Electrònica

CFGM.IEA.M09/0.09

CFGM - Instal·lacions elèctriques i automàtiques

Generalitat de Catalunya
Departament d'Educació

ioc
institut obert
de catalunya

Aquesta col·lecció ha estat dissenyada i coordinada des de l'Institut Obert de Catalunya.

Coordinació de continguts
Santiago Cerezo Salcedo

Redacció de continguts
Santiago Cerezo Salcedo
Xavier Mesas Laserna
Àngel L. Miguel Rodríguez
Josep M. Pallarés Serres
Juan Perona Camacho
Rafael Rodríguez Coronel

Adaptació de continguts
Santiago Cerezo Salcedo
Xavier Mesas Laserna

Primera edició: febrer 2010

Material realitzat per Eureca Media, SL
Dipòsit legal: B. 15205-2013

Introducció

El desenvolupament de l'electrònica com a ciència és relativament recent. La seva ràpida evolució ha permès una disminució de la mida dels sistemes o dispositius electrònics i del seu preu; tot això és compatible amb l'augment de la fiabilitat. Com a conseqüència, hem assistit a una extensió de l'aplicació de l'electrònica a tots els àmbits de la nostra vida: oci, indústria, medicina, aeronàutica, telecomunicació, automoció, etc.

Un sistema electrònic és qualsevol associació de components, dispositius i elements interconnectats i destinats a executar una determinada funció, que poden ser digitals o analògics depenent del tipus de senyal amb què treballen.

Aquest mòdul, en el qual s'introdueixen el sistemes digitals i els analògics, és un mòdul de base, és a dir, serveix per dotar els alumnes dels coneixements previs necessaris per a altres crèdits del cicle.

Aquest material està dividit en tres unitats. La primera, titulada "Electrònica digital no programable" està dedicada als sistemes que treballen amb senyals digitals. Aquests senyals tenen la particularitat de què treballen només amb dos nivells de tensió, que assumeixen els significats de **1 lògic** i **0 lògic**. Aquesta particularització permet estudiar aquests sistemes oblidant per complet les lleis de l'electrònica, centrant l'estudi només en la part lògica. Per això es poden estudiar sense cap coneixement previ en electrònica.

La resta del temari fa referència a l'anomenada electrònica analògica, que treballa amb senyals elèctrics de qualsevol natura i mida. La segona unitat, titulada "Components bàsics i fonts d'alimentació" fa una revisió dels components electrònics més habituals, tot descrivint el seu funcionament i quin és el tractament que se n'ha de fer. També es fa una introducció a una de les parts més importants de qualsevol sistema electrònic: la font d'alimentació. En veureu els diferents tipus que existeixen i les seves característiques més importants.

La tercera unitat, titulada "Components avançats i generadors de senyal" dóna un pas endavant en l'estudi dels sistemes electrònics, introduint l'amplificador operacional, que és un dels més importants components en el món de l'electrònica analògica, i els components anomenats de potència. Al final de la unitat s'introdueixen les parts d'un sistema que es dediquen a la gestió del temps com a paràmetre de govern d'un circuit.

Per al seguiment del temari per part de l'alumne existeix una sèrie d'exercicis i activitats que facilitaran l'assoliment dels coneixements necessaris per obtenir els resultats d'aprenentatge de forma satisfactòria.

Resultats d'aprenentatge

En acabar aquest mòdul heu de ser capaços del següent:

1. Reconèixer circuits lògics combinacionals determinant les seves característiques i aplicacions.
2. Reconèixer circuits lògics seqüencials determinant les seves característiques i aplicacions.
3. Reconèixer circuits de rectificació i filtrat determinant les seves característiques i aplicacions.
4. Reconèixer fonts d'alimentació determinant les seves característiques i aplicacions.
5. Reconèixer circuits amplificadors determinant les seves característiques i aplicacions.
6. Reconèixer sistemes electrònics de potència verificant les seves característiques i funcionament.
7. Reconèixer circuits de temporització i oscil•lació verificant les seves característiques i funcionament.

Continguts

Electrònica digital no programable

Unitat 1

Electrònica digital no programable

1. Principis bàsics de lògica digital
2. Circuits combinacionals i seqüencials

Electrònica analògica

Unitat 2

Components bàsics i fonts d'alimentació

1. Components electrònics emprats en rectificació i filtrat. Tipologia i característiques
2. Fonts d'alimentació

Unitat 3

Components avançats i generadors de senyal

1. Amplificadors operacionals
2. Electrònica de potència i generació de senyal

Electrònica digital no programable

Santiago Cerezo Salcedo, Xavier Mesas Laserna, Ángel L. Miguel Rodríguez, Rafael Rodríguez Coronel

Adaptació de continguts: Santiago Cerezo Salcedo

Electrònica

Índex

Introducció **5**

Resultats d'aprenentatge **7**

1 Principis bàsics de lògica digital **9**
1.1 Senyals analògics i senyals digitals . . . 9
1.2 Sistemes de numeració en els sistemes digitals . . . 10
1.2.1 Sistema de numeració decimal . . . 10
1.2.2 Sistema de numeració binari . . . 11
1.2.3 Sistema de numeració hexadecimal . . . 12
1.3 Conversió entre sistemes de numeració . . . 13
1.3.1 Conversió de binari a decimal . . . 13
1.3.2 Conversió de decimal a binari . . . 14
1.3.3 Conversió de binari a hexadecimal . . . 15
1.3.4 Conversió d'hexadecimal a binari . . . 17
1.3.5 Conversió de decimal a hexadecimal . . . 17
1.3.6 Conversió d'hexadecimal a decimal . . . 17
1.4 Altres formes de codificar nombres sencers . . . 18
1.4.1 Codificació BCD . . . 18
1.5 Aritmètica binària . . . 19
1.5.1 Suma en sistema binari . . . 19
1.5.2 Complement a un i complement a dos d'un nombre binari . . . 20
1.5.3 Resta en sistema binari . . . 20
1.5.4 Representació de nombres negatius en sistema binari . . . 21
1.6 Àlgebra de Boole . . . 22
1.6.1 Funcions lògiques . . . 24
1.6.2 Taula de veritat d'una funció lògica . . . 25
1.6.3 Funcions equivalents . . . 26
1.6.4 Formes canòniques d'una funció . . . 27
1.6.5 Portes lògiques bàsiques . . . 30
1.6.6 Simplificació de funcions lògiques amb mapes de Karnaugh . . . 34

2 Circuits combinacionals i seqüencials **45**
2.1 Multiplexors i desmultiplexors . . . 46
2.1.1 Multiplexors . . . 46
2.1.2 Desmultiplexors . . . 48
2.1.3 Connexió multiplexor-desmultiplexor . . . 49
2.2 Descodificadors i codificadors . . . 49
2.2.1 Descodificadors . . . 50
2.2.2 Implementació de funcions lògiques amb descodificadors . . . 54
2.2.3 Codificadors . . . 56
2.3 Circuits aritmètics . . . 57
2.3.1 Circuits comparadors . . . 57

2.3.2 Circuits sumadors 58
2.4 Circuits seqüencials 60
2.4.1 Biestables: latches i flip-flops 61
2.4.2 Comptadors 67
2.4.3 Registres de desplaçament 69

Introducció

Des de fa unes poques dècades, l'electrònica digital està revolucionant tot el que ens envolta. Ha canviat la manera d'escoltar música (passant dels discos de vinil als CD-ROM i a la música en format MP3), la manera de veure la televisió (passant de la televisió analògica a la TDT), la manera de comunicar-nos (amb la telefonia mòbil, el correu electrònic i els xats), la manera d'informar-nos (amb Internet i els satèl·lits)... Bé podríem omplir unes quantes pàgines enumerant tots els canvis que l'electrònica digital està produint a les nostres vides.

L'àrea dels automatismes també ha estat molt influenciada per l'electrò- nica digital des que, al final de la dècada dels anys seixanta, la indústria va trobar en les noves tecnologies digitals una solució més eficient que els sistemes de control elèctrics basats en relés i interruptors. Així van apa- rèixer els primers controladors lògics programables (PLC), dispositius ba- sats en l'electrònica digital molt utilitzats al món de l'automatització.

Per aquest motiu, en un mòdul introductori com aquest és necessari in- cloure una unitat sobre lògica digital.

En aquesta unitat treballarem amb la lògica digital i els components digitals més bàsics. Entendre com funcionen aquests components és imprescindible per poder treballar després amb controladors lògics programables.

En l'apartat "Principis bàsics de lògica digital" veurem els fonaments matemàtics de la lògica digital. Veurem quin sistema de numeració fan servir les màquines digitals, com realitzen les operacions matemàti- ques i com fan càlculs lògics elementals.

En l'apartat "Circuits combinacionals i seqüencials" farem un repàs dels elements bàsics dels sistemes digitals: comptadors, petites calcu- ladores, circuits comparadors, etc. Tots aquests elements integrats for- men sistemes digitals més complexos com els PLC.

Per treballar els continguts d'aquesta unitat, és convenient que feu totes les activitats i els exercicis d'autoavaluació. Sobretot és molt important que practiqueu amb el sistema de numeració binari, fent conversions a altres siste- mes i realitzant senzills càlculs.

Resultats d’aprenentatge

En finalitzar aquesta unitat, l’alumne/a:

1. Reconeix circuits lògics combinacionals determinant les seves característiques i aplicacions.
    - Utilitza diferents sistemes de numeració i codis.
    - Descriu les funcions lògiques fonamentals utilitzades en els circuits electrònics digitals.
    - Representa els circuits lògics mitjançant la simbologia adequada.
    - Interpreta les funcions combinacionals bàsiques.
    - Identifica els components i blocs funcionals.
    - Munta o simula circuits.
    - Verifica el funcionament dels circuits
    - Identifica les diferents famílies d’integrats i la seva aplicació.
    - Realitza les tasques que cal fer individualment amb autosuficiència i seguretat.
2. Reconeix circuits lògics seqüencials determinant les seves característiques i aplicacions.
    - Descriu diferències entre circuits combinacionals i seqüencials.
    - Descriu diferències entre sistemes síncrons i asíncrons.
    - Identifica els components i blocs funcionals.
    - Utilitza els instruments lògics de mesura adequats.
    - Munta o simula circuits.
    - Verifica el funcionament de circuits bàsics seqüencials.
    - Descriu aplicacions reals dels circuits amb dispositius lògics seqüencials.
    - Realitza les tasques que cal fer individualment amb autosuficiència i seguretat.

1. Principis bàsics de lògica digital

Als Annexos del present mòdul hi teniu disponible un tutorial sobre el maneig de les unitats físiques.

La lògica digital és la "manera de pensar i fer càlculs" que tenen totes les màquines digitals, que poden ser des d'una senzilla calculadora fins a un autòmat programable o un potent ordinador. Per tant, per entendre com funcionen aquestes màquines digitals és necessari saber operar amb lògica digital.

A diferència dels sistemes analògics, els sistemes digitals només poden prendre un conjunt de valors discrets i canvien de valor per salts.

Als Annexos del present mòdul hi teniu disponible un tutorial sobre el procediment de les mesures elèctriques.

Els equips digitals utilitzen el sistema de numeració binari, el qual opera únicament amb dos dígits, el 0 i l'1. Com que els éssers humans pensem amb els sistema de numeració decimal, s'han desenvolupat tècniques matemàtiques per fer conversions entre sistemes de numeració: de binari a decimal, de decimal a binari, de binari a hexadecimal, d'hexadecimal a binari, de decimal a hexadecimal i d'hexadecimal a decimal.

Els sistemes digitals fan operacions matemàtiques amb dades expressades en binari. Com a instrument matemàtic per treballar amb sistemes digitals utilitzem l'àlgebra de Boole.

1.1 Senyals analògics i senyals digitals

Consulteu el vídeo "El circuit lògic" als Annexos del web.

Al camp de l'electricitat i l'electrònica, hi ha dues maneres de representar informació, que anomenem **analògica i digital**, i que es distingeixen per la naturalesa dels valors que poden prendre les variables que ens donen una mesura d'aquesta informació.

Un **senyal analògic** és aquell que varia de forma contínua (sense salts) i pot prendre infinits valors al llarg del temps.

Termòmetre de mercuri

El clàssic termòmetre de mercuri està format per un tub de vidre totalment tancat dins del qual hi ha un líquid, en la majoria dels casos mercuri o alcohol.

Termòmetre analògic de mercuri

El principi de funcionament que permet a aquest instrument mesurar la temperatura és que el volum del líquid que conté canvia de manera uniforme segons la temperatura, de manera que quan el líquid s'escalfa s'expandeix i quan es refreda es contrau. Aquest canvi de volum és visible a través del vidre i es manifesta fent més llarga o més curta la columna de líquid que hi ha dins del tub.

En aquest cas, la informació és la temperatura i la variable que conté la informació és la columna del líquid. Com ja sabem, aquest instrument no és elèctric ni electrònic, però la naturalesa d'aquest senyal és clarament analògica, ja que la longitud de la columna de líquid canvia de manera contínua (sense salts) i pot prendre infinits valors (dins dels límits de l'escala del termòmetre).

Un **senyal digital** és aquell que només pot prendre un conjunt de valors discrets i canvia de valor per salts.

Termòmetre digital

Termòmetre digital

Els termòmetres més moderns no es basen en el mètode clàssic del termòmetre de mercuri. Aquests instruments disposen d'una petita pantalla en la qual es visualitza un nombre que representa la temperatura mesurada.

En aquest cas, la informació també és la temperatura i la variable que conté la informació és el nombre que es veu a la pantalla.

Aquesta variable és digital, ja que el nombre mostrat a la pantalla no varia d'una manera contínua amb la temperatura, sinó que normalment canvia en salts discontinus o discrets de 0,1 graus.

1.2 Sistemes de numeració en els sistemes digitals

Consulteu el vídeo "La codificació digital" als Annexos del web.

A la nostra vida quotidiana, els éssers humans treballem amb deu xifres (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 i 9) que combinem per representar qualsevol número i per fer càlculs: és el que s'anomena **sistema de numeració decimal**.

Els equips digitals (ordinadors, autòmats programables, etc.) treballen amb un mètode per comptar i fer càlculs molt particular: tan sols treballen amb les xifres 0 i 1. És el que s'anomena **sistema de numeració binari**.

Com que els nombres binaris poden ser molt llargs, sovint s'utilitzen altres sistemes de numeració per representar-los: són els sistemes de numeració **hexadecimal** i **BCD**

Per entendre com funcionen els equips digitals és necessari que sapigueu operar amb nombres binaris, hexadecimals i BCD, i que sapigueu convertir un nombre d'un sistema a un altre.

1.2.1 Sistema de numeració decimal

Sabíeu...

... que al llarg de la història han sorgit molts sistemes de numeració diferents? El nostre sistema decimal actual va ser inventat a l'Índia i transmès a Europa pels àrabs.

Dígit

Un dígit és cadascun dels signes o els símbols que s'empren en un determinat sistema de numeració per formar els diferents nombres.

L'ésser humà fa servir la numeració decimal pel costum dels homes primitius de comptar amb els dits de la mà: d'aquesta manera era més fàcil fer la correspondència entre cada objecte i un dit de la mà.

Amb el temps, aquests homes primitius van haver de representar quantitats per escrit i va sorgir la necessitat d'assignar un símbol o dígit a cada nombre, fet que va originar els deu símbols (dígits) que es fan servir en el sistema decimal:

$$0,\ 1,\ 2,\ 3,\ 4,\ 5,\ 6,\ 7,\ 8 \text{ i } 9$$

Però, és clar, normalment volem representar més de deu nombres. Cap problema: sabem que el sistema decimal permet representar qualsevol nombre sencer afegint-hi noves xifres. Així, amb dues xifres decimals, podem representar 100 nombres (del 0 al 99), amb tres xifres podem representar 1.000 nombres (del 0 al 999) i així consecutivament.

Descomposició d'un nombre decimal

El nombre 2.364 consta de 4 xifres que representen el nombre d'unitats (4), desenes (6), centenes (3) i milers (2).

Si fem servir una mica de matemàtiques, podem descompondre aquest nombre tal com s'indica:

$$2.364 = 2 \cdot 1.000 + 3 \cdot 100 + 6 \cdot 10 + 4 \cdot 1$$

Una altra manera d'escriure la suma anterior és fent servir la potenciació:

$$2.364 = 2 \cdot 10^3 + 3 \cdot 10^2 + 6 \cdot 10^1 + 4 \cdot 10^0$$

Escrivint el nombre com una suma de potències, queda molt més clar per què el sistema decimal es diu que és un sistema en base deu: cada dígit multiplica la base (el 10) elevada a un exponent.

Recordeu aquesta manera de descompondre un nombre perquè us serà molt útil quan estudieu els sistemes binari i hexadecimal.

1.2.2 Sistema de numeració binari

El sistema de numeració binari també és anomenat sistema de numeració en base dos.

El sistema binari fa servir únicament dos dígits, el 0 i l'1, en lloc dels deu dígits que fa servir el sistema decimal.

Així, amb una xifra només podem representar dos nombres: el 0 i l'1. Per representar més de dos nombres hem d'afegir noves xifres a l'esquerra, tal com havíem fet en el cas decimal.

Cada una d'aquestes xifres és el que es coneix com a **bit** i , per tant, podem dir que un nombre binari es compon d'una sèrie de bits.

- Amb dos bits podem representar quatre nombres: 00, 01, 10 i 11.
- Amb tres bits podem representar vuit nombres: 000, 001, 010, 011, 100, 101, 110 i 111.
- Amb quatre bits podem representar setze nombres: 0000, 0001, 0010, 0011, 0100, 0101, 0110, 0111, 1000, 1001, 1010, 1011, 1100, 1101, 1110 i 1111.
- I així consecutivament.

En la taula 1.1 podeu veure l'equivalència entre els primers nombres dels sistemes decimal i binari.

Taula 1.1. Equivalència entre els setze primers nombres decimals i binaris

Decimal	0	1	2	3	4	5	6	7
Binari	0	1	10	11	100	101	110	111
Decimal	8	9	10	11	12	13	14	15
Binari	1000	1001	1010	1011	1100	1101	1110	1111

Hi ha una relació entre el nombre de bits que té un codi binari i la quantitat de nombres que es poden representar. Aquesta important relació és la següent:

$$N = 2^n$$

On N és la quantitat de nombres que es poden representar amb $\boldsymbol{n}$ bits.

L'agrupació de vuit bits és tan utilitzada en electrònica i, sobretot, en informàtica, que rep un nom especial: *byte*.

Quants nombres podem representar amb vuit bits?

La resposta és 2^8 o, el que és el mateix, 256.

Com que el primer nombre és el 0 (00000000), l'últim que es podrà representar és el 255 (11111111).

Treballar amb nombres binaris de molts dígits no és gaire còmode i és fàcil que ens equivoquem, per exemple, quan hem de copiar un nombre d'un lloc a un altre en un exercici.

De quatre bits en quatre bits

Per què s'acostumen a agrupar els nombres grans en quatre bits? Com veureu més endavant, agrupar d'aquesta manera un nombre binari ens facilitarà la tasca de convertir-lo a hexadecimal en el cas que sigui necessari.

Una manera d'intentar fer més llegible els nombres binaris consisteix a separar els nombres grans en grups de quatre bits començant per la dreta.

Per exemple, un nombre tan poc llegible com

$$100101010101110101$$

es podria escriure de la manera següent:

$$10\ 0101\ 0101\ 0111\ 0101$$

En qualsevol cas, recordeu que el truc de separar en grups de quatre no és obligatori. Tan sols és una recomanació per facilitar-vos la tasca de treballar amb nombres binaris.

Fixeu-vos que, en aquest cas, el grup situat més a l'esquerra no té quatre bits sinó dos. Si voleu, podeu representar aquest grup amb quatre bits afegint a l'esquerra els 0 que calguin:

$$0010\ 0101\ 0101\ 0111\ 0101$$

Indicació de nombre binari

De vegades, s'afegeix el subíndex *2* per indicar que un nombre està expressat en binari. Per exemple, el nombre binari 101 s'escriu 101_2. També es pot indicar que un nombre és binari amb el sufix *b*. Per exemple, el nombre binari 101 s'escriu 101_b.

1.2.3 Sistema de numeració hexadecimal

El sistema de numeració hexadecimal utilitza setze dígits:

$$0,\ 1,\ 2,\ 3,\ 4,\ 5,\ 6,\ 7,\ 8,\ 9,\ \mathrm{A},\ \mathrm{B},\ \mathrm{C},\ \mathrm{D},\ \mathrm{E\ i\ F}$$

El mecanisme que es fa servir per construir nombres és similar al que hem vist en el sistema decimal i binari:

El sistema de numeració hexadecimal també és anomenat sistema de numeració en base setze.

- Amb una xifra podem representar 16 nombres: del 0 al F. Per representar més de 16 nombres, l'únic que hem de fer és afegir noves xifres hexadecimals a l'esquerra.
- Amb dues xifres podem representar 256 nombres: 00, 01, 02, ..., 0F, 10, 11, 12, ..., 1F, 20, 21, ... 2F, ..., F0, F1, F2, ... FF
- Amb tres xifres podem representar 4.096 nombres: 000, 001, ..., 00F, 010, ..., 0F0, 0F1, 0FF, ..., FFA, FFB, ..., FFF
- I així consecutivament.

A la taula 1.2 es representen els primers nombres decimals i la seva correspondència en hexadecimal.

Indicació de nombre hexadecimal

De vegades, s'afegeix el prefix *0x* per indicar que un nombre està expressat en hexadecimal. Per exemple, el nombre hexadecimal 13 s'escriu 0x13. També es pot indicar que un nombre és hexadecimal amb el sufix *H*. Per exemple, el nombre hexadecimal 13 s'escriu 13H.

Taula 1.2. Equivalència entre els vint primers nombres decimals i hexadecimals

Decimal	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Hexadecimal	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Decimal	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Hexadecimal	A	B	C	D	E	F	10	11	12	13

1.3 Conversió entre sistemes de numeració

Els sistemes digitals treballen amb el sistema de numeració binari, però els éssers humans pensem amb el sistema de numeració decimal. Per tant, es fa necessari saber convertir nombres binaris en decimals i a l'inrevés.

El sistema de numeració hexadecimal s'utilitza per representar nombres binaris d'una manera més compacta. També es necessari saber convertir nombres hexadecimals al sistema binari i decimal i a l'inrevés.

Per fer totes aquestes conversions s'utilitzen unes tècniques matemàtiques molt senzilles.

1.3.1 Conversió de binari a decimal

Per convertir un nombre binari a decimal s'ha de fer una suma de termes en els quals cada dígit binari multiplica el nombre 2 elevat a un exponent.

Per exemple, l'equivalent decimal del nombre binari 110101_2 es pot calcular de la manera següent:

$$1 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0$$

Podem eliminar els termes que multipliquen per zero:

$$1 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^0$$

Ara només cal substituir cada potència pel seu valor decimal (2^5 = 32, 2^4 = 16, 2^2 = 4 i 2^0 = 1) i fer la suma de tots els termes:

$$32 + 16 + 4 + 1 = 53$$

Ja hem acabat! El nombre binari $\mathbf{110101_2}$ és el nombre decimal **53**.

Aquest problema es pot resoldre gràficament, mitjançant una taula com la mostrada a la taula 1.3. A la part superior de la taula apareix l'equivalent decimal de les diferents posicions dels dígits binaris (d'esquerra a dreta, des de 2^7 fins a 2^0).

Taula 1.3. Plantilla per convertir de binari a decimal.

128	64	32	16	8	4	2	1

A la taula, hi escriurem **de dreta a esquerra** el nombre binari i després sumar els valors decimals de les caselles que estiguin a 1.

Per exemple, el número binari 10001100 es faria com es mostra a la taula 1.4.

Taula 1.4. Conversió del 10001100 binari a decimal.

128	64	32	16	8	4	2	1
1	0	0	0	1	1	0	0

Sumem els termes a 1, obtenint:

$$128 + 8 + 4 = 140$$

1.3.2 Conversió de decimal a binari

Un mètode gràfic per convertir un nombre binari a decimal utilitza una taula com la mostrada a la taula 1.5. A la part superior de la taula apareix l'equivalent decimal de les diferents posicions dels dígits binaris (d'esquerra a dreta, des de 2^7 fins a 2^0).

Taula 1.5. Plantilla per convertir de decimal a binari.

128	64	32	16	8	4	2	1

Per convertir a decimal, únicament calia posar el nombre binari sobre la plantilla, escriure'l de dreta a esquerra i sumar els valors que siguin a 1.

La qüestió que ens ocupa ara és la contrària: a partir del nombre decimal volem obtenir l'equivalent binari. Per fer això, anirem omplint la fila inferior de la plantilla **d'esquerra a dreta** amb uns o zeros, comptant fins a arribar al nombre decimal desitjat.

Per exemple, volem trobar l'equivalent binari del nombre decimal 89. Utilitzant la plantilla obtindrem el mostrat a la taula 1.6.

Taula 1.6. Plantilla per convertir de decimal a binari.

128	64	32	16	8	4	2	1
0	1	0	1	1	0	0	1

El raonament que hem seguit per omplir la plantilla és el següent:

1. Comencem per la cel·la de més a l'esquerra (la de pes 128). Posem la cel·la a 0 perquè si la poséssim a 1, el nombre decimal obtingut seria, com a mínim, el 128 i ens passaríem de 89.
2. Continuem amb la següent cel·la a la dreta (la de pes 64). Aquesta la posem a 1 perquè amb 64 encara no arribem a 89.
3. Continuem amb la següent cel·la a la dreta (la de 32). Aquesta la posem a 0 perquè si la poséssim a 1, tindríem 64 + 32 = 96 i ens passaríem de 89.
4. Continuem amb la següent cel·la a la dreta (la de pes 16). Aquesta la posem a 1 perquè així tenim 64 + 16 = 80 i encara no arribem a 89.
5. Continuem amb la següent cel·la a la dreta (la de pes 8). Aquesta la posem a 1 perquè així tenim 64 + 16 + 8 = 88 i encara no arribem a 89.
6. Continuem amb la següent cel·la a la dreta (la de pes 4). Aquesta la posem a 0 perquè si la poséssim a 1, tindríem 64 + 16 + 8 + 4 = 92 i ens passaríem de 89.
7. Continuem amb la següent cel·la a la dreta (la de pes 2). Aquesta la posem a 0 perquè si la poséssim a 1, tindríem 64 + 16 + 8 + 2 = 90 i ens passaríem de 89.
8. Continuem amb la següent cel·la a la dreta (la de pes 1). Aquesta la posem a 1 perquè així tenim 64 + 16 + 8 + 1 = 89 i obtenim el valor decimal desitjat.

Per tant, el nombre binari equivalent al decimal **89** és el $\mathbf{0101\ 1001_2}$.

1.3.3 Conversió de binari a hexadecimal

Passar un nombre binari al seu equivalent hexadecimal és molt fàcil, perquè cada dígit hexadecimal es codifica directament amb quatre dígits binaris.

Amb un nombre binari qualsevol, només cal fer grups de quatre bits començant per la dreta del nombre binari.
Cadascun d'aquests grups es correspondrà amb un símbol del sistema hexadecimal, de manera que la seqüència ordenada d'aquests símbols és l'equivalent hexadecimal del nombre binari.

Fixeu-vos que aquest mètode és aplicable a qualsevol nombre binari, independentment del nombre de bits que tingui.

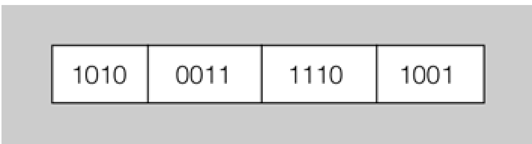
Per a la vostra referència, en la taula 1.7 teniu les equivalències entre els 16 primers nombres dels sistemes de numeració decimal, binari i hexadecimal.

Taula 1.7. Equivalència entre els nombres decimal, binari i hexadecimal

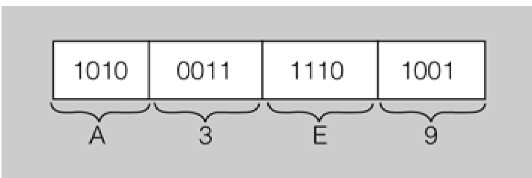
Decimal	Binari	Hexadecimal
0	0000	0
1	0001	1
2	0010	2
3	0011	3
4	0100	4
5	0101	5
6	0110	6
7	0111	7
8	1000	8
9	1001	9
10	1010	A
11	1011	B
12	1100	C
13	1101	D
14	1110	E
15	1111	F

Quin nombre hexadecimal és el nombre binari 1010 0011 1110 1001?

En primer lloc hem de fer grups de quatre bits començant per la dreta, tal com es mostra en la figura següent:



Seguidament, "traduïm" cada grup de quatre bits al seu equivalent hexadecimal (figura següent), segons la correspondència que es mostra a la taula 1.7.



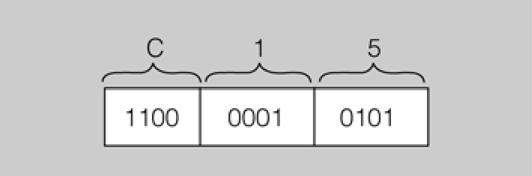
Per tant, l'equivalent hexadecimal del nombre binari 1010 0011 1110 10012 és el 0xA3E9

1.3.4 Conversió d'hexadecimal a binari

En un nombre hexadecimal qualsevol, cada dígit es correspondrà amb un grup de quatre bits, de manera que la seqüència ordenada d'aquests bits és l'equivalent binari del nombre hexadecimal

Quin nombre binari és el nombre hexadecimal 0xC15?

Únicament cal identificar el grup de quatre bits associat a cada dígit hexadecimal, com es mostra a la figura següent. Per tant, el nombre hexadecimal **0xC15** és el nombre binari **1100 0001 0101**.



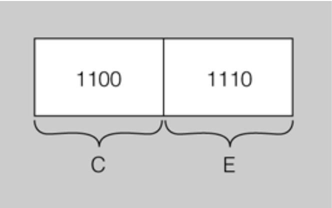
1.3.5 Conversió de decimal a hexadecimal

El mètode per convertir un nombre decimal a hexadecimal consisteix a fer dues senzilles accions: en primer lloc es converteix el nombre decimal a binari i, seguidament, es converteix el nombre binari resultant a hexadecimal.

Quin nombre hexadecimal és el 206 decimal?

Primer convertirem el nombre decimal 206 a nombre binari, mitjançant el mètode gràfic, obtenint el número binari **11001110**.

A continuació convertim aquest nombre binari a hexadecimal, fent grups de quatre bits i convertint-los al símbol hexadecimal corresponent (figura següent):



Per tant, l'equivalent hexadecimal del nombre decimal 206 és el 0xCE.

1.3.6 Conversió d'hexadecimal a decimal

Recordeu que el sistema hexadecimal també s'anomena *sistema de base setze* i, per tant la posició de cada dígit anirà referida a una potència de 16.

Per convertir un nombre hexadecimal a decimal s'ha de fer una suma de termes en els quals cada dígit hexadecimal multiplica el nombre 16 elevat a un exponent.

Recordeu que el prefix 0x indica que el nombre està expressat en hexadecimal.

Per exemple, l'equivalent decimal del nombre 0x1B2 es calcula així:

$$1 \cdot 16^2 + \mathrm{B} \cdot 16^1 + 2 \cdot 16^0$$

Fet això, només ens cal un pas més per passar a decimal: substituir els símbols A, B, C, D, E i F pel seu equivalent decimal (en la taula 1.7 podeu consultar aquestes equivalències) i operar fins a obtenir un nombre decimal:

$$1 \cdot 16^2 + \mathrm{B} \cdot 16^1 + 2 \cdot 16^0 = 1 \cdot 16^2 + 11 \cdot 16^1 + 2 \cdot 16^0$$

El dígit **B** correspon al nombre decimal **11**. Ara només cal substituir cada potència pel seu valor decimal ($16^2 = 256$, $16^1 = 16$ i $16^0 = 1$) i fer la suma de tots els termes:

$$1 \cdot 256 + 11 \cdot 16 + 2 \cdot 1 = 256 + 176 + 2 = 434$$

Ja hem acabat! El nombre hexadecimal **0x1B2** és el nombre **434** en decimal

1.4 Altres formes de codificar nombres sencers

Hi ha diferents sistemes per codificar els valors numèrics. Els més utilitzats són els sistemes de numeració decimal, binari i hexadecimal.

Ara bé, els sistemes digitals fan servir altres codificacions, per exemple, per assignar un codi que representi una lletra de l'abecedari o bé que indiqui la posició de l'eix d'un motor.

En casos com aquests es fan servir uns codis dissenyats especialment per satisfer aquestes i altres necessitats. Un d'aquests codis és el BCD, el qual s'utilitza molt en el món dels autòmats programables.

La sigla BCD prové de l'anglès: ***B**inary **C**oded **D**ecimal*, és a dir, decimal codificat en binari.

1.4.1 Codificació BCD

Per passar un nombre decimal al seu equivalent BCD només cal passar cada xifra del nombre decimal al seu equivalent en binari en quatre bits, independentment.

Cada xifra del número decimal generarà quatre dígits binaris.

Per exemple, el nombre decimal **9285** seria el nombre **1001 0010 1000 0101** en codi BCD, ja que:

- El 9 és el nombre 1001 en binari.
- El 2 és el nombre 0010 en binari.
- El 8 és el nombre 1000 en binari.
- El 5 és el nombre 0101 en binari.

Fixeu-vos que per representar cada símbol d'un nombre decimal **sempre** s'utilitzen quatre bits en codi BCD.

1.5 Aritmètica binària

Les operacions es realitzen de la mateixa forma que en sistema decimal, però, a causa de la senzillesa del sistema binari, es poden fer algunes simplificacions.

> Els sistemes digitals (ordinadors, calculadores, autòmats programables...) són capaços de fer operacions aritmètiques amb dades expressades en sistema binari.

1.5.1 Suma en sistema binari

Les possibles combinacions de la suma binària són:

- 0 + 0 = 0
- 0 + 1 = 1
- 1 + 0 = 1
- 1 + 1 = 0, i en porto una

Les tres primeres combinacions són evidents. Però la suma d'**1+1**, que en decimal sabem que és 2, s'ha d'escriure en binari amb dos dígits (10). Per tant, la suma d'1+1 és 0 i s'arrossega una unitat que se suma a la següent posició a l'esquerra.

Quin és el resultat de sumar els nombres binaris 1011 i 0110?

Fent la suma segons les regles de la suma binària obtenim:

$$\begin{array}{cccccc} & & 1 & 1 & & \\ & & 1 & 0 & 1 & 1 \\ + & & 0 & 1 & 1 & 0 \\ \hline & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}$$

Podeu observar que el resultat té cinc dígits perquè arrosseguem un 1.

La mateixa operació però en sistema decimal hauria estat: 11 + 6 = 17.

1.5.2 Complement a un i complement a dos d'un nombre binari

El **complement a un** i el **complement a dos** són dues eines matemàtiques que faciliten molt les tasques aritmètiques en el sistema binari, sobretot la realització de restes i el treball amb nombres negatius.

Complement a un d'un nombre binari

El complement a un (C1) d'un nombre binari és el nombre resultant d'invertir els uns i els zeros d'aquest nombre.

Per exemple, el complement a un del nombre 1101 és el nombre 0010.

Complement a dos d'un nombre binari

El complement a dos (C2) d'un nombre binari és el nombre resultant de sumar 1 al seu complement a un. És a dir, C2 = C1 + 1.

Per exemple, per calcular el complement a dos del nombre binari 1001 primer calculem el seu complement a un invertint uns i zeros. Ens dóna el nombre 0110. A aquest complement a un li sumem una unitat i ja tenim el complement a dos: 0110 + 1 = 0111.

Generalment s'assumeix que el C2 és la manera de representar el negatiu d'un número binari.

Recordeu...

... que en una resta de dos nombres *A* - *B*, el nombre *A* s'anomena *minuend* i el nombre *B* s'anomena *subtrahend*.

1.5.3 Resta en sistema binari

La resta de dos nombres binaris pot obtenir-se sumant al minuend el complement a dos del subtrahend.

Per exemple, fem la resta 1011011 - 0101110:

- Primer calculem el complement a un del subtrahend:**1010001**.
- A continuació calculem el complement a dos d'aquest: **1010010**.
- Finalment sumem el minuend amb el complement a dos del subtrahend.

$$
\begin{array}{cccccccccc}
 & & & 1 & & & 1 & & \\
 & & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\
+ & & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
\hline
 & \underline{1} & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1
\end{array}
$$

En el resultat de la suma ens sobra un bit, ja que arrossegeum un 1 per l'esquerra. Però com que el nombre resultant de la resta no pot ser més gran que el minuend, el bit sobrant s'ignora. Per tant: **1011011 - 0101110 = 0101101**.

Podeu comprovar que si "traduïm" la resta binària 1011011 - 0101110 = 0101101 a decimal ens dóna: 91 46 = 45.

1.5.4 Representació de nombres negatius en sistema binari

Amb el sistema decimal, els nombres negatius es representen senzillament precedint-los amb el signe **-**. En canvi, en el sistema binari no s'utilitza el signe sinó que es fan servir altres mètodes. El mètode més utilitzat és el del complement a 2 (C2).

Altres representacions de nombres negatius binaris

Hi ha altres mètodes per representar nombres negatius en sistema binari (el mètode de signe i magnitud, el mètode de complement a un, el mètode d'excés N...), però no són tan utilitzats com el mètode de complement a dos.

Els nombres positius es representen amb el sistema de numeració binari normal, i els nombres negatius es representen amb el sistema de numeració binari en **complement a dos**.

En la taula 1.8 es mostra la representació binària des del -128 fins al +127. Si us hi fixeu, el bit de més pes sempre és zero per als nombres positius i sempre és u per als nombres negatius. Aquest bit de més pes s'anomena **bit de signe**, perquè ens indica si el nombre és positiu (bit de signe a zero) o negatiu (bit de signe a un). La resta de bits s'anomenen **magnitud**.

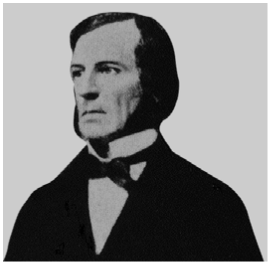
Taula 1.8. Representació binària de nombres positius i negatius amb el mètode de complement a dos

Decimal	Signe	Magnitud	Codi
+127	0	111 1111	Natural
+126	0	111 1110	Natural
+125	0	111 1101	Natural
+124	0	111 1100	Natural
...	0	...	Natural
+5	0	000 0101	Natural
+4	0	000 0100	Natural
+3	0	000 0011	Natural
+2	0	000 0010	Natural
+1	0	000 0001	Natural
0	0	000 0000	Natural
-1	1	111 1111	C2
-2	1	111 1110	C2
-3	1	111 1101	C2

Taula 1.8 (continuació)

Decimal	Signe	Magnitud	Codi
-4	1	111 1100	C2
-5	1	111 1011	C2
...	1	...	C2
-125	1	000 0011	C2
-126	1	000 0010	C2
-127	1	000 0001	C2
-128	1	000 0000	C2

1.6 Àlgebra de Boole



George Boole (1815-1864)

Matemàtic i filòsof britànic. Va desenvolupar l'anomenada *àlgebra de Boole* com una eina per analitzar la ment humana. L'aplicació als sistemes digitals va ser posterior.

L'àlgebra de Boole es basa en el següent:

- Un conjunt d'elements que únicament poden tenir dos valors possibles i que anomenarem 0 i 1.
- Tres operacions que anomenarem **suma lògica**, **producte lògic** i **negació**.

Un element qualsevol de l'àlgebra de Boole es representa amb una lletra que s'anomena **variable booleana** o, alternativament, **variable binària**. Així, doncs, cada variable binària té associat un valor 1 o un valor 0.

L'àlgebra de Boole és una eina matemàtica que ens permet treballar amb sistemes que només fan servir dos estats clarament diferenciats, com és el cas dels sistemes digitals.

Què significa 1 i què significa 0?

Això depèn de l'aplicació i l'únic important és que representa dos estats clarament diferenciats.

Vegem-ne un exemple senzill: molts cotxes incorporen un sistema que informa de l'estat de les portes, de manera que encén un llum indicador si detecta que hi ha una porta oberta.

Com que cadascuna de les portes del vehicle únicament poden estar en dos estats diferents (porta oberta o porta tancada), podem "traduir" aquesta situació a l'àlgebra de Boole d'una manera molt clara.

Per exemple, podríem associar una variable binària a cada porta que anomenarem de la següent manera:

- *A*: variable que representa l'estat de la porta del conductor
- *B*: variable que representa l'estat de la porta del copilot
- *C*: variable que representa l'estat de la porta del darrere esquerra
- *D*: variable que representa l'estat de la porta del darrere dreta

I finalment, associaríem a l'estat "porta oberta" el valor 1 i a l'estat "porta tancada", el valor 0. Òbviament, aquesta elecció ha estat arbitrària i podríem haver fet l'assignació contrària.

