



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

Curvas características de los dispositivos electrónicos

Tomás Ricardo Basile Álvarez
316617194

ASIGNATURA

Laboratorio de Electrónica. Grupo 8285

8 de noviembre de 2021

Introducción

En este trabajo se realizan primero simulaciones usando TINA-TI para obtener las curvas características de tres dispositivos: el diodo, el TBJ y el MOSFET. Posteriormente se comentan los resultados de estas curvas y se comparan con las curvas características teóricas que se pueden encontrar en referencias como [1] y [2]. Esto con el objetivo de entender cómo funcionan estos dispositivos y verlos en acción en la simulación.

Antes de revisar dichas simulaciones, en la siguiente sección se presentan los antecedentes teóricos para entender los resultados de la práctica y para tener una referencia con la que compararlos.

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.[2]

Para entender los dispositivos semiconductores que analizaremos en el trabajo, primero hay que entender qué es un semiconductor. En términos generales, un **semiconductor** es un material con una conductividad que se encuentra entre la de un conductor y la de un aislante. En un conductor prácticamente no se requiere energía para que un electrón de valencia pase a convertirse en uno de conducción, mientras que en un aislante se requiere de mucha energía para hacer este salto. En medio de ambos comportamientos se encuentran los semiconductores, los cuales requieren una energía relativamente baja (del orden de $2eV$) para convertir a los electrones de valencia en electrones de conducción.[1]

Una característica fundamental de los semiconductores es la posibilidad de **doparlos**. Se le llama así cuando se cambian algunos átomos del material original por elementos con una cantidad mayor o menor de electrones de valencia. Si se introduce un elemento con mayor número de electrones, el semiconductor dopado resultante recibe el nombre de semiconductor tipo N. Debido a los electrones adicionales introducidos por el dopaje, en estos materiales se tienen electrones libres que pueden conducir corriente.[1]

Por otro lado, si se introduce un elemento con un número menor de electrones, el material resultante recibe el nombre de semiconductor tipo P. Ahora el material contiene varios 'hoyos' donde antes había electrones y estos se pueden mover por el material. Por lo que podemos visualizar a los materiales tipo P como si tuvieran cargas positivas libres que pueden

conducir corriente.[1]

Estos tipos de materiales son fundamentales para construir los dispositivos electrónicos que estudiaremos en este trabajo y que se detallan a continuación.

1. Diodo

Un diodo es un componente electrónico con dos terminales y que tiene la característica importante de que (en el caso ideal) permite el flujo de corriente en una dirección pero no en la dirección contraria.

Un diodo se puede construir uniendo un material tipo P con uno tipo N como se muestra en la figura 1.

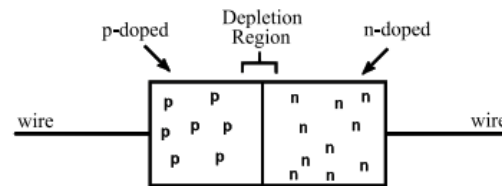


Figura 1: Diodo semiconductor. Imagen obtenida de [1]

A este arreglo se le conoce como **unión PN** y es una forma de construir diodos utilizando semiconductores. Cuando la unión PN se encuentra en equilibrio, los electrones libres del material N que se encuentran en la frontera pasan al material P y llenan a los hoyos libres de éste. Por ello, en la superficie entre ambos materiales se crea una región conocida como **región de agotamiento** en la que no hay cargas libres.[2]

El comportamiento de la corriente como función del voltaje entre las terminales del diodo (medido como potencial del material P menos potencial del material N) se muestra en la figura 2.

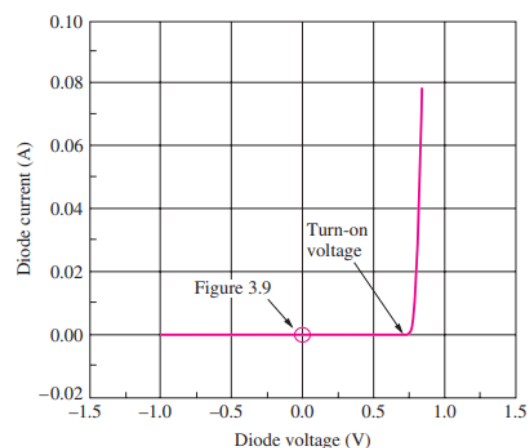


Figura 2: Gráfica de i-v para un diodo semiconductor. Obtenida de [2]

