

PRÁCTICA 3

OSCILADORES

Duración estimada: 2 semanas

Objetivos de la práctica:

1. Conocer la teoría básica de osciladores.
2. Familiarizarse con algunos esquemas clásicos en la implementación de osciladores.

3.1. Oscilador de relajación

Los osciladores de relajación utilizan el tiempo de carga y descarga de un condensador a través de una resistencia como referencia para generar una señal periódica. La idea detrás de todos ellos es hacer funcionar el condensador entre dos niveles conocidos de tensión, digamos V_1 y V_2 , de manera que cuando el condensador alcanza V_1 , a la salida se fije un valor V_H , que permanecerá hasta que el voltaje en el condensador llegue a V_2 . En este momento la salida conmutará a V_L . Repitiéndose este proceso se consigue un oscilador de onda cuadrada. La **Figura 1** trata de ilustrar este funcionamiento.

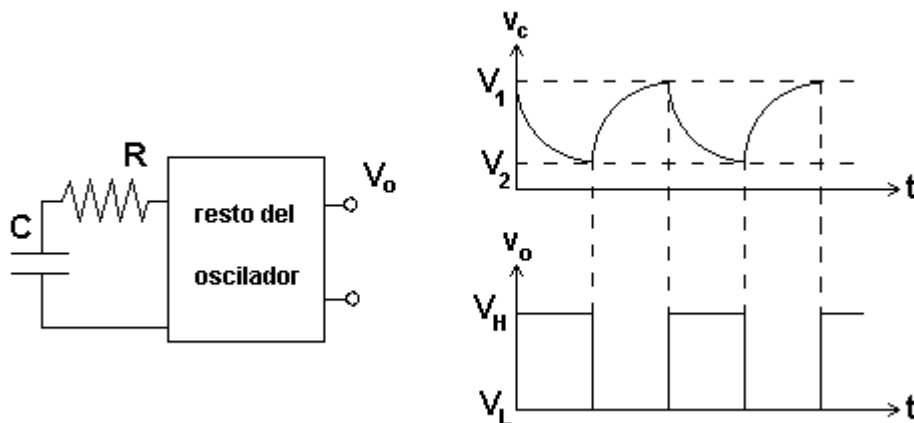


Figura 1: Funcionamiento de un oscilador de relajación

Un posible montaje para implementar un oscilador de este tipo se muestra en la **Figura 2**. Se trata de un montaje sencillo que se realiza con dos inversores. Aunque es difícil hacer un buen diseño con estos dispositivos muchas veces son rentables desde el punto de vista del número de componentes (normalmente un único integrado contiene 6 inversores). Para conseguir un buen comportamiento es necesario tener en cuenta las características del integrado que va a utilizarse.

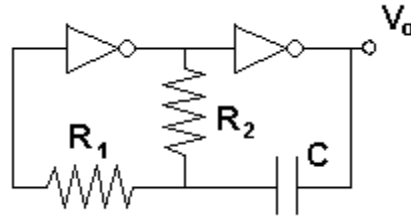


Figura 2: Oscilador de relajación utilizando inversores

En esta práctica utilizarán un 74HC04. En los dispositivos CMOS se puede considerar que el cambio de estado lógico sucede cuando el voltaje a la entrada es la mitad de la tensión de alimentación. Además, suelen disponer de una etapa de protección en la entrada como el que se muestra en la **Figura 3**. Como puede observarse en esta figura, dicha etapa incluye resistencias de un valor desconocido (aunque en general van a ser de pequeño valor). Por esta razón conviene elegir una resistencia R_1 no muy pequeña en el oscilador de relajación de la **Figura 2** y así asegurar un funcionamiento que dependa fundamentalmente de los elementos R_1 , R_2 y C . En este caso, y para $R_1 = 10R_2$, la onda obtenida es prácticamente simétrica y la frecuencia de oscilación puede aproximarse por la siguiente ecuación:

$$f \approx \frac{1}{2,194R_2C} = \frac{1}{0,2194R_1C}$$

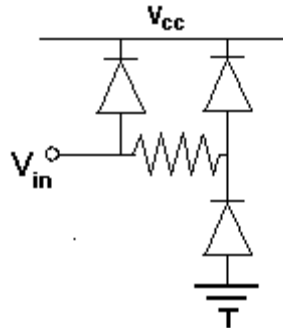


Figura 3: Protección en CMOS (fuente: Fairchild)

