

Tema 1. Dispositius semiconductors bàsics



1

Objectius (1)

- Conèixer i comprendre el funcionament del díode semiconductor bàsic.
- Conèixer els distints models dels díodes i saber aplicar-los a l'anàlisi de circuits digitals amb díodes.
- Conèixer i comprendre les aplicacions dels díodes en circuits digitals.
- Conèixer i comprendre el funcionament bàsic i alguna aplicació de díodes especials, com els Schottky, LED i fotodíodes.

2

Objectius (i 2)

- Conèixer i comprendre el funcionament del transistor bipolar de unió (BJT).
- Conèixer i comprendre les diferents regions de funcionament d'un BJT.
- Conèixer i comprendre el funcionament d'un transistor BJT com a interruptor.
- Aplicar el coneixement sobre BJTs per al disseny de portes lògiques bàsiques.

3

Continguts

- 1.1 **El díode de unió.** Fonaments
- 1.2 Comportament en règim estàtic
- 1.3 Circuits amb diòdes
- 1.4 Tipus especials de diòdes
- 1.5 **El transistor bipolar.** Fonaments
- 1.6 Corbes característiques d'eixida. Recta de càrrega
- 1.7 Regions de funcionament
- 1.8 El transistor en conmutació
- 1.9 Portes lògiques elementals amb BJTs

4

Este tema complementa lo estudiado en la asignatura Fundamentos Físicos de la Informática (FFI).

En FFI se aborda el estudio de la unión PN desde un punto de vista físico (semiconductores tipo P y tipo N, portadores mayoritarios y minoritarios, corrientes de difusión y desplazamiento, etc.)

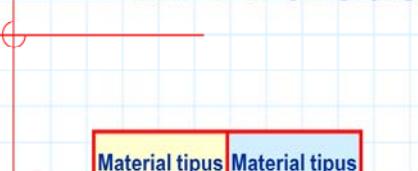
En TCO, nos centramos más bien en el aspecto funcional a nivel electrónico. Por tanto, partiendo de la curva característica de los dispositivos $I = f(V)$, se plantean unos modelos simplificados que permitirán el análisis de algunos circuitos con diodos sencillos.

Bibliografía

TEORIA:

- A.R. Hambley, *Electrónica*, Prentice Hall, 2002. (Cap. 3)
- R. L. Boylestad, *Electrónica. Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*, Pearson, 2009. (Cap. 1..3)
- N.R. Malik. *Circuitos electrónicos. Análisis, simulación y diseño*, Cap. 3, Prentice Hall, 2000. (Cap. 4)
- John F. Wakerly, “*Digital Design. Principles and Practices*”. Prentice Hall; 4th Ed., 2005 (Cap. 3)
- Randy H. Katz and Gaetano Borriello, “*Contemporary Logic Design*”, Prentice Hall; 2nd Ed., 2004

1.1 El díode de unió. Fonaments



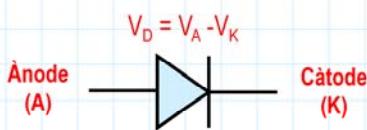
Unió P-N

- La unió P-N conduceix més fàcilment en el sentit directe (de p cap a n) que en sentit contrari.

- Nom del dispositiu: **DÍODE**

- **Terminals:**

- **Ànode (A)**: material tipus p
- **Càtode (K)**: material tipus n



Símbol del díode

6

El diodo, a diferencia de otros elementos conocidos de dos terminales, como las resistencias, no es simétrico. Esto es, conduce más fácilmente en el sentido directo que en sentido inverso.

Este comportamiento da lugar al fenómeno de la rectificación.

A la hora de caracterizar el comportamiento del diodo se definen sus valores de tensión y corriente:

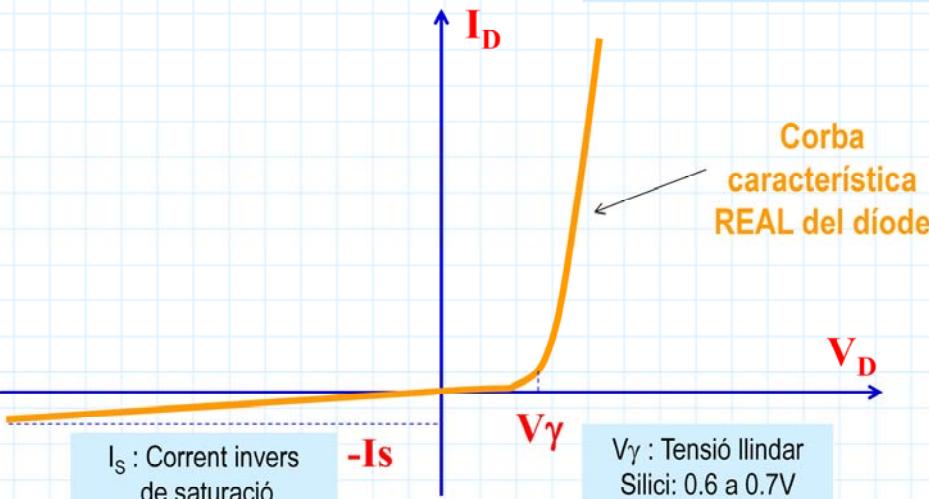
$V_D = V_A - V_K$ es la tensión entre los terminales del diodo

I_D es la corriente por el diodo en el sentido de ánodo (A) a cátodo (K)

1.1 El díode de unió. Fonaments

- És un dispositiu **NO LINEAL**

$$I_D = I_S (e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} - 1)$$



7

Cuando se representa la curva $I_D = f(V_D)$ se observa una relación exponencial donde:

$V_T = KT/q$, es una constante a temperatura (T) constante (25 mV a 25°C)

η es una constante que depende del material semiconductor (Si o Ge), típicamente entre 1 y 2 para el Si.

I_s es la corriente inversa de saturación. Su valor es prácticamente nulo, del orden de nanoamperios (10^{-9} A) o picoamperios (10^{-12} A). Es despreciable frente a la corriente directa, y también depende de la temperatura. Incluye corrientes térmicas y debidas a defectos del material. Se suelen denominar también corrientes de fuga (*leakage currents*)

V_γ es la tensión de codo, a partir de la cual comienza a conducir el diodo. También se le llama “tensión gamma”. Su valor para un diodo normal es de unas décimas de volt, tal y como se muestra en la transparencia.

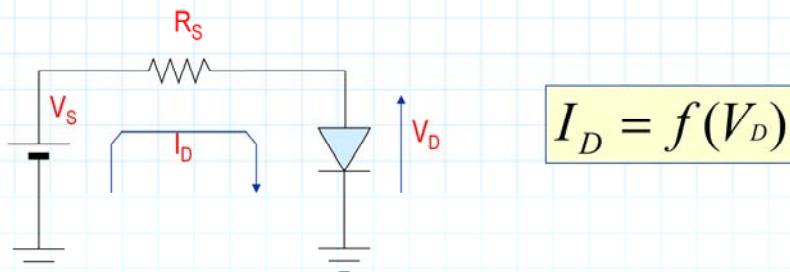
En resumen:

$I_D > 0$ para $V \geq V_\gamma$, con un crecimiento exponencial con V_D

$I_D \approx 0$ para $V < V_\gamma$

1.2 Recta de càrrega (1)

Quan polaritzem el diòde amb un generador de tensió (V_s) i una resistència (R_s), aquests elements condicionen el comportament del mateix.



Aplicant la 2^a llei de Kirchoff, es té:

$$V_s - I_D R_s - V_D = 0$$

$$I_D = \frac{V_s}{R_s} - \frac{V_D}{R_s}$$

8

¿Cómo averiguar la I_D y V_D del diodo en un circuito?

Un método posible es el de la recta de carga. Se trata de un método de análisis gráfico, empleado cuando existen dispositivos no lineales, como es el caso del diodo. La solución analítica es muy compleja y requeriría métodos numéricos.

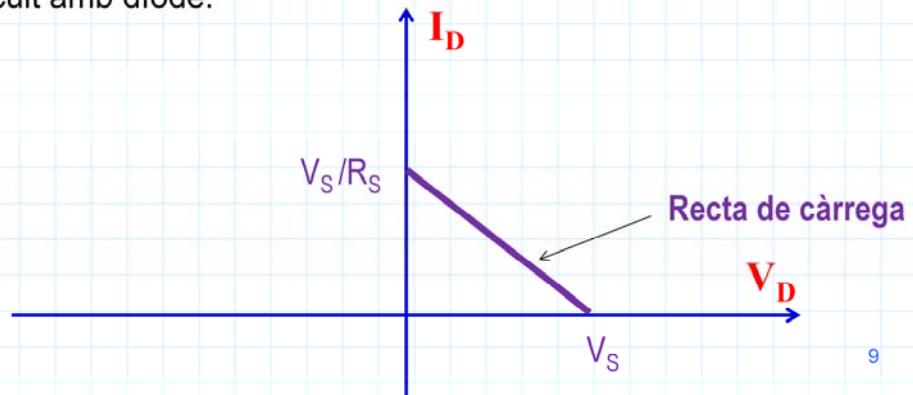
Hay que advertir que el circuito de la figura, aparentemente muy sencillo y carente de generalidad, incluye implícitamente circuitos mucho más complejos. Pensemos que cualquier circuito lineal, independientemente de su complejidad, se puede reducir, aplicando el teorema de Thevenin, a un generador de tensión en serie con una resistencia, que es precisamente lo que muestra la figura. Por tanto, el ejemplo de la figura es más general de lo que pudiera parecer. En principio permitiría calcular el punto de trabajo Q de un diodo conectado a cualquier circuito lineal.

