

# ELECTRÒNICA

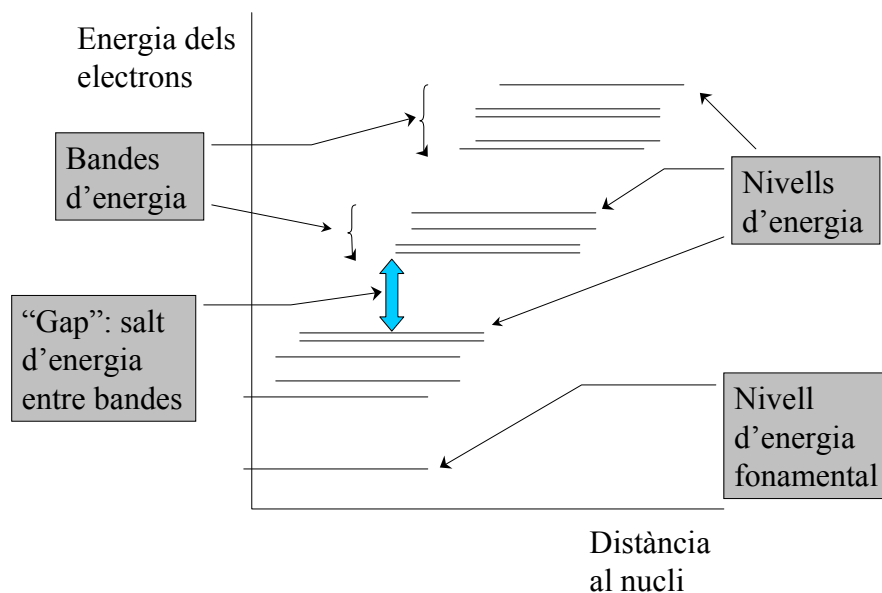
1. Introducció als semiconductors.
2. Díodes.
3. Transistors bipolars d'unió i transistors d'efecte camp.
4. Portes lògiques en circuits. Nocions.



# 1. Introducció als semiconductors

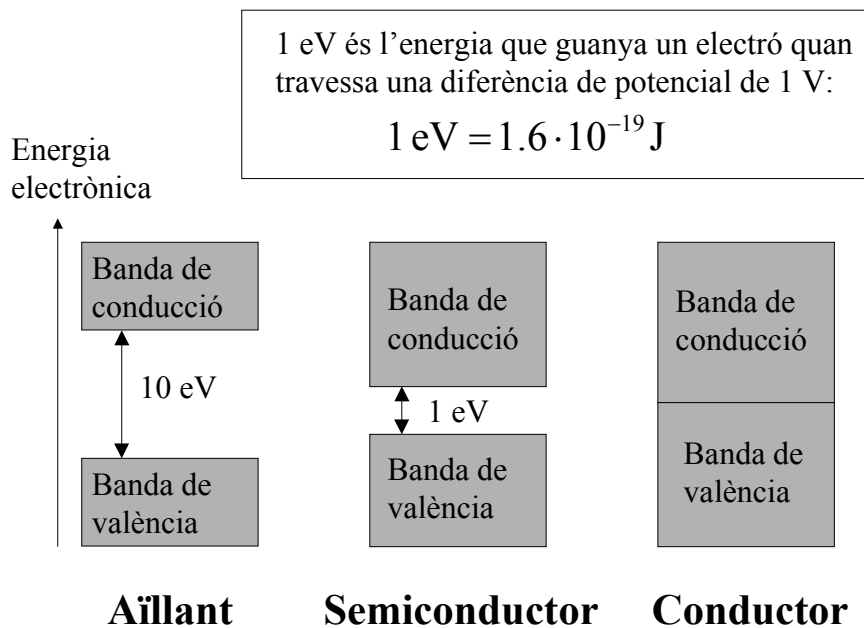
A més dels dielèctrics i els conductors, materials que hem estudiat anteriorment, existeix un altre tipus de materials amb importants aplicacions a la indústria: els **semiconductors**. Els semiconductors s'anomenen d'aquesta manera perquè són materials capaços de conduir corrent elèctric però depenent de la temperatura a què es trobin. En general, són sòlids cristal·lins, tals que els seus àtoms formen enllaços covalents. Els semiconductors més utilitzats en la indústria són el **silici** i el **germani**.

