

Components avançats i generadors de senyal

Santiago Cerezo Salcedo, Josep M. Pallarés Serres, Juan Perona
Camacho

Adaptació de continguts: Santiago Cerezo Salcedo

Electrònica

Índex

Introducció	5
Resultats d'aprenentatge	7
1 Amplificadors operacionals	9
1.1 Característiques de l'amplificador operacional	9
1.2 L'amplificador operacional com a comparador	10
1.3 L'amplificador operacional com a amplificador. Sumadors i restadors	11
1.3.1 Seguidor de tensió	12
1.3.2 Amplificador inversor	13
1.3.3 Amplificador no inversor	14
1.3.4 Amplificador sumador	14
1.3.5 Amplificador diferencial	15
1.4 Aplicacions bàsiques amb dispositius integrats	16
1.4.1 Integrador i derivador	17
1.4.2 Filtre passabaix	18
1.4.3 Filtre passaalt	19
1.4.4 Filtre de pas de banda	20
1.4.5 Altres circuits	20
2 Electrònica de potència i generació de senyal	23
2.1 Tiristor, fototiristor, triac i diac	23
2.1.1 Tiristors	23
2.1.2 Funcionament del tiristor en corrent continu	26
2.1.3 Modes de comandament de tiristors	29
2.1.4 Triac	30
2.1.5 Diac	32
2.2 Sistemes d'alimentació controlats	32
2.2.1 Circuit de tot o res	33
2.2.2 Circuit de control per angle de fase	35
2.3 Temporitzadors	38
2.3.1 Temporitzadors amb circuits RC	39
2.3.2 Temporitzadors amb transistors	40
2.3.3 Temporitzadors amb el 555	42
2.4 Oscil·ladors	45
2.4.1 Oscil·ladors RC	45
2.4.2 Oscil·ladors LC	46
2.4.3 Oscil·ladors amb cristall de quars	50
2.4.4 Multivibrador astable	52

Introducció

L'estudi de l'electrònica es divideix en dues grans branques segons l'amplitud de les tensions (o corrents) amb què treballen els sistemes. Així, es parla d'electrònica de petit senyal en el cas de tensions baixes (desenes de volts, com a molt) i d'electrònica de potència en el cas de tensions de desenes de volts cap amunt (fins a centenars de milers de volts, com en el cas de la distribució d'energia elèctrica). En aquesta unitat es tractaran alguns dispositius i circuits molt importants en el camp de l'electrònica, tant de petit senyal com de potència.

En l'apartat "Amplificadors operacionals" es veuran els dispositius anomenats *amplificadors operacionals*, que són segurament els components més importants que hi ha en el tractament analògic de petit senyal. Són presents en multitud de sistemes gràcies a la seva enorme versatilitat: permeten confeccionar tot tipus de circuits, com ara comparadors, amplificadors i filtres de qualsevol tipus, així com sumadors i restadors; a més, permeten combinar totes aquestes operacions matemàtiques i calcular integrals i derivades de qualsevol senyal.

En l'apartat "Components de potència i generació de senyal" es parlarà dels components de potència, bàsics en qualsevol sistema d'alimentació a mitjana o gran escala. També es revisaran diferents circuits de temporització i de generació de senyal. Els temporitzadors són les peces bàsiques que permeten introduir retards en parts d'un sistema quan cal, i els generadors de senyal són els circuits que permeten crear patrons de senyal que facin de rellotge per a sistemes que en necessitin (els sistemes digitals són un bon exemple d'això, tot i que no l'únic).

Resultats d'aprenentatge

En finalitzar aquesta unitat, l'alumne/a:

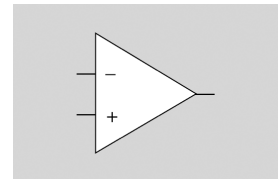
1. Reconeix circuits amplificadors determinant les seves característiques i aplicacions.
 - Descriu diferents tipologies de circuits amplificadors.
 - Descriu els paràmetres i característiques dels diferents circuits amplificadors.
 - Identifica els components amb els símbols que apareixen als esquemes.
 - Munta o simula circuits.
 - Verifica el seu funcionament.
 - Utilitza els instruments de mesura adients.
 - Descriu aplicacions reals dels circuits amplificadors.
 - Realitza les tasques que cal fer individualment amb autosuficiència i seguretat.
2. Reconeix sistemes electrònics de potència verificant les seves característiques i funcionament.
 - Reconeix els elements dels sistemes electrònics de potència.
 - Identifica la funció de cada bloc del sistema.
 - Enumera les característiques més rellevants dels components.
 - Munta o simula circuits.
 - Verifica el funcionament dels components (tiristor, diac, triac entre d'altres).
 - Utilitza els instruments de mesura adients.
 - Visualitza els senyals més significatius.
 - Descriu aplicacions reals dels sistemes d'alimentació controlats.
 - Realitza les tasques que cal fer individualment amb autosuficiència i seguretat.
3. Reconeix circuits de temporització i oscil·lació verificant les seves característiques i funcionament.
 - Reconeix els components dels circuits de temporització i oscil·lació amb dispositius integrats.
 - Descriu el funcionament de temporitzadors i oscil·ladors.
 - Verifica el funcionament dels circuits de temporització.
 - Verifica el funcionament dels circuits oscil·ladors.

- Utilitza els instruments de mesura adients.
- Munta o simula circuits.
- Visualitza els senyals més significatius.
- Descriu aplicacions reals dels circuits amb dispositius integrats de temporització i oscil•lació.
- Realitza les tasques que cal fer individualment amb autosuficiència i seguretat.

1. Amplificadors operacionals

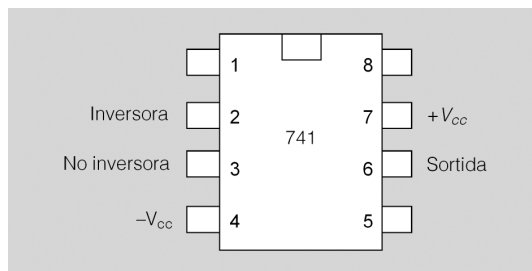
L'amplificador operacional (**AO**) és un circuit integrat analògic. La seva característica principal és proporcionar un guany diferencial de tensió molt elevat. És un element utilitzat en múltiples aplicacions.

L'AO té dues entrades i una sortida (V_o). L'entrada inversora es representa amb el signe menys (V_-) i l'entrada no inversora es representa amb el signe més (V_+).



Símbol de l'AO

FIGURA 1.1. Amplificador Operacional 741



En la figura 1.1 podeu veure el circuit integrat 741, amb la identificació dels seus terminals. Aquest xip conté en el seu interior un únic AO.

En el mercat hi ha gran quantitat i varietat d'AO i d'encapsulacions.

1.1 Característiques de l'amplificador operacional

Les característiques ideals de l'amplificador operacional són les següents:

- Guany de tensió en bucle obert: infinita.
- Resistència d'entrada: infinita.
- Resistència de sortida: 0.
- Ample de banda: infinit.
- Intensitats a les entrades V_- i V_+ : 0.

Direm que l'AO està en **bucle obert** quan no hi hagi cap tipus de connexió entre la seva sortida i alguna de les seves entrades. En general, quan l'AO funciona en **bucle tancat**, la tensió a l'entrada inversora és igual a la tensió de l'entrada no inversora. D'això se'n diu **curtcircuit virtual**.

En general es considera que els amplificadors operacionals idealment treballen en **curtcircuit virtual**, que vol dir que es considera el següent:

- $V_+ = V_-$
- El terminals d'entrada V_+ i V_- **no drenen corrent elèctric**.

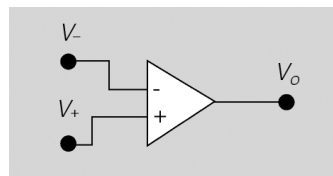
Depenent de les connexions externes que es realitzin a AO i els components utilitzats per realitzar-les, el circuit farà una funció o una altra.

1.2 L'amplificador operacional com a comparador

Comparador: $V_- > V_+ \rightarrow V_o = +V_{CC}$
 $V_- < V_+ \rightarrow V_o = -V_{CC}$

El circuit de la figura 1.2 realitza la comparació de dues tensions: V_- (entrada inversora) i V_+ (entrada no inversora).

FIGURA 1.2. Comparador



Si V_+ és més gran que V_- , la sortida és igual a la tensió positiva $+V_{CC}$ de l'alimentació.

Si V_- és més gran que V_+ , la sortida és igual a la tensió negativa $-V_{CC}$ de l'alimentació.

Exemple de comparador

Teniu un AO comparador alimentat a $+15\text{ V}$ i -15 V (és a dir, amb FA simètrica). Trobeu el valor de V_o si $V_+ = 2\text{ V}$ i $V_- = 1,5\text{ V}$.

Solució:

Com que $V_+ > V_-$, la sortida $V_o = 15\text{ V}$.

El comparador de la figura 1.2 és de bucle obert, i té l'inconvenient que és molt sensible a les interferències, i això fa que la V_o commuti fàcilment de forma no desitjada. Per solucionar aquest problema es realitza el comparador de la figura 1.3. En aquest muntatge, el senyal que s'ha de comparar entra pel terminal inversor.

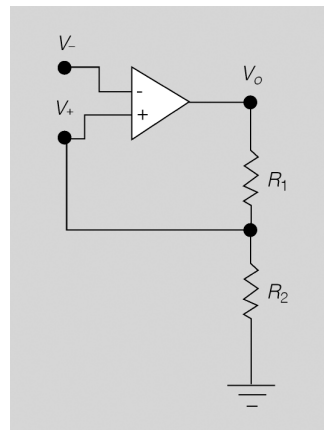
Les dues tensions de referència per les quals la sortida commuta són:

$$V_p = +V_o \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$V_v = -V_o \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

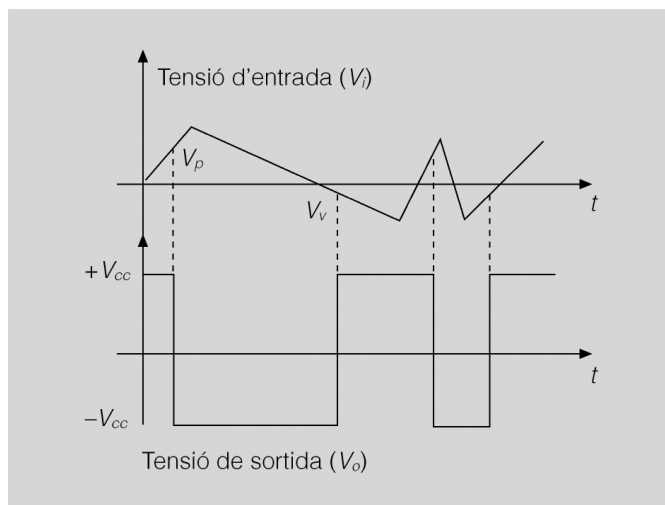
A on V_p és la tensió de pic i V_v és la tensió de vall (o tensió de pic negativa).

FIGURA 1.3. Comparador realimentat o bàscula Schmitt



Si observeu la figura 1.4, el senyal V_o no varia fins que la V_i no hagi sobrepassat el valor de V_p . Un cop sobrepassat, V_o és igual a $-V_{CC}$, i manté el seu valor fins que la V_i no tingui un valor més petit que V_v . En aquest moment V_o commuta a $+V_{CC}$ i és manté fins que V_i no sobrepassa V_p , i es repeteix el cicle.

FIGURA 1.4. Resposta de la bàscula Schmitt a una determinada entrada



Aquest sistema permet evitar rebots a la sortida del comparador en cas que la tensió d'entrada presenti algun petit arrissament.

1.3 L'amplificador operacional com a amplificador. Sumadors i restadors

Per definició, **amplificar és multiplicar el senyal d'entrada d'un circuit per un número**. D'aquesta manera, el que fan els amplificadors és multiplicar l'entrada per un número. Però els AO, en tenir dues entrades (positiva i negativa), permeten

un ventall de configuracions d'amplificació associada a suma de senyals, resta de senyals i d'altres.

En definitiva, gràcies a les configuracions d'amplificació habituals dels AO parlarem de:

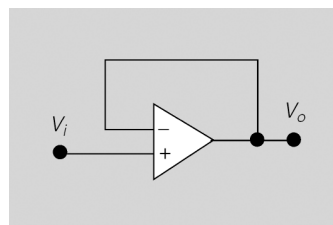
- **Seguiment de tensió:** quan l'amplificació valgui 1, és a dir, que la sortida és exactament igual que l'entrada (es fa servir quan un senyal de molt poca potència s'ha d'injectar a un circuit que només de connecta-lo faria malbé el senyal, amb un seguidor de tensió tenim un senyal de la mateixa forma però amb més potència).
- **Amplificació inversora:** quan el guany (el número pel qual es multiplica el senyal d'entrada) és negatiu, s'anomena *inversió* perquè es dona la volta al senyal en canviar-la de signe.
- **Amplificació no inversora:** quan el guany és positiu.
- **Amplificació amb suma:** quan apart d'amplificar-los si cal, el sistema suma o **resta** senyals.
- **Amplificació diferencial:** quan el sistema amplifica la diferència entre el senyal d'entrada positiu i el negatiu (és una configuració molt habitual a sistemes a on el soroll o les interferències són crítics).

Seguidor de tensió: $V_o = V_i$

1.3.1 Seguidor de tensió

En la figura 1.5, podeu veure el seguidor de tensió. Aquest circuit s'utilitza per exemple com a adaptador d'impedàncies. La **tensió de sortida és igual a la tensió aplicada a l'entrada**.

FIGURA 1.5. Seguidor de tensió



Comprovació del funcionament del seguidor

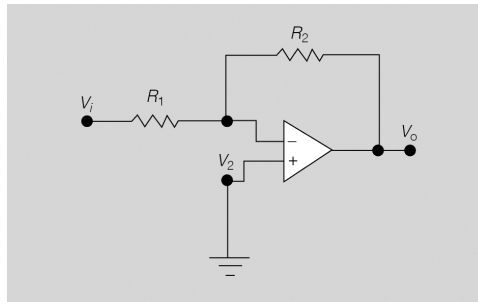
Al circuit de la figura 1.5, queda patent que $V_+ = V_i$ i que $V_- = V_o$.

Degut al curtcircuit virtual, sabem que $V_+ = V_-$. Així, igualant les anteriors equacions, obtenim: $V_o = V_i$

1.3.2 Amplificador inversor

El guany del circuit de la figura 1.6 és determinat per les dues resistències, el signe negatiu indica que V_o està invertida respecte a V_i . Observeu la simulació de la figura 1.7: quan la V_i és negativa V_o és positiva i quan V_i és positiva, V_o és negativa.

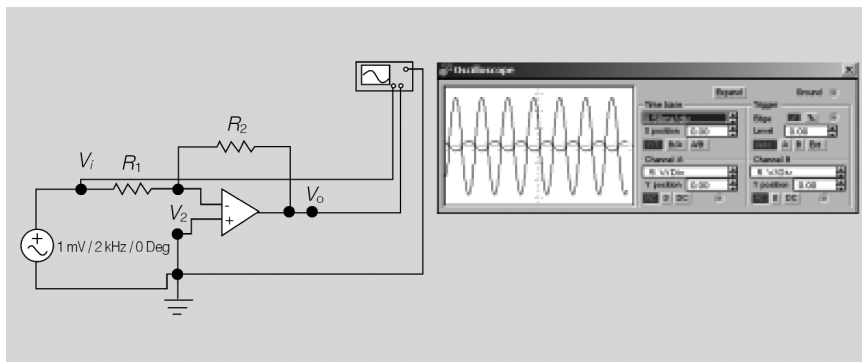
FIGURA 1.6. Amplificador inversor



A l'amplificador inversor el guany és:

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$

FIGURA 1.7. Visualització d'entrada i sortida d'un inversor



Exemple d'amplificador inversor

Si $R_2 = 10 \text{ K}\Omega$ i $R_1 = 1 \text{ K}\Omega$ quin serà el guany del circuit? Si $V_i = 1 \text{ mV}$, quin valor tindrà la sortida?

Solució:

Aplicant la fórmula del guany:

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{10.000}{1.000} = -10$$

La tensió de sortida serà:

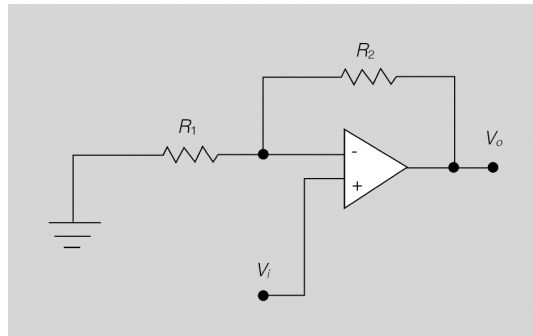
$$\frac{V_o}{0,001} = -10$$

$$V_o = -10 \cdot 0,001 = -0,01 \text{ V} = -10 \text{ mV}$$

1.3.3 Amplificador no inversor

Exactament igual que el circuit inversor, el guany és determinat per les dues resistències d'acord amb la fórmula, però la tensió de sortida està en fase amb la tensió d'entrada, és a dir, **no està invertida** (figura 1.8).