Como se puede ver en la figura 2, cuando el material N se encuentra a mayor potencial que el material P, la corriente por el diodo es 0 (o muy cercana a 0). Es decir, el diodo se comporta prácticamente como un

circuito abierto.^[2]

Por otro lado, cuando el potencial del material tipo P menos el del tipo N es mayor que cierta cantidad mínima llamada 'voltaje de encendido' (típicamente de alrededor de 0.6 V), la corriente puede atravesar el diodo. Además, bajo estas condiciones, el voltaje se vuelve prácticamente independiente de la corriente y permanece en un valor cercano al voltaje de encendido para toda corriente, es decir, el diodo se comporta prácticamente como un corto circuito.

2. 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 $pn p$ (en esta práctica usaremos solamente un transistor tipo npn). En la figura 3 se muestra esquemáticamente la estructura de un transistor npn .

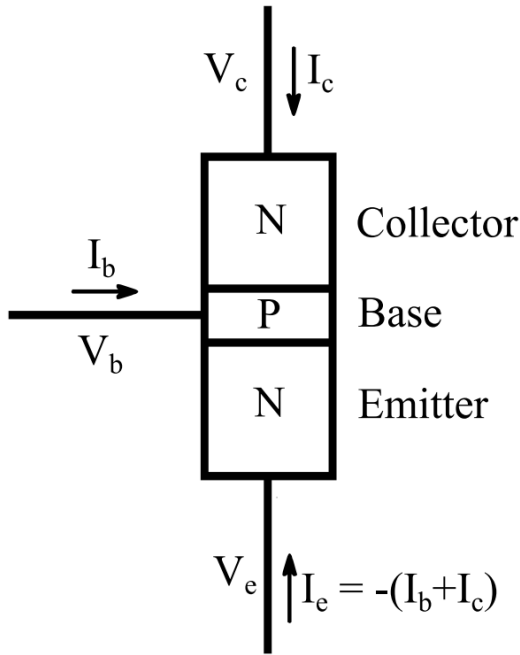


Figura 3: Esquema de un semiconductor npn . Obtenida de [1]

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.

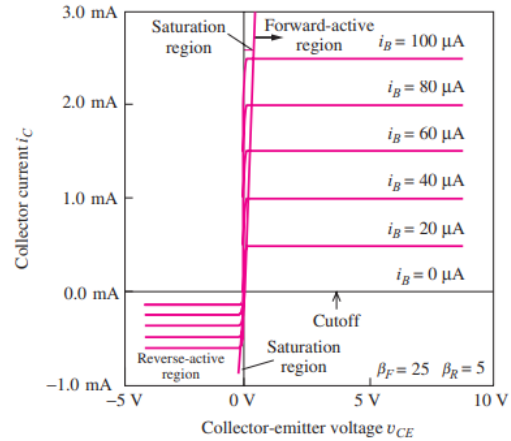


Figura 4: Curvas I_c vs V_{ce} para distintos valores de I_b . Obtenida de [2]

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.^[2]

- **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} (con tal que lo mantengamos dentro de la zona activa). Es decir, se cumple una relación del tipo $I_c = \beta I_b$, donde por lo general β es una constante que cambia para distintos transistores 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.

3. 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.

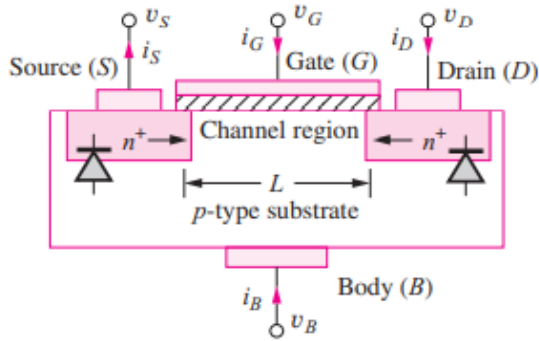


Figura 5: Esquema de MOSFET. Obtenido de [2]

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.^[2] 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} .

