

Transistores

Laboratorio de Electrónica 2019
Práctica 3

El transistor es el componente fundamental de todos los circuitos no pasivos que vimos hasta ahora. Y más generalmente, los circuitos integrados están contruidos a partir de transistores, desde unos pocos como en los amplificadores operacionales hasta millones de ellos como en un microprocesador como el del celular o la PC. Estudiar a fondo el comportamiento, uso y constitución de “Transistores” en general, es una tarea que va más allá del alcance de este curso. De hecho, en esta práctica sólo vamos a ver algunas características y aplicaciones del llamado Transistor de Juntura Bipolar (BJT en inglés), que se usa fundamentalmente para aplicaciones analógicas.

El transistor de juntura bipolar se inventó a fines de la década del 40, y está construido a partir de tres capas de material semiconductor dopado, en donde la capa del medio se dopa de forma que tenga un exceso de portadores de signo opuesto al de los otros dos. (De nuevo: una descripción medianamente razonable sobre semiconductores intrínsecos, dopados, junturas y dinámica de los portadores excede las pretensiones de este curso). Vamos a concentrarnos en aspectos prácticos y “macroscópicos” de estos componentes, y para el detalle del funcionamiento de semiconductores se proponen la siguiente selección arbitraria de lecturas, de lo más simple a lo más complejo:

- F. Rice; *Introductory Electronics Laboratory*, [Página 3-27](#);
- [Hyperphysics Semiconductors](#);
- P. Horowitz & W. Hill; “The Art of Electronics, capítulo 2;

Existen dos clases de transistores BJT (a partir de ahora siempre nos vamos a referir a este tipo de transistores): NPN y PNP, cuyos símbolos se muestran en la figura 1. Las tres capas (cada una conectada a un terminal se llaman *emisor*, *base* y *colector*. La base es la capa del medio, y forma una unión PN con el emisor y otra con el colector.

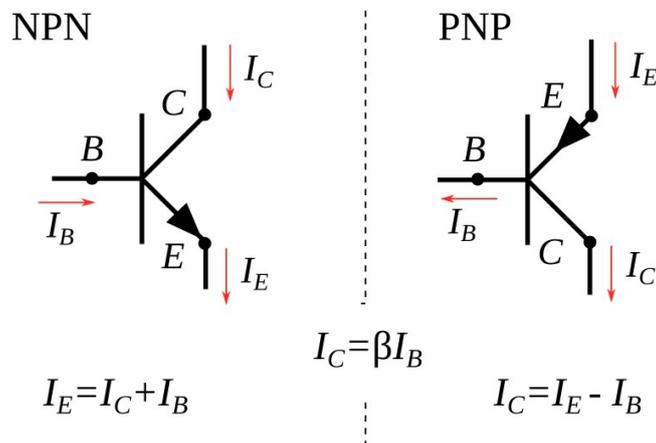


Figura 1: Tipos de transistor de juntura bipolar: NPN y PNP

En un transistor NPN, cuando la juntura PN entre la base y el emisor **se polariza** en forma directa, circula una corriente de la base y hacia afuera del emisor, porque este par de terminales funcionan como un diodo semiconductor. La caída de voltaje entre la base y el emisor es la típica de un diodo, (0.6 – 0.7 V si es de silicio, la mayoría de ellos lo son). Si el voltaje sobre el colector está por encima del la base, casi todos los portadores de carga del emisor que entran a la base “siguen de largo” y van hacia el colector.

Este flujo de portadores desde el emisor es lo que forma la corriente que fluye a través del terminal emisor (I_E). Una pequeña fracción de estos portadores se recombinan en la base y forman la

corriente del terminal de base (I_B), mientras que el resto (la mayor parte) pasa a través de la base del componente y entra al colector, determinando la corriente del colector (I_C). Si la juntura Base-Emisor **no se polariza en forma directa**, entonces no se genera un flujo grande de portadores desde el emisor y la corriente entre el colector emisor se anula. Las únicas corrientes que quedan son corrientes inversas desde el emisor y el colector hacia la base.

