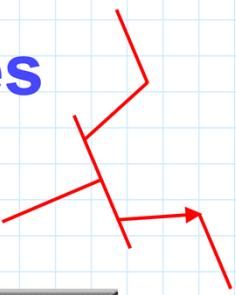


Tema 1. Dispositivos semiconductores básicos



1

Objetivos (1)

- Conocer y comprender el funcionamiento del diodo semiconductor básico.
- Conocer los distintos modelos de los diodos y saber aplicarlos al análisis de circuitos digitales con diodos.
- Conocer y comprender las aplicaciones de los diodos en circuitos digitales.
- Conocer y comprender el funcionamiento básico y alguna aplicación de diodos especiales, como los Schottky, LED y fotodiodos.

2

Objetivos (y 2)

- Conocer y comprender el funcionamiento del transistor bipolar de unión (BJT).
- Conocer y comprender las distintas regiones de funcionamiento de un BJT.
- Conocer y comprender el funcionamiento de un transistor BJT como interruptor.
- Aplicar el conocimiento sobre BJT para la formación de puertas lógicas elementales.

3

Contenidos

- 1.1 **El diodo de unión.** Fundamentos
- 1.2 Comportamiento en régimen estático
- 1.3 Circuitos con diodos
- 1.4 Tipos especiales de diodos (Schottky, LED, fotodiodo)
- **1.5 El transistor bipolar.** Fundamentos
- 1.6 Curvas características de salida. Recta de carga
- 1.7 Regiones de funcionamiento
- 1.8 El transistor en conmutación
- 1.9 Puertas lógicas elementales con transistores

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.)

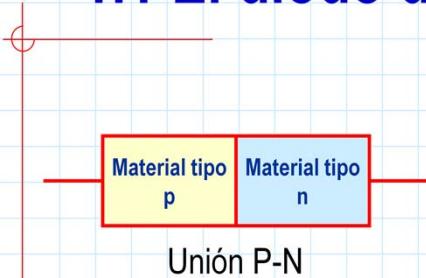
En TCO, nos centramos más bien en el aspecto funcional a nivel electrónico. Por tanto, partiendo de la curva característica de los dispositivos $I = f(V)$, se plantean unos modelos simplificados que permitirán el análisis de algunos circuitos con diodos sencillos.

Bibliografía

TEORÍA:

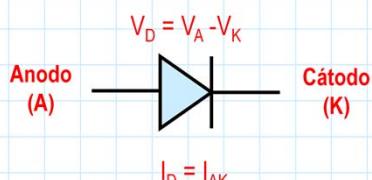
- A.R. Hambley, *Electrónica*, Prentice Hall, 2002. (Cap. 3)
- R. L. Boylestad, *Electrónica. Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*, Pearson, 2009. (Cap. 1..3)
- N.R. Malik. *Circuitos electrónicos. Análisis, simulación y diseño*, Cap. 3, Prentice Hall, 2000. (Cap. 4)
- John F. Wakerly, “*Digital 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 diodo de unión. Fundamentos



- La unión P-N conduce más fácilmente en el sentido directo (de p hacia n) que en sentido inverso.

- Nombre del dispositivo: **DIODO**



Símbolo del diodo

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

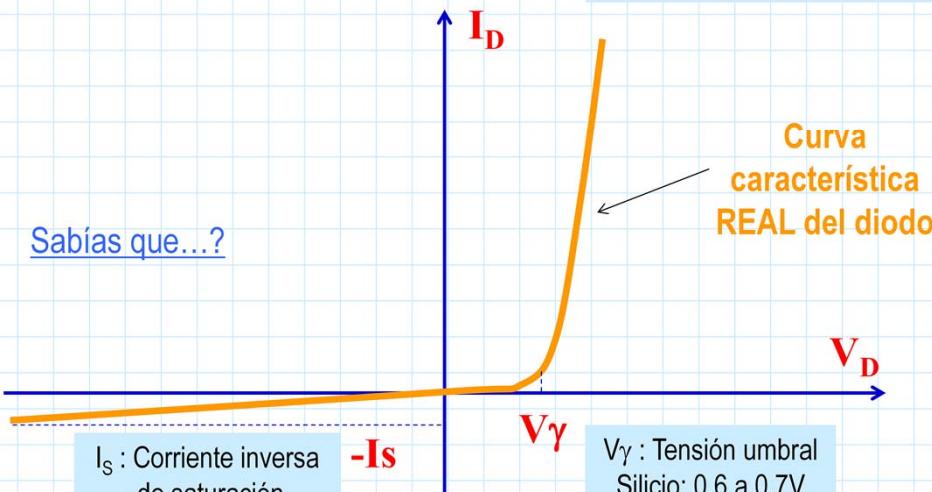
I_D es la corriente por el diodo en el sentido de ánodo (A) a cátodo (K)

1.1 El diodo de unión. Fundamentos

- Es un dispositivo **NO LINEAL**

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

Sabías que...?



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.

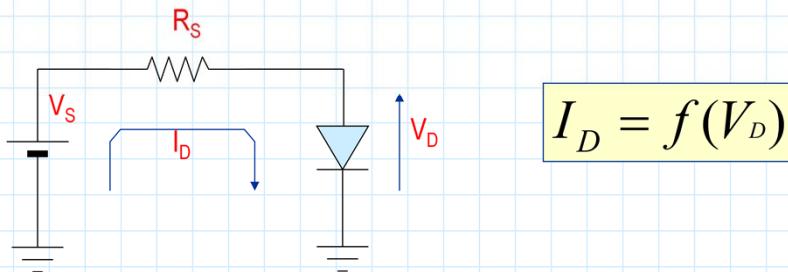
En resumen:

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

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

1.2 Recta de carga

Cuando polarizamos el diodo con un generador de tensión (V_s) y una resistencia (R_s), estos elementos condicionan el comportamiento del mismo.