FIGURA 1.8. Amplificador no inversor



L'amplificació de l'amplificador no inversor és:

$$\frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Exemple d'amplificador no inversor

Si $R_2 = 10 \text{ K}\Omega$ i $R_1 = 1 \text{ K}\Omega$ quin serà el guany del circuit? Si $V_i = 1 \text{ mV}$, quin valor tindrà la sortida?

Solució:

Aplicant la fórmula del guany:

$$\frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 1 + \frac{10.000}{1.000} = 11$$

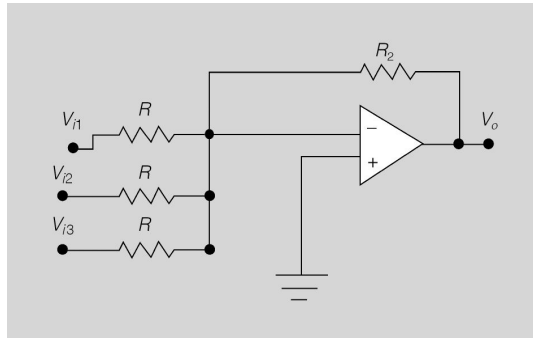
La tensió de sortida serà:

$$\frac{V_o}{0,001} = 11$$

$$V_o = 11 \cdot 0,001 = 0,011 \text{ V} = 11 \text{ mV}$$

1.3.4 Amplificador sumador

L'amplificador sumador, tal com podeu veure en la figura 1.9, realitza la suma d'una sèrie d'entrades V_{i1} , V_{i2} , V_{i3} , ... V_{in} , on n pot ser un número qualsevol, és a dir, el circuit podria tenir tantes entrades com vosaltres volguéssiu.

FIGURA 1.9. Amplificador sumador

La sortida de l'amplificador sumador es:

$$V_o = - \left(\frac{R_2}{R} \right) \cdot (V_{i1} + V_{i2} + \dots + V_{in})$$

Si observeu atentament el circuit sumador, us adonareu que correspon a l'esquema d'un inversor però amb més entrades. D'aquí el signe menys de la sortida.

El guany és determinat pel valor de R_2 i de la resistència R , que ha de tenir el mateix valor per a totes les entrades (condició indispensable per a què tots els senyals d'entrada siguin amplificats al mateix nivell).

Exemple de sumador

Si $R_2 = 10 \text{ K}\Omega$ i $R = 1 \text{ K}\Omega$ quin serà el guany del circuit? Si $V_{i1} = 1 \text{ mV}$, $V_{i2} = 3 \text{ mV}$ i $V_{i3} = 7 \text{ mV}$, quin valor tindrà la sortida?

Solució:

Aplicant la fórmula del guany:

$$\frac{V_o}{\Sigma V_i} = - \frac{R_2}{R_1} = - \frac{10.000}{1.000} = -10$$

La tensió de sortida serà:

$$\frac{V_o}{V_{i1} + V_{i2} + V_{i3}} = \frac{V_o}{0,001 + 0,003 + 0,007} = -10$$

$$V_o = -10 \cdot 0,011 = -0,11 \text{ V} = -110 \text{ mV}$$

1.3.5 Amplificador diferencial

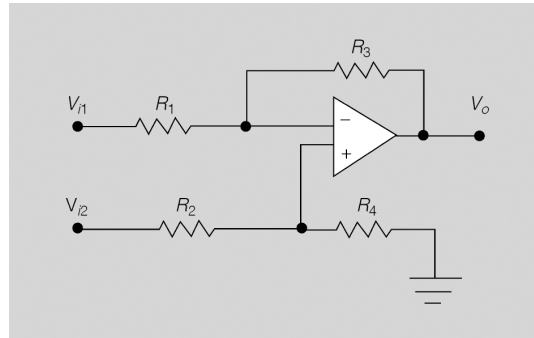
L'amplificador diferencial és molt utilitzat en instrumentació, en circuits de mesura de temperatures, de pes, deformacions, etc. La seva estructura es pot entendre com l'afegit de l'estructura no inversora i de l'estructura inversora. L'únic requisit és que ambdues estructures tinguin el mateix guany (figura 1.10).

El circuit de la figura 1.10 amplifica la diferència (resta) de dues tensions d'entrada ($V_{i2} - V_{i1}$) d'acord amb la fórmula, sempre que es compleixi el producte de resistències següent:

$$R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4$$

Amplificador diferencial:

$$V_o = \frac{R_3}{R_1} \cdot (V_{i2} - V_{i1})$$

FIGURA 1.10. Amplificador diferencial**Exemple d'amplificador diferencial**

Si $R_4 = R_3 = 10 \text{ K}\Omega$ i $R_2 = R_1 = 1 \text{ K}\Omega$ quin serà el guany del circuit? Si $V_{i1} = 1 \text{ mV}$ i $V_{i2} = 3 \text{ mV}$, quin valor tindrà la sortida?

Solució:

Aplicant la fórmula del guany:

$$V_o = \frac{R_3}{R_1} \cdot (V_{i2} - V_{i1}) = \frac{10.000}{1.000} \cdot (V_{i2} - V_{i1}) = 10 \cdot (V_{i2} - V_{i1})$$

La tensió de sortida serà:

$$V_o = 10 \cdot (0,003 - 0,001) = 10 \cdot 0,002$$

$$V_o = 10 \cdot 0,002 = 0,02 \text{ V} = 20 \text{ mV}$$

1.4 Aplicacions bàsiques amb dispositius integrats

Els amplificadors operacionals no serveixen només per fer sumes i restes de senyals, sinó que n'existeix un gran ventall d'aplicacions ben diverses, i no només de caire *matemàtic*, com es podria desprendre del nom del dispositiu. Així, entre moltes d'altres aplicacions, podríem parlar de:

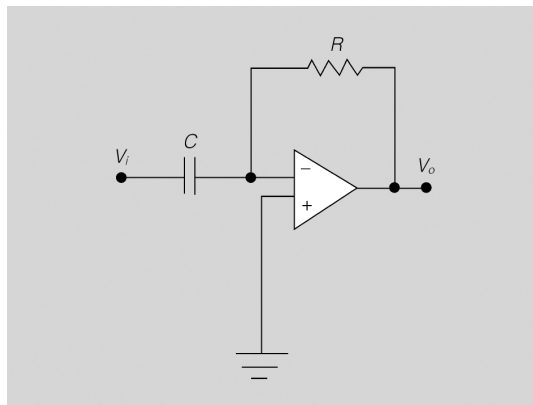
- Amplificadors logarítmics
- Integradors
- Derivadors o diferenciadors (no confondre amb els amplificadors diferenci- als)
- Filtres actius (filtres amb amplificació)
- Portes digitals (per a això no s'usen perquè hi ha elements millors, però es podria)
- Convertidor de senyals
- Oscil·ladors i generadors de senyal

Algunes de les aplicacions citades són poc freqüents, però d'altres d'elles són ben importants en molts àmbits.

1.4.1 Integrador i derivador

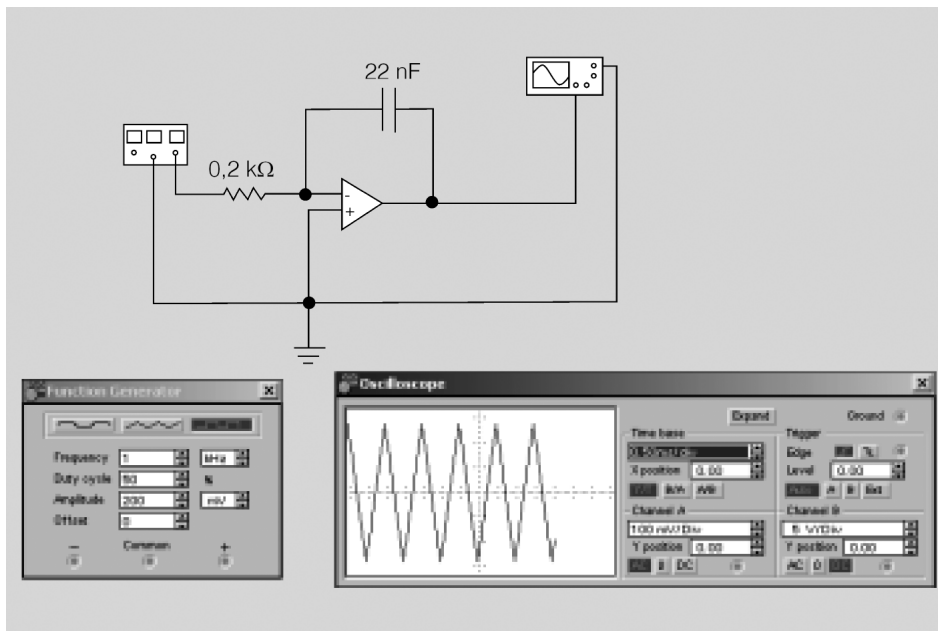
Si observeu el circuit de la figura 1.11, podeu veure que s'aplica un senyal quadrat a l'entrada del circuit, i a la sortida s'obté un senyal triangular. El circuit realitza la conversió d'un senyal quadrat a un de triangular.

FIGURA 1.11. Derivador



El circuit de la figura 1.12 realitza el pas contrari, és a dir, a la seva entrada s'introdueix un senyal triangular i a la seva sortida s'obté un senyal quadrat.

FIGURA 1.12. Integrador



Aquests dos circuits s'utilitzen habitualment per realitzar generadors de senyals.

En termes estrictament matemàtics, el circuit de la figura 1.11 dona a la sortida la derivada de la funció que té a l'entrada, d'aquí el seu nom.

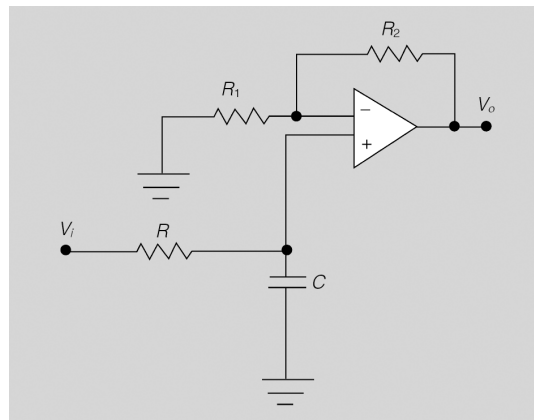
Anàlegament al derivador, el circuit de la figura 1.12 es diu *integrador* perquè en termes matemàtics el que fa és calcular la integral de la funció que té a l'entrada.

La integral és l'operació recíproca o inversa de la derivada, per això un circuit pot desfer el que fa l'altre.

1.4.2 Filtre passabaix

El circuit de la figura 1.13 és un amplificador no inversor. Si l'observeu, s'ha afegit una xarxa RC a l'entrada, que realitza la funció de filtre passabaix. És a dir, el circuit amplificarà sempre que la freqüència del senyal d'entrada estigui compresa dins l'amplada de banda del circuit. Com que és un filtre passabaix, la freqüència inferior és 0 Hz i la freqüència superior és determinada per R i C . Com que és un filtre passabaix $BW = F_s - 0 = F_s$.

FIGURA 1.13. AO filtre passabaix



Les expressions de la freqüència superior, guany i sortida són, respectivament:

$$F_s = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$

$$G_V = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

$$V_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot V_i$$

Ús dels filtres

Els filtres s'utilitzen per seleccionar un o diversos senyals d'entre molts o per eliminar interferències en un circuit; podeu trobar filtres en instal·lacions d'antenes, televisions, vídeos, receptors de ràdio (FM i AM), etc.

Exemple de filtre passabaix

Teniu un filtre passabaix amb AO amb els valors següents: $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 20 \text{ k}\Omega$, $R = 1 \text{ k}\Omega$ i $C = 22 \text{ nF}$. Calculeu:

- El guany i el BW .
- Si introduïu un senyal $V_i = 1 \text{ mV}$ a 2 kHz , quin valor tindria V_o ?
- Si introduïu un senyal $V_i = 5 \text{ mV}$ a 10 kHz , quin valor tindria V_o ?

Solució:

- En primer lloc, calculeu el guany i la F_s .

$$G_V = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = \left(1 + \frac{20.000}{10.000}\right) = 3$$

$$F_s = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 1.000 \cdot 22 \cdot 10^{-9}} = 7.234,3 \text{ Hz}$$

L'amplada de banda és $BW = F_s = 7,3 \text{ kHz}$. Això vol dir que el circuit només funciona com a autèntic amplificador a dins del marge entre 0 i 7,3 kHz.

b) En aquest apartat, la V_i té una freqüència de 2 kHz, per tant, es troba dins del marge d'amplificació, la sortida serà:

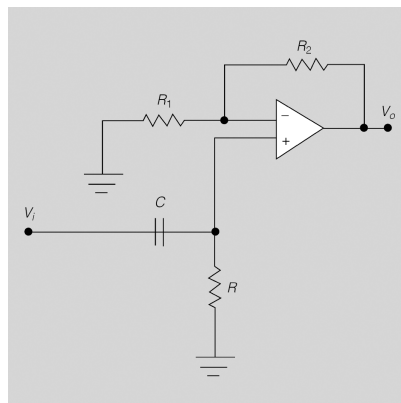
$$V_o = G_V \cdot V_i = 3 \cdot 1 = 3 \text{ mV}$$

c) En aquest apartat, la V_i té una freqüència de 10 kHz, es troba fora del marge d'amplificació. Per tant, idealment a la sortida no tindreu cap tipus de senyal: $V_o = 0$ (això no és ben bé així, però es pot considerar així en primera aproximació).

1.4.3 Filtre passaalt

El circuit de la figura 1.14 és el mateix que d'un circuit passabaix, l'únic que s'ha canviat és la xarxa RC.

FIGURA 1.14. AO filtre passaalt



En aquest cas, el circuit es comporta com un filtre passaalt, és a dir, el circuit amplificarà el senyal d'entrada sempre que la freqüència d'aquest sigui superior a F_i . El valor de F_i s'obté dels valors de R i de C , anàlogament a com es feia amb el filtre passabaix. La seva expressió, juntament amb les de guany i sortida, són:

$$F_i = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$

$$G_V = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

$$V_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot V_i$$

Connexió en cascada

Es diu que una sèrie de circuits estan connectats en cascada quan s'interconnecten entre si de manera que **la sortida d'un circuit ataca l'entrada del següent**, i així successivament. En general, la sortida del sistema global es pot calcular aplicant successivament els guanys de cadascuna de les etapes, un rera l'altre.

1.4.4 Filtre de pas de banda

Un filtre de pas de banda (figura 1.15) no és res més que un filtre passaalt connectat en cascada amb un filtre passa baix. Amb el primer filtre determineu la F_i i amb el segon, la F_s .