Fixeu-vos que amb aquests simples passos hem pogut *traduir* una informació del món real al món matemàtic de l'àlgebra de Boole, de tal manera que si ara ens diguessin:

- $A = 1$
- $B = 1$
- $C = 0$
- $D = 0$

sabríem que les dues portes davanteres del nostre vehicle estan obertes i les dues del darrere, tancades.

Les tres operacions bàsiques de l'àlgebra de Boole són les següents:

Variables binàries al món real

Hi ha molts casos del món real que es poden "traduir" al món binari d'uns i zeros. Per exemple, l'estat de les portes d'un vehicle: cada porta del vehicle equival a una variable binària, de manera que si la porta està oberta la variable pren el valor 1 i si la porta està tancada la variable pren el valor 0.

- **Suma lògica**. És representada pel **signe +** i requereix dos operands. Aquesta operació queda definida en la taula 1.9.

TAULA 1.9. Suma lògica

a	b	a + b
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

El resultat de la suma lògica és 1 si qualsevol dels operands és 1.

- **Producte lògic**. És representat pel **signe ·** i requereix dos operands. Aquesta operació queda definida en la taula 1.10.

TAULA 1.10. Producte lògic

a	b	a·b
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

El resultat del producte lògic és 1 només si tots els operands són 1.

- **Negació**. És una operació que només requereix un operand. Si l'operand és la variable *a*, una línia horitzontal sobre aquesta variable indica que està negada o complementada ($\overline{a}$). Aquesta operació queda definida en la taula 1.11.

L'àlgebra de Boole és el suport matemàtic per al disseny i l'anàlisi dels sistemes digitals i, com tota àlgebra, disposa d'una sèrie de postulats i teoremes. Segurament les més importants són el **teorema d'absorció**, molt útil en simplificacions, i el **teorema de DeMorgan**, el qual ens indica com es converteix un producte lògic en una suma lògica i a l'inrevés.

TAULA 1.11. Negació lògica

a	$\overline{a}$
0	1
1	0

El **teorema d'absorció** es pot expressar amb aquestes dues expressions algebraiques:

$$a + a \cdot b = a$$
$$a \cdot (a + b) = a$$

El **teorema de DeMorgan** es pot expressar amb aquestes dues expressions algebraiques:

$$\overline{a \cdot b} = \overline{a} + \overline{b}$$
$$\overline{a + b} = \overline{a} \cdot \overline{b}$$

1.6.1 Funcions lògiques

Diferents maneres d'escriure una funció lògica

En alguns llibres veureu que, al costat del nom de la funció, s'acostuma a escriure entre parèntesis les variables emprades per la funció. Per exemple:

$$f(a, b, c, d) = a \cdot b + c \cdot d$$

Tanmateix, moltes vegades veureu que el signe · del producte lògic no s'escriu, ja que es dóna per suposada la seva existència. Per exemple, la funció anterior es pot escriure així:

$$f(a, b, c, d) = ab + cd$$

Anomenem **funció lògica** una variable binària que pren el valor d'una expressió algebraica formada per altres variables binàries relacionades de la manera que sigui mitjançant les operacions suma lògica, producte lògic i negació.

Per exemple, les següents expressions són funcions lògiques definides per una expressió algebraica:

$$f_1 = a \cdot b + c \cdot d$$

$$f_2 = a \cdot \overline{c} + b$$

Diem que una funció està expressada com una **suma de productes** si la seva expressió algebraica està formada per una suma de termes i cada terme està format per unes variables que es multipliquen entre elles.

Per exemple, la funció següent és una suma de productes:

$$f_1 = a \cdot b \cdot c + c \cdot \overline{d}$$

Compte amb els parèntesis!

Pareu atenció que, en el cas dels productes de sumes, és obligatori l'ús de parèntesis en els termes, ja que primer s'han d'avaluar les sumes i després el producte. Si, per error, escrivíssim la funció de l'exemple així:

$$f_2 = a + c \cdot b + \overline{d}$$

entendríem que primer s'hauria de fer el producte $c \cdot b$ i després fer la suma de tots els termes (estaríem al davant d'una funció en forma de suma de productes)

Diem que una funció està expressada com un **producte de sumes** si la seva expressió algebraica està formada per un producte de termes i cada terme està format per unes variables que se sumen entre elles.

Per exemple, la funció següent és un producte de sumes:

$$f_2 = (a + c) \cdot (b + \overline{d})$$

Com s'avaluen les funcions lògiques?

Donada una expressió algebraica booleana formada per molts termes, hauríem de trobar el valor resultant de la funció seguint aquest ordre:

1. Parèntesis
2. Operació de negació
3. Operació producte lògic
4. Operació suma lògica

Exemple d'avaluació de funció lògica

Volem saber quin valor té la funció $f_1 = a \cdot b + c \cdot d$ quan a = 0, b = 1, c = 1 i d = 1.

Solució

S'hauria d'avaluar seguint els següents passos:

Com que no hi ha parèntesis ni negacions, en primer lloc es farien les operacions de producte lògic:

$$a \cdot b = 0 \cdot 1 = 0 \, c \cdot d = 1 \cdot 1 = 1$$

Per acabar, es faria la suma lògica dels resultats anteriors. En aquest cas, substituïm $a \cdot b$ pel seu valor (0) i $c \cdot d$ pel seu valor (1), i obtindrem:

$$f_1 = 0 + 1 = 1$$

Exemple d'avaluació de funció lògica

Volem saber quin valor té la funció $f_2 = \overline{a} \cdot (b + c)$ quan a = 1, b = 1 i c = 1.

En aquest cas, en primer lloc s'ha de fer l'operació que hi ha dins del parèntesi:

$$b + c = 1 + 1 = 1$$

Després s'ha de fer l'operació de negació que té la variable a:

$$\overline{a} = \overline{1} = 0$$

I finalment s'ha de fer el producte lògic d'aquests dos resultats:

$$f_2 = 0 \cdot 1 = 0$$

1.6.2 Taula de veritat d'una funció lògica

Sense saber-ho, hem vist algunes taules de veritat quan hem estudiat les operacions booleanes bàsiques (taula 1.9, taula 1.10 i taula 1.11).

Una taula de veritat és una manera de representar una funció lògica, en la qual es mostra el valor que pren la funció per a cadascuna de les combinacions de les variables d'entrada de la funció.

Per construir la taula de veritat d'una funció lògica s'han de seguir els següents passos:

1. Dibuixar una taula amb:
    - tantes columnes com variables tingui la funció, **més una columna addicional**
    - tantes files com el nombre de possibles combinacions de les variables d'entrada, **més una fila addicional**
2. En la fila superior es posen els noms de les variables (en les columnes de l'esquerra) i de la funció (en la columna de la dreta).
3. S'omple la resta de files amb les diferents combinacions de valors de les variables d'entrada, en ordre creixent, com si comptéssim en binari natural.
4. S'omple la columna de la dreta amb el valor que pren la funció per a cada combinació de valors d'entrada.

Recordeu el que heu après al subapartat "Sistema de numeració binari": si tenim *n* variables, podem fer 2^n combinacions diferents.

Exemple de taula de veritat d'una funció lògica donada

Per construir la taula de veritat de la funció $f_1 = a \cdot \overline{c} + b$ faríem el següent:

1. Construïm la taula:
    - Amb 3 + 1 (és a dir, 4) columnes, ja que la funció és de tres variables (*a*, *b* i *c*).
    - Amb 2^3 + 1 (és a dir, 9) files, ja que amb 3 variables es poden fer 2^3 = 8 combinacions.
2. Posem el nom de les variables (*a*, *b*, *c*) i de la funció (f_1) a la fila superior.
3. Omplim a sota totes les combinacions de valors que podem tenir amb tres variables. La primera combinació és 000, la següent 001, la següent 010... fins a arribar a l'última combinació 111 (com si comptéssim en binari).
4. Avaluem la funció per a cadascuna d'aquestes combinacions i posem el resultat a la columna de la dreta.

El resultat obtingut es mostra a la taula 1.12.

Taula 1.12. Taula de veritat de la funció $f_1 = a \cdot \overline{c} + b$

a	*b*	*c*	f_1
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	0
1	1	0	1
1	1	1	1

1.6.3 Funcions equivalents

Una funció booleana es pot definir indistintament amb una expressió algebraica o amb una taula de veritat. Coneixem el mètode per trobar la taula de veritat d'una funció expressada algebraicament.

El que encara no hem vist és com es fa el pas invers: partir de la taula de veritat d'una funció i trobar una expressió algebraica que descrigui la mateixa funció. Això és el que estudiarem en l'apartat "Formes canòniques d'una funció".

Abans, però, ens podríem plantejar si hi ha més d'una expressió algebraica que verifiqui una taula de veritat donada. I, efectivament, és això.

Expressions algebraiques aparentment diferents poden descriure la mateixa funció lògica. Quan passa això diem que **les funcions són equivalents.**

La manera més fàcil de descobrir si dues funcions són equivalents és trobar la taula de veritat a partir de cadascuna de les expressions algebraiques i comprovar si donen el mateix resultat.

Com a exemple, veurem si són equivalents les funcions següents:

$$f_1 = a + a \cdot b \; f_2 = a \cdot (a + b)$$

Primer omplim la taula de veritat de f_1: el resultat el podeu veure a la taula 1.13.

Taula 1.13. Taula de veritat de f_1

a	b	f_1
0	0	0
0	1	0
1	0	1
1	1	1

A continuació omplim la taula de veritat de f_2: el resultat el podeu veure a la taula 1.14.

Taula 1.14. Taula de veritat de f_2

a	b	f_2
0	0	0
0	1	0
1	0	1
1	1	1

Observant les dues taules, veiem que els resultats de les dues funcions són idèntics. Per tant, f_1 i f_2 **són equivalents**.

1.6.4 Formes canòniques d'una funció

A continuació veurem com podem trobar una expressió algebraica d'una funció a partir de la seva taula de veritat. Hi ha dues maneres de fer-ho i es coneixen com a **formes canòniques**.

Primera forma canònica

La primera forma canònica es basa a expressar la funció com una **suma de productes** que deduirem de la taula de veritat mitjançant el procediment que utilitzem en l'exemple següent:

1. A la taula de veritat, ens fixarem en les combinacions de valors de les variables d'entrada que fan que la funció valgui 1.
2. Per cadascuna d'aquestes combinacions hem de trobar un terme producte, anomenat **minterm**, amb les següents característiques:
   - Està format per totes les variables de la funció, negades o no.
   - Aquestes variables estan multiplicades.
3. Per saber si la variable ha d'estar negada o no a cada minterm, us heu de fixar en la combinació de valors:
   - Si el valor d'aquesta variable és 0, aquesta variable haurà d'anar negada en el terme producte.
   - Si el valor d'aquesta variable és 1, aquesta variable haurà d'anar directa (no negada) en el terme producte.
4. Finalment, la primera forma canònica s'obté sumant tots els *minterms*.

Taula 1.15. Funció per a la qual en volem obtenir la primera forma canònica

a	*b*	*c*	*f*
0	0	0	1
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	1	0

Exemple: obtenció de la primera forma canònica d'una funció

A partir de la taula de veritat mostrada en la taula 1.15, trobarem la primera forma canònica de la funció.

Seguint el procediment descrit anteriorment:

1. Primer ens fixem en les combinacions de valors que fan que la funció valgui 1:
   - $a = 0$, $b = 0$ i $c = 0$
   - $a = 0$, $b = 1$ i $c = 1$
   - $a = 1$, $b = 0$ i $c = 1$
2. Per a cadascuna d'aquestes tres combinacions trobarem un terme producte, anomenat **minterm**. Total, 3 termes.
3. Cadascuna de les tres combinacions genera el *minterm* associat:
   - En la primera combinació de valors, totes les variables estan a zero ($a = 0$, $b = 0$ i $c = 0$) i, per tant, aquestes variables estaran invertides en el minterm associat: $\overline{a} \cdot \overline{b} \cdot \overline{c}$.

- En la segona combinació de valors, només la variable *a* està a zero (*a* = 0, *b* = 1 i *c* = 1). Per tant, el minterm associat serà: $\overline{a} \cdot b \cdot c$.
- En la tercera combinació de valors, només la variable *b* està a zero (*a* = 1, *b* = 0 i *c* = 1). Per tant, el minterm associat serà: $a \cdot \overline{b} \cdot c$.

4. Finalment, només cal fer la suma lògica dels tres minterms per obtenir la primera forma canònica de la funció:

$$f = \overline{a} \cdot \overline{b} \cdot \overline{c} + \overline{a} \cdot b \cdot c + a \cdot \overline{b} \cdot c$$

Segona forma canònica

La segona forma canònica es basa a expressar la funció com un **producte de sumes** que deduirem de la taula de veritat mitjançant el següent procediment:

1. A la taula de veritat, ens fixarem en les combinacions de valors de les variables d'entrada que fan que la funció valgui 0.
2. Per cadascuna d'aquestes combinacions hem de trobar un terme producte, anomenat **maxterm**, amb les següents característiques:
   - Està format per totes les variables de la funció, negades o no.
   - Aquestes variables estan sumades.
3. Per saber si la variable ha d'estar negada o no a cada maxterm, us heu de fixar en la combinació de valors:
   - Si el valor d'aquesta variable és 0, aquesta variable haurà d'anar directa (no negada) en el terme suma.
   - Si el valor d'aquesta variable és 1, aquesta variable haurà d'anar negada en el terme suma.
4. Finalment, la segona forma canònica s'obté multiplicant tots els maxterms.

Recordeu que cal usar els parèntesis si es vol expressar correctament la funció com un producte de sumes.

Exemple: obtenció de la segona forma canònica d'una funció

A partir de la taula de veritat mostrada en la taula 1.15, trobarem la segona forma canònica de la funció.

Seguint el procediment descrit anteriorment:

1. Primer ens fixem en les combinacions de valors que fan que la funció valgui 0:
   - *a* = 0, *b* = 0 i *c* = 1
   - *a* = 0, *b* = 1 i *c* = 0
   - *a* = 1, *b* = 0 i *c* = 0
   - *a* = 1, *b* = 1 i *c* = 0
   - *a* = 1, *b* = 1 i *c* = 1
2. Per a cadascuna d'aquestes cinc combinacions trobarem un **maxterm** o terme producte.
3. Els *maxterms* que corresponen a cada combinació són els següents:
   - A la combinació *a* = 0, *b* = 0 i *c* = 1 li correspon $a + b + \overline{c}$
   - A la combinació *a* = 0, *b* = 1 i *c* = 0 li correspon $a + \overline{b} + c$

- A la combinació $a = 1$, $b = 0$ i $c = 0$ li correspon $\overline{a} + b + c$
- A la combinació $a = 1$, $b = 1$ i $c = 0$ li correspon $\overline{a} + \overline{b} + c$
- A la combinació $a = 1$, $b = 1$ i $c = 1$ li correspon $\overline{a} + \overline{b} + \overline{c}$

4. Finalment, només cal fer el producte lògic dels cinc maxterms per obtenir la segona forma canònica de la funció:

$$f = (a + b + \overline{c}) \cdot (a + \overline{b} + c) \cdot (\overline{a} + b + c) \cdot (\overline{a} + \overline{b} + c) \cdot (\overline{a} + \overline{b} + \overline{c})$$

Les portes lògiques...

... són per als sistemes digitals com els maons per a l'arquitectura: malgrat la seva senzillesa, ens permeten construir estructures molt complexes.

1.6.5 Portes lògiques bàsiques

Fins i tot els sistemes digitals més complexos estan formats per blocs més petits encarregats de fer operacions senzilles amb senyals binaris. Aquests blocs fonamentals són el que coneixem com a **portes lògiques.**

Símbols de les portes

Les portes lògiques més importants disposen de símbols gràfics especials que les representen. Hi ha dues maneres de representar cada porta. Les normes que regulen aquestes dues simbologies són les següents:

- La norma IEEE 91-1973, que va ser la primera i més popular.
- La norma IEEE 91-1984, que és més recent i proporciona informació més precisa, encara que no s'utilitza tan sovint.

Cada porta lògica fa una funció determinada; de totes les possibles funcions existents, les **portes lògiques bàsiques** són aquelles que es constitueixen com a bons elements de disseny de propòsit general. Les portes lògiques bàsiques són la porta AND, la porta OR , la porta NOT, la porta NAND i la porta NOR.

Porta AND

La porta AND fa la funció de producte lògic i rep el nom de la paraula anglesa **and**, que significa *i* en català.

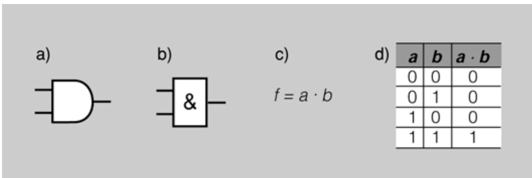
Consulteu la simulació de porta AND que teniu disponible als Annexos del web.

La sortida d'una porta AND és 1 només si totes les variables d'entrada són 1.

La figura 1.1 mostra el símbols d'una porta AND de dues entrades, però els mateixos símbols serveixen per a un nombre d'entrades més gran, només cal afegir les connexions d'entrada necessàries al símbol.

IEEE és la sigla en anglès de l'Institut d'Enginyers en Electricitat i Electrònica. En català s'acostuma a pronunciar com al E cub.

FIGURA 1.1. Porta AND de dues entrades/a) símbol IEEE 91-1973; b) símbol IEEE 91-1984; c) expressió algebraica; d) taula de veritat

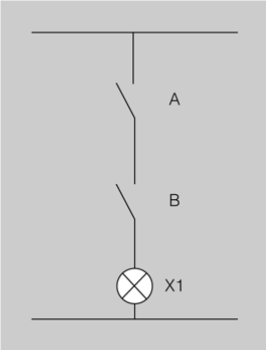


a	b	$a \cdot b$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

La funció que realitza la porta AND és anàloga a la funció que realitzen dos interruptors en sèrie.

Com podeu veure en la figura 1.2, la làmpada X1 tan sols s'encén (és a dir, la sortida es posa a estat 1 lògic) quan els interruptors A i B estan tancats (és a dir, quan les dues entrades estan a 1 lògic).

Figura 1.2. Porta AND a partir de dos interruptors en sèrie



Consulteu la simulació de porta OR que teniu disponible als Annexos del web.

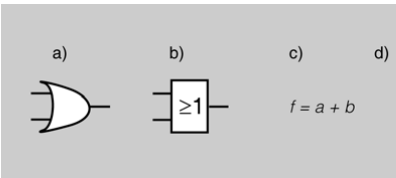
Porta OR

La porta OR realitza la funció suma lògica i rep el nom de la paraula anglesa **or**, que significa *o* en català.

La sortida d'una porta OR és 1 si, com a mínim, una variable d'entrada és 1.

La figura 1.3 mostra el símbols d'una porta OR de dues entrades, la seva expressió algebraica i la seva taula de veritat.

Figura 1.3. Porta OR de dues entrades/a) símbol IEEE 91-1973; b) símbol IEEE 91-1984; c) expressió algebraica; d) taula de veritat

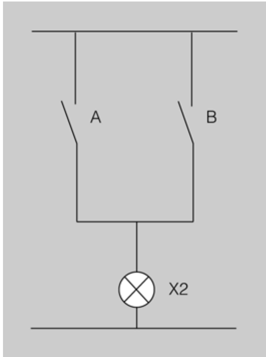


a	b	a + b
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

La funció que realitza la porta OR és anàloga a la funció que realitzen dos interruptors en paral·lel.

Com podeu veure en la figura 1.4, la làmpada X2 s'encén (és a dir, la sortida es posa a estat 1 lògic) quan, com a mínim, un dels dos interruptors A i B està tancat.

Figura 1.4. Porta OR a partir de dos interruptors en paral·lel



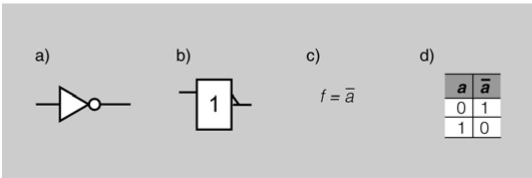
Consulteu la simulació de porta NOT que teniu disponible als Annexos del web.

Porta NOT

Aquesta porta, també coneguda com a **inversor**, només té una entrada i realitza la funció de negació, de manera que la sortida és 1 si l'entrada és 0 i la sortida és 0 si l'entrada és 1.

La figura 1.5 mostra els símbols d'una porta NOT, la seva expressió algebraica i la seva taula de veritat.

Figura 1.5. Porta NOT o inversor/a) símbol IEEE 91-1973; b) símbol IEEE 91-1984; c) expressió algebraica; d) taula de veritat



Consulteu la simulació de porta NAND que teniu disponible als Annexos del web.

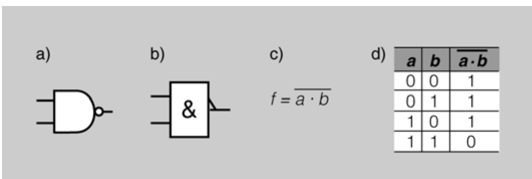
Porta NAND

El nom d'aquesta porta prové de la unió de les paraules angleses notiand i, com el seu nom indica, és una porta AND amb la sortida invertida.

> La sortida d'una porta NAND és 0 només si totes les variables d'entrada són 1.

La figura 1.6 mostra els símbols d'una porta NAND, la seva expressió algebraica i la seva taula de veritat.

Figura 1.6. Porta NAND de dues entrades/a) símbol IEEE 91-1973; b) símbol IEEE 91-1984; c) expressió algebraica; d) taula de veritat



Porta NOR

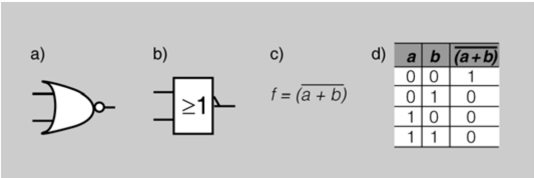
Consulteu la simulació de porta NOR que teniu disponible als Annexos del web.

La sortida d'una porta NOR és la invertida d'una porta OR. El seu nom prové de la unió de les paraules angleses noti or.

La sortida d'una porta NOR és 1 només si totes les variables d'entrada són 0.

La figura 1.7 mostra els símbols d'una porta NOR, la seva expressió algebraica i la seva taula de veritat.

Figura 1.7. Porta NOR de dues entrades/a) símbol IEEE 91-1973; b) símbol IEEE 91-1984; c) expressió algebraica; d) taula de veritat



a	b	$\overline{(a+b)}$
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

Consulteu les simulacions de portes XOR i NXOR (NOT XOR) que teniu disponibles als Annexos del web.

Als Annexos del web teniu disponible un exemple complet de disseny d'un circuit amb portes lògiques, que inclou els arxius de simulació.

Als Annexos del web teniu disponible un breu tutorial per iniciar-vos en l'ús del NI Curcuit Design Suite en l'àmbit de l'electrònica digital.

Porta XOR

També anomenada **porta OR-exclusiva**. La seva sortida és 1 només quan les dues variables d'entrada tenen valors diferents.

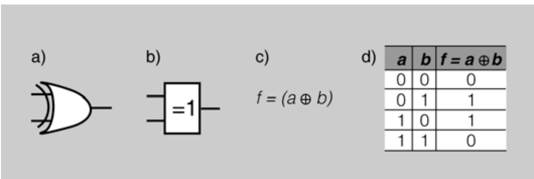
L'operador XOR en les expressions algebraiques és el símbol $\oplus$, un signe de suma encerclat.

En el cas de tenir més de dues entrades, podeu recordar com funciona una porta XOR si recordeu el següent:

La sortida d'una porta XOR és 1 només si hi ha un nombre senar d'entrades a 1.

La figura 14 mostra els símbols d'una porta XOR, la seva expressió algebraica i la seva taula de veritat.

Figura 1.8. Porta XOR de dues entrades/a) símbol IEEE 91-1973; b) símbol IEEE 91-1984; c) expressió algebraica; d) taula de veritat



a	b	$f = a \oplus b$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

1.6.6 Simplificació de funcions lògiques amb mapes de Karnaugh

Per a qualsevol aplicació que ens plantegem, és evident que l'obtenció de la funció més curta possible té grans avantatges:

- Circuits més petits i ràpids
- Preu més reduït

Una de les eines més senzilles per obtenir una funció simplificada a partir d'una taula de veritat és l'anomenada **mapa de Karnaugh**, que consisteix en un mètode gràfic.

Partint de la taula de veritat d'una funció digital d'**entre dues i quatre variables**, el mètode consisteix en reescriure aquella taula de veritat seguint unes indicacions concretes. Això ens donarà el punt de partida per realitzar la simplificació.

Un mapa de Karnaugh és una representació gràfica d'una taula de veritat.

Construcció d'un mapa de Karnaugh

De la mateixa manera que una taula de veritat té un nombre 2^n de resultats possibles per a n variables, el mapa de Karnaugh resultant tindrá el mateix nombre de caselles.

Una taula de veritat de **dues** entrades té 2^2 = 4 resultats possibles. Una taula de veritat de **tres** entrades té 2^3 = 8 resultats possibles. Una taula de veritat de **quatre** entrades té 2^4 = 16 resultats possibles.

A l'interior de les caselles haurem de posar el valor de la sortida corresponent a cadascuna de les combinacions dels valors de les entrades. Aquests valors poden ser:

- 0: **zero** lògic.
- 1: **u** lògic.
- X: **indiferent**, podrem prendre'l com a 0 o com a 1 segons ens interessi.

Termes indiferents en una funció digital

En un sistema digital real, els valors *indiferents* de la sortida apareixen, en general, quan és impossible que la combinació d'entrades corresponent es produeixi. De cara al càlcul, podem considerar que **ens és igual si val 0 o val 1**.

Mapa de Karnaugh amb zeros o amb uns?

La idea general seria treballar amb el resultat més abundant de la taula. En aquest text no ens n'ocuparem, però si treballéssim amb els zeros obtindríem una funció simplificada de termes de tipus *maxterms* (producte de termes suma) i treballant amb els uns obtindríem una funció simplificada de termes de tipus *minterms* (suma de termes producte).

Al mapa de Karnaugh només hi hem de posar un dels resultats: o bé posem els uns (1) o bé els zeros (0). Al nostre nivell, nosaltres només treballarem amb els uns (1). Així, **ignorarem els zeros**.

Els resultats indiferents (X) de la funció s'han de posar **sempre** al mapa de Karnaugh

Aquesta manera de representar la taula de veritat ens servirà per detectar aquells termes de la funció canònica que estan generats per combinacions de les entrades entre les quals només canvia un dígit. Dit així, sembla complicat, però com és un mètode gràfic, no ho és pas.

Construcció d'un mapa de Karnaugh per a una funció de 2 variables

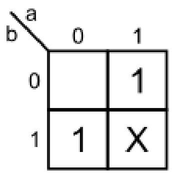
Imaginem una taula de veritat d'una funció de 2 variables *a*, *b*, i una sortida *x*:

Taula 1.16. Taula de veritat de 2 variables

a	b	x
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	X

En aquest cas, el mapa serà una taula amb els valors possibles d'*a* i de *b* a cadascun dels eixos:

Figura 1.9. Mapa de Karnaugh de 2 variables



Noteu que hi hem copiat els valors corresponents de la sortida (només els 1) per a cadascuna de les combinacions.

Construcció d'un mapa de Karnaugh per a una funció de 3 variables

Imaginem una taula de veritat d'una funció de 3 variables *a*, *b*, *c*, i una sortida *x*:

Taula 1.17. Taula de veritat de 3 variables

a	b	c	x
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	X
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	1
1	1	1	1

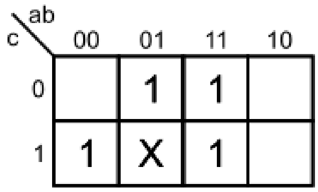
En aquest cas, el mapa serà una taula amb els valors possibles d'*a*, de *b* i de *c* a cadascun dels eixos. En un dels eixos hi hauran d'aparèixer dues d'elles, i el més important és que passarem d'una casella a l'adjacent' **només canviant el valor d'una sola variable**.

Vegeu com, en la figura següent, hem posat a l'eix horitzontal la combinació *ab*, amb els valors possibles **exactament** en el següent ordre:

1. 00
2. 01
3. 11
4. 10

No segueixen l'ordre *natural* que seria 0, 1, 2, 3 (00-01-10-11), sinó que estan ordenats de forma que d'un terme al següent només canvia un dígit, **i a més, també canvia un sol dígit entre el darrer i el primer**.

FIGURA 1.10. Mapa de Karnaugh de 3 variables



Noteu que hi hem copiat els valors corresponents de la sortida (només els 1) per a cadascuna de les combinacions.

Construcció d'un mapa de Karnaugh per a una funció de 4 variables

Imaginem una taula de veritat d'una funció de 4 variables *a*, *b*, *c*, *d*, i una sortida *x*:

TAULA 1.18. Taula de veritat de 4 variables

a	b	c	d	x
0	0	0	0	0
0	0	0	1	1
0	0	1	0	1
0	0	1	1	X
0	1	0	0	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	1
0	1	1	1	1
1	0	0	0	1
1	0	0	1	X
1	0	1	0	1
1	0	1	1	0
1	1	0	0	1
1	1	0	1	0
1	1	1	0	1
1	1	1	1	0

En aquest cas, el mapa serà una taula amb els valors possibles d'*a*, de *b*, de *c* i de *d* a cadascun dels eixos. Als dos eixos hi hauran d'aparèixer dues d'elles, i el més important és que passarem d'una casella a l'adjacent' **només canviant el valor d'una sola variable**.

Vegeu com, en la figura següent, hem posat a l'eix horitzontal la combinació *ab* i a l'eix vertical *cd*, igualment amb els valors possibles **exactament** en el següent ordre:

1. 00
2. 01
3. 11
4. 10

No segueixen l'ordre *natural* que seria 0, 1, 2, 3 (00-01-10-11), sinó que estan ordenats de forma que d'un terme al següent només canvia un dígit, **i a més, també canvia un sol dígit entre el darrer i el primer**.

Figura 1.11. Mapa de Karnaugh de 4 variables

cd \ ab	00	01	11	10
00			1	1
01	1			X
11	X	1		
10	1	1	1	1

Noteu que hi hem posat els valors corresponents de la sortida (només els 1) per a cadascuna de les combinacions.

Simplificació del mapa de Karnaugh (mètode) a partir dels 1 de la funció

Per fer la simplificació de la funció digital, el primer que hem de fer és **triar amb quin resultat (0 o 1) treballarem**. en el nostre cas, per fer-ho més fàcil, **sempre** treballarem amb els uns (1) de la funció.

Prenent com a punt de partida el mapa emplenat amb els uns (1) i els indiferents (X), **la simplificació consisteix en fer agrupacions tot seguint les set regles** que descrivim tot seguit.

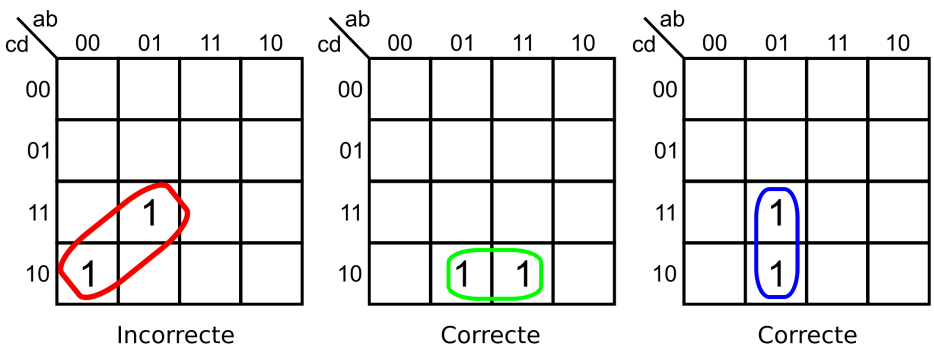
Consideració important: a l'hora d'agrupar els 1, considerarem que les **X** són 1 o 0 lliurement, segons ens interessi en cada moment.

Regla 1

Un element es pot agrupar amb d'altres elements amb els quals estigui en contacte directe als costats, a dalt o a sota, **en horitzontal o en vertical**. Mai en diagonal.

Així, vegeu a la figura 1.12 possibles agrupacions correctes i incorrectes.

Figura 1.12. Regla 1: agrupacions correctes i incorrectes

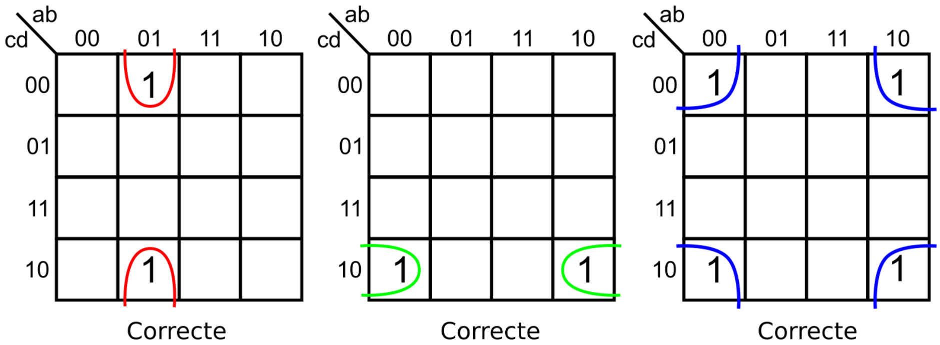


Regla 2

Al mapa de Karnaugh **els extrems es toquen**, tant per les bandes laterals com per dalt i per baix.

Així, les agrupacions mostrades en la figura 1.13 seran totes correctes.

FIGURA 1.13. Regla 2: agrupacions fent servir les vores del mapa

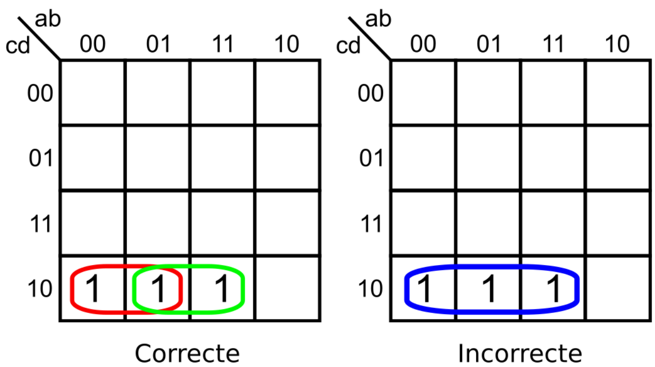


Regla 3

Els grups poden tenir un **nombre d'elements que sigui potència de 2**. Així, els grups podran tenir **1, 2, 4 o 8 elements** (**mai 3 o 6**, que són els errors típics).

D'aquesta manera, vegeu a la figura 1.14 possibles agrupacions correctes i incorrectes.

FIGURA 1.14. Regla 3: grups d'1, 2, 4 o 8 elements

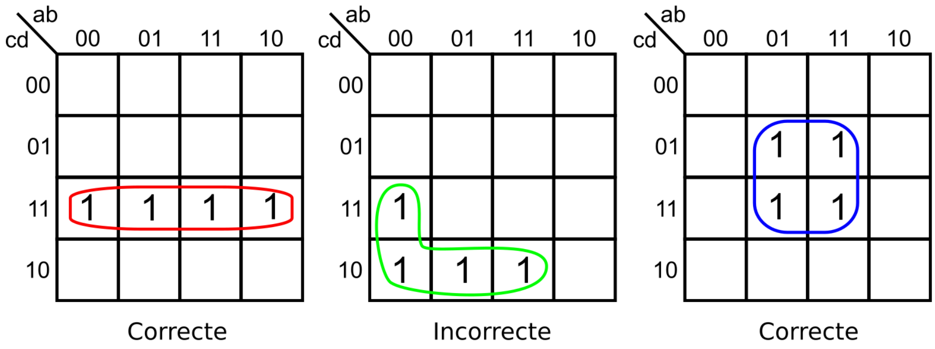


Regla 4

Els grups han de tenir una **forma compacta**: poden ser quadrats o rectangulars. **Mai podran tenir forma de L o similar**.

D'aquesta manera, vegeu a la figura 1.15 possibles agrupacions correctes i incorrectes.

Figura 1.15. Regla 4: grups compactes

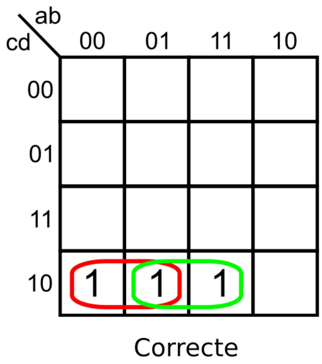


Regla 5

Els grups **es poden superposar entre ells**. Això vol dir que **un 1 pot pertànyer perfectament a més d'un grup**.

Les agrupacions de la figura 1.16 són completament correctes.

Figura 1.16. Regla 5: grups solapables



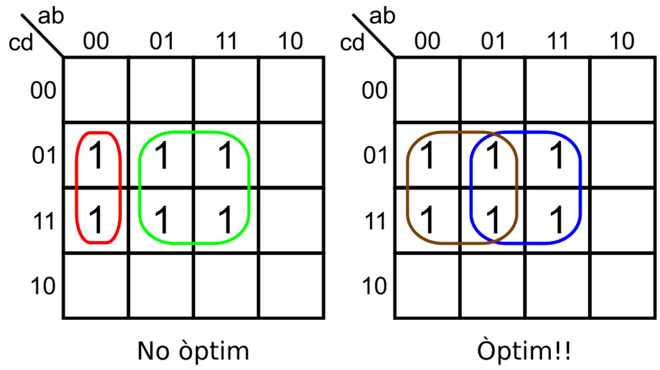
Regla 6

Els grups han de ser **tan extensos com sigui possible**. No importa si per a això s'han de superposar. Millor dos grups de 4 que se superposin que no pas un de 4 amb un de 2 al costat.

> Utilitzarem les X del mapa de Karnaugh per aconseguir crear grups els més grans possible, considerant-les 1 o 0 si ens interessa.

Així, davant de les dues propostes de solució mostrades en la figura 1.17, hi ha una que és òptima i l'altra, essent correcta (el circuit funcionaria), no és la millor solució possible.

FIGURA 1.17. Regla 6: grups el més grans possible



Regla 7

Tots els uns del mapa han de pertànyer a algun grup. **No pot quedar cap 1 sense agrupar**. Les X sí que poden intervenir en la formació dels grups o no, segons les nostres necessitats.

Obtenció de la funció òptima de sortida (mètode)

La solució òptima serà aquella que presenti **el mínim nombre de grups possible que esdevinguin tan extensos com sigui possible**.

Si es miren les files i columnes a què afecta un grup del mapa es pot veure si les variables (a, b, c, d en el nostre cas) tenen un valor fix o si canvien de valor.

Cada grup del mapa generarà un terme de la funció simplificada, en forma de producte de les variables que hi apareguin. La funció final serà la suma d'aquests termes.

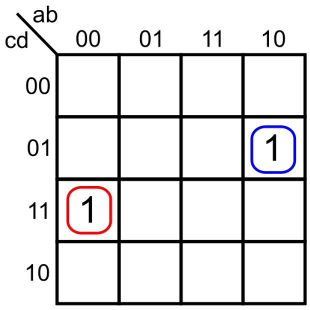
La forma de construir un terme a partir d'un grup és la següent:

1. Mireu **en tota l'extensió del grup**, variable per variable, quines variables tenen valor fix i quines canvien de valor.
2. El contingut del terme es farà en funció de:
   - Variables que canvien de valor: **no apareixen** al terme
   - Variables que valen 0 fix: **apareixen negades** (ex: $\overline{a}$) al terme
   - Variables que valen 1 fix: **apareixen directes** (ex: a) al terme

Cada terme consistirà en el producte de les variables que han d'aparèixer, directes o negades segons el cas.