En este sentido, se puede pensar al transistor como una válvula, que a partir del ajuste de la corriente de base permite controlar casi linealmente la corriente del colector. O de otra forma, como un amplificador de corriente: si la juntura base-emisor se polariza directamente (la base unos 0.7V más positiva que el emisor, para un NPN), entonces una corriente pequeña sobre el terminal de la base estimula una corriente mucho más grande en el terminal del colector. Esto siempre y cuando exista una fuente externa capaz de mantener o suministrar esa corriente.

Este comportamiento se muestra en las curvas de la figura 2, para un par de transistores NPN: Cada curva muestra la corriente de colector I_C en función de la diferencia de potencial entre el colector y el emisor (V_{CE}), para distintos valores de corriente de base I_B (que en cada curva varía en $5\mu A$). Las curvas son casi planas para $V_{CE} > 0.8V$, lo que muestra que la corriente de colector es independiente de V_{CE} (en este régimen). Además, la separación entre las curvas es constante, lo que muestra una dependencia directa y lineal de la corriente de colector con la de base. La proporción entre I_C e I_B define la ganancia en corriente del transistor, que generalmente se la denomina β y/o h_{fe} . Valores típicos de β están entre 50 y 200 para la mayoría de los transistores BJT.

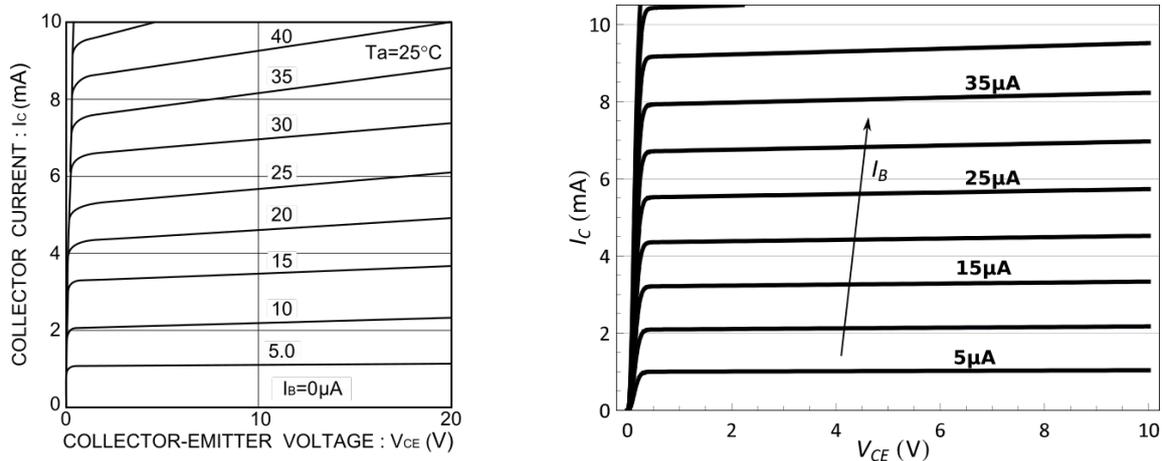


Figura 2: Curvas características de dos transistores NPN. Izquierda: 2N3904; derecha: 2N2219

Ejercicio 1:

Cómo medir β o h_{fe} , la ganancia de corriente? Se define $\beta = I_C/I_B$; encontrar una expresión para calcular la ganancia de corriente a partir del circuito de la figura 3, usando el voltímetro y amperímetros allí esquematizados y la tensión de alimentación de base V^+ . Por qué no se usan dos amperímetros?

Experimento 1:

A partir del resultado del Ejercicio 1, medir el factor β para distintas corrientes de base, para un transistor NPN (PN2222, 2N2219, BC547 o similar). Para ello, reemplazar R_B y R_{load} por los valores sugeridos en la figura 3, y variar I_B usando distintos valores de R : dejar siempre una resistencia fija de $4.7k\Omega$ por protección variando R entre $10k\Omega$ y $10M\Omega$. Comparar con los valores de la hoja de datos.

