



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

**Circuito con transistores**

**Tomás Ricardo Basile Álvarez**  
**316617194**

ASIGNATURA

**Laboratorio de Electrónica. Grupo 8285**

5 de diciembre de 2021

## Introducción

Los transistores son dispositivos semiconductores con un gran número de aplicaciones en distintos circuitos. En este trabajo se revisará la función de transistores TBJ y MOSFET en circuitos con aplicaciones prácticas.

En particular, se estudiará la aplicación de un transistor TBJ para construir un amplificador y la aplicación de un MOSFET para construir un convertidor Boost. Ambos circuitos serán simulados utilizando TINA-TI para obtener las curvas de voltajes y corrientes resultantes y poder así interpretar los resultados.

Primero se revisarán algunos conceptos básicos de estos transistores en la sección de antecedentes y posteriormente se construirán y simularán los circuitos en la sección de desarrollo para revisar que funcionen de la forma esperada.

## Antecedentes

Un **dispositivo semiconductor** es un componente electrónico que está compuesto de materiales semiconductores y utiliza las propiedades de estos para su funcionamiento. Los dispositivos semiconductores son esenciales para el diseño de circuitos y son una de las razones principales por el enorme desarrollo de la electrónica moderna.<sup>[2]</sup>

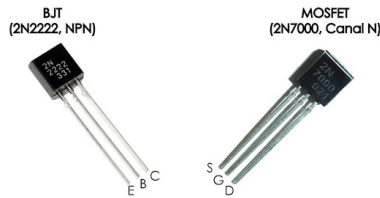


Figura 1: Transistor TBJ y MOSFET

### 1. TBJ

Un transistor de unión bipolar (TBJ) es un dispositivo electrónico con tres terminales conocidas como Emisor, Base y Colector. Esquemáticamente podemos pensar en un transistor TBJ como un material formado por tres semiconductores tipo n y tipo p apilados en el orden npn o en el orden pnp (en esta práctica usaremos solamente un transistor tipo npn). En la figura 3 se muestra esquemáticamente la estructura de un transistor npn.



Figura 2: Transistor TBJ

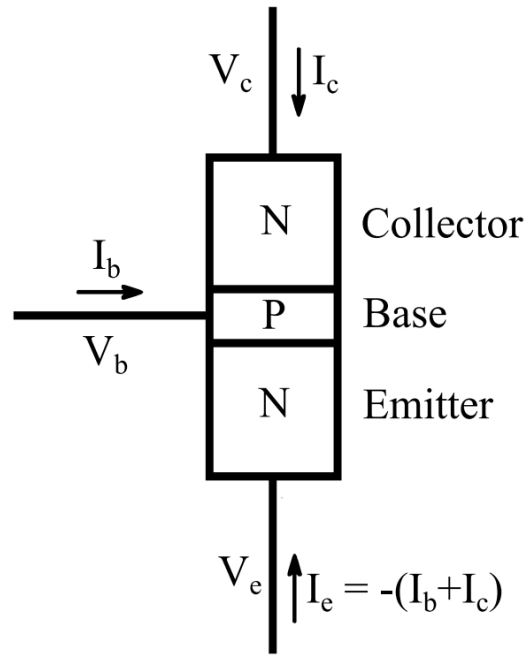


Figura 3: Esquema de un semiconductor npn. Obtenida de [1]

Donde  $V_e, V_b, V_c$  representan los voltajes del emisor, base y colector respectivamente y  $I_e, I_b, I_c$  sus corrientes.

En este tipo de transistores es de especial importancia encontrar la corriente del colector  $I_c$  como función de la diferencia de potencial entre el emisor y el colector  $V_{ce} = V_c - V_e$ . La relación entre estas dos variables dependerá del valor de la corriente de la base  $I_b$ . Por lo tanto, podemos variar el valor de  $I_b$  y para cada valor dibujar la curva de  $I_c$  vs  $V_{ce}$ . De esta forma obtendremos una familia de curvas como la que se observa en la figura 4.

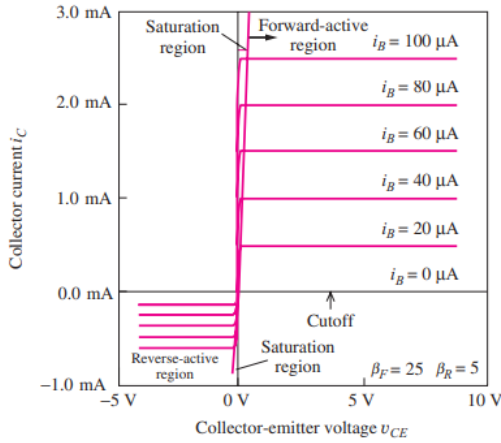


Figura 4: Curvas  $I_C$  vs  $V_{ce}$  para distintos valores de  $I_b$ .  
Obtenida en [2]

En la figura 4 se ve cómo cambia el comportamiento de las curvas de  $I_C$  vs  $V_{ce}$  dependiendo de los valores de  $I_b$ . Se identifican varias zonas en las que el transistor tiene distintos comportamientos.<sup>[2]</sup>

- **Zona de Corte:** La zona de corte se obtiene cuando la corriente por la base  $I_b$  es prácticamente 0. En este caso, la corriente del colector  $I_C$  será 0 sin importar el voltaje  $V_{ce}$  que se aplique. Por lo tanto, el transistor actúa como un circuito abierto.
- **Zona de Saturación:** La zona de saturación se obtiene cuando el voltaje  $V_{ce}$  es bajo. En esta zona la corriente del colector  $I_C$  se encuentra en un máximo y no depende de la corriente de la base  $I_b$ . Es decir, sin importar el valor de  $I_b$ , el transistor se comporta como un circuito cerrado entre el emisor y el colector.
- **Zona Activa:** La zona activa se consigue para voltajes  $V_{ce}$  mayores a los de la zona de saturación. En esta zona la corriente del colector  $I_C$  es directamente proporcional a la corriente de la base  $I_b$  y no depende fuertemente del voltaje  $V_{ce}$ . Es decir, se cumple una relación del tipo  $I_C = \beta I_b$  (1), donde por lo general  $\beta$  es una constante que depende del modelo del transistor y es del orden de 100.  
Es decir, el transistor funciona como un amplificador que toma la corriente de la base  $I_b$  y la amplifica por un factor fijo para formar una señal igual pero amplificada que pasa por el colector.
- **Zona activa inversa:** Para voltajes  $V_{ce}$  negativos se sigue un comportamiento similar al de la zona activa, en el que  $I_C$  es un múltiplo de  $I_b$ . Solamente que ahora la corriente  $I_C$  tendrá signo contrario a la  $I_b$  y el factor por el que se multiplica la corriente es menor al de la zona activa.

De esta forma, variando el voltaje  $V_{ce}$  podemos hacer que el transistor funcione como un amplificador de la corriente  $I_b$  (lo cual se consigue en la zona activa) o como un circuito abierto o cerrado.

## Amplificador TBJ

Como aplicación del transistor TBJ, en esta práctica construiremos y simularemos un amplificador. Dicho amplificador tiene la finalidad de tomar una señal de voltaje de entrada  $V_i$  y producir como resultado esa misma señal pero con una amplitud mayor en un voltaje de salida  $V_o$ .