Exemple de generació de termes de grups d'un element

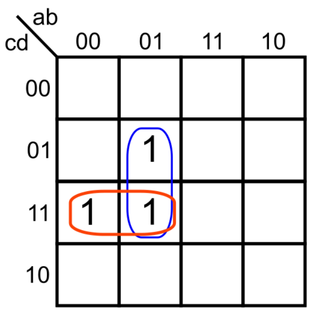
Figura 1.18. Grups d'un sol element



- Grup de l'esquerra (totes fixes): *a* = 0, *b* = 0, *c* = 1, *d* = 1 $\rightarrow \overline{a} \cdot \overline{b} \cdot c \cdot d$
- Grup de la dreta (totes fixes): *a* = 1, *b* = 0, *c* = 0, *d* = 1 $\rightarrow a \cdot \overline{b} \cdot \overline{c} \cdot d$

Exemple de generació de termes de grups de dos elements

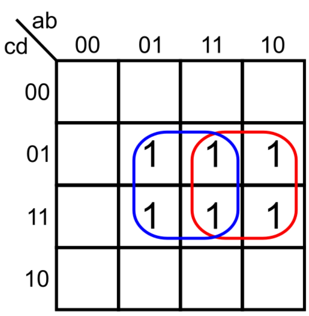
Figura 1.19. Grups de dos elements



- Grup horitzontal (*b* canvia de valor): *a* = 0, *b* = 0/1, *c* = 1, *d* = 1 $\rightarrow \overline{a} \cdot c \cdot d$
- Grup vertical (*c* canvia de valor): *a* = 0, *b* = 1, *c* = 0/1, *d* = 1 $\rightarrow \overline{a} \cdot b \cdot d$

Exemple de generació de termes de grups de quatre elements

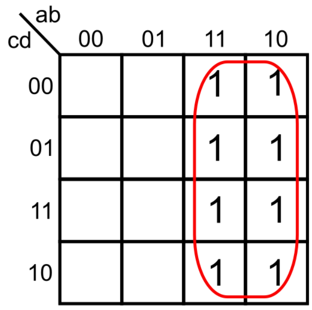
Figura 1.20. Grups de quatre elements



- Grup de l'esquerra (*a* i *d* canvien de valor): *a* = 0/1, *b* = 1, *c* = 0/1, *d* = 1 $\rightarrow b \cdot d$
- Grup de la dreta (*b* i *c* canvien de valor): *a* = 1, *b* = 1/0, *c* = 0/1, *d* = 1 $\rightarrow a \cdot d$

Exemple de generació de termes de grups de vuit elements

Figura 1.21. Grups de vuit elements



- Grup (b, c i d canvien de valor): a = 1, b = 1/0, c = 0/0/1/1 , d = 0/1/1/0 $\rightarrow a$

Exemple pràctic complet de mapa de Karnaugh

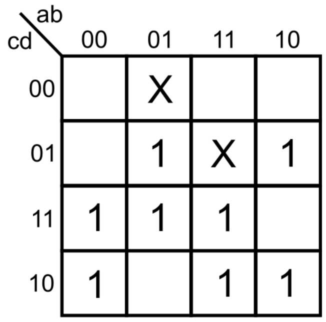
Sigui la taula de veritat (quatre variables a, b, c, d; una sortida f) mostrada a la taula 1.19.

Taula 1.19. Taula de veritat de quatre variables

a	b	c	d	f
0	0	0	0	**0**
0	0	0	1	**0**
0	0	1	0	**1**
0	0	1	1	**1**
0	1	0	0	**X**
0	1	0	1	**1**
0	1	1	0	**0**
0	1	1	1	**1**
1	0	0	0	**0**
1	0	0	1	**1**
1	0	1	0	**1**
1	0	1	1	**0**
1	1	0	0	**0**
1	1	0	1	**X**
1	1	1	0	**1**
1	1	1	1	**1**

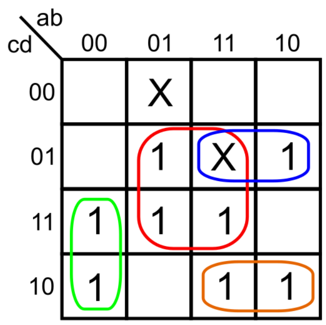
Construïm primer el mapa de Karnaugh resultant de la taula de veritat, que serà el mostrat a la figura 1.22.

Figura 1.22. Mapa de Karnaugh resultant



A continuació fem les agrupacions tot seguint les set regles anteriors. El resultat serà el que es mostra a la figura 1.23.

Figura 1.23. Agrupacions al mapa de Karnaugh resultant



Noteu que per tal de crear grups més grans hem aprofitat una de les X i l'altra no ha calgut.

Els termes seran:

- Grup de 2 vertical: $a = 0$, $b = 0$, $c = 1$, $d = 1/0 \rightarrow \overline{a} \cdot \overline{b} \cdot c$
- Grup de 4: $a = 0/1$, $b = 1$, $c = 0/1$, $d = 1 \rightarrow b \cdot d$
- Grup de 2 horitzontal dalt: $a = 1$, $b = 1/0$, $c = 0$, $d = 1 \rightarrow a \cdot \overline{c} \cdot d$
- Grup de 2 horitzontal baix: $a = 1$, $b = 1/0$, $c = 1$, $d = 0 \rightarrow a \cdot c \cdot \overline{d}$

La funció òptima de sortida serà:

$$f = \overline{a} \cdot \overline{b} \cdot c + b \cdot d + a \cdot \overline{c} \cdot d + a \cdot c \cdot \overline{d}$$

Com expressar la funció resultant amb només un tipus d'operació lògica

L'única manera posterior de millorar aquesta funció seria expressar-la fent servir un únic tipus de porta (NAND, per exemple). Això ho podríem fer aplicant el teorema de DeMorgan a aquest funció que hem obtingut, convertint les sumes en productes negats.

Ara no ens aturarem a descriure de nou aquest procediment, descrit amb anterioritat, però almenys sapigueu que és un pas posterior que **sempre** podríeu aplicar.

2. Circuits combinacionals i seqüencials

Les portes lògiques donen solució a problemes que es plantegen en la vida quotidiana. Darrere de fets tan comuns com la utilització d'una calculadora, el control dels semàfors dels carrers, o fins i tot l'ús dels ordinadors trobem l'electrònica digital i les portes lògiques.

A mesura que els problemes són més complexos, també ho són els circuits per resoldre'ls. D'altra banda hi ha determinats processos que es donen de manera molt freqüent i que, per tant, es poden estandarditzar i tractar com un sol bloc.

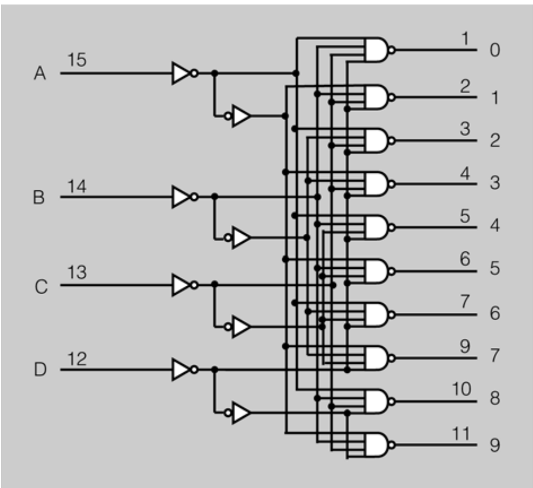
Posem un exemple. Si una fàbrica ha de fer caragols d'unes determinades característiques, amb tota seguretat en comptes de fer-los un per un, de manera artesana, farà un motlle perquè surtin tots iguals.

Bé, doncs, en l'electrònica digital combinacional, i també en la seqüencial, el que es fa és desenvolupar blocs integrats que donen solucions a problemes concrets, sense haver de preocupar-nos de les portes que hi ha a dins i de com es troben interconnectades entre elles.

L'avenç progressiu de les tècniques d'integració ha permès la realització, en un circuit integrat, de sistemes combinacionals i seqüencials complexos formats per un gran nombre de portes lògiques. Aquesta integració redueix el nombre d'elements necessaris, ja que permet la combinació de diferents tipus de portes en un mateix bloc integrat, disminueix el temps de disseny i el nombre de connexions.

En la figura 2.1 es mostra un exemple de circuit combinacional, amb quatre entrades i deu sortides.

FIGURA 2.1. Exemple de circuit combinacional



Els **circuits combinacionals** són blocs formats per portes lògiques bàsiques (NOT, AND, OR, NAND, NOR, OR-exclusiva i NOR-exclusiva) que tenen diferents entrades i sortides, i en els quals els valors de la sortida o de les sortides dependran exclusivament del valor de les entrades en aquell instant.

Els blocs integrats combinacionals donen resposta a aplicacions de caire general, com ara codificadors, descodificadors, multiplexors, desmultiplexors, comparadors, etc.

Els **circuits seqüencials** són blocs formats per portes lògiques bàsiques que tenen diferents entrades i sortides, i en els quals els valors dels senyals de sortida no depenen solament dels valors dels senyals d'entrada, sinó també dels valors que les mateixes sortides tenien abans.

Els principals circuits seqüencials són els registres, els comptadors i els registres de desplaçament.

2.1 Multiplexors i desmultiplexors

L'enviament d'informació mitjançant senyals elèctrics d'un lloc a un altre es pot fer utilitzant una o diverses línies. Quan s'envia amb una sola línia estem parlant d'una transmissió en sèrie i quan es fa utilitzant diverses línies parlem d'una transmissió en paral·lel.

Si heu d'enviar una informació d'un byte i disposeu de vuit línies (cables de connexió) per a cada unitat de temps, podreu enviar un byte sencer. Si aquest mateix byte s'envia per una sola línia necessitareu 8 unitats de temps, ja que en aquest cas heu d'enviar un bit darrere l'altre, però necessitareu només un cable per connectar els dos llocs.

Per tant, el sistema que caldrà utilitzar dependrà d'aspectes econòmics, de la distància entre els llocs que volem comunicar i de la velocitat de transmissió de les dades. Aquesta necessitat de passar de diverses línies a una de sola (de paral·lel a sèrie) i a l'inrevés (de sèrie a paral·lel) porta a la multiplexació i a la desmultiplexació, respectivament.

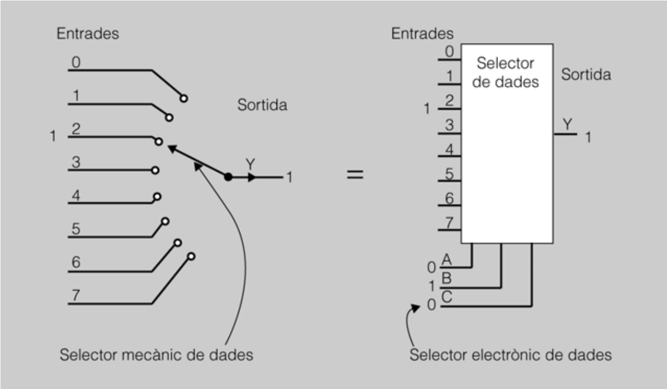
2.1.1 Multiplexors

El **multiplexor** és un sistema digital que disposa de N entrades d'informació i una única sortida. Mitjançant unes entrades de control, selecciona internament una de les entrades d'informació i la connecta a l'única sortida.

En la figura 2.2 es pot veure com l'entrada de selecció és l'encarregada de connectar, en aquest cas, l'entrada corresponent al 2 amb la sortida Y. Gràficament es pot veure com l'entrada d'informació és en paral·lel i la sortida és en sèrie, només d'una línia.

Fixeu-vos com amb les entrades de control ABC (010 = 2) seleccionem l'entrada de dades 2, i com internament el que es fa és un pont entre aquesta entrada i la sortida (Y). Com que el nivell a l'entrada 2 és 1 (nivell alt), a la sortida trobem aquest nivell 1.

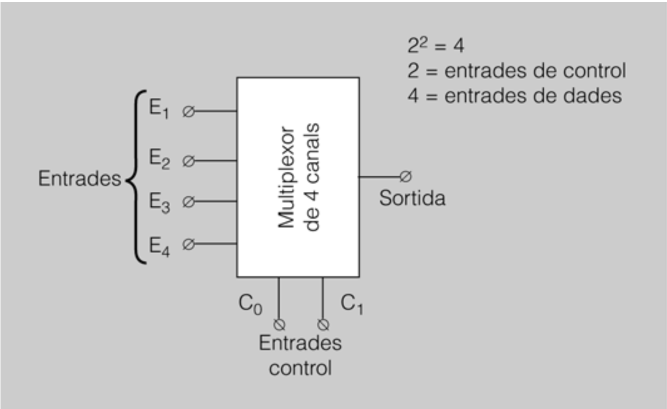
FIGURA 2.2. Simplificació del funcionament d'un multiplexor



> Als multiplexors s'ha de complir que les entrades d'informació N siguin igual a 2^M, essent M el nombre d'entrades de control.

En la figura 2.3, podeu observar com les entrades per multiplexar poden ser com a màxim 4 si el nombre de línies de control és 2.

FIGURA 2.3. Relació entre entrades d'informació i de control a un MUX de quatre línies



Circuit integrat 74151

El circuit integrat comercial 74151 és un petit xip de setze pius que implementa la funció de multiplexor de vuit línies.

En la taula 2.1 es mostra com funciona el multiplexor de quatre línies: si les entrades de selecció prenen el valor 00, a la sortida apareix el senyal de l'entrada E_1. Si les entrades de selecció prenen el valor 01, a la sortida apareix el senyal de l'entrada E_2. Si les entrades de selecció prenen el valor 10, a la sortida apareix el senyal de l'entrada E_3. I, finalment, si les entrades de selecció prenen el valor 11, a la sortida apareix el senyal de l'entrada E_4.

> Als Annexos del web hi trobareu un arxiu amb la simulació del multiplexor comercial 74151.

Taula 2.1. Selecció de la sortida a un multiplexor de quatre línies

C_1	C_0	S
0	0	E_1
0	1	E_2
1	0	E_3
1	1	E_4

2.1.2 Desmultiplexors

El desmultiplexor és un sistema digital que disposa d'una sola entrada d'informació i *N* sortides. Mitjançant unes entrades de control, selecciona internament una de les sortides d'informació i la connecta a l'única entrada.

Com podeu comprovar, el seu funcionament és a l'inrevés que el multiplexor. Gràficament ho podeu acabar de veure a la figura 2.4 i figura 2.5.

Figura 2.4. Desmultiplexor mecànic de quatre línies

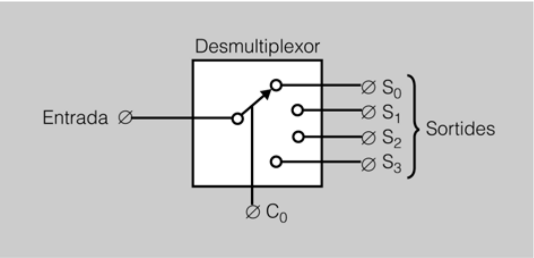
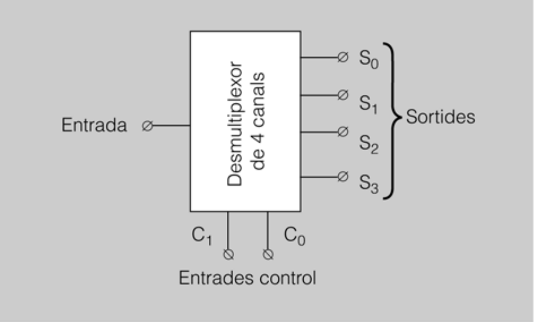


Figura 2.5. Desmultiplexor digital de quatre línies



Circuit integrat 74155

El circuit integrat comercial 74155 és un petit xip de setze pius que implementa la funció de desmultiplexor d'una a vuit línies.

Als Annexos del web hi trobareu un arxiu amb la simulació del desmultiplexor comercial 74155.

Als desmultiplexors s'ha de complir que les sortides d'informació *N* siguin igual a 2^M, essent *M* el nombre d'entrades de control.

La taula 2.2 és la taula de funcionament corresponent al desmultiplexor de quatre línies de la figura 2.5. Com podeu observar en la taula, la dada de l'entrada (1 o 0) apareixerà a la sortida seleccionada amb les línies de control C_1 i C_0.

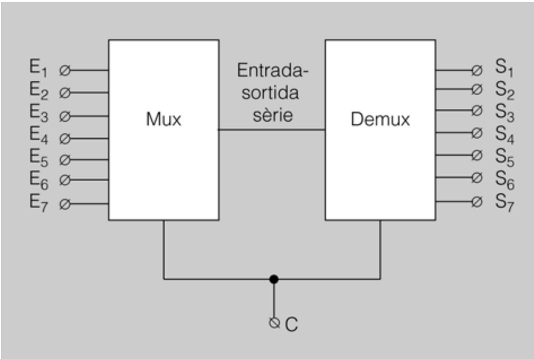
Taula 2.2. Taula de veritat d'un desmultiplexor digital de quatre línies

C_1	C_0	Entrada	S_3	S_2	S_1	S_0
0	0	E	0	0	0	E
0	1	E	0	0	E	0
1	0	E	0	E	0	0
1	1	E	E	0	0	0

2.1.3 Connexió multiplexor-desmultiplexor

En la figura 2.6 podeu veure l'aplicació del multiplexor (*Mux*) i desmultiplexor (*Demux*) per fer una transmissió de dades. El primer converteix la informació de paral·lel a sèrie; d'aquesta manera, la informació és enviada només amb una línia. La informació, quan arriba al desmultiplexor, es converteix de sèrie a paral·lel per tornar a tenir la informació original.

Figura 2.6. Connexió multiplexor-desmultiplexor



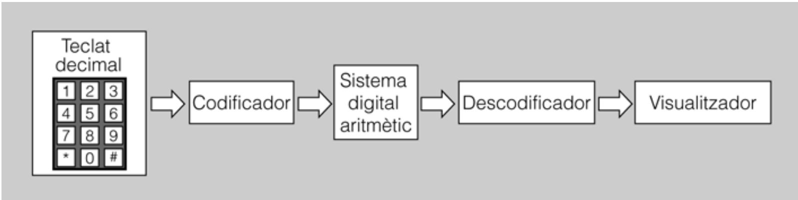
Fixeu-vos com tots dos elements estan connectats per un senyal de control. Aquest té la missió de sincronitzar els dos dispositius. Posarem un exemple. Quan el multiplexor està seleccionant l'entrada E_2, el desmultiplexor ha d'estar seleccionant la sortida S_2; quan el multiplexor selecciona l'entrada E_3, el desmultiplexor ha de seleccionar la sortida S_3, etc. És la manera perquè la informació a la sortida sigui la mateixa que a l'entrada.

2.2 Descodificadors i codificadors

Per una banda, els sistemes digitals només treballen amb els bits 1 i 0 i, per l'altra, a les persones ens és difícil interpretar grans combinacions d'uns i zeros. Per donar resposta a aquesta situació, s'utilitzen els convertidors de codi, encarregats de traduir el nostre codi al llenguatge que entén el sistema digital. Si agafem com a exemple una calculadora, podem distingir tres grans blocs (figura 2.7):

1. Un bloc codificador, on es produeix una codificació o conversió del codi decimal (teclat) a un codi binari (1 i 0).
2. El sistema encarregat de fer les operacions que només interpreta bits 1 i 0.
3. Un bloc descodificador que tradueix el resultat de l'operació, en binari, a un llenguatge que podem interpretar, en decimal.

Figura 2.7. Diagrama de blocs del funcionament intern d'una calculadora



Traducció

Els codificadors tradueixen el llenguatge que nosaltres utilitzem al codi que entén el sistema digital. Els descodificadors tradueixen el llenguatge que utilitza el sistema digital a un llenguatge que nosaltres entenem.

Els codificadors són sistemes combinacionals que s'encarreguen de transformar una sèrie de senyals sense codificar en un conjunt de senyals codificats.

Els descodificadors són circuits integrats digitals que fan la conversió d'un codi binari, normalment el BCD, en una forma sense codificar.

2.2.1 Descodificadors

Els descodificadors tradueixen el llenguatge que utilitza el sistema digital a un llenguatge que nosaltres puguem entendre.

Els **descodificadors** són circuits combinacionals que si tenen n nombre d'entrades poden presentar fins a 2^n nombre de sortides.

Taula 2.3. Taula de veritat d'un descodificador de dues entrades

Entrades		Sortides			
A	B	Q_3	Q_2	Q_1	Q_0
0	0	0	0	0	1
0	1	0	0	1	0
1	0	0	1	0	0
1	1	1	0	0	0

Descodificador de dues entrades

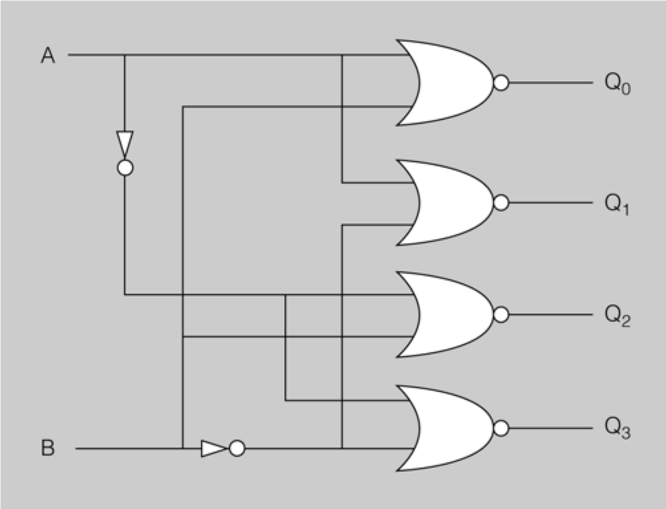
Un descodificador de dues entrades té les següents característiques:

- Nombre d'entrades: $n = 2$
- Nombre de sortides: $N = 2^n = 4$

En la taula 2.3 es mostra la taula de veritat d'aquest circuit. El seu funcionament és molt senzill: per a cada combinació binària de les entrades, es posa a 1 la sortida corresponent.

En la figura 2.8 es mostra el circuit amb portes lògiques que implementa la funció de descodificador de dues entrades.

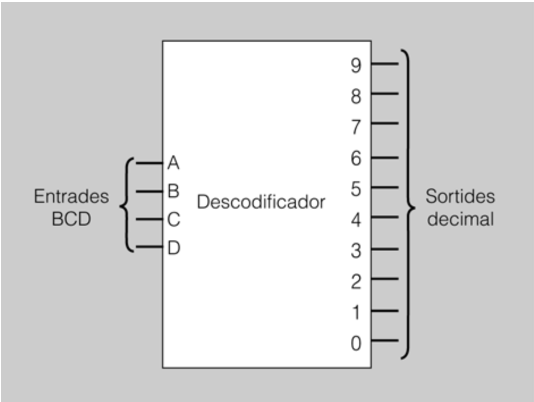
Figura 2.8. Circuit amb portes lògiques que fa la funció de descodificador de dues entrades



Descodificadors BCD/decimal

Els descodificadors que més s'utilitzen són els **descodificadors BCD/decimal**. En la figura 2.9 es mostra un diagrama d'aquests circuits.

Figura 2.9. Descodificador BCD-decimal



Els descodificadors tenen quatre línies d'entrada que formen un codi BCD. A la sortida tenen deu línies, de manera que es posa a 1 la sortida que correspon al nombre decimal representat a l'entrada, mentre que les altres sortides es mantenen a 0.

En la taula 2.4 es mostra la taula de veritat del descodificador BCD/decimal.

Circuit integrat 7442

El circuit integrat comercial 7442 és un petit xip de catorze pius que implementa la funció de descodificador BCD/decimal.

Als Annexos del web hi trobareu un arxiu amb la simulació del descodificador BCD/decimal comercial 7442.

Taula 2.4. Taula de veritat d'un descodificador BCD/decimal

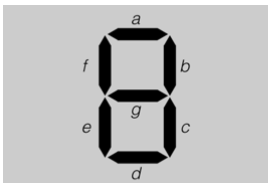
Entrades				**Sortides**									
A	**B**	**C**	**D**	**Q_9**	**Q_8**	**Q_7**	**Q_6**	**Q_5**	**Q_4**	**Q_3**	**Q_2**	**Q_1**	**Q_0**
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Descodificadors BCD/set segments

Per veure el funcionament d'aquest tipus de circuit, abans cal fer esment dels dispositius visualitzadors de set segments.

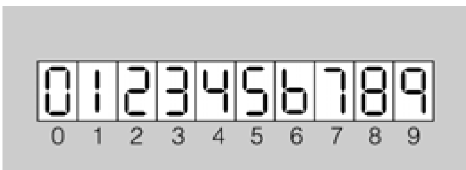
Els visualitzadors de set segments, que podeu veure en la figura 2.10, s'utilitzen per visualitzar nombres decimals. Els set segments s'identifiquen amb les lletres *a, b, c, d, e, f* i*g*.

Figura 2.10. Visualitzador de set segments



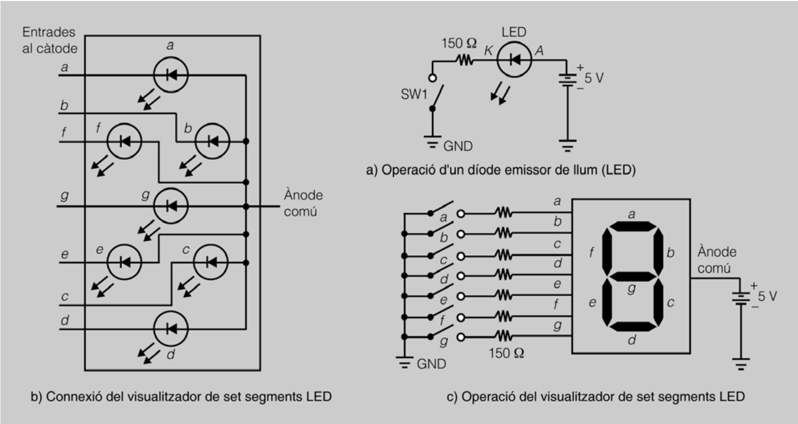
En la figura 2.11 podeu observar com s'aconsegueix la visualització dels deu dígits decimals (del 0 al 9). Per exemple, si s'activen tots menys el segment *g* es visualitza el zero. En canvi, si s'activen el segment *a, b* i*c,* es visualitza el 7, i si s'activen tots els segments, el 8.

Figura 2.11. Visualitzador de set segments



En la figura 2.12 podeu veure la composició interna d'un visualitzador de set segments, el seu funcionament elèctric i la connexió.

Figura 2.12. Connexió, composició interna i funcionament d'un visualitzador de set segments



Cada segment està fet a partir d'un díode LED. Quan aquest díode LED és travessat pel corrent elèctric, emet radiacions lluminoses.

Els elements del visualitzador sempre han de portar una resistència limitadora. El valor d'aquesta resistència es calcula mitjançant la següent equació:

$$R = \frac{V_{CC} - V_{LED}}{I_{LED}}$$

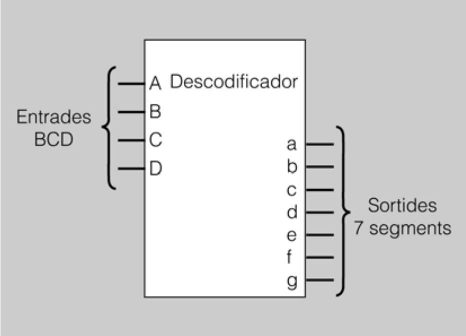
Pel que fa al càlcul, es considera el voltatge LED aproximadament de 2 V i el corrent LED necessari al voltant dels 20 mA, per a LEDs estàndard.

Tal com s'aprecia en la figura 2.12, per a una alimentació V_{CC} de 5 V la resistència limitadora hauria de ser d'uns 150 Ω. Col·locant una resistència limitadora de 500 Ω, podríeu connectar el mateix *visualitzador* a un voltatge d'alimentació de 12 V. Podeu comprobar que en la connexió del visualitzador de set segments, cada segment conté un LED. Tots els ànodes estan connectats entre si (connexió ànode comú) i a positiu. Per tant, quan en el càtode d'un determinat díode apareix un nivell baix, o 0 lògic, el díode emetrà llum.

També podeu trobar visualitzadors amb la connexió de càtode comú. En aquest cas, el segment s'encendrà quan hi apliqueu un nivell alt (1 lògic).

En la figura 2.13 es representa el diagrama en bloc d'un descodificador BCD/ set segments. Com podeu apreciar, hi ha les quatre entrades corresponents al codi BCD i set sortides, una per a cada segment del visualitzador.

FIGURA 2.13. Descodificador BCD-set segments



Circuit integrat 7447

El circuit integrat comercial 7447 és un petit xip de setze pius que implementa la funció de descodificador BCD/set segments.

Als Annexos del web hi trobareu un arxiu amb la simulació del descodificador BCD/set segments comercial 7447.

En la taula 2.5 es mostra el funcionament del descodificador BCD/set segments.

TAULA 2.5. Taula de veritat d'un descodificador BCD/set segments

Entrades				Sortides						
A	**B**	**C**	**D**	**a**	**b**	**c**	**d**	**e**	**f**	**g**
0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0
0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0
0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1
0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1
0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1
0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1
0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1
0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1

Les combinacions d'entrades entre 1010 (10) i 1111 (15) no pertanyen al codi BCD

2.2.2 Implementació de funcions lògiques amb descodificadors

Una de les aplicacions dels descodificadors és la d'implementar funcions lògiques.

TAULA 2.6. Taula de veritat de la funció $f = (a \cdot \overline{b} \cdot \overline{c}) + (a \cdot b \cdot \overline{c}) + (\overline{a} \cdot \overline{b} \cdot c) + (a \cdot b \cdot c)$

c	b	a	f
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	1

Per exemple, si volem implementar amb un descodificador la funció lògica $f = (a \cdot \overline{b} \cdot \overline{c}) + (a \cdot b \cdot \overline{c}) + (\overline{a} \cdot \overline{b} \cdot c) + (a \cdot b \cdot c)$, els passos que haurem de seguir seran els següents:

1. Escrivim la taula de veritat de la funció, com es mostra en la taula 2.6.

2. Utilitzem un descodificador amb un nombre d'entrades igual o més gran que el nombre de variables de la funció. Com que, en aquest cas, tenim tres variables (a, b, c) utilitzarem un descodificador BCD/decimal.

3. Com es mostra en la figura 2.14, connectem les variables de la funció a les entrades del descodificador BCD/decimal. L'entrada de més pes del descodificador la connectem a massa, ja que no la utilitzem.

4. Mirem les combinacions de les variables que donen 1:

   - Q1 = 001
   - Q3 = 011
   - Q4 = 100
   - Q7 = 111

5. Finalment, connectem a una porta OR les sortides del descodificador que es posen a 1. En la figura 2.15 es mostra el circuit final.

Figura 2.14. Connexió de les variables a, b i c a les entrades del descodificador BCD-decimal

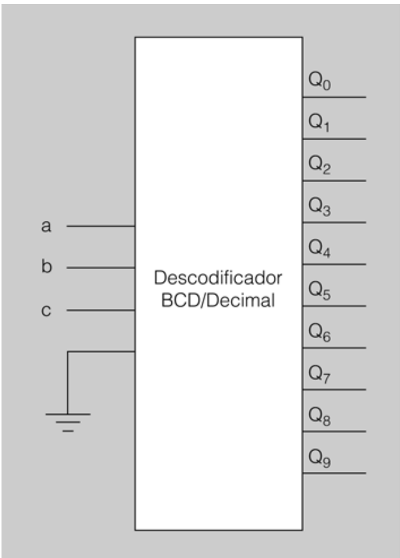
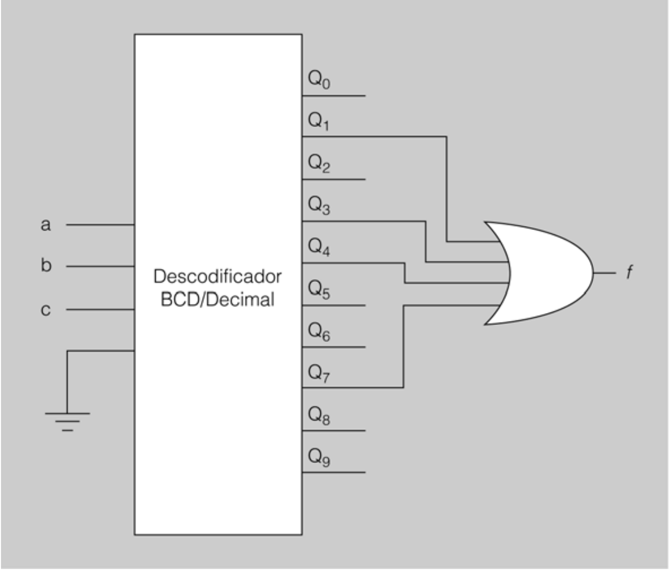


Figura 2.15. Circuit amb descodificador que implementa la funció lògica



D'aquesta manera, a la sortida de la porta OR obtindrem la funció *f*.

2.2.3 Codificadors

Els codificadors tradueixen el llenguatge que utilitzem (normalment, codi decimal) al codi que entén el sistema digital (normalment, codi binari).

Els codificadors són circuits combinacionals que si tenen 2^n nombre d'entrades presenten *n* nombre de sortides.

Codificador decimal/BCD

Un dels tipus de codificador més utilitzat és el codificador decimal/BCD. En aquest circuit, quan s'activa una de les entrades decimals, les sortides agafen l'estat corresponent al seu codi BCD. En la taula 2.7 es mostra la seva taula de veritat.

Els codificadors decimal/BCD són **prioritaris**, això vol dir que si hi ha més d'una entrada activada, la sortida que s'activarà correspondrà a l'entrada de major pes o de menor pes, segons la seva estructura interna.

Aquests codificadors tenen la sortida Y_0 que s'activa en el cas que totes les entrades estiguin a zero. D'aquesta manera es distingeix entre dos casos:

- Quan s'activa l'entrada E_0, les sortides Q_3, Q_2, Q_1 i Q_0 estan a zero i la sortida Y_0, també.
- Quan no hi ha cap entrada activada, les sortides Q_3, Q_2, Q_1 i Q_0 estan a zero i la sortida Y_0 es posa a 1.

Circuit integrat 74147

El circuit integrat comercial 74147 és un petit xip de setze pius que implementa la funció de codificador decimal/BCD.

Taula 2.7. Taula de veritat d'un codificador decimal/BCD amb prioritat al major pes

Entrades										Sortides				
E_9	E_8	E_7	E_6	E_5	E_4	E_3	E_2	E_1	E_0	Y_0	Q_3	Q_2	Q_1	Q_0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	X	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	1	X	X	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	1	X	X	X	0	0	0	1	1
0	0	0	0	0	1	X	X	X	X	0	0	1	0	0
0	0	0	0	1	X	X	X	X	X	0	0	1	0	1
0	0	0	1	X	X	X	X	X	X	0	0	1	1	0
0	0	1	X	X	X	X	X	X	X	0	0	1	1	1
0	1	X	X	X	X	X	X	X	X	0	1	0	0	0
1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0	1	0	0	1

El valor X indica que és indiferent el valor que s'hi posi, tant 0 com 1

Als Annexos del web hi trobareu un arxiu amb la simulació del codificador decimal/BCD comercial 74147.

2.3 Circuits aritmètics

Els circuits combinacionals aritmètics serveixen per realitzar operacions de caire matemàtic. Els més importants són els comparadors, els sumadors i els restadors, que no veurem aquí.

2.3.1 Circuits comparadors

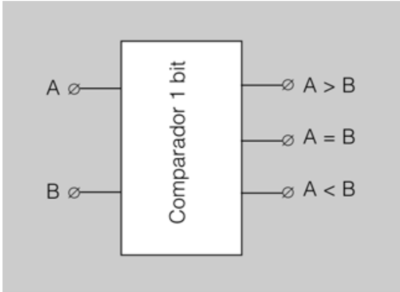
Les aplicacions de lògica digital combinacional requereixen moltes vegades realitzar la comparació entre dades binàries procedents de diferents fonts.

Un circuit comparador és aquell que pot comparar dos nombres binaris (A i B) de n bits cadascun i determinar si són iguals ($A = B$), o si no ho són, quin és més gran ($A > B$) o més petit que l'altre ($A < B$).

Els comparadors són circuits combinacionals que indiquen, a la seva sortida, la relació d'igualtat o desigualtat entre dos nombres (A i B) de n bits cadascun.

El circuit comparador més senzill és aquell que permet fer la comparació entre dos nombres d'un bit. En la figura 2.16 podeu veure la seva representació.

Figura 2.16. Circuit comparador d'un bit



Com podem observar, hi ha, com a entrades, els dos nombres per comparar A i B i les tres sortides possibles $A > B$, $A = B$ i $A < B$.

Circuit integrat 7485

El circuit integrat comercial 7485 és un petit xip de setze pius que permet comparar dos nombres binaris de 4 bits.

La taula de veritat d'aquest circuit comparador d'un bit es mostra a la taula 2.8.

Taula 2.8. Taula de veritat d'un comparador d'un bit

Entrades		Sortides		
A	**B**	**A > B**	**A = B**	**A < B**
0	0	0	1	0
0	1	0	0	1
1	0	1	0	0
1	1	0	1	0

Als Annexos del web hi trobareu un arxiu amb la simulació del comparador universal de 4 bits comercial 7485.

2.3.2 Circuits sumadors

Els circuits sumadors són els circuits digitals encarregats de realitzar les operacions de sumes amb nombres binaris. Primer estudiarem la teoria de la suma i després veurem circuits integrats combinacionals.

Suma de dos bits (semisumador)

Sumar nombres en binari és força semblant a fer-ho en sistema decimal. El primer que cal tenir en compte són les regles, o algoritmes, de la suma binària (taula 2.9).

Taula 2.9. Suma de dos bits

B + A	Carry (C)	Suma (S)
0 + 0	0	0
0 + 1	0	1
1 + 0	0	1
1 + 1	1	0

Carry

Amb aquest terme anglès s'identifica en els manuals tècnics el concepte d'arrossegament, carreteig o transport quan es fan operacions de sumes binàries.

A l'última fila, si apliquéssim el procediment habitual de la suma, el resultat seria 1 + 1 = 2. Ara bé, ja sabem que el 2 en binari no existeix i que el seu equivalent és 10. Què ha succeït? La resposta és el mateix que quan sumem en decimal.

Suma de 6 + 4

Si hem de fer la suma de 6 + 4, com que el sistema decimal només té dígits del 0 al 9, quan superem el 9, hem de tornar a començar des de 0 i incrementar en una unitat la posició d'ordre superior (les desenes), és a dir, 10; aquesta unitat que “ens n'emportem” és l'arrossegament o transport, la qual més endavant esmentarem com a carry. La interpretació d'aquesta regla o algoritme seria: 1 + 1 és igual a 0 i en porto 1.

Vista la part matemàtica, veurem els circuits amb portes que donen resposta a la taula dels algoritmes de la suma.

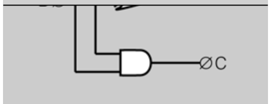
Suma lògica i suma aritmètica

Fixeu-vos en un detall important: no heu de confondre la suma lògica, on 1 + 1 = 1 (F = A + B), amb la suma aritmètica, on 1 + 1 = 0 i us n'emporteu una.

La funció suma aritmètica $S = A + B$ s'implementa amb la porta OR-exclusiva de dues entrades.
La porta OR-exclusiva dóna el resultat de la suma de 2 bits.

La funció carry $C = A \times B$ s'implementa amb la porta AND de dues entrades.
La porta ens dóna el resultat del bit de *carry* quan se sumen 2 bits.

Als Annexos del web hi trobareu un arxiu amb la simulació del semisumador.



Circuit semisumador

El circuit lògic que realitzen totes dues funcions s'anomena **semisumador**. S'anomena semisumador perquè només permet fer la suma dels dos bits menys significatius, dit d'una altra manera, no té en compte la possibilitat de sumar el bit de transport (carry) d'una operació anterior, ja que només té dues entrades.

Suma de dos bits i carry (sumador total)

Quan s'han de sumar dos nombres de més d'un bit, cal modificar el circuit anterior perquè pugui sumar el carry que s'ha produït a la suma anterior.

Als Annexos del web hi trobareu un arxiu amb la simulació del sumador total.

En definitiva, el circuit lògic ha de ser capaç de realitzar la suma de tres bits i donar com a resposta, per una banda, el resultat de la suma i, per l'altra, el resultat del carry. Aquest circuit rep el nom de **sumador total**.

En la taula 2.10 veurem la taula de funcionament d'aquest sumador total.

Taula 2.10. Suma de dos bits més carreteig anterior (suma de tres bits)

B + A + C_i	C_o	Suma (S)
0 + 0 + 0	0	0
0 + 0 + 1	0	1
0 + 1 + 0	0	1
0 + 1 + 1	1	0
1 + 0 + 0	0	1
1 + 0 + 1	1	0
1 + 1 + 0	1	0
1 + 1 + 1	1	1

Ci: carreteig d'entrada; Co: carreteig de sortida.

Circuit integrat 74283

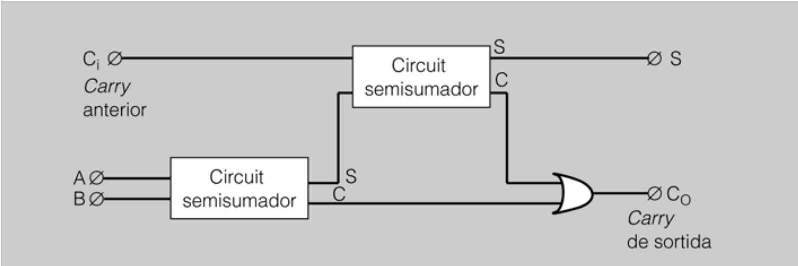
L'integrat comercial 74283 està format per quatre sumadors totals en un xip de setze pius de manera que pot efectuar la suma de dos nombres de 4 bits.

Simplificant la funció S i la funció C podem arribar a construir un sumador total amb diferents tipus de portes, ara bé, la manera més fàcil d'implementar-lo és a

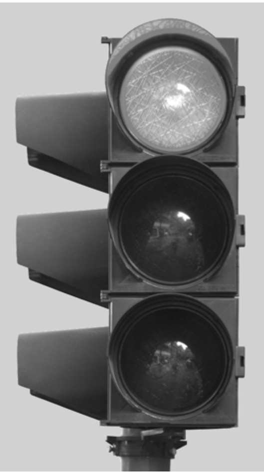
Als Annexos del web hi trobareu un arxiu amb la simulació del sumador de 4 bits comercial 74283.

partir de dos blocs semisumadors connectats de la manera que podeu veure en la figura 2.17.