Aplicando la 2^a ley de Kirchoff, se tiene:

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

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

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, con la expresión exponencial anterior, 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 carga

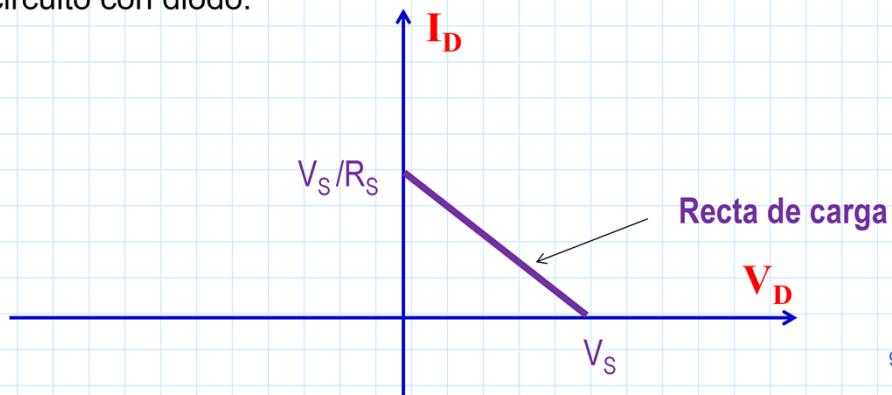
$$I_D = \frac{V_S}{R_s} - \frac{V_D}{R_s}$$

Para obtener los puntos de corte con los ejes:

$$\text{Si } I_D = 0 \rightarrow V_D = V_S$$

$$\text{Si } V_D = 0 \rightarrow I_D = V_s / R_s$$

La **RECTA de CARGA** depende de los elementos añadidos al circuito con diodo.



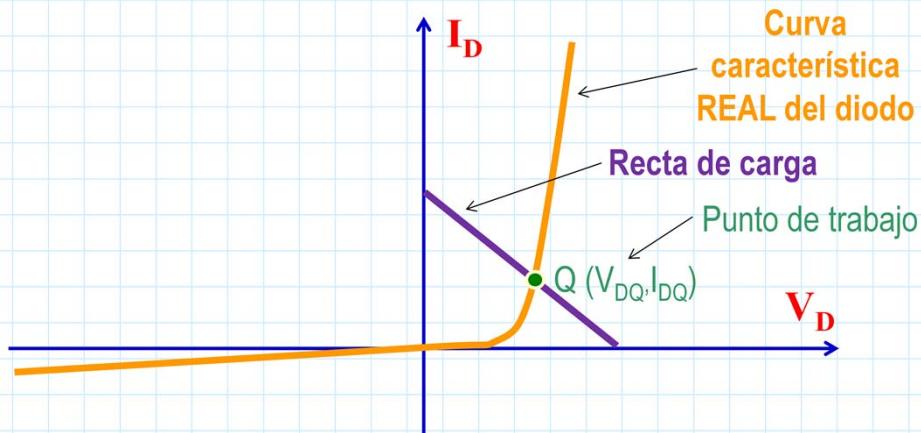
9

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 del generador (R_s).

Cuando igualamos las variables V_D e I_D a cero, obtenemos respectivamente la abscisa 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 Punto de trabajo

- El diodo ha de cumplir necesariamente su CURVA CARACTERÍSTICA.
- La intersección de la curva característica del diodo con la recta de carga del circuito define el PUNTO DE TRABAJO del diodo.



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 simultáneamente.

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 diodo

- Se definen MODELOS que aproximan el comportamiento del diodo real, con precisión creciente:
 1. Modelo **ideal**
 2. Modelo **ideal con tensión umbral**
 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.

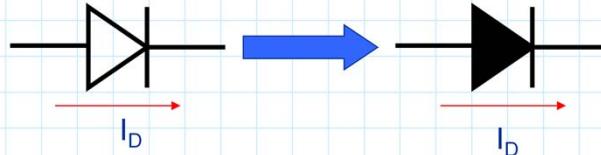
Para resolver analíticamente circuitos con diodos, se suele realizar una aproximación basada en el uso de **modelos lineales para el diodo**. De esta manera, se pueden aplicar las leyes de Kirchhoff y los teoremas derivados para circuitos lineales (mallas, nodos, Thevenin, superposición, etc.).

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 Aproximaciones del diodo

1. Diodo ideal

Diodo real



Se comporta como un interruptor:

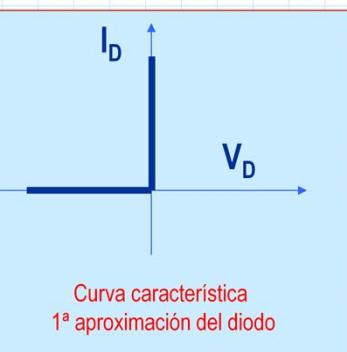
- Polarización directa: cerrado (ON)

$$\Leftrightarrow V_D = 0 \text{ para toda } I_D > 0$$



- Polarización inversa: abierto (OFF)

$$\Leftrightarrow I_D = 0 \text{ para toda } V_D < 0$$



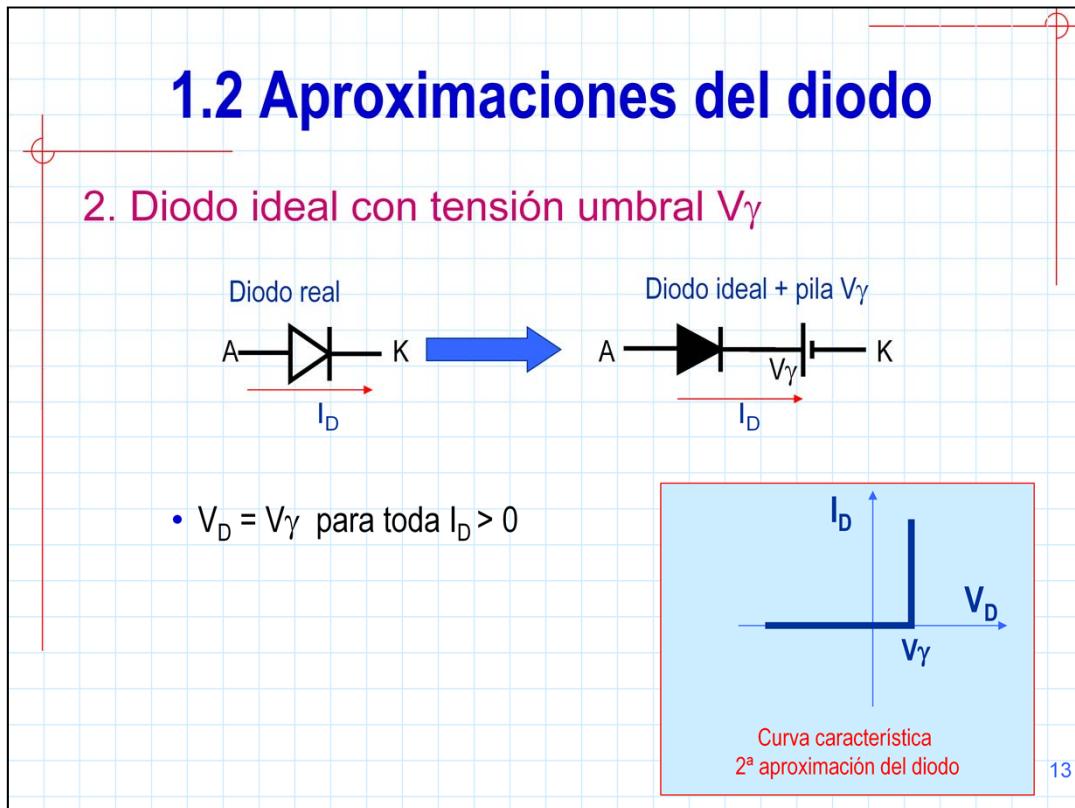
12

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 (de pendiente infinita)



Modelo 2, es el más usado.

