

Circuito Astable

Ing. María Isabel Schiavon, Ing. Raúl Lisandro Martín

El circuito astable genera en su salida una onda cuadrada de frecuencia fija dependiente de los elementos del circuito. Básicamente consta de dos transistores que, desde el momento en que se conecta la alimentación del mismo, alternan su conducción en el tiempo pasando de un estado de conducción no estable o semiestable al estado de corte: El circuito dispone de dos salidas desfasadas 180° , una en el colector de cada transistor.

Circuito Astable acoplado por colector

El circuito más simple es el que se muestra en la figura 1 y se identifica como astable acoplado por colector. Cuando Q1 conduce, Q2 se encuentra cortado, mientras que cuando Q1 se corta, Q2 conduce. Las salidas disponibles son v_{o1} y v_{o2} , respectivamente.

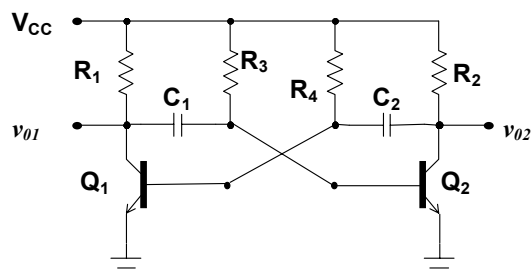


FIG 1.- CIRCUITO ASTABLE

El circuito se diseña con $R_1 \ll R_3$ y $R_2 \ll R_4$ a fin de que la tensión de colector del transistor cortado alcance el valor máximo (V_{CC}) en un tiempo despreciable frente a la duración de la conducción del otro transistor. Si esta condición se cumple las ondas en las salidas resultan más cuadradas y el capacitor que está conectado al colector del transistor cortado se carga en este semiperíodo con una constante de tiempo muy chica comparada con el tiempo de corte del transistor (alcanza el valor final rápidamente).

Para realizar el análisis del funcionamiento del circuito se parte de la hipótesis de que el tiempo de conmutación de los transistores es mucho menor que el tiempo que tardan los capacitores en cargarse, y de que ya se extinguió el transitorio inicial que se produce al conectar la alimentación. En estas condiciones, suponiendo que el circuito se encuentra en uno de los estados semiestables, por ejemplo con Q1 conduciendo y Q2 cortado, los capacitores C_1 y C_2 se cargan a través de R_3 y R_2 respectivamente en el sentido indicado en la figura 2.

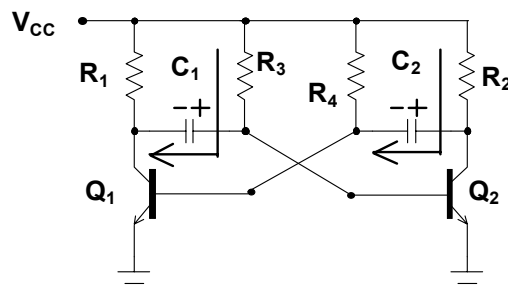


FIG 2.- SENTIDO DE CARGA DE LOS CAPACITORES CON Q₁ EN CONDUCCIÓN Y Q₂ CORTADO

La carga de cada capacitor queda determinada por los valores iniciales y finales de tensión y por la constante de tiempo (τ_{ic}) que le corresponde, los cuales dependen fuertemente de la zona de conducción de los transistores. Los transistores pueden conducir saturados o en zona activa, según se diseñe el circuito, si bien el criterio más común es forzar la saturación de los mismos, tanto por mayor simplicidad del diseño como para maximizar el cambio de tensión en las salidas. Con Q_1 conduciendo en zona de saturación la constante de tiempo de carga de C_1 (τ_{1c1}) resulta:

$$\tau_{1c1} = R_3 C_1$$

Mientras que la correspondiente a C_2 (τ_{2c1}) queda en serie con la base de Q_1 resulta:

$$\tau_{2c1} = R_2 C_2$$

A medida que se carga C_1 , la tensión en la base de Q_2 aumenta hasta que al cabo de un tiempo t_1 llega a polarizar directamente su juntura base emisor ($V_{BE2} = V_\gamma$). En ese momento Q_2 entra en conducción, su tensión de colector disminuye y provoca la disminución de la tensión de base de Q_1 llevándolo hacia el corte y la carga del capacitor C_2 polariza inversamente la juntura base emisor de Q_1 reforzando el corte y la tensión de colector de Q_1 aumenta favoreciendo la conducción de Q_2