Figura 2.17. Circuit sumador total a partir de dos blocs semisumadors



2.4 Circuits seqüencials



Un semàfor és un exemple típic de sistema seqüencial.

Fixem-nos en el funcionament d'un semàfor qualsevol del nostre municipi. Un semàfor és un sistema digital típic i les seves sortides són les següents:

- llum vermell per a vehicles
- llum taronja per a vehicles
- llum verd per a vehicles
- llum vermell per a vianants
- llum verd per a vianants

Aquestes cinc sortides només poden prendre dos valors diferents: llum encès o llum apagat. Com a única entrada possible, un semàfor pot presentar el polsador perquè els vianants puguin dir al semàfor que volen creuar el carrer.

Imaginem-nos que arribem a un semàfor passejant. Volem creuar el carrer però el llum dels vianants està en vermell i els vehicles circulen perquè tenen el llum verd encès. Com que tenim pressa, premem el polsador del semàfor i, després de pocs segons, el semàfor dels vehicles es posa en vermell (passant primer pel taronja) i el semàfor dels vianants es posa en verd. Fins aquí tot molt bé: quin semàfor més amable! Ens ha obeït de seguida.

Però què passarà si ara, amb el llum verd per als vianants encès, tornem a prémer el polsador? Doncs que el semàfor no ens farà ni cas i, transcorreguts uns quants segons, continuarà amb la seva seqüència de funcionament normal, deixant passar els vehicles i encenent el llum vermell per als vianants. Si pogués parlar, el semàfor ens diria alguna cosa semblant a: "No cal que tornis a prémer el polsador que ja t'he entès a la primera! Això sí: espavila't perquè en pocs segons jo continuaré fent la meva feina i no et deixaré passar!".

Cronòmetre

Penseu en un cronòmetre digital amb un polsador d'inici/aturada i un polsador de reinicialització o *RESET* per tornar a zero. És un sistema digital seqüencial? Per què?

Això significa que el semàfor no sempre dóna les mateixes sortides per a una mateixa combinació de les entrades. Aquest semàfor és un exemple típic de **sistema digital seqüencial**.

En un sistema digital seqüencial, els valors dels senyals de sortida no depenen solament dels valors dels senyals d'entrada, sinó també dels valors que les mateixes sortides tenien abans.

Us podeu trobar amb llibres tècnics que anomenen al nivell alt i al nivell baix estat de **SET** i estat de **RESET**, respectivament.

Els circuits seqüencials elementals són els **biestables**. A partir de biestables es poden construir circuits seqüencials més complexos com, per exemple, els **comptadors**i els **registres de desplaçament**.

2.4.1 Biestables: latches i flip-flops

Un biestable és un circuit digital seqüencial que pot tenir dos estats estables a la sortida denominats **nivell alt** i **nivell baix**, en els quals es pot mantenir indefinidament.

Un biestable canvia l'estat de la seva sortida segons les seves entrades i l'estat previ de la sortida.

Un flanc...

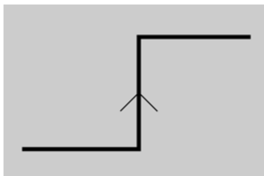
... és una transició d'un senyal digital de 0 a 1 o d'1 a 0. Si la transició és de 0 a 1 s'anomena *flanc positiu* o *flanc de pujada*. Si la transició és d'1 a 0 s'anomena *flanc negatiu* o *flanc de baixada*.

Els dispositius biestables es divideixen en dues categories:

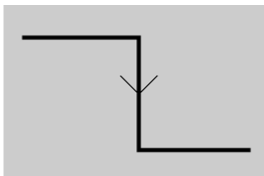
- *Latches*: són biestables asíncrons. Això vol dir que no utilitzen cap senyal de sincronització o rellotge.
- *Flip-flops*: són biestables síncrons. Això vol dir que la seva sortida canvia d'estat únicament en un instant específic d'una entrada de sincronització denominada **rellotge** (habitualment, en un instant concret anomenat **flanc**).

Els *flip-flops* es poden classificar segon el tipus de senyal de rellotge que utilitzen:

- *Flip-flop* disparat per flanc positiu: la sortida del *flip-flop* canvia quan el senyal de rellotge fa una transició de 0 a 1.
- *Flip-flop* disparat per flanc negatiu: la sortida del *flip-flop* canvia quan el senyal de rellotge fa una transició d'1 a 0.



Flanc positiu



Flanc negatiu

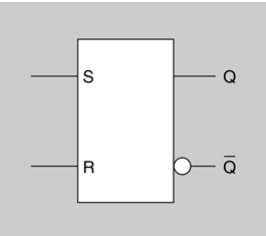
Latch S-R (SET-RESET)

El funcionament del *latch* S-R és el següent:

- Si posem l'entrada S (*SET*) a 1 i deixem l'entrada R (*RESET*) a 0, la sortida Q del *latch* S-R es posa a 1: és el que s'anomena **estat de SET**.
- Si posem l'entrada R (*RESET*) a 1 i deixem l'entrada S (*SET*) a 0, la sortida Q del *latch* S-R es posa a 0: és el que s'anomena **estat de RESET**.

- Si posem les dues entrades S i R a 0, les sortides no canvien: conserven l'estat. Això vol dir posar el mateix valor que tenien abans de canviar l'estat de les entrades. Aquesta característica és molt important, perquè el *latch* "memoritza" el seu estat anterior.
- La sortida $\overline{Q}$ sempre té el valor contrari a la sortida Q (d'això se'n diu que les dues sortides són **complementàries**).

La taula de veritat del *latch* S-R es mostra en la taula 2.11.



Símbol lògic del latch S-R

Taula 2.11. Taula de veritat d'un latch S-R

Entrades		Sortides		
S	**R**	$Q+$	$\overline{Q+}$	**Comentaris**
0	0	Q	$\overline{Q}$	Les sortides no canvien. Es queden en l'estat anterior
1	0	1	0	Estat de SET
0	1	0	1	Estat de RESET
1	1	?	?	**Condició no vàlida**

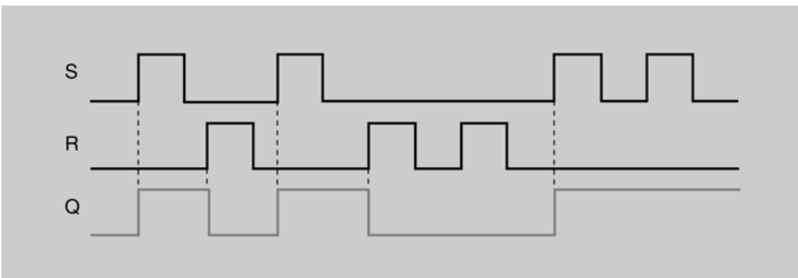
Amb Q+ es designa el valor posterior a la realització de la operació corresponent

I què passa quan posem les dues entrades del *latch* S-R a 1? Doncs que, a causa del funcionament intern del *latch* S-R, no podem predir quines sortides obtindrem.

No hem de posar mai les dues entrades del *latch* S-R a 1 simultàniament perquè no podem predir quin valor tindran les seves sortides. Aquesta imprecisió del valor de les sortides podria provocar problemes greus al circuit on estigués connectat el *latch* S-R.

En la figura 2.18 podem veure l'evolució amb el temps de les les formes d'ona de les entrades i la sortida d'un*latch* S-R. Se suposa que Q es troba inicialment a nivell baix. Observeu que en cap moment les dues entrades es troben a nivell alt simultàniament.

Figura 2.18. Formes d'ona de les entrades i la sortida d'un latch S-R



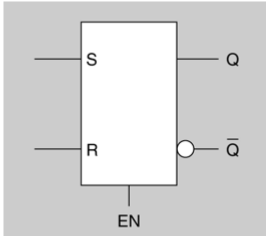
El nom EN d'una entrada d'habilitació ve de la paraula anglesa *enable*, que vol dir habilitació.

Latch S-R amb entrada d'habilitació

A un *latch* S-R se li pot afegir una nova entrada: **l'entrada d'habilitació EN**.

La funció d'aquesta entrada **EN** és molt senzilla:

- Quan l'entrada EN està a nivell alt, el *latch* està habilitat i funciona com un *latch* S-R normal.
- Quan l'entrada EN està a nivell baix, simplement el *latch* S-R no fa res: per molt que canviem el valor de les entrades S i R, les sortides conserven l'estat anterior.



Símbol lògic del latch S-R amb entrada d'habilitació

La taula de veritat d'aquest *latch*S-R amb entrada d'habilitació es mostra en la taula 2.12.

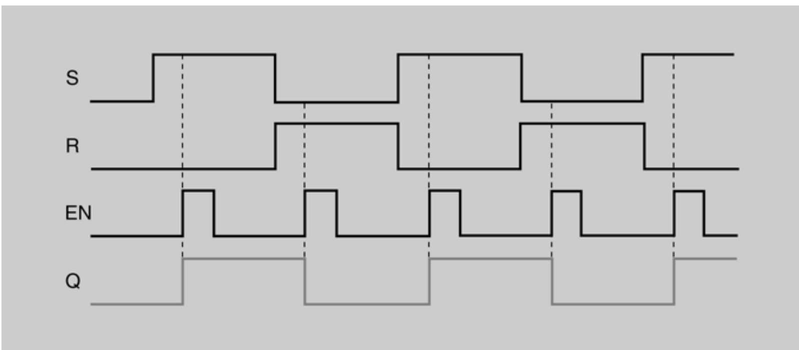
Taula 2.12. Taula de veritat d'un latch S-R amb entrada d'habilitació

Entrades			Sortides		
EN	**S**	**R**	$Q+$	$\overline{Q+}$	**Comentaris**
1	0	0	Q	$\overline{Q}$	Les sortides no canvien. Es queden en l'estat anterior
1	1	0	1	0	Estat de SET
1	0	1	0	1	Estat de RESET
1	1	1	?	?	**Condició no vàlida**
0	X	X	Q	$\overline{Q}$	Latch no habilitat. Les sortides no canvien

Als Annexos del web hi teniu disponible una simulació d'un latch S-R amb habilitació.

En la figura 2.19 podem veure les formes d'ona de les entrades i la sortida d'un *latch* S-R amb habilitació. Se suposa que Q es troba inicialment a nivell baix.

Figura 2.19. Formes d'ona de les entrades i la sortida d'un latch S-R amb habilitació



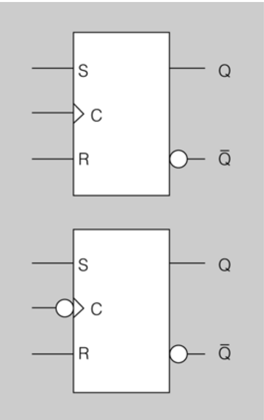
Flip-flop S-R

En la taula 2.13 es mostra la taula de veritat d'un *flip-flop* S-R disparat per flanc positiu. Com es pot veure, el seu funcionament és similar al del *latch* S-R. L'única diferència és que les sortides només canvien en l'instant en què el senyal **CLK** passa de nivell baix a nivell alt.

Taula 2.13. Taula de veritat d'un flip-flop S-R disparat per flanc positiu

Entrades			Sortides		
CLK	**S**	**R**	$Q+$	$\overline{Q+}$	**Comentaris**
X	X	X	Q	$\overline{Q}$	No hi ha flanc de CLK: les sortides no canvien
↑	0	0	Q	$\overline{Q}$	Les sortides no canvien
↑	1	0	1	0	Estat de SET
↑	0	1	0	1	Estat de RESET
↑	1	1	?	?	Condició no vàlida

La fletxa cap amunt significa flanc de pujada

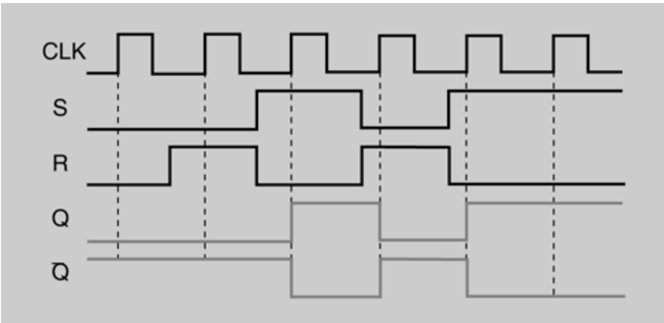


Flip-flops S-R disparats per flanc positiu (superior) i per flanc negatiu (inferior)

Com en el cas del *latch* S-R, mai no hem de posar les entrades S i R del *flip-flop* S-R simultàniament a nivell alt, perquè no podem predir quin valor tindran les seves sortides. Aquesta imprecisió del valor de les sortides podria provocar problemes greus al circuit on estigués connectat el *flip-flop* S-R.

En la figura 2.20 podem veure les formes d'ona de les entrades i la sortida d'un *flip-flop* S-R disparat per flanc positiu. Se suposa que Q es troba inicialment a nivell baix.

Figura 2.20. Formes d'ona de les entrades i la sortida d'un flip-flop S-R disparat per flanc positiu



Flip-flop J-K

El *flip-flop* J-K és un dels tipus de *flip-flop* més utilitzats.

Les denominacions J i K...

... per a les entrades del *flip-flop* J-K no tenen cap significat conegut, excepte el fet que són dues lletres consecutives de l'alfabet.

El funcionament del *flip-flop* J-K és idèntic al del *flip-flop* S-R en els estats d'operació *SET*, *RESET* i no-canvi. La diferència resideix en el fet que el *flip-flop* J-K **no té condicions no vàlides** com passa amb el *flip-flop* S-R (ara sí hi pot haver dos uns a les entrades).

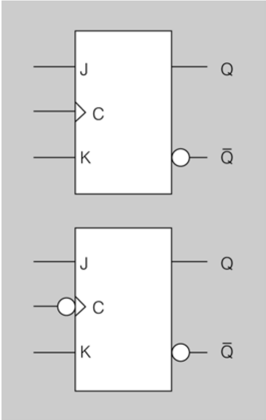
Taula 2.14. Taula de veritat d'un flip-flop J-K disparat per flanc positiu

Entrades			Sortides		
CLK	**J**	**K**	$Q+$	$\overline{Q+}$	**Comentaris**
X	X	X	Q	$\overline{Q}$	No hi ha flanc de CLK: les sortides no canvien
↑	0	0	Q	$\overline{Q}$	Les sortides no canvien.
↑	1	0	1	0	Estat de SET
↑	0	1	0	1	Estat de RESET
↑	1	1	$\overline{Q}$	Q	**Basculació**: la sortida canvia al seu estat oposat

Quan la sortida bascula, vol dir que si hi havia un 1 passa a haver-hi un 0, i a l'inrevés

Com podem observar en la taula de veritat del *flip-flop* J-K (taula 2.14), ara ja no hi ha combinacions no vàlides de les entrades, com passava al *flip-flop* S-R. Quan les dues entrades J i K es posen a nivell alt, la sortida canvia al seu estat oposat. És a dir, ens podem trobar amb dues d'aquestes situacions:

- Si la sortida estava a nivell alt abans del flanc de rellotge, passarà a nivell baix.
- Si la sortida estava a nivell baix abans del flanc de rellotge, passarà a nivell alt.



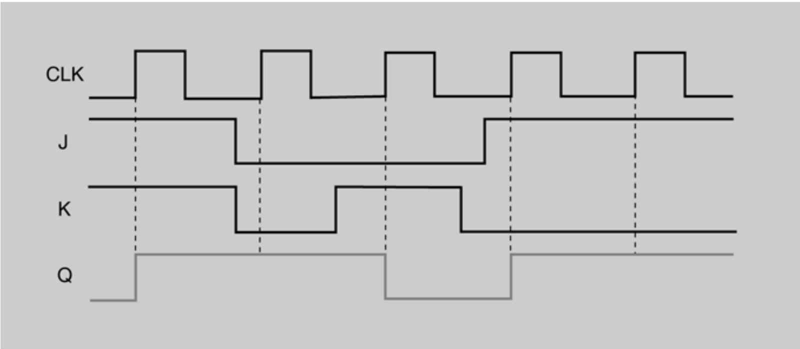
Circuit integrat 74HC112

El circuit integrat comercial 74HC112 és un petit xip de setze pius que conté dos *flip-flops* J-K disparats per flanc descendent.

Als Annexos del web hi teniu disponible una simulació d'un flip-flop J-K i d'un doble flip-flop J-K.

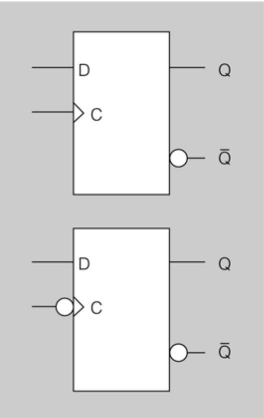
En la figura 2.21 podem veure les formes d'ona de les entrades i la sortida d'un *flip-flop* J-K disparat per flanc positiu. Se suposa que Q es troba inicialment a nivell baix.

Figura 2.21. Formes d'ona de les entrades i la sortida d'un flip-flop J-K disparat per flanc positiu



Flip-flops D i T

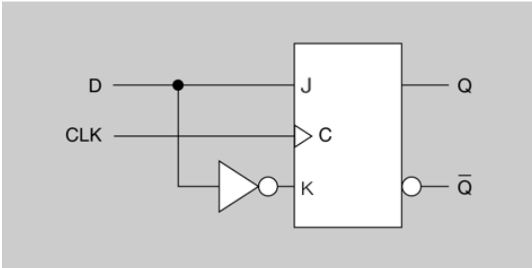
El *flip-flop* D està construït a partir d'un *flip-flop* J-K al qual s'han unit les seves entrades J i K mitjançant un inversor, tal com es mostra en la figura 2.22. La taula de veritat d'aquest *flip-flop* D és molt senzilla (taula 2.15).



Flip-flop D disparat per flanc positiu (superior) i per flanc negatiu (inferior)

simulació d'un flip-flop D i d'un flip-flop D mitjançant S-R.

Figura 2.22. Flip-flop D construït a partir d'un flip-flop S-R



Taula 2.15. Taula de veritat d'un flip-flop D activat per flanc positiu

Entrades		Sortides		
D	**CLK**	$Q+$	$\overline{Q+}$	**Comentaris**
0	↑	0	1	Estat de RESET
1	↑	1	0	Estat de SET

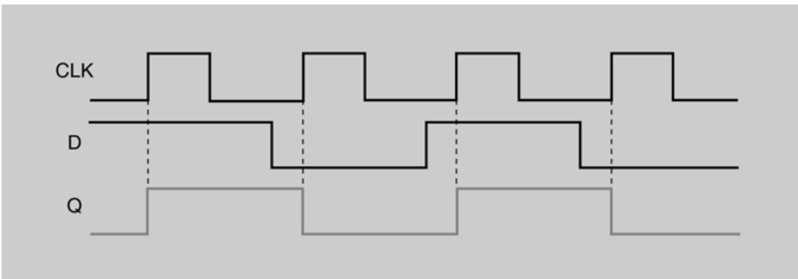
Com veiem en la taula 2.15, la sortida Q conserva el valor que té l'entrada D just en l'instant en el qual es produeix la transició positiva del rellotge. Aquesta propietat fa que el *flip-flop* D s'utilitzi molt com a element de memòria.

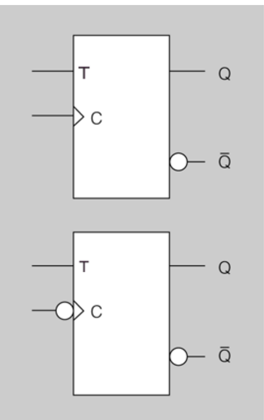
Flanc positiu o flanc negatiu?

Quan un *flip-flop* es dispara per flanc negatiu se simbolitza amb un petit cercle a l'entrada del rellotge. Si el *flip-flop* es dispara per flanc positiu el petit cercle no apareix en el seu símbol.

En la figura 2.23 podem veure les formes d'ona de les entrades i la sortida d'un *flip-flop* D disparat per flanc positiu. Se suposa que Q es troba inicialment a nivell baix.

Figura 2.23. Formes d'ona de les entrades i la sortida d'un flip-flop D disparat per flanc positiu.

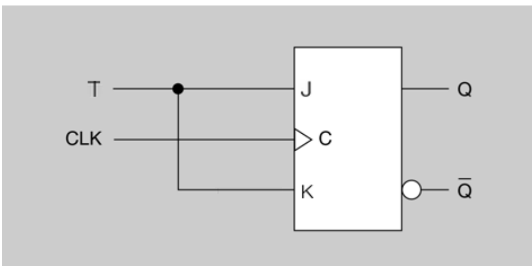




Flip-flop T disparat per flanc positiu (superior) i per flanc negatiu (inferior)

El *flip-flop* T està construït a partir d'un *flip-flop* J-K al qual s'han unit les seves entrades J i K directament, tal com es mostra en la figura 2.24. La taula de veritat d'aquest *flip-flop* T és molt senzilla (taula 2.16).

Figura 2.24. Flip-flop T construït a partir d'un flip-flop S-R



Taula 2.16. Taula de veritat d'un flip-flop T activat per flanc positiu

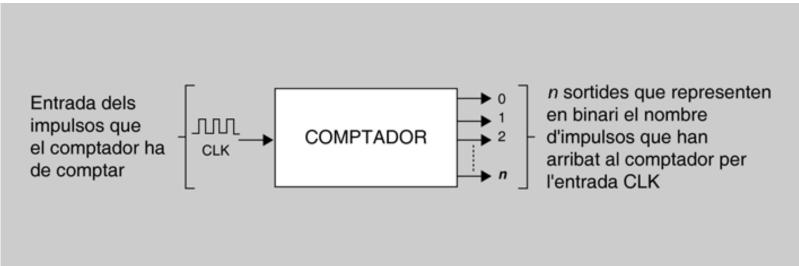
Entrades		Sortides		
T	CLK	$Q+$	$\overline{Q+}$	Comentaris
0	$\uparrow$	Q	$\overline{Q}$	No hi ha canvi d'estat
1	$\uparrow$	$\overline{Q}$	Q	Canvi d'estat forçat

Com veiem en la taula 2.16, la sortida Q canvia el valor que tenia **si hi ha un 1 a l'entrada T** just en l'instant en el qual es produeix la transició positiva del rellotge. Aquesta propietat fa que el *flip-flop* T s'utilitzi molt com a element comptador o com a complement d el rellotge.

2.4.2 Comptadors

Un comptador (figura 2.25) és un circuit format per *flip-flops* T, que té una entrada d'impulsos (anomenada **entrada de rellotge** o **CLK**) i un nombre de sortides *n* que representen **en codi binari**, en cada moment, el nombre d'impulsos que li arriben a l'entrada de rellotge.

Figura 2.25. Diagrama de blocs d'un comptador digital




Un cronòmetre és un exemple molt clar de comptador digital

La importància dels comptadors dins del món dels sistemes digitals és molt gran. Només cal pensar en el gran nombre d'aplicacions que poden tenir: detecció del nombre de vehicles que entren en un pàrking, recompte de les peces elaborades en una fàbrica, realització de funcions de cronometratge, etc.

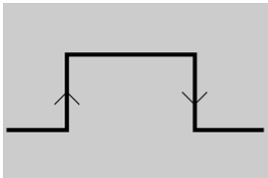
Els comptadors digitals tenen les característiques següents:

- **Mòdul**: és el nombre de combinacions diferents que té un comptador a la seva sortida. Per exemple, si un comptador té 4 bits de sortida i compta des de 0000 fins a 1111, es diu que és de mòdul 16 o, de forma abreujada, és diu que és *MOD16*.
- **Compte ascendent o descendent**: gairebé tots els comptadors digitals tenen un bit d'entrada per seleccionar si el compte es fa de manera ascendent o descendent.
- **Operació asíncrona o síncrona**: als comptadors asíncrons, els *flip-flops* no comparteixen el mateix senyal de rellotge. Als comptadors síncrons, tots els

seus *flip-flops* comparteixen el mateix senyal de rellotge. Els més utilitzats són els comptadors síncrons.

- **Entrada d'esborrat**: molts comptadors disposen d'un bit d'entrada que, quan es posa a zero, fa que totes les sortides es posin a nivell baix (*RESET*).
- **Entrada amb flanc ascendent o descendent**: els comptadors amb flanc ascendent canvien la seva sortida quan en el senyal de rellotge hi ha una transició de baix a alt. Els comptadors amb flanc descendent canvien la seva sortida quan en el senyal de rellotge hi ha una transició d'alt a baix. En la figura 2.26 es mostra un pols de rellotge amb els seus flancs ascendent i descendent.

FIGURA 2.26. Pols de rellotge



Els comptadors més utilitzats són els de quatre bits de sortida

Els comptadors de quatre bits de sortida poden ser:

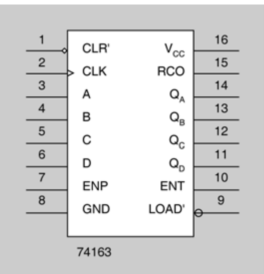
- De mòdul 16 (MOD16): compten des de 0000b fins a 1111b (és a dir, de 0 a 15 en decimal, o de 0 a F en hexadecimal).
- De mòdul 10 (MOD10): compten des de 0000b fins a 1001b (és a dir, de 0 a 9 en decimal). Quan les sortides d'aquests comptadors estan a 1001b i hi ha un nou pols de rellotge a l'entrada, les sortides tornen a 0000b.

Els comptadors dels PLC

La majoria de comptadors que porten incorporats els autòmats programables compten fins a valors superiors a 30.000 impulsos.

Per comptar nombres més grans de 16 s'utilitzen diversos comptadors de quatre bits connectats entre ells.

Comptador binari síncron de quatre bits 74163



74163: comptador binari síncron de 4 bits

El xip 74163 és un exemple de circuit integrat comptador binari de quatre bits.

La utilitat de cada piu d'aquest circuit comptador es descriu a continuació:

- **Q_A, Q_B, Q_C i Q_D** (pius núms. 14, 13, 12 i 11, respectivament): **sortides** del comptador. Q_A correspon al bit de menys pes.
- **CLK** (piu 2): **entrada** de rellotge actiu per flanc ascendent.
- **VCC** (piu 16): alimentació del circuit integrat (+5 V).
- **GND** (piu 8): connexió a massa del circuit integrat.

- **A**, **B**, **C** i **D** (pius núm. 3, 4, 5 i 6, respectivament): a aquest comptador li podem indicar per quin nombre ha de començar a comptar. Normalment serà el 0000, però amb les **entrades** A, B, C i D li podem indicar un altra combinació d'inici (A correspon al bit de menys pes)

- $\overline{\mathrm{LOAD}}$ (piu núm. 9): quan s'aplica un nivell baix a l'**entrada** $\overline{\mathrm{LOAD}}$,el comptador assumeix l'estat de les entrades A, B, C i D en el següent flanc ascendent de rellotge.

- $\overline{\mathrm{CLR}}$ (piu núm. 1): **entrada** d'esborrat activa a nivell baix que posa a zero de manera síncrona (és a dir, en el següent flanc ascendent de rellotge) les quatre sortides del comptador.

- **ENP** i **ENT** (pius núm. 7 i 10, respectivament): **entrades** d'habilitació. Aquestes entrades han d'estar a nivell alt perquè el comptador pugui comptar. Quan almenys una de les dues entrades és a nivell baix, el comptador es desactiva.

- **RCO** (piu núm. 15): aquesta **sortida** es posa a nivell alt quan el comptador assoleix el valor 1111 a la seva sortida.

2.4.3 Registres de desplaçament

Els registres de desplaçament són una altra aplicació digital seqüencial que, com els comptadors, es poden obtenir mitjançant la connexió de diversos biestables o utilitzant circuits integrats específics.

Aplicacions dels registres de desplaçament

Les principals aplicacions dels registres de desplaçament són:

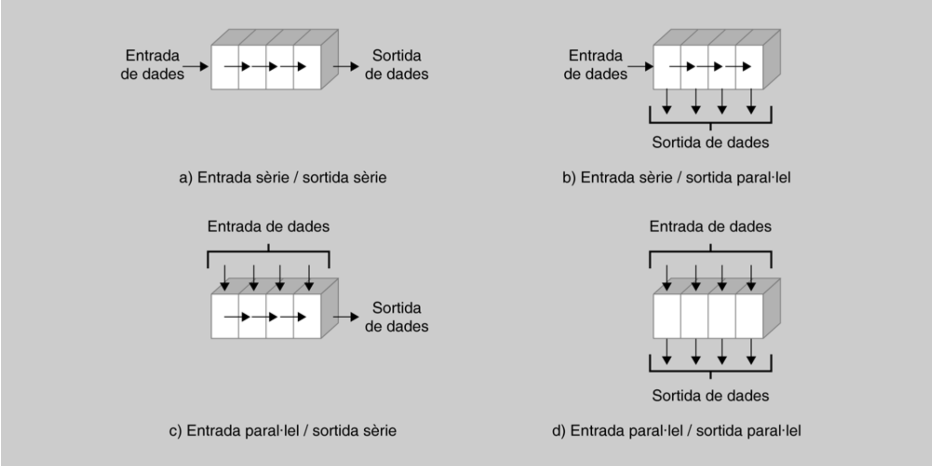
- emmagatzematge de dades,
- conversió de dades paral·lel/ sèrie,
- conversió de dades sèrie/ paral·lel,
- introducció de retards en els sistemes de comunicació.

> Els registres de desplaçament són sistemes digitals seqüencials formats per biestables, que s'utilitzen per emmagatzemar i transferir dades digitals.

Els registres de desplaçament es poden classificar segons com s'introdueix la informació i de com s'obté aquesta informació. D'acord amb aquest criteri, podem trobar (figura 2.27):

- registres de desplaçament entrada sèrie/sortida sèrie
- registres de desplaçament entrada sèrie/sortida paral·lel
- registres de desplaçament entrada paral·lel/sortida sèrie
- registres de desplaçament entrada paral·lel/sortida paral·lel.

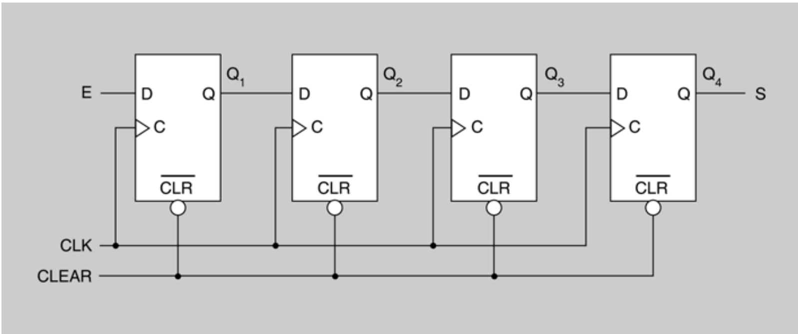
FIGURA 2.27. Registres de desplaçament de quatre bits



Registre de desplaçament amb entrada sèrie/sortida sèrie

En la figura 2.28 es mostra l'estructura d'un registre de desplaçament entrada sèrie/sortida sèrie de quatre bits, format per quatre *flip-flops* D amb senyal d'esborrat (CLR).

FIGURA 2.28. Registre de desplaçament entrada sèrie-sortida sèrie de quatre bits

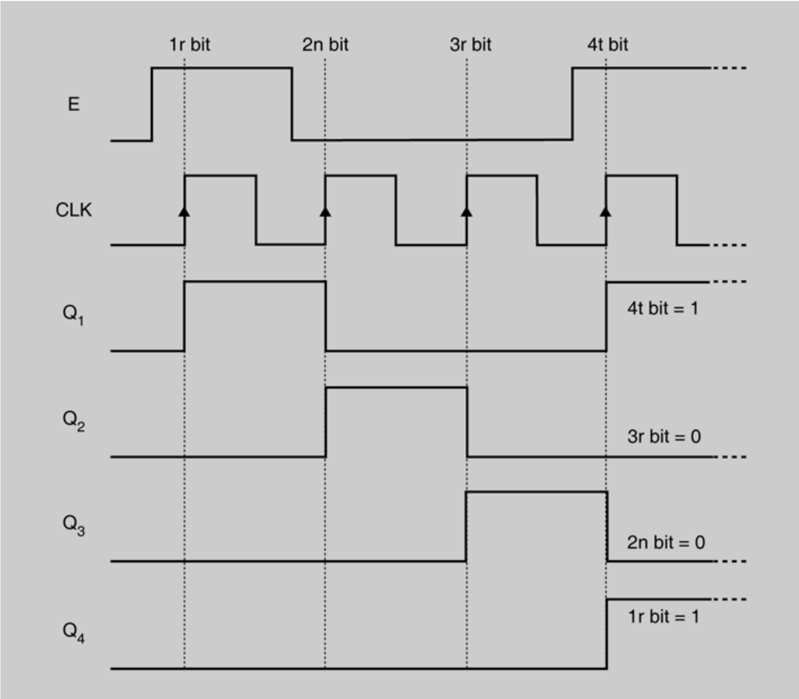


Estructura interna dels registres de desplaçament

La majoria dels registres de desplaçament es realitzen a partir de *flip-flops* tipus D.

El funcionament d'aquest registre de desplaçament és ben senzill. Per l'entrada **E** es van introduint les dades. Cada bit dels introduïts serà desplaçat al següent *flip-flop* a cada flanc ascendent del senyal de rellotge, de manera que a partir del quart flanc ascendent la informació introduïda s'obtindrà a la sortida de manera successiva. En la figura 2.29 es mostren els senyals E, CLK, Q1, Q2, Q3 i Q4 quan s'emmagatzema el codi 1001 en un registre de desplaçament sèrie/sèrie.

Figura 2.29. Formes d'ona del registre de desplaçament sèrie-sèrie de quatre bits

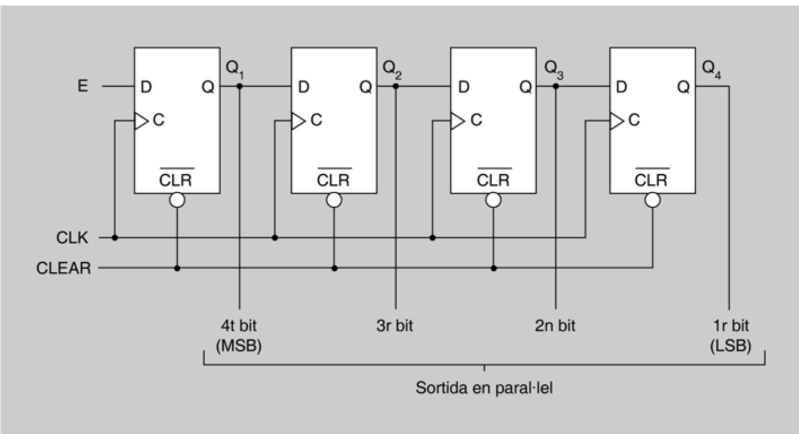


Registre de desplaçament amb entrada sèrie/sortida paral·lel

Es pot obtenir un registre de desplaçament d'entrada sèrie/sortida paral·lel partint de l'esquema del registre sèrie/sèrie. Només caldrà connectar les sortides paral·lel als punts Q1, Q2, Q3 i Q4 com es mostra en la figura 2.30. El funcionament d'aquest registre és el següent:

- Quan es produeix un flanc ascendent de CLK entra un bit per la línia E i es queda a Q1. En el mateix instant, el bit que era al punt Q1 passa a Q2, el que era a Q2 passa a Q3 i el que era a Q3 passa a Q4.
- La informació introduïda per l'entrada sèrie estarà disponible a les sortides Q1, Q2, Q3 i Q4 al flanc ascendent del quart pols de rellotge.

Figura 2.30. Registre de desplaçament entrada sèrie-sortida paral·lel de quatre bits



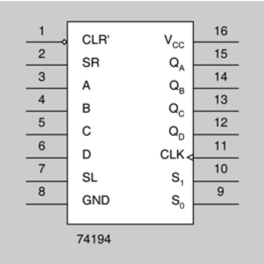
MSB i LSB

MSB vol dir ***M**ost **S**ignificant **B**it*, és a dir, el bit més significant, el de més pes.

LSB vol dir ***L**east **S**ignificant **B**it*, és a dir, el bit menys significant, el de menys pes.

Registre de desplaçament universal

Un registre de desplaçament universal és un circuit integrat que incorpora els diferents modes de funcionament de registre, amb entrades i sortides sèrie i paral·lel.



74194: registre de desplaçament universal

Un exemple clar de registre de desplaçament universal és el circuit integrat 74194.

La utilitat de cada piu d'aquest registre de desplaçament universal es descriu a continuació:

- $\overline{\mathrm{CLR}}$ (piu núm. 1): **entrada** asíncrona d'esborrat, activa a nivell baix.
- $\mathbf{S_0}$ i $\mathbf{S_1}$ (pius núm. 9 i 10, respectivament): **entrades** de selecció del mode d'operació. Aquestes entrades actuen segons la taula 2.17.
- **CLK** (piu núm. 11): **entrada** de rellotge actiu per flanc ascendent.
- **SR** (piu núm. 2): **entrada** sèrie per fer desplaçaments a la dreta.
- **SL** (piu núm. 7): **entrada** sèrie per fer desplaçaments a l'esquerra.
- **A**, **B**, **C** i **D** (pius núm. 3, 4, 5 i 6, respectivament): **entrades** per fer càrregues en paral·lel.
- $\mathbf{Q_A}$, $\mathbf{Q_B}$, $\mathbf{Q_C}$ i $\mathbf{Q_D}$ (pius núm. 15, 14, 13 i 12, respectivament): **sortides** en paral·lel.
- **VCC** (piu 16): alimentació del circuit integrat (+5 V).
- **GND** (piu 8): connexió a massa del circuit integrat.

Als Annexos del web hi teniu disponible una simulació d'un registre de desplaçament universal 74194.

Taula 2.17. Modes d'operació del registre universal 74HC194

S0</sub ˆ S<sub>1	Mode d'operació	
0	0	Rellotge inhibit: no hi ha desplaçament
0	1	Desplaçament a l'esquerra
1	0	Desplaçament a la dreta
1	1	Càrrega en paral·lel de les dades a les sortides

La càrrega en paral·lel es fa de manera síncrona, aplicant les dades a les entrades en paral·lel i posant les entrades de control de mode S_0 i S_1 a nivell alt. A partir d'aquest moment, les dades seran transferides a la sortida en el flanc ascendent del pols de rellotge; durant la càrrega en paral·lel, el flux de dades per l'entrada sèrie queda inhibit.

Components bàsics i fonts d'alimentació

Santiago Cerezo Salcedo, Àngel L. Miguel Rodríguez, Josep M. Pallarés Serres i Juan Perona Camacho
Adaptació de continguts: Santiago Cerezo Salcedo

Electrònica

Índex

Introducció **5**

Resultats d'aprenentatge **7**

1 Components electrònics emprats en rectificació i filtrat. Tipologia i característiques **9**
- 1.1 Components passius: tipus, característiques i aplicacions . . . 9
- 1.2 Resistències fixes, ajustables i potenciòmetres . . . 10
  - 1.2.1 Codi de colors per a resistències . . . 12
- 1.3 Condensadors. Bobines . . . 13
  - 1.3.1 Condensadors . . . 14
  - 1.3.2 Bobines . . . 15
  - 1.3.3 Codificació de valors de condensadors . . . 15
- 1.4 Díodes semiconductors . . . 16
  - 1.4.1 Corba característica. Zones de funcionament . . . 16
- 1.5 Rectificació. Filtres . . . 17
  - 1.5.1 Rectificació de mitja ona . . . 18
  - 1.5.2 Rectificació d'ona completa o de doble ona . . . 18
  - 1.5.3 Filtres . . . 19
- 1.6 Díodes Zener. Característiques i aplicacions . . . 21
- 1.7 Components actius. Característiques i aplicacions . . . 22
- 1.8 El transistor. Polarització . . . 23
  - 1.8.1 Zones de funcionament . . . 24
  - 1.8.2 Circuits de polarització . . . 26
  - 1.8.3 Recta de càrrega i punt de treball (Q) . . . 27

2 Fonts d'alimentació **29**
- 2.1 Fonts lineals: estabilització i regulació amb dispositius integrats . . . 29
  - 2.1.1 Estabilitzador amb díode Zener . . . 30
  - 2.1.2 Estabilitzador amb reguladors integrats . . . 31
- 2.2 Fonts commutades: característiques, fonaments i blocs funcionals . . . 33
  - 2.2.1 Reguladors commutats a la freqüència pròpia . . . 34
  - 2.2.2 Configuracions bàsiques . . . 34
  - 2.2.3 Esquema d'una font commutada completa . . . 37

Introducció

La irrupció dels sistemes digitals en la nostra vida quotidiana sovint ens fa oblidar que el món és analògic, molt lluny dels uns i zeros sense matisos que ha imposat l'electrònica digital. Abans de l'abaratiment dels circuits digitals, l'electrònica analògica era la que es feia servir massivament per a qualsevol aplicació, i avui encara hi ha casos en què no ha estat substituïda pels sistemes digitals o bé no podrà ser substituïda mai. Així, l'estudi dels sistemes analògics encara i sempre revesteix una importància que no es pot ignorar sense més ni més.

