

# Circuito Aestable

*Ing. María Isabel Schiavon, Ing. Raúl Lisandro Martín*

El circuito aestable 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  $180^\circ$ , una en el colector de cada transistor.

## Circuito Aestable acoplado por colector

El circuito más simple es el que se muestra en la figura 1 y se identifica como aestable 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.

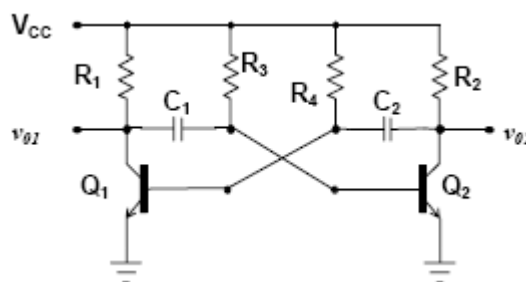


FIG 1.- CIRCUITO ASTABLE

El circuito se diseña con  $R_1 \ll R_3$  y  $R_2 \ll R_4$  a fin de que el voltaje 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.

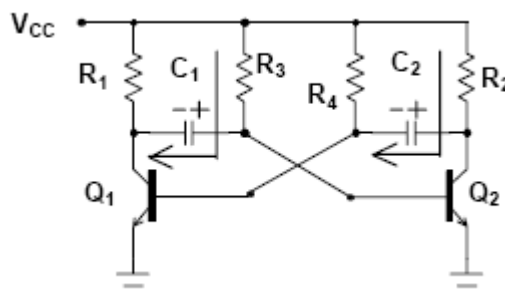


FIG 2.- SENTIDO DE CARGA DE LOS CAPACITORES  
CON Q1 EN CONDUCCIÓN Y Q2 CORTADO

La carga de cada capacitor queda determinada por los valores iniciales y finales de voltaje y, por la constante de tiempo ( $\tau_{ic}$ ) 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 voltaje en las salidas. Con Q1 conduciendo en zona de saturación la constante de tiempo de carga de C1 ( $\tau_{1c1}$ ) resulta:

:

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

Mientras que la correspondiente a C2 ( $\tau_{2c1}$ ) queda en serie con la base de Q1 resulta:

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

A medida que se carga C1, el voltaje en la base de Q2 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 Q2 entra en conducción, su voltaje de colector disminuye y provoca la disminución del voltaje de base de Q1 llevándolo hacia el corte y la carga del capacitor C2 polariza inversamente la juntura base emisor de Q1 reforzando el corte y el voltaje de colector de Q1 aumenta favoreciendo la conducción de Q2

En la figura 3 se muestra el estado en que se encuentra el circuito un instante de tiempo antes de la conmutación ( $t_1^-$ ).  $V_\gamma$  es el voltaje 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,  $t_1^+$ .

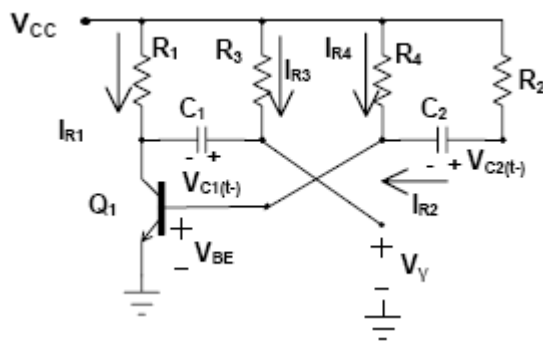


FIG. 3: CIRCUITO EN EL INSTANTE DE TIEMPO  $t_1^-$

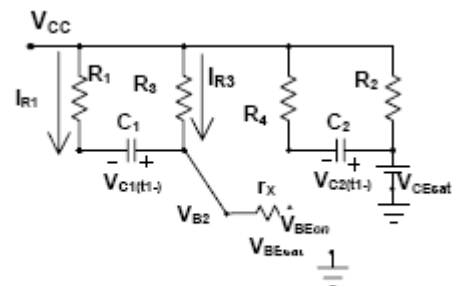


FIGURA 4: CIRCUITO EN  $t_1^+$

En estas condiciones los capacitores comienzan a cargarse en sentido contrario con la constante de tiempo que corresponde ( $\tau_{1d2}$ ,  $\tau_{2d2}$ ) según el circuito que se muestra en la figura\_4), hasta que en el instante  $t_2$  el voltaje de la base de Q1 alcanza el valor necesario para polarizar directamente su juntura base emisor y provocar la conducción de Q1, y el consecuente corte de Q2. El proceso se repite periódicamente con una frecuencia que queda determinada por los elementos del circuito.