En la figura 3 se muestra el estado en que se encuentra el circuito un instante de tiempo antes de la conmutación (t_1^-). V_γ es la tensión de arranque de la juntura base emisor ($V_\gamma = V_{BEon}$), mientras que en la figura 4 se muestra el estado del circuito un instante después de la conmutación, t_1^+ .

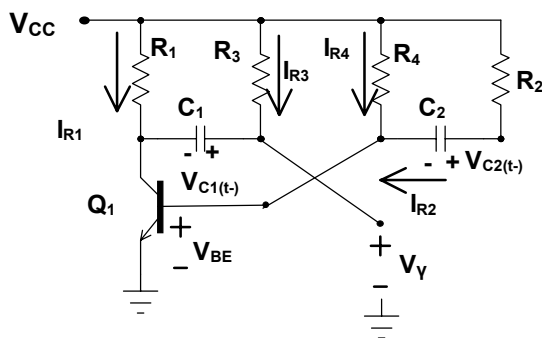


FIG. 3: CIRCUITO EN EL INSTANTE DE TIEMPO t_1^-

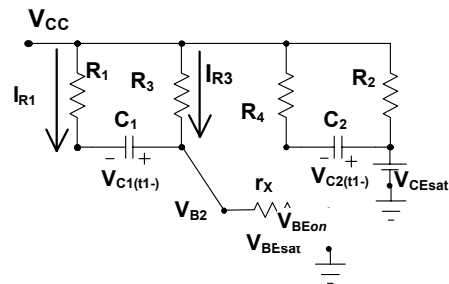


FIGURA 4: CIRCUITO EN t_1^+

En estas condiciones los capacitores comienzan a cargarse en sentido contrario con la constante de tiempo que corresponde (τ_{1d2} , τ_{2d2}) según el circuito que se muestra en la figura 4), hasta que en el instante t_2 la tensión de la base de Q_1 alcanza el valor necesario para polarizar directamente su juntura base emisor y provocar la conducción de Q_1 , y el consecuente corte de Q_2 . El proceso se repite periódicamente con una frecuencia que queda determinada por los elementos del circuito.

Análisis de cada estado semiestable.

Q_1 conduce, Q_2 cortado. Se considera positivo el sentido de carga para los capacitores que corresponde a la conducción de Q_1 . Al cabo de un tiempo t_1 , la tensión en C_1 alcanzó el valor necesario para que la juntura de base emisor de Q_2 se polarice directamente, en consecuencia:

$$V_{C1}(t_1) = V_\gamma - V_{CEsat}$$

Suponiendo que C_2 alcanzó el valor final en un tiempo mucho menor que t_1 , la tensión en bornes de C_2 resulta:

$$V_{C_2}(t_1) = V_{CC} - V_{BEsat} \quad \text{si } I_{R_2}(t_1) = 0$$

Las corrientes por las resistencias un instante antes de que Q_2 conduzca (T_1) pueden calcularse por:

$$I_{R_4} = I_{B_{Q1}} = \frac{V_{CC} - V_{BEsat}}{R_4} \quad I_{R_3} = \frac{V_{CC} - V_\gamma}{R_3} \quad I_{R_1} = \frac{V_{CC} - V_{CEsat}}{R_1}$$

La corriente de base de Q_1 resulta:

$$I_{B_1} = I_{R_4} = \frac{V_{CC} - V_{BEsat}}{R_4}$$

La corriente de colector de Q_1 es suma de la corriente que circula a través de R_1 y de la corriente que circula por R_3 que es la de carga de C_1 . Si se tiene en cuenta que $R_3 \gg R_1$, el aporte de la corriente por R_3 es despreciable.