Como ya se mencionó, cuando el transistor TBJ se encuentra en la zona activa, se puede utilizar como un amplificador. Pues en esta zona la corriente que pasa por el colector  $I_C$  es directamente proporcional a la corriente que se suministra en la base, con una relación del tipo  $I_C = \beta I_b$ . Esta función del transistor es la que será aprovechada para construir el circuito amplificador que se simulará en TINA en la siguiente sección.

Sin embargo, para construir el amplificador es importante saber en qué zona de funcionamiento se encuentra el transistor (y asegurarnos de que se encuentre en la zona activa). Esto se puede realizar con un proceso conocido como 'polarizar' el transistor, en el cual nos aseguramos de poner al transistor en la zona activa. Desarrollaremos y detallaremos este proceso en la siguiente sección antes de construir el amplificador.

## 2. MOSFET

Un MOSFET se construye utilizando semiconductores tipo n y tipo p además de una capa aislante. Como se ve en la figura 5, el MOSFET tiene 4 terminales llamadas Gate (G), Source (S), Drain (D) y Body (B). El body del MOSFET (Del N-MOSFET para ser exactos) está formado por un semiconductor tipo p, mientras que en el source y el drain se colocan semiconductores tipo n incrustados en el cuerpo. Por último, en el gate se tiene una placa de metal y se encuentra separada del body por una capa aislante.

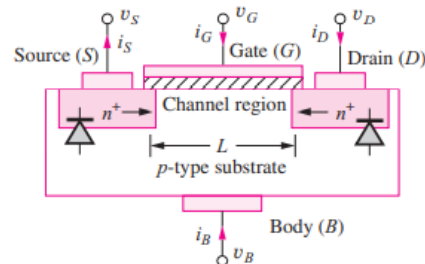


Figura 5: Esquema de MOSFET. Obtenido de [2]

Usualmente la terminal de body está conectada internamente con el source, por lo que no se suele considerar y se toma el MOSFET como un dispositivo de 3 terminales.<sup>[2]</sup>  $V_s, V_g, V_d$  representan los voltajes del source, gate y drain respectivamente y  $I_s, I_g, I_d$  sus corrientes como se ve en la figura 5.

En general nos va a interesar la corriente que entra por el source y sale por el drain, que llamaremos corriente drain-source. Veremos cómo se comporta esta corriente para distintos valores del voltaje entre el drain y el source  $V_{ds} = V_d - V_s$ . Se puede alterar esta relación  $I_{ds}$  vs  $V_{ds}$  al cambiar el valor del voltaje entre el gate y el source  $V_{gs} = V_g - V_s$  y obtener una familia de curvas parametrizadas por  $V_{gs}$ .

En la figura 6 vemos cómo se ve teóricamente la relación entre la corriente drain-source  $I_{ds}$  con el voltaje  $V_{ds}$  para distintos valores del voltaje  $V_{gs}$ .

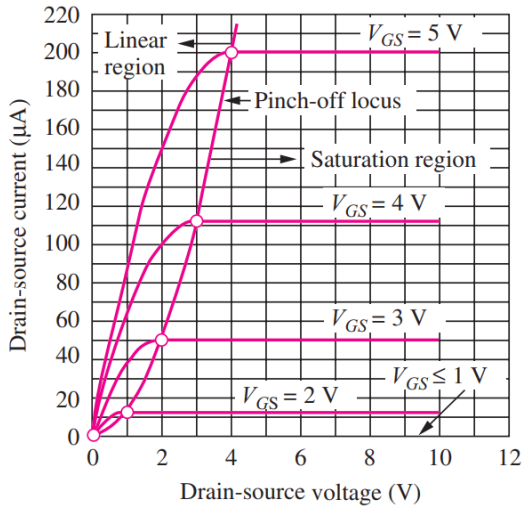


Figura 6:  $I_{ds}$  vs  $V_{ds}$  para distintos valores de  $V_{gs}$ . Obtenido de [2]

En la figura 6 distinguimos distintas regiones de funcionamiento del MOSFET dependiendo de los valores de  $V_{gs}$  y de  $V_{ds}$ .<sup>[2]</sup>

- **Zona de corte:** Para voltajes  $V_{gs}$  bajos (menores a un valor umbral llamado  $V_{th}$  que suele ser del orden de 1V) el transistor se encuentra apagado, lo que significa que sin importar el voltaje  $V_{ds}$ , la corriente entre el drain y el source  $I_{ds}$  es siempre 0, por lo que se comporta como un circuito abierto.
- **Zona lineal o triodo:** Zona con voltajes  $V_{gs}$  mayores al voltaje de umbral  $V_{th}$  y voltajes  $V_{ds}$  menores a  $V_{gs} - V_{th}$ . En esta región, la corriente  $I_{ds}$  entre el drain y el source sigue una relación prácticamente lineal con el voltaje  $V_{ds}$  entre el drain y el source.

Es decir, siempre y cuando se mantenga el voltaje  $V_{ds}$  pequeño, el MOSFET se comportará como

una resistencia entre el drain y el source. El valor de dicha resistencia depende del valor de  $V_{gs}$ , por lo que se puede controlar al ir variando el voltaje en el gate.

- **Zona de Saturación:** Zona con voltajes  $V_{gs}$  mayores al voltaje de umbral  $V_{th}$  y voltajes  $V_{ds}$  mayores a  $V_{gs} - V_{th}$ . En esta región la corriente  $I_{ds}$  que entra por el drain y sale por el source se hace independiente del voltaje  $V_{ds}$  y depende sólo del voltaje  $V_{gs}$  aplicado.

## Convertidor Boost

Un convertidor Boost es un circuito que toma un voltaje DC y tiene la finalidad de producir también una señal DC pero con un aumento en el valor del voltaje. Para su aplicación se suele utilizar un transistor MOSFET, un diodo y algún elemento que pueda guardar energía, como un inductor.<sup>[5]</sup> Como se verá en la sección de desarrollo, la importancia del MOSFET en estos circuitos es que puede actuar como un interruptor.

En la siguiente sección se implementará y analizará el circuito con el que se construye un convertidor Boost. Por ahora lo importante es tomar en cuenta que en un convertidor Boost podemos regular qué tanto queremos que aumente el voltaje en la salida  $V_o$  con respecto al voltaje de entrada  $V_i$ . Para regular esto se utiliza una señal de voltaje cuadrada que es aplicada al gate del MOSFET que tiene la funcionalidad de prender y apagar al MOSFET como si fuera un interruptor. Si dicha señal cuadrada tiene un ciclo de trabajo  $D$  (es decir, el tiempo que se encuentra encendida la señal dividido entre el periodo de la señal es igual a  $D$ ), entonces la relación entre el voltaje de entrada y de salida será:<sup>[4]</sup>

$$V_o = \frac{1}{1-D} V_i \quad (2)$$

El funcionamiento del circuito y esta relación se estudiarán a mayor detalle en la sección de desarrollo.

## Desarrollo

En esta sección revisamos las aplicaciones de cada uno de los transistores en distintos circuitos y los simulamos con TINA-TI.