- 3.1.a) Monte el oscilador de relajación mediante un 74HC04. Puede elegir una alimentación entre 5 V y 6V. Debe elegir los valores de R_1 , R_2 y C de manera que la frecuencia de la señal sea aproximadamente 300 Hz. Visualice la señal con el osciloscopio y compruebe su frecuencia y simetría. Para obtener una mayor precisión puede utilizar el multímetro en ambas medidas. Los multímetros del laboratorio tienen una función de medida de frecuencias. Respecto a la simetría, piense que una onda con semiperiodos de igual duración presentaría un voltaje eficaz igual a la mitad de la amplitud pico a pico.

- 3.1.b) Para aumentar la estabilidad de los circuitos que utilizan integrados CMOS se suele conectar un condensador entre la tensión de alimentación y tierra de al menos cientos de nanofaradios. Su función es proporcionar las corrientes de pico que son necesarias en los cambios de estado. Coloque un condensador de esta manera y vuelva a medir la frecuencia. ¿Nota alguna mejoría en la señal obtenida?
- 3.1.c) Mida las señales que hay a la entrada y a la salida del primer inversor. Dibújelas conjuntamente. ¿Con qué voltaje de entrada se produce el cambio de estado de “0” lógico a “1” lógico? ¿Y de “1” a “0”?
- 3.1.d) Combine distintos valores de R y C para obtener señales de otras frecuencias. Realice una tabla donde se muestre el valor teórico de la frecuencia, el valor real obtenido y la diferencia entre ambos valores, expresada en porcentaje respecto al valor teórico. Indique también cuál es la diferencia entre la longitud de los semiperiodos.

3.2. El circuito integrado 555

El integrado 555 (ver **Figura 4**) es un circuito muy versátil, con gran número de aplicaciones en circuitos electrónicos, sobre todo para generar intervalos de tiempo. En su circuito interno hay dos comparadores, y en su diagrama de bloques se observa la existencia de tres resistencias de $5K\Omega$, a las que debe su nombre. Una de las aplicaciones más comunes es su utilización como generador de señales cuadradas, para lo cual es necesario el uso de dos resistencias y un condensador exteriores al integrado.

El circuito contiene dos comparadores y un biestable (flip-flop), un transistor y una puerta inversora que proporciona un nivel bajo a la salida cuando el dispositivo está en reposo (sin disparo). Los terminales 1 y 8 se conectan a tierra y al positivo de la fuente de alimentación, respectivamente. El circuito puede funcionar en un margen de tensión de alimentación V_{CC} entre 4,5 y 15 V. Al terminal 2 se aplica la tensión de disparo y está conectado directamente a la entrada inversora del comparador inferior. Si el terminal 4 (puesta a cero) se conecta a tierra, el circuito se inhibe y deja de funcionar, por eso en los empleos más corrientes, la pata 4 se conecta directamente al positivo de la fuente. La pata 3 es la salida del dispositivo, la 5 (control) y 6 (umbral) son las entradas inversora y no inversora del comparador 1. La entrada de control está conectada a una cadena de resistencias internas del circuito de tal forma que el nivel de tensión aplicado a la misma es de $2/3 V_{CC}$. El terminal 7 está conectada al colector del transistor interior. Cuando \overline{Q} está en alta este transistor se encontrará en saturación y por tanto el terminal 7 estará conectado a tierra. Por otro lado si \overline{Q} está en baja polarizará el transistor en la zona de corte y se puede considerar que el terminal 7 está “al aire” (sin conexión).

