $RC$ . Si la entrada diferencial es positiva, la salida del amplificador operacional se satura cerca del valor positivo de la fuente de alimentación. Por el contrario, si la entrada diferencial es negativa, la salida se satura cerca del valor negativo de la fuente de alimentación.

Cuando la salida se halla en un valor positivo, el capacitor se carga hacia este valor en forma exponencial con una constante de tiempo  $RC$ . En algún punto, este crecimiento en la tensión de la entrada inversora hace que el amplificador operacional cambie al otro estado, donde la tensión de salida es negativa. Entonces el capacitor empieza a descargarse hacia este valor negativo hasta que la entrada diferencial se vuelve negativa.

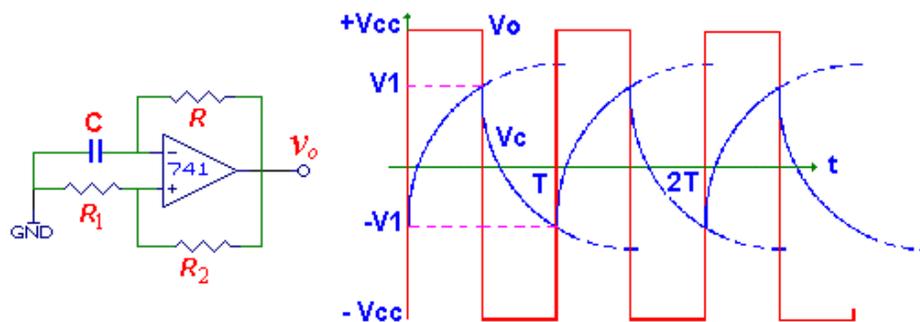


Figura 2 Circuito de relajación que permite obtener una señal cuadrada

Planteando la ecuación para el lazo no inversor tenemos:

$$\frac{0 - v_p}{R_1} = \frac{v_p - v_0}{R_2} \quad (5)$$

Los niveles de disparo vienen dados por:

$$v_1 = v_p = \frac{R_1 v_0}{R_1 + R_2} = \frac{R_1 V_{cc}}{R_1 + R_2} \quad (6)$$

La ecuación diferencial para  $V_n$  se puede tomar directamente del esquema del circuito, y es:

$$\frac{dv_n}{dt} = \frac{v_0 - v_n}{RC} \Rightarrow \int_{v_{n_0}}^{v_{n_f}} \frac{-dv_n}{(v_0 - v_n)} = - \int_0^t \frac{dt}{RC}$$

Integrando tenemos:

$$\ln[v_0 - v_n] \Big|_{v_{n_0}}^{v_{n_f}} = \frac{-t}{RC} \quad t = -RC \ln \left[ \frac{v_0 - v_{n_f}}{v_0 - v_{n_0}} \right] \quad (7)$$

Tomando las condiciones iniciales y finales de la entrada inversora tenemos:  $v_n(0) = -\frac{R_1 V_{cc}}{R_1 + R_2}$   $v_n(t) = \frac{R_1 V_{cc}}{R_1 + R_2}$

Mientras que la salida debe estar en:

$$v_0 = V_{cc}$$

El nivel de disparo se alcanza después de un tiempo  $t$  dado por:

$$t = -RC \ln \left[ \frac{V_{cc} - R_1 V_{cc} / (R_1 + R_2)}{V_{cc} + R_1 V_{cc} / (R_1 + R_2)} \right] = -RC \ln \left[ \frac{R_2}{2R_1 + R_2} \right]$$

El periodo es, entonces:

$$T = 2t = -2RC \ln \left[ \frac{R_2}{2R_1 + R_2} \right] \quad (8)$$

Para  $R_1 = R_2$  se obtiene:

$$T = 2t = 2RC \ln 3 \approx 2.2RC \quad (9)$$

La frecuencia de oscilación es el recíproco del período anterior:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{0.455}{RC} \text{ Hz} \quad (10)$$

Esta ecuación se basa en la teoría del amplificador operacional ideal. Si la frecuencia es muy alta, la ganancia real del amplificador operacional puede reducirse con aumentos en la frecuencia, provocando así el error en esta ecuación.