Com que són dos amplificadors connectats en cascada, el guany total (G_{Vt}) del circuit s'obté del producte dels dos guanys, on G_{V1} és el guany de la primera etapa i G_{V2} és el guany de la segona etapa. Les fórmules que caracteritzen aquest filtre són:

$$F_i = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_i \cdot C_i}$$

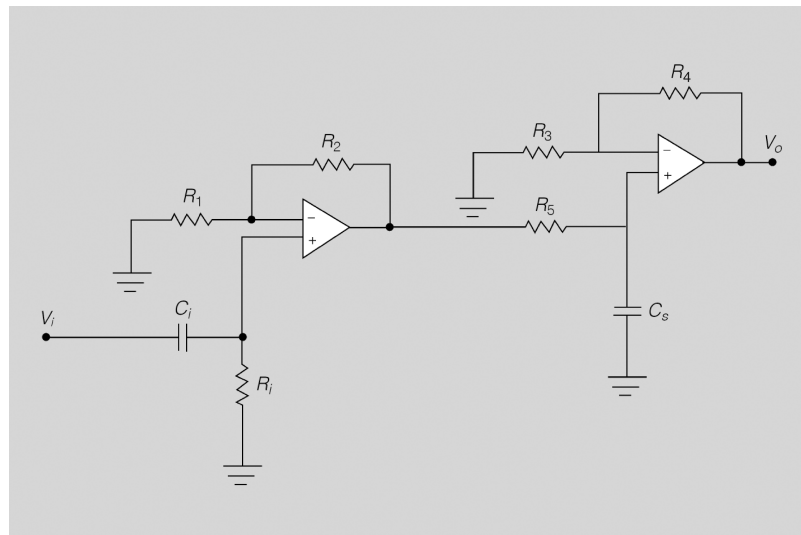
$$F_s = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_s \cdot C_s}$$

$$G_{Vt} = G_{V1} \cdot G_{V2}$$

$$G_{Vt} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)$$

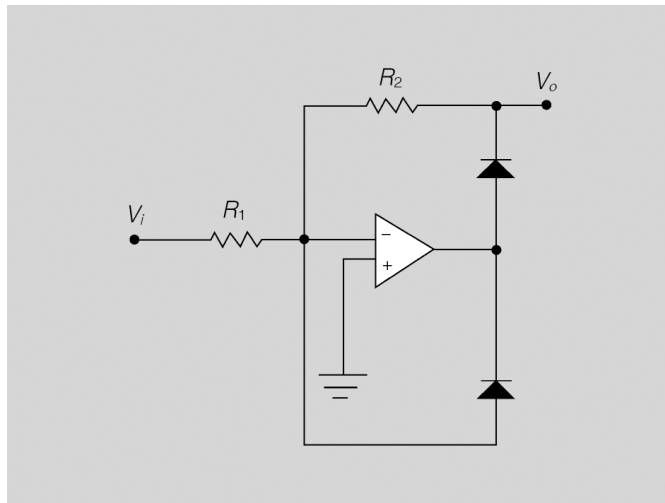
$$V_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) \cdot V_i$$

FIGURA 1.15. AO filtre de pas de banda



1.4.5 Altres circuits

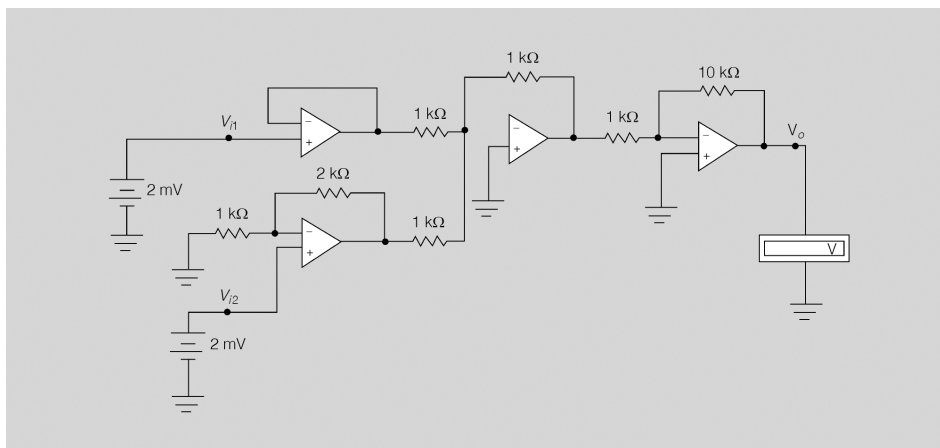
Amb l'amplificador operacional es poden realitzar una quantitat molt elevada de circuits amb diferents funcions o finalitats, com per exemple un rectificador com el de la figura 1.16.

FIGURA 1.16. Amplificador rectificador de precisió de mitja ona

En el circuit de la figura 1.16 rectifica el senyal V_i , que pot ser d'un valor petit (de l'ordre dels mV), i a la sortida s'obté una V_o rectificada i amplificada, on el guany de tensió és determinat per:

$$G_V = -\frac{R_2}{R_1}$$

A l'hora d'interpretar esquemes us trobareu amb circuits com els de la figura 1.17, a on s'observa l'existència d'un conjunt d'etapes interconnectades. A l'esquema, cada AO realitza un funció concreta que ha de ser identificada.

FIGURA 1.17. Circuit amb AO

Exemple de circuit genèric amb AO

Per al circuit de la figura 1.17, calculeu el valor de la tensió de sortida.

Solució:

Per poder trobar el valor de la V_o , el primer que s'ha de fer és identificar cadascun dels AO:

- L'entrada V_{i1} està aplicada a un AO seguidor de tensió.
- La sortida d'aquest seguidor ataca un AO sumador.
- La sortida del sumador està connectada a un amplificador inversor.

Observeu ara l'entrada V_{i2} :

- Està connectada a un amplificador no inversor.
- La sortida d'aquest no inversor és l'altra entrada de l'AO sumador.

Amb els valors del circuit, trobareu ara el valor de la V_o :

1. La sortida del seguidor és igual a $V_{i1} = 2 \text{ mV}$.
2. La sortida del no inversor és igual a 6 mV .
3. La sortida del sumador amb les seves dues entrades de 2 mV i 6 mV és igual a -8 mV .
4. Finalment, l'entrada de l'amplificador inversor és de -8 mV , i per tant, aplicant la fórmula, teniu que $V_o = 80 \text{ mV}$.

2. Electrònica de potència i generació de senyal

Avui dia hi ha una gran quantitat de dispositius elèctrics que requereixen una variació de la seva alimentació (tensió) per funcionar correctament. Aquests sistemes d'alimentació variables es duen a terme fent servir components i circuits electrònics que permeten la regulació de velocitat d'un motor, la variació de la intensitat lluminosa, controls de temperatura de forns, alimentacions regulades, etc.

Aquests circuits utilitzen bàsicament semiconductors, com el tiristor i el triac per controlar la potència, i el diac.

Els circuits temporitzadors són utilitzats en el control d'apagada i encesa automàtica de motors, bombetes, ventiladors, etc. Veurem també circuits oscil·ladors d'ona sinusoidal i circuits generadors de diferents tipus d'ones. Aquests circuits s'utilitzen per generar senyals de control, d'ajust i sincronització en altres circuits més complexos.

Per realitzar tots aquests circuits, utilitzarem transistors, amplificadors operacionals i algun circuit integrat lineal específic per a aplicacions analògiques.

2.1 Tiristor, fototiristor, triac i diac

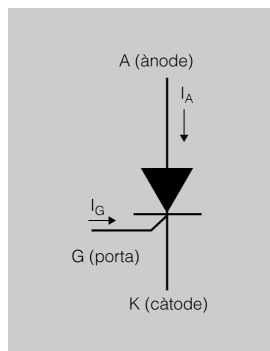
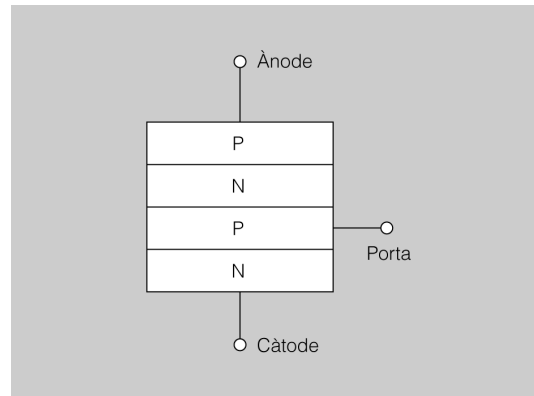
L'aplicació dels dispositius semiconductors a l'electrònica de potència s'adreça primordialment al control i transformació de potència. Tots aquests dispositius dedicats a la potència deriven en una manera o en una altra del díode i del transistor. A grans trets, són els següents:

- **Tiristors**, també anomenats *rectificadors controlats de silici* o **SCR** (de l'anglès *silicon controlled rectifier*).
- **Triacs** o triodes per a corrent altern.
- **Diacs** o díodes per a corrent altern.

2.1.1 Tiristors

El **tiristor** (**SCR**, *silicon controlled rectifier* o rectificador controlat de silici) és un dispositiu semiconductor biestable format per quatre capes P i N alternativament disposades (PNPN), tal com podem veure en la figura 2.1.

Un tiristor és un interruptor gairebé ideal i un rectificador.

FIGURA 2.1. Representació del tiristor

Símbol elèctric del tiristor

El tiristor està format per tres terminals anomenats **ànode (A)**, **càtode (K)** i **porta (G)**, de l'anglès *gate* respectivament. L'instant de commutació pot ser controlat amb tota precisió actuant sobre la porta (G). El tiristor és un element unidireccional, actua com un interruptor i només condueix corrent en un sentit, d'ànode a càtode. Sempre que l'element estigui polaritzat en sentit directe (tensió ànode positiu / càtode negatiu) i es faci aplicant un senyal a la porta (G) el tiristor conduirà.

El tiristor es comporta com un interruptor governat per un element, el terminal porta (G). Quan apliquem un impuls o un petit corrent a la porta (G), activem el pas de corrent que circularà pel tiristor (corrent entre ànode i càtode). Si la polarització és inversa (tensió ànode negatiu / càtode positiu), l'element estarà sempre bloquejat.

El tiristor pot tenir les aplicacions següents:

- **Rectificació:** aprofitant que és un element unidireccional, fa la funció d'un díode.
- **Interruptor de corrent:** si el fem servir com a interruptor, pot reemplaçar els contactors mecànics, molt més problemàtics.
- **Regulació:** com que té la possibilitat d'ajustar el moment precís de conducció, permet governar la potència o el corrent de càrrega.
- **Amplificació:** atès que el corrent de comandament és molt petit comparat amb el corrent principal, es produeix un fenomen d'amplificació de corrent o potència.

Càrrega

La càrrega és una resistència de consum que fa servir l'energia per dur a terme una feina. En són exemples una bombeta, un motor, un escalfador, etc.

El tiristor posseeix una sèrie de característiques que el fan apte per ser utilitzat en circuits de potència. Podem destacar-ne les següents:

- Interruptor gairebé ideal
- Amplificador eficaç (un petit senyal de porta produeix un gran senyal A-K).
- Fàcil control
- Característiques en funció de situacions passades (memòria)

- Capacitat per suportar altes tensions.
- Capacitat per controlar grans potències.
- Rapidesa relativa

Podem distingir dos tipus de tiristors. Són els següents:

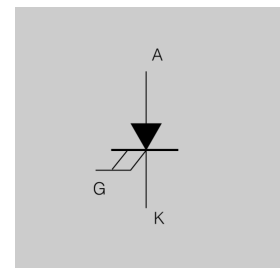
- **GTO**, o *gate turn-off*, que vol dir que es pot apagar mitjançant la porta.
- **MCT** o *MOS controlled thyristor* que vol dir tiristor control·lat per transistors de tipus MOS o MOSFET.

GTO

El **GTO** (*gate turn-off*) és un dispositiu semiconductor de potència que combina les característiques més desitjables d'un tiristor convencional i les d'un transistor bipolar, presentant l'avantatge de poder passar de l'estat de conducció a l'estat de bloqueig per mitjà de l'aplicació d'un impuls negatiu a la porta.

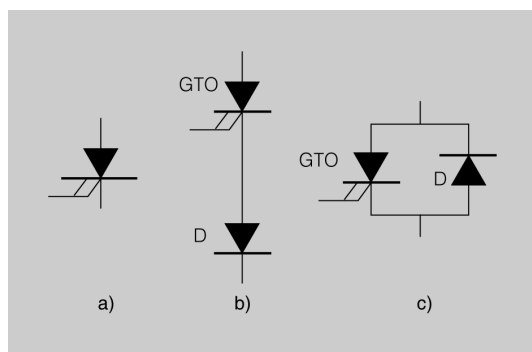
La característica V-I del GTO és similar a la d'un tiristor convencional. La tensió ànode-càtode (V_{AK}) quan el dispositiu condueix serà aproximadament de 3 V, i el corrent que hi circula només es trobarà limitat per la càrrega exterior col·locada en el circuit.

La característica inversa del GTO és equivalent a una resistència que és incapaç de bloquejar tensió o de conduir un corrent significatiu. Per al corrent continu, el dispositiu no presenta cap problema. Això no obstant, si es vol bloquejar qualsevol tensió inversa, caldrà connectar en sèrie un díode amb el GTO, i si es vol que passi el corrent, haurem de connectar un díode en antiparal·lel amb el dispositiu. Això ho podem veure representat en la figura 2.2.

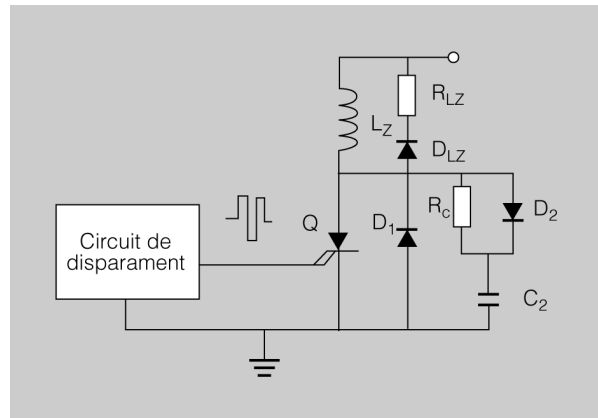


Símbol elèctric del GTO

FIGURA 2.2. Configuració d'un GTO en inversa



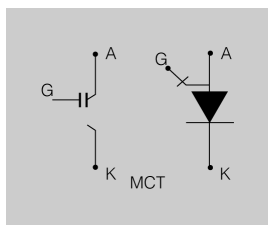
La característica de comandament s'estudia sobre un possible circuit de comandament de porta que inclou, a més, un sistema de protecció contra sobretensions i sobreintensitats del GTO, similar al que es fa servir amb els tiristors.

FIGURA 2.3. Configuració de comandament

En la figura 2.3, podem veure el següent: d'una banda, per limitar la velocitat de creixement de la variació de tensió es fa servir el circuit format per la resistència R_S , el díode D_S , i el condensador C_S ; i de l'altra, per limitar la velocitat de creixement del corrent s'utilitza el circuit format per la bobina L_Z , la resistència R_{LZ} , i el díode D_{LZ} .

En aquest circuit de comandament hi ha un temps durant el qual el senyal és positiu respecte al càtode —i dona senyal—, i un altre durant el qual és negatiu i no dona cap senyal.

MCT

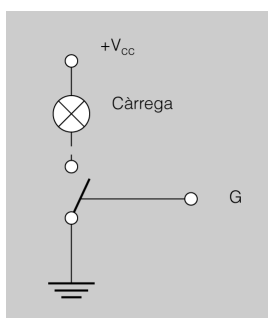


Símbol elèctric del MCT

L'**MCT** (*MOS controlled thyristor*) és un tiristor o un GTO integrat en una pastilla juntament amb dos transistors tipus MOSFET. Un d'aquests transistors passa el tiristor de l'estat de tall a l'estat de conducció, mentre que l'altre el passa de l'estat de conducció a l'estat de tall.

La freqüència de commutació del dispositiu pot ser superior als 20 kHz. Caldrà tenir en compte que la caiguda de tensió en conducció del MCT és baixa, atès que es troba al voltant de 1,1 V.

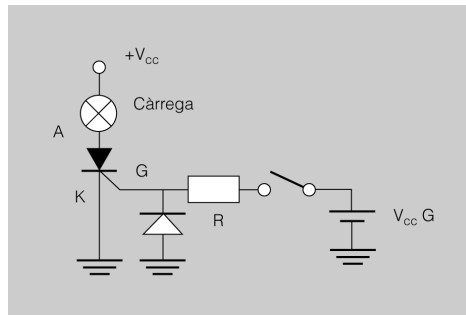
El MCT té una sèrie de propietats que cobreixen un ampli rang d'aplicacions. El seu principal desavantatge és que la seva capacitat de bloqueig invers del dispositiu és inferior a la del GTO, en favor de la velocitat de commutació.



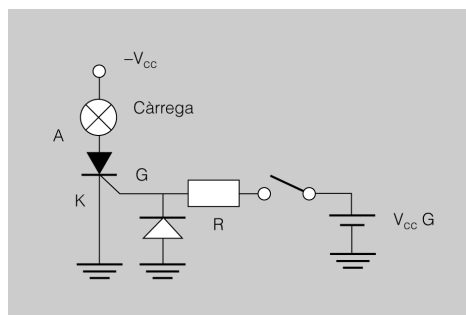
Símbol elèctric del tiristor

2.1.2 Funcionament del tiristor en corrent continu

El tiristor és com un díode: l'hem de polaritzar correctament, tal com es pot veure en la figura 2.4. Hem d'aplicar el potencial positiu (+ de bateria) a l'ànode (A), i el negatiu (- de bateria) al càtode (K). En aquestes circumstàncies, el tiristor estarà en disposició de conduir, però no conduirà fins que no apliquem una petita tensió o corrent al terminal porta (G).

FIGURA 2.4. Polarització directa

Si, al contrari, polaritzem inversament (figura 2.5), és a dir, si apliquem el potencial negatiu (- de bateria) a l'ànode (A), i el positiu (+ de bateria) al càtode (K), el dispositiu no funcionarà mai, encara que apliquem alguna tensió o corrent al terminal porta (G). El seu comportament serà el d'un interruptor obert.