La base de l'electrònica analògica recau sobre els dos tipus de components que hi ha: els components passius i els actius.

Els components passius duen a terme la seva funció *per se*, és a dir, només amb la seva presència en el circuit. Aquests components estan governats per unes lleis físiques concretes i són relativament fàcils de descriure.

Els components actius necessiten una aportació extra d'energia per dur a terme la seva funció dins del circuit. Aquesta aportació extra d'energia rep el nom d'*alimentació*. Alguns d'aquests components són prou bàsics per poder ser inclosos, juntament amb els components passius, en l'apartat "Components electrònics emprats en rectificació i filtrat. Tipologia i característiques".

Els components actius bàsics que seran descrits en aquest apartat són els díodes i els transistors. Els uns i els altres són la base de pràcticament tots els avenços que s'han fet en el camp de l'electrònica (tant analògica com digital) des de la dècada de 1940.

En l'apartat "Fonts d'alimentació", es descriuen les fonts d'alimentació com a bloc essencial per al funcionament de qualsevol circuit electrònic. Hi veureu quines parts les componen i quina és la funció de cadascuna de les parts.

Resultats d'aprenentatge

En finalitzar aquesta unitat, l'alumne/a:

1. Reconeix circuits de rectificació i filtrat determinant les seves característiques i aplicacions.
    - Reconeix els diferents components.
    - Descriu els paràmetres i magnituds que caracteritzen els circuits amb components passius.
    - Utilitza els instruments de mesura adients (multímetre i oscil•loscopi, entre d'altres).
    - Relaciona els components amb els símbols que apareixen als esquemes.
    - Descriu els tipus de rectificadors i filtres.
    - Munta o simula circuits.
    - Obté els paràmetres i característiques elèctriques dels components dels sistemes.
    - Descriu les aplicacions reals d'aquest tipus de circuits.
    - Realitza les tasques que cal fer individualment amb autosuficiència i seguretat.
2. Reconeix fonts d'alimentació determinant les seves característiques i aplicacions.
    - Descriu les diferències entre fonts commutades i no commutades.
    - Descriu el funcionament dels diferents blocs que componen els sistemes complets d'alimentació.
    - Identifica les característiques més rellevants proporcionades pels fabricants.
    - Descriu les diferents configuracions de circuits reguladors integrats.
    - Munta o simula circuits.
    - Utilitza els instruments de mesura adients (multímetre i oscil•loscopi, entre d'altres).
    - Descriu aplicacions reals de les fonts commutades .
    - Verifica el funcionament de les fonts commutades.
    - Descriu aplicacions reals de les fonts commutades.
    - Realitza les tasques que cal fer individualment amb autosuficiència i seguretat.

1. Components electrònics emprats en rectificació i filtrat. Tipologia i característiques

Alguns dels elements més importants que podem trobar generalment en un circuit electrònic són:

- Resistències
- Condensadors
- Bobines
- Díodes
- Transistors

Els components elèctrics s'agrupen en dues grans famílies:

- **Passius**: fan la seva funció per les característiques físiques i l'estructura interna pròpies.
- **Actius**: necessiten una aportació extra d'energia (alimentació) per poder fer la seva funció en el circuit.

1.1 Components passius: tipus, característiques i aplicacions

Els components passius basen el seu funcionament en algun principi físic concret dels que governen l'electricitat i el magnetisme. Així, a grans trets es podria parlar del següent:

- **Resistències**: relacionades amb el pas del corrent elèctric pel circuit, serveixen per modificar la tensió i limitar el corrent.
- **Condensadors**: molt lligats al camp elèctric, absorbeixen les variacions ràpides de tensió elèctrica.
- **Bobines**: relacionades amb els efectes magnètics del corrent elèctric (electromagnetisme), absorbeixen les variacions ràpides de corrent elèctric.

Les principals aplicacions d'aquests components apareixen en la taula 1.1.

TAULA 1.1. Aplicacions dels components passius

Component	Aplicacions principals
Resistència o *resistor*	Divisió de tensió, limitació de corrent, adaptació d'impedàncies, filtratge
Condensador	Adaptació d'impedàncies, filtratge
Bobina o inductor	Adaptació d'impedàncies, filtratge

1.2 Resistències fixes, ajustables i potenciòmetres

La **resistència** és la dificultat que ofereixen els cossos al pas del corrent elèctric. Aquesta propietat la tenen tots els materials en major o menor grau. En el cas dels conductors, el valor de la resistència elèctrica és determinat per tres factors:

- **Tipus de material** que defineix una constant ρ anomenada **resistivitat**. Com millor conductor és el material, més baix és aquest paràmetre.
- **Secció** (S)
- **Longitud** (L)

De manera que com més secció, menys resistència, i com més longitud més resistència. L'expressió per calcular la resistència d'un cos és:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S}$$

La unitat de resistència és l'**ohm** (Ω).

En electrònica, una **resistència** és un component electrònic que té la propietat d'oposar-se al pas del corrent elèctric.

Una de les funcions primordials de les resistències és adequar els valors de tensió i d'intensitat de corrent de l'alimentació a aquells valors que es necessiten en els diferents punts d'un circuit.

Per tal d'aconseguir reduir al mínim els circuits, i per tant els equips, els fabricants de components electrònics intenten fer els elements cada vegada més petits, és a dir, ampliar al màxim l'escala d'integració. En el cas concret de les resistències, es tracta d'aconseguir el valor de resistència emprant el mínim volum possible, sempre que el consum de potència posterior de la resistència ho permeti (una resistència només podrà ser molt petita si ha de dissipar poca energia).

Les resistències es poden dividir en tres grups: lineals, variables i no lineals.

1. Resistències lineals fixes: aquests components de dos terminals presenten un valor nominal de resistència constant (predeterminat pel fabricant) i un comportament lineal. Es representa per un dels símbols que es poden veure en la figura 1.1.

Figura 1.1. Símbols de resistències

Les característiques de les resistències que hem de tenir en compte la majoria de les vegades són: **valor**, **tolerància** i **potència**.

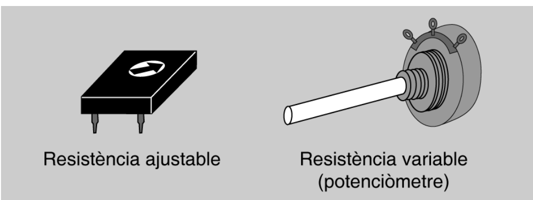
Les **especificacions tècniques** més importants que podem trobar en els fulls de característiques que ens subministra el fabricant són les següents:

- **Valor nominal**: és el valor òhmic que s'espera que tingui el component.
- **Tolerància**: és el marge de variació, respecte al valor indicat pel fabricant. Cada vegada la precisió és més gran, però és clar que per als fabricants és més fàcil, i sobretot menys costós, fer resistències d'un valor aproximat, que de valor exacte. S'expressa en tant per cent sobre el valor (± %).
- **Potència nominal**: és la potència (en watts) que la resistència pot dissipar sense deteriorar-se a la temperatura nominal de funcionament.
- **Tensió màxima de funcionament** ($V_{màx}$): és la màxima tensió contínua o alterna eficaç que el dispositiu no pot sobrepassar de manera continuada a la temperatura nominal de funcionament.
- **Temperatura màxima de funcionament** ($T_{màx}$): és la màxima temperatura ambient en què el dispositiu pot treballar sense deteriorar-se. Tingueu en compte que la dissipació de l'escalfor d'una resistència disminueix a mesura que augmenta la temperatura ambient en què està treballant.
- **Coeficient de temperatura** (C_t): és la variació del valor de la resistència amb la temperatura.
- **Soroll elèctric**: és el senyal no desitjat que la resistència afegeix al senyal principal i que provoca petites variacions de tensió.

2. Resistències variables: el seu valor de resistència pot variar entre un valor mínim, 0, i un valor màxim, R. Per exemple, si la resistència és de 10 kΩ = 10.000 Ω, podem fixar qualsevol valor entre 0 i 10.000 Ω.

Per tal d'aconseguir això, se'ls ha afegit un tercer terminal de connexió unit a un contacte mòbil anomenat *cursor* que es pot desplaçar a sobre de l'element resistiu proporcionant variacions en el valor de la resistència. Aquest tercer terminal pot tenir un desplaçament angular (giratori) o longitudinal (lliscant). Podem veure una representació esquemàtica de l'aspecte que té en la figura 1.2.

Figura 1.2. Aspecte d'una resistència ajustable i un potenciòmetre



Comportament com a reòstat

Tant en un potenciòmetre com en una resistència ajustable o *trimmer*, en deixar un dels seus terminals extrems a l'aire, es comportaran com un reòstat, encara que aquests estan dissenyats per suportar grans corrents.

Segons la funció que tenen en el circuit, aquestes resistències es denominen:

- **Potenciòmetres**: s'apliquen en circuits en què l'usuari varia la resistència des de l'exterior (controls d'àudio, vídeo, etc.).
- **Resistències ajustables**: es diferencien de les anteriors en el fet que el seu ajust és definitiu en el circuit en què van aplicades. Només hi pot accedir personal tècnic (controls de guany, polarització, etc.) i són de poca potència.
- **Reòstats**: són resistències variables en què un dels terminals extrems està elèctricament anul·lat. Solen ser de gran potència, és a dir, que poden circular-hi grans corrents.

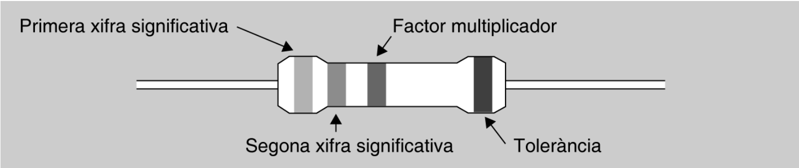
3. Resistències no lineals: es caracteritzen perquè el seu valor òhmic varia de manera no lineal, depenent de diferents magnituds físiques com ara la temperatura, la tensió, la llum, els camps magnètics, etc. Per aquest motiu, aquestes resistències també són considerades com a sensors. Entre les més comunes podem destacar les següents:

- **Termistors**: en aquestes resistències, el valor òhmic canvia quan varia la temperatura, i en podem destacar dos grans grups: **resistències de coeficient de temperatura negatiu** (**NTC**, la resistència baixa quan puja la temperatura) i **resistències de coeficient de temperatura positiu** (**PTC**, la resistència augmenta quan augmenta la temperatura).
- **Varistors**: aquests dispositius, també anomenats **VDR**, experimenten una disminució en el seu valor òhmic de resistència a mesura que augmenta la tensió aplicada en els seus extrems. Les aplicacions més importants d'aquest component es troben en protecció contra sobretensions, regulació de tensió i supressió de transitoris.
- **Fotoresistències**: aquestes resistències, també conegudes com a **LDR**, es caracteritzen pel fet que la resistència disminueix a mesura que augmenta la llum que hi incideix. Les principals aplicacions d'aquests components són en controls d'enllumenat, control de circuits amb relés, alarmes, etc.

1.2.1 Codi de colors per a resistències

S'acostuma a indicar el valor de les resistències mitjançant un codi de colors: normalment sobre un fons de color marró clar hi ha unes franges de color (figura 1.3), generalment n'hi ha quatre (cinc per a toleràncies del 2% o menys). Els colors, per si mateixos, tenen associat un valor, i la posició del color els dóna un significat determinat, com es descriu en la taula 1.2.

FIGURA 1.3. Codi de quatre colors



TAULA 1.2. Codificació de les resistències

Color	1a Banda	2a Banda	Multiplicador	Tolerància (%)
Negre	0	0	$\times$ 1	
Marró	1	1	$\times$ 10	1%
Vermell	2	2	$\times$ 100	2%
Taronja	3	3	$\times$ 1.000	
Groc	4	4	$\times$ 10.000	
Verd	5	5	$\times$ 100.000	0,5%
Blau	6	6	$\times$ 1.000.000	0,25%
Violeta	7	7	$\times$ 10.000.000	0,10%
Gris	8	8	$\times$ 100.000.000	0,05%
Blanc	9	9	$\times$ 1.000.000.000	
Or			0,1	5%
Argent			0,01	10%

Per conèixer el valor de la resistència, començarem per determinar la línia de color de la tolerància: or, argent, vermell, marró o cap color. Si les línies són de color or o argent, és clar que són les corresponents a la tolerància i hem de començar la lectura per l'extrem contrari. Si són de color vermell o marró i estan separades de les altres tres o quatre línies, començarem la lectura per l'extrem oposat. D'aquesta manera la primera franja de color indicarà la primera xifra del valor, la segona franja indicarà la segona xifra del valor, la tercera franja indicarà el nombre de zeros (o factor multiplicador) i l'última franja de color, la tolerància. Es pot donar el cas que hi hagi cinc colors en comptes de quatre. En aquest cas, en lloc de dues xifres significatives de color, n'hi haurà tres (tres xifres més multiplicador més tolerància).

1.3 Condensadors. Bobines

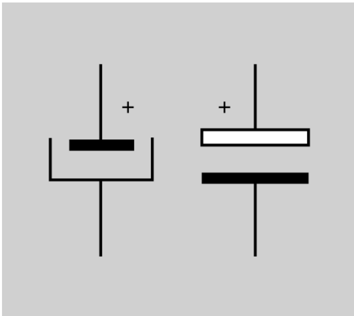
El condensador i la bobina són dos elements de circuit passius que són capaços d'emmagatzemar energia. En el cas dels condensadors, s'emmgagatzema energia elèctrica i en el cas de les bobines, energia magnètica.

Tant quan parlem de *condensadors* com de *bobines*, hi ha diferents tecnologies de fabricació, com en el cas de les resistències, que fan aparèixer tot tipus de peculiaritats en les seves característiques. A més, també hi ha condensadors i bobines fixos i variables.

1.3.1 Condensadors

El condensador emmagatzema energia en forma de camp elèctric. Aquesta propietat s'anomena **capacitància** o **capacitat** (**C**) i expressa la quantitat de càrregues elèctriques que és capaç d'acumular. Aquesta capacitat s'expressa en una unitat anomenada **farad** (**F**). Alguns símbols de condensadors apareixen en la figura 1.4.

Figura 1.4. Símbols de condensador electrolític i de tàntal



La capacitància o capacitat depèn de les característiques físiques del condensador:

- **Superfície de les plaques**: com més grans siguin les plaques, més capacitat té el condensador.
- **Distància entre les plaques**: com més distància hi hagi entre les plaques, menys capacitat té el condensador.
- **Material dielèctric**: els diferents materials que s'utilitzen com a dielèctrics tenen diferents graus de permitivitat. Com més permitivitat, més gran és la capacitat del condensador.

Els **condensadors** són uns dispositius electrònics que estan formats per dues plaques metàl·liques separades per un aïllant anomenat **dielèctric**. El dielèctric o aïllant és un material que evita el pas del corrent.

El que fa interessant el condensador és el fet que s'oposa als canvis bruscos de tensió, cosa que el fa molt útil en filtres i en estabilitzadors.

En cas de **connectar-lo a un circuit de corrent altern** (variable en el temps), el condensador, anàlogament a la resistència, s'oposa al flux de corrent, però a diferència de la resistència, aquesta oposició no s'anomena *resistència òhmica*, sinó **reactància capacitiva** (X_C) i es pot calcular mitjançant:

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

En què f és la freqüència del corrent altern en Hz i C és la capacitat del condensador en F. Observeu que com més alta és la freqüència, menys impedància té el condensador. A freqüència zero (corrent continu) és com un circuit obert.

1.3.2 Bobines

La bobina emmagatzema energia en forma de camp magnètic. Aquesta propietat s'anomena **inductància** (**L**). Aquesta inductància s'expressa en una unitat anomenada **henry** (**H**). El símbol de la bobina es pot veure en la figura 1.5.

Figura 1.5. Símbol de l'inductor o bobina

Quan circula corrent per un conductor es crea un camp magnètic. Com que la bobina està feta amb espires de conductor, les línies del camp magnètic passen pel centre de la bobina i tanquen el seu camí per la banda exterior.

Una característica interessant de les bobines és que s'oposen als canvis bruscos del corrent que hi circula. Això significa que a l'hora de modificar el corrent que circula per les bobines, com per exemple, quan es connecta i desconnecta d'una font de corrent directe, aquesta tractarà de mantenir la seva condició anterior. Una **inductància** és un element que s'oposa a les variacions del corrent elèctric; per tant, és evident que reaccionarà només davant el corrent altern. Podem dir que la inductància tendeix a impedir que el corrent augmenti o disminueixi.

En cas de **connectar-la a un circuit de corrent altern** (variable en el temps), la bobina, anàlogament a la resistència, s'oposa al flux de corrent, però a diferència de la resistència, aquesta oposició no s'anomena *resistència òhmica*, sinó **reactància inductiva** (X_L) i es pot calcular mitjançant:

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$$

En què f és la freqüència del corrent altern i L el valor de la inductància. Com més alta és la freqüència, més gran és la impedància. A freqüència zero (corrent continu), es comporta com un curtcircuit.

1.3.3 Codificació de valors de condensadors

A diferència de les resistències, no hi ha una única manera generalitzada d'expressar el valor d'un condensador. Entre d'altres, podem trobar les següents:

- **Codi de colors**: similar al de les resistències, és bastant obsolet.
- **Codificació directa**: es dóna directament el valor del condensador. Per exemple, **15p** vol dir **15 pF** (15 picofarads = 15 · 10^{-12} F), o **6n8** vol dir **6,8 nF** (6,8 nanofarads = 6,8 · 10^{-9}).

- **Mantissa i exponent**: es dóna la mantissa i l'exponent del multiplicador. El resultat seran pF (picofarads). Per exemple, **334** vol dir $\mathbf{33 \cdot 10^4}$ **pF = 330.000 pF = 330 nF**, o **102** vol dir $\mathbf{10 \cdot 10^2}$ **pF = 10 · 100 pF = 1.000 pF = 1 nF**.

1.4 Díodes semiconductors

Als Annexos del web hi trobareu un vídeo explicatiu dels díodes i un altre dels materials semiconductors en general.

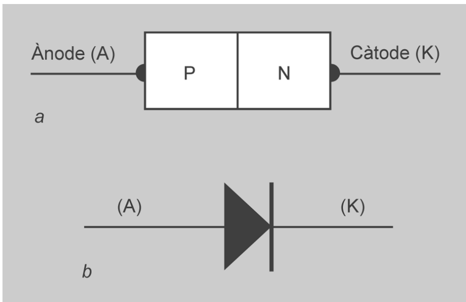
Un díode és un dispositiu que permet el pas del corrent elèctric en una única direcció. De manera simplificada, la corba característica d'un díode (I-V) consta de dues regions: per sota de certa tensió es comporta com un circuit obert (no condueix), i per sobre de certa tensió es comporta com un circuit tancat amb una resistència elèctrica molt petita (pràcticament un curtcircuit). A causa d'aquest comportament, se'ls sol denominar *rectificadors*, ja que són dispositius capaços de convertir un corrent altern en un de continu.

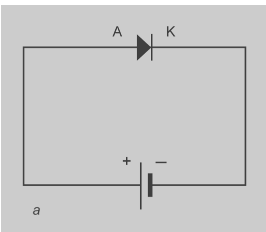
Zones P i zones N

Els dispositius semiconductors (díodes i altres) es basen, com el nom indica, en materials semiconductors com el silici. Per si sols són aïllants, però **dopant** (sobrecarregant) unes zones positivament (zones P) i unes altres negativament (zones N), en la frontera entre les zones es pot produir conducció elèctrica forçant-la mitjançant una tensió elèctrica d'unes característiques concretes.

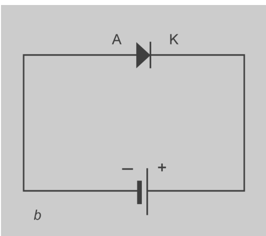
El díode està constituït per una unió P-N i disposa de dos terminals: l'**ànode** (**A**) connectat a la zona P, i el **càtode** (**K**) connectat a la zona N. En la figura 1.6 es pot veure un diagrama de la unió P-N i el símbol elèctric corresponent.

Figura 1.6. Unió P-N i símbol del díode





Díode polaritzat en directa



Díode polaritzat en inversa

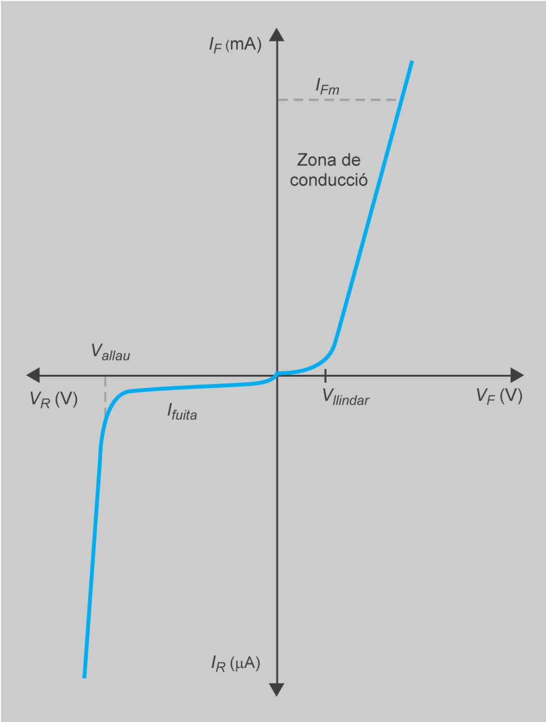
Quan es polaritza directament, l'ànode (A) es connecta al positiu de la pila i el càtode al negatiu. El díode condueix i es comporta com un curtcircuit o un interruptor tancat. La resistència que ofereix entre ànode i càtode en aquest cas és molt baixa, pràcticament nul·la.

En polarització inversa, connectem l'ànode al negatiu d'una pila i el càtode al positiu. El díode no condueix, i es comporta com un interruptor obert. La resistència entre ànode i càtode és molt elevada, pràcticament un circuit obert.

1.4.1 Corba característica. Zones de funcionament

Podem observar en la figura 1.7 la corba característica del díode.

Figura 1.7. Corba característica del díode



Distingim la **zona de conducció** (polarització directa) de la **zona de no-conducció** (polarització inversa). La **tensió de llindar** (V_{on}) és de 0,7 V per al díode de silici, i de 0,3 V per al de germani. S'ha de superar aquesta tensió en la polarització directa per considerar que el díode condueix. En polarització inversa hi ha un **tensió d'allau** que no s'ha de superar (el díode es trenca).

1.5 Rectificació. Filtres

Per *rectificació* s'ha d'entendre la conversió d'un corrent altern (per exemple, que canvia de signe) en un corrent continu (per exemple, que no canvia de signe, o sigui que pot variar en el temps, no necessàriament ha de ser *constant*).

L'instrument utilitzat per visualitzar l'evolució temporal dels senyals s'anomena *oscil·loscopi*. En podeu veure un tutorial als Annexos del web del mòdul.

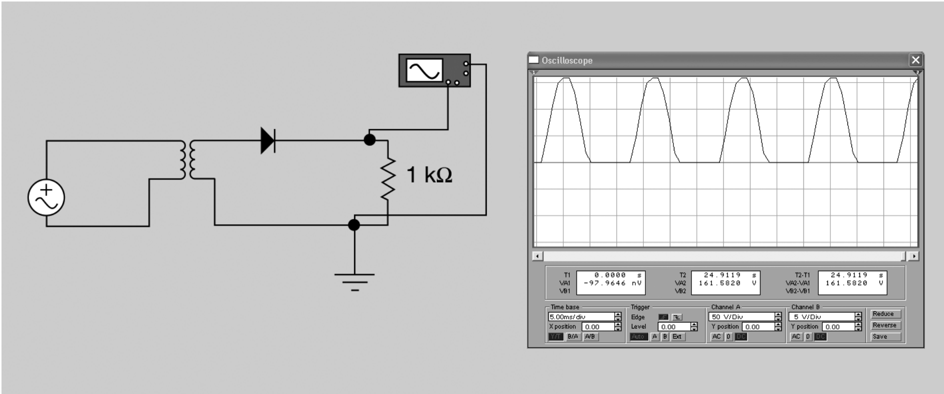
Fet aquest aclariment, el principal element utilitzat en qualsevol procés de rectificació del senyal elèctric és el díode. En funció del tipus de rectificació que es vulgui, la configuració dels díodes rectificadors és variada. Bàsicament, hi ha dos tipus de rectificació:

1. Rectificació de mitja ona
2. Rectificació d'ona completa o doble ona

1.5.1 Rectificació de mitja ona

El rectificador de mitja ona és el rectificador més senzill: utilitza únicament un díode. Se'n mostren l'esquema i el senyal de sortida en la figura 1.8.

Figura 1.8. Rectificació de mitja ona



Als Annexos del web hi trobareu un arxiu amb la simulació d'un rectificador de mitja ona.

La rectificació de mitja ona consisteix a eliminar un semiperíode de la tensió aplicada a l'entrada. Quan la tensió a l'entrada del rectificador sigui positiva, la tensió de l'ànode serà més gran que la del càtode, i per tant el díode conduirà, i quan la tensió sigui negativa, la tensió a l'ànode serà més petita que la del càtode, i per tant el díode no conduirà.

1.5.2 Rectificació d'ona completa o de doble ona

Als Annexos del web hi trobareu un arxiu amb la simulació d'un rectificador d'ona completa amb pont de díodes.

La majoria de fonts d'alimentació utilitzen aquest tipus de rectificador, en el qual els dos semiperíodes del senyal aplicat a l'entrada passen a tenir la mateixa polaritat, com es mostra en la figura 1.9.

El circuit més utilitzat que fa aquesta operació és l'anomenat **pont de Graetz** o **pont de díodes**, que apareix en la figura 1.10.

Als Annexos del web hi trobareu un arxiu amb la simulació d'un rectificador alternatiu d'ona completa amb transformador de presa mitja i solament dos díodes.

En aquest circuit condueixen dos díodes dels quatre a la vegada, en cada un dels semiperíodes del senyal de sortida. Això fa que les pèrdues siguin aproximadament de 2 volts, ja que són dos díodes polaritzats directament.

Aquest tipus de rectificador és tan comú que es venen els quatre díodes ja empaquetats en un sol component (figura 1.11).

Figura 1.9. Senyal rectificat de doble ona

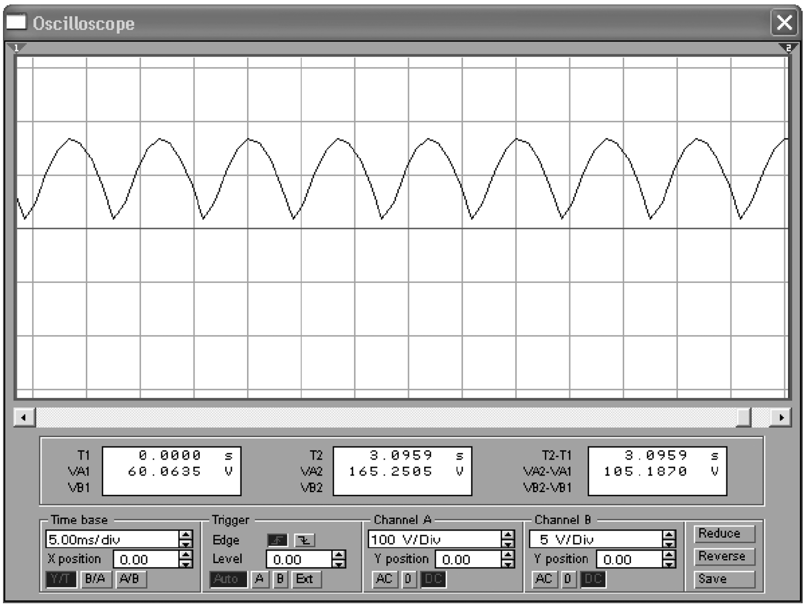


Figura 1.10. Rectificador amb pont de díodes

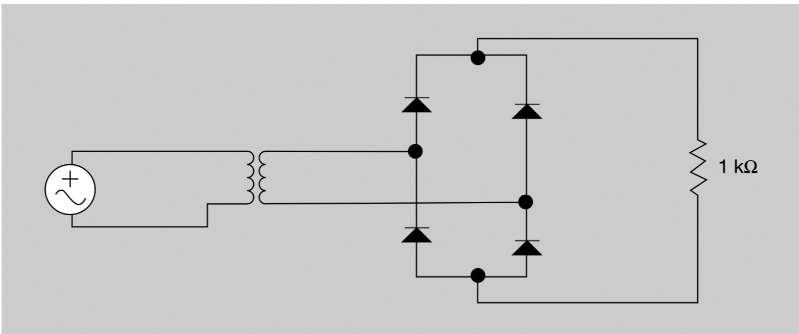
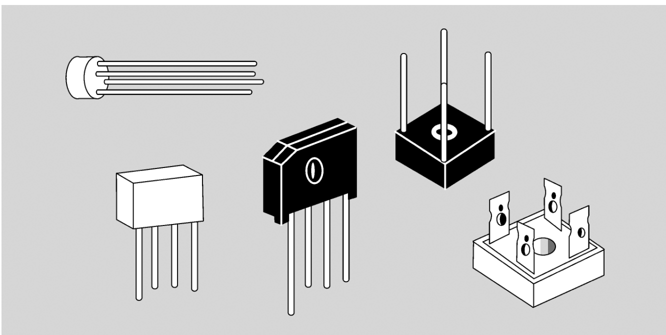


Figura 1.11. Ponts de díodes integrats



1.5.3 Filtres

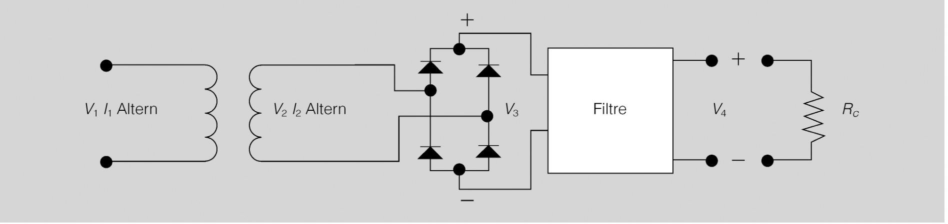
Als Annexos del web hi trobareu un arxiu amb la simulació d'un rectificador d'ona completa amb filtre C.

En fonts d'alimentació, l'objectiu del **filtre** és reduir la tensió d'arrissament per augmentar el valor mitjà de l'ona rectificada. S'intenta aconseguir la tensió de sortida més estable i constant possible (se'n pot veure la ubicació en la figura 1.12).

Tensió d'arrissament

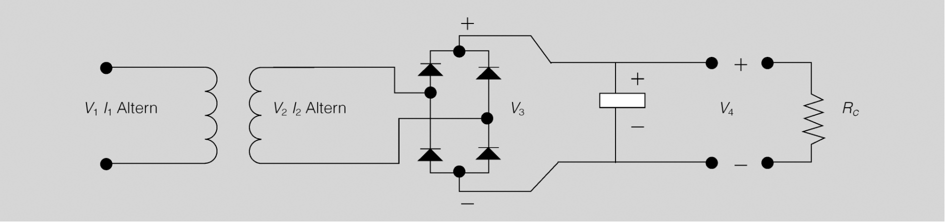
La tensió d'arrissament és la petita fluctuació o oscil·lació que pateix el senyal continu d'una font d'alimentació.

FIGURA 1.12. Filtre d'arrissament



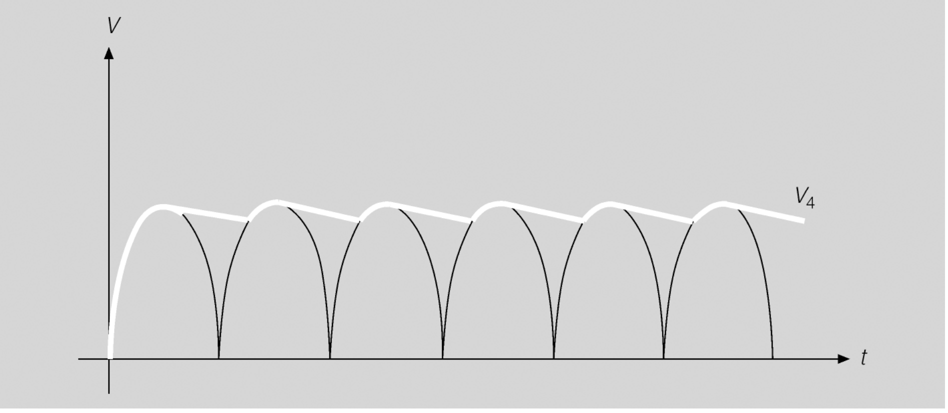
El filtre que s'utilitza més en les FA consisteix a col·locar un condensador en paral·lel amb la resistència de càrrega (figura 1.13).

FIGURA 1.13. Filtre d'un condensador



En la figura 1.14 es pot veure la tensió a la sortida del rectificador (**negre**) i la tensió a la sortida del filtre (**blanc**). D'aquesta manera se'n pot observar el funcionament.

FIGURA 1.14. Sortida del filtre d'arrissament



El condensador es va carregant fins a arribar al valor màxim de l'ona de sortida del rectificador; quan la tensió cau, el condensador es va descarregant i forma la recta que s'observa, fins que l'ona rectificada torna a ser més gran que la tensió acumulada al condensador. Aquest es torna a carregar fins al valor màxim de l'ona rectificada i es repeteix el cicle.

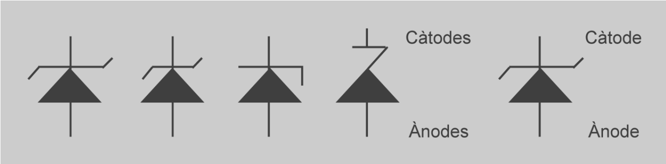
El pendent d'aquesta recta de descàrrega del condensador serà més petit com més temps trigui a descarregar-se el condensador. Això s'aconsegueix amb una capacitat gran.

Per al filtre hi ha altres opcions més complexes, com ara filtres LC.

1.6 Díodes Zener. Característiques i aplicacions

El díode Zener té els mateixos pius que el díode rectificador, i es representa amb els símbols de la figura 1.15.

Figura 1.15. Símbols elèctrics de díodes Zener

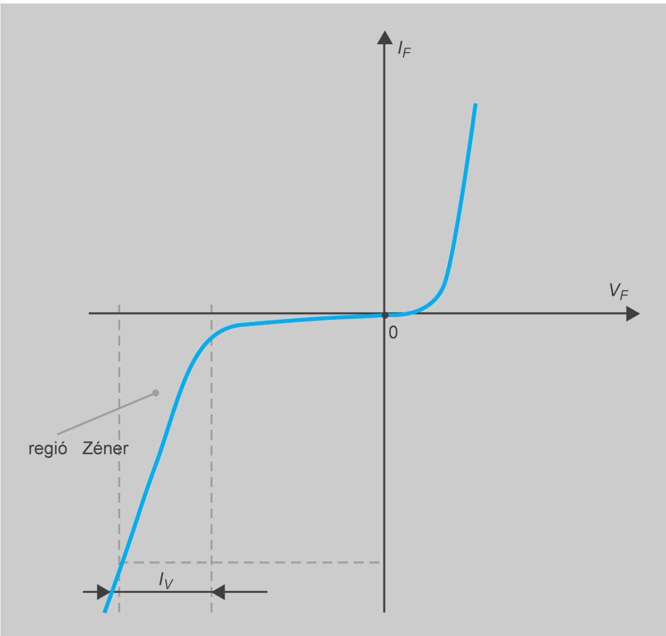


En polarització directa es comporta com un díode normal, però en polarització inversa, quan arriba a la tensió d'allau, estabilitza la seva tensió entre el càtode i l'ànode al valor de **tensió de Zener** (V_z). La tensió de Zener pràcticament no canvia si hi ha variacions de corrent, és a dir, es manté la V_z i el díode no es destrueix.

La principal aplicació dels díodes Zener és l'**estabilització de tensió**, fent servir la seva **tensió de Zener** a aquest efecte.

En la figura 1.16 es pot veure la corba característica tensió-corrent d'un díode Zener qualsevol. Es pot observar que a la part esquerra de la gràfica (tensions negatives, o sigui, en inversa), en lloc de tenir una tensió d'allau (ruptura del díode) tenim una *tensió de Zener*, que en realitat varia molt poc, a la qual es queda *clavat* el díode quan l'assoleix.

Figura 1.16. Corba característica d'un díode Zener



Els paràmetres més rellevants del díode Zener són la tensió de Zener (V_z) i la potència (P_z), que en dispositius de baixa potència és de 0,4 W o 1,3 W.

1.7 Components actius. Característiques i aplicacions

Per definició, els components actius són aquells que poden fer alguna de les tasques següents:

- **Excitar circuits**: proporcionar senyals d'alimentació o d'entrada al circuit.
- **Donar guanys**: amplificar senyals del circuit.
- **Controlar**: prendre decisions automàticament sobre el comportament del circuit.

A grans trets, es podria dir que els elements actius són aquells que necessiten alimentació extra per fer la seva tasca (per exemple, un resistència no necessita alimentació extra, sinó que treballa directament amb el senyal que li arriba, però un amplificador *engreixa* el senyal que li arriba gràcies a una aportació externa d'energia, que és l'alimentació de l'amplificador). Els components actius més habituals són:

- **Díodes**: basats en uns materials anomenats *semiconductors*, són capaços de conduir corrent elèctric en només un sentit i a més fer-ho de manera controlada, segons les seves característiques.
- **Tiristors** o **SCR**: són un tipus de díode controlable per tensió.
- **DIAC** i **TRIAC**: també anomenats *díodes* i *tríodes d'alterna*, són dispositius semiconductors que poden conduir corrent en tots dos sentits.
- **Transistors**: dispositius semiconductors capaços d'amplificar un corrent o d'obrir-li i barrar-li el pas.
- **Amplificadors operacionals**: conjunt de transistors integrats en un únic circuit que té dues entrades i una sortida, i que serveix per fer operacions matemàtiques entre les entrades. Segurament és el circuit més versàtil de l'electrònica analògica.
- **Components digitals**: circuits lògics i programables.

Les principals aplicacions d'aquests components apareixen en la taula 1.3.

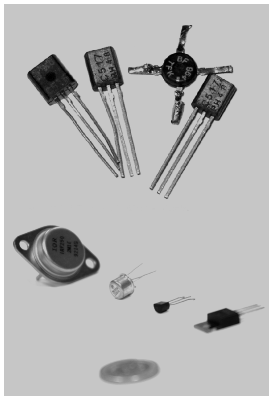
Taula 1.3. Aplicacions dels components actius

Component	Aplicacions principals
Díode	Rectificació, regulació
Tiristor	Control de sistemes de potència

TAULA 1.3 (continuació)

Component	Aplicacions principals
DIAC, TRIAC	Control de sistemes de potència
Transistor	Amplificació, oscil·lació, commutació, rectificació
Amplificador operacional	Amplificació, oscil·lació, commutació, rectificació, filtratge, suma, resta, integració, derivació
Components digitals	Sistemes lògics programables i no programables

1.8 El transistor. Polarització



Diferents transistors amb diferents encapsulacions

El **transistor** és un dispositiu semiconductor d'estat sòlid que s'utilitza per a l'amplificació i la commutació, i té tres terminals: un petit corrent o voltatge aplicat a un dels terminals controla el corrent en els altres dos. El transistor és el component principal de tota l'electrònica moderna, i el més utilitzat des del seu descobriment.

Hi ha dos tipus bàsics de transistors, els bipolars (BJT) i els d'efecte camp (FET), i cadascun funciona de manera diferent. El transistor bipolar s'anomena així perquè el canal de conducció principal usa tant electrons com buits per transportar el corrent elèctric principal. Els d'efecte camp (també anomenats *unipolars*) solament usen un dels dos tipus de transportador (o buits, o electrons).

Història del transistor

El transistor va ser inventat als Laboratoris Bell el desembre de 1947 (mostrat per primera vegada el 23 de desembre) per John Bardeen, Walter Houser Brattain i William Bradford Shockley, als quals es va concedir el premi Nobel de física el 1956. Irònicament, s'havien proposat crear un transistor d'efecte camp (FET) predit per Julius Edgar Lilienfeld ja el 1925, però al final van descobrir l'amplificació de corrent en el transistor amb punts d'unió que posteriorment evolucionà fins a convertir-se en el transistor bipolar (BJT).

BJT: de l'anglès *bipolar junction transistor* o *transistor d'unions bipolars.*

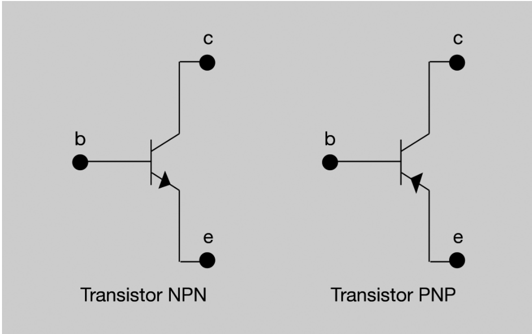
Un **transistor bipolar** (BJT) és un tipus de transistor, un dispositiu que pot funcionar com a amplificador o commutador fet amb semiconductors dopats. El BJT està compost per diverses capes de material dopat, sia NPN o PNP.