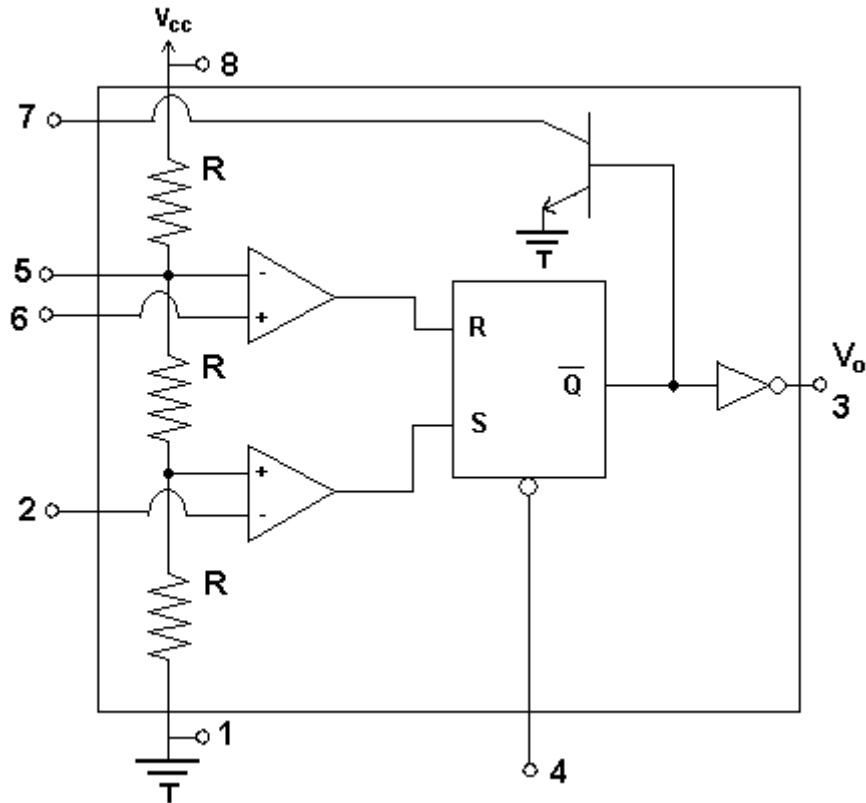


Figura 4: Esquema del integrado 555

Mediante el conexionado de la **Figura 5** se puede obtener una onda cuadrada (oscilador estable). La tensión en el condensador 4va a variar entre $1/3$ y $2/3$ de V_{CC} y la frecuencia de trabajo es independiente de la de alimentación. La carga durará $T_1 = (R_1+R_2)C \cdot \ln 2$ segundos, y la descarga $T_2 = R_2C \cdot \ln 2$ segundos, con lo que la frecuencia de oscilación será:

$$f = \frac{1}{(R_1 + 2R_2)C \cdot \ln 2}$$

El condensador C_1 no es estrictamente necesario, pero mejora el funcionamiento al derivar posibles ruidos inducidos en la entrada de control.