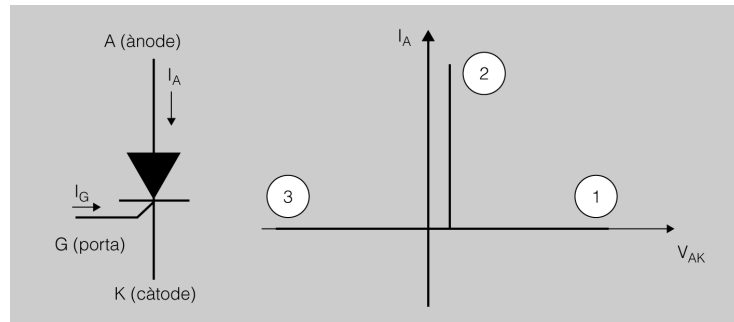
FIGURA 2.5. Polarització inversa**Simil elèctric**

Com a concepte de funcionament del tiristor es pot substituir el tiristor per un interruptor per entendre que el seu comportament és similar. La porta governarà quan es tanca l'interruptor i quan s'obre.

V_{AK} : tensió entre ànode i càtode

En la corba característica de la figura 2.6 idealitzada del tiristor, hi podem distingir tres zones:

1. **Zona 1.** V_{AK} positiva (l'ànode té major potencial que el càtode). La intensitat de l'ànode (I_A) pot seguir essent nul·la. El dispositiu es comporta com un circuit obert (es troba en estat de bloqueig directe).
2. **Zona 2.** V_{AK} positiva. En aquest instant s'introdueix un senyal de comandament per la porta que fa que el dispositiu basculi de l'estat de bloqueig a l'estat de conducció i que circuli una I_A pel dispositiu, intensitat que estarà limitada només pel circuit exterior. L'element està en estat de conducció. El pas d'estat de conducció a estat de tall es fa polaritzant la unió ànode-càtode en sentit invers, el que provocarà que la intensitat principal que circula es faci menor que el corrent de manteniment (I_H).
3. **Zona 3.** V_{AK} negativa. La I_A és nul·la, per la qual cosa el dispositiu equival a un circuit obert i es troba en estat de bloqueig invers.

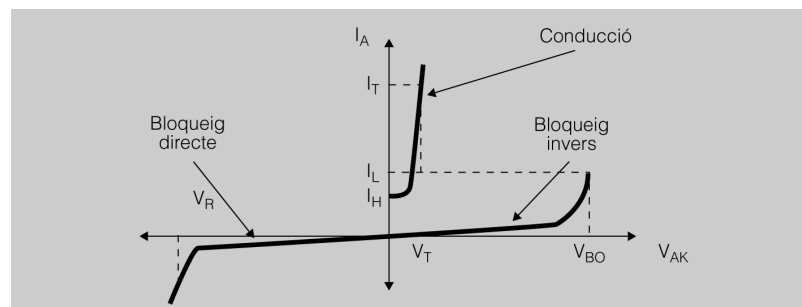
FIGURA 2.6. Símbol i gràfic de característiques de funcionament en CC

Quan el polaritzem inversament —figura 2.5— (tensió ànode negatiu / càtode positiu), el tiristor no conduirà, es comportarà com un interruptor obert. Ara bé, el tiristor pot suportar una tensió inversa màxima que dóna el fabricant, anomenada V_{RSM} (tensió inversa màxima no repetitiva): si superem aquest límit, el tiristor conduirà en efecte allau i es destruirà.

Quan el polaritzem directament —figura 2.4— tenim dues possibilitats:

1. Sense excitació de porta, és a dir que no apliquem cap senyal al circuit. En aquestes condicions, si no s'aplica cap senyal en la porta (G) i l'ànode-càtode està polaritzat directament (tensió ànode positiu / càtode negatiu), el tiristor no conduirà.
2. Amb excitació de porta, és a dir que apliquem senyal al circuit. Si apliquem un corrent de porta (G), el tiristor entrarà en conducció i es comportarà com un interruptor tancat, de manera que circularà corrent entre l'ànode i el càtode. La tensió ànode-càtode V_{AK} en conducció és d'entre 1 i 2 V.

En la figura 2.7, corresponent a les corbes característiques del tiristor, podem observar que en el primer quadrant no hi ha corrent I_A , encara que augmenti la tensió V_{AK} , el que indica que el tiristor no condueix. Quan hi ha un corrent de porta I_L sí que condueix, la qual cosa queda reflectida en l'augment de corrent I_A . El valor I_H és el corrent mínim de porta (G) per mantenir el tiristor en conducció. El valor V_T és la caiguda de tensió del tiristor quan condueix.

FIGURA 2.7. Corbes característiques del tiristor

En el tercer quadrant podem veure com el tiristor polaritzat inversament no condueix, fins que arriba al valor màxim que pot suportar (V_{RSM} —tensió inversa màxima no repetitiva), en què es produeix l'efecte allau.

Tant per a l'estat de bloqueig directe com per a l'estat de polarització inversa, hi ha uns petits corrents de fugues.

2.1.3 Modes de comandament de tiristors

Es poden distingir tres modes de comandament per al tiristor:

1. **Comandament de porta per corrent continu.** En el circuit de la figura 2.8 podem veure com aplicant un corrent d'una bateria es pot governar el tiristor perquè condueixi.
2. **Comandament de porta per corrent altern.** En el circuit de la figura 2.9 podem veure com aplicant un corrent altern també es pot governar el tiristor perquè condueixi.
3. **Comandament per pols de senyal o tren d'ones.** En el circuit de la figura 2.10 podem veure com aplicant un successió de polsos elèctrics també es pot governar el tiristor perquè condueixi.

FIGURA 2.8. Comandament per corrent continu

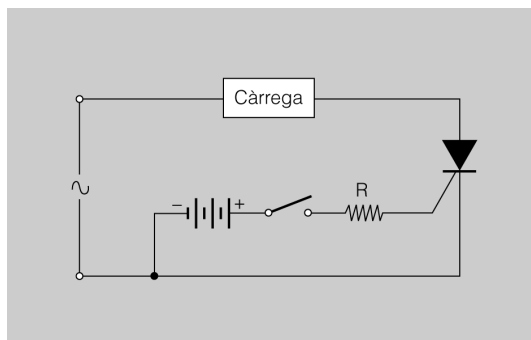


FIGURA 2.9. Comandament per corrent altern

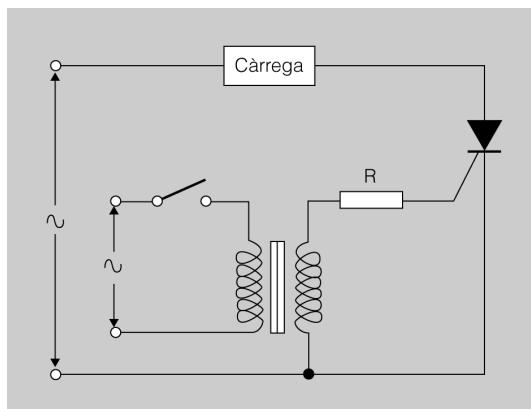
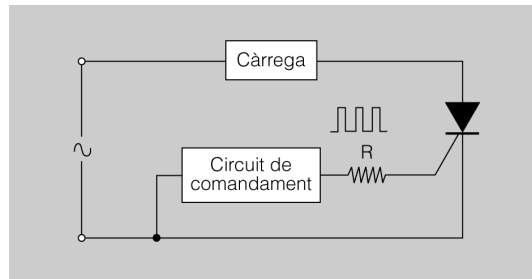
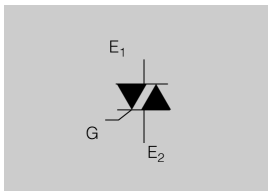


FIGURA 2.10. Comandament per pols de senyal

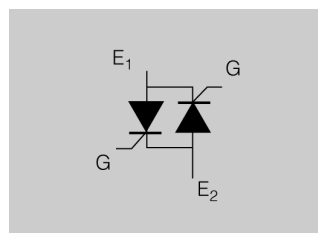
2.1.4 Triac



Símbol electrònic del triac

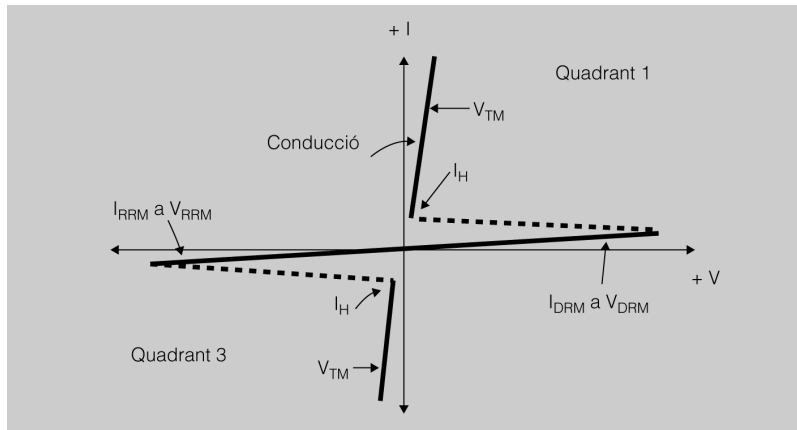
El triac és un semiconductor de tres terminals: dos de principals (E_1 i E_2 , o T_1 i T_2), i un altre de control, denominat **porta (G)**. Aquest dispositiu té la capacitat de controlar el pas de corrent en ambdues direccions (és a dir, és un dispositiu bidireccional), per la qual cosa és molt utilitzat en la regulació de corrent altern.

El triac presenta l'avantatge de poder passar a l'estat de conducció tant per a tensions negatives com per a tensions positives. Una manera simple de descriure'n el comportament és comparant-lo amb dos tiristors connectats en antiparal·lel, com es veu en la figura 2.11.

FIGURA 2.11. Símil en antiparal·lel

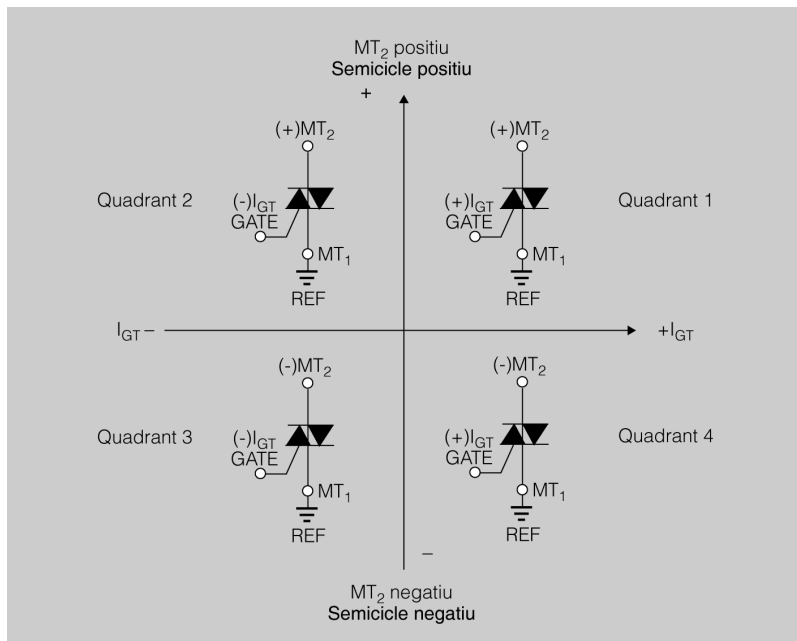
És més fàcil controlar un triac que dos tiristors, però quan la potència que s'ha de controlar és excessiva per a les característiques del triac (atès que la potència que el triac pot dissipar és reduïda), es pot substituir per dos tiristors col·locats en antiparal·lel.

El triac és sensible a variacions poc brusques de tensió i corrent en un espai de temps reduït. Per tant, es pot dir que el dispositiu té baixa velocitat de commutació (una freqüència de treball d'entre 50 i 60 Hz). El límit de freqüència per a aquest tipus de dispositius es troba a l'entorn dels 400 Hz. També s'hi pot veure que la corba característica del triac és idèntica a la del tiristor. Aquesta característica la veiem representada en la figura 2.12, on podem observar la simetria del dispositiu. Però com que el triac pot conduir en els dos sentits, aquesta corba és simètrica en els quadrants 1 i 3.

FIGURA 2.12. Corba característica del triac

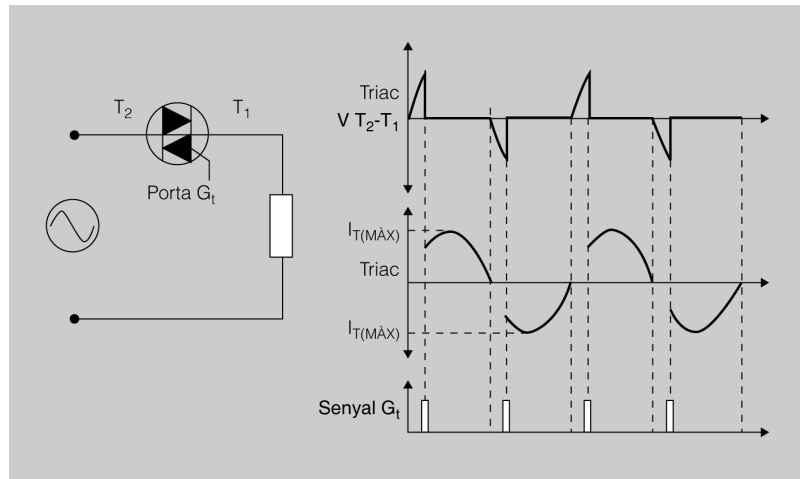
Modes de funcionament del triac

Segons es pot apreciar en la figura 2.13, hi ha quatre modes de comandament.

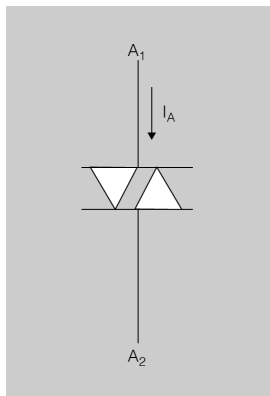
FIGURA 2.13. Modes de funcionament del triac

En el primer quadrant podem veure com al terminal T_2 s'hi aplica el potencial positiu i al terminal T_1 , el negatiu, i a la porta G un potencial positiu. En el segon quadrant tenim els terminals T_2 i T_1 , igual que en l'anterior, però la porta ara és negativa. En conclusió, el triac pot conduir tant si el corrent de porta (G) és positiu com si és negatiu. En el tercer i quart quadrants, al terminal T_2 s'hi aplica el potencial negatiu i al terminal T_1 , el positiu. En aquest cas, el triac també condueix, tant si el corrent de porta (G) és positiu com si és negatiu.

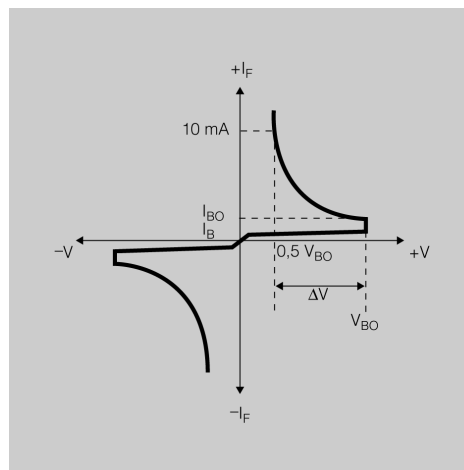
En la figura 2.14 veiem un regulador de corrent altern amb triac. Com podem observar en el circuit i en els oscil·logrames, quan arriba el senyal a la porta (G) el triac condueix, la qual cosa queda reflectida en el gràfic de corrent del triac. Quant el corrent altern passa per zero, el triac deixa de conduir, i no condueix fins que no arriba un altre senyal a la porta.

FIGURA 2.14. Regulador d'alterna amb triac

2.1.5 Diac



Simbol del diac

FIGURA 2.15. Corba característica de diac

El diac és un element semiconductor simètric; és a dir, no està polaritzat. La seva tensió de conducció és aproximadament d'uns 30 volts.

Els diacs són molt útils per fer variadors de potència molt simples. Permeten obtenir corrents de comandament de valor elevat amb condensadors de poc volum. Com podem observar en la figura 2.15, la corba característica del diac condueix en els dos sentits del corrent i es dispara en la tensió V_{BO} del gràfic.

2.2 Sistemes d'alimentació controlats

El control dels sistemes d'alimentació es realitza mitjançant els **circuits de comandament**, que són els circuits destinats a fer el control i a governar el funcionament dels elements de control de potència. Els circuits de comandament

de tiristors i triacs presenten dues maneres de controlar:

1. El circuit de **tot o res**, que s'utilitza en els circuits:
 - relés estàtics,
 - control de potència.
2. El circuit per **angle de fase**, que s'utilitza en els circuits:
 - rectificació controlada,
 - control de corrent altern,
 - altres circuits de control.

2.2.1 Circuit de tot o res

La característica general d'aquest circuit és que només hi ha dos estats de comportament o funcionament: l'**estat de conducció** o **tot** (conducció sempre al mateix corrent) i l'**estat de bloqueig** o **res**.