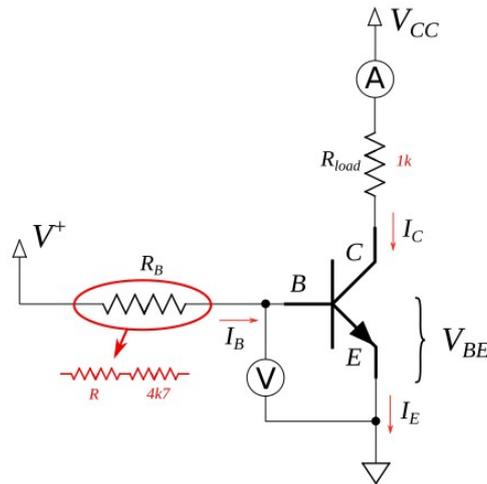


Figura 3: Medición del factor de ganancia.

Ejercicio 2:

Si se usa un transistor con $\beta=200$, qué corriente de base hace falta para generar $I_C=4\text{mA}$? Si en la figura 3, $V^+=5\text{V}$, calcular el valor adecuado de la resistencia de base (usar valores estándar de resistencias de 5% de tolerancia)

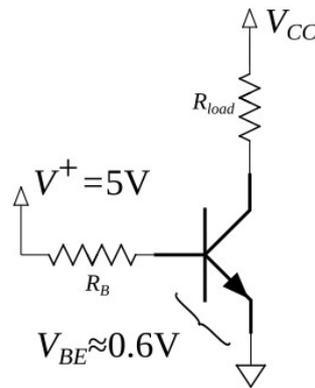


Figura 4: Calcular I_B y R_B para obtener $I_C=4\text{mA}$, si $\beta=200$

El transistor como amplificador:

El circuito de la figura 5 incluye un transistor NPN conectado entre dos “rails” o líneas de tensión, usualmente denominadas V_{CC} y V_{EE} . ($V_{CC}>V_{EE}$). La juntura base-emisor está polarizada en forma directa (esto es, $V_B>V_{EE}$ y hay una corriente no nula I_B que circula desde la base). Se pretende analizar el circuito para determinar las relaciones entre los voltajes, corrientes, ganancia del transistor y resistencias del mismo.

La primera suposición es que la caída de tensión entre la base y el emisor al polarizarlo en forma directa es $V_{BE}\approx 0.6\text{V}$. Suponemos además que este valor es constante (pese a que en realidad cambia ligeramente con I_B). Entonces,

$$V_E = V_B - V_{BE}, \quad (1)$$

y por lo tanto

$$I_E = \frac{V_E - V_{EE}}{R_E}. \quad (2)$$

Usando las relaciones de corrientes de la figura 1, obtenemos que

$$I_B = I_E \frac{1}{1 + \beta}, \quad I_C = I_E \frac{\beta}{1 + \beta} \quad (3)$$

y finalmente con el valor de R_C se obtiene el voltaje V_C :

$$V_C = V_{CC} - (V_B - V_{BE} - V_{EE}) \frac{R_C}{R_E} \frac{\beta}{1 + \beta}. \quad (4)$$

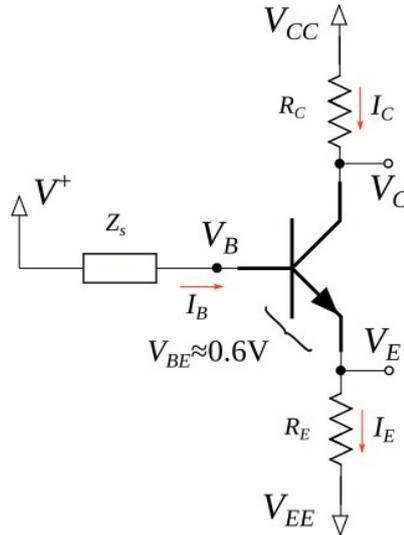


Figura 5: Transistor NPN usado como amplificador

Con esto y un par de cuentas más se puede encontrar la ganancia de distintos modos de funcionamiento, y las impedancias de entrada y salida de este circuito general: cómo responde el sistema frente a variaciones pequeñas de los voltajes e impedancias del circuito. Vamos primero a ver las ganancias. Si se usa la salida de V_E , a esta configuración se la denomina *seguidor por Emisor (emitter-follower)* y usando (1) la ganancia es

$$G_{E-F} \equiv \frac{dV_E}{dV_B} = 1, \quad (5)$$

Este modo de funcionamiento es análogo al de un seguidor de voltaje de un Opamp.