Per tal de poder estudiar en detall el comportament d'aquests materials, cal fer ús de conceptes de mecànica quàntica. Aquesta teoria estableix que els electrons en un àtom no poden tenir qualsevol energia sinó que només poden tenir energies múltiples d'una certa energia mínima, que s'anomena **energia de l'estat fonamental**. Els valors possibles de les energies electròniques s'anomenen **nivells d'energia** i, en el cas dels sòlids cristal·lins, aquests nivells no es presenten per separat sinó en grups, que anomenarem **bandes d'energia**. La diferència energètica entre dues bandes consecutives s'anomena *gap* (salt, en anglès) i correspon a valors no permesos (prohibits) de les energies dels electrons:



Les dues classes de bandes d'energia més importants són la banda de **valència** i la banda de **conducció**, que corresponen a les energies més baixa i més alta, respectivament. Els electrons de la banda de valència estan lligats als àtoms i, en canvi, els electrons de la banda de conducció són gairebé lliures i poden formar part del corrent elèctric. De forma simplificada, les energies dels electrons en un cristall són proporcionals a la temperatura del material, és a dir que escalfant un material el que fem és augmentar l'energia dels seus electrons. A temperatures baixes, l'energia dels electrons és baixa i la majoria d'electrons del material estan a la banda de valència: no hi ha conducció de corrent. A mesura que augmenta la temperatura, alguns electrons de la banda de valència "salten" a la banda de conducció, augmentant la conductivitat del material.

Podem comparar els dielèctrics, semiconductors i conductors des del punt de vista energètic:

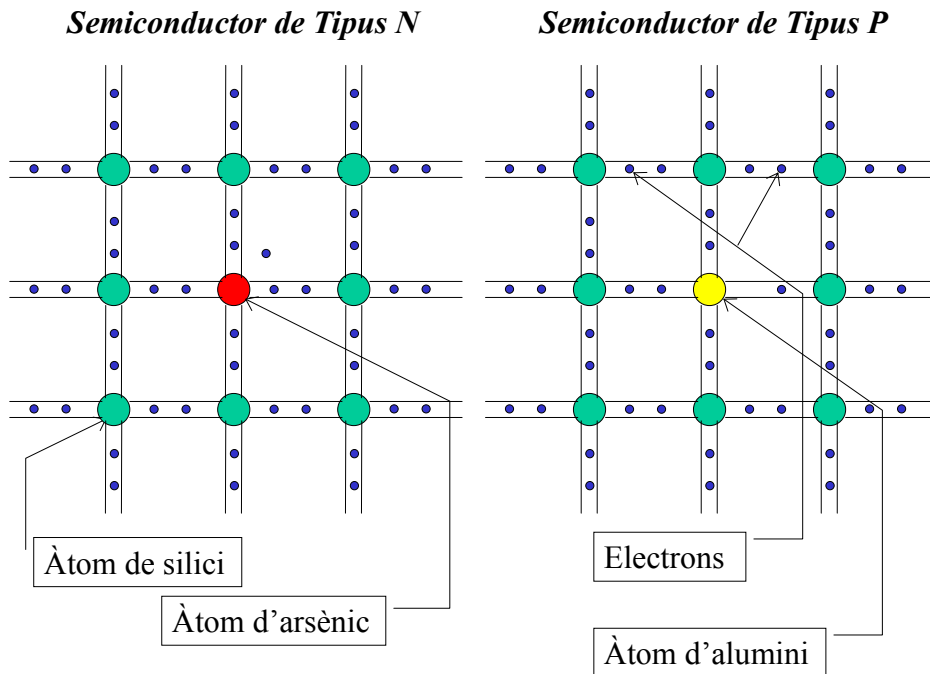


Els aïllants, com la fusta o el plàstic, per exemple, tenen molt buida la banda de conducció; els conductors com el coure, en canvi, la tenen molt poblada; els semiconductors (silici, germani) hi tenen més electrons que els aïllants i menys que els conductors. El que observem és que la gran diferència entre les tres classes de materials, des del punt de vista de la conducció de corrent elèctric, està en l'amplada de la zona d'energies prohibides: uns 10 eV pels aïllants (la qual cosa fa que sigui molt difícil que hi hagi molts electrons a la banda de conducció); 1 eV pels semiconductors, que poden tenir prou electrons a la banda de conducció si fem que les energies d'alguns electrons de la banda de valència augmentin un xic i 0 eV pels conductors, que tenen molts electrons a la banda de valència.