1.2 Recta de càrrega (i 2)

$$I_D = \frac{V_S}{R_s} - \frac{V_D}{R_s}$$

Per obtenir els punts de tall amb els eixos:
 Si $I_D = 0 \rightarrow V_D = V_S$
 Si $V_D = 0 \rightarrow I_D = V_s / R_s$

La **RECTA de CÀRREGA** depèn dels elements afegits al circuit amb diode.

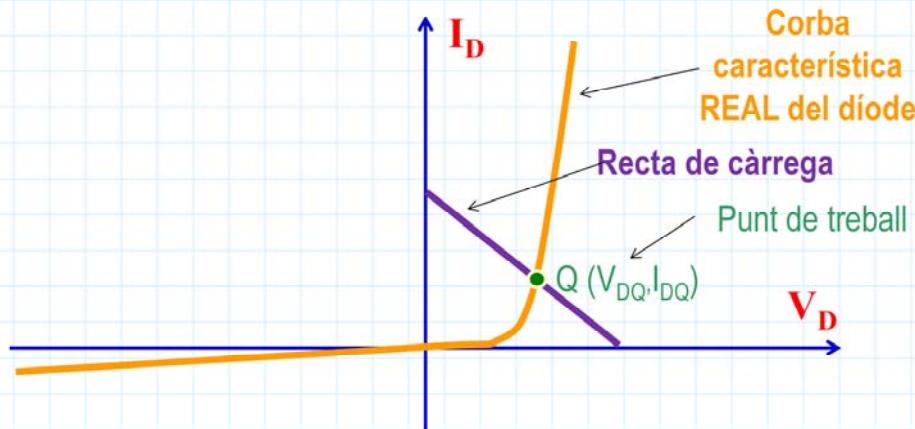


La recta de carga no depende de la característica del dispositivo. Sólo depende de la tensión de alimentación (V_s) y del valor de la resistencia serie (R_s).

Cuando igualamos las variables V_D e I_D a cero, obtenemos la abcisa en el origen (puntos de corte con el eje x), y la ordenada en el origen (puntos de corte con el eje y).

1.2 Punt de treball

- El diode ha de complir necessàriament la seva CORBA CARACTÉRISTICA.
- La intersecció de la corba característica del díode amb la recta de càrrega del circuit defineix el PUNT DE TREBALL del díode.



10

La curva característica del diodo representa el lugar geométrico con todo el conjunto de pares tensión-corriente posibles (V_D , I_D).

La recta de carga y la ecuación no lineal del diodo deben satisfacerse mutuamente.

Gráficamente se corresponde con el punto de intersección de la recta con la curva característica del diodo.

El punto Q indica la tensión y la corriente del diodo en continua (obsérvese que el generador de tensión es de continua)

1.2 Aproximaciones del díode

- Es defineixen MODELS que aproximen el comportament del díode real, amb precisió creixent:
 1. Model **ideal**
 2. Model **ideal amb tensió llindar**
 3. ...

11

Como hemos visto, el método de la recta de carga necesita disponer de la curva real del diodo, suministrada por el fabricante, lo cual no es siempre posible. Además, el método es poco operativo cuando hay varios diodos.

Para resolver analíticamente circuitos con diodos, se suele realizar una aproximación basada en el uso de **modelos lineales para el diodo**. De esta manera, se pueden aplicar las leyes de Kirchhoff y los teoremas derivados para circuitos lineales (mallas, nodos, Thevenin, superposición, etc.).

Típicamente se introducen 4 modelos lineales para el diodo, que representan aproximaciones cada vez más próximas al comportamiento real del dispositivo. En nuestro caso, se abordará el estudio de los dos primeros, que son los que más se utilizan.

1.2 Aproximacions del díode

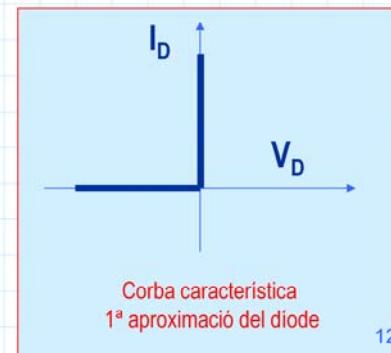
1. Díode ideal

Díode real



Es comporta com un interruptor:

- Polarització directa: tancat (ON)
 - $V_D = 0$ per a tota $I_D > 0$
- Polarització inversa: obert (OFF)
 - $I_D = 0$ per a tota $V_D < 0$



El **modelo 1** (diodo ideal) aproxima el comportamiento del diodo con el de un interruptor.

Se trata del modelo más sencillo.

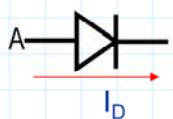
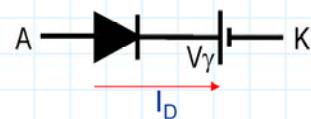
Aproximaciones en los parámetros:

$V\gamma \approx 0$, $I_s \approx 0$, la curva exponencial se approxima por una semirrecta vertical (pendiente infinita)

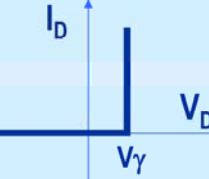
1.2 Aproximacions del diode

2. Díode ideal amb tensió llindar V_γ

Díode real

Díode ideal + font V_γ 

- $V_D = V_\gamma$ per a tota $I_D > 0$

Corba característica
2ª aproximació del diode

13

Modelo 2, es el más usado.

Diferencias respecto al modelo 1: $V_\gamma \approx 0.7$ (en Si)

Esto se refleja en el circuito añadiendo al diodo ideal (modelo 1) un generador (pila, batería) de valor V_γ en serie.

En directa: $V_D \approx 0.7V$, $I_D > 0$

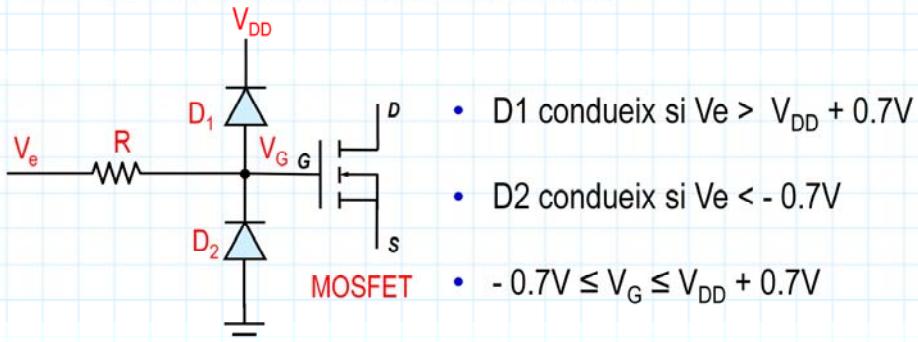
En inversa: el diodo se comporta como un interruptor abierto e $I_D = 0$

Obsérvese la respuesta lineal $I_D - V_D$, igual a la del modelo 1 pero desplazada a la derecha V_γ

El **modelo 3** trata de modelizar la **Resistencia en directo** del diodo, mientras que el **modelo 4**, también su **Resistencia inversa**.

1.3 Protecció d' entrades digitals

- Díodes retalladors (*Clipping diodes*): protegeixen les entrades dels circuits amb MOSFET front a sobretensions.



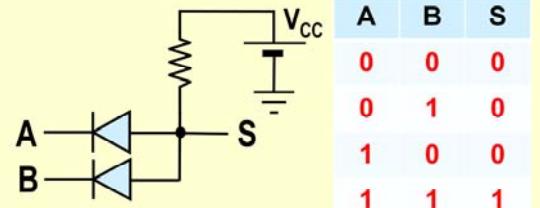
14

El circuito se denomina recortador porque mantiene la tensión V_G en un intervalo acotado, como indica la última inecuación. Por supuesto, esto mientras no se “fundan” los diodos por encontrarnos fuera de las especificaciones de los dispositivos.

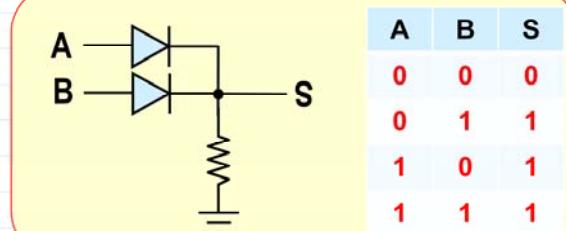
La resistencia R limita la corriente por los diodos e impide que se destruyan por excesiva disipación de potencia.

1.3. Aplicaciones digitales

Porta AND (Y)



Porta OR (O)



15

A continuación se estudian dos puertas lógicas diseñadas con diodos y resistencias. Son las puertas AND y OR.