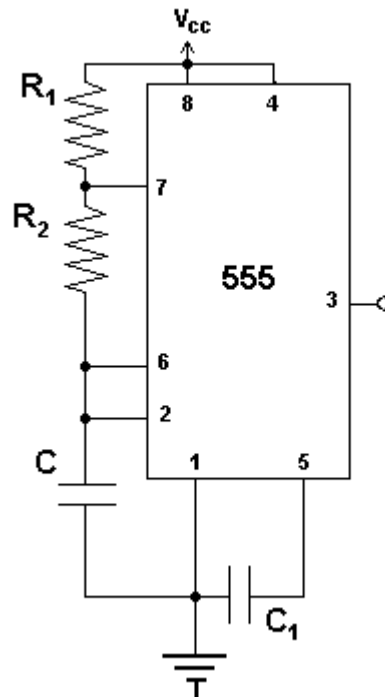


Figura 5: El 555 como astable

- 3.2.a) Resuelva teóricamente el circuito y demuestre que efectivamente se comporta como un oscilador astable y que la frecuencia de la señal obtenida coincide con la expresada anteriormente.
- 3.2.b) Elija un condensador y dos resistencias diferentes cualesquiera¹, monte el circuito y compruebe que su respuesta es la esperada teóricamente. Dibuje la onda resultante. A continuación intercambie las dos resistencias entre sí y vuelva a dibujar la onda proporcionada por el 555.
- 3.2.c) ¿Cuál es el valor máximo y mínimo que se alcanza en los extremos del condensador?. Dibuje superpuestos el voltaje a la salida y el voltaje en el condensador. ¿Coincide con lo esperado teóricamente?
- 3.2.d) ¿Cómo lograría que la forma de onda fuera simétrica o casi simétrica (es decir, que los tiempos T_1 y T_2 fueran de igual longitud)? Utilice el 555 para generar una señal simétrica (o casi) de frecuencia 220 Hz. Dicha frecuencia corresponde con el LA 3. Si lo desea puede conectar el jack y los cascos a la salida del 555 para escuchar esta nota.
- 3.2.e) **(OPTATIVO)** Elija una configuración alternativa para el 555 (de las hojas de especificaciones, de la documentación adicional que se proporciona en la web de la asignatura o de otras fuentes) y realícelo. *Cualquier montaje adicional debe ser evaluado por el profesor.* Piense si es posible, con

¹ Es posible que con determinados valores la frecuencia se encuentre fuera de los rangos de funcionamiento del integrado. Si con una determinada configuración no obtiene la respuesta esperada cambie alguno de los componentes y vuelva a intentarlo.

algún componente adicional, obtener una señal periódica con un semiciclo de alta más corto que el semiciclo de baja.

3.3. Divisor de frecuencia

En este apartado va a construir un sencillo divisor de frecuencias que será de utilidad para medir con más precisión las señales de 6 MHz que obtendrá mediante un cristal de cuarzo en el apartado 3.4. Por tanto, **no desmonte el circuito de la Figura 6 una vez que haya terminado el ejercicio**, ya que lo utilizará en los siguientes. Es conveniente que lo deje montado en un extremo de la placa de pruebas. Por supuesto, al finalizar el turno sí debe dejar la placa de pruebas libre de componentes, con independencia de que haya realizado o no los ejercicios del siguiente apartado.

El integrado 4518 es un contador BCD, que, en este caso, actúa como divisor de frecuencias. Dependiendo de sus conexiones, podemos obtener un factor u otro, lo que puede ser útil si nuestro oscilador nos genera una frecuencia muy alta o distinta de la que precisamos para una aplicación concreta.

En nuestro diseño vamos a conectar este 4518 de la forma indicada en la **Figura 6** (no olvide colocar un condensador entre la alimentación y tierra). En este apartado la entrada se tomará del generador de funciones. Debe ser una onda cuadrada que varíe entre 0 y 5 V, de frecuencia 1 Mhz.

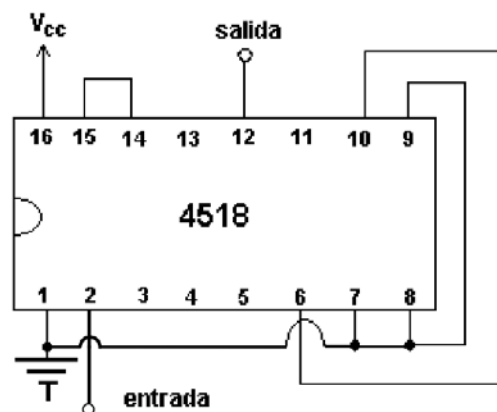


Figura 6: Una posible configuración del 4518 como divisor de frecuencia

3.3.a) En la conexión de la Figura 6, ¿por cuánto va a dividir la frecuencia del cristal? ¿Qué sentido tiene que esté conectada la pata 14 a la 15? Justifique su respuesta, utilizando si lo considera necesario un cronograma.

- 3.3.b) Realice el circuito y observe la salida. ¿Por cuánto ha dividido la frecuencia del reloj? ¿Se corresponde con lo hallado teóricamente?
- 3.3.c) ¿Dónde tomaría la salida si quisiera que la frecuencia quedase dividida por un factor de 4? Si quisiera dividir la frecuencia de la señal de entrada por 16 ¿Cuál sería el conexionado del contador empleando el menor número de conexiones posibles?. ¿Son simétricos todos los semiperiodos? Dibuje en ambos casos un sencillo cronograma o diagrama de tiempos explicativo.