#### **Análisis de cada estado semiestable.**

**Q1 conduce, Q2 cortado.** Se considera positivo el sentido de carga para los capacitores que corresponde a la conducción de Q1. Al cabo de un tiempo  $t_1$ , el voltaje en C1 alcanzó el valor necesario para que la juntura de base emisor de Q2 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  $t_1$ , el voltaje en bornes de  $C_2$  resulta:

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

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

$$I_{R_4} = I_{BQ_1} = \frac{V_{CC} - V_{BEsat}}{R_4} \quad I_{R_3} = \frac{V_{CC} - V_\gamma}{R_3} \quad I_{R_1} = \frac{V_{CC} - V_{CEsat}}{R_1}$$

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 voltajes 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 voltaje en los capacitores no puede ser instantánea, en consecuencia los valores de voltaje 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  $t_1^+$ :

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

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

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

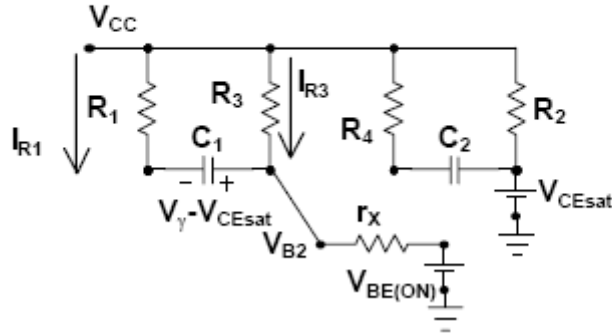


FIGURA 4: CIRCUITO EN  $t_1^+$

### 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  $V_J$ , 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:

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

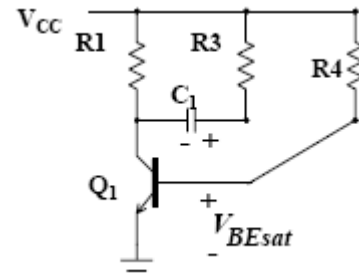


FIGURA 5: CÁLCULO DEL VALOR FINAL

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 voltajes característicos.

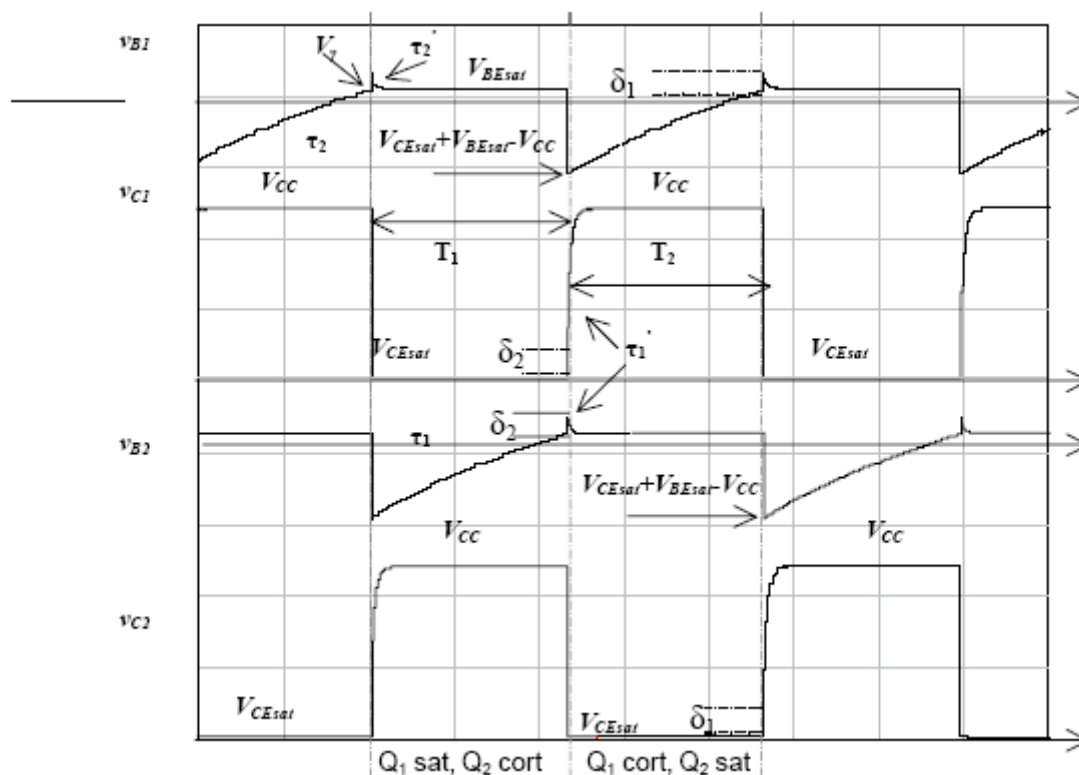


FIGURA 6: GRAFICAS DE LOS VOLTAJES EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

En la figura 6 se muestran las gráficas de los voltajes 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 voltaje 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 voltaje 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 voltaje ( $\delta_1$ ) que se produce en la base del transistor Q2 en el instante ( $t_1^+$ ), puede determinarse como la diferencia entre el valor que tiene el voltaje de base antes y después de la conmutación

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

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

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

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

En la base de Q1 (y en el colector de Q2) se produce un pico de voltaje similar ( $\delta_1$ ) en el instante  $t_2$ . Planteando las condiciones que corresponden al inicio de la conducción de Q1 resulta:

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