Su funcionamiento es fácil de deducir a partir del modelo 1 ó 2 del diodo AND: cuando hay uno o más ceros lógicos en las entradas, los diodos correspondientes conducen, y la salida es un nivel bajo de tensión (“0” lógico). Sólo cuando todas las entradas son “1”, los diodos están cortados y la salida es “1”

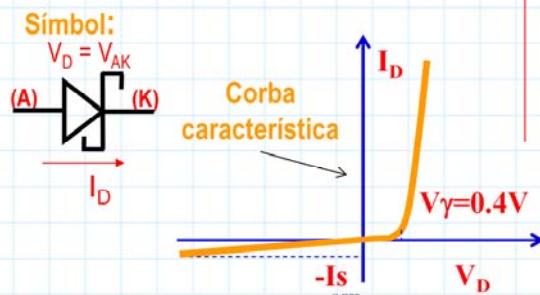
OR: ocurre lo contrario. Cuando hay uno o más unos lógicos en las entradas, los diodos correspondientes conducen, y la salida es un nivel alto de tensión (“1” lógico). Sólo cuando todas las entradas son “0”, los diodos están cortados y la salida es un “0”.

Estos esquemas (AND, OR) aparecen generalizados en memorias de solo lectura, como ROM, PROM, PLAs y PALs (se verá en el tema 5 - Memorias).

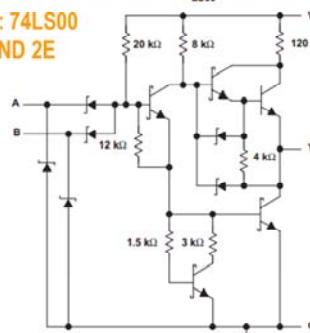
Hay que advertir que con diodos y resistencias no se puede diseñar la puerta NOT, y por tanto tampoco la NAND ni la NOR. Para esto hace falta usar un dispositivo nuevo: el TRANSISTOR, que veremos al final de este tema (BJT) y en el tema 2.(MOSFET).

1.4 Díodes Schottky

- Díodes especiales per a commutació
- Basats en la unió metall (Al)-semiconductor (“n” poc dopat)
- Alta I_s (1000 voltes major)
- Baixa V_γ (0.4V aprox.)
- Molt ràpids en commutació
- Aplicació en circuits digitals d'alta velocitat



Exemple: 74LS00
4 * NAND 2E



16

Los Schottky son diodos especiales para aumentar la velocidad de conmutación de las puertas lógicas. Para conseguir este objetivo, no son diodos semiconductores normales, sino que se construyen mediante una unión de un metal (aluminio) y de un semiconductor de tipo N muy poco dopado.

Este tipo de diodos tienen un tiempo de recuperación inversa (paso de conducción a corte) mucho menor de lo normal y, en consecuencia, una mayor velocidad de conmutación.

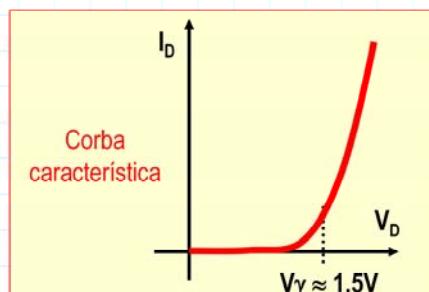
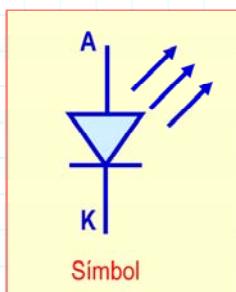
También tienen la ventaja en conducción de una menor V_γ , por lo tanto, de una menor caída de tensión y menor potencia disipada.

Como inconveniente, en la zona de funcionamiento inversa, la corriente de saturación es bastante mayor (alrededor de 1000 veces más), que en un diodo normal de Silicio.

Los Schottky se utilizan en las puertas lógicas TTL Schottky, que son puertas TTL especiales de alta velocidad. En estas puertas, la asociación de un diodo Schottky y de un transistor bipolar dan lugar a un transistor Schottky (ver figura). La característica principal de este tipo de transistores es que no se llegan a saturar, por lo que aumenta considerablemente su velocidad de conmutación.

1.4 Fonaments dels LEDs

- LED: Díode emissor de llum
- Al polaritzar en directe la unió P-N, s'injecten portadors majoritaris. Per a restablir l'equilibri, es recombinen els portadors, desprendent energia en forma de calor o de llum.
- Aquest últim cas (emissió de llum) es produeix escollint materials semiconductors adequats : GaAs, GaAsP, SiC, ...



17

Al polarizar en directo la unión P-N, se inyectan portadores mayoritarios. Para restablecer el equilibrio, los portadores se recombinan desprendiendo energía en forma de calor o de luz.

Este último caso (emisión de luz) se produce eligiendo materiales semiconductores adecuados:

GaAs, GaAsP, SiC, ...

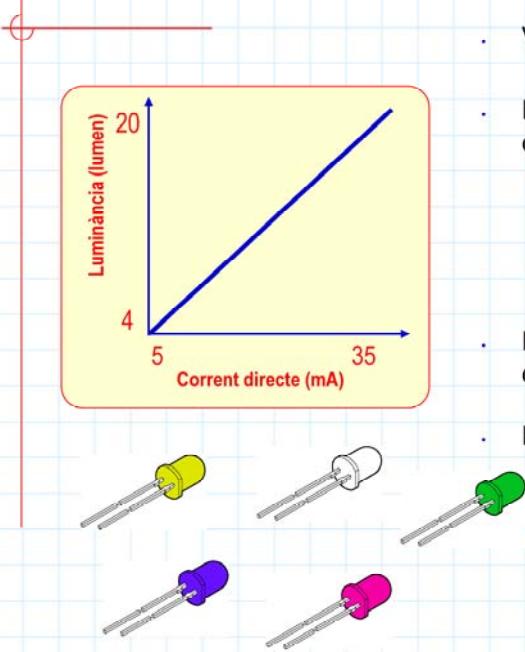
El color de la luz emitida (longitud de onda) depende del material empleado.

Obsérvese que la curva I_D-V_D es exponencial, como la de un diodo normal, pero el valor de la tensión de codo es aproximadamente el doble (entre 1.5V y 2V) para LED estándar.

La tensión de codo aumenta con la frecuencia de la radiación.

Para LED de color azul o ultravioleta (la de mayor frecuencia, menor longitud de onda) la tensión de codo puede llegar a 4V.

1.4 Característiques dels LEDs



- V_F entre 1.5V i 4V
- La luminància emesa és proporcional al corrent en directe
 - (per a una bona visibilitat es requereixen de 10 a 20mA)
 - Els actuals d'alta potència (1W o més) requereixen més corrent
- La radiació és quasi monocroma (d'un sol color).
- Existeixen diòdes de:
 - Infrarojos (moltes aplicacions)
 - Color groc
 - Color verd
 - Color roig (el més típic)
 - Color blau
 - Ultravioleta } Els més recents

18

El LED conduce para $VD \geq V_F$, pero esto no es suficiente para que se ilumine.

La intensidad luminosa emitida es proporcional a la corriente en polarización directa. Para una buena visibilidad se requieren típicamente de 10 a 20 mA en diodos estándar. Sin embargo, para LED de alta potencia de color azul o ultravioleta para generar, con la ayuda de un filtro, luz blanca, la corriente es mucho mayor. Por ejemplo, si el LED es de 1W y su tensión de codo es de 4V, la corriente será de $(1W/4V) = 250$ mA.

2 parámetros fundamentales del LED:

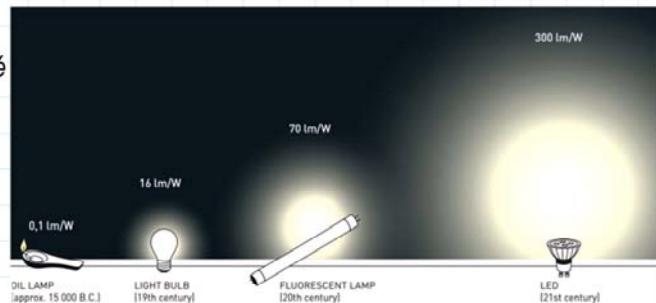
$$V_F \text{ (forward)} = V_F$$

$$I_F = I \text{ necesaria para una buena visibilidad}$$

1.4 LED

- En 2014 fou entregat el **Nobel de Física** als descubridors del LED blau: Akasaki, Amano i Nakamura.
- Per produir la llum blanca faltava el LED blau:
 - Llum blanca amb 3 LED: roig, verd i blau (RGB)
 - Llum blanca amb LED blau (o ultraviolat) i filtre de fósfor
- Després de diversos intents fallits, en 1994 van obtenir per primera vegada un LED blau d'alta" eficiència (per a l'època).
- Utilitzaren com a semiconductor InGaN / AlGaN
- http://www.asifunciona.com/tablas/leds_equivalecias/leds_equivalecias.htm

Gràcies al LED ara es té molta més eficiència



19

Las bombillas incandescentes iluminaron el siglo XX; el siglo XXI será iluminado por lámparas LED, dicen desde la Real Academia Sueca.

El LED rojo en 1962

En torno a 1970 la mejora en las técnicas de crecimiento de cristales permitió un gran avance en el desarrollo de nuestros queridos LEDs azules. En principio se intentaron basar en GaN (Nitruro de Galio) pero pronto se vio que esa técnica no conseguía una luminosidad suficiente. Es aquí donde podemos establecer la creación del primer LED azul, aunque no era usable y apenas se veía su luz.