Relés estàtics

Els tiristors i els triacs substitueixen en gran mesura els relés i els contactors convencionals, ja que presenten alguns avantatges respecte d'aquests, com són:

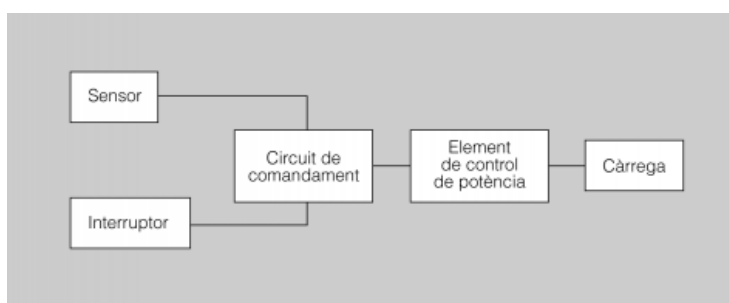
- Una major rapidesa de resposta
- Menor mida
- No hi ha contactes mecànics
- No hi ha espurneig entre contactes

Relé estàtic

Un relé estàtic és un interruptor electrònic, normalment per a un tiristor o un transistor de potència.

En la figura 2.16 podem veure per blocs els elements que formen un relé estàtic.

FIGURA 2.16. Blocs d'un relé estàtic



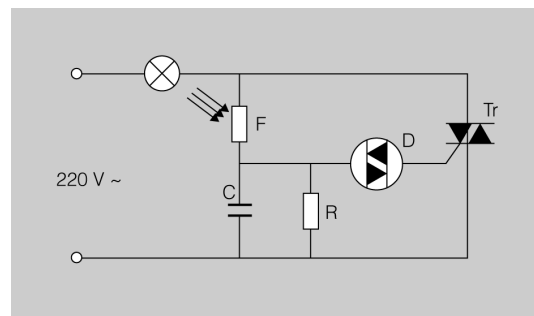
Els circuits que fan servir tiristors o triacs com a interruptors estàtics acostumen a tenir la mateixa disposició, tal com queda reflectit en la figura 2.16. Allà es pot

apreciar l'element de control de potència (tiristor, triac...) connectat a la càrrega. Un circuit de control de comandament està governat bé per un interruptor, o bé per un sensor com ara una fotocèl·lula, un termistor, etc.

Circuit de control de potència asíncron

En nombroses aplicacions, un circuit electrònic ha de respondre directament a tot o res per mantenir una variable física (temperatura, llums, etc.) a un valor constant, regulant-ne la potència. Així, podem distingir entre els circuits de control de potència síncrons (sincronitzats a la freqüència de la xarxa) i els asíncrons (més econòmics però més dèbils enfront les interferències a radiofreqüències i paràsits).

FIGURA 2.17. Exemple de circuit de control de potència asíncron



El funcionament d'aquest circuit mostrat a la figura 2.17 es basa en el següent: quan la fotocèl·lula F (sensor) està il·luminada, la seva resistència és baixa i el condensador es podrà carregar a la tensió de conducció del diac D (element de comandament) i podrà aplicar un pols de corrent al triac Tr (element de control de potència), de manera que pugui circular corrent per la bombeta (càrrega); en canvi, si la fotocèl·lula F es troba amb poca llum, la seva resistència serà molt alta i el condensador no es podrà carregar a la tensió de conducció del diac D, de manera que el triac Tr no conduirà i la bombeta no s'encendrà.

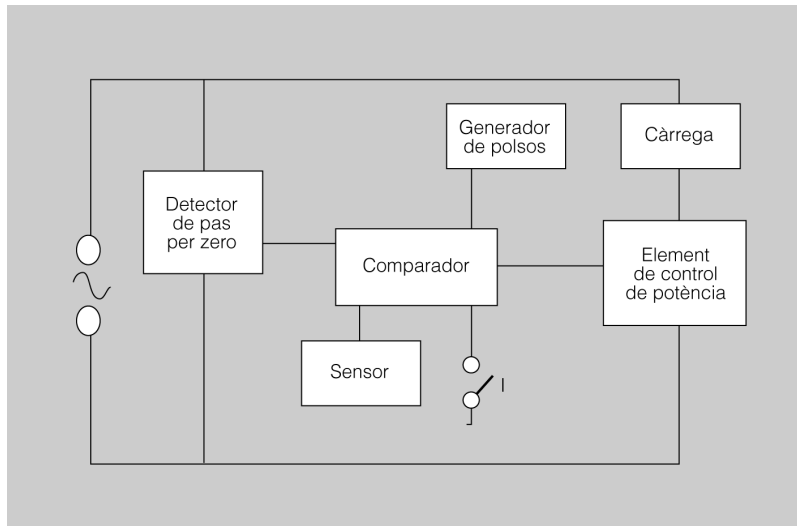
LDR: resistència que varia amb la llum.

NTC: resistència que baixa el seu valor amb la temperatura.

PTC: resistència que augmenta el seu valor amb la temperatura.

Circuit de control de potència síncron

Aquest circuit té l'avantatge respecte dels circuits asíncrons que no produeix paràsits ni interferències en la commutació. I tot això és gràcies al circuit de detecció de pas per zero.

FIGURA 2.18. Circuit de control síncron

Tal com podem veure en la figura 2.18 (en què se'ns mostra l'esquema de blocs típic d'aquest circuit), el circuit de control de potència síncron consta dels elements següents:

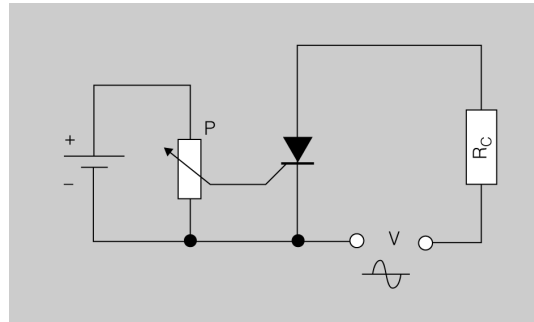
- Detector de pas per zero: encarregat de sincronitzar el circuit cada vegada que passa per zero volts.
- Comparador: verifica les condicions establertes pel sensor. Compara les sortides del generador de polsos i del detector de pas per zero.
- Generador de polsos: tren de polsos per sincronitzar el sistema.
- Element de control de potència: rep els polsos de govern del comparador.

Tot es pot controlar o bé per l'interruptor I o bé per un altre sensor del tipus PTC, NTC, LDR, etc.

Aquests circuits de potència s'acostumen a dissenyar per a necessitats molt concretes, normalment amb circuits integrats, ja que aquests circuits de control són més complexos.

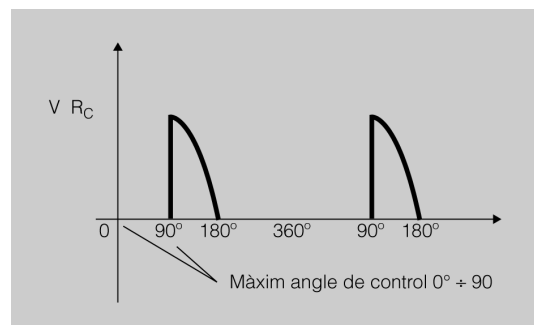
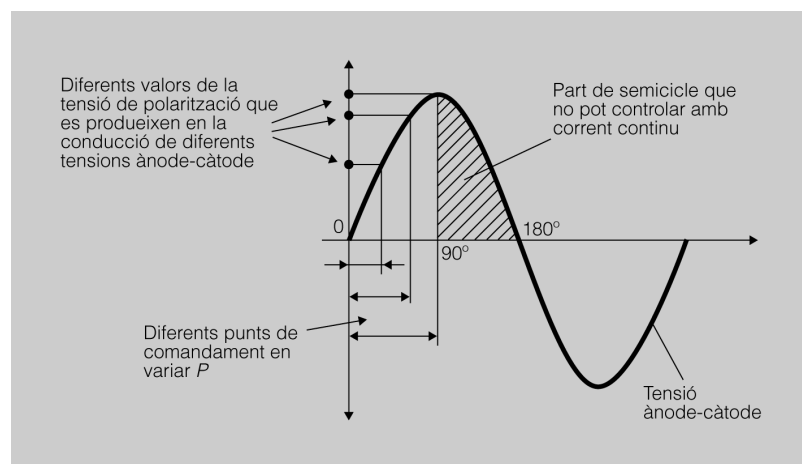
2.2.2 Circuit de control per angle de fase

El circuit de control per angle de fase és un circuit (figura 2.19) que serveix bàsicament per aplicar a la porta (**G**) un senyal de comandament en un temps diferent del temps d'aplicació de tensió entre ànode i càtode.

FIGURA 2.19. Circuit bàsic**Circuit RC**

Un circuit RC és un circuit format per una resistència i un condensador en sèrie, que produeix un retard de temps.

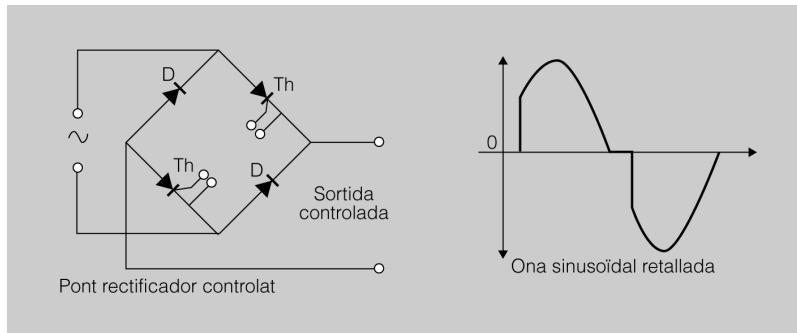
Això s'aconsegueix amb circuits RC, que desfasen o retarden el temps, cosa que podem observar en l'oscil·lograma de la figura 2.20.

FIGURA 2.20. Oscil·lograma de resposta en RC**FIGURA 2.21.** Angle de control en corrent continu

En la figura 2.21 veiem en els gràfics i les formes d'ona com el tiristor només pot variar l'angle de comandament i control com a màxim els primers 90° en els circuits de corrent continu.

Rectificador controlat

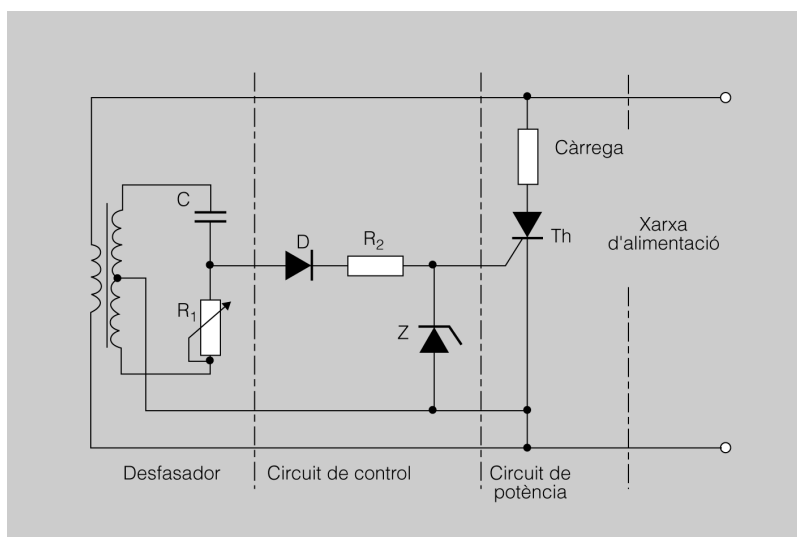
El rectificador controlat és un circuit que converteix el corrent altern en un corrent polsant, en el qual el corrent polsant pot variar en funció del control de comandament (figura 2.22).

FIGURA 2.22. Rectificador controlat

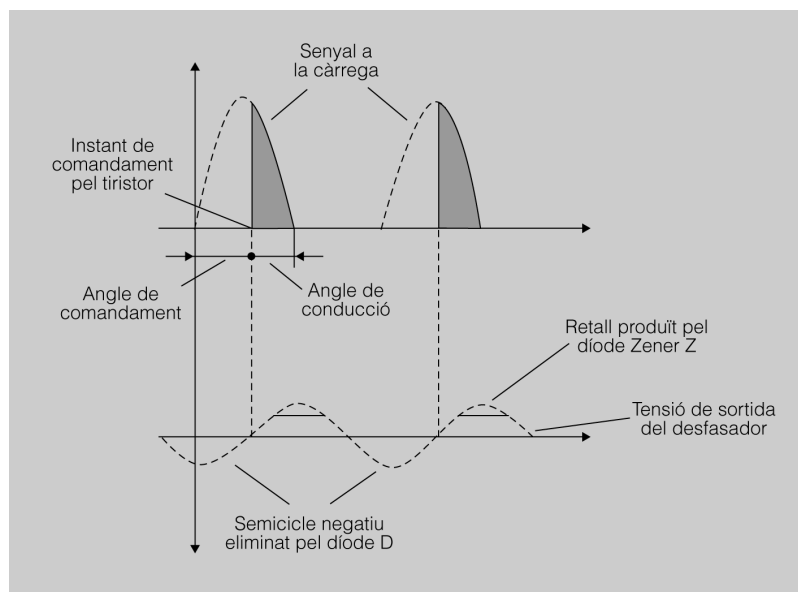
Podem observar que és un pont rectificador normal en què s'han substituït dos díodes per dos tiristors. El seu funcionament és idèntic al d'un rectificador, amb els circuits de comandament, que són els que governen el temps de conducció. En la forma d'ona veiem el control de com podem retallar el pas de corrent.

Circuits de control de corrent altern

Els circuits de control de corrent altern proporcionen a la càrrega una tensió retallada en el semicicle positiu (figura 2.23).

FIGURA 2.23. Control de corrent altern

Si variem la part retallada (conducció) i el potenciòmetre R_1 , obtindrem el control de potència.

FIGURA 2.24. Oscil·lograma del circuit de corrent altern

Com podeu veure a l'oscil·lograma de la figura 2.24, el canvi d'angle de conducció es produeix variant en el desfasador la resistència variable R_1 i fent que a la càrrega li arribi més o menys corrent. En aquest circuit podem controlar l'angle de conducció de 0° a 180° .

2.3 Temporitzadors

Els circuits temporitzadors s'utilitzen en multitud d'aplicacions industrials quan es necessita un temps de retard entre una actuació i la següent. N'hi ha de tot tipus, des dels més senzills, basats en circuits RC, fins als més complicats retards digitals, passant pels sistemes basats en el circuit integrat **555**, d'us molt estès.

Si bé els retards basats en circuits RC són poc precisos, els basats en el 555, que funciona generant trens de polsos a freqüència control·lada, són molt satisfactoris.

En general, els circuits temporitzadors es basen en una estructura anomenada **multivibrador monoestable**. Un multivibrador monoestable és un circuit en què la sortida té dos valors o estats possibles, un dels quals és estable i l'altre inestable. Els monoestables són circuits que només tenen una entrada de control. Aquesta entrada de control s'utilitza per canviar de l'estat estable a l'estat inestable introduint un petit impuls. Passat un cert temps, l'estat inestable acaba i el circuit torna a l'estat estable automàticament sense necessitat de cap impuls extern al circuit.

Els circuits monoestables s'utilitzen normalment com a temporitzador. Un circuit temporitzador proporciona a partir d'un impuls a la seva entrada un senyal de sortida d'una durada determinada.

Els temporitzadors s'utilitzen per controlar el temps de connexió o desconnexió

555

El circuit 555 és un circuit integrat capaç de funcionar en múltiples configuracions tant com a temporitzador com a oscil·lador, entre d'altres.

d'alguns circuits o dispositius. Podeu trobar temporitzadors en:

- Processos industrials
- Controls automàtics: obertura de caixes fortes, control de reg, etc.
- Aparells electrònics de consum: microones, forns, ventiladors, televisors, etc.
- Sistemes d'alarma

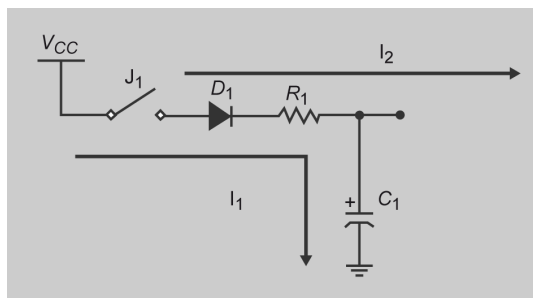
Un temporitzador pot produir diferents tipus de retard:

- Retard en la connexió
- Retard en la desconexió
- Retard en la connexió i desconexió

2.3.1 Temporitzadors amb circuits RC

El circuit de la figura 2.25 conforma el circuit de retard més senzill que es pot concebre. Basa el seu funcionament en el temps de càrrega d'un condensador de valor elevat a través d'una resistència.

FIGURA 2.25. Retard amb circuit RC



Quan es tanca l'interruptor J_1 , com el condensador està descarregat, tot el corrent descriu el camí assenyalat com a I_1 , començant-se a carregar el condensador. El temps de càrrega vindrà donat per la constant de temps del circuit RC, que és $\tau = R \cdot C$.