3.4. Oscilador utilizando un elemento piezoeléctrico

Cuando son importantes la exactitud y la estabilidad de la frecuencia de oscilación, se utiliza un oscilador de cristal de cuarzo. El cristal (XTAL) actúa como una bobina grande en serie con un pequeño condensador. Así que la frecuencia de resonancia casi no se ve afectada por el amplificador y las capacidades parásitas. El causante de la vibración de un cristal de cuarzo es el efecto piezoeléctrico por el cual, al aplicar una tensión al cristal, éste vibra a la frecuencia de la tensión aplicada. Y de forma inversa, si se les obliga a que vibren, generan una tensión alterna de la misma frecuencia (otras sustancias con efecto piezoeléctrico son las sales de Rochelle y la turmalina).

Como la forma natural del cristal de cuarzo es un prisma hexagonal con pirámides en los extremos, se debe cortar una lámina rectangular del cristal natural para tener uno útil. El número de láminas obtenidas de un cristal depende de su tamaño y del ángulo de corte. Y cada corte tiene diferentes propiedades piezoeléctricas. La lámina se monta entre dos placas de metal, y la vibración del cristal dependerá de la frecuencia de la tensión aplicada. Al cambiar la frecuencia podemos encontrar frecuencias de resonancia a las cuales las vibraciones del cristal alcanzan un punto máximo.

Cuando un cristal no está vibrando es equivalente a una capacidad C_0 (capacidad del encapsulado). Cuando el cristal está vibrando, el circuito equivalente es el de la figura, con valores de L_1 en cientos de milihenrios, C_0 en picofaradios, R_1 en decenas de ohmios y C_1 en decenas de fentofaradios. La **Figura 7** muestra el circuito equivalente.

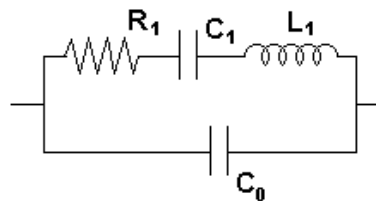


Figura 7: Circuito equivalente de un cristal de cuarzo

Casi siempre se corta el cristal y se monta para vibrar adecuadamente en una de sus frecuencias de resonancia, llamada fundamental o mínima. Cuanto más aumenta la frecuencia, más disminuye el espesor, de forma que, para frecuencias altas, el espesor del cuarzo hace que sea fragilísimo y se pueda romper al menor golpe, o al estar sometido a una corriente más elevada de lo habitual. Para solucionar esto se ha descubierto que tallando el cristal de un modo particular, aun empleando espesores más elevados de lo requerido, es posible hacerlo oscilar a frecuencias más elevadas. Las frecuencias de resonancia mayores, llamadas sobretonos, son múltiplos casi exactos de la frecuencia fundamental. Por ejemplo, un cristal con una frecuencia fundamental de 1MHz tiene un primer sobretono aproximadamente de 2MHz, otro en 3MHz y sucesivamente. En la **Figura 8** puede observarse la respuesta en frecuencia de un cristal. Se comporta como una reactancia capacitiva o inductiva dependiendo de la frecuencia de trabajo. Un cristal presenta dos frecuencias de resonancia, conocidas como resonancia serie (reactancia nula) y resonancia paralelo (reactancia infinita). Estos dos valores se encuentran muy próximos entre sí y por tanto apenas se notará diferencia en la frecuencia de trabajo si se utiliza un montaje serie o uno paralelo.

Hay que tener en cuenta que el valor de la frecuencia de resonancia que marca el fabricante es para una determinada capacidad de carga, en general 32 pF, aunque puede variar según el cristal. Este dato se deberá tener en cuenta a la hora de diseñar el resto de circuito oscilante.