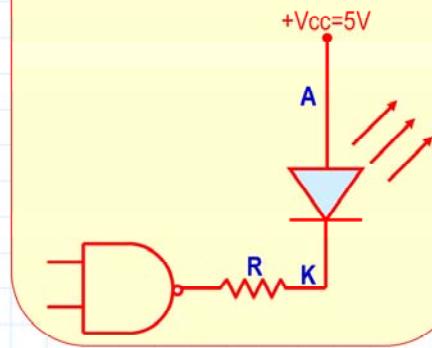
Para los más exigentes podemos establecer 1989 como la fecha en que se consiguió el primer LED azul con una emisión razonablemente alta, aunque su eficiencia era del 0.03%. Una vez más parecía que el LED azul no era viable para la producción masiva;

El LED, subrayó, es "una nueva luz para iluminar el mundo", más eficiente y respetuosa con el medio ambiente al ahorrar energía.

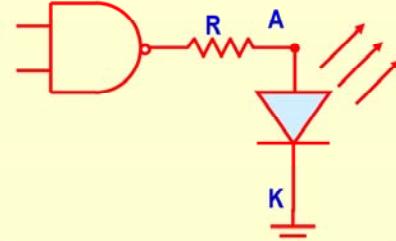
Con una duración de 100.000 horas (frente a las mil horas escasas de una bombilla de tungsteno) y un rendimiento que puede llegar a 300 lumens por vatio (frente a los pírricos 16 lm/W de la bombilla), los leds ayudarán a contener la bulimia energética de los países ricos. Y pueden llevar la luz a los 1.500 millones de personas de países pobres que no tienen acceso a redes eléctricas, pero que pueden obtener electricidad suficiente para encender leds con pequeños paneles solares y baterías. Los LED son cada vez más eficientes en el sentido de que requieren menos energía para emitir luz, en comparación con las bombillas tradicionales o los fluorescentes. Así, los más avanzados alcanzan más de 300 lumen (flujo luminoso) por vatio, frente a los 16 de las bombillas incandescentes y 70 de los fluorescentes. Y, a diferencia de estos últimos,

1.4 Circuits amb LEDs

Encès amb sortida a nivell baix



Encès amb sortida a nivell alt



$$R = \frac{V_{cc} - V_{OL} - V\gamma}{I_{NECESSÀRIA}}$$

$$R = \frac{V_{OH} - V\gamma}{I_{NECESSÀRIA}}$$

20

Las figuras muestran un par de circuitos que utilizan el encendido de un LED para identificar los niveles lógicos de salida de un circuito lógico

V_{OL} = tensión de salida a nivel bajo de la puerta (“0” lógico)

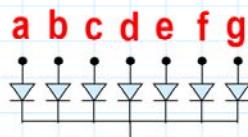
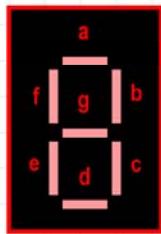
V_{OH} = tensión de salida a nivel alto de la puerta (“1” lógico)

$I_{necessaria}$ se refiere al valor de corriente que proporciona una buena visibilidad del LED.

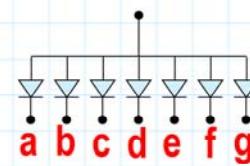
La R controla la corriente por el LED

Se suele emplear más el circuito de la izquierda, pues en determinadas familias lógicas (como TTL), la capacidad de dar corriente a nivel bajo es mayor que a nivel alto.

1.4 Visualitzadors de 7 segments



Configuració de càtode comú



Configuració de ànode comú

21

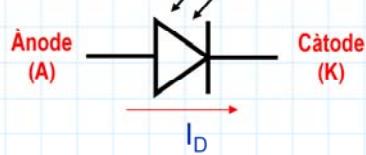
Los visualizadores (o *displays*) de 7 segmentos son dispositivos constituidos por 7 LEDs, configurados en catodo común o en ánodo común, tal y como se muestra en la figura.

El encendido selectivo de los LED permite representar caracteres numéricos o alfabéticos.

Para encender los LED hace falta un circuito lógico de control (decodificador BCD-7segmentos) y típicamente 7 resistencias (una por LED). También se puede hacer con una sola R para simplificar el diseño.

1.4 Fotodíodes

- Funcionament invers als LED
 - A partir de la llum s'obté corrent elèctric
 - La llum accedeix a la unió del díode
 - Encapsulat translúcid
- Símbol



- Fotodíodes reals



22

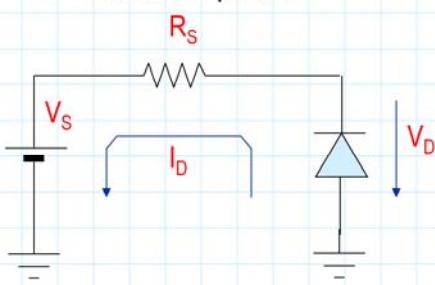
Los fotodiodos tienen el funcionamiento inverso a los LED. En este caso, a partir de una radiación de luz, el fotodiodo generará una corriente inversa, que será proporcional a la intensidad luminosa. El material utilizado para fabricar un fotodiodo depende de la frecuencia de la radiación luminosa incidente que deba detectar. Los fotodiodos pueden ser sensibles a la luz visible, pero son mucho más comunes los sensibles a las radiaciones infrarrojas.

El símbolo del fotodiodo es el de un diodo normal, al que se añaden unos rayos de luz incidentes, como se ve en la figura.

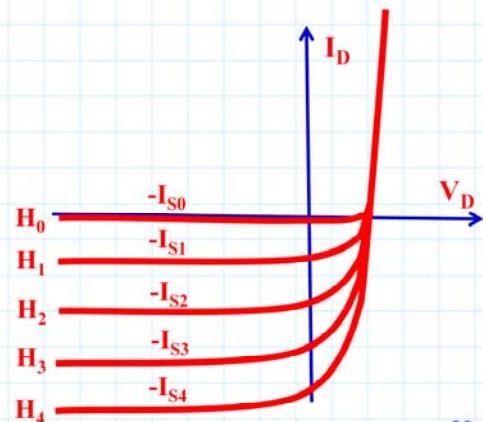
Para que un fotodiodo pueda funcionar, la luz debe acceder a la unión del fotodiodo. Es por ello que, como se ve en la figura, los fotodiodos reales deben tener un encapsulado translúcido que deje pasar la luz. El cuadrado de la figura, que se ve a través de un cristal translúcido, es el fotodiodo, con su unión PN accesible a la luz.

1.4 Fotodíodes

- Funcionament en inversa
- Corrent invers ($I_D = -I_S$) proporcional a la intensitat iluminosa
 - ◆ H: Intensitat iluminosa (fotons/s)
- Circuit de prova



Corbes característiques



23

Los fotodiodos deben pues, polarizarse en la zona inversa, siendo su corriente inversa de saturación (I_S), proporcional a la intensidad luminosa incidente. El circuito de prueba muestra que el diodo está polarizado en su zona de funcionamiento inversa.

Las curvas características muestran la relación Intensidad-Voltaje. Puede verse que estas curvas son similares a las de un diodo normal en su polarización en directo. Sin embargo, en inverso puede verse la gran influencia que tiene la energía de la radiación luminosa incidente en la corriente inversa de saturación (I_S). I_{S0} representa la corriente inversa para oscuridad, en tanto que I_{S1} a I_{S4} representan corrientes inversas para intensidades luminosas crecientes.

Los fotodiodos se utilizan en numerosas aplicaciones, por ejemplo en las siguientes relacionadas con la informática:

- En los lectores de CD/DVD/Blu-ray: para detectar la información grabada de forma digital en el disco.
- En la transmisión por fibra óptica: para detectar el tren de pulsos de luz que llegan por la fibra desde el emisor y obtener los niveles altos y bajos de tensión para el receptor.

1.4 Aplicacions LED i fotodíodes

- Visualitzadors (televisors, pantalles, panels, marcadors, projectors multimèdia...)
- Comunicacions òptiques
- Xarxa Li-Fi (<https://en.wikipedia.org/wiki/Li-Fi>)
- Sistemes d'il.luminació (domèstica, urbana, automoció...)
- Semàfors
- Lectors de discs òptics
- Perifèrics ...



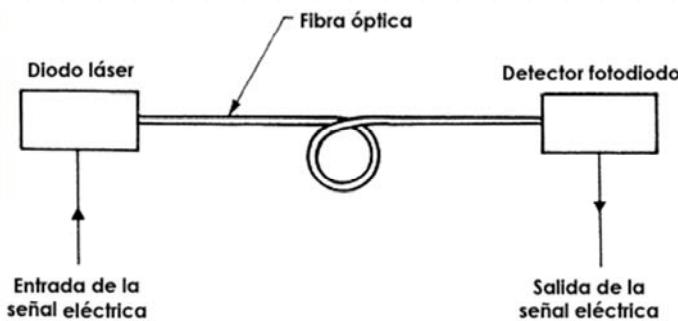
24

Las principales aplicaciones de los LED y fotodiodos son las siguientes:

- Sistemas de visualización, por ejemplo en televisores, pantallas, paneles, marcadores, proyectores multimedia, etc.
- Comunicaciones por fibra óptica, como se verá a continuación. En este caso, los LED transforman los pulsos eléctricos del emisor en pulsos de luz para transmitirse por la fibra óptica. En el lado del receptor, los fotodiodos se utilizan para el paso inverso, es decir para recuperar los pulsos eléctricos a partir de los pulsos de luz recibidos a través de la fibra.
- Red Li-Fi (<https://en.wikipedia.org/wiki/Li-Fi>). Este tipo de transmisión de datos del futuro se basa en modular la información a transmitir mediante minúsculos pulsos de luz sobre las lámparas de iluminación basadas en LED, por ejemplo en una oficina. Los receptores (computadores, tabletas, móviles, etc) decodifican esta información mediante fotodiodos o fototransistores y la transforman en pulsos eléctricos que recuperan la información transmitida.
- Sistemas de iluminación (doméstica, urbana, automoción...). Los LED de alta potencia que dan luz blanca o de diferentes colores han revolucionado los sistemas de iluminación, tanto domésticos como urbanos o los de automoción. Por ejemplo, en iluminación doméstica, se pude conseguir con LED la misma intensidad luminosa que con lámparas halógenas, pero con la décima parte de potencia.
- Semáforos y otras señales de tráfico luminosas.
- Lectores de discos ópticos, como se verá a continuación. Los fotodiodos se utilizan para detectar la información grabada de forma digital en el disco. Los LED generan un haz luminoso que rebota en la superficie grabada del disco, siendo detectada por los fotodiodos.
- Otros periféricos de computadores, como impresoras.