Si se usa como salida V_C , usando (4) se puede encontrar la tasa de cambio de V_C con V_B :

$$G_{C-E} \equiv \frac{V_C}{V_B} = -\frac{R_C}{R_E} \frac{\beta}{1 + \beta} \simeq -\frac{R_C}{R_E}. \quad (6)$$

A esta configuración se la denomina *emisor común (common emitter)*, y su ganancia se parece a la de un Opamp en configuración amplificador inversor con ganancia infinita ($\beta \gg 1$).

Por último, analizamos las impedancias de entrada, $Z_{in} \equiv dV_B/dI_B$, y las de salida en cada una de las configuraciones anteriores: $Z_{outC} \equiv -dV_C/dI_{outC}$ y $Z_{outE} \equiv -dV_E/dI_{outE}$, donde I_{out} el cambio en la corriente requerida desde el terminal de salida por una carga allí conectada. Diferenciando (1), (2) y (3) se obtiene la impedancia de entrada:

$$Z_{in} = (\beta + 1)R_E \simeq \beta R_E. \quad (7)$$

Para calcular la impedancia de salida usando el terminal V_C , se puede suponer que β es independiente de V_{CE} (las curvas de la figura 2 son planas). Y, como I_B es independiente de la corriente de carga,

$$\frac{V_{CC}}{R_C} = I_{out} + I_C = I_{out} + \beta I_B, \quad y \quad V_C = V_{CC} - I_C R_C,$$

entonces diferenciando (V_{CC} es constante!) se obtiene que

$$Z_{outC} = R_C. \quad (8)$$

Finalmente nos queda calcular la impedancia de salida usando la configuración *emisor-seguidor*:

Ejercicio 3:

Calcular la impedancia de salida $Z_{outE} \equiv -dV_E/dI_{outE}$, usando las siguientes relaciones (se pueden obtener del circuito de la figura 5!):

$$V_B = V^+ - I_B Z_s;$$

$$I_E = I_{outE} + \frac{V_E}{R_E} = I_B(1 + \beta).$$

Mostrar que esta impedancia, para $\beta \gg 1$ es:

$$Z_{outE} = \left(\frac{1}{R_E} + \frac{1}{Z_s/\beta} \right)^{-1}. \quad (9)$$

Amplificadores Electrónicos:

Un amplificador electrónico es un dispositivo que puede aumentar la potencia de una señal (un voltaje o corriente que varía en el tiempo). Es un circuito electrónico con una entrada y una salida, que usa potencia eléctrica de una fuente de alimentación para aumentar la amplitud de la señal aplicada en la entrada produciendo una señal de mayor amplitud a la salida. La magnitud de la amplificación la da la ganancia: el cociente entre el voltaje (o corriente, o potencia) a la salida y a la entrada. Los distintos tipos de amplificador se dividen en clases, que dan una idea de sus características y desempeño. Estas clases se relacionan con la fracción del tiempo en el cual el amplificador está consumiendo corriente, expresado como fracción del período de la señal a la entrada: un amplificador clase A conduce corriente durante todo el período de la señal, uno clase B conduce sólo durante la mitad del período de entrada. En esta práctica vamos a ver un par de esquemas básicos de amplificadores clase A y clase B, que se esquematizan en la figura 6.

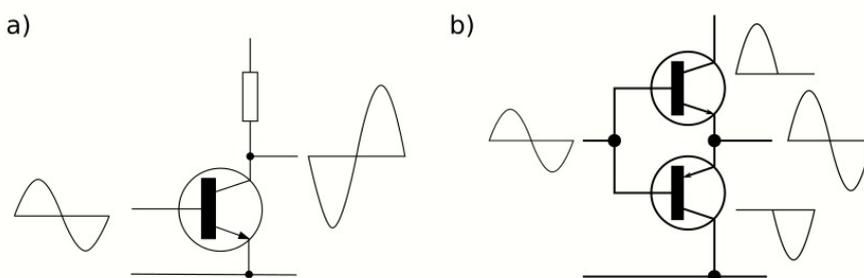


Figura 6: Amplificadores electrónicos esquemáticos: a) clase A; b) clase B

Amplificadores clase A:

Los circuitos de la figura 7 a) y b) funcionan como amplificadores clase A. El punto de trabajo del sistema se debe elegir de forma que el transistor no pase ni a la condición de corte ($I_C \approx 0$), ni a la de saturación ($V_{CE} \approx 0$) cuando se aplica una señal de entrada AC. Este punto de trabajo es entonces la condición DC del transistor, y como se ve en la figura 7c), nunca está apagado (el transistor consume corriente y disipa potencia aunque no haya señal aplicada).