### Amplificador con TBJ

Primero construiremos un amplificador utilizando un transistor TBJ. Sin embargo, antes de construirlo, es importante polarizar el transistor, como se mencionó en la sección de antecedentes.

#### Polarización

La polarización del transistor consiste en un circuito que sirve para asegurarnos de que el transistor esté trabajando en cierta zona de funcionamiento que queremos (en la zona activa en este caso). En la figura 7 se muestra el circuito de una red de polarización por divisor de tensión en la base para TBJ.

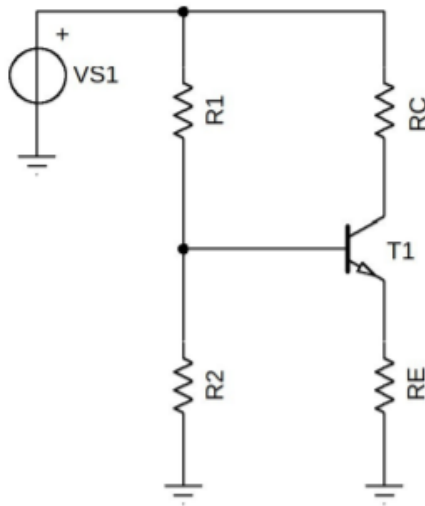


Figura 7: Red de polarización del TBJ por divisor de tensión.

El objetivo de esta sección es encontrar los valores de las resistencias  $R_1, R_2, R_C, R_E$  de tal forma que el transistor tenga cierto valor de voltaje  $V_{CE}$  y de corriente  $I_C$  que escogemos previamente para asegurarnos de que se encuentre en cierta región de funcionamiento. Realizamos ahora los siguientes pasos relativos a este circuito:

#### 1. Seleccionar un transistor TBJ y determinar sus parámetros como Beta.

Escogí el transistor TBJ modelo 2N2221 que se encuentra entre los modelos incluidos en TINA-TI. Según la especificación que incluye TINA, dicho transistor tiene un valor de  $\beta = 170$  y tiene un voltaje entre base y emisor de  $V_{BE} = 0,65V$

#### 2. Seleccionar una fuente de voltaje $V_{CC}$ para el circuito entre 5V y 20V

En este caso seleccioné una fuente de  $V_{CC} = 10V$ .

#### 3. Seleccione un punto de operación $Q(v_{CE}, I_C)$ tal que $v_{CE} = V_{CC}/2$

Como dice el punto 3, vamos a escoger que el voltaje entre colector y emisor en el punto de operación sea de  $v_{CE} = V_{CC}/2 = 5V$ . Por otro lado, escogemos que la corriente del colector en el punto de operación sea de  $I_C = 750\mu A$ .

#### 4. Use el procedimiento descrito en la página 262 del libro o 'Microelectronic Circuit Design' de Jagger y Blalock para calcular una red de polarización para el $Q$ seleccionado.

Seguimos el procedimiento que se encuentra en el libro:

##### a) Escoger el voltaje equivalente de Thevenin $V_{EQ}$ con $\frac{V_{CC}}{4} \leq V_{EQ} \leq \frac{V_{CC}}{2}$

En nuestro caso tenemos que  $V_{CC} = 10V$ , así que el voltaje que debemos escoger en este punto debe de cumplir  $2,5V \leq V_{EQ} \leq 5V$ . Escogemos entonces que  $V_{EQ} = 4V$ .

##### b) Escoger $R_1$ tal que en el circuito se tenga que $I_1 = 9I_B$ . Esto se hace escogiendo $R_1 = \frac{V_{EQ}}{9I_B}$

Primero que nada, para el transistor en la región activa directa se cumple que  $I_C = \beta I_B$ , por lo que  $I_B = I_C/\beta$ , con lo cual ya podemos calcular  $I_B$  a partir de datos que conocemos. Luego, tenemos que la resistencia  $R_1$  es igual a:

$$R_1 = \frac{V_{EQ}}{9I_B} = \frac{4V}{9(I_C/\beta)} = \frac{4V}{9(750\mu A/170)} = 100,74k\Omega$$

##### c) Selecciona $R_2$ de forma tal que $I_2 = 10I_B$ . Esto se consigue haciendo $R_2 = \frac{V_{CC} - V_{EQ}}{10I_B}$

Calculamos el valor de  $R_2$  como dice la fórmula y usando  $I_B = I_C/\beta$

$$R_2 = \frac{V_{CC} - V_{EQ}}{10I_B} = \frac{V_{CC} - V_{EQ}}{10I_C/\beta} = \frac{10V - 4V}{10(750\mu A/170)} = 136k\Omega$$

##### d) Determina $R_E$ a partir de $V_{EQ}$ usando $R_E \simeq \frac{V_{EQ} - V_{BE}}{I_C}$

Hacemos el cálculo:

$$R_E \simeq \frac{V_{EQ} - V_{BE}}{I_C} = \frac{4V - 0,65V}{750\mu A} = 4,466k\Omega$$

- e) **Determina  $R_C$  usando  $R_C \simeq \frac{V_{CC} - V_{CE}}{I_C} - R_E$**

Lo calculamos a partir de los datos que ya tenemos y que hemos propuesto:

$$R_C \simeq \frac{V_{CC} - V_{CE}}{I_C} - R_E = \frac{10V - 5V}{750\mu A} - 4,466k\Omega = 2,197k\Omega$$

##### 5. Implemente el circuito de polarización en el simulador

Ahora ya hemos calculado los valores de las resistencias que creemos que nos van a permitir tener al transistor en el punto de operación en el que lo propusimos ( $V_{ce} = 5V$  y  $I_C = 750\mu A$ ).

Entonces, implementamos el circuito de la figura 7 para los valores específicos encontrados para las resistencias  $R_1 = 100,74k\Omega$ ,  $R_2 = 136k\Omega$ ,  $R_E = 4,466k\Omega$ ,  $R_C = 2,197k\Omega$ . Y con el voltaje  $V_{CC} = 10V$  que fue propuesto.

En la figura 8 se muestra el circuito simulado en TINA-TI, ya con los valores de las resistencias que encontramos en el desarrollo anterior.

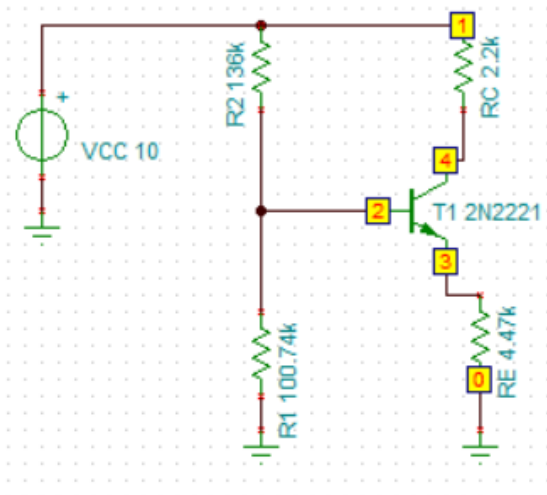


Figura 8: Red de polarización simulada en TINA-TI.

Utilizando TINA-TI se aplicó un análisis DC a este circuito para ver si el punto de operación del transistor es el que estamos buscando. En la figura 9 se muestran los resultados de los voltajes en cada nodo.