En els estudis de cristalls i de sòlids en general, es fa servir una imatge molt útil: **el model dels electrons i els forats**. Quan un electró passa a la banda de conducció, deixa un lloc buit a la banda de valència: direm que ha aparegut un *forat*. El model d'electrons i forats ens diu que el forat "porta" una càrrega positiva, és un *portador* de càrrega positiva. Així, quan un camp elèctric actua sobre un semiconductor, podem pensar que el que succeeix és que un electró i un forat bescanvien les seves localitzacions.

Es diu que quan un cristall té el mateix nombre d'electrons i forats tenim un **semiconductor intrínsec**. Un exemple típic és el silici. Per tal de millorar el rendiment dels semiconductors, es pot substituir algun dels seus àtoms per un altre que té una estructura electrònica molt semblant però no idèntica: és el procés de contaminació o **dopatge** d'un semiconductor. Es diu que el semiconductor té **impureses** i que s'ha convertit en un semiconductor **extrínsec**. Lògicament, cal introduir un nombre molt gran (milions) d'impureses per tal d'assolir un cristall d'ús industrial.

Tal com s'observa a la figura, hi ha dues classes principals de semiconductors extrínsecs: els anomenats de **tipus N** i els de **tipus P**.



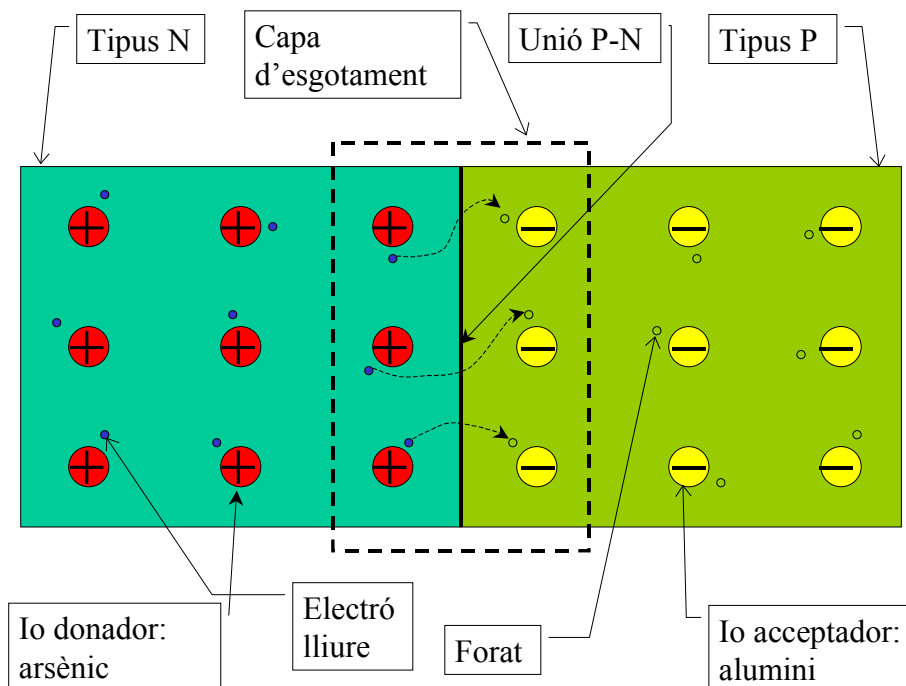
Els àtoms de silici tenen quatre electrons a la seva darrera capa electrònica. En un cristall pur, s'enllacen amb els seus veïns més propers per enllaços covalents. Si dopem el cristall amb un àtom d'arsenic, que té 5 electrons a la darrera capa, ens queda 1 electró lliure que, donat que la seva energia és molt propera a la banda de conducció, passarà a formar part del corrent amb facilitat. En canvi, si substituïm un àtom de silici per un d'alumini, amb només 3 electrons a la seva darrera capa, observem que resta un forat al cristall. L'energia del forat restant resulta ser molt propera a la de la banda de valència i, en conseqüència, és molt probable que un electró de la banda de valència ocupi el forat, quedant un forat en la banda de valència. A la vista d'aquests fets, els semiconductors de tipus N s'anomenen també **donadors** (donen electrons al cristall) i els de tipus P s'anomenen també **acceptadors** (accepten electrons del cristall).