Para ubicar al transistor en ese punto de trabajo, se debe *polarizar* el transistor. El circuito DC de polarización del transistor es entonces fundamental para obtener un funcionamiento adecuado de este tipo de amplificadores.

La condición de polarización de un transistor puede cambiar por las siguientes razones:

- Los parámetros de un transistor dependen de la temperatura de la juntura. Si esta temperatura aumenta, aumenta la corriente I_{CBO} (corriente colector-base con el emisor abierto). Al aumentar I_{CBO} , la corriente colector-emisor con la base abierta también aumenta, por lo que aumenta I_C . Esto genera calor en la juntura del colector, y retroalimenta el efecto, y finalmente el punto de trabajo puede viajar a la región de saturación.
- Cuando se reemplaza un transistor por otro del mismo tipo, el punto de trabajo puede cambiar debido a una variación componente a componente de β .

Debido a esto, es preciso estabilizar la polarización. Los circuitos de la figura 7 muestran a) un esquema básico e inestable de polarización, y b) uno en el cual se puede obtener un punto de operación independiente de β . Analizamos brevemente estos casos, sin profundizar mucho más.

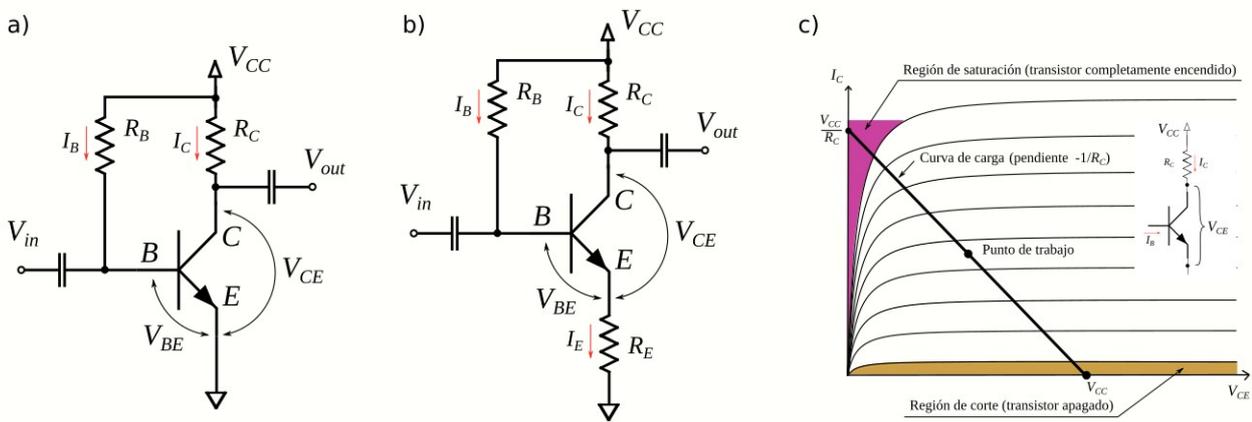


Figura 7: a) polarización fija; b) polarización fija con resistencia de realimentación en el emisor; c) curva de carga y zonas de corte y saturación de un transistor

Bias o polarización Fija (figura 7a)

Una única fuente de alimentación se usa tanto para el colector como para la base del transistor. En el circuito de la figura 7a),

$$V_{CC} = I_B R_B + V_{BE} \Rightarrow I_B = (V_{CC} - V_{BE}) / R_B. \quad (10)$$

Como V_{CC} está fijo, y V_{BE} es esencialmente constante, I_B está fijo. Como además $I_C = \beta I_B$, se obtiene

$$I_C = \beta \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}. \quad (11)$$

La corriente del colector es directamente proporcional a β !. Este esquema es muy simple pero muy inestable.