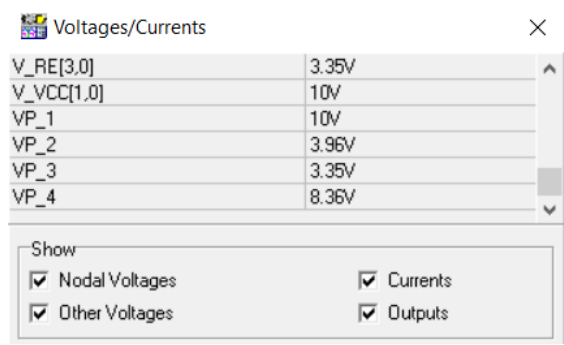


Figura 9: Voltajes nodales en la red de polarización simulada en TINA-TI

Con estos voltajes podemos calcular el valor de  $V_{CE}$  en el que está funcionando nuestro transistor. El voltaje del colector corresponde con el nodo 4, por lo que tiene un valor de  $8,36V$  y el voltaje del emisor corresponde con el nodo 3, por lo que la simulación nos dice que tiene un valor de  $3,35V$ . Luego, el voltaje entre colector y emisor en el que está funcionando nuestro transistor es de  $V_{CE} = 8,36V - 3,35V = 5,01V$ .

Esto coincide casi perfectamente con el voltaje de  $V_{CE} = 5V$  en el que queríamos que se ubicara el punto de operación del transistor.

Por otro lado, en el análisis de TINA también se incluye el valor de la corriente que pasa por la resistencia  $R_C$  como se ve en la figura 10.



Figura 10: Corrientes en la red de polarización simulada en TINA-TI

El valor de la corriente del colector  $I_B$  simulada es la corriente que pasa por la resistencia  $R_C$ , es decir,  $745,37\mu A$  según TINA. Esto coincide casi perfectamente con el valor de  $750\mu A$  en el que queríamos que se ubicara el punto de operación del transistor.

##### 6-7 Verifique que los resultados del simulador sean aproximadamente iguales a los que propuso en su diseño Cuantifique las diferencias, éstas no deberían de ser mayores al 10 %

Ya vimos en el párrafo anterior que los valores en los que está operando el transistor según la simulación de TINA son:

$$I_C = 745,37 \mu A$$

$$V_{CE} = 5,01 V$$

Lo cual coincide casi perfectamente con el punto de operación en el que queríamos a nuestro transistor, que era de  $I_C = 750\mu A$  y  $V_{CE} = 5V$ .

El error porcentual de lo propuesto y lo encontrado con TINA para la corriente es de  $\frac{|750\mu A - 745,37\mu A|}{750\mu A} \times 100 = 0,61\%$ . Y para el voltaje es de  $\frac{|5V - 5,01V|}{5V} \times 100 = 0,2\%$ .

Por lo que vemos que ambos errores porcentuales son muy bajos y pudimos correctamente colocar al transistor en el punto de operación que queríamos.

## Amplificador

Habiendo hecho el análisis de la red de polarización, podemos proceder a simular un amplificador.

### 8. Implemente en el simulador el circuito de un amplificador

Implementamos el circuito de un amplificador en TINA TI como se ve en la figura 11.

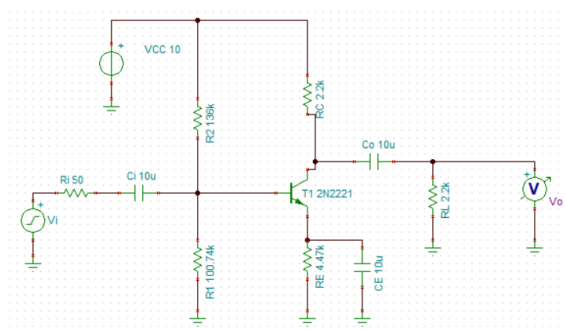


Figura 11: Circuito de amplificador

Como vemos en el circuito de la figura 11, la parte central es igual al circuito de red de polarización de la figura 8, con los valores de las resistencias encontrados antes.

### 9. Ajuste el voltaje de la fuente de AC (VS1) para que tenga una señal senoidal de $1mV$ de amplitud y con una frecuencia de $5kHz$ .

Realicé el ajuste para que el voltaje de entrada  $v_i$  tenga una señal senoidal de  $1mV$  de amplitud y una frecuencia de  $5kHz$ .

### 10 Realice una simulación transitoria cuyo tiempo final sea de, por lo menos, $20ms$ y compare los voltajes de entrada y de salida.

Realicé la simulación transitoria con un tiempo de  $20ms$  en TINA. El resultado de los voltajes de entrada y salida se muestran en la figura 12.

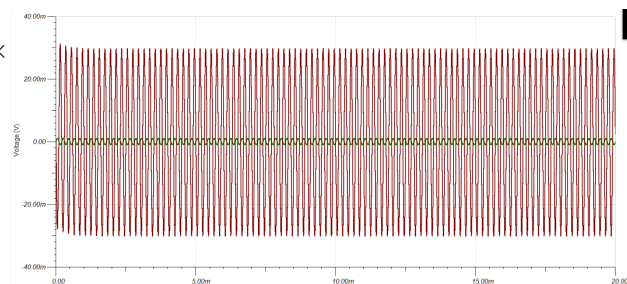


Figura 12: Resultado simulación del amplificador

En la figura se colocan los voltajes de entrada y de salida en la misma gráfica para que quede clara la amplificación. El eje horizontal es el tiempo transcurrido y el eje vertical el voltaje. La curva verde indica el voltaje de entrada del circuito  $v_i$  y la curva roja indica el voltaje de salida, el cual es medido por el voltímetro  $v_o$ .

Poner las dos curvas en la misma gráfica nos muestra claramente cómo ambas curvas son tienen la misma frecuencia con la única diferencia de que el voltaje  $v_o$  tiene una mayor amplitud.

### 11. Mida el tamaño de las crestas del voltaje de entrada y del voltaje de salida.

Hacemos estas medidas usando las herramientas de análisis de TINA como se muestra en la figura 13.

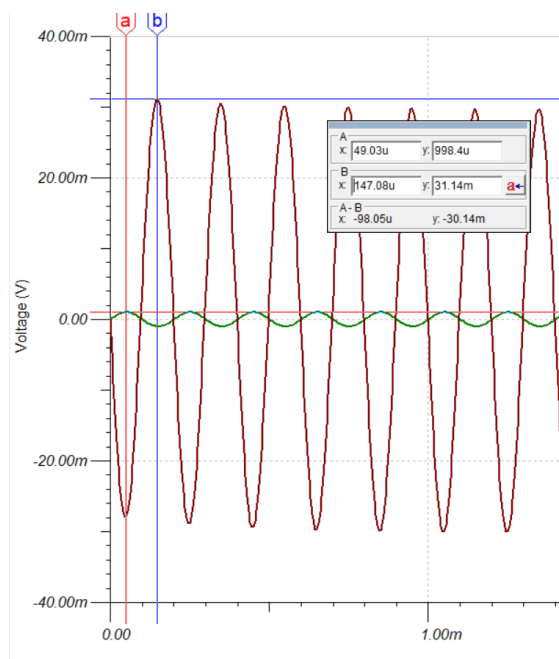


Figura 13: Medida de amplitud de las curvas



La figura 13 muestra nuevamente las curvas de voltaje de entrada (en verde) y de salida (en rojo). Cuyas amplitudes fueron medidas con los cursores de TINA.