El cert és que, per a poder utilitzar aquests dos tipus de semiconductors, cal que treballin en equip. Veurem les seves aplicacions més importants en electrònica: els díodes i els transistors.



## 2. Díodes

Un dels dispositius més utilitzats en electrònica és el díode. Algunes de les seves aplicacions més importants són la rectificació de senyals i l'ús com a interruptor en circuits de corrent continu i altern. Un díode està format per dos cristalls semiconductors, un de tipus N i un de tipus P, connectats entre ells. En el següent esquema es veu l'esquema d'un díode d'unió P-N en dues dimensions. Considerarem cristalls de silici dopats amb arsènic (tipus N) i alumini (tipus P). Només es mostren els àtoms d'arsènic en el semiconductor de tipus N i els d'alumini en el de tipus P.

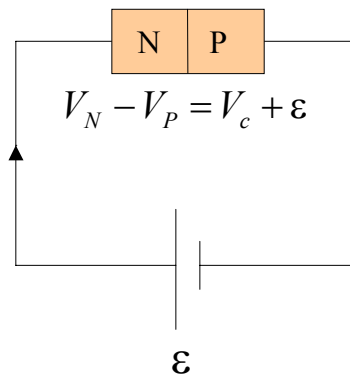
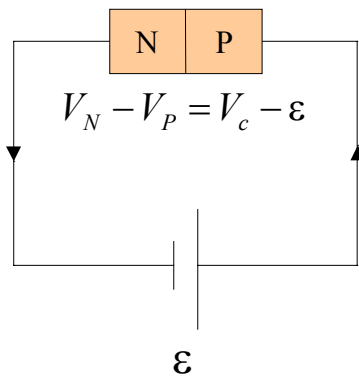


Els únics electrons i forats que es mostren són els aportats per les impureses a la xarxa cristal·lina. A prop de la unió, electrons i forats es combinen, restant dues distribucions de càrrega, una positiva al semiconductor de tipus N i una de negativa al de tipus P. Això vol dir que apareixerà un camp elèctric dirigit de la zona N a la zona P. O, en altres paraules, una diferència de potencial entre les dues parts, major a la zona N que a la zona P. Aquesta diferència de potencial s'anomena **potencial de contacte** ( $V_C$ ). Degut a aquest camp elèctric, la difusió entre les dues parts del díode s'atura. La zona dintre del quadre que conté les dues distribucions de càrrega és la **capa d'esgotament**.

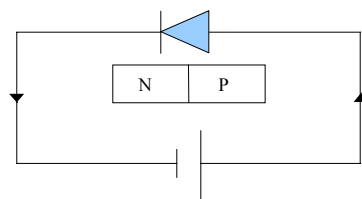
L'ús del díode com a interruptor es manifesta clarament quan el connectem a una generador de corrent continu. Hi ha dues possibilitats: la connexió en **polarització directa** i la connexió en **polarització inversa**. Anem a veure que el díode només condueix en polarització directa.

**Polarització directa:** el corrent travessa el díode

**Polarització inversa:** el corrent no passa.



La connexió en polarització directa fa baixar la barrera de potencial que han de superar les càrregues del corrent per tal de travessar el díode: el corrent passa. En canvi, la connexió en polarització inversa produeix l'efecte contrari: la barrera de potencial en la unió es fa molt més alta i la converteix en una barrera insuperable pel corrent: no circula intensitat a través del díode. Per tal de tenir present aquest fet, el símbol que s'ha adoptat per un díode en un circuit és:



És a dir que la fletxa indica el sentit del corrent tal que pot travessar el díode.