Els transistors bipolars són components semiconductors, formats per la unió de tres cristalls de silici contaminats amb algun tipus d'impuresa i que poden funcionar com a amplificadors. L'ordre de col·locació dels cristalls dóna lloc als dos tipus de transistors: els **NPN** i els **PNP**. Tots dos tipus de transistors tenen tres terminals (vegeu la figura 1.17), connectats internament a cada un dels cristalls, anomenats: **base -b-**, **col·lector -c-** i **emissor -e-**.

Transistors NPN i PNP

Els cristalls de tipus *P* són cristalls de silici als quals s'han afegit impureses amb cristall d'indi o gal·li o qualsevol altre element del grup 3 de la taula d'elements químics. Els cristalls de tipus *N* són el resultat d'afegir al silici àtoms del grup 5 com pot ser l'arsènic. En els transistors NPN, s'utilitzen dos cristalls de silici del tipus *N* i un del tipus *P*. En el transistor PNP, es fan servir dos cristalls de silici de tipus *P* i un de tipus *N*.

Figura 1.17. Símbols de transistors BJT

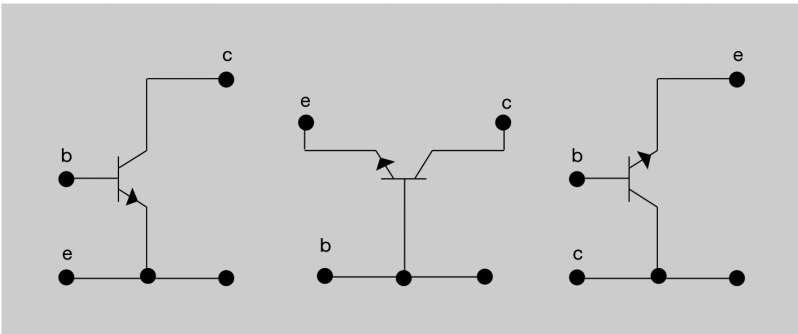


Als Annexos del web hi trobareu un vídeo explicatiu dels transistors i un altre de l'efecte transistor.

El transistor és un element amplificador que proporciona a la sortida un corrent proporcional a l'aplicat a l'entrada. El transistor té tres terminals, però abans hem vist que un amplificador té quatre terminals, dos d'entrada i dos de sortida. Per aquest motiu, s'utilitza una de les tres potetes del transistor com a terminal comú a l'entrada i a la sortida.

D'acord amb això, hi ha tres possibles configuracions, tal com es mostra en la figura 1.18: **emissor comú (EC)**, **base comuna (BC)** i **col·lector comú (CC)**.

Figura 1.18. Muntatge en EC, BC i CC



El muntatge en EC és el més utilitzat per amplificar, ja que el guany de corrent és elevat. En el muntatge BC, el guany de corrent és pràcticament igual a 1, la resistència d'entrada és molt petita i la de sortida molt gran. Per acabar, en el CC el guany de corrent és elevat i presenta una resistència d'entrada petita i una de sortida elevada.

1.8.1 Zones de funcionament

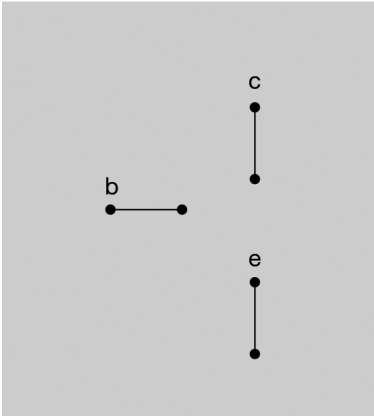
El transistor té tres zones de funcionament:

- Tall
- Saturació
- Activa

En circuits de commutació, es fa treballar el transistor en saturació i tall. Si voleu utilitzar el transistor per amplificar, ha de treballar en la zona activa.

Quan funciona en **tall**, el transistor es comporta com un interruptor obert entre el col·lector i l'emissor. Observeu la figura 1.19.

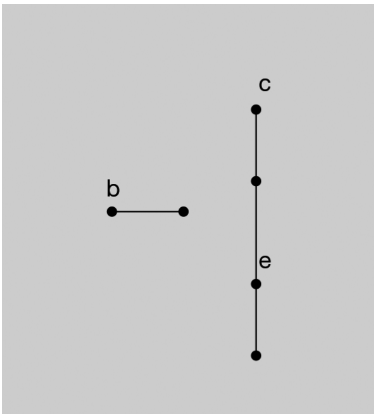
Figura 1.19. Circuit equivalent d'un transistor en tall



Si agafeu com a referència el circuit EC, els valors de tensió entre base i emissor són més baixos que 0,7 V (V_{BE} < 0,7 V), la tensió entre el col·lector i l'emissor (V_{CE}) és igual a la tensió al col·lector (V_C). En tots tres terminals les intensitats són nul·les, ja que estan en circuit obert.

En **saturació**, el transistor es comporta com un interruptor tancat entre el col·lector i l'emissor. Observeu la figura 1.20.

Figura 1.20. Circuit equivalent d'un transistor en saturació



Tenint com a referència el circuit EC, la tensió V_{CE} és aproximadament 0,2 V, la tensió V_{BE} = 0,7 V i la intensitat que circula pel terminal col·lector és la mateixa que a l'emissor.

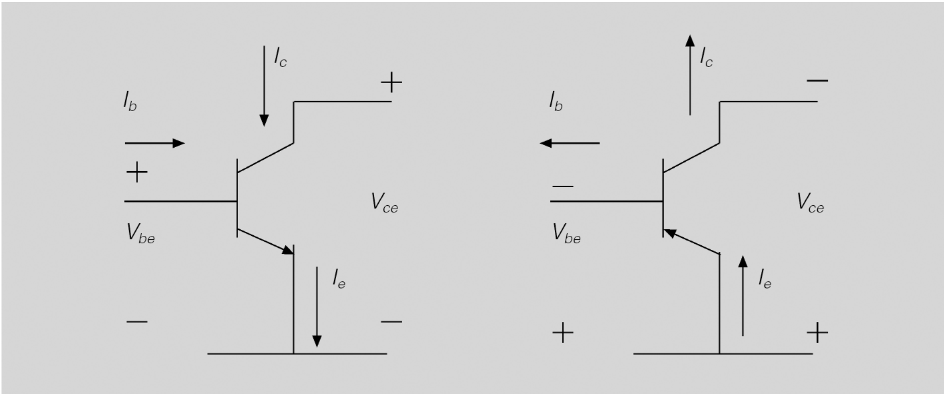
1.8.2 Circuits de polarització

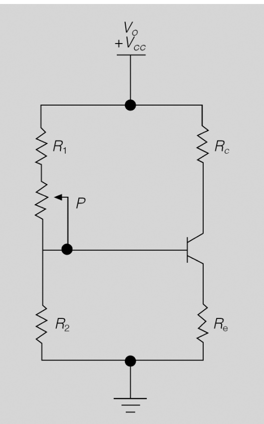
La polarització del transistor consisteix a col·locar el seu punt de treball en zona activa. Això s'aconsegueix amb una xarxa de resistències.

Per poder treballar en zona activa i fer circuits amplificadors, el transistor ha d'estar correctament polaritzat. Per poder-lo polaritzar s'utilitzen resistències.

La polarització d'un transistor NPN és diferent de la d'un PNP. En la figura 1.21 podeu observar la polarització d'un transistor NPN i la d'un PNP. Podeu comprovar que les polaritats de les tensions són diferents i el sentit dels corrents també.

FIGURA 1.21. Polarització de transistor NPN i polarització de transistor PNP





Circuit de polarització universal

Perquè el transistor bipolar pugui amplificar és necessari polaritzar cada un dels seus terminals, tal com es mostra en la figura 1.21. En els NPN, el col·lector ha de ser sempre positiu respecte a l'emissor, en canvi, en els PNP és el contrari. Si els transistors estaven polaritzats es generen tres corrents diferents en cada un dels terminals que compleixen les equacions següents:

$$I_e = I_c + I_b$$

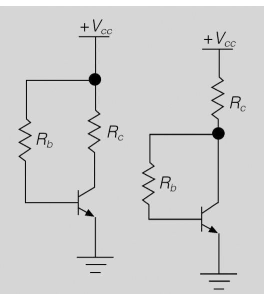
$$I_c = \beta \cdot I_b$$

En què β és el guany de corrent en continu, i és una característica de cada transistor.

Hi ha diferents tipus de circuits de polarització, però el més utilitzat és el **circuit de polarització universal**, ja que proporciona una gran estabilitat.

Polarització fixa i amb realimentació

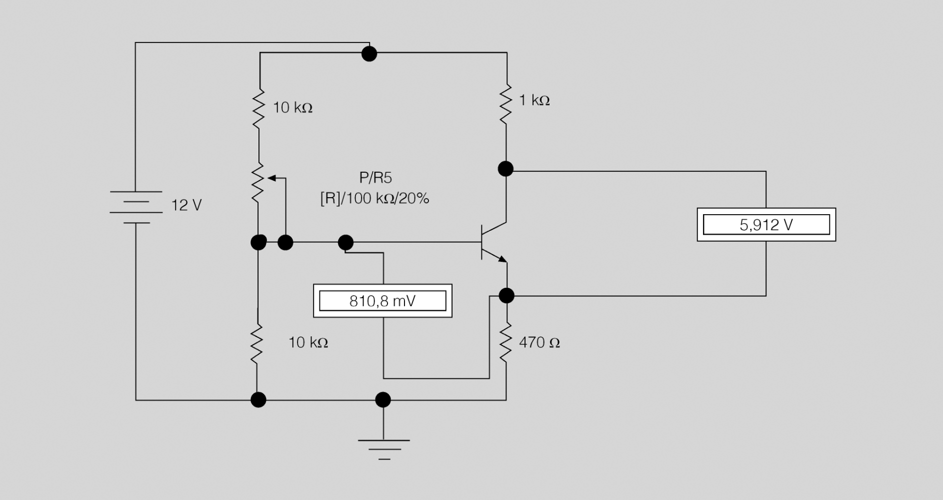
Els circuits de polarització fixa i amb realimentació són els circuits més bàsics utilitzats. Però presenten un problema: amb el pas del temps les característiques del transistor es veuen afectades (per la calor que desprèn, la humitat, les intensitats que la travessen, etc.), cosa que fa que deixi de treballar en una zona activa i que el circuit no funcioni. Com que en aquest tipus de polarització no hi ha cap resistència ajustable, no es podria reparar, s'hauria de canviar el transistor.



Circuits de polarització fixa i polarització amb realimentació

En la figura 1.22 el circuit està format per quatre resistències i un potenciòmetre. Un cop fixat el valor de cada resistència, es varia el potenciòmetre fins que la tensió V_{ce} és igual a la meitat de la tensió d'alimentació. D'aquesta manera ens assegurem que el transistor es troba en zona activa.

Figura 1.22. Transistor NPN polaritzat en una zona activa



V_{ce}: tensió entre el terminal col·lector i el terminal emissor del transistor

En la figura 1.22 podeu veure el transistor amb el circuit de polarització universal. S'han col·locat dos voltímetres que mesuren les tensions V_{be} i V_{ce} per comprovar si està en una zona activa. S'ha anat variant el potenciòmetre fins que la V_{ce} és aproximadament la meitat de l'alimentació, en el nostre cas la meitat de 12 V. El valor de V_{ce} que podeu aconseguir és 5,912 V i observeu que la V_{be} = 0,810 V. Amb aquests dos valors podeu assegurar que el transistor està en zona activa.

1.8.3 Recta de càrrega i punt de treball (Q)

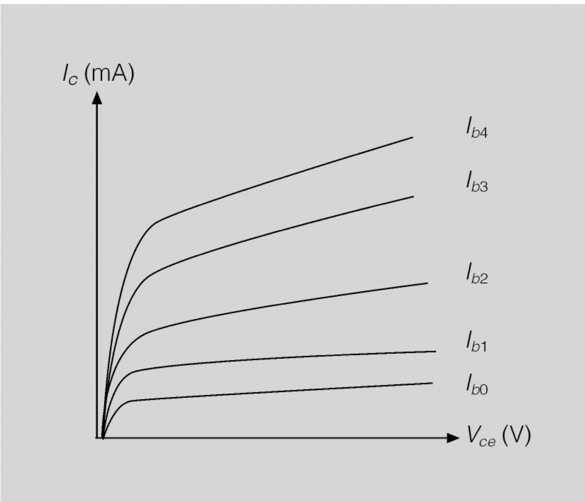
Recta de càrrega i punt de treball

La recta de càrrega s'obté a partir de les resistències utilitzades en el circuit de polarització del transistor, la qual es representa sobre les corbes característiques del transistor que ens dóna el fabricant. S'utilitza per poder determinar en quina zona funciona el transistor. El punt de treball és un punt qualsevol de la recta de càrrega. Segons en quina posició es troba, el transistor estarà en saturació, en tall o actiu.

Als Annexos del web hi trobareu un vídeo explicatiu dels amplificadors.

Per poder representar la recta de càrrega i determinar el punt de treball s'utilitzen les corbes característiques del transistor. Aquestes corbes són la representació gràfica de les magnituds més importants del transistor (V_{be}, V_{ce}, I_b, I_c). Per consideracions pràctiques, el muntatge EC és el més utilitzat i per aquest motiu les concretarem en aquest muntatge.

Figura 1.23. Corbes característiques del transistor en muntatge EC



En la figura 1.23 podeu veure les corbes característiques d'EC. Sobre aquesta gràfica es dibuixa la recta de càrrega i es determina el punt de treball (***Q***). La recta de càrrega s'obté del circuit de polarització. En el circuit de polarització universal, la recta de càrrega és igual a:

$$V_{CC} = V_{ce} + I_c \cdot (R_c + R_e)$$

Per representar la recta ens faran falta dos punts. Aquests punts es poden veure gràficament en la figura 1.24:

- El **primer punt** el trobeu quan la recta talla amb l'eix V_{ce}, llavors la $I_c = 0$; substituint, teniu que:

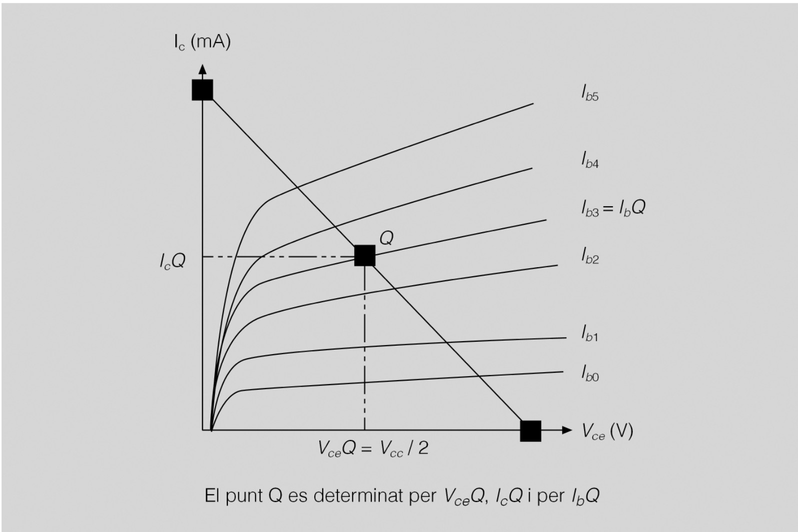
$$V_{CC} = V_{ce}$$

- El **segon punt**, quan la recta passa per l'eix I_c, llavors $V_{ce} = 0$, i teniu que:

$$I_c = \frac{V_{CC}}{R_c + R_c}$$

Als Annexos del web del mòdul hi trobareu una completa anàlisi d'una etapa amplificadora de classe A, amb les simulacions associades per tal de recrear-ne el funcionament.

Figura 1.24. Representació gràfica de la recta de càrrega i del punt de treball Q



El **punt de treball** es col·loca al mig de la recta de càrrega. Observeu que en el punt Q la V_{ce} és igual a la meitat de la V_{CC}: d'aquesta manera el transistor es troba en zona activa i amplifica el senyal d'entrada al màxim sense cap distorsió.

2. Fonts d'alimentació

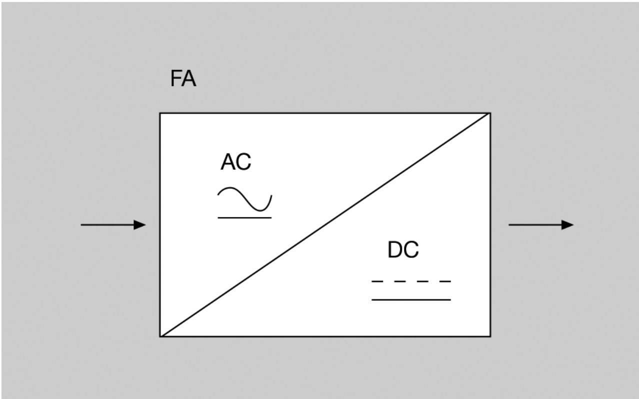
Qualsevol equip electrònic —sia un televisor, un DVD, un computador, un equip d'àudio, etc.— disposa d'una font d'alimentació (FA). Aquesta s'encarrega de subministrar les diferents tensions per tal que la resta de circuits de l'equipament funcioni correctament. **Si falla la FA, falla tot l'equip**.

Font d'alimentació d'un ordinador personal (PC)

La tensió per a l'ús domèstic i industrial se subministra en corrent altern; per tant, serà necessari transformar aquest senyal altern en un senyal continu. El seu símbol apareix en la figura 2.1.

En un endoll domèstic tenim 230 V 50 Hz.

Figura 2.1. Símbol de la font d'alimentació



> La funció de la font d'alimentació és transformar la tensió alterna (corrent altern, AC) a tensió contínua (corrent continu, DC) de la manera més estable possible, sense sorolls, i així subministrar les tensions necessàries per al funcionament correcte dels components electrònics que formen part d'un aparell.

Soroll

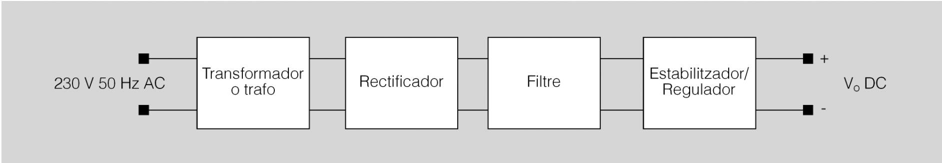
El soroll és el senyal no desitjable que apareix conjuntament amb el senyal de sortida i, si és prou gran, en modifica la forma i el valor. Per exemple, quan fem servir l'assecador davant d'un televisor en marxa es produeixen fluctuacions de la imatge.

2.1 Fonts lineals: estabilització i regulació amb dispositius integrats

Als Annexos del web hi trobareu un vídeo explicatiu dels sistemes d'alimentació elèctrica.

En la figura 2.2 podeu veure la connexió de cadascun dels blocs d'una font lineal. A l'entrada tenim un senyal AC i a la sortida DC; com que és un senyal continu hem de diferenciar el terminal positiu del negatiu. Després del bloc rectificador, el senyal tractat ja té polaritat. A la sortida de cada un d'aquests blocs tenim un tipus d'ona diferent; per tant, observant-la, podrem detectar avaries, mals funcionaments i verificar que funciona correctament. Per poder fer aquests mesuraments és necessari saber utilitzar correctament l'**oscil·loscopi** i el **multímetre**.

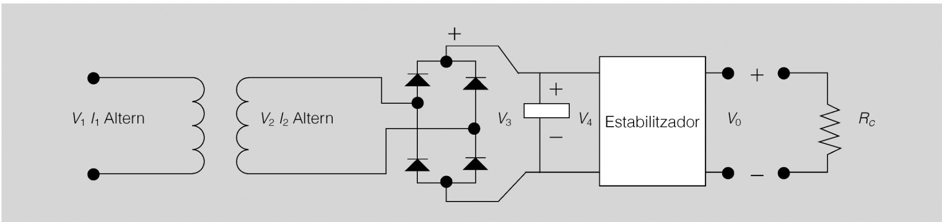
Figura 2.2. Diagrama de blocs de la font d'alimentació (FA)



> Una font d'alimentació lineal està formada pels blocs següents:
>
> - Transformador
> - Rectificador
> - Filtre
> - Estabilitzador o regulador

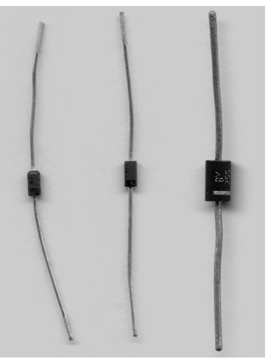
L'estabilitzador és l'últim bloc de la FA i, com el seu nom indica, té la funció d'eliminar les fluctuacions de la tensió de sortida, és a dir, estabilitzar-la a una tensió contínua (figura 2.3). Noteu que en el circuit de la figura la tensió de sortida del pont de díodes és la mateixa que la de sortida del filtre ($V_3 = V_4$).

Figura 2.3. Font d'alimentació amb estabilitzador



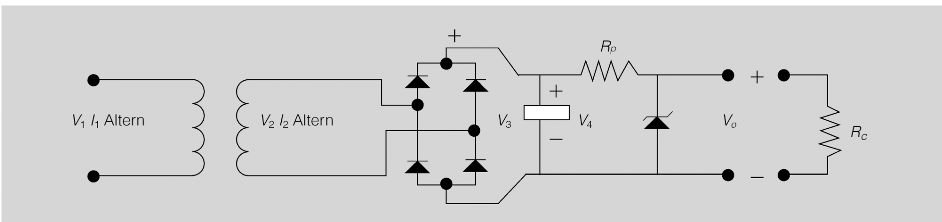
2.1.1 Estabilitzador amb díode Zener

En la figura 2.4 podeu veure l'esquema final d'una FA amb l'esquema de connexió de l'estabilitzador.



Diferents díodes Zener

Figura 2.4. Esquema de FA amb díode Zener

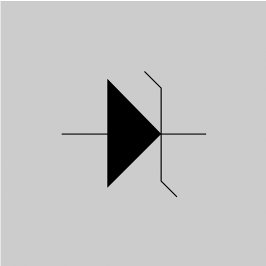


El díode Zener s'utilitza en sentit invers en el circuit estabilitzador.

El **díode Zener** és un element electrònic bàsic, que en sentit directe es comporta com un díode normal. Però, al contrari del díode, quan es polaritza en sentit invers, també condueix, i manté en els extrems una tensió constant, fins i tot si varia el corrent invers que el travessa.

El símbol del díode Zener és el que apareix en la figura 2.5.

Figura 2.5. Símbol del díode Zener



Les característiques principals del díode Zener són les següents:

- ***V**$_z$*: tensió de Zener, que és aquella que es manté constant en els extrems del díode quan està polaritzat inversament.
- ***I**$_{z\,mín}$*: valor mínim en què el díode es manté constant en la zona inversa.
- ***P**$_z$*: potència màxima que pot arribar a dissipar.

Per trobar el valor de la resistència de protecció (R_p) del díode Zener per a un circuit com el de la figura 2.4, utilitzarem la fórmula següent:

$$R_p = \frac{V_4 - V_z}{I_o + I_{zmin}}$$

En què V_4 és la tensió de sortida del filtre i I_o és la intensitat que es vol lliurar a la càrrega.

El valor de V_z **del díode** que utilitzarem ha de ser igual a la tensió desitjada a la sortida V_o, ja que el díode Zener mantindrà aquest valor constant (V_z = V_o).

2.1.2 Estabilitzador amb reguladors integrats

Els reguladors de tensió més habituals són els de tres terminals. Hi ha diferents encapsulacions, com les que apareixen en la figura 2.6, depenent del consum de potència que han de tenir.

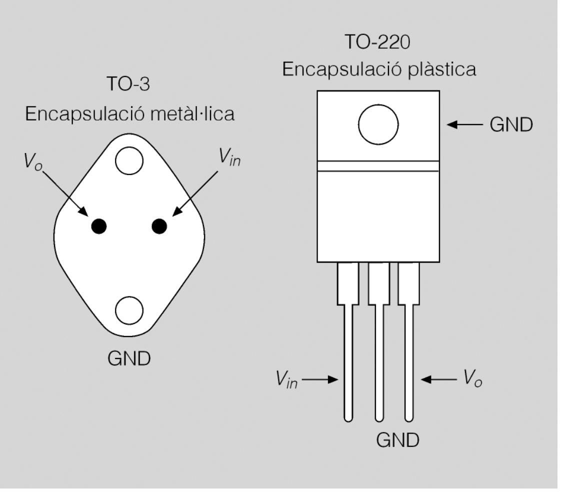
Als Annexos del web hi trobareu simulacions de circuits estabilitzadors amb Zener, amb i sense càrrega.

Valors típics de díodes Zener

Díodes Zener de V_z igual a: 5V1 = 5,1 volts, 8V2 = 8,2 volts... Normalment en l'encapsulació va imprès aquest valor.

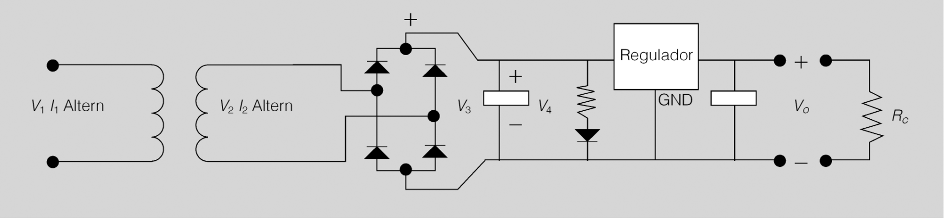
Els **reguladors** són circuits formats per un nombre elevat de components, integrats dins d'una única encapsulació, que són capaços de proporcionar una tensió constant a la sortida. Els reguladors redueixen la tensió d'arrissament unes 100.000 vegades, cosa que esdevé negligible a la pràctica.

FIGURA 2.6. Encapsulacions de reguladors de tensió



En la figura 2.7 apareix una font d'alimentació amb regulador integrat.

FIGURA 2.7. Esquema de FA amb regulador



Les característiques o requisits del circuit de la figura 2.7 són:

- La tensió entre V_o i GND serà de valor fix i estable, i dependrà del tipus de regulador.
- La tensió d'entrada al regulador V_4 ha de ser uns 3 volts superior a la V_o per tal d'assegurar el funcionament correcte del circuit regulador.
- El condensador de sortida evita possibles oscil·lacions o impureses.

Radiador com a dissipador

Quan utilitzem un radiador per dissipar la calor, la superfície d'unió s'ha de protegir mitjançant una pasta conductora de la calor i de l'electricitat, per tal de millorar-ne la transmissió, omplint possibles forats i impedint la corrosió de l'alumini produïda pel pas d'un corrent.

Alguns reguladors permeten el muntatge d'un radiador mitjançant un orifici (com és el cas de l'encapsulació TO-220). L'orifici és metàl·lic i coincideix amb el terminal GND. El radiador es col·locarà verticalment, i és millor utilitzar el tipus d'aleta anoditzada i negra, ja que dissipa més calor que les d'alumini blanc. L'objectiu principal és refredar el regulador; si no ho aconseguim, s'han d'utilitzar altres mètodes de refrigeració com poden ser ventiladors, com es fa, per exemple, en la FA d'un ordinador personal.

Els reguladors més utilitzats són els **78XX** i **79XX**. La nomenclatura utilitzada és descrita en la taula 2.1.

TAULA 2.1. Descripció de la nomenclatura dels reguladors de tensió

Primer grup	Lletres que indiquen el fabricant
Segon grup	**78** si la tensió de sortida és positiva, **79** si és negativa
Tercer grup	**M** si $I_{omàx}$ = 0,5 A, **S** si $I_{omàx}$ = 2 A, cap si $I_{omàx}$ = 1,5 A
Quart grup	Valor nominal de la tensió de sortida, en dues xifres
Cinquè grup	**C** si la temperatura de funcionament va de 0 a 155 ºC, cap si va de —55 a 155 ºC
Sisè grup	Una lletra que fa referència al tipus d'encapsulació

En la secció Activitats d'aquesta unitat hi trobareu un complet exercici d'anàlisi i disseny d'una font regulada amb un integrat LM317.

A part dels reguladors de sortida fixa, n'hi ha d'ajustables, com el component **LM317**.

2.2 Fonts commutades: característiques, fonaments i blocs funcionals

Les fonts commutades són circuits electrònics que converteixen un corrent continu en un corrent polsant de freqüència alta, que després es convertiran una altra vegada en un corrent continu.

Les fonts commutades es van desenvolupar inicialment per a aplicacions militars i aeroespacials en els anys seixanta. La raó principal d'aquest desenvolupament es basava en el fet que tenien un pes i un volum molt més reduïts que les fonts lineals.

D'aleshores ençà s'han desenvolupat diverses topologies i circuits de control que han esdevingut d'ús comú en fonts commutades per a aplicacions industrials i comercials.

Sobretensió

La sobretensió és una tensió que supera els límits determinats pel fabricant de l'element connectat a la font d'alimentació.

Avui en dia la majoria dels equips que utilitzem tenen alimentacions de 12 V.

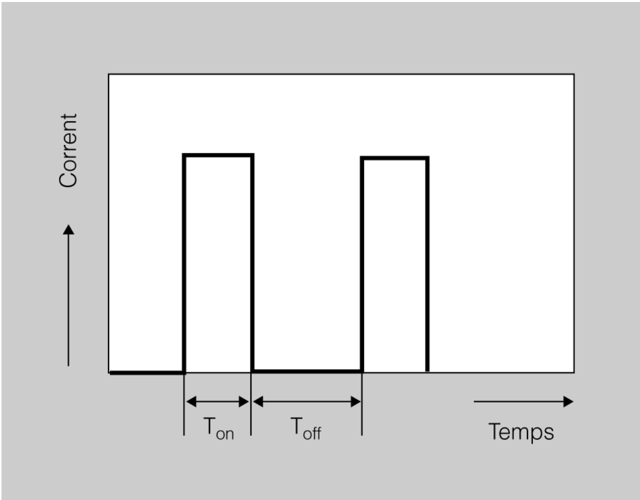
Els avenços de la tecnologia han implicat també que aquests equips comportin un alt grau de sofisticació i que, per tant, siguin molt sensibles als sorolls, les sobretensions o els canvis bruscos en les tensions d'alimentació.

La sofisticació dels equips electrònics ha fet imprescindible que les fonts d'alimentació regulades garanteixin l'estabilitat de la tensió que alimenta l'equip. D'altra banda, per poder aconseguir potències de sortida d'uns 100 a 500 W amb les baixes tensions que necessiten els transistors actuals (12 V), calen corrents d'alimentació alts (20 A o més), la qual cosa ha implicat que les antigues fonts basades en transformadors voluminosos s'hagin substituït per fonts més segures i més petites, les **fonts commutades**.

2.2.1 Reguladors commutats a la freqüència pròpia

Les fonts commutades són circuits que generen la seva freqüència de treball, per la qual cosa es diu que són reguladors a la freqüència pròpia, per diferenciar-los dels reguladors que funcionen a la freqüència de la xarxa elèctrica. Poden funcionar a una freqüència fixa o variable, i fan servir convertidors a partir d'un corrent continu per generar un corrent polsant de cicle de treball o freqüència variable. En la figura 2.8 podem veure el temps de variació del cicle de treball.

Figura 2.8. Temps de sortida del convertidor

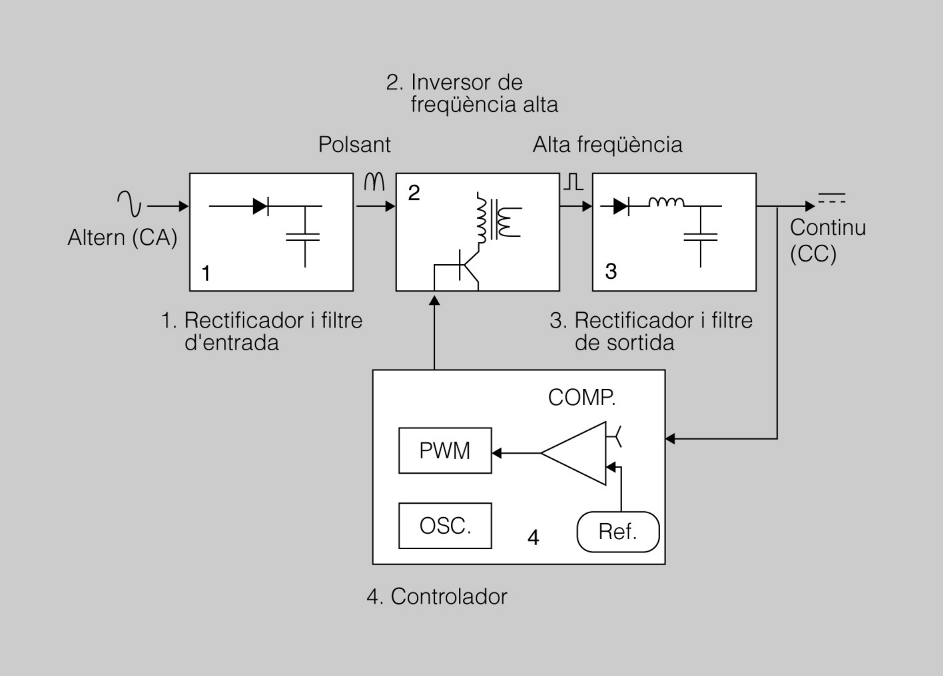


2.2.2 Configuracions bàsiques

Les **fonts commutades** són circuits relativament complexos, però sempre en podem diferenciar quatre blocs constructius bàsics, com es mostra en la figura 2.9.

- El primer bloc rectifica i filtra la tensió alterna d'entrada i la converteix en una tensió contínua polsant.
- El segon bloc s'encarrega de convertir la tensió contínua en una ona quadrada d'alta freqüència (de 10 a 200 kHz). Aquesta és aplicada a una bobina o al primari d'un transformador.
- El tercer bloc rectifica i filtra la sortida d'alta freqüència del bloc anterior i dóna una tensió contínua pura.
- El quart bloc s'encarrega de regular l'oscil·lació del segon bloc. Aquest bloc consisteix en un oscil·lador de freqüència fixa, una tensió de referència, un comparador de tensió i un modulador d'amplada de pols (*pulse width modulator*, PWM).

Figura 2.9. Esquema de blocs d'una font commutada



Modulador d'amplada de pols (PWM)

Un modulador d'amplada de pols (PWM) és un circuit que genera una freqüència en funció d'un senyal d'entrada en comparació amb un altre de referència, de manera que l'amplada del pols varia en funció d'aquest senyal d'entrada.

El **modulador d'amplada de pols** (PWM) rep el pols de l'oscil·lador i en modifica el cicle de treball segons el senyal del comparador, el qual confronta la tensió contínua de la sortida del tercer bloc amb la tensió de referència.

En la majoria dels circuits de fonts commutades trobarem el primer i el quart blocs com a elements pràcticament invariables. En canvi, el segon i el tercer tindran diferents tipus de configuracions.

De vegades el quart bloc estarà format per un circuit integrat; altres vegades, però, ens trobarem amb circuits totalment transistoritzats. El segon bloc és realment l'ànima de la font i tindrà configuracions bàsiques anomenades **reductor** (*buck*), **elevador** (*boost*) i **reductor-elevador** (*buck-boost*).

Filtre LC: filtre format per bobina i condensador.

Reductor (buck)

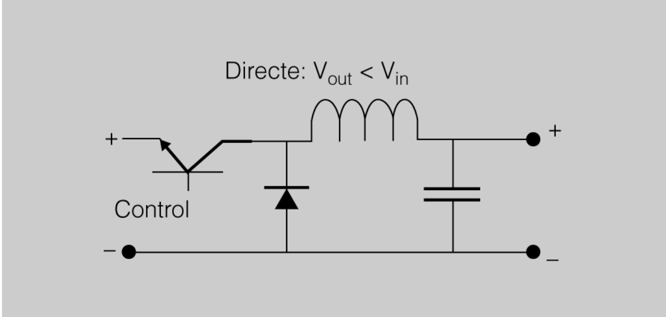
El reductor és un circuit, de configuració bàsica, del segon bloc d'una font commutada (figura 2.10); aquest circuit interromp l'alimentació i proveeix d'una ona quadrada d'amplada de pols variable un simple filtre LC. La tensió es produeix per mitjà de la variació de la freqüència de treball del transistor. La característica més important d'aquest circuit és que **la tensió de sortida V_{out} és més petita que la tensió d'entrada V_{in}**:

V_{out} és l'abreviatura de *tensió de sortida*. V_{in} és l'abreviatura de *tensió d'entrada*.

$$V_{out} < V_{in}$$

En la majoria dels casos, n'hi ha prou amb aquesta regulació i només caldrà ajustar lleument la relació de voltes en el transformador per compensar les pèrdues per l'acció de càrrega resistiva, la caiguda en els díodes i la tensió de saturació dels transistors en la commutació.

Figura 2.10. Circuit reductor



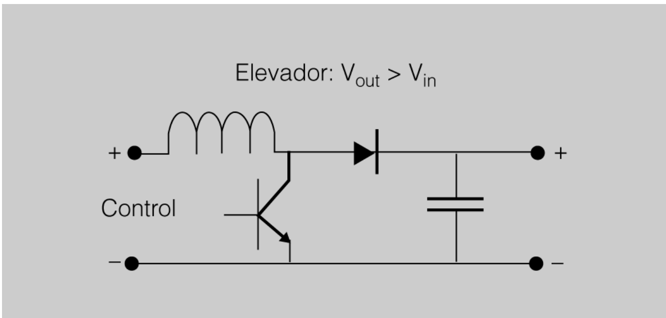
Elevador (boost)

L'elevador és un circuit, de configuració bàsica, del segon bloc d'una font commutada (figura 2.11). Aquest dispositiu presenta un funcionament una mica complex: el circuit elevador emmagatzema l'energia en la bobina i aplica l'energia emmagatzemada més la tensió d'alimentació a la càrrega. Aquest procediment és molt utilitzat en sistemes de flaix fotogràfics o d'ignició de l'automotor per recarregar la càrrega capacitativa. També es fa servir com un molt bon carregador de bateries. Aplica sempre una quantitat fixa de potència a la càrrega sense fixar-se en la seva impedància.

La característica més important d'aquest circuit és que la tensió de sortida V_{out} és més gran que la tensió d'entrada V_{in}:

$$V_{out} > V_{in}$$

Figura 2.11. Circuit elevador (boost)

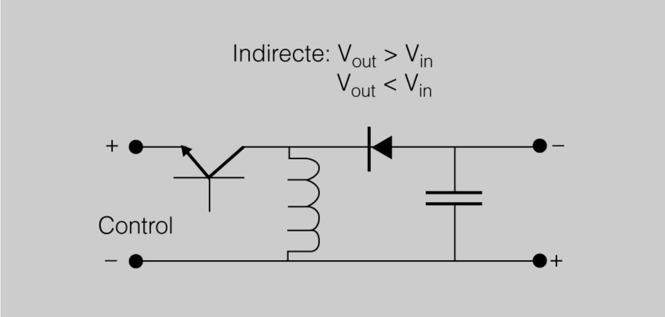


Un *flyback* és un circuit del tipus del reductor-elevador (*buck-boost*) però amb aïllament.

Reductor-elevador (buck-boost)

El reductor-elevador és un circuit, de configuració bàsica, del segon bloc d'una font commutada (figura 2.12). Aquest circuit, també anomenat ***flyback***, és una evolució dels circuits reductor i elevador, però presenta una diferència fonamental respecte d'aquests, atès que aplica a la càrrega només l'energia emmagatzemada en la inductància.

Figura 2.12. Circuit reductor-elevador



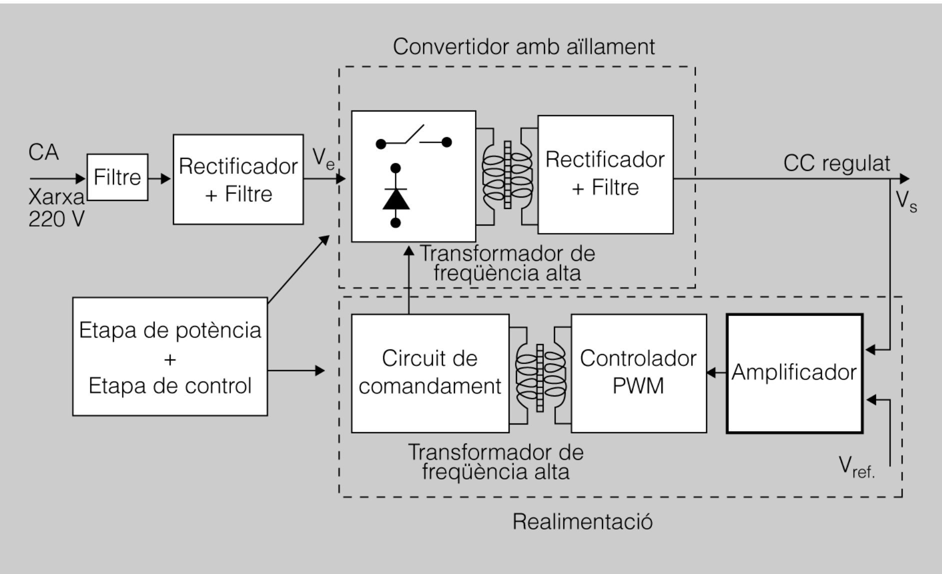
Com podem observar, el sistema elevador només pot regular quan la tensió de sortida V_{out} és més gran que la tensió d'entrada V_{in}, mentre que el *flyback* o reductor-elevador pot regular sempre, independentment de si la tensió de sortida és més petita o més gran que la tensió d'entrada.