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

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

En polarización directa: $V_D \approx 0.7V$, $I_D > 0$ (independientemente del valor de la corriente)

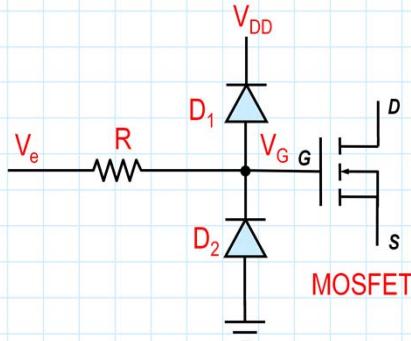
En polarización inversa: el diodo se comporta como un interruptor abierto e $I_D=0$

Obsérvese la respuesta lineal $I_D = f(V_D)$, 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 Protección de entradas digitales

- Diodos recortadores (*Clipping diodes*): protegen las entradas de los circuitos con MOSFET ante sobretensiones.



- D1 conduce si $V_e > V_{DD} + 0.7V$
- D2 conduce si $V_e < -0.7V$
- $-0.7V \leq V_G \leq V_{DD} + 0.7V$

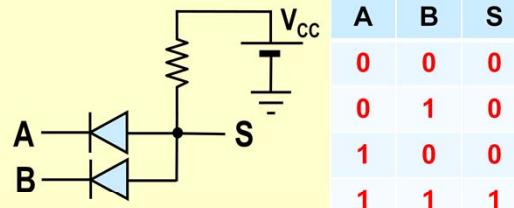
14

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.

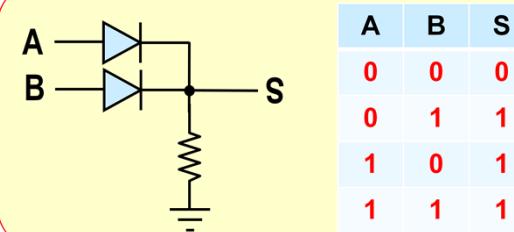
La resistencia R limita la corriente por los diodos e impide que se destruyan por excesiva disipación de potencia.

1.3. Aplicaciones digitales

Puerta AND (Y)



Puerta 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).

1.3 Otras aplicaciones en circuitos digitales

Como veremos a lo largo de la asignatura, los diodos se encuentran omnipresentes en los circuitos lógicos integrados:

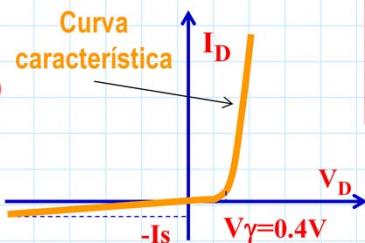
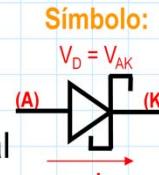
- Diversas puertas bipolares utilizan diodos para ajustar los niveles de tensión.
- Cada transistor MOSFET contiene implícitamente varios diodos en inversa: tecnologías NMOS, CMOS.

16

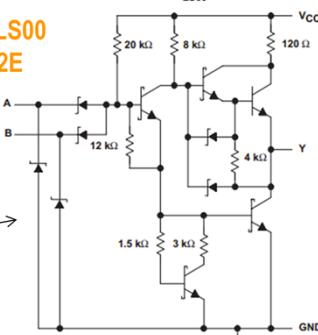
También se utilizan diodos en las entradas CMOS como parte de circuitos recortadores, que sirven para la protección de las entradas ante sobretensiones, tanto positivas como negativas. Estas sobretensiones pueden ser debidas a la electricidad estática.

1.4 Diodos Schottky

- Diodos especiales para conmutación
- Basados en la unión metal (Al)-semiconductor (“n” poco dopado)
- Alta I_s (1000 veces mayor)
- Baja V_γ (0,4V aprox.)
- Muy rápidos en conmutación
- Aplicación en circuitos digitales de alta velocidad



Ejemplo: 74LS00
4 * NAND 2E



17

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.

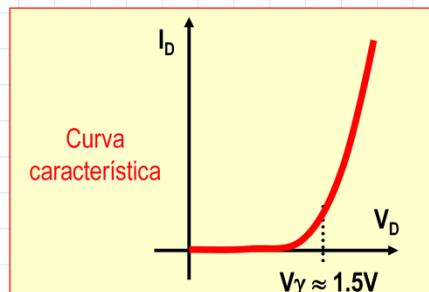
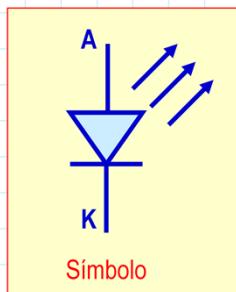
También tienen la ventaja en conducción de una menor V_γ , por lo tanto, de una menor caída de tensión y menor potencia disipada.

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 Fundamentos de los LED

- LED : Diodo emisor de luz (*Light Emitting Diode*)
- Al polarizar en directo la unión P-N, se inyectan portadores mayoritarios. Para restablecer el equilibrio, se recombinan los portadores, desprendiendo energía en forma de calor o de luz.
- Este último caso (emisión de luz), se produce eligiendo materiales semiconductores adecuados: GaAs, GaAsP, SiC, ...



18

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, ...

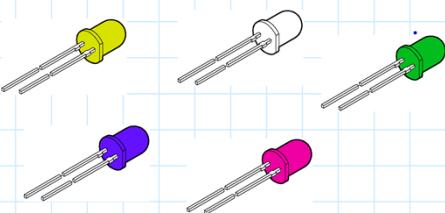
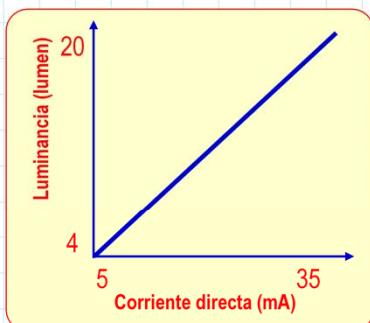
El color de la luz emitida (longitud de onda) depende del material empleado.