Polarización fija con resistencia en el emisor (figura 7b)

En el circuito del panel central, se modifica el bias fijo agregando una resistencia externa en el emisor. Ésta agrega realimentación negativa que estabiliza el punto de trabajo. El voltaje sobre la resistencia de base es

$$V_{R_B} = V_{CC} - V_{BE} - I_E R_E, \quad (12)$$

y la corriente de base es

$$I_B = V_{R_B} / R_B. \quad (13)$$

La realimentación controla el punto de trabajo de la siguiente forma: si V_{BE} se mantiene constante y

aumenta la temperatura, la corriente del emisor aumenta. Sin embargo un aumento en I_E aumenta el voltaje del emisor $V_E = I_E R_E$, que a su vez reduce el voltaje V_{R_B} sobre la resistencia de la base. Esta disminución de V_{R_B} reduce la corriente de base, lo que resulta en una menor corriente de colector, debido a que $I_C = \beta I_B$. Similarmente, si el transistor es reemplazado por otro, el cambio del valor de β puede producir un cambio en I_C . Pero por el mismo argumento de arriba, el cambio realimenta negativamente al voltaje de la resistencia de base y el punto de operación se mantiene estable.

Ejercicio 4:

Usando que $I_E = I_B + I_C = (1 + \beta)I_B$, obtener la expresión para I_B en función de los parámetros del sistema (V_{CC} , V_{BE} , las resistencias y β) para el circuito de la figura 7b).

Luego usando la relación entre I_C e I_B , llegar a la siguiente expresión:

$$I_C = \frac{\beta(V_{CC} - V_{BE})}{R_B + (1 + \beta)R_E}. \quad (14)$$

En qué condición se puede obtener una corriente de colector independiente de β ? Cuál es el valor de corriente de colector I_C bajo esa condición?

El inconveniente de este tipo de circuito de bias es que si R_E es grande, hay que usar una fuente de tensión V_{CC} mayor, porque R_E limita la corriente máxima disponible. Por otro lado, si se precisa un valor de R_B bajo, habrá que usar una segunda fuente para el circuito de la base.

Experimento 2:

Armar los dos circuitos de la figura 7, establecer un punto de trabajo y observar la estabilidad del mismo (cómo?) frente a cambios de temperatura del transistor y a cambios de componente (cambio del transistor por otro).

Independientemente del tipo de polarización que se use, las señales de entrada y salida deben desacoplarse de las señales DC definidas a partir de las resistencias y voltajes de alimentación, usando los capacitores de entrada y salida. Éstos, junto con las resistencias, definen filtros pasa altos con frecuencias de corte de entrada y salida dadas por:

$$f_{in} = \frac{1}{2\pi Z_{in} C_{in}} = \frac{1}{2\pi C_{in}} \left(\frac{1}{R_B} + \frac{1}{\beta R_E} \right), \quad (15)$$

$$f_{out} = \frac{1}{2\pi (Z_{out} + Z_{load}) C_{out}} = \frac{1}{2\pi (R_C + Z_{load}) C_{out}}. \quad (16)$$

En el caso de la figura 6a), $R_E = 0$, así que la frecuencia de corte se reduce al RC del capacitor de entrada y la resistencia de la base.

Amplificador clase B:

En un amplificador clase B, el dispositivo activo conduce durante 180° del ciclo. Para que no se distorsione completamente la señal (sólo reproduce media onda!), se usan dos dispositivos. Cada uno conduce durante una mitad del ciclo, y las corrientes se combinan de forma que la corriente sobre la carga es continua

La configuración típica de estos amplificadores es la de un amplificador *push-pull*. En su configuración más simétrica, cada mitad del par de salida es una versión especular de la otra; esto es, el transistor NPN de una de las mitades se empareja con un PNP equivalente en la otra mitad. Un esquema de este tipo de amplificadores se muestra en la figura 8. En este esquema se utiliza un opamp para controlar la polarización de base.