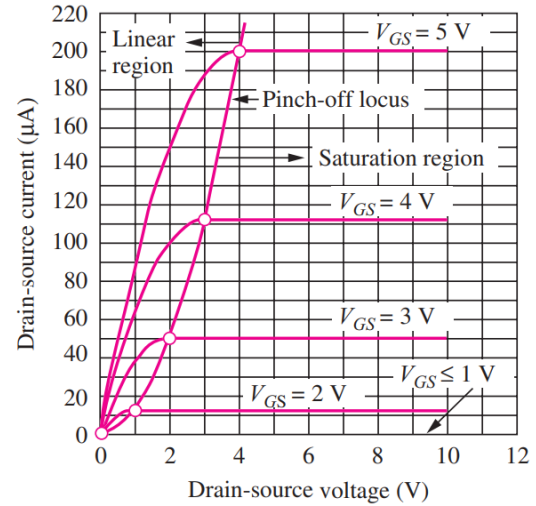


Figura 6: I_{ds} vs V_{ds} para distintos valores de V_{gs} . Obtenido de [2]

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

- **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.

Desarrollo

Obtención de las curvas características de los dispositivos semiconductores

En esta sección obtendremos las curvas características de cada uno de los dispositivos semiconductores que estamos estudiando (diodo, TBJ, MOSFET) haciendo una simulación en TINA-TI.

1. Diodo

Para obtener la curva característica del diodo primero se implementa en TINA-TI el circuito mostrado en la figura 7.

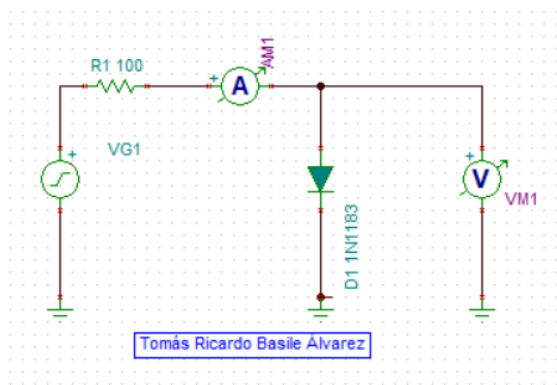


Figura 7: Circuito para el diodo

En la figura 7 la fuente de voltaje VG1 es de tipo triangular con una amplitud de 10V y frecuencia de 1Hz. El diodo utilizado es del modelo 1N1183 y es uno de los incluidos en el programa TINA-TI y la resistencia tiene un valor de 100Ω.

Se hizo una simulación transitoria del circuito desde un tiempo de 0s hasta 0.25s, con lo que se obtuvo información de la corriente y voltaje medidos como funciones del tiempo.

Al analizar sólo durante 0,25s, lo que hacemos es quedarnos solamente con un cuarto de la oscilación de la fuente de voltaje (recordando que tiene una frecuencia de 1Hz), por lo que durante este intervalo de tiempo, el voltaje crece linealmente desde 0V hasta el máximo de 15V. La corriente generada pasa primero por el diodo y el voltímetro en paralelo nos permite conocer la diferencia de potencial entre las terminales del diodo, mientras que el amperímetro en serie nos permite conocer la corriente que atraviesa el diodo. De esta forma obtenemos la corriente y el voltaje como funciones del tiempo.

Resultados:

Tras hacer la simulación transitoria del circuito de la figura 7, se obtienen las siguientes gráficas de corriente y de voltaje medidos como funciones del tiempo mostradas en la figura 8.

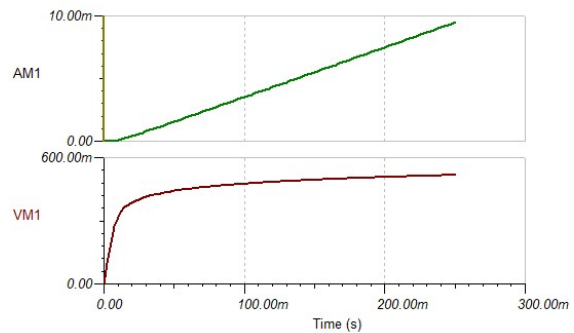


Figura 8: Corriente y voltaje como función del tiempo, diodo

Posteriormente, con estos datos se realizó una gráfica de la corriente como función del voltaje entre las terminales del diodo, es decir, la curva característica del diodo simulado. Se muestra la gráfica en la figura 9.