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 Características de los LED



- V_F entre 1.5V y 4V
- La luminancia emitida es proporcional a la corriente en directo
 - (para una buena visibilidad se requieren de 10 a 20mA)
 - Los actuales de alta potencia (1 W o más), necesitan más corriente
- La radiación es casi monocroma (de un solo color).

Existen diodos de:

- Infrarrojos (muchas aplicaciones)
 - Color amarillo
 - Color verde
 - Color rojo (el más típico)
 - Color azul
 - Ultravioletas
- Últimos en llegar 19

El LED conduce para $V_D \geq V_F$, 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:

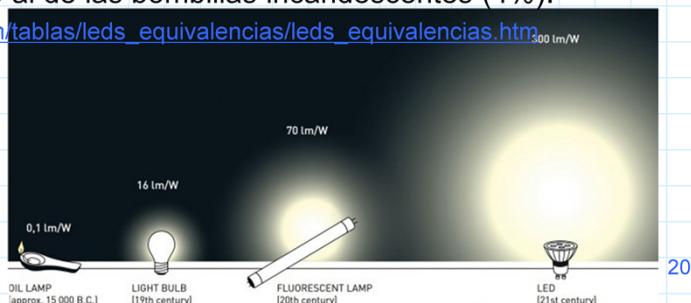
$$V_F \text{ (forward)} = V_F$$

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

1.4 LED

- En 2014 fue entregado el **Nobel de Física** a los descubridores del LED azul: Akasaki, Amano y Nakamura.
- Para producir la luz blanca faltaba el LED azul:
 - Luz blanca con 3 LED: rojo, verde y azul (RGB)
 - Luz blanca con LED azul (o ultravioleta) y filtro de fósforo
- Despues de varios intentos fallidos, en 1994 obtuvieron por primera vez un LED azul de "alta" eficiencia (para la época).
- Utilizaron como semiconductor InGaN / AlGaN y obtuvieron una eficiencia comparable al de las bombillas incandescentes (4%).
- http://www.asifunciona.com/tablas/leds_equivalecias/leds_equivalecias.htm

Gracias al LED ahora se tiene mucho más eficiencia



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

El LED rojo se introdujo en 1962. **En torno a 1970 la mejora en las técnicas** de crecimiento de cristales permitió **un gran avance** en el desarrollo de los LED 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 es "una nueva luz para iluminar el mundo", más eficiente y respetuosa con el medio ambiente al ahorrar energía. Con una duración mayor y un mejor rendimiento, como veremos en detalle después, los LED ayudarán a contener la bulimia energética de los países ricos. Además, 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 LED 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, los LED no contienen mercurio, señala la academia sueca al explicar la importancia socioeconómica y medioambiental del trabajo galardonado este año.

En cuanto a su duración, los LED aguantan hasta 100.000 horas encendidos, las bombillas incandescentes mil y los fluorescentes, 10.000. Hay que recordar que las llamadas bombillas de bajo consumo de hace pocos años son fluorescentes, pero con la llegada de los LED, ese apelativo de bajo consumo ha perdido su significado.

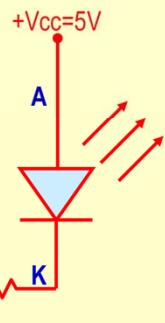
Los tres investigadores galardonados con el Nobel se dedicaron, durante la década de los noventa, a mejorar sus LED de color azul haciéndolos más eficientes con diferentes aleaciones de nitrito de galio, utilizando para la fabricación de los cristales, aluminio o iridio.

El led azul es fundamental para obtener la luz blanca, pudiéndose obtener de dos formas diferentes:

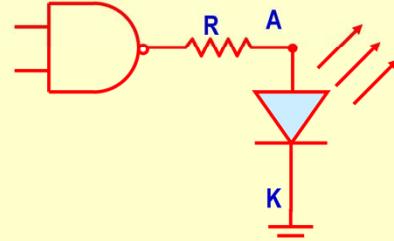
- La primera es la más cara, pues precisa de tres LED, el rojo, el verde y el azul (RGB). Recuérdese que el rojo y el verde ya son antiguos, mientras que el azul fue el último en llegar. Mezclando los colores con una intensidad similar, se obtiene una luz blanca. Aunque este sistema es el más caro, pues utiliza 3 LED, tiene la ventaja de producir cualquier color, mediante modulación de la intensidad de los colores RGB. Existen lámparas de este tipo, a un precio de unos 80 euros, que disponen incluso de un mando a distancia para encender/apagar y para cambiar de color.
- La segunda consigue una luz blanca a partir de un único LED azul, filtrando la luz azul con un filtro de fósforo. Es un sistema parecido al que usan los tubos fluorescentes, en este caso emiten una luz ultravioleta. Este es el sistema de las lámparas LED que están sustituyendo progresivamente a las halógenas, incandescentes e incluso fluorescentes de casa. Por ejemplo, una halógena de 50W puede ser sustituida por una basada en LED de 5W con una intensidad de luz similar. El precio de las de LED ronda los 5 euros, durando 10 veces más.

1.4 Circuitos con LED

Encendido con salida a nivel bajo



Encendido con salida a nivel alto



$$R = \frac{V_{CC} - V_{OL} - V\gamma}{I_{NECESARIA}}$$

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

21

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)

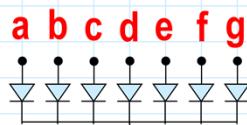
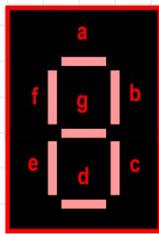
V_{OH} = tensión de salida a nivel alto de la puerta ("1" lógico)

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

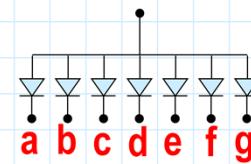
La R controla la corriente por el LED

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 Visualizadores de 7 segmentos



Configuración de cátodo común



Configuración de ánodo común

22

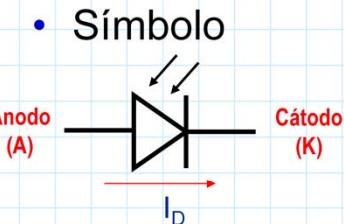
Los visualizadores (o *displays*) de 7 segmentos son dispositivos constituidos por 7 LED, configurados en cátodo común o en ánodo común, tal y como se muestra en la figura.