Como vemos en las medidas, la curva de voltaje de entrada tiene una altura de  $998,4\mu V$  (aunque en realidad sabemos que el valor exacto de esta fuente de voltaje es  $1mV$ ). Y la curva de voltaje de salida tiene una altura de  $31,14mV$ , es decir, 31,14 veces mayor amplitud.

También podemos calcular la amplificación que debería de tener el amplificador teóricamente a partir de los valores de  $\beta$  y de las resistencias. Teóricamente, vimos en clase que la amplificación debería de tener un valor de:

$$A_V = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-g_m r_\pi R'_i}{R_i + r_\pi}$$

Donde  $R'_i = \left( \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_L} \right)^{-1}$  que en nuestro caso es igual a  $R'_i = \left( \frac{1}{2,2k} + \frac{1}{2,2k} \right)^{-1} = 1,1k\Omega$ .

Y donde  $g_m r_\pi = \beta$ , que en nuestro caso es 170.

Y  $r_\pi = \frac{25,8mV\beta}{I_C} = \frac{25,8mV * 170}{750\mu A} = 5848$  Por lo 14. que la amplificación teórica debería de ser de:

$$A_V = \frac{v_o}{v_i} = \frac{170(1,1k\Omega)}{50 + 5848} = 31,7V/V$$

Esto coincide considerablemente bien con el valor de  $31,14V/V$  obtenido en TINA, de hecho el error porcentual es de solamente 1,76 %

## 12. Calcule la ganancia de voltaje con carga ( $R_L = 2,2k$ ) del circuito.

Como vimos, el voltaje de entrada tiene una amplitud de  $1mV$  y el de salida  $31,14mV$ . Es decir, un voltaje con una amplitud  $31,14V/V$  veces mayor. Podemos calcular la ganancia de voltaje en decibels con la fórmula que vimos en clase:

$$\begin{aligned} \text{ganancia} &= 20 \log \left( \frac{V_{out}}{V_{in}} \right) \text{ dB} \\ &= 20 \log \left( \frac{31,14mV}{1mV} \right) \text{ dB} = \boxed{29,93 \text{ dB}} \end{aligned}$$

## 13. Realice un análisis en el dominio de la frecuencia (AC transfer Characteristic), en magnitud y fase, con una frecuencia inicio desde $0,1Hz$ hasta $100MHz$ . Cambie la cantidad de puntos de la simulación a 5000

Realicé dicho análisis en TINA. El resultado se muestra en la figura 14 a continuación.

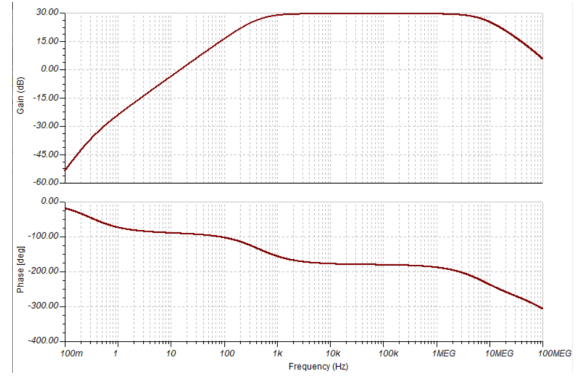


Figura 14: AC transfer characteristic

Vemos en la gráfica que la primera curva corresponde a la ganancia que tiene el amplificador según la frecuencia de la señal de entrada mientras que la segunda curva corresponde a la fase del amplificador según la frecuencia de la señal de entrada.

Vemos que para frecuencias de entre  $1kHz$  y  $1MHz$ , la ganancia es de aproximadamente  $30dB$  (lo que coincide con la ganancia de  $29,93dB$  que calculamos para una frecuencia de entrada de  $5kHz$ ).

## Modifique la resistencia de carga $R_L = 1M$ y repita los pasos del 10 al 13.

Primero modificamos dicha resistencia tal como se muestra en el circuito de la figura 15 (que es el mismo circuito amplificador de antes pero con la resistencia  $R_L$  con un valor de  $1M\Omega$ ).

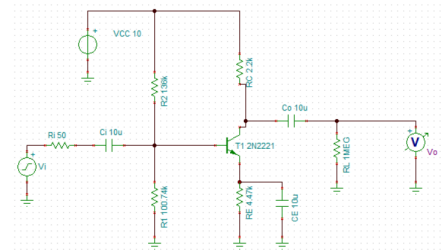


Figura 15: Amplificador con  $R_L = 1M\Omega$

Ahora realizamos los pasos del 10 al 13 para este circuito. Primero realizamos una simulación transitoria con un tiempo de  $20ms$  y comparamos los voltajes de entrada y de salida. El resultado de la simulación se muestra en la figura 16.

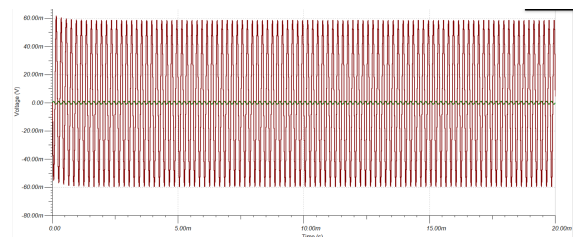


Figura 16: Análisis de amplificador con  $R_L = 1M\Omega$



La curva verde corresponde al voltaje de entrada del circuito generado por la fuente  $V_i$  y la curva roja al voltaje de salida medida por el voltímetro. Al poner ambas curvas en la misma gráfica podemos notar cómo el voltaje de salida tiene la misma frecuencia pero mucho mayor amplitud.

Al igual que antes, podemos medir la amplitud de ambos voltajes usando las herramientas de TINA. Haciendo esto resulta que el voltaje de entrada tiene una amplitud de  $1\text{mV}$  y el de salida una amplitud de aproximadamente  $61,5\text{mV}$ .

Calculamos la ganancia del voltaje con estos datos al igual que como hicimos antes:

$$\begin{aligned} \text{ganancia} &= 20 \log \left( \frac{V_{out}}{V_{in}} \right) \text{ dB} \\ &= 20 \log \left( \frac{61,5 \text{ mV}}{1 \text{ mV}} \right) \text{ dB} = \boxed{35,77 \text{ dB}} \end{aligned}$$

Finalmente, realizamos un análisis en el dominio de la frecuencia (AC transfer characteristic) al igual que hicimos antes con una frecuencia desde  $0,1\text{Hz}$  hasta  $100\text{MHz}$ . El resultado se muestra en la figura 17 a continuación.