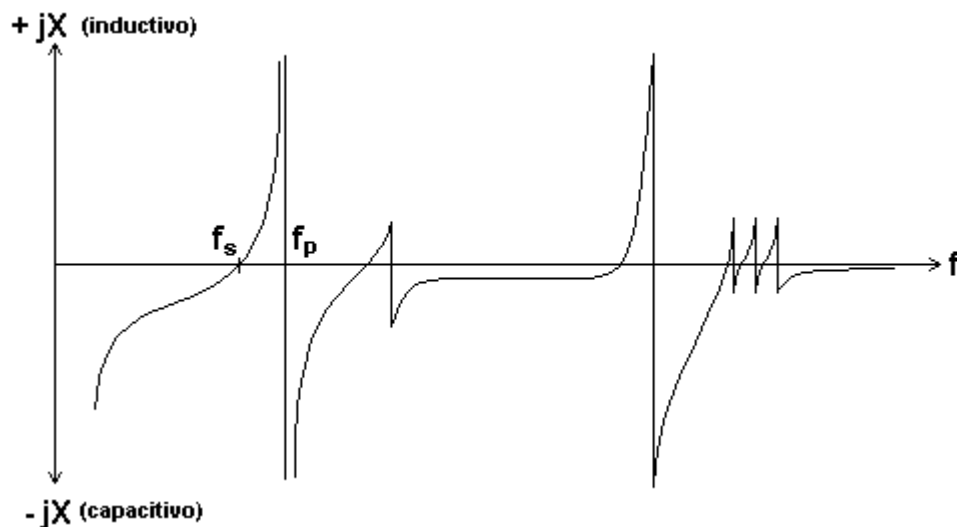


Figura 8: Respuesta en frecuencia de un cristal de cuarzo

Cuando la precisión en la frecuencia de oscilación no es crítica, en lugar de utilizar cristales de cuarzo puede ser rentable elegir resonadores cerámicos, en general más baratos. Mientras que un cristal de cuarzo puede presentar una desviación de su frecuencia nominal de hasta 0,005%, un resonador cerámico puede desviarse hasta un 0,5%. La razón es que las frecuencias f_s y f_p (ver **Figura 8**) están mucho más separadas en un resonador cerámico que en un cristal de cuarzo. Los resonadores cerámicos son ampliamente utilizados en los mandos a distancia domésticos.

El circuito de la **Figura 9** representa un posible montaje paralelo para un oscilador de cristal o cerámico. Recibe este nombre porque la vibración se produce a la frecuencia de resonancia paralelo. Se puede observar como el cristal forma la red de realimentación junto con dos condensadores. Puesto que el amplificador es negador esto significa que, a la frecuencia de oscilación, el elemento piezoeléctrico debe presentar una reactancia inductiva, como sucede cerca de la frecuencia de resonancia paralelo del mismo.

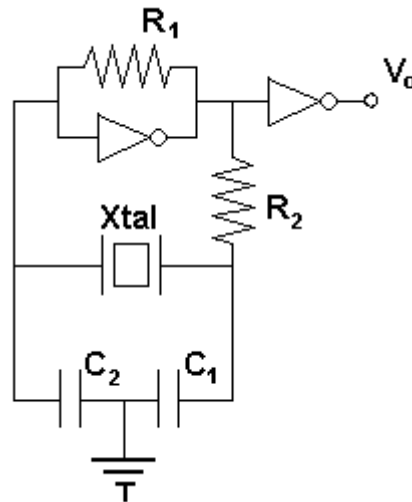


Figura 9: Oscilador digital utilizando un montaje paralelo del cristal

- 3.4.a) Monte el circuito de la **Figura 9** utilizando los inversores del 74HC04. $R_1 = 10M$, $R_2 = 680\Omega$, $C_1 = C_2 = 68$ pF y el cristal de cuarzo de 6 MHz. No olvide colocar un condensador entre la alimentación y tierra del circuito integrado y conectar las entradas de aquellos inversores del 74HC04 que no vaya a utilizar. Si con estos valores no consigue que el circuito oscile, pruebe a cambiar la resistencia R_2 por un condensador de 56 pF. Si sigue sin funcionar, pruebe otras combinaciones según la teoría de osciladores realimentados explicada en clase. Dibuje la señal obtenida. ¿Cuál es su frecuencia? Para realizar esta última medida con mayor exactitud, utilice el divisor de frecuencia del apartado 3.3 y el multímetro. Comentarios.
- 3.4.b) Utilice ahora el resonador cerámico de 455 kHz que se le ha suministrado. Dejando el resto de componentes con los mismo valores que en el ejercicio 3.4.a), calcule cuál debe ser el valor de R_2 para que, a la frecuencia de oscilación, esta resistencia presente un valor óhmico similar al del condensador C_1 . Dibuje la señal obtenida. ¿Cuál es ahora la frecuencia obtenida? De nuevo utilice el multímetro para conseguir mayor exactitud. Comentarios.
- 3.4.c) A continuación va a estudiar el efecto de la capacidad de carga (C_1 y C_2) en la frecuencia de oscilación. Utilizará el circuito de la **Figura 9** con el resonador cerámico. Conecte una resistencia $R_2 = 5K6$ y vaya cambiando C_1 y C_2 , pero utilizando siempre dos condensadores del mismo valor (esto es, $C_1 = C_2$ en cada prueba). Realice una tabla que muestre la frecuencia

obtenida para cada valor de los condensadores. Apunte también si la señal obtenida es limpia o ruidosa.