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

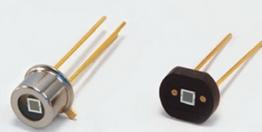
Para encender los LED hace falta un circuito lógico de control (decodificador BCD-7segmentos) y típicamente 7 resistencias (una por LED). También se puede hacer con una sola R para simplificar el diseño.

1.4 Fotodiodos

- Funcionamiento inverso a los LED
 - A partir de la luz se obtiene corriente eléctrica
- La luz accede a la unión del diodo
 - Encapsulado translúcido



- Fotodiodos reales



23

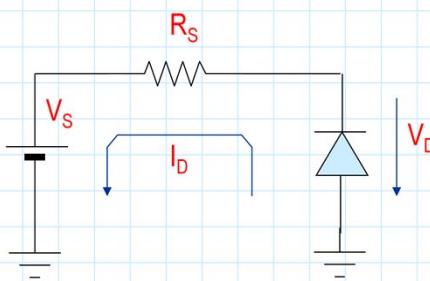
Los fotodiodos tienen el funcionamiento inverso a los LED. En este caso, a partir de una radiación de luz, el fotodiodo generará una corriente inversa, que será proporcional a la intensidad luminosa. El material utilizado para fabricar un fotodiodo depende de la frecuencia de la radiación luminosa incidente 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.

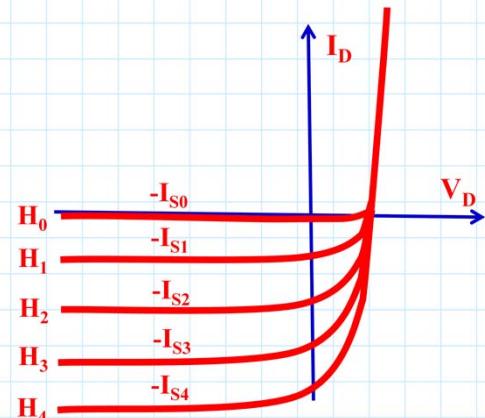
Para que un fotodiodo pueda funcionar, la luz debe acceder a la unión del fotodiodo. Es por ello que, como se ve en la figura, los fotodiodos reales deben tener un encapsulado translúcido que deje pasar la luz. El cuadrado de la figura, que se ve a través de un cristal translúcido, es el fotodiodo, con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

1.4 Fotodiodos

- Funcionamiento en inversa
- Corriente inversa ($I_D = -I_S$) proporcional a la intensidad luminosa
 - H: Intensidad luminosa (fotones/s) (mW/cm^2)
- Circuito de prueba



Curvas características



24

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 Aplicaciones LED y fotodiodos

- Visualizadores (televisores, pantallas, paneles, marcadores, proyectores multimedia...)
- Comunicaciones ópticas
- Red Li-Fi (<https://en.wikipedia.org/wiki/Li-Fi>)
- Sistemas de iluminación (doméstica, urbana, automoción...)
- Semáforos
- Lectores de discos ópticos
- Periféricos ...



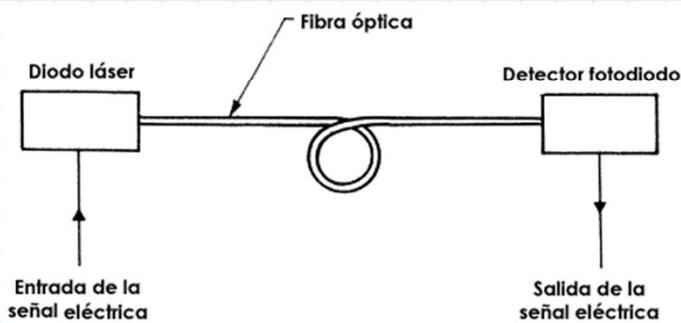
25

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 fotodiodos

- Transmisión de datos por fibra óptica



26

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 Aplicaciones LED y fotodiodos

• Lectura de CD, DVD y Blu-ray

- Distribución de la información:



- Representación de los bits



- Pozos ("pits"):
 - 0.5 μm de ancho
 - 0.83 μm de largo (mínimo)
 - 125 nm de alto
 - En DVD y Blu-ray estos valores son menores
- Zonas planas ("lands")

27

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 (millionésimas 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".

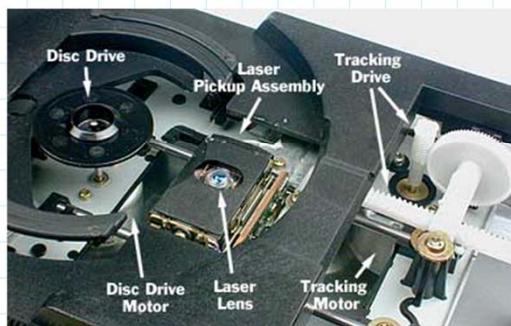
El láser utilizado para leer el disco podría pasar a través del plástico transparente, por lo que la superficie de sellado se recubre con una capa reflectante de metal (generalmente de aluminio) para que sea reflectante. A continuación, el aluminio se recubre con una fina capa protectora de laca acrílica,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

- Lectura de CD, DVD y Blu-ray

- Sistema de lectura:



- Funcionamiento del sistema de lectura:

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

28

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. Fundamentos

BJT: *Bipolar Junction Transistor*

- Un **Transistor Bipolar de Unión** es un dispositivo de tres terminales que, en la mayoría de los circuitos lógicos, trabaja como un **interruptor controlado por corriente**.

- Si circula una pequeña corriente por uno de los terminales, llamado la **base**, entonces el interruptor está en **ON**:

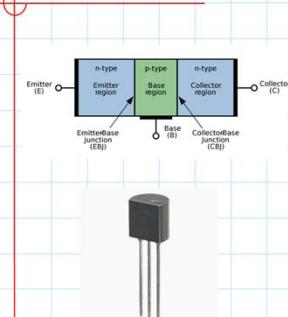
La corriente puede circular entre los otros dos terminales, llamados el **emisor** y el **colector**.

- Si no circula corriente por la base, entonces el interruptor está en **OFF**:

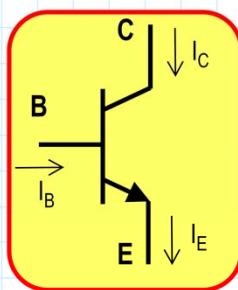
No circula corriente entre el emisor y el colector.

29

1.5 El transistor bipolar. Fundamentos



TRANSISTOR N-P-N



B: Base

C: Colector

E: Emisor

$$I_B + I_C = I_E$$

- Nótese que el símbolo contiene una pequeña flecha en la dirección del flujo de corriente (**unión base-emisor**, como en un diodo)
- También es posible fabricar transistores **PNP**. Sin embargo, los transistores PNP apenas se usan en circuitos digitales.