### 3. Transistors bipolars d'unió i transistors d'efecte camp

Un transistor és, en general, un dispositiu format per semiconductors capaç de rectificar i amplificar impulsos elèctrics. Els **transistors bipolars d'unió** van aparèixer comercialment a finals dels anys 50. W. Shockley proposà, amb anterioritat al transistor bipolar, un altre tipus de transistor més simple: el **transistor unipolar o d'efecte camp**. No es va comercialitzar fins als anys 70. Actualment és el més utilitzat, degut a les seves petites dimensions i a un consum i cost baixos en relació als transistors bipolars. Els transistors d'efecte camp es fan servir en massa en els ordinadors personals, per exemple, mentre que els d'unió bipolar són més adients per aparells analògics i grans ordinadors, degut a la seva major velocitat.

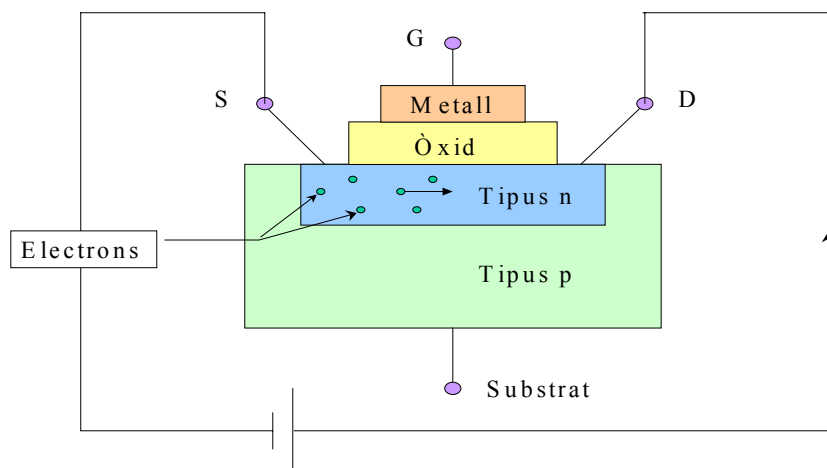
En els transistors d'efecte camp el corrent consisteix bé en electrons bé en forats, motiu pel qual reben el nom d'unipolars. En canvi, en els transistors bipolars el corrent conté ambdós tipus de portadors.

#### 3.1 Transistors d'efecte camp

N'hi ha de dos tipus bàsics: els de **canal n** (els portadors són electrons) i els de **canal p** (els portadors són forats). Els transistors d'efecte camp més utilitzats són els anomenats **MOSFET** (metal oxid semiconductor field effect transistor). Descriurem el seu funcionament a continuació.

Com tot transistor d'efecte camp, un MOSFET té tres elements principals: la font (S), la porta (G) i el drenador (D). Estudiarem les dues classes de MOSFET més utilitzades en electrònica: els MOSFET d'**empobriment** i d'**enriquiment**.

#### A. MOSFET d'empobriment.

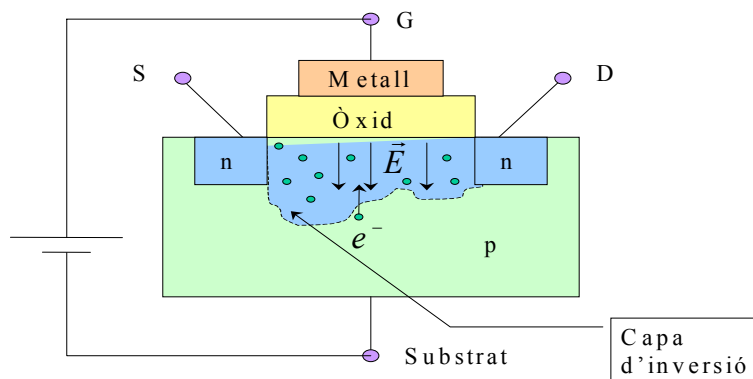


Tal com es mostra a la figura, l'òxid, situat entre el metall i el semiconductor, funciona com a aïllant, evitant que el corrent arribi a la porta. Els electrons circulen entre font i drenador, de manera que l'amplada del canal n és regulable i, en conseqüència, podem controlar també la intensitat de corrent que circula. Com fer-ho? La porta sempre es connecta a un potencial diferent del substrat, de manera que la diferència de potencial porta-substrat ens dona la clau per regular el corrent: si fem que la diferència sigui gran voldrà dir que hauré establert un camp elèctric transversal al corrent molt intens. Si el camp és atractiu