$$I_{C_1} = I_{R_3} + I_{R_1} = \frac{V_{CC} - V_{CEsat}}{R_1} + \frac{V_{CC} - V_\gamma}{R_3} \approx \frac{V_{CC} - V_{CEsat}}{R_1}$$

Por otro lado, si C_2 se cargó completamente la corriente por R_2 es nula, y la corriente de base de Q_1 sería mínima e igual al aporte de corriente a través de R_4 . Si bajo esta condición Q_1 se encuentra saturado, es seguro que durante todo su tiempo de conducción estará en la zona de saturación.

Para que Q_1 esté saturado se debe verificar que:

$$\frac{I_{C_1}}{I_{B_1}} = \frac{\frac{V_{CC} - V_{CEsat}}{R_1}}{\frac{V_{CC} - V_{BEsat}}{R_4}} < \beta_{\min Q_1}$$

Si esta condición no se verifica el transistor estaría funcionando en zona activa. En este caso, si la suposición de que el transistor estaba saturado resulta errónea, se tendría que replantear el análisis (constantes de tiempo y valores de tensiones y corrientes) con el modelo del transistor correspondiente a zona activa.

Q_2 conduce, Q_1 cortado.

En el instante de tiempo t_1^+ el circuito ya conmutó, es decir Q_1 está cortado y Q_2 está en conducción. La variación de tensión en los capacitores no puede ser instantánea, en consecuencia los valores de tensión en sus bornes se mantienen:

$$v_{C_1}(t_1^-) = v_{C_1}(t_1^+) = V_\gamma - V_{CEsat} \quad v_{C_2}(t_1^-) = v_{C_2}(t_1^+) = V_{CC} - V_{BEsat}$$

En t_1^+ :

$$V_{CC} = I_{R_3} R_3 + (I_{R_1} + I_{R_3}) r_x + V_{BEsat}$$

$$I_{R_1} R_1 - v_{C_1}(t_1^-) = I_{R_1} R_1 - V_\gamma + V_{CEsat} = I_{R_3} R_3 \Rightarrow I_{R_3} = \frac{I_{R_1} R_1 - V_\gamma + V_{CEsat}}{R_3}$$

$$V_{CC} = \frac{I_{R1} R_1 - V_\gamma + V_{CEsat}}{R_3} (R_3 + r_x) + I_{R1} r_x + V_{BEsat}$$

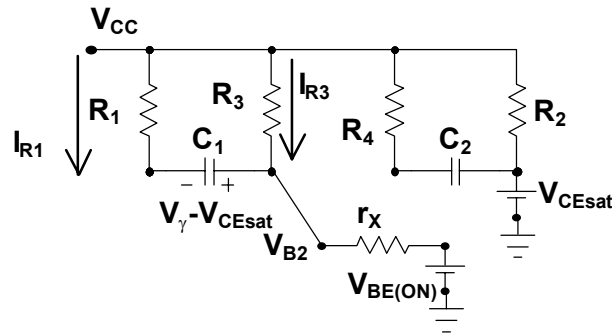


FIGURA 4: CIRCUITO EN t_1^+

Frecuencia de oscilación. Cálculo de la duración de cada estado del circuito.

El tiempo de conducción del transistor Q_1 está determinado por la evolución temporal de la tensión en el capacitor C_1 . Es el tiempo que esa tensión tarda en alcanzar el valor que polariza directamente la juntura base emisor de Q_2 . Si se considera que la tensión de encendido de la juntura base emisor es V_γ , la tensión en bornes de C_1 en el instante t_1 resulta:

$$I_{R1} = \frac{V_{CC} - V_{BEsat} + \frac{V_\gamma - V_{CEsat}}{R_3} (R_3 + r_x)}{r_x + R_1 \frac{(R_3 + r_x)}{R_3}} \approx \frac{V_{CC} - V_{BEsat} + V_\gamma - V_{CEsat}}{r_x + R_1}$$

$$v_{C1(t_1)} = V_{C1f} + (V_{C1i} - V_{C1f}) e^{\frac{-t_1}{\tau_1}} = V_\gamma - V_{CEsat} \quad \tau_1 = R_3 C_1$$