Quan ha passat aproximadament un temps igual a la τ (durant el qual el condensador s'haurà carregat aproximadament fins a dues tercers parts de la seva capacitat), el corrent que anava pel camí I_1 comença a deixar aquest camí per decantar-se progressivament pel camí marcat per I_2 , a on hi hauria col·locat l'actuador que s'hauria d'accionar (per exemple, un relé).

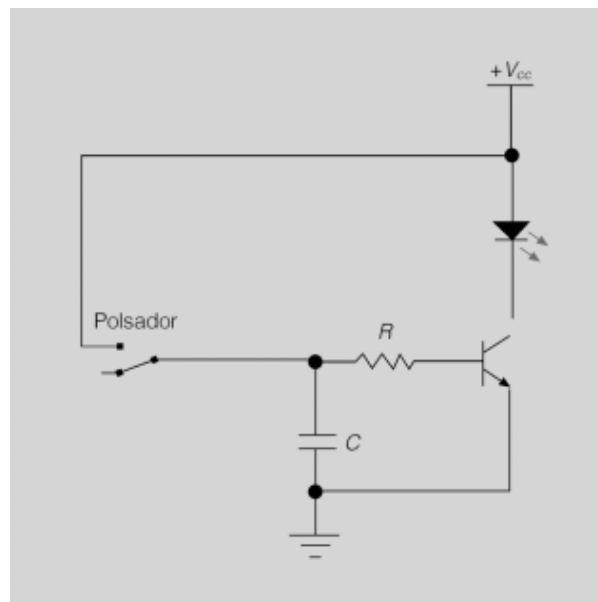
Amb aquesta configuració s'ha aconseguit un retard de temps $t \approx \tau$. El què passa és que depenent de la necessitat de corrent de l'actuador, així com de la integritat

de la resistència i el condensador, entre d'altres factors, el temps real de retard no és gens precís.

2.3.2 Temporitzadors amb transistors

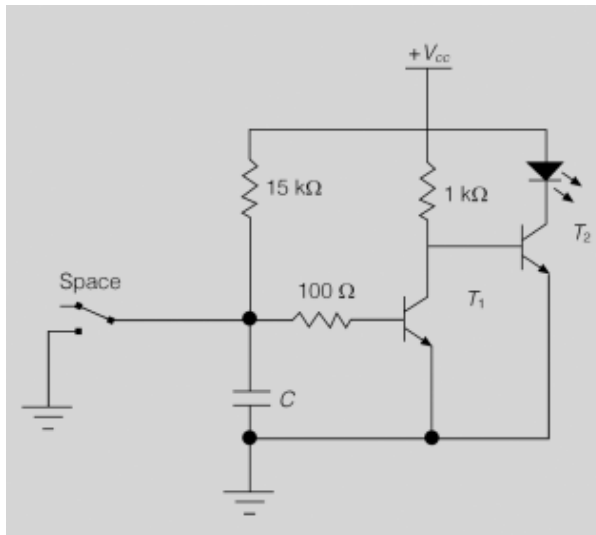
Es poden implementar circuits temporitzadors formats per transistors treballant en commutació.

FIGURA 2.26. Temporitzador amb retard en la desconexió

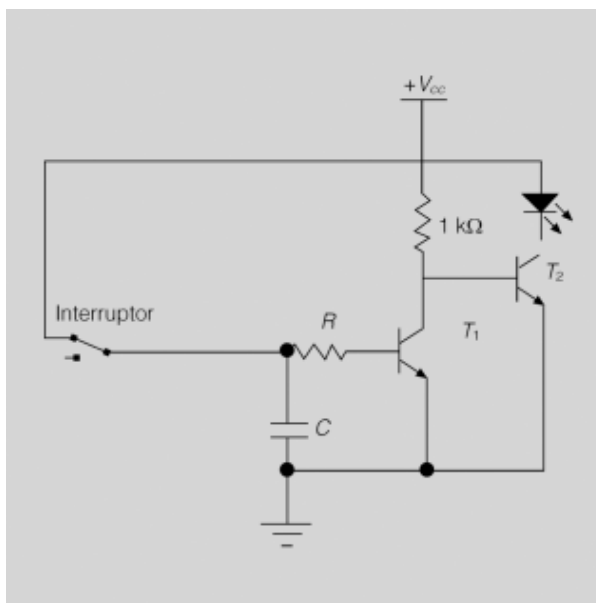


En la figura 2.26, inicialment el pulsador està en estat de repòs, el condensador descarregat i el transistor en tall, ja que la tensió de base (V_b) és zero. Quan premeu el pulsador, aquest connecta directament els extrems de condensador a V_{CC} i queda carregat instantàniament. Quan el pulsador torna a la seva posició de repòs, el condensador es descarrega a través de R i proporciona durant quasi tot el temps de descàrrega una V_b prou gran per saturar el transistor, i en conseqüència el LED s'il·luminarà tot el temps que el transistor estigui saturat.

El circuit de la figura 2.27, amb el pulsador en la posició de repòs, el condensador es carrega a través de la resistència de $15\text{ k}\Omega$ i satura el transistor T_1 . En estar T_1 saturat, connecta la base de T_2 directament a massa i col·loca T_2 en tall i, per tant, el LED està apagat. Quan premeu el pulsador, realitzeu un curtcircuit als extrems de C i el descarregueu, T_1 passa a tall i T_2 queda connectat a V_{CC} a través de la resistència de $1\text{ k}\Omega$, passant a saturació i il·luminant el LED. En tornar el pulsador a la seva posició inicial, el condensador es va carregant fins que, passat un temps, satura T_1 . Llavors, T_2 bascula a tall i el LED s'apaga.

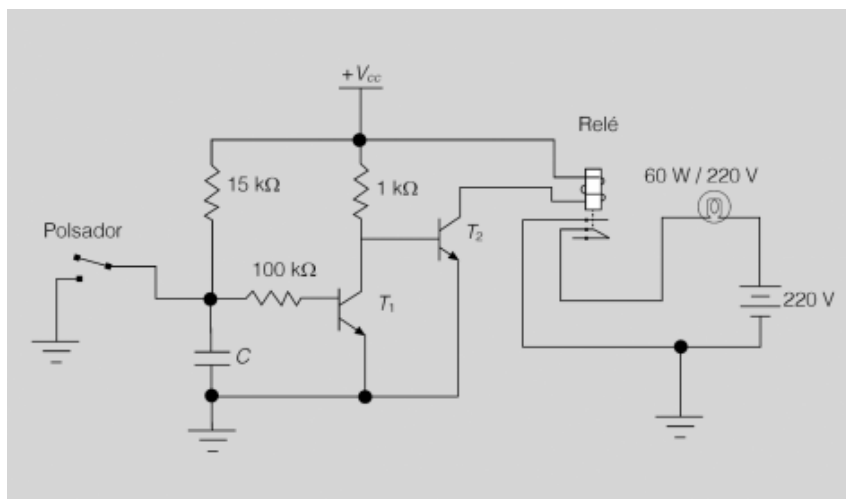
FIGURA 2.27. Circuit temporitzador

En circuit de la figura 2.28, volem il·luminar el LED amb retard respecte al moment que accionem l'interruptor. Inicialment es pot observar que C està carregat, T_1 en saturació, T_2 en tall i el LED apagat. Quan accioneu l'interruptor, C es descarrega a través de R i, passat un temps, la tensió al condensador és zero (s'ha descarregat) i T_1 bascula a tall. Llavors T_2 queda connectat a través de la resistència a V_{CC} i se satura, il·luminant el LED.

FIGURA 2.28. Temporitzador amb retard en la connexió

Exemple

Observeu el circuit de la figura següent i intenteu deduir què passa amb la bombeta quan premeu el polsador.



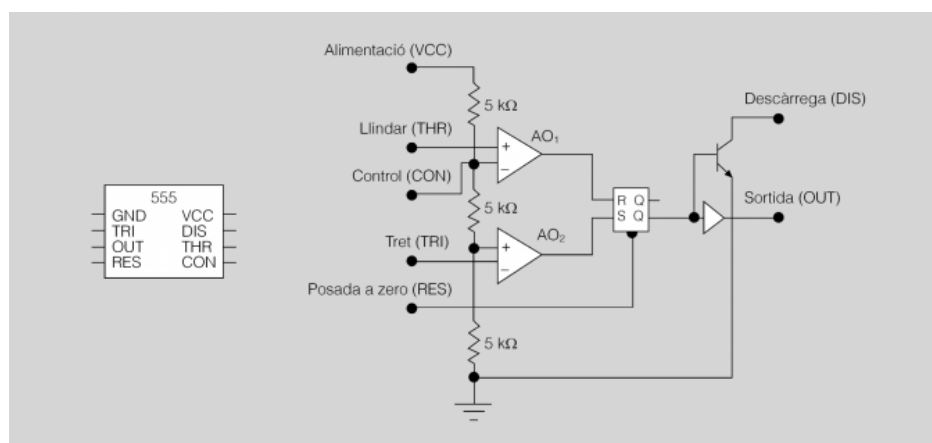
Solució:

El circuit de la figura anterior és igual que l'introduït a la figura 2.27, amb la diferència que s'ha substituït el LED per un relé. Quan T_2 se satura, el corrent travessa la bobina del relé i acciona el commutador, connectant la bombeta a la seva FA, **de forma temporitzada**.

2.3.3 Temporitzadors amb el 555

En la figura 2.29 hi ha el **555**, un circuit integrat molt estable i de gran precisió, que pot funcionar com a oscil·lador, temporitzador i oscil·lador controlat per tensió (VCO).

FIGURA 2.29. Disposició de pins del 555 i estructura interna



Porta inversora NOT

La porta NOT si a l'entrada té un 1, a la sortida dona un 0 i si a l'entrada té un 0, a la sortida dona un 1. Aquest 1 equival a una tensió igual a la tensió d'alimentació (V_{CC}) i el 0 a zero volts.

Reset: reiniciar, posar a zero un circuit.

$\bar{Q}$ és la sortida negada del biestable RS.

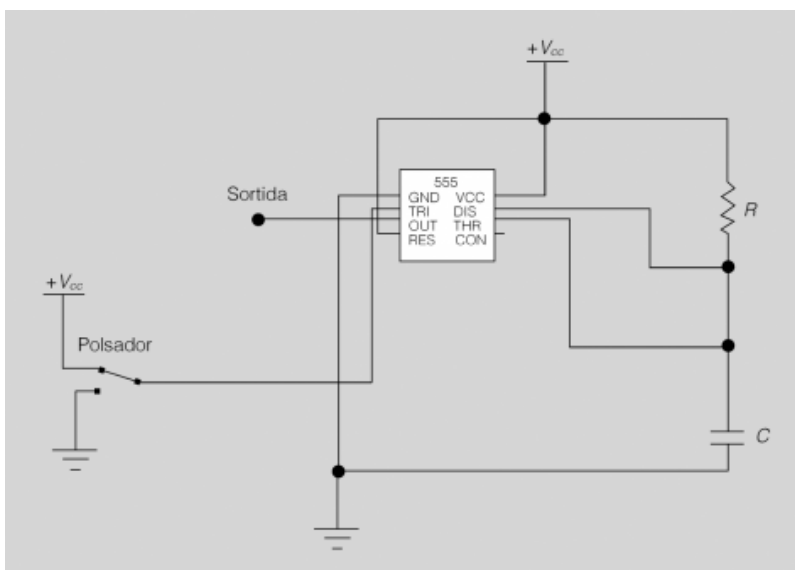
En la figura 2.29, podeu veure, en primer lloc, la disposició de pins del 555, que es presenta en forma de xip de vuit terminals. En segon lloc, en podeu veure l'estructura interna, que està constituïda per dos amplificadors operacionals (AO) funcionant com a comparadors i tres resistències de 5 k connectades entre elles, proporcionant les tensions de referència als dos AO (l'entrada inversora de l'AO₁ val 2/3 de V_{CC} , i l'entrada no inversora de l'AO₂ val 1/3 de V_{CC}). En el circuit, podeu observar també un biestable RS, un transistor i una porta inversora (NOT).

Els terminals del 555 són:

- Els terminals **1** (GND) i **8** (V_{CC}) es connecten al negatiu i positiu de la FA respectivament. L'integrat permet ser alimentat a una tensió compresa entre 4,5 i 16 V.
- El terminal 4 és el *reset* (**RES**), si es connecta a terra (massa) l'integrat deixa de funcionar. Per a les aplicacions que veureu, aquest terminal es connecta directament al positiu de la FA.
- El terminal 3 és la sortida del dispositiu (**OUT**).
- El terminal 2 és l'entrada de disparament (**TRI**, de l'anglès *trigger*) i correspon a l'entrada inversora de l'AO₂. Quan la tensió aplicada és més petita de 1/3 de la tensió d'alimentació (V_{CC}), AO₂ proporcionarà un nivell alt. Aquest nivell s'aplica a l'entrada S del biestable RS, i la seva sortida Q' bascula a nivell baix. Això farà que el transistor passi a estat de tall. En aquest cas, l'entrada de la porta inversora valdrà 0 i, per tant, la sortida (**OUT**) del 555 serà 1.
- El terminal 6 és l'entrada llindar (**THR**, de l'anglès *threshold*) i correspon a l'entrada no inversora de l'AO₁. Quan la tensió en aquest terminal superi els 2/3 de V_{CC} , l'AO₁ proporcionarà a l'entrada R del biestable RS un nivell alt que farà bascular $\overline{Q}$ a nivell alt; això farà que el transistor passi a l'estat de saturació. En aquest cas, l'entrada de la porta inversora valdrà 1 i, per tant, la sortida (**OUT**) del 555 serà 0.

El circuit de la figura 2.30 és l'esquema del 555 que funciona com a temporitzador. Amb aquest circuit podeu temporitzar des de microsegons (μs) fins a hores, amb una gran estabilitat i precisió.

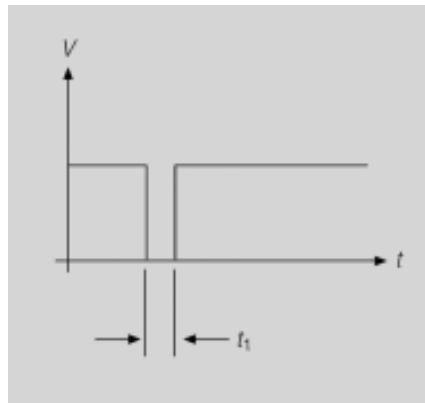
FIGURA 2.30. El 555 com a temporitzador



El seu funcionament és el següent:

1. Inicialment, la sortida $\overline{Q}$ del biestable RS es troba a 1, cosa que significa que la sortida (**OUT**) està a 0; al mateix temps, el transistor està saturat, i en estar connectat en paral·lel amb el condensador C , aquest està descarregat. Aquesta situació es manté fins que es produeix un impuls a l'entrada de disparament (TRI). En la figura 2.31 podeu veure la forma de l'impuls generat pel polsador. Consisteix a posar a 0 volts l'entrada durant un petit instant t_1 .
2. Després de produir-se aquest impuls, la sortida de l'AO₂ es posa a 1, igual que l'entrada S del biestable; en conseqüència, la seva sortida $\overline{Q}$ és igual a 0; d'aquesta manera, la sortida val 1. El transistor intern bascula a tall i deixa que el condensador C es carregui a través de R . Quan la tensió en els extrems del condensador són $2/3$ de V_{CC} , la sortida de l'AO es posa a nivell alt. L'entrada R del biestable es col·loca a 1 i tornem a la posició inicial $\overline{Q} = 1$, i la sortida a 0.

FIGURA 2.31. Impuls a l'entrada TRI



El temps durant el qual la sortida es manté a nivell alt es troba a partir de la fórmula següent:

$$T = 1,1 \cdot R \cdot C$$

Exemple de circuit temporitzador

En un circuit temporitzador format per un 555, el valor de la resistència és de $100 \text{ k}\Omega$ i el valor del condensador és de $100 \text{ }\mu\text{F}$. Calculeu el temps en el qual la sortida estarà a nivell alt després de produir-se un impuls a l'entrada TRI.

Solució:

Substituint els valors en la fórmula teniu:

$$T = 1,1 \cdot R \cdot C = 1,1 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^{-6} = 11 \text{ s}$$

El temps de temporització és igual a 11 s.

Exemple de temporitzador d'enllumenat

El president de veïns d'un edifici ens proposa realitzar un circuit que controli la temporització dels llums de l'escala del bloc. Ens ha dit que quan s'activa el polsador, els llums han de romandre il·luminats durant cinc minuts aproximadament. Calculeu el valor de R i C del circuit temporitzador realitzat amb el 555.