30

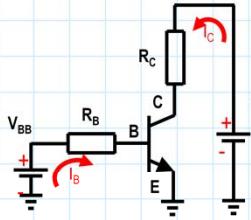
El transistor NPN es el más habitual en los circuitos, aunque también se usan los PNP en algunos circuitos. Para intentar simplificar su estudio, siempre que sea posible, nos referiremos por defecto al NPN.

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**.

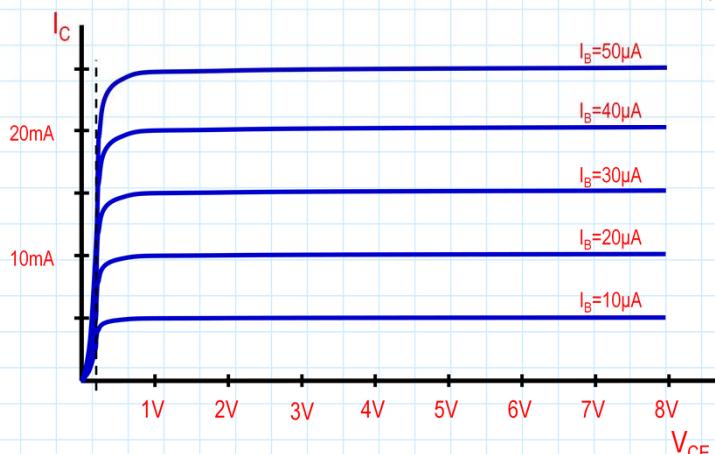
Así, la tensión Base-emisor de un **NPN** en activa será **positiva**, al igual que la tensión Colector-emisor, mientras que en un **PNP** en activa, las dos tensiones serán **negativas**.

1.6 Curvas características de salida

La corriente I_C en función del voltaje V_{CE} y la corriente I_B



Datos:
 $\beta=500$
 (ganancia del transistor)
 $R_B=100\text{k}\Omega$
 $R_C=0.4\text{k}\Omega$
 $V_{CC}=8\text{V}$



Polimedia sobre "Polarización del transistor bipolar" (G.Benet):

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

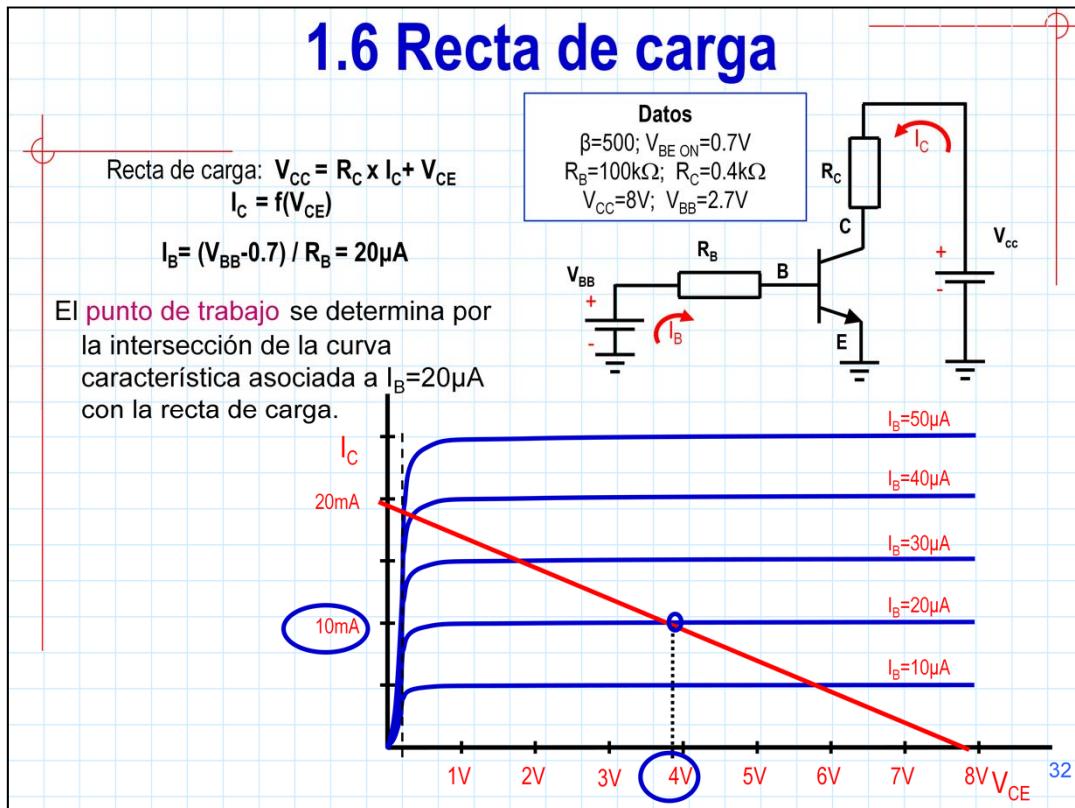
31

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

Las 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 se le denomina **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**.

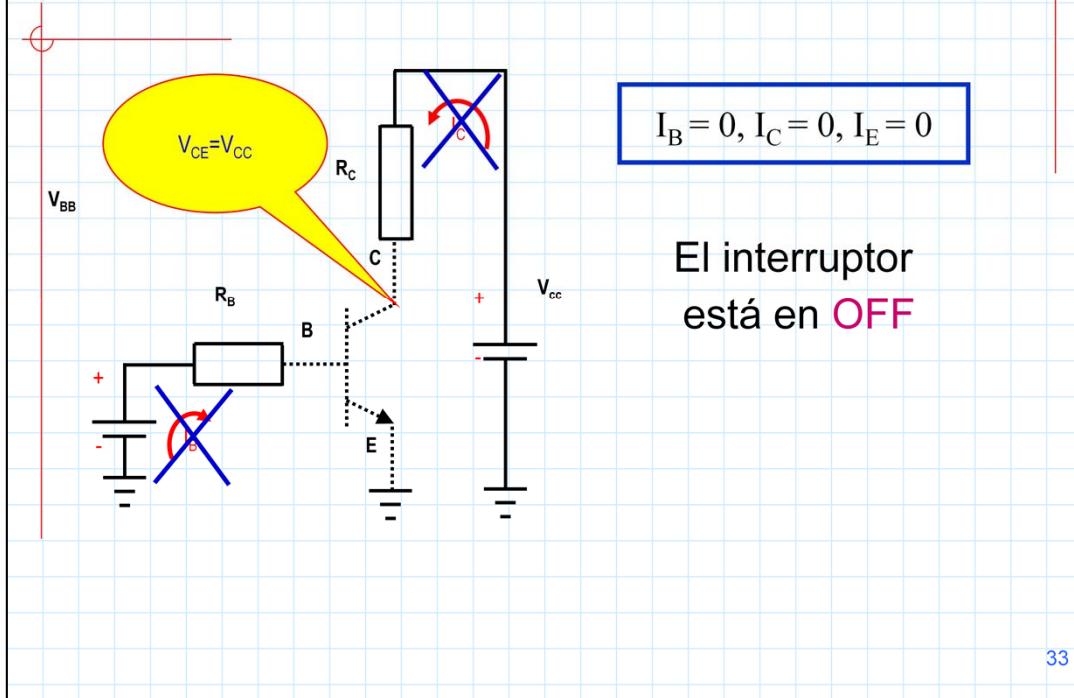
El punto de trabajo será el cruce de la recta de carga con la curva característica del transistor, correspondiente a $I_B=20\mu A$