El valor inicial V_{C1i} es el valor que alcanza la tensión en C_1 al finalizar el otro estado semiestable (conducción de Q_2), si se considera que durante ese estado C_1 alcanzó su valor final:

$$V_{C1i} = v_{C1inicial} = -V_{CC} + V_{BEsat}$$

El valor final de tensión al cual tiende la carga de C_1 se puede pensar como el valor de tensión al cual llegaría la tensión en bornes del capacitor C_1 si Q_2 permaneciera cortado indefinidamente (figura 5).

El capacitor alcanza su valor final cuando la corriente por R_3 es nula, en consecuencia resulta:

$$V_{C1f} = v_{C1final} = V_{CC} - V_{CEsat}$$

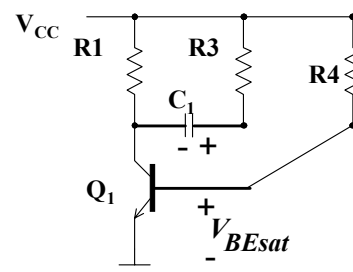


FIGURA 5: CÁLCULO DEL VALOR FINAL

En consecuencia, T_1 puede determinarse a partir de la expresión:

$$v_{C1(t_1)} = V_{CC} - V_{CEsat} + (V_{BEsat} - 2V_{CC} + V_{CEsat})e^{\frac{-T_1}{R_3C_1}} = V_{\gamma} - V_{CEsat}$$

resultando:

$$T_1 = R_3C_1 \cdot \ln\left(\frac{2V_{CC} - V_{BEsat} - V_{CEsat}}{V_{CC} - V_{\gamma}}\right) \quad \text{si } V_{cc} \geq 5V \Rightarrow T_1 \approx 0,7R_3C_1$$

Para calcular el tiempo (T_2)de conducción de Q_2 el análisis es similar, y resulta:

$$v_{C2(t_2)} = V_{C2f} + (V_{C2i} - V_{C2f})e^{\frac{-T_2}{\tau_2}} = V_{\gamma} - V_{CEsat} \quad \tau_2 = R_4C_2$$

$$V_{C2i} = -V_{CC} + V_{BEsat}$$

$$V_{C2f} = V_{CC} - V_{CEsat}$$

$$T_2 = R_4C_2 \ln\left(\frac{2V_{CC} - V_{BEsat} - V_{CEsat}}{V_{CC} - V_{\gamma}}\right) \quad \text{si } V_{cc} \geq 5V \Rightarrow T_2 \approx 0,7R_4C_2$$

El circuito oscila con una frecuencia, f :

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{T_1 + T_2}$$

Gráficas temporales de tensiones características.