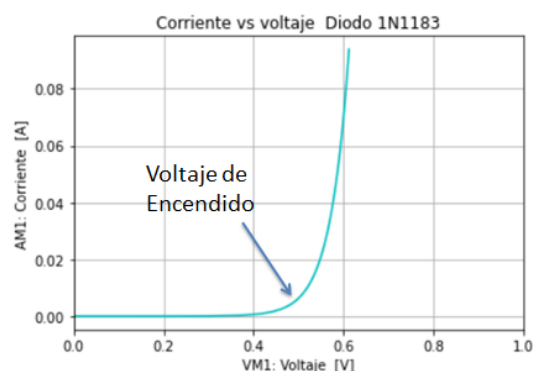


Figura 9: Corriente vs voltaje para el diodo simulado

Identificamos en la figura 9 que el voltaje de encendido es de aproximadamente 0,5V. Es decir, para voltajes menores a este valor, no pasa corriente por el diodo. Pero a partir de entonces la corriente pasa casi libremente, el voltaje se vuelve casi independiente de la corriente y permanece en un valor cercano a 0,6V.

Finalmente, realizamos el armado del circuito de la figura 7 usando Fritzing. El circuito en Fritzing se muestra en la figura 10, donde vemos que se tienen las mismas conexiones entre los dispositivos.

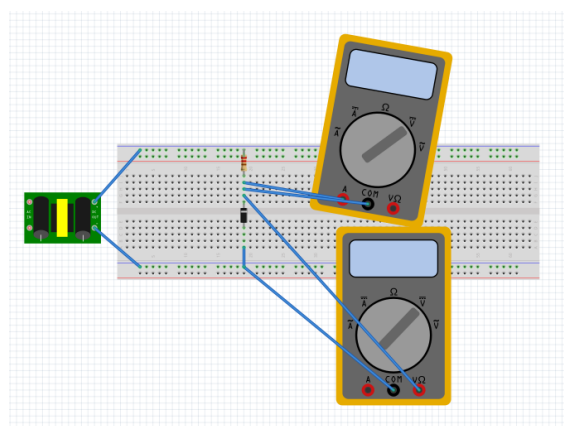


Figura 10: Circuito para el diodo en Fritzing

2. TBJ

Para obtener la curva característica del transistor TBJ se utiliza el circuito de la figura 11 implementado en TINA-TI

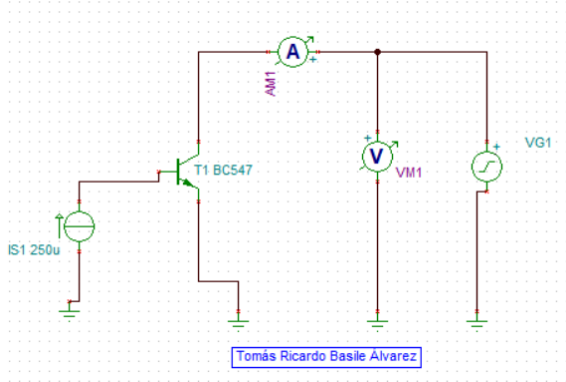


Figura 11: Circuito para el transistor TBJ

En la figura 11 la fuente de corriente $IS1$ es la corriente que entra por la base del transistor, la cual denotamos por I_b . Mientras que la fuente de voltaje $VG1$ (que es un voltaje de señal triangular con amplitud de 15V y frecuencia de 1Hz) crea la diferencia de potencial entre el colector y el emisor del transistor, que denotamos por V_{ce} .

Se hizo una simulación transitoria del circuito desde un tiempo de 0s hasta 0,25s. Con ello se obtuvo información de la corriente medida por el amperímetro (que está conectado al colector, por lo que es la corriente del colector I_c) y del voltaje medido por el voltímetro (que está conectado en paralelo entre el colector y el emisor, por lo que mide la diferencia de potencial V_{ce}).