(dirigit de porta a substrat), farà que els electrons s'acostin a la zona de la porta i el canal n es farà més estret: diem que **el canal n s'empobreix**. En cas contrari, tindríem un eixamplament del canal: enriquiment.

### B. MOSFET d'enriquiment.

Són els transistors d'efecte camp més utilitzats. Són molt senzills i de baix consum. La seva longitud és d'aproximadament  $1 \mu\text{m}$ . El MOSFET d'enriquiment de canal n està format per dues illes (font i drenador) de tipus n inserides en una peça de semiconductor de tipus p.



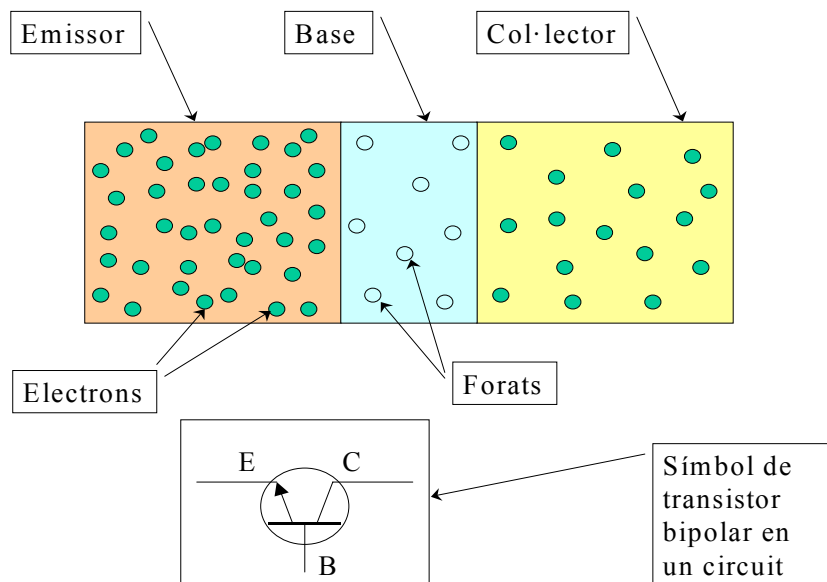
El procés de funcionament del transistor és el següent: com que no té canal, s'estableix un diferència de potencial positiva entre la porta i el substrat. El camp elèctric creat, tal com es veu al dibuix, atrau electrons de la zona p (que queda amb excés de forats), generant-se un canal n que connecta les dues illes (la font i el drenador): la **capa d'inversió**. Quan la diferència de potencial entre porta i substrat  $V_G - V_S$  és major que un cert valor llindar  $V_T$ , aleshores el transistor pot funcionar produint corrent entre font i drenador, si entre ambdós s'estableix una diferència de potencial adequada.

### **3.2 Transistors d'unió bipolar**

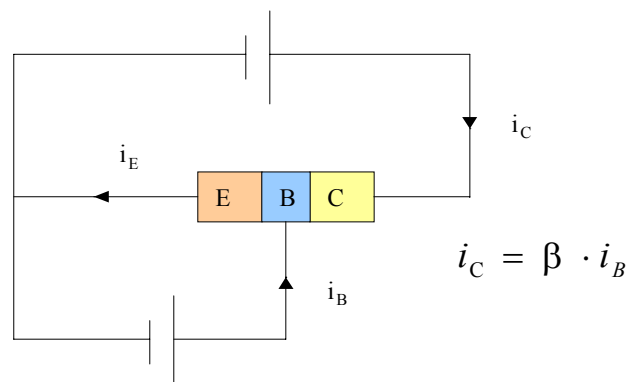
Estan formats per tres cristalls semiconductors connectats en sèrie entre ells. Hi ha dues classes fonamentals de transistors bipolars, es del tipus **nnp** i els de tipus **pnp**. Degut a que el seu funcionament és molt més complex que el dels transistors unipolars, ens limitarem a repassar els aspectes qualitius més importants. Aquesta mena de transistors foren inventats per Bardeen, Brattain i Shockley cap al 1948. Tots tres físics van rebre el premi Nobel per la seva feina.