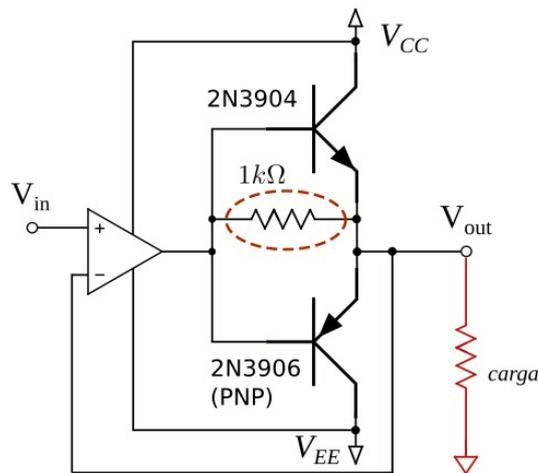


Figura 8: Configuración de amplificador push-pull simétrico

Experimento 3: Cómo aumentar la potencia en una salida controlada por un opamp

Armar el circuito de la figura 8. Los transistores NPN y PNP complementarios 2N3904 y 2N3906 pueden manejar hasta 200mA! Probar el circuito sin la resistencia de 1kΩ. Qué pasa cerca del cruce por cero de la señal? La distorsión ocurre en el cruce entre los dos semiciclos, porque cada transistor precisa superar los 0.7V de V_{BE} , y el operacional responde con velocidad finita al cambio.

El Transistor como switch

El uso del transistor como conmutador o switch consiste en que el mismo trabaje ya sea apagado, es decir que la juntura base-emisor no tiene un voltaje de polarización suficiente aplicado, o bien saturado, debido a que se le aplica una alta corriente de polarización base-emisor.

En el ejemplo de la figura 9, se usa un transistor NPN como switch para energizar una carga (en este caso simplemente un LED, pero puede ser cualquier tipo de carga. Llevando al transistor a la saturación, casi todo el voltaje de la fuente V_{CC} se aplica sobre la carga, ya que V_{CE} es casi 0, y la limitación de corriente está dada por la capacidad de manejo de corriente del transistor ($V_{CE} < 1V$). En el circuito de la figura (y en general) conviene agregar un diodo en reversa entre la juntura base-emisor, ya que la tensión de ruptura de la juntura B-E es chica (del orden de 6V para un PN2222A, por ejemplo), entonces una tensión negativa no muy alta en la entrada puede arruinar el transistor. De la misma manera, este diodo es útil cuando se quiere controlar una carga inductiva. Al “apagar” el transistor se genera un pulso electromagnético inverso en la inductancia que puede destruir el transistor.

Experimento 4: Cómo conmutar un LED?

Queremos encender un led a 50mA usando un opamp TL082, que tiene una entrada Schmitt-Trigger (Fig. 9). Un LED (verde) tiene una caída de voltaje de $V_D = 2.3V$ cuando conduce 50mA (medir este valor de caída de tensión en el caso particular del experimento, consultar con los docentes). Si usamos un transistor PN2222A, chequear en la hoja de datos cuál es el valor aproximado de saturación V_{CE} para una corriente $I_C = 50mA$: **para asegurarse de trabajar con el transistor en la zona de saturación, conviene usar como regla general una corriente de base I_B entre el 5% y el 10% de la corriente de colector I_C deseada. Así, $I_C \ll \beta I_B$, y entonces el transistor trabaja en la zona de saturación.** Entonces $I_B \approx 5mA$.

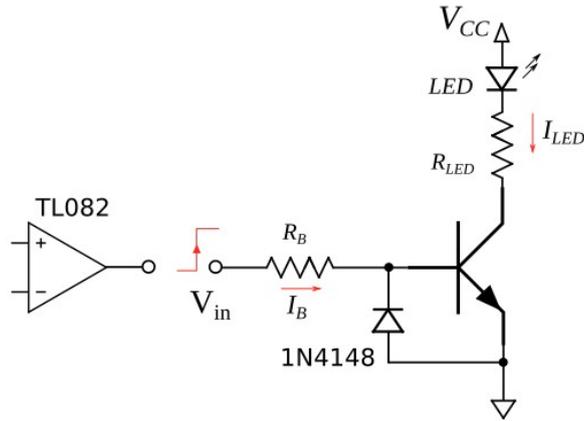


Figura 9: Transistor como switch de un LED usando la salida saturada de un operacional

Ahora, chequear cual es la tensión de salida positiva V_{out+} del TL082 usado como comparador (dependerá de la fuente que está usando). El valor de la resistencia de base se puede calcular:

$$R_B = (V_{out+} - V_{BE})/5mA = (V_{out+} - 0.7)/5mA \quad (17)$$

Chequear: qué potencia disipa esta resistencia?