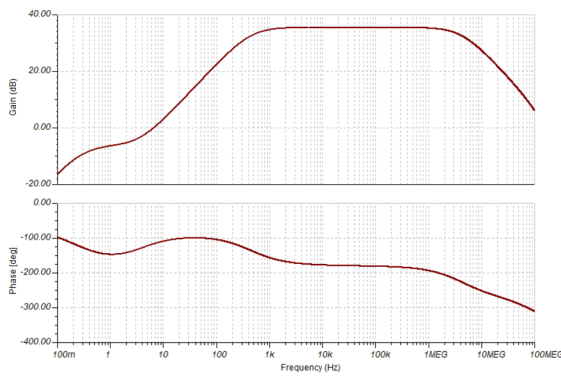


Figura 17: AC transfer characteristic  $R_L = 1\text{M}\Omega$

La gráfica de arriba muestra el valor de la ganancia del amplificador para distintos valores de la frecuencia en la señal de entrada y la gráfica inferior muestra el desfase. Vemos que para una frecuencia de  $5\text{kHz}$  la gráfica muestra una ganancia de aproximadamente  $35\text{ dB}$ , lo que es consistente con la ganancia que calculamos de  $35,77\text{ dB}$  para esta frecuencia.

15. **Cambie el valor de la resistencia de carga  $R_L = 2,2\text{k}\Omega$ . Cambie la amplitud de la señal de entrada a  $0,5\text{V}$  y haga la simulación transitoria como se indica en el paso 10.**

Se realizó dicho análisis con una señal de entrada de amplitud  $0,5\text{V}$  como menciona la instrucción. Los resultados del análisis transitorio se muestran en la figura 18.

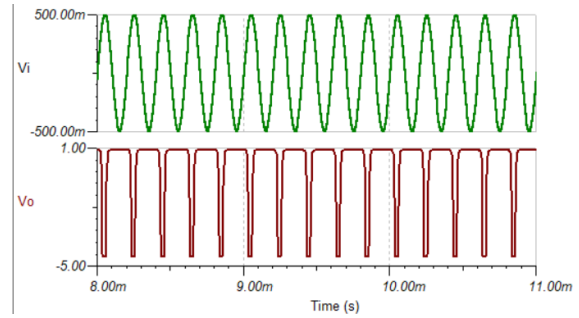


Figura 18: Análisis transitorio señal de amplitud  $0,5\text{V}$

Al igual que antes, la curva verde muestra la señal de voltaje de entrada producida por la fuente, que tiene una amplitud de  $0,5\text{V}$  y frecuencia de  $5\text{kHz}$ . La curva roja muestra la señal de voltaje de la salida del circuito. En este caso vemos que la salida no es una onda con forma de seno, esto se debe a que el voltaje de entrada es demasiado alto y el funcionamiento de estos circuitos como amplificadores sólo es válido para voltajes de entrada bajos, en los que se pueden hacer varias aproximaciones para analizar teóricamente el circuito.

## Sección de preguntas

1. **¿Por qué es necesario polarizar el transistor?**
2. **Por qué es importante que el punto de operación del transistor se encuentre en la región de activa directa?**

Debido a que queremos utilizar al transistor como un amplificador de señales. Es en la región activa directa en la que el transistor funciona de esta manera, tal como se explica en los antecedentes de la práctica.

3. **En una tabla reporta los siguientes voltajes y corrientes obtenidos con el simulador y con el algoritmo de diseño:  $V_{BE}$ ,  $V_{CE}$ ,  $I_C$  e  $I_B$ . Cuantifica los errores.**

Según el diseño del circuito, el voltaje  $V_{BE}$  es igual a  $0,65\text{V}$  y el voltaje  $V_{CE}$  es  $5\text{V}$ . Además, propusimos  $I_C = 750\mu\text{A}$  y calculamos que la corriente de la base es  $I_B = I_C/\beta = 750\mu\text{A}/170 = 4,411\mu\text{A}$ .

Ahora vemos los resultados de la simulación. Como se ve en la figura 9, el voltaje del nodo 2 del circuito (que es la base del transistor) es de  $V_B = 3,96V$ , el del nodo 3 (que es el emisor del transistor) es de  $V_E = 3,35V$  y el del nodo 4 (que es el colector del transistor) es de  $V_C = 8,36V$ . Entonces tenemos que  $V_{BE} = V_B - V_E = 3,96V - 3,35V = 0,61V$  y que  $V_{CE} = V_C - V_E = 8,36V - 3,35V = 5,01V$ .

En la figura 10 tenemos las corrientes del circuito. La corriente del colector es la de la resistencia  $R_C$ , que según la figura 10 tiene un valor de  $I_C = 745,37\mu A$ . Por otro lado, viendo la figura 8 de la red de polarización y usando la ley de Kirchoff para el nodo central, vemos que la corriente de la base del transistor es igual a  $I_B = -I_{R2} - I_{R1} = 44,39\mu A - 39,34\mu A = 5,05\mu A$ .

Con todos estos datos podemos crear una tabla de resultados comparando los del diseño y los de la simulación.

	Diseño	Simulación	Error porcentual
$V_{BE}$	0,65V	0,61V	6,15 %
$V_{CE}$	5V	5,01V	0,02 %
$I_C$	750 $\mu A$	745,37 $\mu A$	0,61 %
$I_B$	4,411 $\mu A$	5,05 $\mu A$	19,8 %

4. **Según sus simulaciones, reporte las ganancias de voltaje con carga y sin carga y explique a qué se debe esa diferencia. Compare las ganancias de voltaje contra las calculadas teóricamente y cuantifique los errores.**

La ganancia con carga (obtenida en el paso 12 con la carga  $R_L = 2,2k\Omega$ ) resultó ser de 29,93dB. Mientras que sin la carga (en el paso 14, cuando  $R_L = 1M\Omega$ ), la ganancia resultó de 35,77dB. Vemos que la ganancia es mayor sin la carga, esto debido a que la carga se lleva parte de la energía y no permite que toda se utilice para la amplificación.

En el caso en que  $R_L = 2,2k\Omega$ , ya calculamos la amplificación teórica en el paso 11 y obtuvimos un valor de  $A_V = 31,7V/V$ , mientras que en la simulación obteníamos 31,14V/V, lo cual implica un error porcentual de 1,76 %.

Para el caso en que  $R_L = 1M\Omega$ , la amplificación simulada la obtuvimos en el paso 14, con un resultado de 61,5V/V. Mientras que el resultado teórico se obtiene análogamente al de la otra resistencia (en el paso 11) y da 62,2k $\Omega$ , por lo que se tiene un error de 1,12 %.

5. **¿Qué significa el diagrama de magnitud y**

## fase (Bode) que obtuvo en el paso 13?

El diagrama (en la figura 14) contiene dos curvas. Una curva de ganancia vs frecuencia y una de fase vs frecuencia. La primera curva nos dice la ganancia que tiene el amplificador dependiendo de la frecuencia de la señal de entrada. Mientras que la segunda curva nos dice el desfase que tendrá la señal de salida respecto a la de entrada dependiendo de la frecuencia de la señal.

De esta forma podemos interpretar como va a ser afectada en amplitud y en fase una señal que es pasada por el amplificador dependiendo de la frecuencia que tenga la señal.