1.4 Aplicaciones LED y fotodíodos

- Utilització en transmissió de dades per fibra òptica



25

Se utilizan LED o diodos láser para emitir la señal luminosa. El láser tiene más potencia y direcciónalidad (menos dispersión).

La señal luminosa se transmite por fibra óptica, que es un fino tubo de vidrio (cubierto de plástico) por el que el rayo luminoso va reflectándose hasta llegar al fotodiodo.

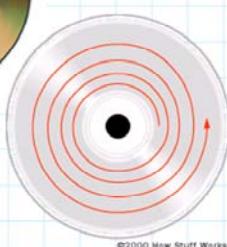
Ventajas sobre la transmisión eléctrica a través de cables metálicos:
 menos pérdidas de señal y menos problemas de interferencias electromagnéticas. Adecuada cuando la distancia de la transmisión es grande. Permite más velocidad (ancho de banda) que la transmisión por cable.

El fotodiodo convierte la señal luminosa en señal eléctrica.

1.4 Aplicacions LED i fotodíodes

• Lectura de CDs, DVDs i Blu-ray

- ◆ Distribució de la informació:



- ◆ Representació dels bits



- ◆ Pous ("pits"):

- 0.5 μm d'ample
- 0.83 μm de llarg (mínim)
- 125 nm d'alt
- En DVD i Blu-ray aquests valors són menors

- ◆ Zones planes ("lands")

26

Los discos ópticos han seguido la tecnología del disco compacto de audio (CD-DA: Compact Disc Digital Audio). Están hechos de una oblea de policarbonato, de 120 mm de diámetro y 1,2 mm de espesor, con un agujero de 15 mm en el centro. Esta base de oblea está estampada o moldeada con una sola pista física en una configuración en espiral que va desde dentro hacia fuera. La pista en su desarrollo en espiral guarda una distancia de 1,6 micras (millonésimas de metro, o milésimas de milímetro). En comparación, un disco de vinilo de los grandes (LP) tiene un paso de pista física de alrededor de 125 micras.

Cuando se ve desde el lado de la lectura (la parte inferior), el disco gira en sentido antihorario. Si se examina la pista en espiral con un microscopio, se observa que a lo largo de la pista aparecen una especie de pozos, llamados "pits" (resaltos o "bumps" si se miraran desde la cara contraria), y unas áreas planas entre los pozos, llamados "lands".

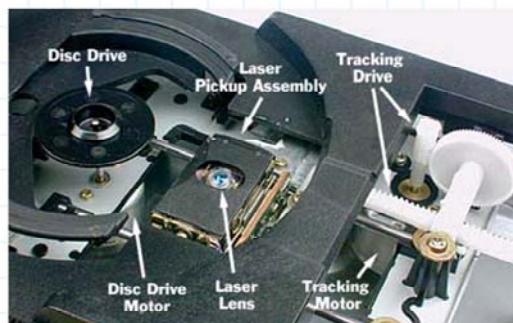
El láser utilizado para leer el disco podría pasar a través del plástico transparente, por lo que la superficie de sellado se recubre con una capa reflectante de metal (generalmente de aluminio) para que sea reflectante. A continuación, el aluminio se recubre con una fina capa protectora de laca acrílica, y finalmente se añade una etiqueta o impresión.

Fuente: Scott Mueller, Upgrading and Repairing PCs, 2013, Pearson Education Inc. (Chapter 11 Optical Storage)

1.4 Aplicaciones LED i fotodíodes

- Lectura de CDs, DVDs i Blu-ray

- Sistema de lectura:



- Funcionamiento del sistema de lectura:

<http://static.howstuffworks.com/flash/cd-read.swf>

27

La lectura de la información almacenada en el disco óptico consiste en hacer rebotar un rayo láser de baja potencia en la capa reflectante del disco. Para capturar la luz reflejada se utiliza un receptor sensible a la luz (*optical pickup* en la animación Flash).

Cuando la luz láser incide en una zona plana (*land*) de la pista, la luz reflejada es captada por el fotodetector. Sin embargo, cuando la luz golpea un pozo (*pit*), no se detecta ninguna luz reflejada.

A medida que el disco gira, el láser incide de forma continua sobre el mismo mientras que el receptor recibe un patrón de luz intermitente en función de que el láser incida sobre los pozos o sobre las zonas planas. Cada vez que el láser pasa sobre el borde de un pozo, la luz capturada por el receptor cambia de estado, pasando de ser reflejada a no serlo, o viceversa. Cada cambio en el estado de la reflexión causada por cruzar el borde de un pozo supone asignar un valor 1 al bit, mientras que cuando no hay transiciones, se asigna un valor 0 (modulación NRZI).

Fuente: **Scott Mueller, Upgrading and Repairing PCs, 2013, Pearson Education Inc. (Chapter 11 Optical Storage)**

1.5 El transistor bipolar. Fonaments

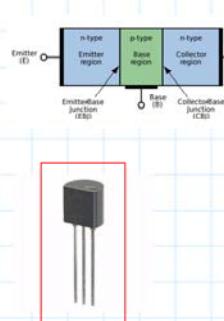
BJT: *Bipolar Junction Transistor*

- Un **Transistor Bipolar de Unió** és un dispositiu de tres terminals que, en la majoria dels circuits lògics, treballa com un **interruptor controlat per corrent**.
 - Si circula un petit corrent per un dels terminals, anomenat la **base**, aleshores l'interruptor està en **ON**:
El corrent pot circular entre els altres dos terminals, anomenats l'**emissor** i el **col·lector**. Amplifica el corrent de base.
 - Si no circula corrent per la base, aleshores l'interruptor està en **OFF**:
No circula corrent entre l'emissor i el col·lector.

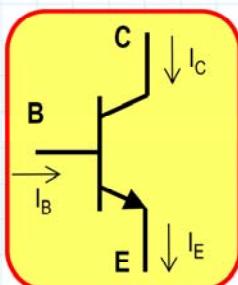
28

1.5 El transistor bipolar. Fonaments

Diagrama de un transistor NPN:



TRANSISTOR N-P-N



B: Base

C: Col·lector

E: Emissor

$$I_B + I_C = I_E$$

- Fixeu-vos que el símbol conté una petita fletxa en la direcció del flux de corrent (unió base-emissor, com en un diòde)
- També és possible fabricar transistors PNP. Però, els transistors PNP s'utilitzen molt poc en circuits digitals.

29

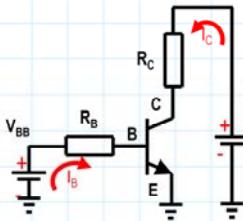
El transistor NPN es el más habitual en los circuitos, aunque también se usan los PNP en algunos circuitos. Para intentar simplificar su estudio, siempre que sea posible, nos referiremos por defecto al NPN.

En cualquier caso, hay que recordar que las **corrientes** se definen siempre en su **sentido real** para los transistores, mientras que las tensiones de las uniones **en los PNP** serán de **signo opuesto** a las equivalentes **en los NPN**.

Así, la tensión Base-emisor de un **NPN** en activa será **positiva**, al igual que la tensión Colector-emisor, mientras que en un **PNP** en activa, las dos tensiones serán **negativas**.