El transistor bipolar npn està format per tres parts:

- A) **Emissor**: cristall semiconductor de tipus n. Està molt contaminat per impureses.
- B) **Base**: cristall de tipus p. Poc contaminat. Molt estreta ( $1 \mu\text{m}$ ).
- C) **Col·lector**: Tipus n. Està moderadament contaminat.



Anem a veure de forma simplificada com funciona un transistor bipolar npn en un circuit. La forma més habitual de connectar-lo és l'anomenada **configuració d'emissor comú**:



Podem distingir quatre règims de funcionament del transistor:

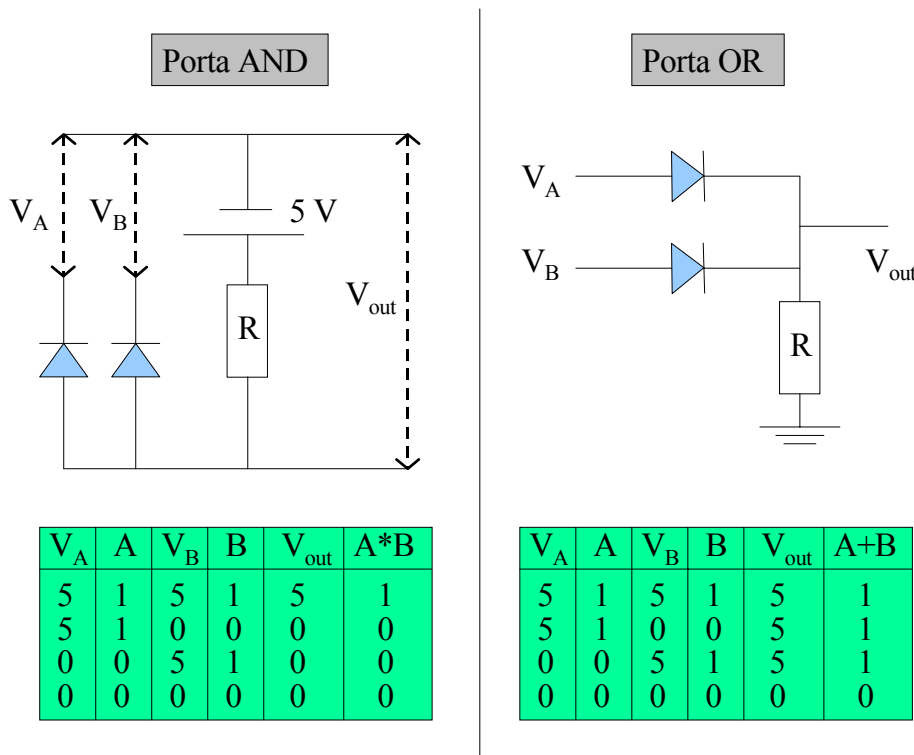
1. **Regió de tall:** la intensitat de col·lector és molt baixa. No hi ha corrent a la base: el transistor no condueix.
2. **Regió de saturació:** la diferència de potencial entre emissor i col·lector és menor de 0.5 V. La intensitat de col·lector augmenta molt de pressa.
3. **Regió activa:** la diferència de potencial emissor-col·lector és major de 0.5 V. La intensitat de col·lector és aproximadament constant per a totes les possibles intensitats de base. Es demostra que el transistor és capaç d'**amplificar** el corrent, donat que  $i_C = \beta \cdot i_B$ . El factor multiplicador  $\beta$  s'anomena **guany de corrent**. Per molts transistors  $\beta$  és de l'ordre de 100.
4. **Regió de ruptura:** la diferència de potencial emissor-col·lector és major de 5 V. El transistor no condueix, es crema.