2.2.3 Esquema d'una font commutada completa

En l'esquema de la figura 2.13 podem veure una font commutada de tipus professional en blocs. Hi podrem observar cadascuna de les parts que la componen.

L'etapa de potència és la part del circuit per on circula molt corrent, normalment regulat per un transistor o tiristor.

Figura 2.13. Blocs d'una font commutada professional



L'etapa de control és la part del circuit que controla en funció d'uns senyals establerts. Hi circula molt poc corrent.

Hi podem distingir tres grans blocs: el primer, comú a totes les fonts, comprèn el rectificador i el filtre; el segon, que és el bloc del convertidor amb aïllament, pot ser perfectament qualsevol dels que confirmen les configuracions bàsiques de les fonts commutades o d'altres configuracions disponibles (*forward*, semipont, pont, etc.), i el tercer, anomenat **realimentació**, està format per un amplificador comparador, un controlador d'amplada de pols (**PWM**) i un altre convertidor de CC que governarà el circuit de comandament del primer convertidor. Com podem veure, hi ha dos convertidors de CC que garanteixen una gran estabilitat i control.

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 . . . 12

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).

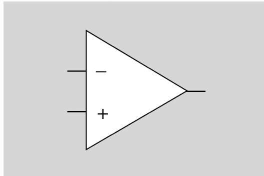
Resultats d'aprenentatge

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

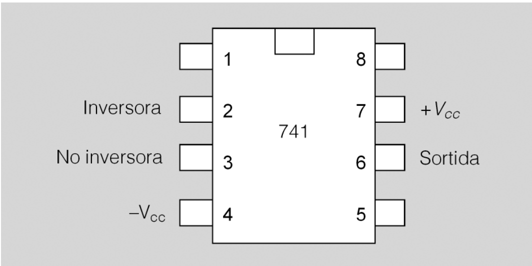


Símbol de l'AO

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_+***).

Figura 1.1. Amplificador Operacional 741



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

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.

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**.

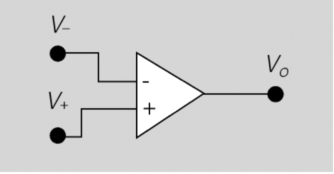
Depenent de les connexions externes que es realitzin a AO i els components utilitzats per realitzar-les, el circuit farà una funció o una altra.

1.2 L'amplificador operacional com a comparador

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

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

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 V i -15 V (és a dir, amb FA simètrica). Trobeu el valor de V_o si V_+ = 2 V i V_- = 1,5 V.

Solució:

Com que $V_+ > V_-$, la sortida V_o = 15 V.

Als Annexos del web hi trobareu un arxiu per simular un comparador basat en amplificadors operacionals.

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.

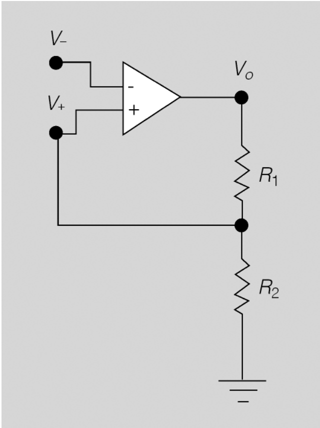
Les dues tensions de referència per les quals la sortida commuta són:

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

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

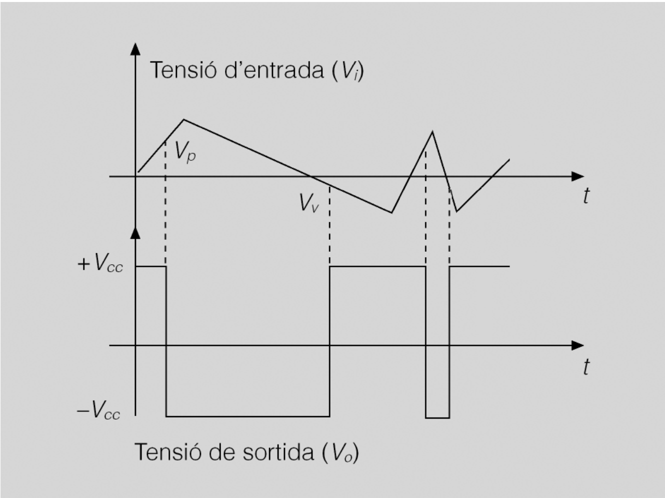
A on V_p és la tensió de pic i V_v és la tensió de vall (o tensió de pic negativa).

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 amplifiacadors 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:

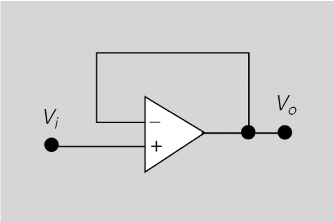
- **Seguiment de tensió**: quan l'amplificació valgui 1, és a dir, que la sortida és exactament igual que l'entrada (es fa servir quan un senyal de molt poca potència s'ha d'injectar a un circuit que només de connecta-lo faria malbé el senyal, amb un seguidor de tensió tenim un senyal de la mateixa forma 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 dóna 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).

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**.

Seguidor de tensió: $V_o = V_i$

FIGURA 1.5. Seguidor de tensió



Als Annexos del web hi trobareu un arxiu per simular un seguidor basat en amplificadors operacionals.

Comprovació del funcionament del seguidor

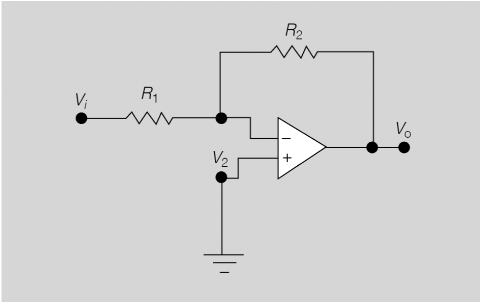
Al circuit de la figura 1.5, queda patent que $V_+ = V_i$ i que $V_- = V_o$.

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

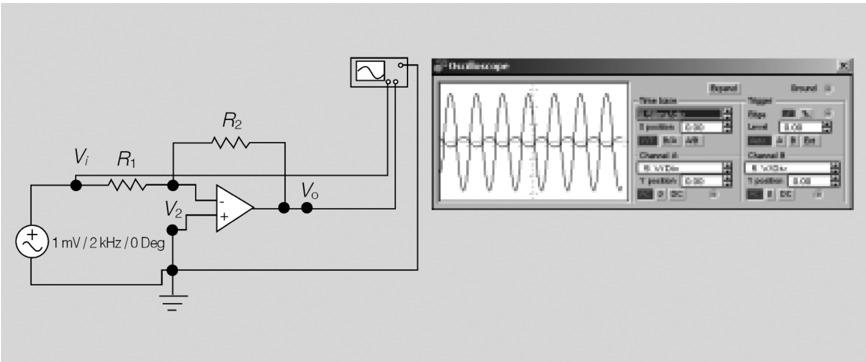


Als Annexos del web hi trobareu un arxiu per simular un inversor basat en amplificadors operacionals.

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 KΩ i R_1 = 1 KΩ quin serà el guany del circuit? Si V_i = 1 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:

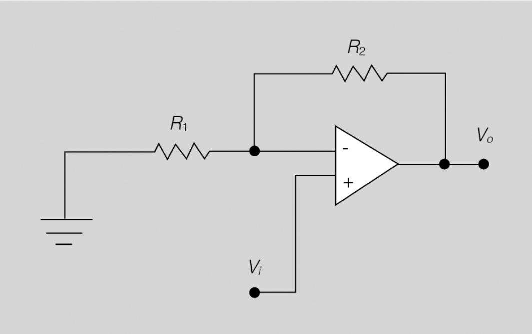
$$\frac{V_o}{0,001} = -10$$

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

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



Als Annexos del web hi trobareu arxius per simular amplificadors no inversors basats en amplificadors operacionals.

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 KΩ i R_1 = 1 KΩ quin serà el guany del circuit? Si V_i = 1 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:

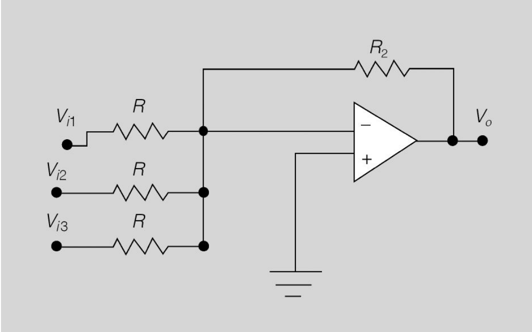
$$\frac{V_o}{0,001} = 11$$

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

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



Als Annexos del web hi trobareu un arxiu per simular un sumador basat en amplificadors operacionals.

La sortida de l'amplificador sumador es:

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

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 KΩ i R = 1 KΩ quin serà el guany del circuit? Si V_{i1} = 1 mV, V_{i2} = 3 mV i V_{i3} = 7 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

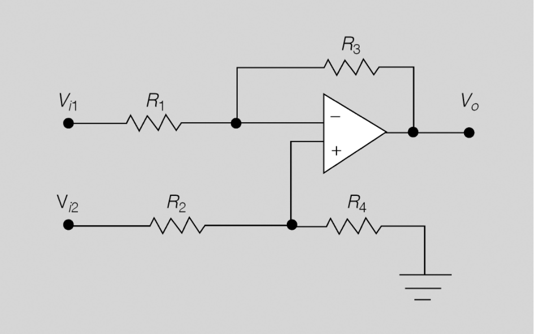
L'amplificador diferencial és molt utilitzat en instrumentació, en circuits de mesura de temperatures, de pes, deformacions, etc. La seva estructura es pot entendre com l'afegit de l'estructura no inversora i de l'estructura inversora. L'únic requisit és que ambdues estructures tinguin el mateix guany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

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

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

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

FIGURA 1.10. Amplificador diferencial



Als Annexos del web hi trobareu un arxiu per simular un amplificador diferencial basat en amplificadors operacionals.

Exemple d'amplificador diferencial

Si R_4 = R_3 = 10 KΩ i R_2 = R_1 = 1 KΩ quin serà el guany del circuit? Si V_{i1} = 1 mV i V_{i2} = 3 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:

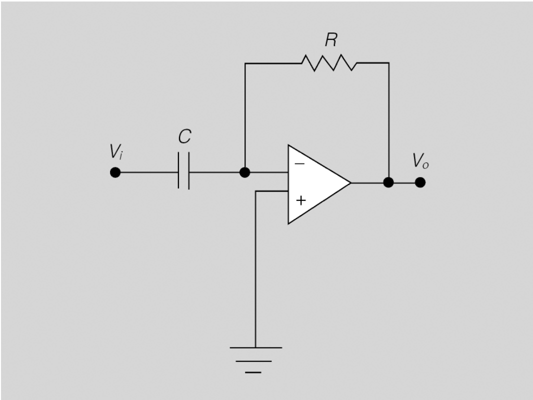
- Amplificadors logarítmics
- Integradors
- Derivadors o diferenciadors (no confondre amb els amplificadors diferencials)
- Filtres actius (filtres amb amplificació)
- Portes digitals (per a això no s'usen perquè hi ha elements millors, però es podria)
- Convertidor de senyals
- Oscil·ladors i generadors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

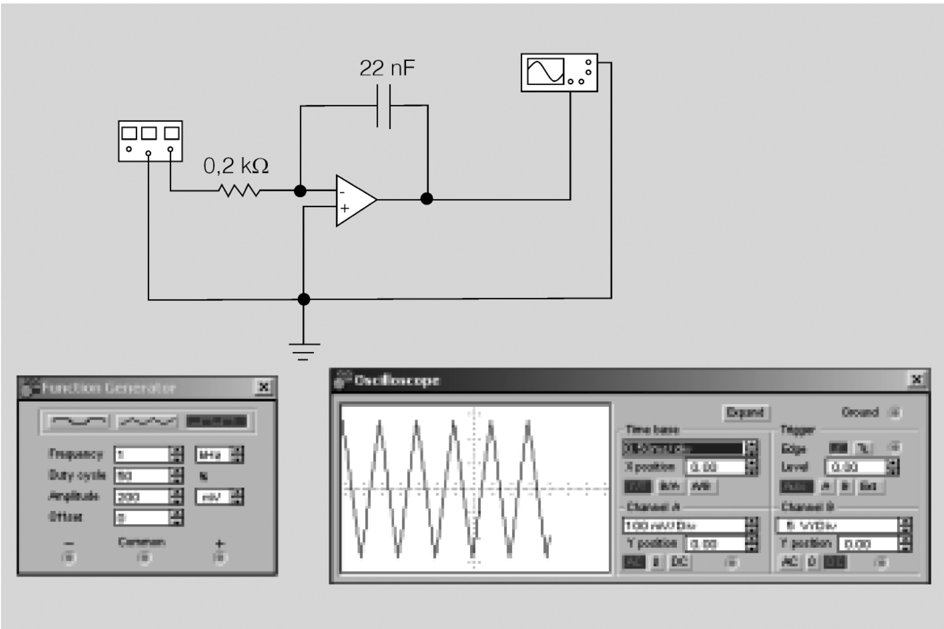
Si observeu el circuit de la figura 1.11, podeu veure que s'aplica un senyal triangular a l'entrada del circuit, i a la sortida s'obté un senyal quadrat. El circuit realitza la conversió d'un senyal triangular a quadrat.

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 quadrat i a la seva sortida s'obté un senyal triangular.

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 dóna a la sortida la derivada de la funció que té a l'entrada, d'aquí el seu nom.

Als Annexos del web hi trobareu un arxiu per simular un derivador i un integrador basats en amplificadors operacionals.

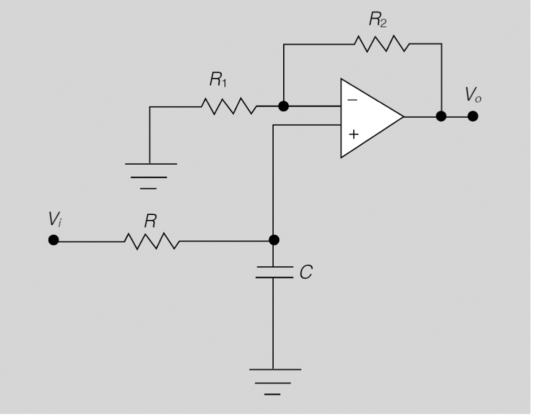
Anàlegament al derivador, el circuit de la figura 1.12 es diu *integrador* perquè en termes matemàtics el que fa és calcular la integral de la funció que té a l'entrada. La integral és l'operació recíproca o inversa de la derivada, per això un circuit pot desfer el que fa l'altre.

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 $BW = F_s - 0 = F_s$.

Als Annexos del web hi trobareu un arxiu per simular un filtre passabaix basat en amplificadors operacionals.

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 kΩ, R_2 = 20 kΩ, R = 1 kΩ i C = 22 nF. Calculeu:

a) El guany i el *BW*.

b) Si introduïu un senyal V_i = 1 mV a 2 kHz, quin valor tindria V_o?

c) Si introduïu un senyal V_i = 5 mV a 10 kHz, quin valor tindria V_o?

Solució:

a) 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 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:

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

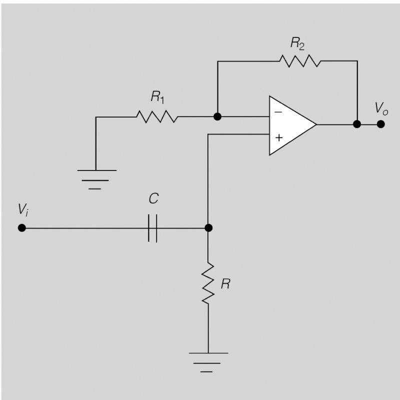
c) En aquest apartat, la V_i té una freqüència de 10 kHz, es troba fora del marge d'amplificació. Per tant, idealment a la sortida no tindreu cap tipus de senyal: V_o = 0 (això no és ben bé així, però es pot considerar així en primera aproximació).

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.

Als annexos del web hi trobareu un arxiu per simular un filtre passaalt basat en amplificadors operacionals.

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:

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

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

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

1.4.4 Filtre de pas de banda

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.

Un filtre de pas de banda (figura 1.15) no és res més que un filtre passaalt connectat en cascada amb un filtre passabaix. 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:

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

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

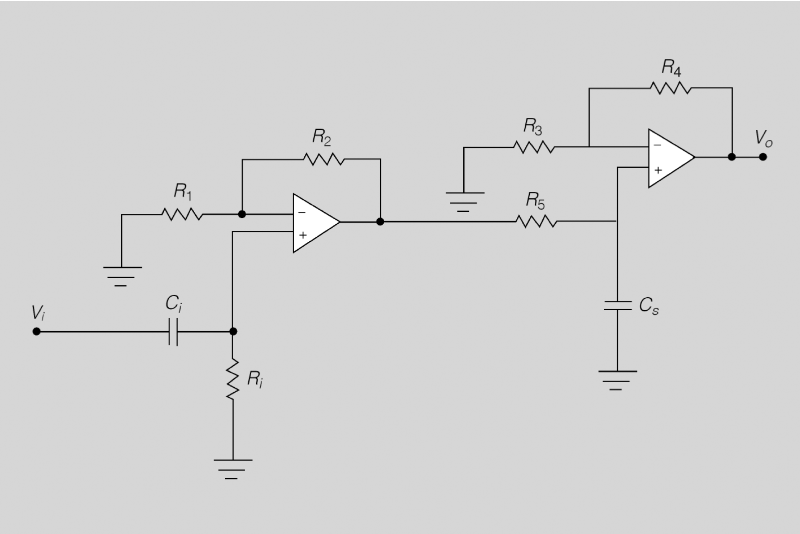
$$G_{Vt} = G_{V1} \cdot G_{V2}$$

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

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

Als Annexos del web hi trobareu un arxiu per simular un filtre passabanda basat en amplificadors operacionals.

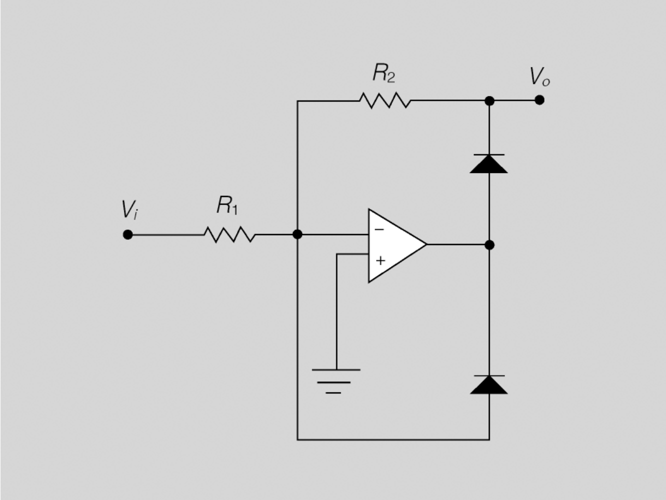
Figura 1.15. AO filtre de pas de banda



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

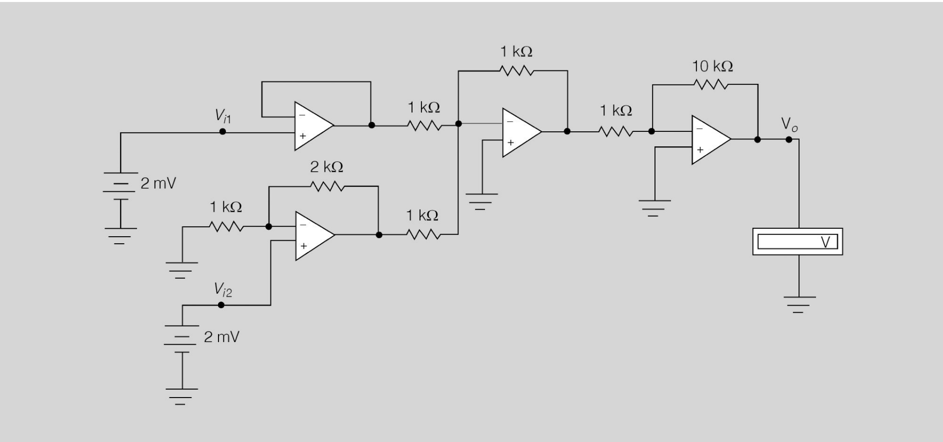


En el circuit de la figura 1.16 rectifica el senyal V_i, que pot ser d'un valor petit (de l'ordre dels mV), i a la sortida s'obté una V_o rectificada i amplificada, on el guany de tensió és determinat per:

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

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 nop 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 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 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 sinusoïdal 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:

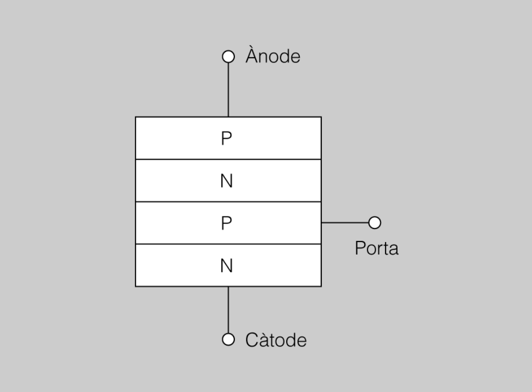
- **Tiristors**, també anomenats *rectificadors controlats de silici* o **SCR** (de l'anglès *silicon controlled rectifier*).
- **Triacs** o triodes per a corrent altern.
- **Diacs** o díodes per a corrent altern.

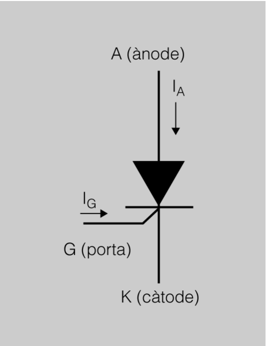
2.1.1 Tiristors

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)

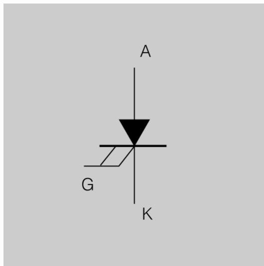
- Capacitat per suportar altes tensions.
- Capacitat per controlar grans potències.
- Rapidesa relativa

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.

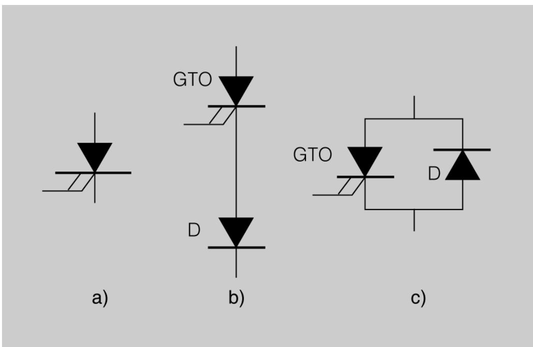


Símbol elèctric del GTO

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.

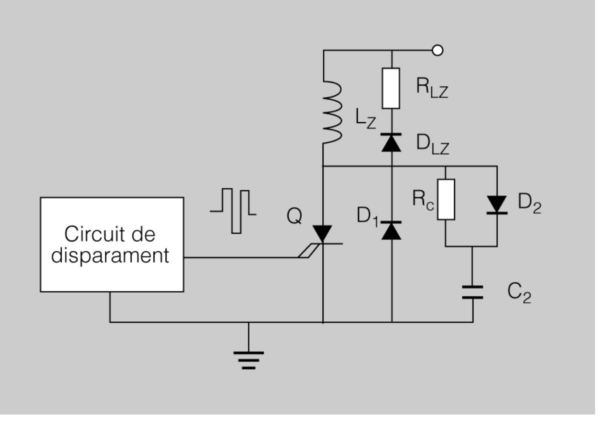
La característica inversa del GTO és equivalent a una resistència que és incapaç de bloquejar tensió o de conduir un corrent significatiu. Per al corrent continu, el dispositiu no presenta cap problema. Això no obstant, si es vol bloquejar qualsevol tensió inversa, caldrà connectar en sèrie un díode 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.

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.

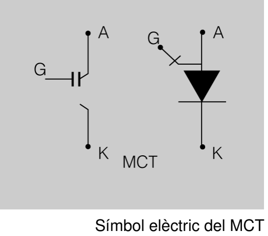
Figura 2.3. Configuració de comandament



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 dóna senyal—, i un altre durant el qual és negatiu i no dóna cap senyal.

MCT

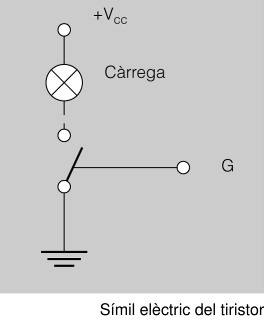


Símbol elèctric del MCT

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.

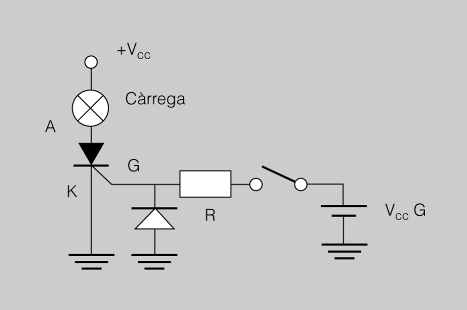


Símil elèctric del tiristor

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

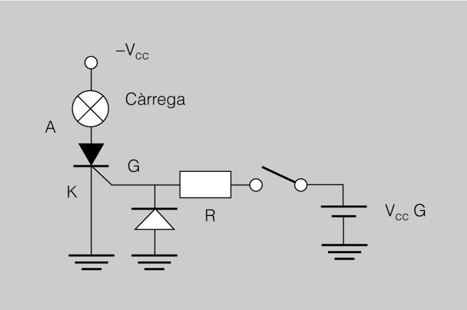


Si, al contrari, polaritzem inversament (figura 2.5), és a dir, si apliquem el potencial negatiu (- de bateria) a l'ànode (A), i el positiu (+ de bateria) al càtode (K), el dispositiu no funcionarà mai, encara que apliquem alguna tensió o corrent al terminal porta (G). El seu comportament serà el d'un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

Símil 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.

Figura 2.5. Polarització inversa

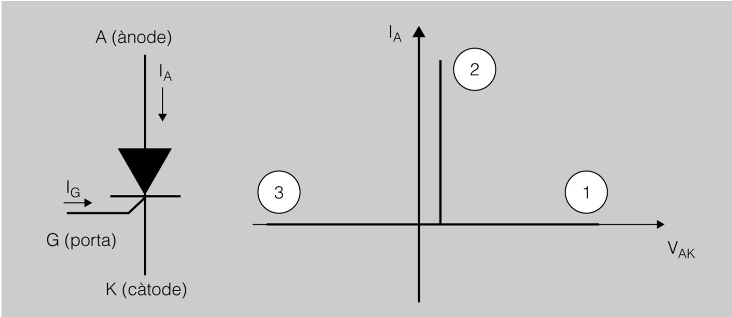


V_{AK}: tensió entre ànode i càtode

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



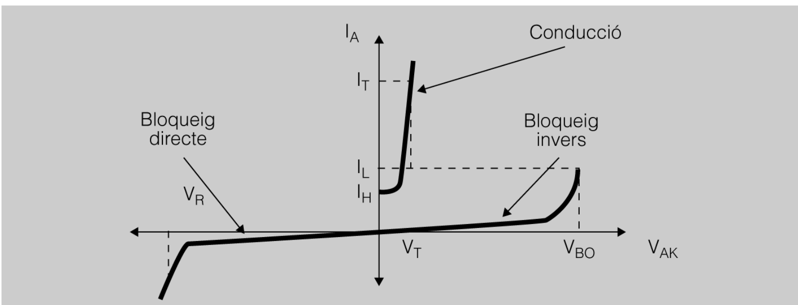
Quan el polaritzem inversament —figura 2.5— (tensió ànode negatiu / càtode positiu), el tiristor no conduirà, es comportarà com un interruptor obert. Ara bé, el tiristor pot suportar una tensió inversa màxima que dóna el fabricant, anomenada $\boldsymbol{V_{RSM}}$ (tensió inversa màxima no repetitiva): 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

Als Annexos del web hi trobareu un arxiu per simular un tiristor comandat amb corrent continu i un altre de comandat per corrent altern.

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 per què 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

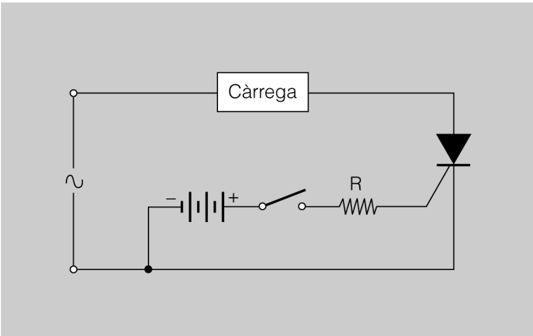


FIGURA 2.9. Comandament per corrent altern

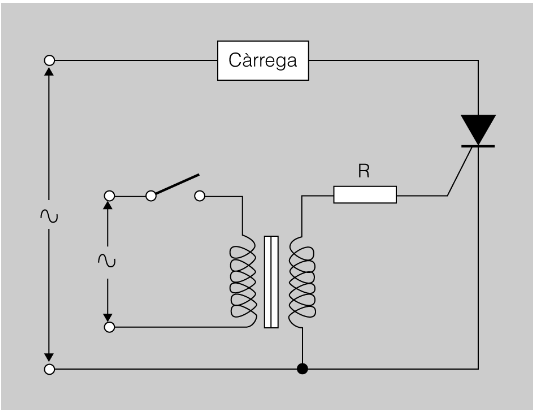
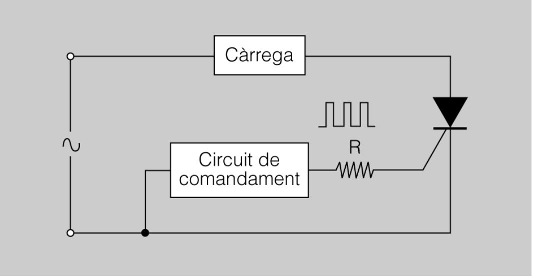
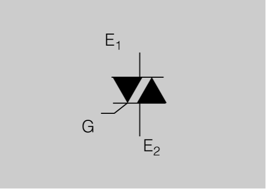


Figura 2.10. Comandament per pols de senyal



2.1.4 Triac

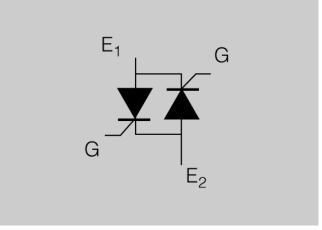


Símbol electrònic del triac

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.

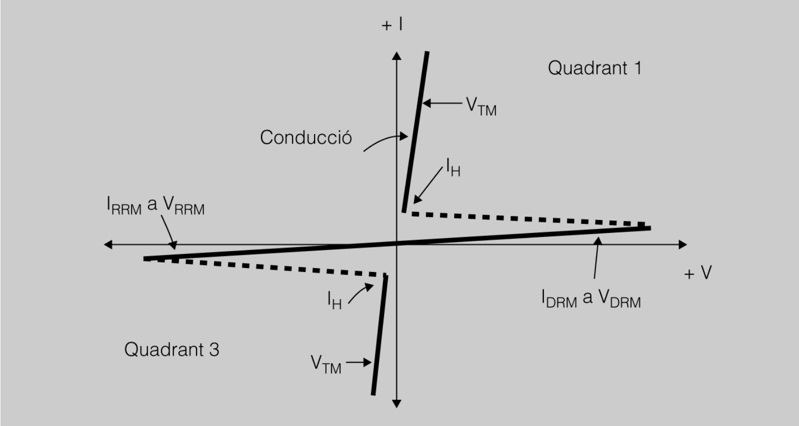
Figura 2.11. Símil en antiparal·lel



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.

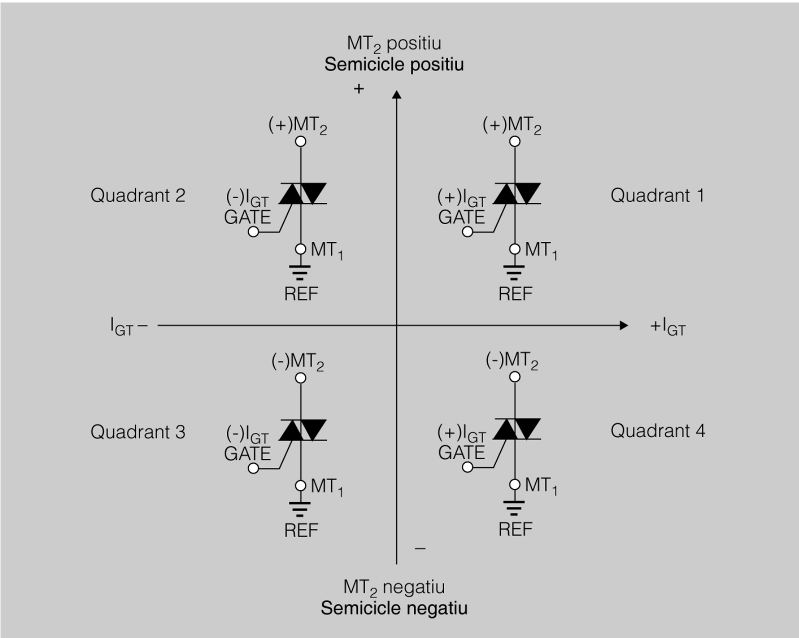
Figura 2.12. Corba característica del triac



Modes de funcionament del triac

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

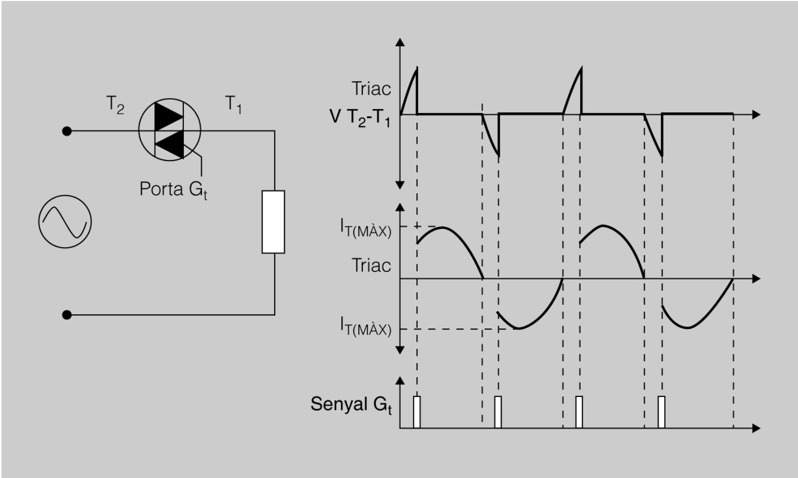
Figura 2.13. Modes de funcionament del triac



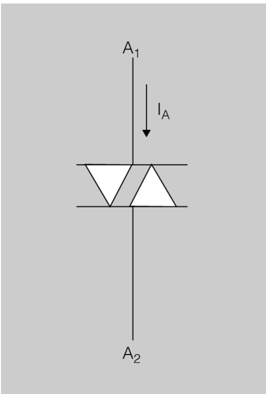
En el primer quadrant podem veure com al terminal T_2 s'hi aplica el potencial positiu i al terminal T1, el negatiu, i a la porta G un potencial positiu. En el segon quadrant tenim els terminals T_2 i T_1, igual que en l'anterior, però la porta ara és negativa. En conclusió, el triac pot conduir tant 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

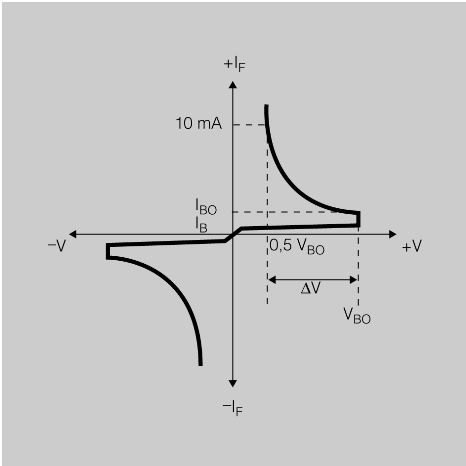


2.1.5 Diac



Símbol 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

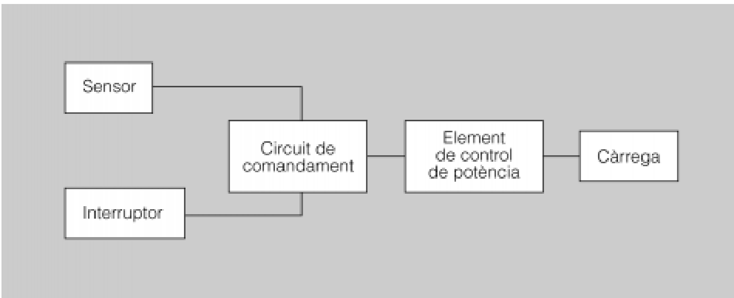
Els tiristors i els triacs substitueixen en gran mesura els relés i els contactors convencionals, ja que presenten alguns avantatges respecte d'aquests, com són:

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

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

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

Figura 2.16. Blocs d'un relé estàtic

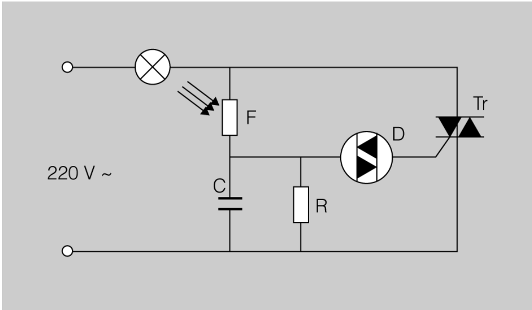


Els circuits que fan servir tiristors o triacs com a interruptors estàtics acostumen a tenir la mateixa disposició, tal com queda reflectit en la figura 2.16. Allà es pot apreciar l'element de control de potència (tiristor, triac...) connectat a la càrrega. Un circuit de control de comandament està governat 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



Als Annexos del web hi trobareu un arxiu per simular un control de potència asíncron.

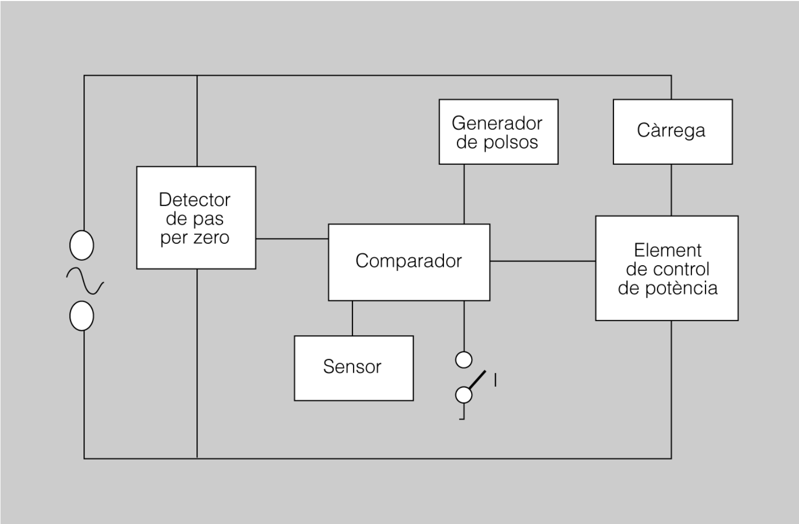
El funcionament d'aquest circuit mostrat a la figura 2.17 es basa en el següent: quan la fotocèl·lula F (sensor) està il·luminada, la seva resistència és baixa i el condensador es podrà carregar a la tensió de conducció del diac D (element de comandament) i podrà aplicar un pols de corrent al triac Tr (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.

Circuit de control de potència síncron

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.

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.

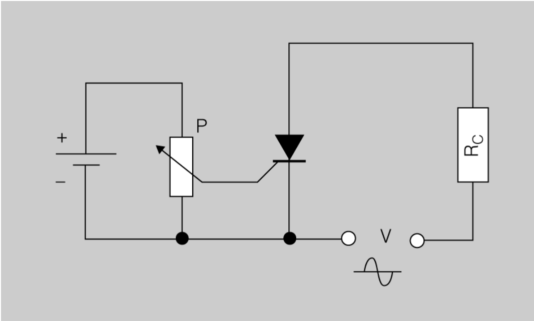
Tot es pot controlar o bé per l'interruptor I o bé per un altre sensor del tipus PTC, NTC, LDR, etc.