Al igual que para el circuito del diodo, como la frecuencia del voltaje es de 1Hz y estamos midiendo durante sólo 0,25s, lo que hacemos es quedarnos con un cuarto de la oscilación de la fuente de voltaje. Es decir, en el intervalo en el que estamos midiendo, el voltaje crece linealmente desde 0V hasta el máximo de 15V. Y durante el tiempo en el que crece el voltaje, se mide la corriente I_c reportada por el amperímetro, para conseguir así una gráfica de I_c vs V_{ce} .

Este procedimiento se repite para distintos valores de la fuente de corriente (que como dijimos, es igual a la corriente que entra por la base I_b) para ver cómo cambia el comportamiento de la gráfica I_c vs V_{ce} para distintos valores de I_b .

El transistor utilizado es del tipo BC547B, del cual se puede encontrar las gráficas de I_c vs V_{ce} en [3]. Según dicha referencia en la que se mide el funcionamiento del transistor para distintos valores de la corriente de la base I_b , se obtienen los resultados de la figura 12.

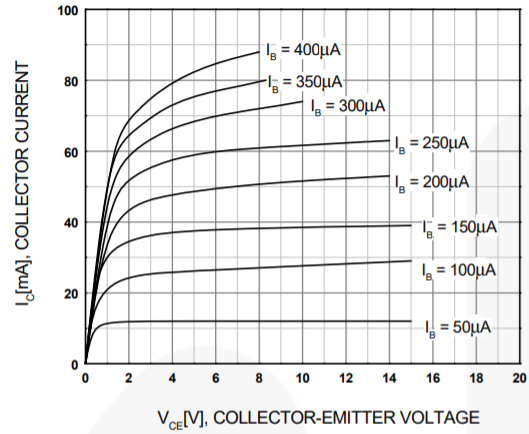


Figura 12: Curvas de I_c vs V_{ce} según las especificaciones del transistor. Obtenida de [3]

Por otro lado, se hace ahora la simulación del funcionamiento del transistor utilizando TINA-TI. Para cada valor de I_b controlado por la fuente de corriente (utilizando los mismos valores que en la especificación del transistor de la figura 12) se encuentra la relación I_c vs V_{ce} utilizando el amperímetro y el voltímetro como se mencionó antes. Para cada valor de I_b se encuentra primero la curva de la corriente y voltaje como funciones del tiempo, las cuales se encuentran en el apéndice. Finalmente, con estos datos se hacen las gráficas de corriente I_c vs voltaje V_{ce} y se muestran todas juntas en la figura 13.

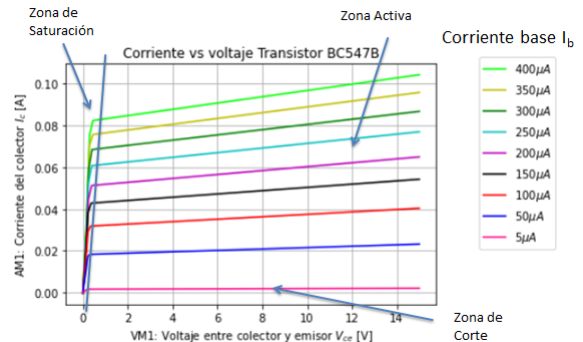


Figura 13: Curvas de I_c vs V_{ce} simuladas en Tina-TI

Vemos que el comportamiento de las curvas es en general bastante similar al de la figura 12. Sin embargo, no son exactamente iguales, notamos que en la zona activa las curvas dadas por Tina-TI tienen una pendiente considerable, mientras que en las especificaciones del transistor, las pendientes son prácticamente 0.

Además, identificamos en la figura 13 las distintas zonas de funcionamiento del transistor explicadas en el marco teórico. Observamos que para corrientes de la base muy pequeñas (como 5uA) la corriente del colector es prácticamente 0 sin importar el valor del voltaje, es decir, nos encontramos en la zona de corte. Vemos también que para voltajes V_{ce} pequeños la corriente del colector I_c se encuentra en un máximo y no depende de la corriente de la base I_b , es decir, nos

encontramos en la zona de saturación. Finalmente, para voltajes V_{ce} mayores, la corriente I_c es directamente proporcional a I_b , por lo que nos encontramos en la zona activa.

Finalmente, realizamos el armado del circuito de la figura 11 usando Fritzing. El circuito en Fritzing se muestra en la figura 14, donde vemos que se tienen las mismas conexiones entre los dispositivos.