1.6 Corbes característiques d'eixida

El corrent I_C en funció del voltatge V_{CE} i el corrent I_B



Dades:

$$\beta = 500$$

(guany del transistor)

$$R_B = 100\text{k}\Omega$$

$$R_C = 0.4\text{k}\Omega$$

$$V_{CC} = 8\text{V}$$



Polimèdia sobre "Polarització del transistor bipolar" (G.Benet):

<https://media.upv.es/player/?id=d0a5f9f5-2a3e-a04f-a5d1-d2e6a5028f86>

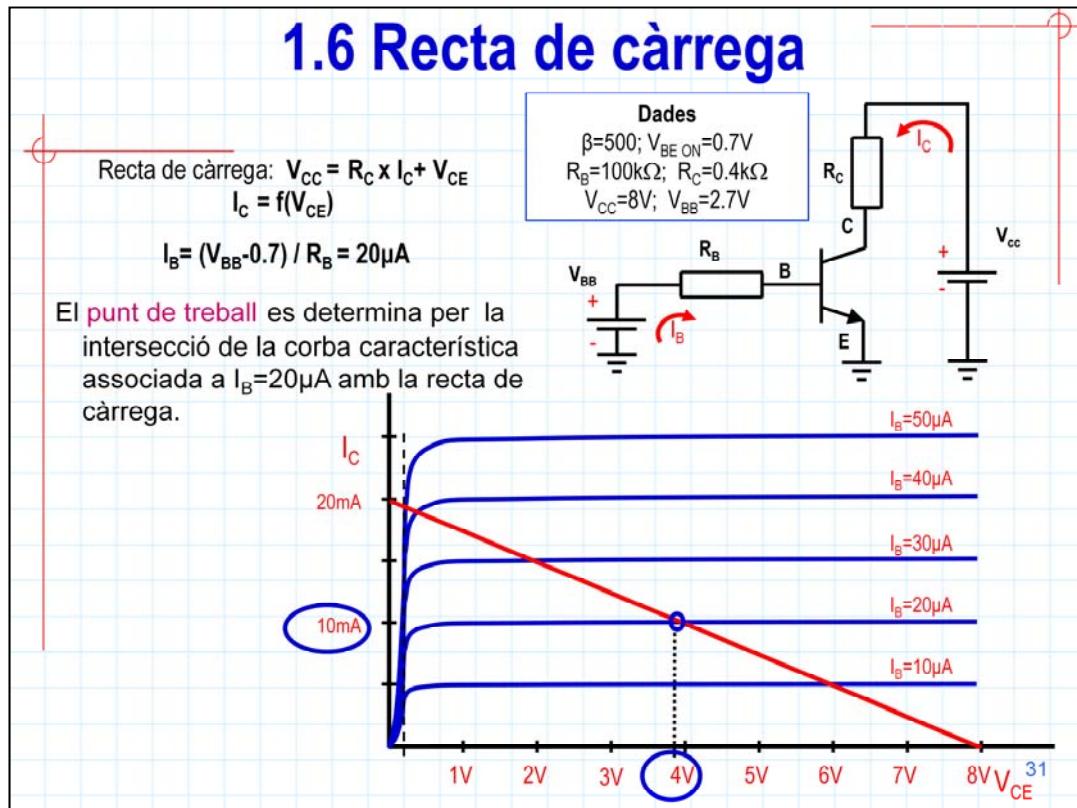
30

Se recomienda visualizar el polimedia referenciado para reforzar los conceptos de polarización del transistor.

La curvas características de salida muestran la corriente del colector I_C de la malla de salida. Esta corriente depende de V_{CE} , así como de la corriente de base I_B , por ello hay varias curvas, cada una para una corriente de base diferente.

Para corriente de base igual a '0', el transistor está en CORTE (no conduce), correspondiendo a la curva pegada al eje horizontal.

Obsérvese que en la zona central de cada curva, los valores de corriente I_C son mucho mayores que los correspondientes de I_B . Por ejemplo, para $I_B=40\mu\text{A}$, $I_C=20\text{mA}$ (se puede obtener esta corriente proyectando sobre el eje de ordenadas). A este efecto le denominamos **efecto transistor** o de **amplificación** de corriente. En este caso, la ganancia de corriente es $\beta=(I_C/I_B)=(20\text{mA}/40\mu\text{A})=500$. ¡El transistor tiene una ganancia de corriente de 500!. Esto sucede en la zona casi horizontal de cada curva, que se encuentra en la región denominada ACTIVA. En esta zona es donde sucede el efecto transistor.



Gráficamente, se puede resolver empleando la ecuación ya conocida del circuito de colector:

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C \times I_C$$

Esta ecuación muestra la relación lineal entre V_{CE} e I_C y sólo depende del circuito externo. Se le denomina **Recta de Carga**.

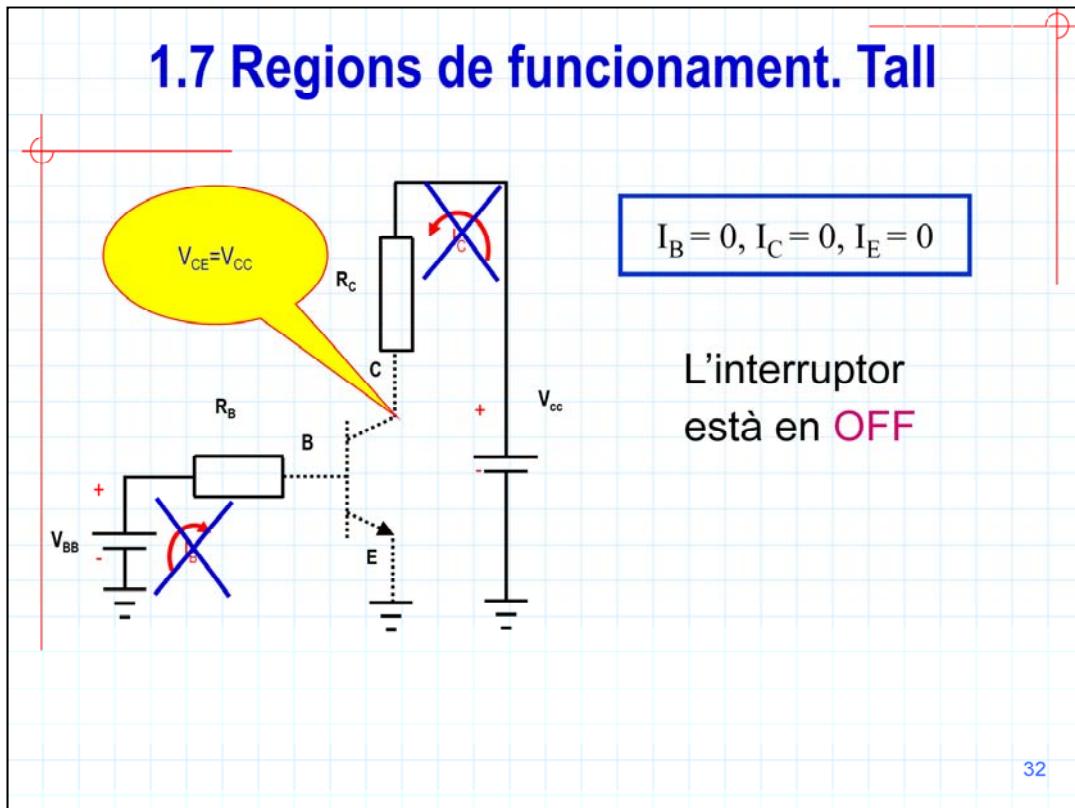
El punto de trabajo será el cruce de la recta de carga con la curva característica del transistor, correspondiente a $I_B = 20\mu A$

Para dibujar la recta de carga $I_C = V_{CC}/R_C - V_{CE}/R_C$
debe tenerse en cuenta que cortará a los ejes en dos puntos:

La tensión V_{CC} (cuando $I_C = 0mA$)

Y la corriente de corto-circuito $I_{CMAX} = V_{CC}/R_C$
(correspondiente a $V_{CE} = 0V$).

(en nuestro ejemplo, son 8V y 20mA, respectivamente)

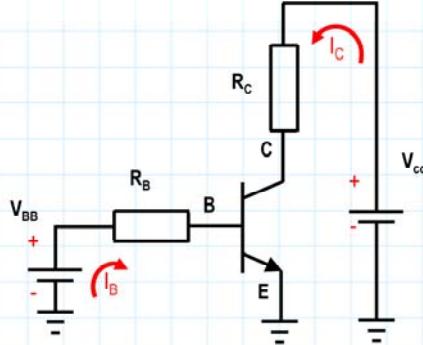


Zona de CORTE

Si en nuestro anterior ejemplo hacemos que $V_{BB} < 0.7V$, la unión base-emisor no podrá conducir, y la I_B será cero. A esta situación se la denomina **CORTE**.

En esta situación, todas las corrientes del transistor serán nulas. El **modelo** del transistor en esta zona es un **circuito abierto** en todos sus terminales.

1.7 Regions de funcionament. Activa



$$I_B > 0 \rightarrow I_C = \beta I_B$$

El corrent I_C
és proporcional al I_B
(zona lineal)

β típica $\geq 100 \rightarrow$ amplificació de corrent ($I_C \gg I_B$)

33

Si $V_{BB} > 0.7V$, el diodo B-E estará en directo (ON).

Por tanto:

$$V_B = V_{BE} = 0.7V$$

$$I_B = (V_{BB} - 0.7V) / R_B$$

Si está en zona activa, se cumplirá que:

$$I_C = \beta \times I_B, \text{ por lo que:}$$

$$V_{CE} = V_C = V_{CC} - I_C \cdot R_C \quad (\text{importante})$$

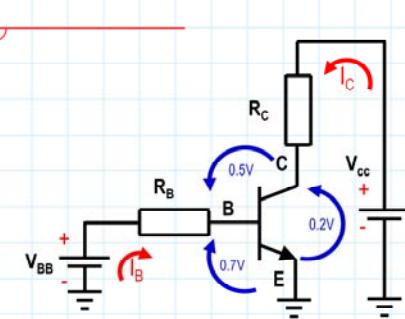
Sustituyendo, obtendremos:

$$V_C = V_{CC} - \frac{(V_{BB} - 0.7V) \cdot \beta \cdot R_C}{R_B}$$

Si la tensión V_{BB} fuera variable y V_{CC} constante, esta fórmula nos indica que la tensión en V_C depende **linealmente** de la tensión V_{BB} multiplicada por un coeficiente constante, en función de β , de R_C y de R_B y que en general suele tener un valor grande (obsérvese el signo negativo).