- 3.4.d) Vuelva a repetir el experimento con $R_2 = 680\Omega$.
- 3.4.e) Comente los resultados obtenidos en los dos ejercicios anteriores. Explique el comportamiento del oscilador al variar los condensadores y/o la resistencia R_2 .

Otro circuito clásico de oscilador a cristal es el que se muestra en la **Figura 10**. Esta vez se trata de un montaje serie.

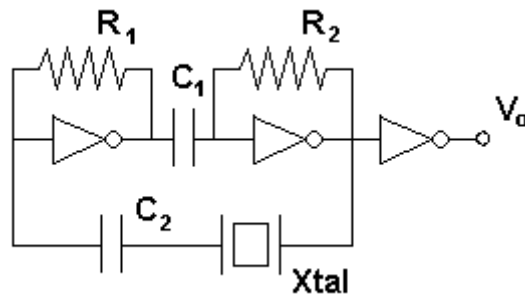


Figura 10: Oscilador serie

- 3.4.f) Utilice de nuevo los inversores del 74HC04 y el cristal de cuarzo. $R_1 = 1K$, $R_2 = 100K$, $C_1 = 100nF$, $C_2 = 68 pF$. No olvide colocar un condensador entre la alimentación y tierra del circuito integrado. Dibuje la señal obtenida. ¿Cuál es su frecuencia? Comentarios.
- 3.4.g) Repita el ejercicio 3.4.f) utilizando el resonador cerámico.

3.5. Estudio en lazo abierto de un oscilador realimentado

(OPTATIVO)

En la parte obligatoria de la práctica han realizado varios osciladores realimentados basados en elementos piezoeléctricos. En particular vamos a centrarnos en el montaje paralelo, que se muestra en la **Figura 9**. Siguiendo la teoría general de amplificadores realimentados, tenemos una etapa amplificadora (formada por el inversor y la resistencia R_1) y una etapa de realimentación (formada por R_2 , el elemento piezoeléctrico y los dos condensadores) que se encarga de lograr la realimentación positiva en la frecuencia deseada. Si abrimos el lazo obtenemos el circuito de la **Figura 11**, que puede utilizarse para caracterizar el comportamiento de este tipo de osciladores.

En primer lugar, recordemos que la condición de oscilación la da el criterio de Barkhausen:

$$|A \cdot B| \geq 1 \quad (1)$$

$$\angle(A \cdot B) = 0 \quad (2)$$

donde A es la función de transferencia de la parte amplificadora, esto es $A = \frac{V_2}{V_1}$, y B es la función de transferencia de el circuito de realimentación ($B = \frac{V_3}{V_2}$). Esto significa que el circuito de la **Figura 1** oscilará a aquella frecuencia (o frecuencias) para la cual no existe desfase entre V_3 y V_1 (2) y además $V_3 \geq V_1$ (1)² utilizando el montaje de la **Figura 11**.