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

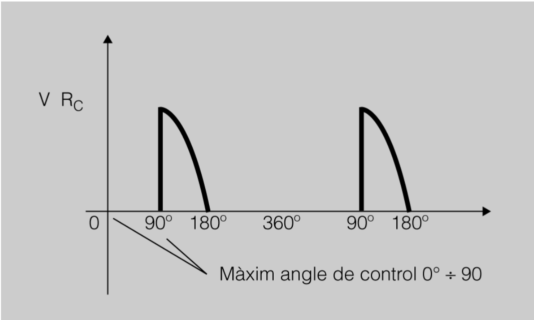
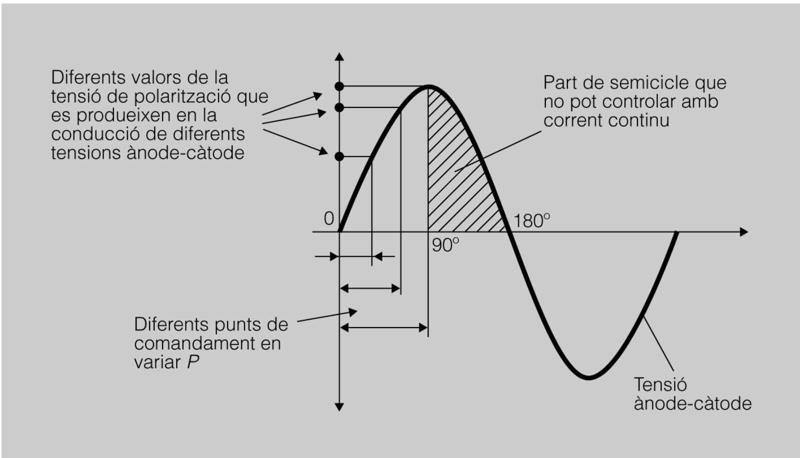


Figura 2.21. Angle de control en corrent continu

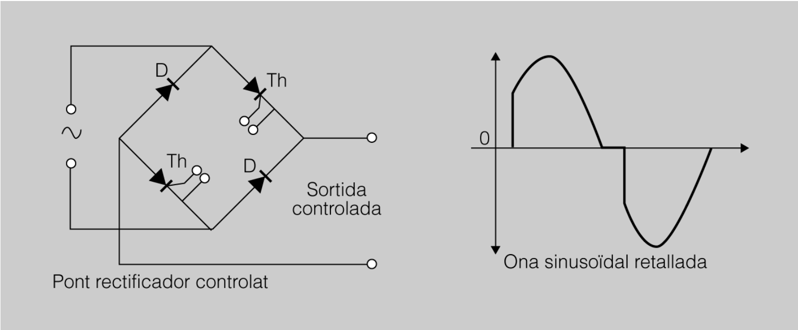


En la figura 2.21 veiem en els gràfics i les formes d'ona com el tiristor només pot variar l'angle de comandament i control com a màxim els primers 90° en els circuits de corrent continu.

Rectificador controlat

El rectificador controlart 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

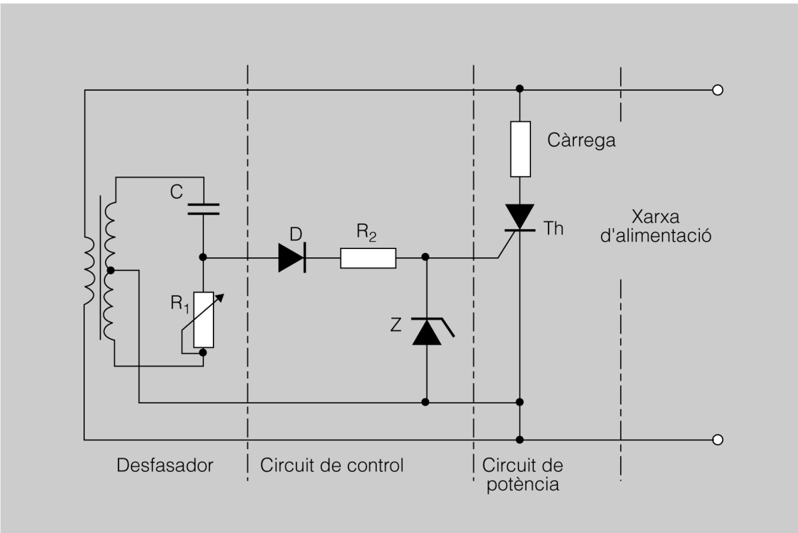


Podem observar que és un pont rectificador normal en què s'han substituït dos díodes per dos tiristors. El seu funcionament és idèntic al d'un rectificador, amb els circuits de comandament, que són els que governen el temps de conducció. En la forma d'ona veiem el control de com podem retallar el pas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

Circuits de control de corrent altern

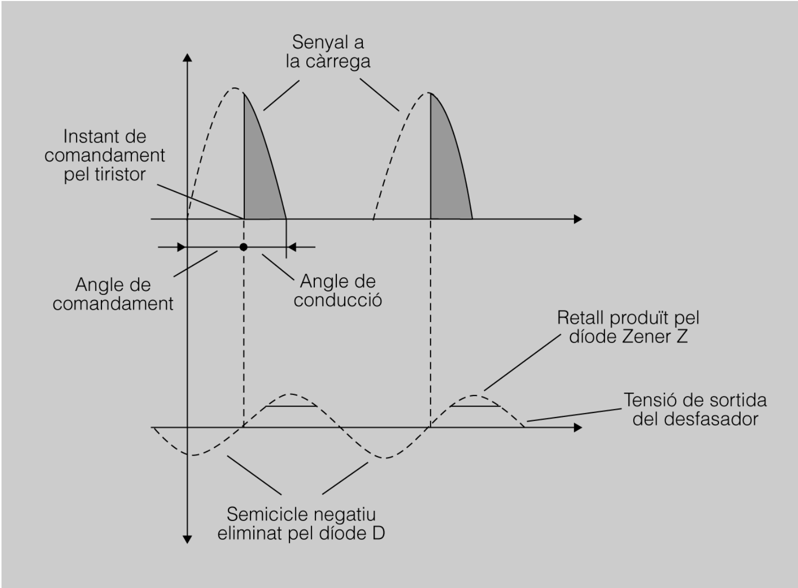
Els circuits de control de corrent altern proporcionen a la càrrega una tensió retallada en el semicicle positiu (figura 2.23).

Figura 2.23. Control de corrent altern



Si variem la part retallada (conducció) i el potenciòmetre $\mathbf{R_1}$, 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 $\mathbf{R_1}$ 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.

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.

Si bé els retards basats en circuits RC són poc precissos, 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 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:

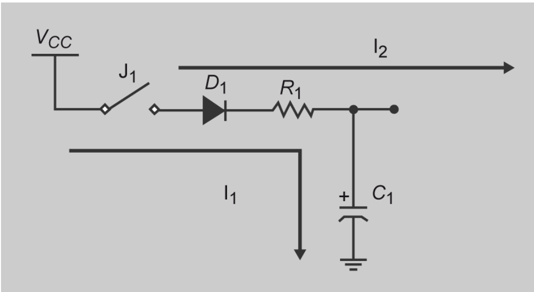
- Retard en la connexió
- Retard en la desconnexió
- Retard en la connexió i desconnexió

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.

Als Annexos del web hi trobareu explicacions extenses per simular un temporitzador basat en un circuit RC, així com uns arxius de simulació.

Figura 2.25. Retard amb circuit RC



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

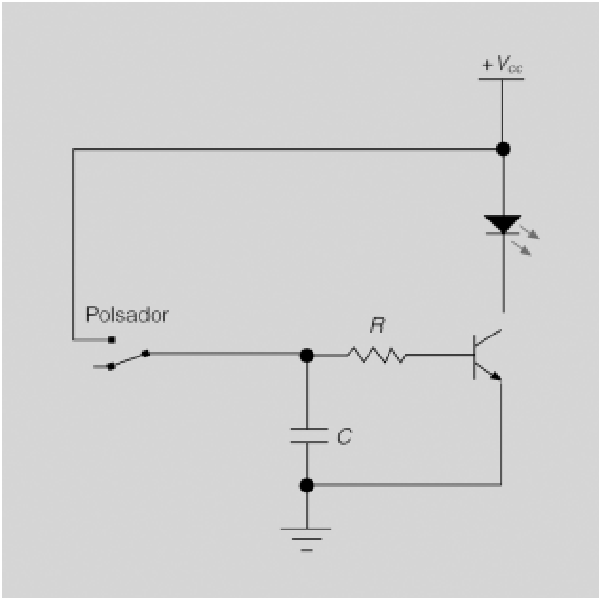
Quan ha passat aproximadament un temps igual a la τ (durant el qual el condensador s'haurà carregat aproximadament fins a dues terceres parts de la seva capacitat), el corrent que anava pel camí $\mathbf{I_1}$ comença a deixar aquest camí per decantar-se progressivament pel camí marcat per $\mathbf{I_2}$, 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.

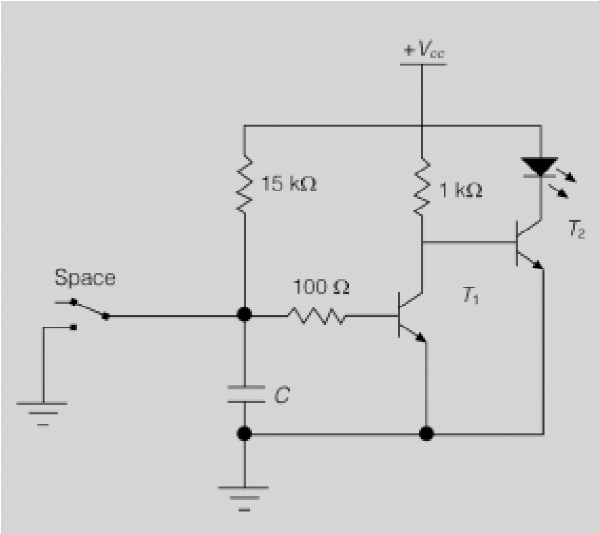
Figura 2.26. Temporitzador amb retard en la desconnexió



En la figura 2.26, inicialment el polsador 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 polsador, aquest connecta directament els extrems de condensador a V_{CC} i queda carregat instantàniament. Quan el polsador 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.

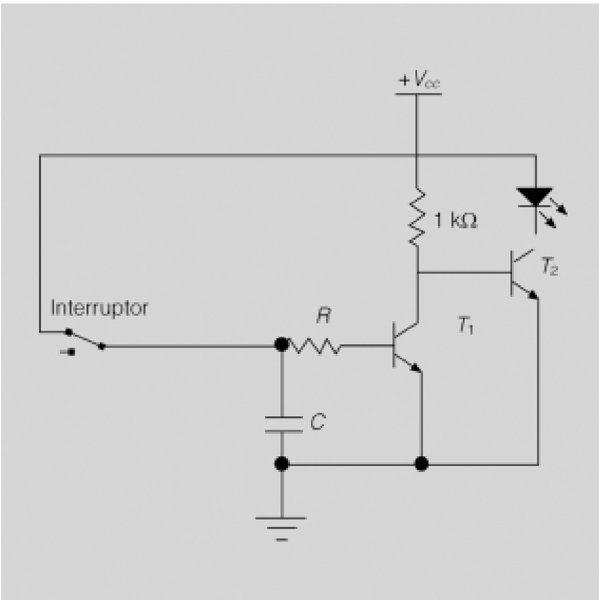
El circuit de la figura 2.27, amb el polsador en la posició de repòs, el condensador es carrega a través de la resistència de 15 kΩ i satura el transistor T_1. En estar T_1 saturat, connecta la base de T_2 directament a massa i col·loca T_2 en tall i, per tant, el LED està apagat. Quan premeu el polsador, 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 kΩ, passant a saturació i il·luminant el LED. En tornar el polsador 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



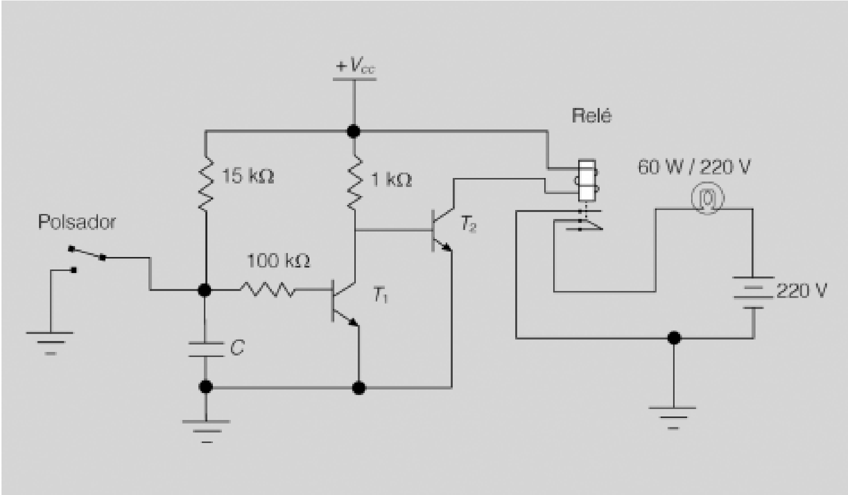
En circuit de la figura 2.28, volem il·luminar el LED amb retard respecte al moment que accionem l'interruptor. Inicialment es pot observar que C està carregat, T_1 en saturació, T_2 en tall i el LED apagat. Quan accioneu l'interruptor, C es descarrega a través de R i, passat un temps, la tensió al condensador 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.



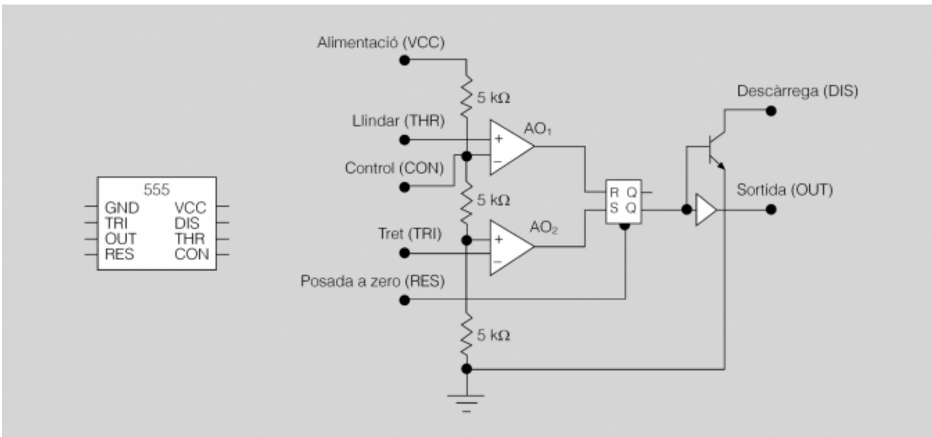
Solució:

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 pius del 555 i estructura interna



Porta inversora NOT

La porta NOT si a l'entrada té un 1, a la sortida dóna un 0 i si a l'entrada té un 0, a la sortida dóna 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.

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

En la figura 2.29, podeu veure, en primer lloc, la disposició de pius 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'AO_1 val 2/3 de V_{CC}, i l'entrada no inversora de l'AO_2 val 1/3 de V_{CC}). En el circuit, podeu observar també un biestable RS, un transistor i una porta inversora (NOT).

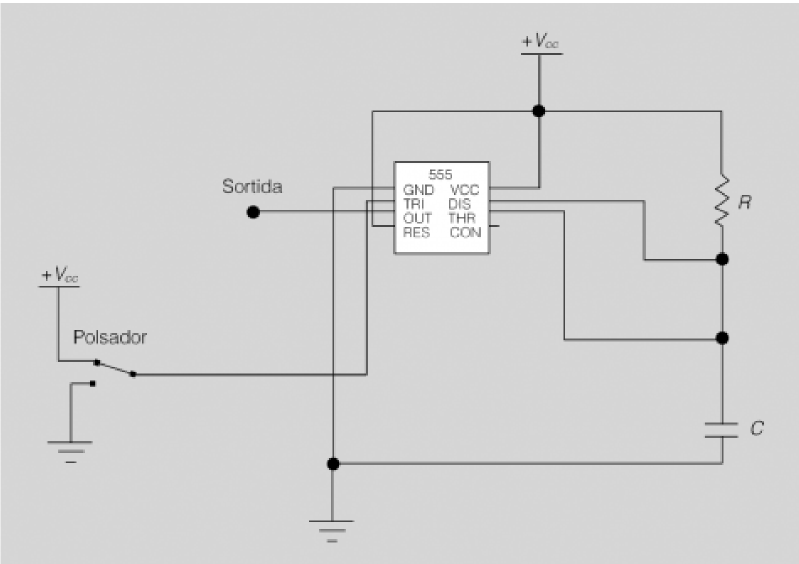
Els terminals del 555 són:

- 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'AO_2. Quan la tensió aplicada és més petita de 1/3 de la tensió d'alimentació (V_{CC}), AO_2 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'AO_1. Quan la tensió en aquest terminal superi els 2/3 de V_{CC}, l'AO_1 proporcionarà a l'entrada R del biestable RS un nivell alt que farà bascular $\overline{\mathrm{Q}}$ 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.

Als Annexos del web hi trobareu un arxiu per simular un temporitzador amb 555.

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

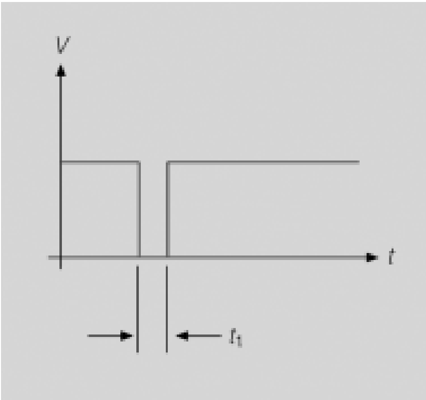


El seu funcionament és el següent:

1. Inicialment, la sortida $\overline{\mathrm{Q}}$ 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'AO_2 es posa a 1, igual que l'entrada S del biestable; en conseqüència, la seva sortida $\overline{\mathrm{Q}}$ 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 $\overline{\mathrm{Q}} = 1$, 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 kΩ i el valor del condensador és de 100 μF. 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:

$$R = \frac{300}{1,1 \cdot 1.000 \cdot 10^{-6}} = 272.7 \text{ k}\Omega$$

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:

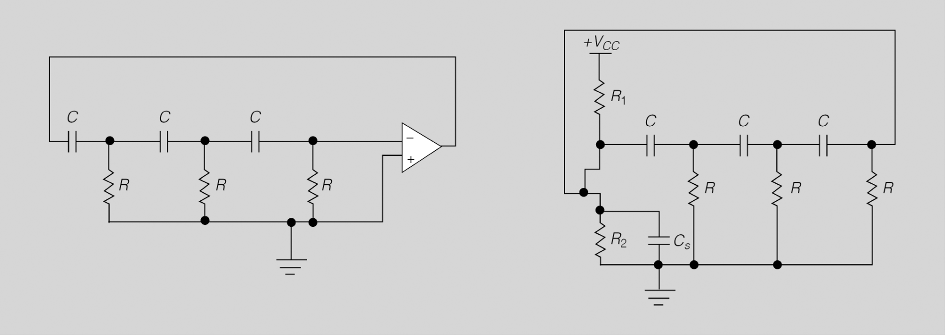
- Transistors
- Amplificadors operacionals
- 555
- Cristalls de quars

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 180º entre el senyal d'entrada i el senyal de sortida. Per aquest motiu, la xarxa de realimentació ha de desfasar uns altres 180º el senyal, de tal manera que es produeixi un desfasament total de 360º, o sigui de 0º. Cada conjunt de condensador i resistència produeix un desfasament de 60º, i com que hi ha tres condensadors, el desfasament total serà 3 · 60º = 180º.

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 μF i R = 1,5 kΩ.

Solució:

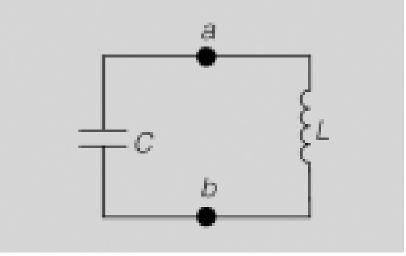
Si substituïu els valors donats de resistència i condensador en la fórmula de la freqüència, obteniu:

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

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



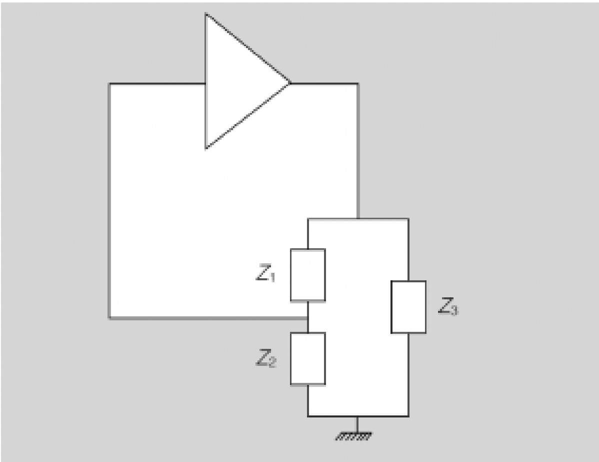
En la figura 2.33, suposeu que el condensador ha estat prèviament carregat amb una tensió contínua. En connectar la bobina als extrems del condensador (a i b), el condensador trasllada la seva energia a la bobina —aquesta energia és emmagatzemada per ser alliberada després— per carregar un altre cop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

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

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

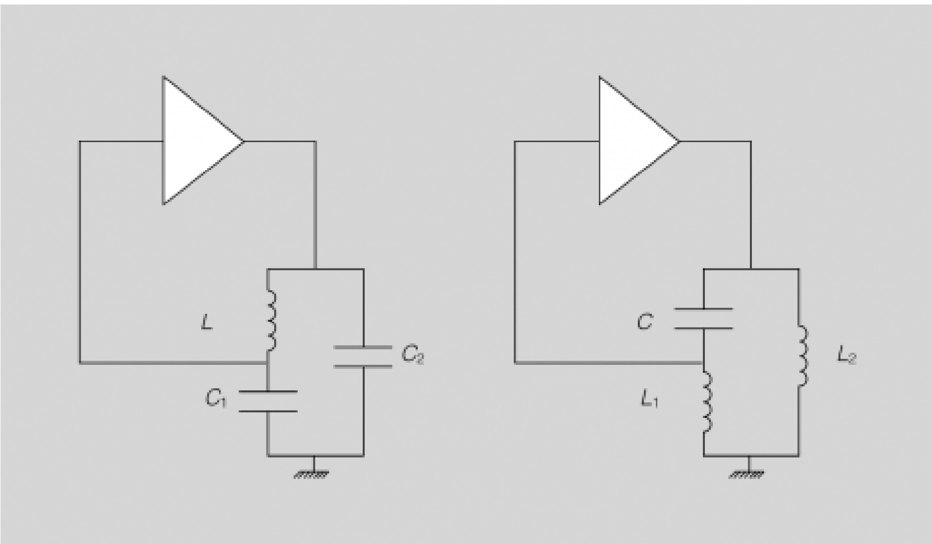
En la majoria d'oscil·ladors LC la xarxa de realimentació està constituïda per tres impedàncies d'acord amb l'esquema general de la figura 2.34.

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:

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

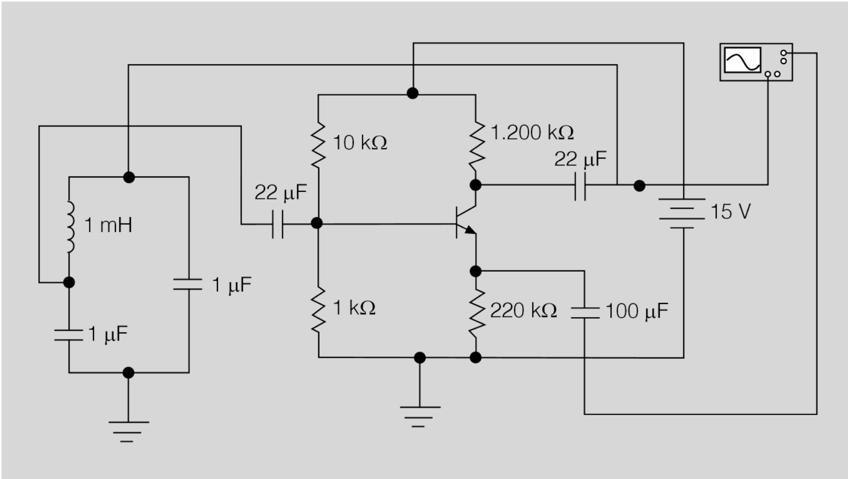
En canvi, a l'oscil·lador Hartley, la inductància total a considerar és:

$$L = L_1 + L_2$$

Als Annexos del web hi trobareu un arxiu per simular un oscil·lador Colpitts.

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:

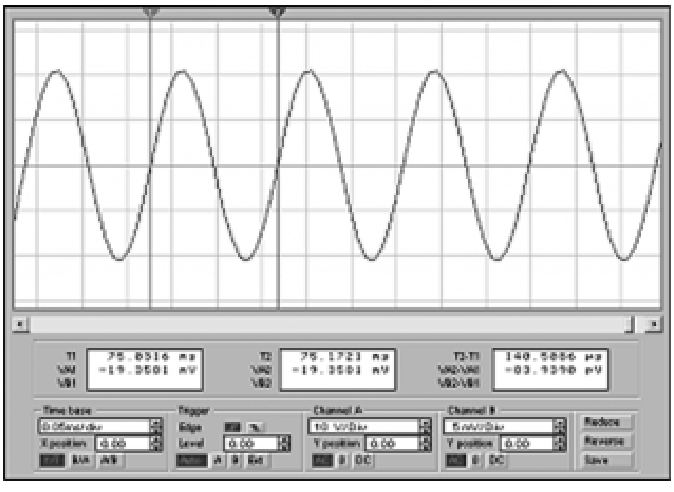
Si apliqueu la fórmula, substituint els valors obtinguts de la xarxa de realimentació de l'esquema anterior teniu: L = 1 mH; C_1 = 1 μF; C_2 = 1 μF.

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

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

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 μs, i amb aquest valor, la freqüència és igual a:

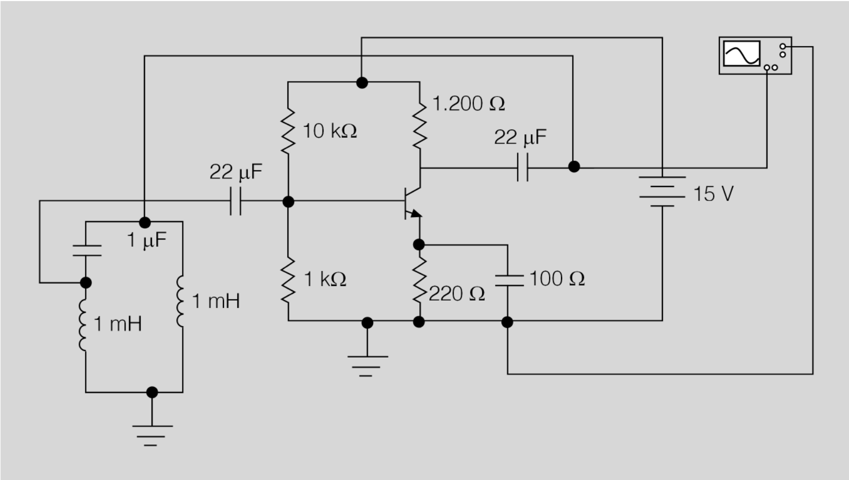
$$f = \frac{1}{T} = 7.117\ \text{Hz}$$



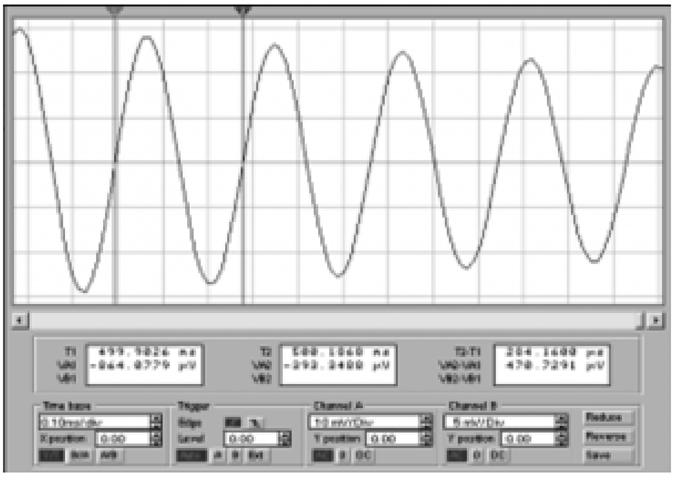
Com podeu observar, són dues maneres diferents de trobar la freqüència d'oscil·lació, la primera teòricament aplicant la fórmula i la segona pràcticament utilitzant l'oscil·loscopi.

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.

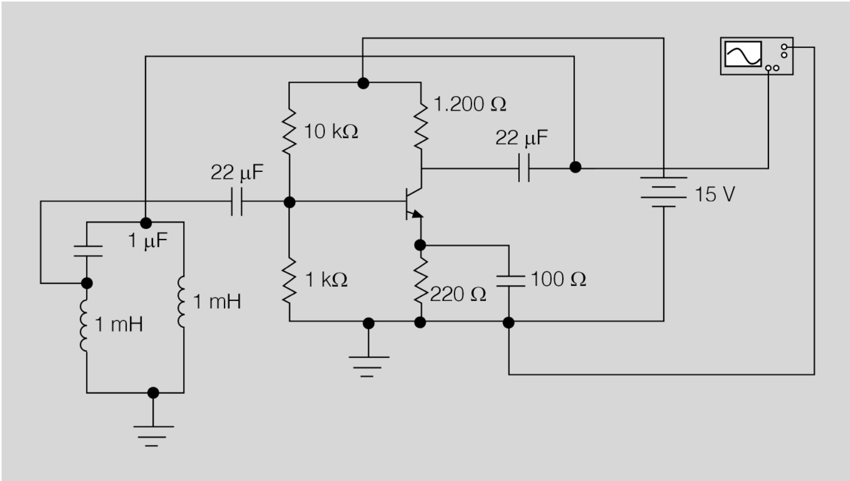


Solució:

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 μs. (T = 284,16 μs). 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.

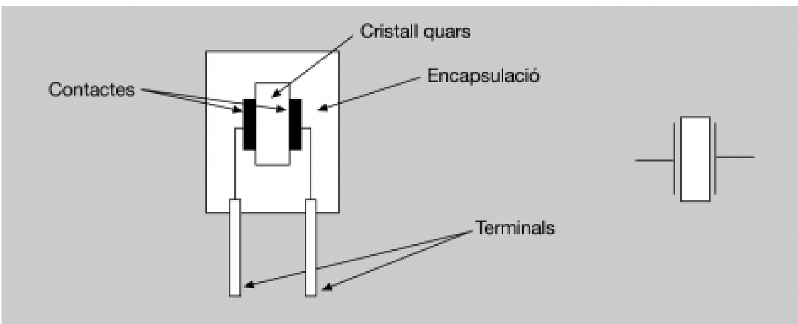
El quars és un mineral que presenta una sèrie de propietats anomenades **piezoelectricitat**:

- 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.

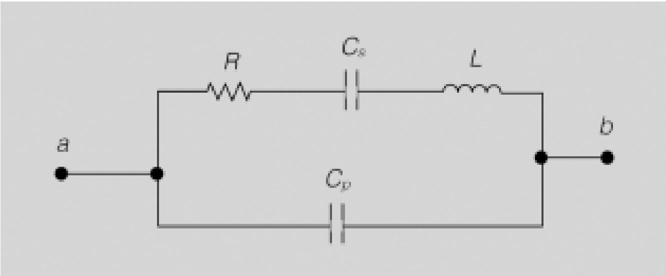
A la figura 2.36 es pot veure l'estructura dels cristalls de quars i el seu símbol elèctric.

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).

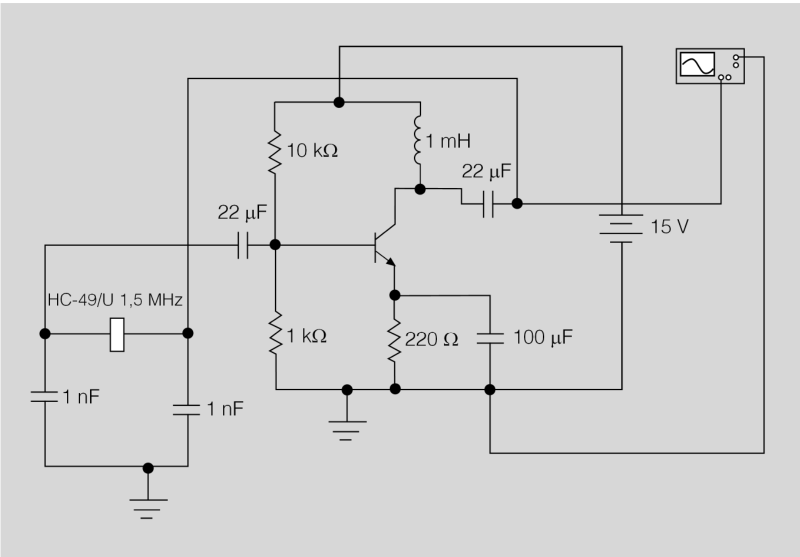
Figura 2.37. Circuit equivalent al cristall de quars



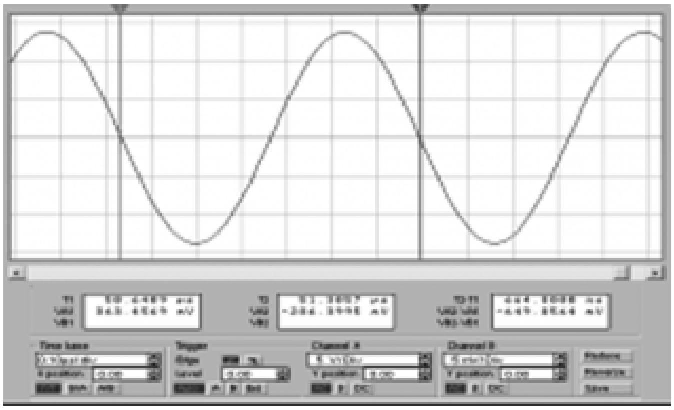
En el mercat, podem trobar gran varietat de cristalls amb diferents freqüències d'oscil·lació, com poden ser: 1,5 MHz, 3 MHz, 4 MHz, 15 MHz, 40 MHz, etc.

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).



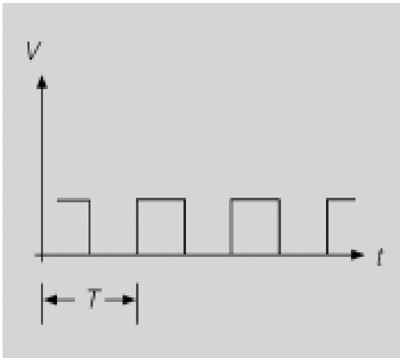
La figura següent correspon a la sortida de l'oscil·lador. Si l'observeu, el període de l'ona T = 664,8 ns, llavors la f = 1.504.211 Hz, que són aproximadament 1,5 MHz, el valor del cristall de quars col·locat en el circuit.



2.4.4 Multivibrador astable

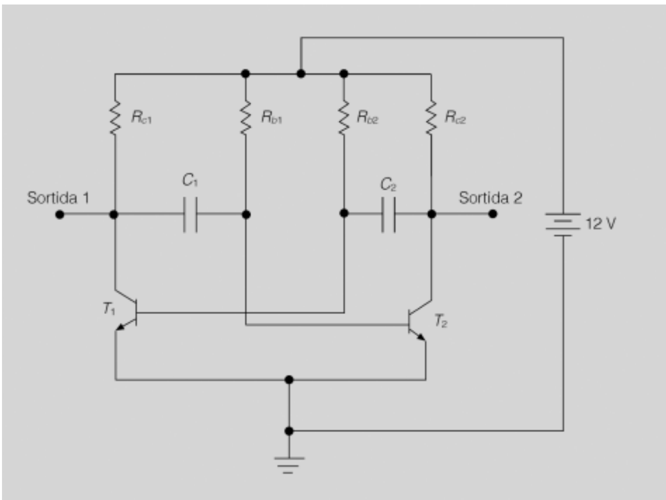
Un circuit astable genera un senyal quadrat com el de la figura 2.38.

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:

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

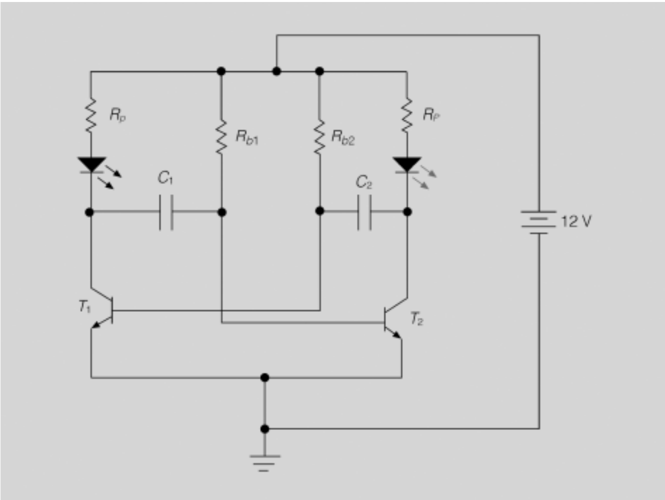
On R_B és la resistència de base i C la capacitat del condensador utilitzat. Si els components utilitzats són de les mateixes característiques i valors, els dos semiperíodes de l'ona són idèntics i iguals a $T/2$, essent T el període del senyal.

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.

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.

Figura 2.40. Intermitent amb astable



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.

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:

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

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

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

Substituint els valors:

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

Per tant, heu dissenyat el circuit amb els valors següents ***C* = 100** μ**F** i ***R*$_B$ = 7,246** Ω.

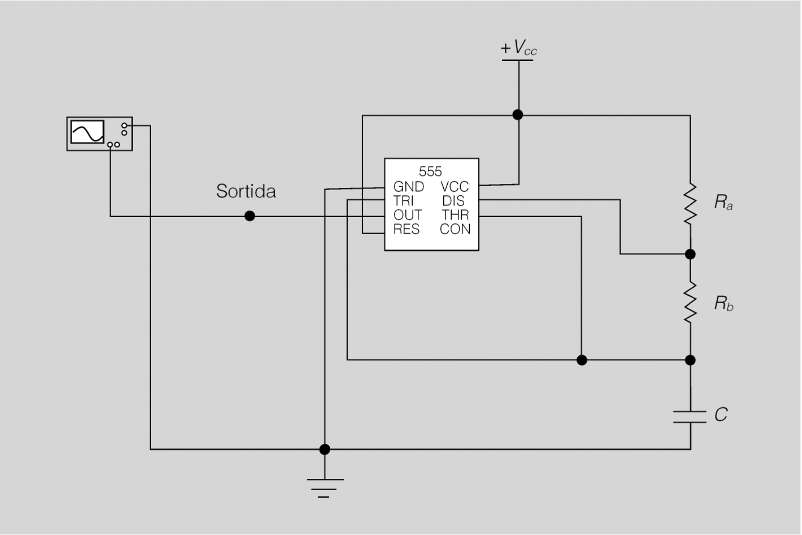
En el circuit de la figura 2.40, substituint un dels LED per un altaveu, aquest produiria un determinat so d'acord amb la freqüència de l'ona generada. Variant el valor de R_B i C, el so pot ser des d'agut fins a greu. Fins i tot podríem generar ultrasons.

Multivibrador astable amb 555

Als Annexos del web hi trobareu un arxiu per simular un 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'AO$_2$ 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'AO$_1$ 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 kΩ i C = 1 μF, quina serà la freqüència d'oscil·lació?

Solució:

Substituint els valors en les fórmules, teniu:

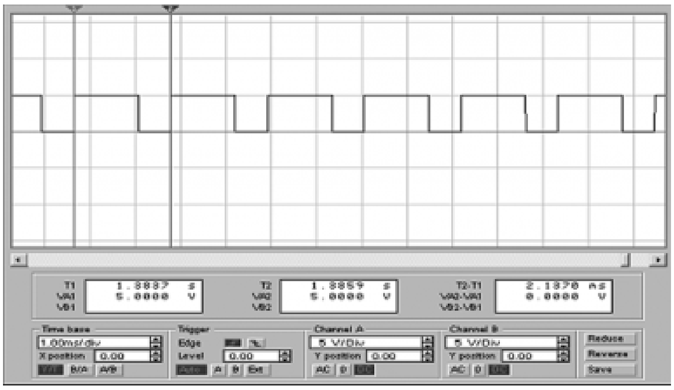
$$T_1 = 0,693 \cdot (1.000 + 1.000) \cdot 1 \cdot 10^{-6} = 1,386 \text{ ms}$$

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

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

$$T = T_1 + T_2 = 1,3868 + 0,693 = 2,079 \text{ ms}$$

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



Observant la forma d'ona originada a la figura, podeu veure que 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 dóna un valor del període de 2,1879 ms. Amb aquest valor s'obtindria una freqüència de 457 Hz. Hi ha una petita diferencia 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.