Por tanto, pequeñas variaciones de V_{BB} producirán grandes variaciones en V_C (aunque de signo contrario). En esto se basa el efecto de la **amplificación**, que es una de las principales aplicaciones del transistor en esta zona de trabajo (zona activa ó zona lineal).

1.7 Regions de funcionament. Saturació



L'interruptor està en ON

- I_C no pot augmentar més, es diu que el transistor està **SATURAT**

$$I_C < \beta I_B ; V_{CE} \approx 0.2V ; \text{ on } I_B > I_{B\min SAT}$$

- La saturació ocorre perquè el circuit d'eixida (V_{cc} i R_C) limita I_C a un valor màxim.

34

Zona de SATURACIÓN

Si en el circuito de nuestro ejemplo fuera aumentando V_{BB} , la I_B iría creciendo, así como la I_C . Según nos indicaba la anterior ecuación $V_{CE}=V_C=V_{CC}-R_C \cdot I_C$, la tensión V_{CE} irá disminuyendo conforme aumentamos I_B . En el momento que se alcance una tensión: $V_{CE}=V_{CESAT}=0.2V$, ya no puede aumentar más la corriente I_C , por lo que se pierde la linealidad entre I_B e I_C , y el transistor entra en SATURACIÓN. **La saturación se produce porque el circuito de salida (V_{cc} y R_C) impide el paso de más corriente, aunque la I_B aumente.**

$$I_{CSAT} = (V_{CC} - 0.2V) / R_C$$

$$I_{BMINSAT} = I_{CSAT} / \beta$$

$$I_{B\min SAT} = (V_{CC} - 0.2V) / R_C / \beta$$

1.8 El transistor BJT en commutació (1)

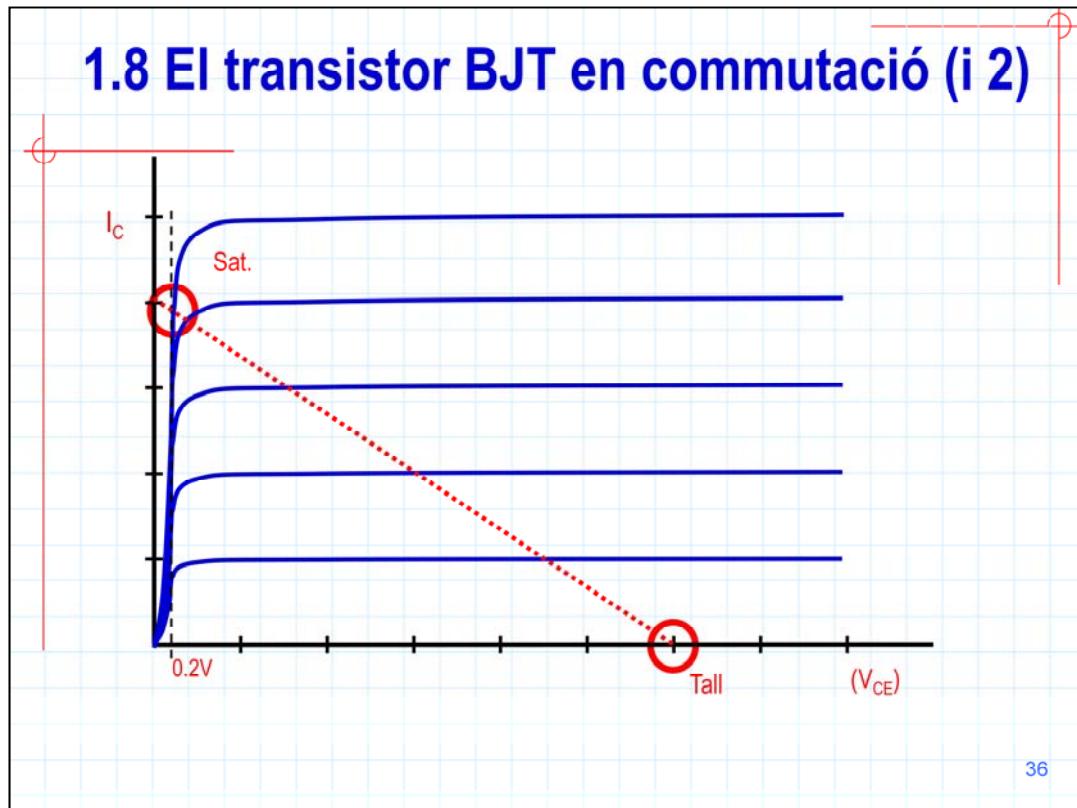
- Els transistors treballen bé en **tall** (OFF) o en **saturació** (ON):
 - Es tracta de dos estats molt diferents
 - El consum de potència es mínim
 - Són molt apropiats per a circuits digitals
- El col·lector i l'emissor formen els dos terminals de l'interruptor i la base és el seu terminal de control.
- En altres paraules, el petit corrent per la base permet controlar un corrent molt major entre el col·lector i l'emissor.

35

Un transistor se dice que trabaja en CONMUTACIÓN cuando se encuentra **exclusivamente** en el corte ó en la saturación, que son **dos estados** claramente diferenciados; pasando de un estado al otro lo más rápidamente posible.

Con ello, se evita trabajar en la zona lineal, reduciendo el consumo de potencia, ya que en el corte y en la saturación la potencia disipada es mínima.

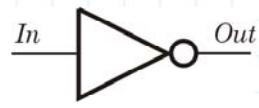
En este modo de trabajo se basan los **circuitos digitales**.



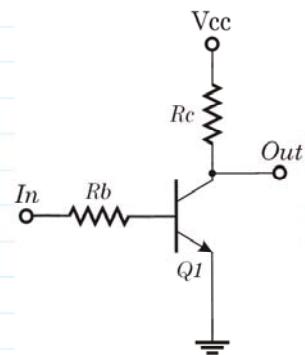
La gráfica muestra las curvas características del transistor, la recta de carga y dos puntos sobre ésta, que marcan las zonas donde el transistor trabaja en corte o en saturación.

Así se dice que el transistor trabaja en CONMUTACIÓN porque pasa de uno de esos dos estados al otro (**circuitos digitales, relacionado con los conceptos de 0 y 1**).

1.9 Portes lògiques. L'inversor



In	Out
1	0
0	1

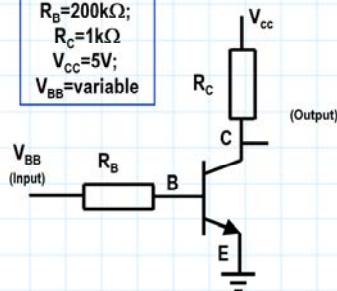


Un inversor es pot construir fàcilment amb un transistor BJT degudament polaritzat

37

1.9 Portes lògiques. L'inversor

Dades: $\beta=500$
 $R_B=200\text{k}\Omega$; $R_C=1\text{k}\Omega$
 $V_{CC}=5\text{V}$;
 $V_{BB}=\text{variable}$



Si V_{BB} és una tensió que varia entre 0 i 5V, l'eixida serà:

- Estat OFF:
 quan $V_{BB} = 0$; $I_C = 0$; $V_C = 5\text{V}$ (BJT està OFF)
 - $P = I_C * V_{CE} = 0$ (ja que I_C és nul·la)
- Estat ON:
 quan $V_{BB} = 5\text{V}$; $V_C \sim 0$
 (suposant que el BJT està SAT)
 - $P = I_C * V_{CE} \sim 0$
 ja que V_{CE} es ~ 0 aleshores la potència dissipada és molt petita

38

Tomemos de nuevo nuestro circuito de ejemplo, cambiando la alimentación V_{CC} a 5V y los valores de las resistencias tal como se muestran.

Si suponemos que la entrada V_{BB} es una tensión que comuta entre 0V y 5V, podemos comprobar fácilmente que la salida V_C también conmutará entre 5V(Corte) y 0.2V (SAT).