### Análisis Práctico

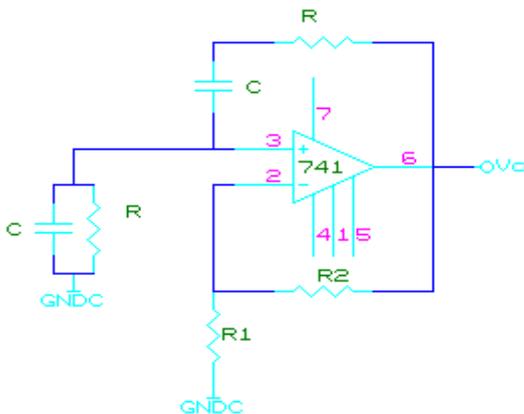
- Monte el circuito anterior con los siguientes valores:

$$\begin{aligned} R &= 20 \text{ K}\Omega & R_2 &= 30 \text{ K}\Omega \\ R_1 &= 10 \text{ K}\Omega & C &= 0.01 \mu\text{F} \end{aligned}$$

- Dibuje la señal Vo.
- Mida el voltaje de pico y la frecuencia de la señal.
- Repita los numerales anteriores para un condensador mayor y otro menor a  $C=0.01 \mu\text{F}$ .

### Generador de onda Senoidal (Oscilador de puente de Wien)

Las propiedades de selección de frecuencias del puente de Wien estudiadas en la teoría son muy adecuadas para la red de realimentación de un oscilador. El oscilador de puente de Wien se utiliza mucho en los instrumentos de laboratorio de frecuencia variable llamados generadores de señales.



Del circuito tenemos las siguientes ecuaciones que permitirán hallar el  $\beta$  de la red de realimentación:

$$\frac{0 - v_n}{R_1} = \frac{v_n - v_o}{R_2} \Rightarrow v_n = \frac{v_o R_1}{R_1 + R_2}$$

$$\frac{0 - v_p}{(1/R + sC)^{-1}} = \frac{v_p - v_0}{(R + 1/sC)} \Rightarrow v_p = \frac{sCRv_0}{1 + 3sCR + (sCR)^2}$$

Como:

$$A = \frac{v_0}{v_p - v_n} \quad y \quad A\beta = 1$$

Reemplazando los valores de Vn y Vp en la expresión de la ganancia y teniendo en cuenta el criterio de Barkhausen, se tiene:

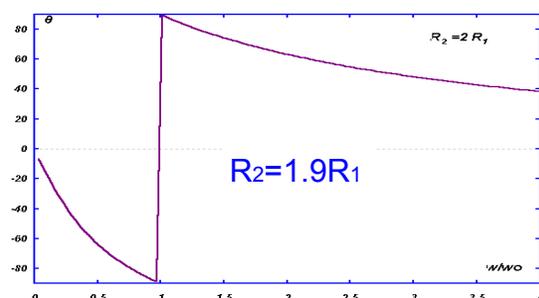
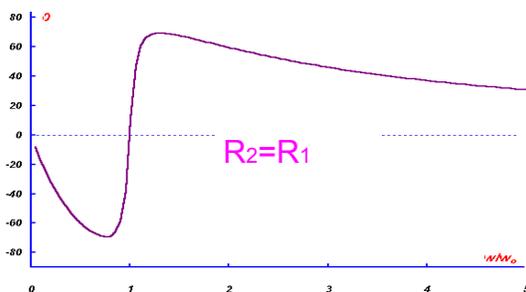
$$\beta = \frac{sCR}{1 + 3sCR + (sCR)^2} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{1}{3 + j(\omega/\omega_0 - \omega_0/\omega)} - \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

donde  $\omega_0 = 1/CR$  que es la frecuencia de oscilación del puente, racionalizando tenemos:

$$\beta = \frac{-j(1 + R_2/R_1)(\omega/\omega_0 - \omega_0/\omega) + [3(1 + R_2/R_1) - 9 - (\omega/\omega_0 - \omega_0/\omega)^2]}{(1 + R_2/R_1)(9 + (\omega/\omega_0 - \omega_0/\omega)^2)}$$

La rotación de la fase se halla racionalizando la ecuación y calculando la tangente del ángulo de fase.