## 6. Interprete el diagrama de Bode

Interpretaremos el diagrama de Bode de la figura 14, primero nos fijamos en la curva de ganancia. Vemos que para frecuencias bajas la ganancia es baja y va aumentando poco a poco hasta alcanzar un máximo de ganancia de 30 cuando la frecuencia es 1kHz. Es decir, las frecuencias bajas no son tan amplificadas como las cercanas a 1kHz. Luego, la ganancia se mantiene casi constante desde una frecuencia de 1kHz hasta casi 10MEG (es decir, todas estas frecuencias son amplificadas por la misma magnitud). Y finalmente la ganancia para frecuencias arriba de 10MEG disminuye poco a poco.

Ahora nos fijamos en la curva de fase. Vemos que para frecuencias de aproximadamente entre 1Hz y 100Hz el desfase es de 90 grados. Es decir, en este rango de frecuencias la señal de salida se desfaza 90 grados con respecto a la de entrada. Luego, para frecuencias entre 1kHz hasta 1MEG, el desfase es de aproximadamente 180 grados. Es decir, en este rango de frecuencias, la señal de salida estará completamente desfasada con respecto a la de entrada.

## Conmutación con transistores MOSFET 5. Simule el circuito

En esta sección utilizaremos un transistor MOSFET para construir un convertidor Boost. Como se mencionó en la sección de antecedentes, el objetivo de este circuito es tomar un voltaje D.C. de entrada con valor  $V_i$  y convertirlo a un voltaje D.C. con valor  $V_o$ .

Para hacer esto, el circuito utiliza un transistor MOSFET, un diodo y un voltaje con señal cuadrada que como veremos, se utiliza para activar y desactivar el MOSFET. Para implementar el circuito, seguimos los siguientes pasos:

### 1. Implemente en el simulador el circuito de un convertidor Boost

Para esta actividad implementaremos un convertidor Boost utilizando un transistor MOSFET. Para ello implementamos el circuito de la figura 19.

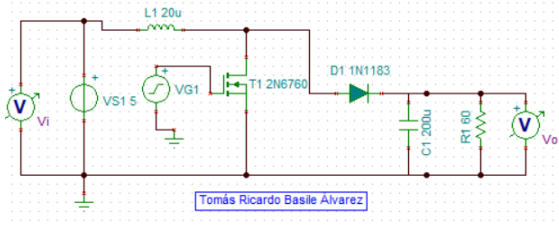


Figura 19: Convertidor Boost implementado en TINA

### 2. Proponga los valores para $L_1, C_1, R_1$

Como se puede ver en el circuito, escogí un inductor con  $L_1 = 20\mu H$ , un capacitor de  $C_1 = 200\mu F$  y una resistencia de  $R_1 = 60\Omega$ . Además, el MOSFET utilizado, que es uno de los incluidos en TINA, es el modelo 2N6760 y el diodo utilizado es 1N1183.

### 3. Seleccione $V_{S1}$ entre 1,5V y 5V

Como se ve en el dibujo, escogí un voltaje  $V_{S1}$  de 5V.

### 4. Ajuste $V_{G1}$ para tener una señal cuadrada con un ciclo de trabajo $D$ .

Ajusté una señal cuadrada en la fuente de potencial  $V_{G1}$  con una amplitud 1V y un periodo de  $8\mu s$ . Como se ve en la figura 20, la señal se encuentra encendida durante  $4\mu s$  de esos  $8\mu s$ , por lo que se tiene un ciclo de trabajo de  $D = 4/8 = 1/2$ .

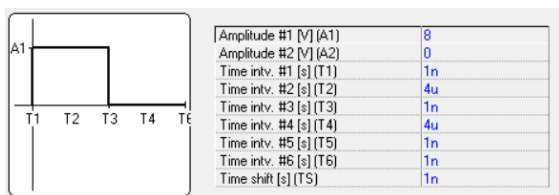


Figura 20: Señal del voltaje  $V_{G1}$

Simulé el circuito con un análisis transitorio con una duración de  $50\mu s$ . En la figura 21 se ven las gráficas resultantes.

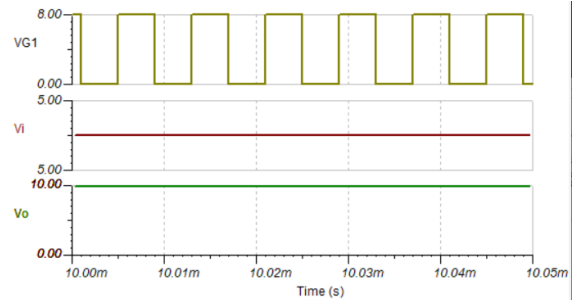


Figura 20: Análisis del Convertidor Boost implementado en TINA

La curva amarilla corresponde a la señal  $V_{G1}$ , que como se mencionó antes, es una señal cuadrada de magnitud 8V y con un ciclo de trabajo  $D = 1/2$ . La curva roja indica el valor del voltaje de entrada, que es  $V_i = 5V$ . Y la curva verde muestra el valor del voltaje de salida, que es  $V_o = 9,86V$ .

Por lo tanto, como se puede ver, el voltaje fue convertido desde un valor de 5V a 9,86V. Lo cual coincide considerablemente bien con la ecuación teórica (2) de los antecedentes, que dice  $V_o = \frac{1}{1-D} V_i = \frac{1}{1-1/2} 5V = 10V$ .

## Sección de preguntas

Para contestar las preguntas de esta sección, primero revisaremos cómo funciona el circuito en general. Como se mencionó antes, el objetivo del circuito es incrementar un voltaje de entrada D.C. con valor  $V_i$  a un voltaje D.C. de salida  $V_o$ .

El funcionamiento del circuito se basa en dos etapas que se repiten periódicamente cada que la señal del voltaje cuadrado se encuentra prendida o apagada:<sup>[5]</sup>

- Primera Etapa: Cuando la señal cuadrada de voltaje  $V_{G1}$  se encuentra en el estado encendido, dicho voltaje aplicado sobre la terminal Gate del MOSFET hace que éste actúe como un interruptor encendido. Entonces, las terminales Drain y Source del MOSFET están conectadas y puede fluir corriente entre ellas. Por ello, en esta etapa las partes activas (por las que fluye corriente) en el circuito son las marcadas en rojo en la figura 21.

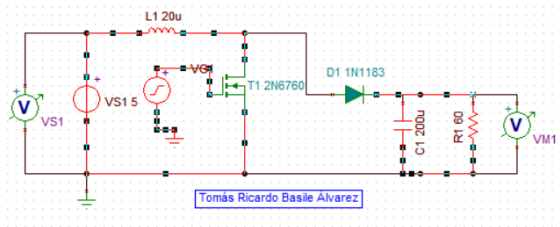


Figura 21: Convertidor Boost en la primera etapa de funcionamiento

En esta primera etapa la corriente llega al inductor  $L_1$ , por lo que lo puede cargar y guardar energía en él. Además, el capacitor  $C_1$  (que es cargado en la segunda etapa) proporciona el voltaje  $V_o$  de salida sobre la resistencia  $R_1$ .

- Segunda Etapa: Cuando la señal cuadrada de voltaje  $V_{G1}$  se encuentra en el estado apagado, el MOSFET no recibe voltaje en su terminal Gate, por lo que actúa como un interruptor apagado. Esto implica que las puertas drain y source están desconectadas y no fluye corriente entre ellas. Por ello, en esta etapa las partes activas (por las que fluye corriente) en el circuito son las marcadas en rojo en la figura 22.