De hecho, cualquier tensión de entrada V_{BB} que esté por debajo de 0.7V hará que el transistor esté cortado, por lo que la tensión de salida será de 5V

Y cualquier tensión V_{BB} de entrada que esté por encima de 2.62V producirá la saturación del transistor, por lo que $V_C=0.2\text{V}$

Comprobación de la saturación:

Para que el trt. esté en SAT. Será necesaria una $I_{BminSAT}$ que valdrá:

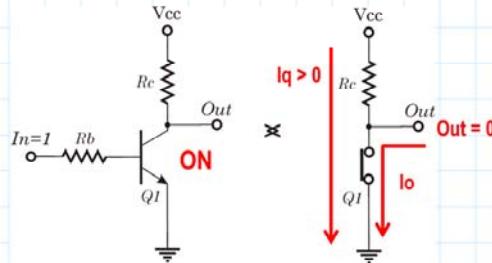
$$I_{BminSAT} = ((V_{CC}-V_{CESAT})/R_C)/\beta = (5-0.2)/1\text{k}/500 = 9.6\mu\text{A}$$

Por tanto, la tensión $V_{BBminSAT}$ será:

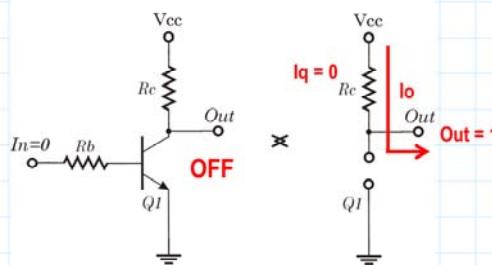
$$V_{BBminSAT} = 0.7\text{V} + R_B \cdot I_{BminSAT} = 0.7\text{V} + 200\text{k} \times 9.6\mu\text{A} = 2.62\text{V}$$

1.9 Portes lògiques. L'inversor

In = 1: La tensió d'entrada és suficientment alta per saturar a Q1 → Q1 ON.
Q1 es pot aproximar a un curcircuit



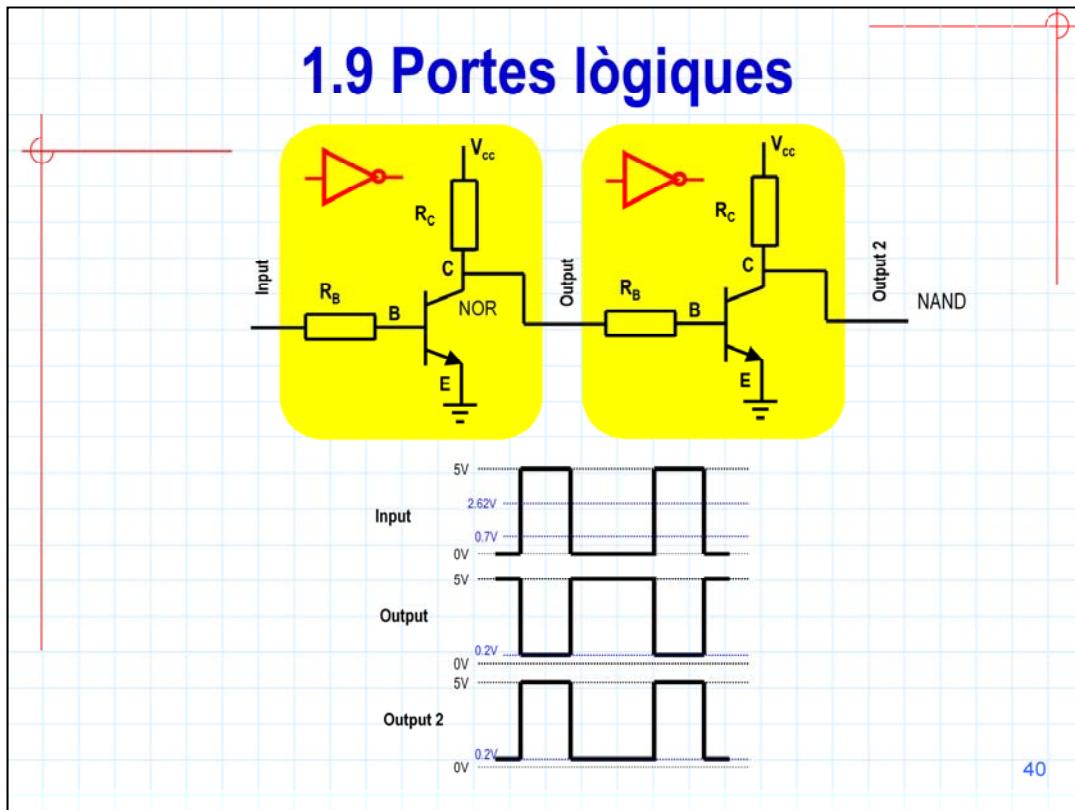
In = 0: La tensió d'entrada es molt baixa i Q1 està en tall → Q1 OFF. Q1 es pot aproximar a un circuit obert



39

Cuando $In = 1$ Q1 conduce y la salida está a masa a través de Q1. La corriente Io entra a la puerta. Hay una corriente interna (Iq) que es mayor que 0.

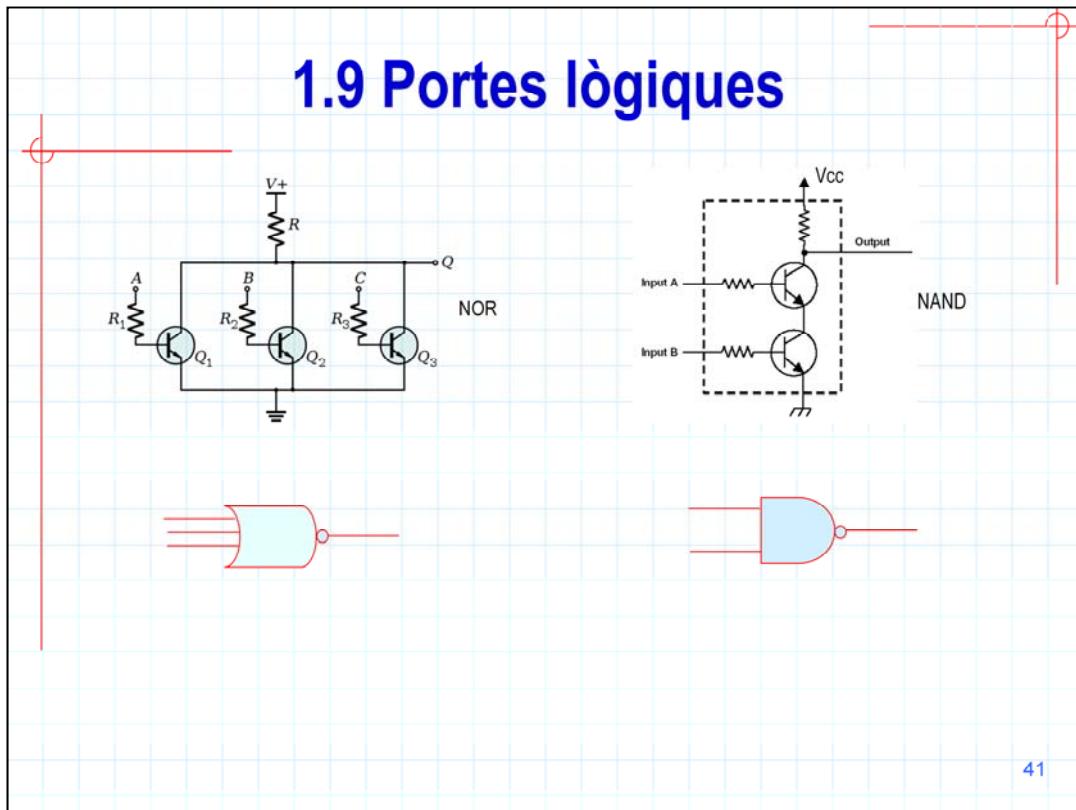
Cuando $In = 0$ Q1 está cortado y la salida está conectada a V_{cc} a través de R_c . La caída de tensión en R_c (que depende de Io), hace bajar la tensión de salida. Io sale de la puerta. No hay corriente interna Iq .



En la figura se puede apreciar la salida cuando la entrada es un tren de pulsos de 0V a 5V.

Por tanto, este circuito funcionará como una puerta lógica inversora elemental.

Si a su vez, tomáramos la salida de este circuito para alimentar otro idéntico sería totalmente compatible, por lo que acabamos de descubrir una posible **familia lógica**.



Otras puertas lógicas con BJT y resistencias

NOR: los BJTs se conectan en paralelo, de tal forma que basta con que uno de ellos se sature (entrada “1”) para que la salida sea “0”

NAND: los BJTs se conectan en serie, de tal forma que únicamente cuando los dos conducen ($A = B = “1”$), la salida es “0”

Tema 1. Resum (1)

En aquest tema hem repassat primer el funcionament de la unió PN, que hem aproximat mitjançant diversos models. Aquestes aproximacions ens han permès simplificar l'anàlisi de circuits amb diòdes.

A continuació, hem introduït alguns dels més importants circuits amb diòdes en la seva aplicació en els circuits digitals. Com exemple s'ha descrit un circuit per a la protecció de les entrades MOSFET, i altres que implementen portes lògiques digitals.

Posteriorment, s'ha descrit el diode Schottky, que aconsegueix major velocitat i menor V_f que el diode normal, sent per això de especial importància per a aplicacions de commutació.

Del mateix mode, hem descrit les particularitats del LED i hem mostrat alguns dels seus circuits d'aplicació, com els que ens permet identificar el nivell lògic d'eixida en circuits digitals. També s'ha descrit altre tipus especial de diode: el fotodiode, que aconsegueix l'efecte contrari que el LED: transforma una radiació lluminosa en un corrent elèctric.

Tema 1. Resum (i 2)

Després d'estudiar el diòde, ens hem centrat en el transistor BJT, explicant els fonaments del seu funcionament i les seves corbes característiques d'eixida.

A continuació, s'han introduït les regions de funcionament, tall quan no condueix, i zona lineal i de saturació quan condueix. S'ha introduït també la recta de càrrega, que, depenent dels components externs al transistor, determina el seu punt de treball.

Una vegada coneudes les regions de funcionament, s'ha incidit en les dos zones utilitzades en aplicacions digitals (tall i saturació), en les que es fa treballar al transistor en commutació.

Finalment, s'han descrit circuits amb transistors en aplicacions digitals, ficant exemples relacionats amb portes lògiques, com el de l'inversor.