$$\tan \alpha = \frac{-(1 + R_2/R_1)(\omega/\omega_0 - \omega_0/\omega)}{[3(1 + R_2/R_1) - 9 - (\omega/\omega_0 - \omega_0/\omega)^2]}$$



Como se puede ver el ángulo de rotación de fase varía fácilmente en el circuito de realimentación del puente de Wien con el valor de  $R_2$ , permitiendo cubrir un amplio dominio de frecuencias. Si  $\omega = \omega_0$  y  $R_2 = 1.9R_1$

$$|\beta| = \left| \frac{1}{3} - \frac{1}{2.9} \right| = 0.0114$$

de acuerdo al criterio de Barkhausen la ganancia A debe ser:

$$|A| = 87.719$$

Para frecuencias próximas a la resonancia el ángulo de fase resulta:

$$\tan \alpha \approx \frac{(1 + R_2 / R_1)}{[9 - 3(1 + R_2 / R_1)]} (\omega / \omega_0 - \omega_0 / \omega)$$

Si, por ejemplo,  $R_2 = 1,9 R_1$ , el coeficiente del término de frecuencia de la ecuación es igual a 9,7. Por comparación, la expresión correspondiente del oscilador por rotación de fase es, después de racionalizar la ecuación de  $\beta$ .

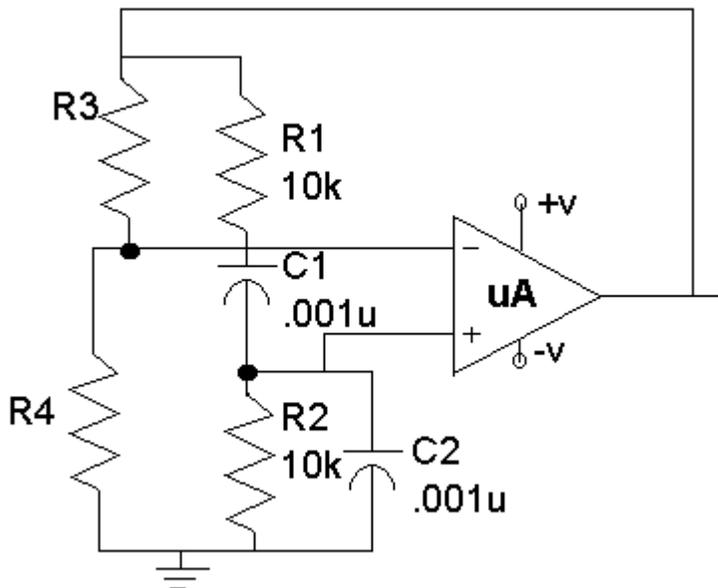
$$\tan \alpha \approx \frac{\sqrt{6}}{5} (\omega / \omega_0 - \omega_0 / \omega)$$

En donde se ha utilizado la frecuencia característica del circuito para introducir  $\omega_0$ . El factor numérico de la ecuación anterior es solo 0.49, siendo 20 veces menor que el correspondiente al caso del puente de Wien.

### **Análisis Práctico**

- Monte el generador sinusoidal siguiente:

El más general es el de puente de Wien, en donde  $R_1$  y  $C_1$  forman una red de atraso y  $R_2$  y  $C_2$  una red de adelanto. A bajas frecuencias predomina la red de adelanto. Al crecer la frecuencia crece el voltaje de salida. En alguna frecuencia se impone la red de atraso y el voltaje de salida se reduce.



### **ANÁLISIS PRÁCTICO:**

Tenga en cuenta que  $R_3=2R_4$ , observe y tome los datos. Si  $F=1/2\pi RC$  calcule R y C para  $F=20\text{kHz}$ .

### ***Simulación en PSpice***

Simule los siguientes circuitos:

- Generador de onda triangular
- Generador de onda cuadrada
- Puente de Wien (utilice los valores de resistencias y condensadores que usó en la práctica)

Haga una comparación entre las gráficas obtenidas en la simulación y en la práctica.

Anexe estas gráficas a su informe.

### ***Informe***

El informe debe incluir:

- Todos los cálculos pedidos.
- Tablas con las medidas sugeridas.
- Las graficas teóricas y las de simulación.
- Análisis de resultados y causas de error.
- Conclusiones.