Solució:

El temps T ha de ser igual a cinc minuts. El primer que heu de fer és passar a segons aquest valor:

$$T = 5 \text{ min} \cdot 60 \text{ s/min} = 300 \text{ s}$$

Substituint en la fórmula:

$$T = 1,1 \cdot R \cdot C$$

$$300 = 1,1 \cdot R \cdot C$$

Com que teniu una equació i dues incògnites, la R i la C , fixareu el valor d'una d'aquestes. Escollireu un valor normalitzat i fàcil de trobar al mercat del condensador, com pot ser 1000 μF . Aquest valor el substituïu en la fórmula i queda:

$$300 = 1,1 \cdot R \cdot 1.000 \cdot 10^{-6}$$

Aïllant la R de la fórmula teniu:

$$R = \frac{300}{1,1 \cdot 1.000 \cdot 10^{-6}} = 272,7 \Omega$$

2.4 Oscil·ladors

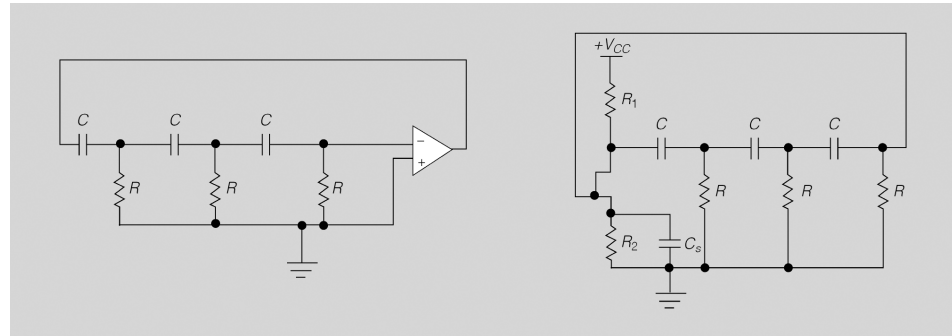
Els oscil·ladors són circuits que a la seva sortida ofereixen un senyal periòdic. N'hi han de naturaleses molt diverses, i poden generar formes d'ona diferents, en funció de la seva estructura, que pot estar basada en:

- Transistors
- Amplificadors operacionals
- 555
- Cristalls de quars

2.4.1 Oscil·ladors RC

L'oscil·lador RC està format per un amplificador amb un circuit de realimentació constituït per tres resistències i tres condensadors. En la figura 2.32 podeu veure, en primer lloc, un oscil·lador RC basat en un AO i, en segon lloc, un oscil·lador RC amb transistor FET.

L'amplificador FET, així com qualsevol altre transistor, produeix un desfasament de 180° entre el senyal d'entrada i el senyal de sortida. Per aquest motiu, la xarxa de realimentació ha de desfasar uns altres 180° el senyal, de tal manera que es produeixi un desfasament total de 360° , o sigui de 0° . Cada conjunt de condensador i resistència produeix un desfasament de 60° , i com que hi ha tres condensadors, el desfasament total serà $3 \cdot 60^\circ = 180^\circ$.

FIGURA 2.32. Oscil·ladors RC amb amplificador operacional i FET

La freqüència d'oscil·lació de l'oscil·lador RC ve donada per la fórmula següent:

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C \cdot \sqrt{6}}$$

Exemple de càlcul de la freqüència d'oscil·lació

Calculeu la freqüència d'un oscil·lador RC si $C = 22 \mu\text{F}$ i $R = 1,5 \text{ k}\Omega$.

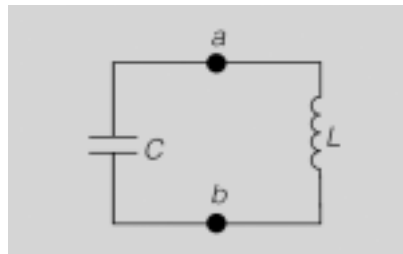
Solució:

Si substituïu els valors donats de resistència i condensador en la fórmula de la freqüència, obteniu:

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 1.500 \cdot 22 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{6}} = 1,9 \text{ Hz}$$

2.4.2 Oscil·ladors LC

En aquests oscil·ladors, la xarxa de realimentació està formada per bobines i condensadors. En la figura 2.33 podeu veure el circuit ressonant, format per un condensador i una bobina.

FIGURA 2.33. Circuit ressonant

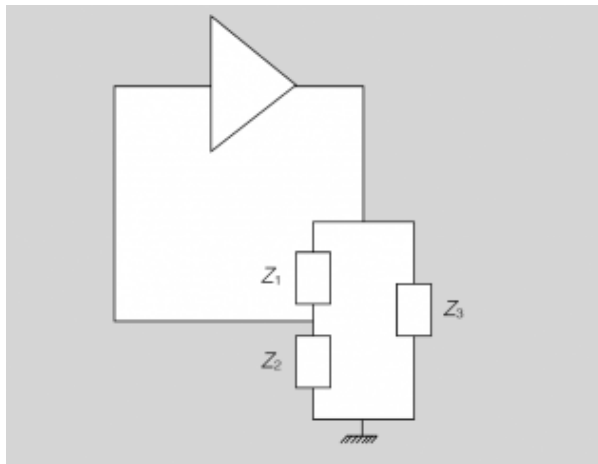
En la figura 2.33, suposeu que el condensador ha estat prèviament carregat amb una tensió contínua. En connectar la bobina als extrems del condensador (a i b), el condensador trasllada la seva energia a la bobina —aquesta energia és emmagatzemada per ser alliberada després— per carregar un altre cop el condensador, i així successivament. Si no hi hagués pèrdues, entre a i b es generaria una ona sinusoidal perfecta.

La freqüència d'oscil·lació d'un oscil·lador LC ideal ve donada per la fórmula:

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

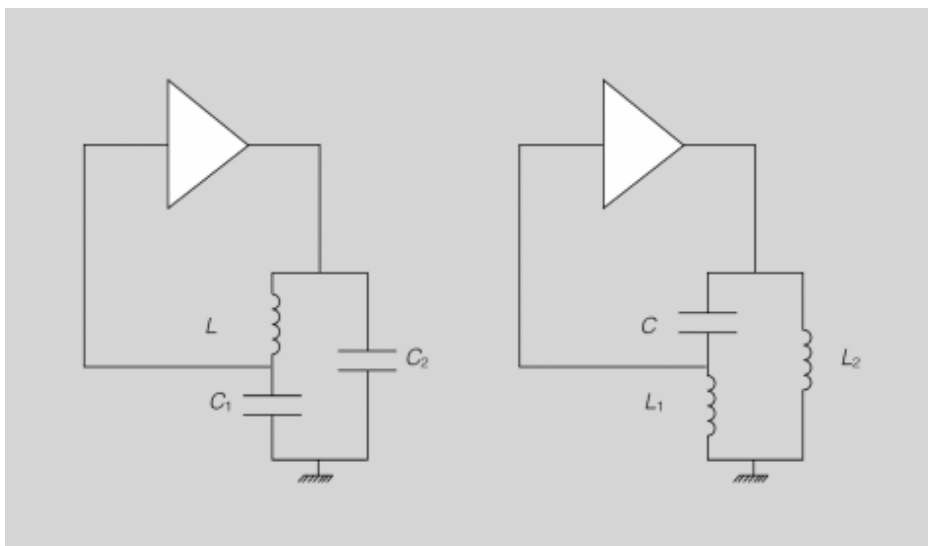
En la majoria d'oscil·ladors LC la xarxa de realimentació està constituïda per tres impedàncies d'acord amb l'esquema general de la figura 2.34.

FIGURA 2.34. Diagrama general d'un oscil·lador LC



Si en la figura 2.34, Z_2 i Z_3 són dues bobines i Z_1 un condensador, estarem parlant d'un **oscil·lador Hartley** (figura 2.35) i si Z_2 i Z_3 són dos condensadors i Z_1 una bobina estarem parlant d'un **oscil·lador Colpitts**.

FIGURA 2.35. Oscil·lador Colpitts i oscil·lador Hartley



La freqüència d'oscil·lació ve donada per la fórmula anterior, però amb la diferència que en un oscil·lador Colpitts, com que hi ha dos condensadors, la capacitat equivalent és:

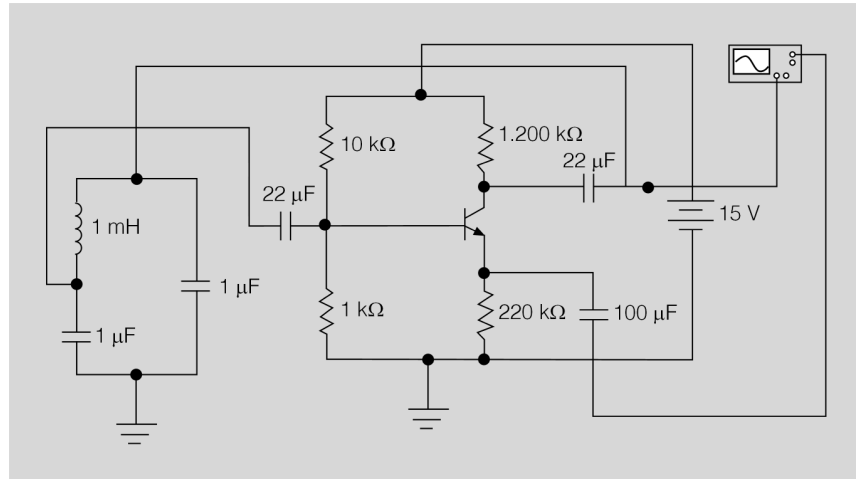
$$C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$

En canvi, a l'oscil·lador Hartley, la inductància total a considerar és:

$$L = L_1 + L_2$$

Exemple d'oscil·lador Colpitts

En la figura següent teniu un oscil·lador Colpitts amb NPN. Trobeu el valor de la freqüència d'oscil·lació aplicant la fórmula i amb la utilització de l'oscil·loscopi.



Solució:

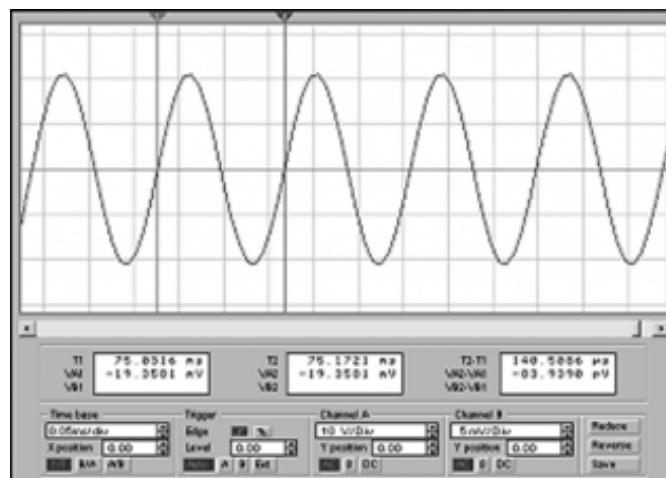
Si apliqueu la fórmula, substituint els valors obtinguts de la xarxa de realimentació de l'esquema anterior teniu: $L = 1 \text{ mH}$; $C_1 = 1 \text{ μF}$; $C_2 = 1 \text{ μF}$.

$$C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} = 0,5 \text{ μF}$$

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} = 7.117 \text{ Hz}$$

Si calculem el valor de la freqüència a partir de la gràfica de la figura ??, el primer que heu de fer és trobar el període (T). En la figura ??, els indicadors verticals limiten un període (T) de la ona, per tant, la diferència dels dos temps $T_2 - T_1$ ens dóna el període T . Si observeu la part dreta superior $T_2 - T_1 = 140,5 \text{ μs}$, i amb aquest valor, la freqüència és igual a:

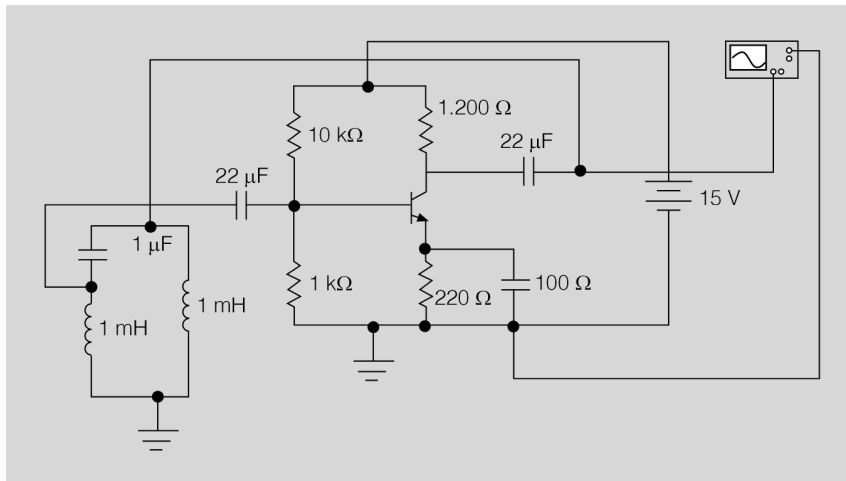
$$f = \frac{1}{T} = 7.117 \text{ Hz}$$



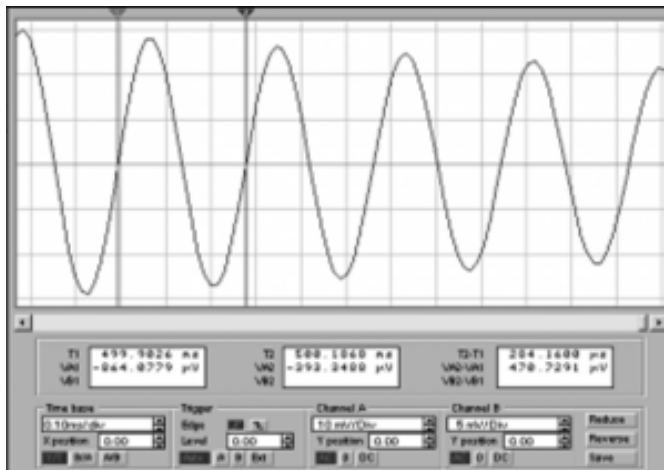
Com podeu observar, són dues maneres diferents de trobar la freqüència d'oscil·lació, la primera teòricament aplicant la fórmula i la segona pràcticament utilitzant l'oscil·loscopi.

Exemple d'oscil·lador Hartley

En la figura següent veieu un oscil·lador Hartley amb NPN.



Trobeu el valor de la freqüència d'oscil·lació amb la utilització de l'oscil·loscopi.

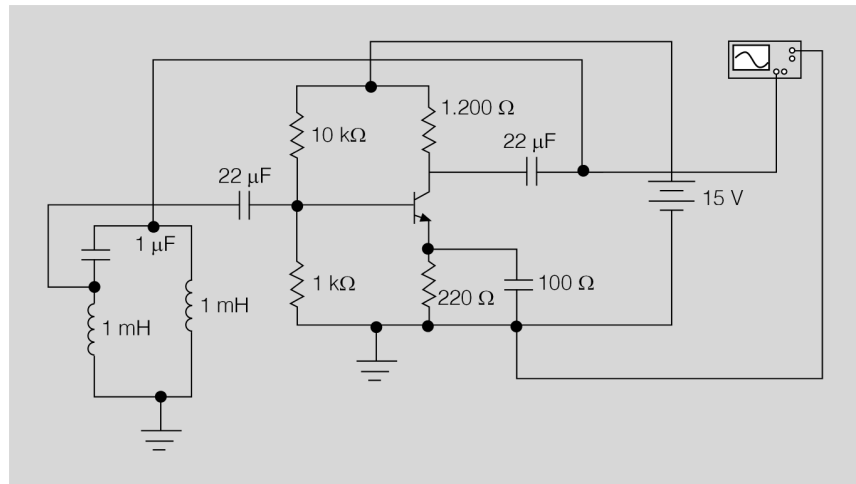


Solució:

Primer de tot, connectarem l'oscil·loscopi a la sortida del circuit, amb els dos indicadors T_1 i T_2 marcarem un període (T). La diferència d'aquests dos punts és igual a $284,16 \mu\text{s}$. ($T = 284,16 \mu\text{s}$). Si feu l'invers de T trobareu la freqüència (f).

$$f = \frac{1}{T} = 3.519,14 \text{ Hz}$$

A la figura següent podeu veure el resultat obtingut amb l'oscil·loscopi:



2.4.3 Oscil·ladors amb cristall de quars

A l'hora de realitzar oscil·ladors, de vegades interessa que la freqüència d'oscil·lació sigui el més estable possible. Els dispositius que ho fan millor són els cristalls de quars.

Quars

Els cristalls de quars s'utilitzen per fer oscil·ladors (*clocks*) per a sistemes digitals com comptadors, rellotges, microprocessadors, etc.