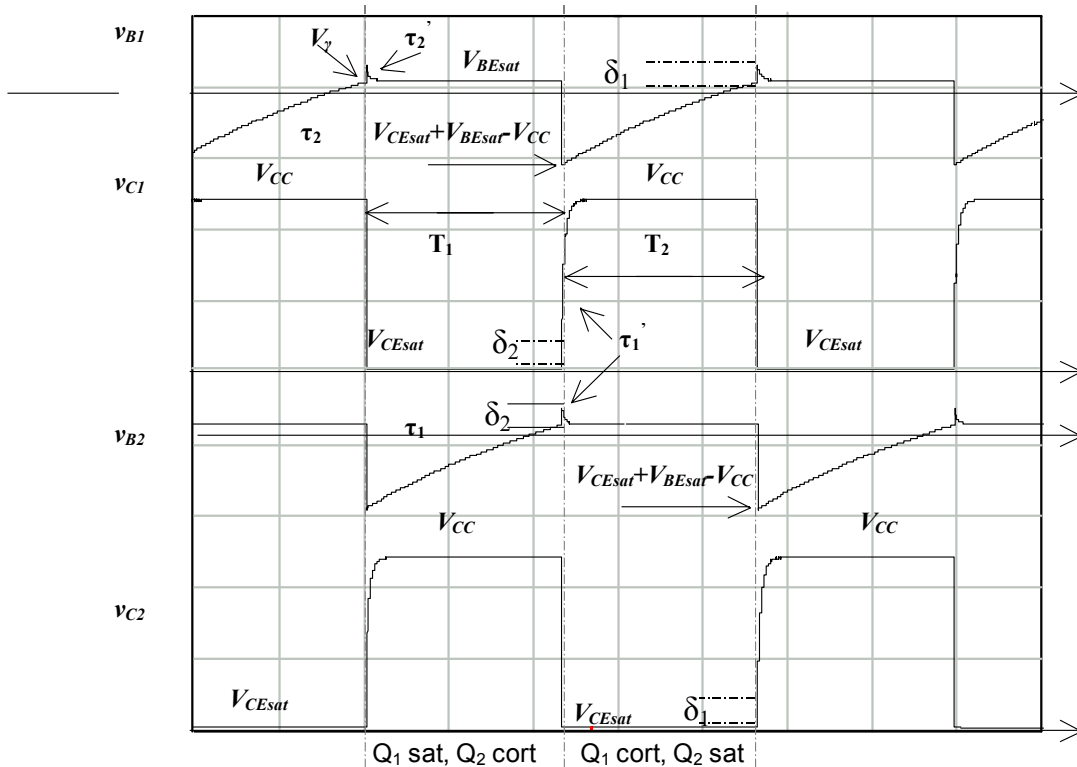


FIGURA 6: GRAFICAS DE LAS TENSIONES EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

En la figura 6 se muestran las gráficas de las tensiones en los colectores y en las bases de los transistores en función del tiempo. En el caso en que el circuito se diseñe con los transistores conduciendo en zona activa, aparecen diferencias en cuanto a formas de onda y ecuaciones que surgen de utilizar el modelo que corresponde al transistor conduciendo en zona activa.

Determinación de los picos de tensión que se producen en el instante de la conmutación.

En la base del transistor que inicia la conducción en el momento de la conmutación, se produce un pico de tensión en el primer instante que se extingue rápidamente. Estos saltos aparecen también en el colector del transistor que entra al corte. Para calcular su valor es necesario considerar la resistencia de dispersión de base (r_x).

El salto de tensión (δ_2) que se produce en la base del transistor Q_2 en el instante (t_1^+), puede determinarse como la diferencia entre el valor que tiene la tensión de base antes y después de la conmutación

$$\delta_2 = V_{B2(t_2^+)} - V_{B2(t_2^-)}$$

$$V_{B2(t_2^+)} = (I_{R1} + I_{R3})r_x + V_{BE_{on}}$$

$$V_{B2(t_2^+)} \approx \frac{V_{CC} \frac{r_x}{R_B^*} + \frac{r_x}{R1} (V_{BE_{on}} - V_{BE_{sat}}) - V_{BE_{on}}}{1 + \frac{r_x}{R_B^*}} \quad \text{donde } R_B^* = R1 \parallel R3$$

$$\delta = V_{B2(t_2^+)} - V_{B2(t_2^-)} \quad \delta_2 \approx \frac{(V_{CC} - V_{BE_{on}})/(R1 \parallel R3) - (V_{CE_{sat}} - V_{BE_{on}})/R1}{1 + r_x/(R1 \parallel R3)} r_x$$

En la base de Q_1 (y en el colector de Q_2) se produce un pico de tensión similar (δ_1) en el instante t_2 . Planteando las condiciones que corresponden al inicio de la conducción de Q_1 resulta:

$$\delta_1 \approx \frac{(V_{CC} - V_{BE_{on}})/(R2 \parallel R4) - (V_{CE_{sat}} - V_{BE_{on}})/R2}{1 + r_x/(R2 \parallel R4)} r_x$$