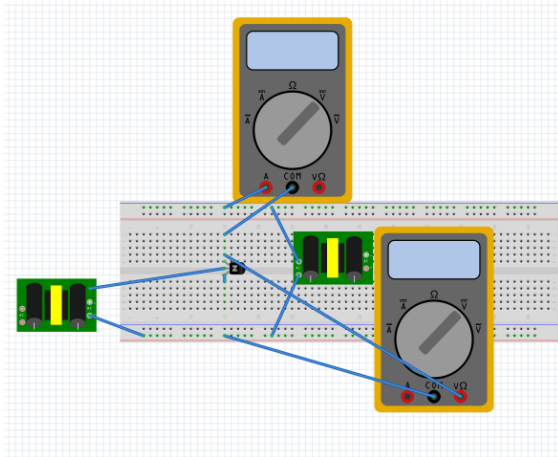


Figura 14: Circuito para el transistor TBJ en Fritzing

3. MOSFET

Para obtener las curvas características del MOSFET se utiliza el circuito de la figura 15 implementado en TINA-TI.

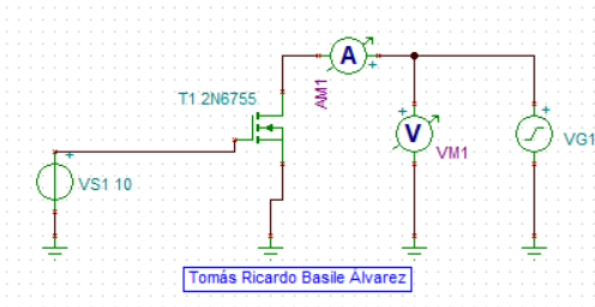


Figura 15: Circuito para el MOSFET en Tina-TI

Como se ve en la figura 15, se utiliza un MOSFET tipo 2N6755 que se encuentra entre los dispositivos incluidos en TINA-TI. Para suministrar la diferencia de potencial entre el drain y el source se utiliza la fuente de voltaje $VG1$, la cual es una señal triangular con amplitud de 15V y frecuencia de 1Hz. Este voltaje se mide utilizando el voltímetro $VM1$.

Por otro lado, el amperímetro $AM1$ mide la corriente que pasa por el drain y el source. Además, tenemos una fuente de voltaje $VS1$ que proporciona el voltaje

en el Gate del MOSFET.

Para la simulación se utilizan distintos valores del voltaje en el Gate (que está dado por $VS1$) y para cada uno se encuentra la corriente I_{ds} y el voltaje V_{ds} como funciones del tiempo. Para encontrar dicha curva, se realiza un análisis transitorio de 0,25s y se mide la corriente del amperímetro y el voltaje marcado por el voltímetro. Al igual que antes, hacer este análisis durante este tiempo nos permite medir en distintos valores de V_{ds} desde 0V hasta 15V. Las curvas de voltaje dado por el voltímetro $VM1$ (que es el voltaje que definimos como V_{ds}) y de la corriente $AM1$ (que es la corriente que definimos como I_{ds}) como funciones del tiempo se encuentran en el apéndice.

Hacemos estas simulaciones para distintos valores del voltaje en el Gate y para cada uno graficamos la curva I_{ds} vs V_{ds} . Los resultados se muestran en la figura 16.

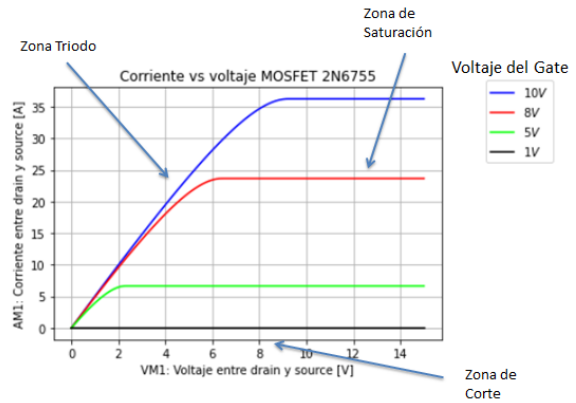


Figura 16: Curvas de I_{ds} vs V_{ds} simuladas en Tina-TI para distintos valores del voltaje en el gate

En la figura 16 observamos las distintas zonas de funcionamiento del MOSFET mencionadas en el marco teórico. Para valores de voltaje del gate bajos (en la figura se muestra la curva para $V_{gs} = 1V$) vemos que la corriente entre el drain y source es prácticamente 0A para todo voltaje V_{ds} , es decir, nos encontramos en la zona de corte.