## 4. Portes lògiques en circuits. Nocions

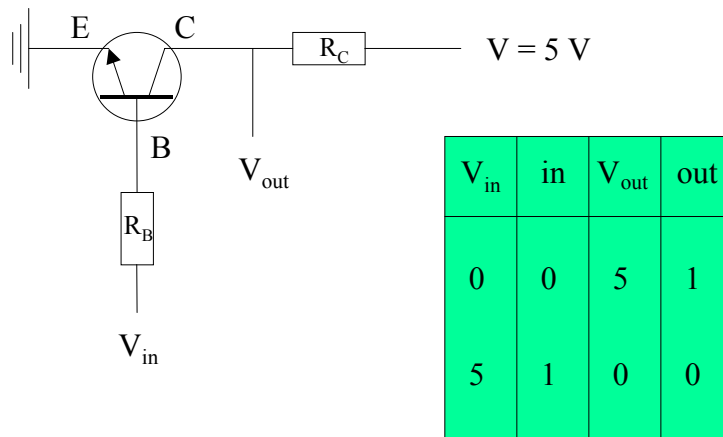
Els ordinadors són aparells que treballen amb àlgebra booleana, tant en els càlculs com en l'emmagatzematge i transferència de dades. En general, requereixen dos tipus diferenciats de senyals, que solen ser l'emissió o la no-emissió d'un impuls elèctric. En lògica, aquests successos es solen representar amb els bits 0 i 1. A més, per tal d'implementar funcions complexes en circuits, cal poder representar els operadors lògics elementals: AND, OR i NOT, que corresponen a les operacions algebraiques de multiplicació, suma i inversió, respectivament.

En un circuit, els díodes i transistors, combinats adequadament, poden implementar tant les funcions lògiques elementals com les seves negacions (NAND i NOR). Les entrades i sortides es generen mitjançant diferències de potencial creades per generadors, normalment de 5 V de força electromotriu. Un circuit lògic o **porta lògica** és un circuit en que el senyal de sortida està en funció dels senyals d'entrada. Veiem alguns exemples:



El que succeeix és que quan la diferència de potencial entre els extrems del díode és diferent de zero, el díode condueix corrent (si està polaritzat directament) i, a més, fa que la diferència de potencial entre els seus extrems es redueixi fins a uns 0.5 V. A nivell de senyals en un circuit, 0.5 V són equivalents a 0, donat que són clarament diferenciables dels 5 V dels generadors que s'utilitzen. En definitiva, es fan servir senyals de 0.5 o 5 V, que s'associen als bits 0 i 1. Al dibuix es veu com es poden construir les portes AND i OR només amb díodes. Per tal de construir una porta inversora NOT, cal fer servir un transistor:

Porta NOT



L'efecte del transistor en el circuit és molt més complex d'analitzar. Només indicarem que **quan un transistor rep corrent per la base**, també produeix un corrent al col·lector i fa que la diferència de potencial entre l'emissor i el col·lector sigui petita, d'uns 0.5-0.7 V, la qual cosa significa **que el col·lector resta aproximadament al mateix potencial que l'emissor**.

En el cas de la porta NOT, podem observar que, quan a l'entrada ("in") el potencial és de 5 V, com que l'emissor està sempre connectat al terra (de potencial 0 V), tindrem un corrent de base no nul. En conseqüència, el col·lector estarà també a 0 V (igual que l'emissor): la sortida ("out") és justament el potencial del col·lector, és a dir, 0 V.

D'altra banda, quan l'entrada és de 0 V, donat que no hi ha diferència de potencial entre emissor i base, no hi ha corrent de base. En conseqüència, el transistor no actua sobre el circuit produint corrent de col·lector ni fa que els potencials de l'emissor i el col·lector s'igualin. Resultat: el col·lector resta al potencial de 5 V a que està connectat mitjançant  $R_C$ .

Finalment, només esmentar que per a assolir portes com la NAND (negació de l'AND) i la NOR (negació de l'OR), cal combinar díodes i transistors en un mateix circuit. Hi poden haver moltes combinacions que representin una mateixa porta.