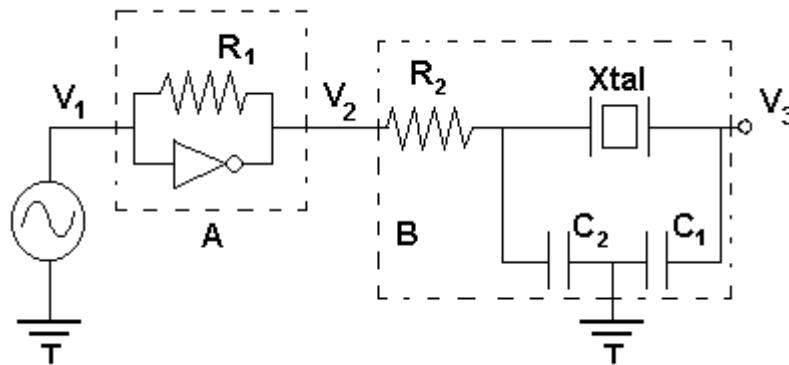


Figura 11: Oscilador digital en lazo abierto

- 3.5.a) **(OPTATIVO)** Monte el circuito de la **Figura 11** utilizando los inversores del 74HC04. $R_1 = 10M$, $R_2 = 680\Omega$, $C_1 = C_2 = 68 \text{ pF}$ y el cristal de cuarzo de 6 MHz. No olvide colocar un condensador entre la alimentación y tierra del circuito integrado y conectar las entradas de aquellos inversores del 74HC04 que no vaya a utilizar. La entrada la obtendrá del generador de funciones, que debe estar configurado para proporcionar una señal sinusoidal entre 0 V y unos cientos de mV (es decir, nunca debe colocar a la entrada del inversor un voltaje menor que 0 V). Vaya variando la frecuencia de entrada desde 5,8 MHz hasta 6,2 MHz midiendo el desfase y la ganancia de V_3 con respecto a V_1 . Realice una gráfica donde puedan verse ambas medidas simultáneamente. A la vista de dicha gráfica ¿a qué frecuencia oscilará este montaje?
- 3.5.b) **(OPTATIVO)** De ahora en adelante va a utilizar el resonador cerámico de 455 KHz. Dejando el resto de componentes con los mismos valores, coloque una resistencia $R_2 = 5K6$. Busque ahora la

² La condición (1) puede no tener que cumplirse estrictamente en este montaje dado el comportamiento *especial* del inversor como amplificador. En cualquier caso es conveniente que se cumpla para asegurar la oscilación.

frecuencia de oscilación que tendría el circuito al cerrar el lazo. Para ello, varíe la frecuencia en el generador de funciones (siempre en las cercanías de 455 KHz) hasta obtener un desfase nulo entre V_3 y V_1 , y asegúrese que a dicha frecuencia hay una cierta ganancia entre ambos valores. Desconecte el generador de funciones y cierre el lazo para obtener el circuito de la **Figura 9** y compruebe que efectivamente oscila.

- 3.5.c) **(OPTATIVO)** Un problema de este tipo de circuitos es que es posible obtener espurios debido a los sobretonos del elemento piezoeléctrico utilizado. En este ejercicio va a comprobar si este problema existe con el montaje anterior. Para ello introduzca con el generador de funciones señales de frecuencias cercanas a múltiplos enteros de 455 KHz (sobretonos) y compruebe si para alguna de ellas se cumple el criterio de Barkhausen. La resistencia R_2 puede utilizarse para eliminar estos espurios. Junto con el condensador C_2 está formando un filtro paso bajo, atenuando en mayor medida las frecuencias altas que las bajas. Es decir, favorece la oscilación a la frecuencia fundamental frente a los sobretonos. Dicho efecto es más importante cuanto mayor sea la resistencia R_2 . Pero hay que tener en cuenta que de esta manera también aumenta la atenuación a la frecuencia fundamental y es posible que el criterio de Barkhausen deje de cumplirse también a la frecuencia deseada (se está disminuyendo la ganancia de realimentación) y por tanto el circuito no oscile en absoluto. Pruebe con varios valores de R_2 , mayores y menores que los 5600Ω iniciales, midiendo la ganancia a la frecuencia de oscilación y en los sobretonos en lazo abierto. Después compruebe en lazo cerrado si el circuito oscila o no. Debido a que los inversores no se comportan como amplificadores lineales, es posible que incluso con ganancias entre V_3 y V_1 inferiores a la unidad en lazo abierto se obtenga una oscilación al cerrar el lazo. Realice los comentarios que considere adecuados.

3.6. Comentarios y sugerencias

Indiquen aquí aspectos que se podrían mejorar, nuevas ideas o propuestas (que se valorarán especialmente), o aportaciones que consideren de interés.

"Si buscas resultados distintos, no hagas siempre lo mismo "

Einstein, Albert