Por otro lado, cuando el voltaje del Gate es mayor, observamos que para valores de V_{ds} bajos se sigue una relación lineal entre I_{ds} y V_{ds} . Esto corresponde a la zona de triodo, en la que el MOSFET actúa como una resistencia entre el drain y el source (pues se sigue una relación lineal entre I_{ds} y V_{ds}) cuyo valor particular depende del voltaje en el gate.

Finalmente, para valores de V_{ds} más altos, la corriente I_{ds} deja de aumentar linealmente y llega a un valor máximo que es ya independiente del voltaje V_{ds} . Esto corresponde a la zona de saturación y el valor de la corriente I_{ds} máxima depende del voltaje del gate.

Finalmente, realizamos el armado del circuito de la figura 15 usando Fritzing. El circuito en Fritzing se muestra en la figura 17, donde vemos que se tienen las mismas conexiones entre los dispositivos.

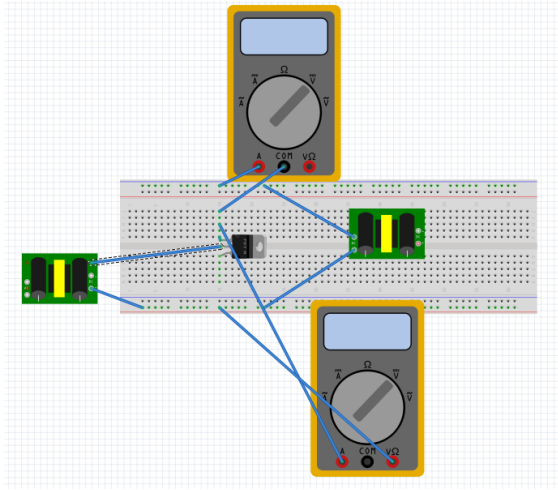


Figura 17: Circuito para el diodo en MOSFET

Conclusiones

Se realizaron exitosamente las simulaciones en TINA-TI para cada uno de los tres dispositivos semiconductores. Para cada uno de ellos se obtuvieron las curvas de I vs V y se encontraron las áreas de funcionamiento que describe la teoría.

En el diodo se encontró la gráfica de la figura 9, que se asemeja mucho a la gráfica que postula la teoría en la figura 2 y se logra distinguir claramente el valor del voltaje de encendido del diodo de TINA-TI.

Por otro lado, para el transistor TBJ se obtuvo la figura 13, la cual se asemeja en su comportamiento a la gráfica de la figura 12 que describe la especificación del fabricante del transistor y a la de la que postula la teoría en la figura 4. Además, se encontraron las zonas de funcionamiento del transistor y se observa el rol de la corriente I_b en la operación del transistor. Para valores cada vez más altos de la corriente I_b , el máximo de I_c en la zona activa se encuentra cada vez a mayor corriente. De esta forma se observa que la corriente I_c en esta zona es aproximadamente un múltiplo de la corriente I_b . Por tanto, estos transistores en la zona activa pueden utilizarse para tomar una señal en la corriente de la base I_b y amplificarla sin distorcionarla considerablemente para convertirla en la corriente I_c de mayor potencia.

Finalmente, para el MOSFET se obtuvo la gráfica de la figura 16, la cual describe la relación entre I_{ds} y V_{ds} para distintos valores del voltaje V_{gs} . Vemos que la gráfica obtenida se parece mucho a la propuesta teóricamente en la figura 6 y nos es posible distinguir claramente las distintas zonas de funcionamiento. Además, notamos el rol que juega V_{gs} en la operación del transistor. Para valores bajos de V_{gs} , el transistor actúa como un circuito abierto (no pasa corriente entre el drain y el source) pero para voltajes más altos de V_{gs} , el transistor se comporta primero como una resistencia entre el drain y el source cuyo valor particular depende de V_{gs} . Hasta que al aumentar mucho el voltaje entre el drain y el source, la corriente llega a un valor fijo y ya no depende del voltaje V_{ds} .