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)

1.7 Regiones de funcionamiento. Corte



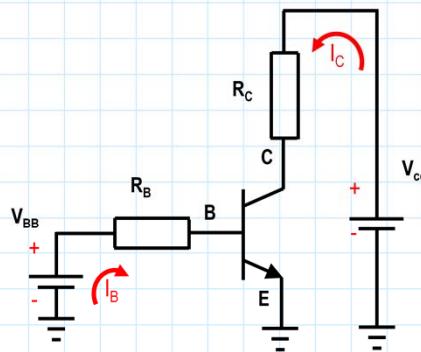
33

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 Regiones de funcionamiento. Activa



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

La corriente I_C
es proporcional a la I_B
(zona lineal)

34

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:

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

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

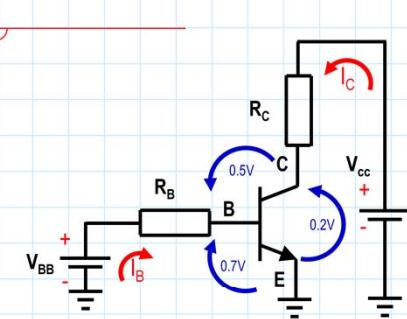
Sustituyendo, obtendremos:

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

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 o zona lineal).

1.7 Regiones de funcionamiento. Saturación



El interruptor está en ON

- I_C no puede aumentar más, se dice que el transistor está **SATURADO**

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

- La saturación ocurre porque el circuito de salida (V_{CC} y R_C) limita I_C a un valor máximo.

35

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 que aproximadamente es: $V_{CE} = V_{CESAT} = 0.2V$, 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 (formado por V_{CC} y R_C) impide el paso de más corriente, aunque la I_B aumente.

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

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

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

1.8 El transistor BJT en conmutación (1)

- Los transistores trabajan bien en **corte** (OFF) o en **saturación** (ON):
 - Se trata de dos estados muy diferentes
 - El consumo de potencia es mínimo
 - Son muy apropiados para circuitos digitales
- El colector y el emisor forman los dos terminales del interruptor y la base es su terminal de control.
- En otras palabras, la pequeña corriente por la base permite controlar una corriente mucho mayor entre el colector y el emisor.

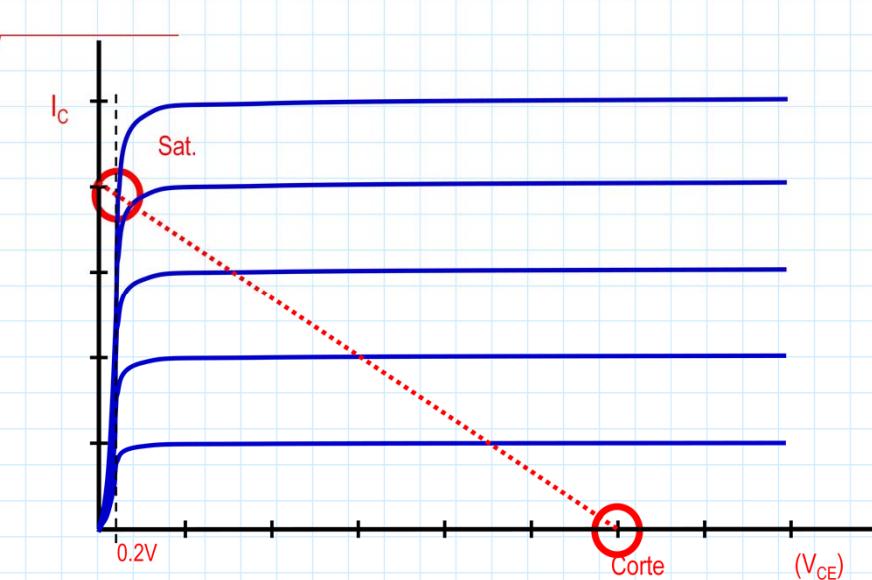
36

Un transistor se dice que trabaja en CONMUTACIÓN cuando se encuentra **exclusivamente** en el corte o 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 funcionamiento se basan los **circuitos digitales**.

1.8 El transistor BJT en conmutación (y 2)

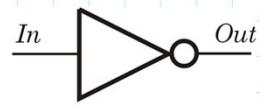


37

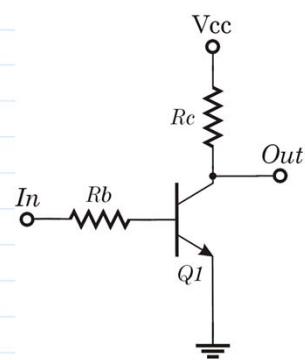
La gráfica muestra las curvas características del transistor, la recta de carga y dos puntos sobre ésta, que marcan las zonas donde el transistor trabaja en corte o en saturación.