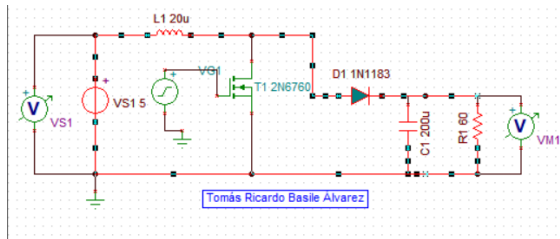


Figura 22: Convertidor Boost en la segunda etapa de funcionamiento

En esta etapa el inductor  $L_1$  (que obtuvo energía durante la primera etapa) produce una emf. Esto resulta en dos voltajes aplicados al capacitor y la resistencia, el voltaje de entrada  $V_{in}$  y el voltaje que produjo el inductor. Por ello, se produce un voltaje de salida  $V_o$  mayor a  $V_{in}$  sobre la resistencia. Además, se carga el capacitador con este voltaje  $V_o$ , lo que permitirá que durante la primera etapa la resistencia también tenga este voltaje  $V_o$ .

Además, como mencionamos en los antecedentes, la relación entre el voltaje de entrada  $V_i$  y el de salida  $V_o$  está dada por el ciclo de trabajo  $D$  del voltaje  $V_{G1}$  y es (2):<sup>[4]</sup>

$$V_o = \frac{1}{1-D} V_i$$

Ahora sí respondemos a las preguntas.

1. ¿Cuál es la función del diodo en el circuito?

El diodo tiene la función de separar el circuito durante la primera etapa de funcionamiento. Básicamente, el diodo nos permite asegurar que el capacitor  $C_1$  se tenga que descargar en la resistencia  $R_1$  (proporcionándole así el voltaje de salida  $V_o$  que queremos). El diodo prohíbe que el capacitor se descargue en la dirección del inductor y así efectivamente proporcione el potencial  $V_o$  a la resistencia.

2. ¿Cuál es la función del MOSFET en el circuito?

Como se mencionó durante el análisis de las etapas del circuito, el mosfet actúa como un interruptor controlado por la fuente de voltaje  $V_{G1}$ . Dicho interruptor nos permite cambiar entre la etapa 1 y la etapa 2 de funcionamiento.

3. ¿En qué valor de voltaje se estabiliza el voltaje de salida para el punto 4?

Como se mencionó y se pudo ver en la primera simulación, el voltaje de salida es  $V_o = \frac{1}{1-D} V_i$

4. Repita el experimento para 4 valores diferentes de  $D$  y grafique los puntos. Explique si estos se ajustan a la expresión teórica.

Vamos a simular el circuito para valores de  $D = 0,1, 0,25, 0,5, 0,75$ , los cuales se consiguen cambiando la forma de la curva de voltaje  $V_{G1}$ . Para cada uno de estos casos, analizamos el circuito al igual que antes y obtenemos el valor del voltaje de salida  $V_o$ .

Además de los datos simulados, se incluye el valor del voltaje de salida teórico que es  $V_o = \frac{1}{1-D} V_i$ . De esta forma se obtiene la siguiente tabla:

$D$	$V_o$ Simulación	$V_o$ teórico
0,1	5,27V	5,55V
0,25	7,16V	6,66V
0,5	9,86V	10V
0,75	18,11V	20V

En la figura 23 se muestra la gráfica de los datos encontrados por la simulación y los teóricos.

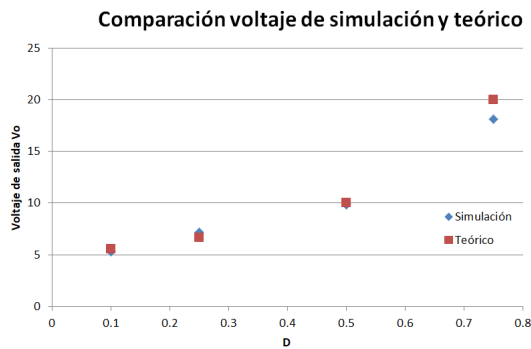


Figura 23: Gráfica simulación y teórico

Vemos que los valores de la simulación y los teóricos se parecen considerablemente, con la mayor diferencia siendo de un 10 % cuando  $D = 0,75$ .

## 5. ¿Cuál es la utilidad de este tipo de circuitos?

Como se ha mencionado, este circuito funciona para transformar el voltaje D.C. de un valor a otro. Esto es útil en una gran variedad de aplicaciones. Por ejemplo, en automóviles eléctricos o híbridos en los que se necesita un voltaje alto. En este caso se utiliza el convertidor Boost para convertir un voltaje bajo que se puede crear sencillamente en el voltaje alto que requiere el automóvil.

## Conclusiones

Se realizaron exitosamente las simulaciones en TINA-TI para cada una de las aplicaciones de transistores.

Para el caso del TBJ, se pudo polarizar correctamente el transistor para asegurarnos que se encuentre en la zona activa. Posteriormente se utilizó el circuito de amplificador para amplificar una señal de voltaje y notamos que efectivamente se amplificaba por un factor el voltaje de la señal. Además, notamos que el valor de amplificación teórica (que resultó ser de  $A = 31,7V/V$ ) coincide muy bien con el simulado en TINA de  $31,14V/V$ . Y finalmente observamos que estos amplificadores no sirven correctamente para amplitudes muy altas del voltaje de entrada, en las que no son válidas algunas aproximaciones que se hacen al analizar el circuito, por lo que el voltaje de salida resulta no ser senoidal.

Finalmente, para el MOSFET nos fue posible implementar el convertidor Boost. Observamos que dicho convertidor efectivamente incrementa un voltaje D.C por algún valor. Además, encontramos cómo cambia la amplificación del voltaje según el valor del ciclo de trabajo  $D$ . En la figura 23 se muestran los valores del voltaje  $V_o$  simulado por TINA y los valores teóricos según el valor de  $D$ . En dicha figura vemos que la simulación se acerca mucho a los valores teóricos, con el mayor error siendo de aproximadamente 10 % para  $D = 0,75$ . El error se puede deber a que el análisis de circuitos que lleva a la ecuación (2) se basa en idealizar al transistor y al diodo, lo cual no es cierto para un sistema real como el simulado por TINA.

Con ello concluimos que fue posible simular exitosamente el amplificador y el convertidor Boost y ambos cumplieron con las funciones esperadas (amplificar una señal de voltaje A.C. para el amplificador y aumentar el voltaje D.C para el convertidor). Además de que vemos la utilidad de estos circuitos para amplificar señales A.C. y señales D.C respectivamente.

## Bibliografía

1. Suits, Bryan H. Electronics for Physicists: An Introduction. Springer Nature, 2020
2. Jaeger, Richard C., and Travis N. Blalock. Micro-electronic circuit design. New York: McGraw-Hill, 2010.
3. Neamen, Donald A. Semiconductor physics and devices: basic principles. New York, NY: McGraw-Hill,, 2012.

- 
4. "Boost Converter Operation". LT1070 Design Manual, Carl Nelson & Jim William
  5. Ramos Flores, Cristina. Análisis de un convertidor DC/DC destinado al almacenamiento híbrido de energía. Universidad Politécnica de Madrid 2017.