Finalmente, calculamos el valor de la resistencia que define la corriente sobre el LED, si usamos una fuente de alimentación $V_{CC}=5V$,

$$R_{LED} = (5V - 2.3V)/50mA = 54\Omega \rightarrow R_{LED} = 56\Omega \quad (18)$$

Qué potencia disipa esta resistencia?

Armar el circuito y probarlo. Chequear los valores de corriente y tensión en corte y saturación. Cuán rápido se puede conmutar el LED con este circuito?

Cómo cambiar niveles lógicos:

Muchas veces queremos pasar de los niveles de salida de un comparador a voltajes correspondientes a alguna familia lógica. Para eso se puede usar un transistor en corte y saturación. En la figura 10 se muestran dos configuraciones. La de la izquierda traduce los valores de salida saturados de un opamp a valores lógicos TTL (0-5V). En el esquema de la derecha se muestra un convertor de lógicas: la entrada es una señal LVTTTL (0-3.3V) y la salida es 0-5V.

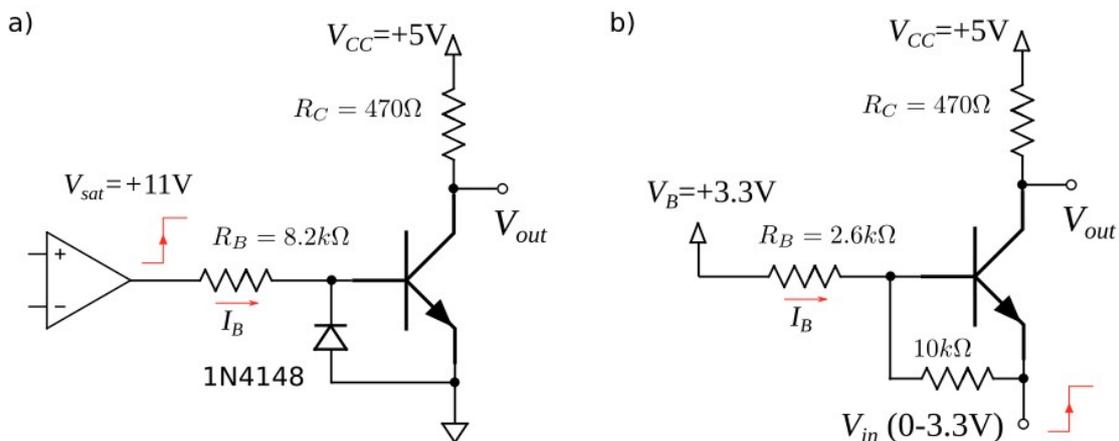


Figura 10: Conversión de niveles lógicos usando transistores en corte y saturación a) de una salida saturada de un opamp a TTL; b) LVTTTL a TTL

Ejercicio 5:

Chequear en ambas configuraciones de la figura 10 que la condición de saturación esté asegurada. Calcular la impedancia mínima (corriente máxima sobre la carga) que toleran estos circuitos: la resistencia R_C se denomina *pull-up*, porque “tira” del voltaje de salida hacia V_{CC} cuando el transistor se apaga. Como el voltaje que efectivamente ve la carga es V_{CC} menos la caída en esta resistencia, hay que tener cuidado con cuánto consume la carga (cuál es la impedancia de entrada de la carga). Analizar la corriente I_E en las condiciones de entrada “high” y “low” para el circuito de la figura 10b).

Experimento 5:

Implementar alguno de los circuitos de la figura 10 y chequear los valores “lógicos” a la salida, para distintas cargas ($1M\Omega$, $1k\Omega$, 50Ω).