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 Puertas lógicas. El inversor



In	Out
1	0
0	1



Un inversor se puede construir fácilmente con un transistor BJT debidamente polarizado

38

1.9 Puertas lógicas. El inversor

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

Si V_{BB} es una tensión que varía entre 0 y 5V, la salida será:

- Estado OFF:
cuando $V_{BB} = 0$; $I_C = 0$; $V_C = 5\text{V}$ (BJT está OFF)
 - $P = I_C * V_{CE} = 0$ (pues I_C es nula)
- Estado ON:
cuando $V_{BB} = 5\text{V}$; $V_C \sim 0$
(suponiendo que el BJT está SAT)
 - $P = I_C * V_{CE} \sim 0$
ya que V_{CE} es ~ 0 entonces la potencia disipada es muy pequeña

39

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 comutará 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 transistor esté SATURADO, Será necesaria una $I_{BminSAT}$ que valdrá:

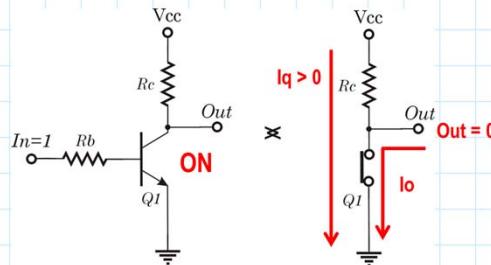
$$I_{BminSAT} = ((V_{CC}-V_{CESAT})/R_C)/\beta = (5-0.2)/1\text{k}/500 = 9.6\mu\text{A}$$

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

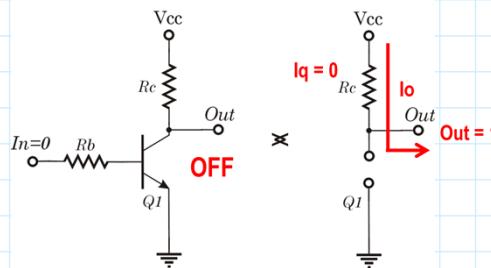
$$V_{BBminSAT} = 0.7\text{V} + R_B \cdot I_{BminSAT} = 0.7\text{V} + 200\text{k} \times 9.6\mu\text{A} = 2.62\text{V}$$

1.9 Puertas lógicas. El inversor

In = 1: La tensión de entrada es suficientemente alta para hacer conducir a Q1 \rightarrow Q1 SAT. Q1 se puede aproximar a un cortocircuito



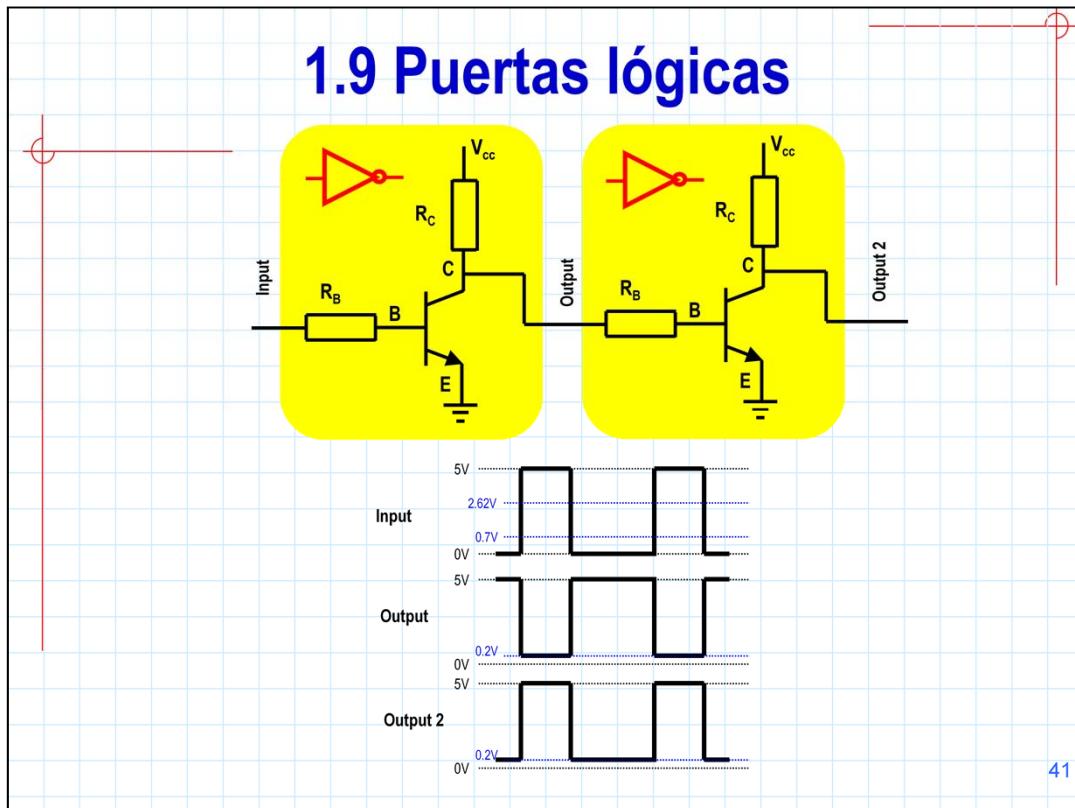
In = 0: La tensión de entrada es muy baja y Q1 está en corte \rightarrow Q1 OFF. Q1 se puede aproximar a un circuito abierto



40

Cuando **In = 1** Q1 conduce en saturación 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 Vcc a través de Rc. La caída de tensión en Rc (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 el punto de partida para una posible **familia lógica**.

Tema 1. Resumen (1)

En este tema hemos repasado primero el funcionamiento de la unión PN, que hemos aproximado mediante distintos modelos. Estas aproximaciones nos han permitido simplificar el análisis de circuitos con diodos.

A continuación, hemos introducido algunos de los más importantes circuitos con diodos, en su aplicación en los circuitos digitales. Como ejemplo, se ha descrito un circuito para protección de las entradas MOSFET, y varios que implementan puertas lógicas digitales.

Posteriormente, se ha descrito el diodo Schottky, que consigue mayor velocidad y menor V_f que el diodo normal, siendo por ello de especial importancia para aplicaciones de conmutación.

Del mismo modo, hemos descrito las particularidades del LED y hemos mostrado algunas de sus circuitos de aplicación, como los que nos permiten identificar el nivel lógico de salida en circuitos digitales. También se ha descrito otros tipos especial de diodo: el fotodiodo, que consigue el efecto contrario que el LED: transforma una radiación luminosa en una corriente eléctrica.

42

Tema 1. Resumen (y 2)

Después de estudiar el diodo, nos hemos centrado en el transistor BJT, explicando el fundamento de su funcionamiento y sus curvas características de salida.

A continuación, se ha introducido las regiones de funcionamiento, corte cuando no conduce, y zona lineal y de saturación cuando conduce. Se ha introducido también la recta de carga, que dependiendo de los componentes externos al transistor, determina su punto de trabajo.

Conocidas las regiones de funcionamiento, se ha hecho hincapié en las dos zonas utilizadas en aplicaciones digitales (corte y saturación), en las que se hace trabajar al transistor en conmutación.

Finalmente, se ha descrito circuitos con transistores en aplicaciones digitales, poniendo ejemplos relacionados con puertas lógicas, como el del inversor.