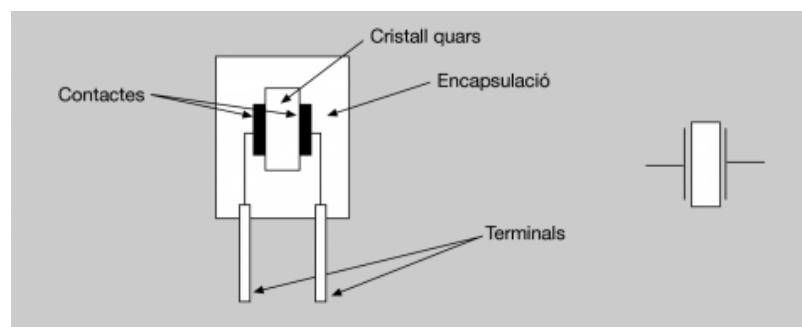
El quars és un mineral que presenta una sèrie de propietats anomenades **piezoelectricitat**:

- En aplicar una tensió alterna entre els seus extrems, es produeixen unes forces interiors que originen una vibració de freqüència igual a de la tensió aplicada.
- De la mateixa manera, si es produeix una força entre dues cares del cristall, aquest genera una diferència de potencial.

Aquestes dues propietats són utilitzades per crear oscil·ladors de gran estabilitat i precisió.

A la figura 2.36 es pot veure l'estructura dels cristalls de quars i el seu símbol elèctric.

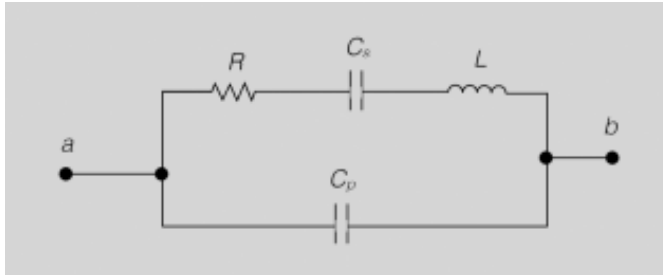
FIGURA 2.36. Cristall de quars i símbol del cristall de quars



El comportament del cristall de quars és equivalent al circuit de la figura 2.37. El

valor de la bobina depèn de la massa del cristall, la C_s de l'elasticitat, la R de la fricció mecànica i la C_p , que correspon a la capacitat electrostàtica als extrems dels terminals. Els valors de L , R , C_s i C_p depenen de les dimensions del cristall. Així doncs, aquests valors determinaran la freqüència d'oscil·lació (f_o).

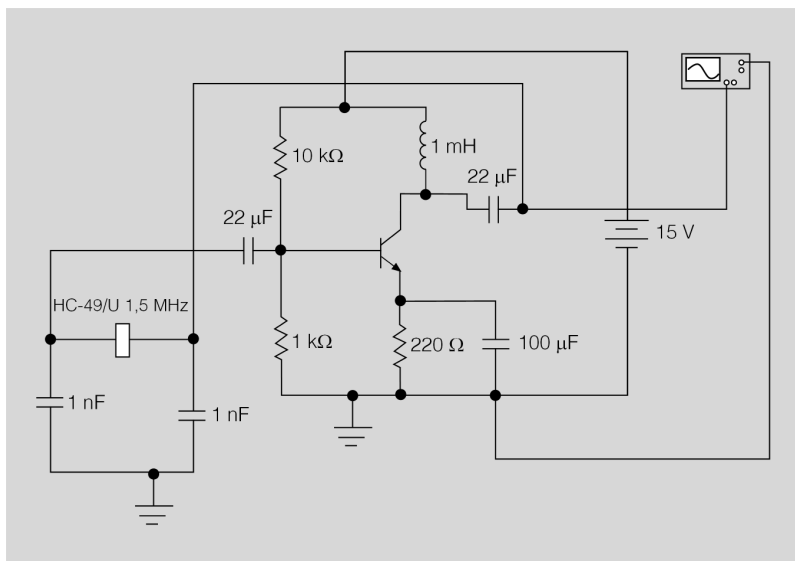
FIGURA 2.37. Circuit equivalent al cristall de quars



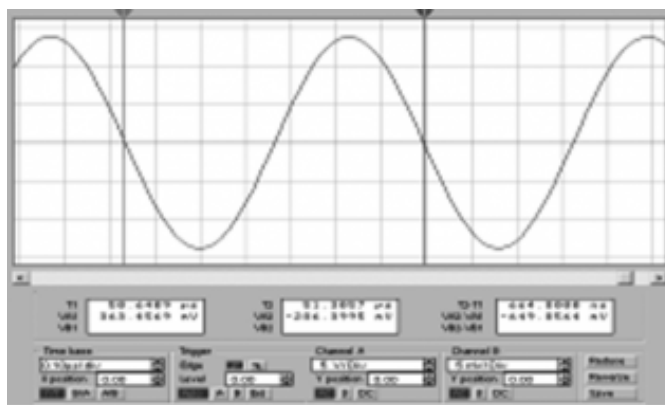
En el mercat, podem trobar gran varietat de cristalls amb diferents freqüències d'oscil·lació, com poden ser: 1,5 MHz, 3 MHz, 4 MHz, 15 MHz, 40 MHz, etc.

Exemple d'oscil·lador

El circuit de la figura següent és molt similar a un oscil·lador Colpitts, on s'ha substituït la bobina per un cristall. La bobina que apareix en el col·lector del transistor s'utilitza per impedir el pas de l'oscil·lació cap a la font d'alimentació (FA).



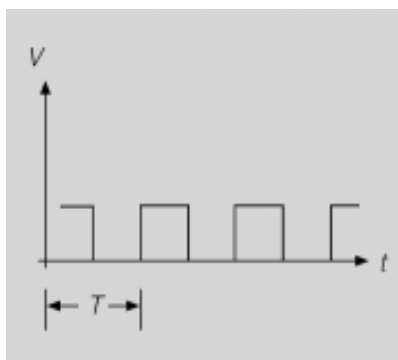
La figura següent correspon a la sortida de l'oscil·lador. Si l'observeu, el període de l'ona $T = 664,8$ ns, llavors la $f = 1.504.211$ Hz, que són aproximadament 1,5 MHz, el valor del cristall de quars col·locat en el circuit.



2.4.4 Multivibrador astable

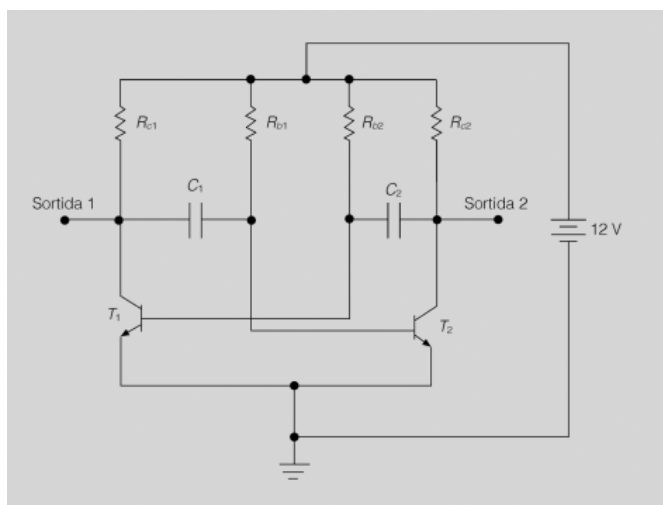
Un circuit astable genera un senyal quadrat com el de la figura 2.38.

FIGURA 2.38. Senyal típic de sortida d'un astable



El circuit de la figura 2.39 està format per dos transistors i és totalment simètric.

FIGURA 2.39. Multivibrador astable amb dos transistors



Quan es connecta a l'alimentació, un dels dos transistors, el de guany superior,

se satura, i a causa de la connexió entre tots dos l'altre passa automàticament a estat de tall. Al cap d'un temps, en funció de la resistència de base (R_B) i del condensador (C), el transistor que està en tall passa a saturació i el que està en saturació passa a tall. Aquest procés es repeteix contínuament sempre que es mantingui connectat. El circuit té dues sortides complementàries entre elles, la 1 i la 2. Com podeu veure, les sortides s'obtenen dels col·lectors dels dos transistors.

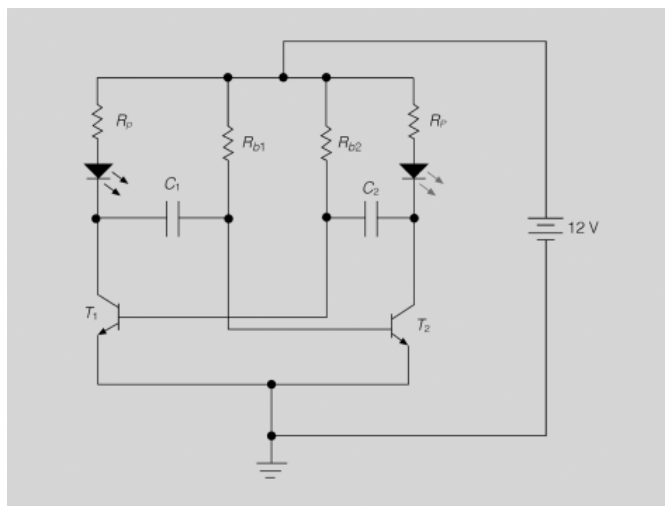
El període de l'ona originada s'obté amb l'aplicació de la fórmula següent:

$$T = 1,38 \cdot R_B \cdot C$$

On R_B és la resistència de base i C la capacitat del condensador utilitzat. Si els components utilitzats són de les mateixes característiques i valors, els dos semiperíodes de l'ona són idèntics i iguals a $T/2$, essent T el període del senyal.

Aquest circuit té moltes aplicacions, una de les quals podria ser la de la figura 2.40, on s'han col·locat dos LED. Aquests s'apagaran i s'il·luminaran d'acord amb el període de l'ona creada.

FIGURA 2.40. Intermitent amb astable



Exemple de multivibrador amb transistors

Simuleu el semàfor ambre que es troba en una cruïlla de trens d'una maqueta, on la intermitència ha de ser de 0,5 s.

Solució:

Segons l'enunciat, el LED ha d'estar il·luminat durant 0,5 s i durant 0,5 s apagat. Recordeu que quan un LED està il·luminat, l'altre està apagat, són complementaris. El T del senyal serà la suma del semiperíode alt més el semiperíode baix.

$$T = 0,5 + 0,5 = 1 \text{ s}$$

Si utilitzem la fórmula:

$$T = 1,38 \cdot R_B \cdot C$$

Substituint valors:

$$1 = 1,38 \cdot R_B \cdot C$$

Aplicacions

El multivibrador astable amb dos transistors podria tenir diverses aplicacions, des de la simulació d'alarma d'un cotxe fins a la simulació dels indicadors d'un pas a nivell en la maqueta d'un tren elèctric.

Ultrasons

El ultrasons són ones de pressió sonora amb freqüència per sobre del nostre llindar audible. Els humans només podem sentir sons compresos en la banda de freqüències que va dels 20 Hz als 22 kHz. Avui en dia són moda els repel·lents d'insectes per ultrasons, que no són res més que un circuit astable en què la freqüència del senyal generat és l'adequada.

Teniu una equació amb dues incògnites. Quan s'arriba en aquesta situació s'ha d'escollir un valor de condensador, com pot ser **100 μF** . Fixant aquest valor, trobareu el valor de R_B . Aïl·leu R_B de la fórmula anterior i teniu:

$$R_B = \frac{T}{1,38 \cdot C}$$

Substituint els valors:

$$R_B = \frac{T}{1,38 \cdot C} = \frac{1}{1,38 \cdot 100 \cdot 10^{-6}} = 7,246 \text{ k}\Omega$$

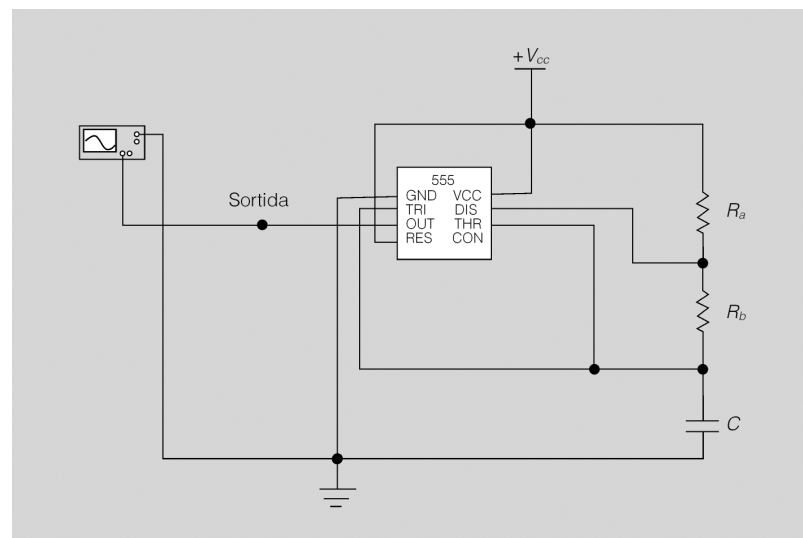
Per tant, heu dissenyat el circuit amb els valors següents **$C = 100 \mu\text{F}$ i $R_B = 7,246 \Omega$** .

En el circuit de la figura 2.40, substituint un dels LED per un altaveu, aquest produiria un determinat so d'acord amb la freqüència de l'ona generada. Variant el valor de R_B i C , el so pot ser des d'agut fins a greu. Fins i tot podríem generar ultrasons.

Multivibrador astable amb 555

Per a què el 555 funcioni com a multivibrador astable s'han de realitzar les connexions externes de la figura 2.41.

FIGURA 2.41. 555 com a astable



Segons el circuit de la figura 2.41, en un primer moment C està descarregat, la tensió als seus extrems és inferior a $1/3$ de V_{CC} i l'entrada TR de l'AO₂ fa bascular el biestable, que lliura a la sortida (OUT) el nivell alt; al mateix temps, el transistor està en tall, amb la qual cosa el condensador (C) es començarà a carregar a través de R_a i R_b . Quan la tensió en el condensador superi $2/3$ de V_{CC} , l'entrada THR de l'AO₁ farà bascular de nou el biestable i la sortida es posarà a nivell baix. En aquest cas, el transistor que estava polaritzat en tall passarà a saturació, fent un curtcircuit entre el terminal 7 i massa. Això fa que el condensador es descarregui a través de R_b . Quan la tensió en el condensador estigui per sota de $1/3$ de V_{CC} , tornarà a canviar el biestable i la sortida tornarà a agafar el nivell alt, el transistor passarà a tall i el condensador es tornarà a carregar a través de R_a i R_b i així successivament.

La sortida està a nivell alt durant el temps T_1 (temps de càrrega del condensador):

$$T_1 = 0,693 \cdot (R_a + R_b) \cdot C$$

La sortida està a nivell baix durant el temps T_2 (temps de descàrrega del condensador):

$$T_2 = 0,693 \cdot R_b \cdot C$$

El període serà igual a:

$$T = T_1 + T_2$$

La freqüència d'oscil·lació serà:

$$f = \frac{1}{T}$$

Exemple de multivibrador amb 555

Si R_a i R_b valen $1 \text{ k}\Omega$ i $C = 1 \text{ }\mu\text{F}$, quina serà la freqüència d'oscil·lació?

Solució:

Substituint els valors en les fórmules, teniu:

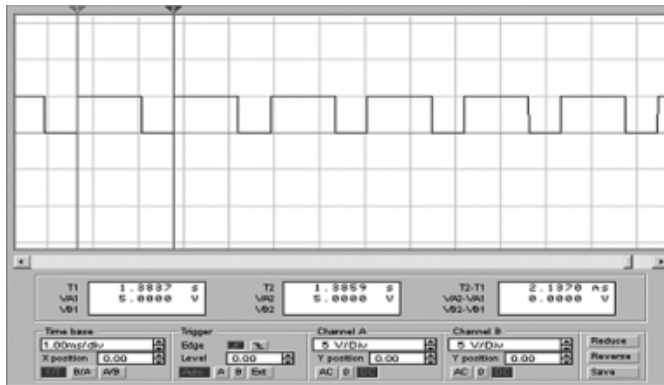
$$T_1 = 0,693 \cdot (1.000 + 1.000) \cdot 1 \cdot 10^{-6} = 1,386 \text{ ms}$$

$$T_2 = 0,693 \cdot 1.000 \cdot 1 \cdot 10^{-6} = 0,693 \text{ ms}$$

Si observeu els valors obtinguts, en aquest cas T_1 és el doble de T_2 . A continuació calculareu el període i la freqüència:

$$T = T_1 + T_2 = 1,386 + 0,693 = 2,079 \text{ ms}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2,079 \cdot 10^{-3}} = 481 \text{ Hz}$$



Observant la forma d'ona originada a la figura, podeu veure que el temps T_1 dura el doble que el temps T_2 . El període del senyal és el temps comprès entre les dues marques verticals. La diferència entre les dues ens dona un valor del període de 2,1879 ms. Amb aquest valor s'obtingria una freqüència de 457 Hz. Hi ha una petita diferència entre el valor teòric calculat i l'obtingut per observació amb l'oscil·loscopi, degut a les toleràncies dels valors de les resistències i altres components, així com la falta de precisió humana en l'ús dels controls de l'oscil·loscopi.