Con ello vemos como todos los dispositivos simulados en TINA-TI se comportaron de la manera que esperábamos según la teoría y notamos nuevamente la utilidad de usar TINA-TI para realizar simulaciones incluso cuando incluyen dispositivos semiconductores.

Bibliografía

1. Suits, Bryan H. Electronics for Physicists: An Introduction. Springer Nature, 2020.
2. Jaeger, Richard C., and Travis N. Blalock. Microelectronic circuit design. New York: McGraw-Hill, 2010.
3. Fairchild, BC546 / BC547 / BC548 / BC549 / BC550 NPN Epitaxial Silicon Transistor. Recuperado de <https://datasheetspdf.com/pdf-file/128382/FairchildSemiconductor/BC547/1>

Apéndice

Mostramos ahora las gráficas de V_{ce} y de I_c como funciones del tiempo para el circuito del transistor TBJ. Se tienen varias gráficas para los distintos valores de I_b utilizados en las simulaciones.

$$I_b = 5\mu A$$

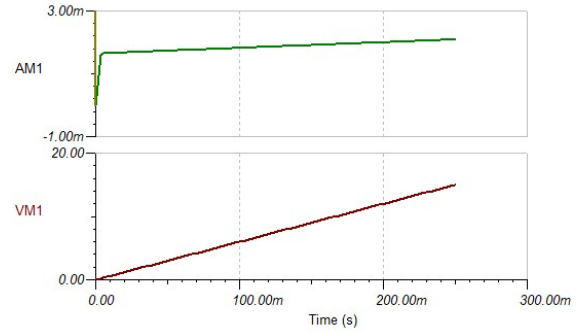


Figura 18: Curvas de V_{ce} , I_c en el transistor TBJ como funciones del tiempo para $I_b = 5\mu A$

$$I_b = 50\mu A$$

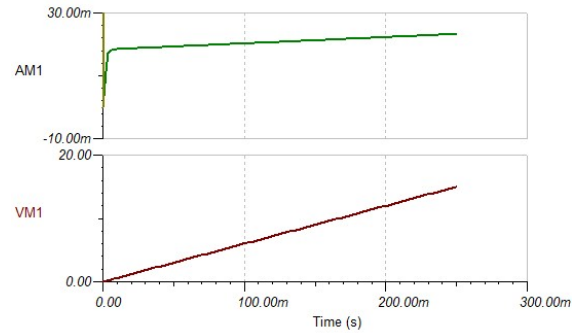


Figura 19: Curvas de V_{ce} , I_c en el transistor TBJ como funciones del tiempo para $I_b = 50\mu A$

$$I_b = 100\mu A$$

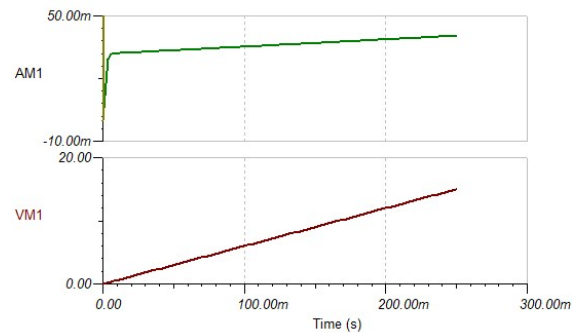


Figura 20: Curvas de V_{ce} , I_c en el transistor TBJ como funciones del tiempo para $I_b = 100\mu A$

$$I_b = 150\mu A$$

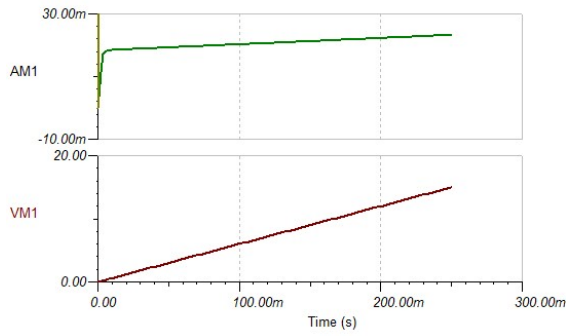


Figura 21: Curvas de V_{ce}, I_c en el transistor TBJ como funciones del tiempo para $I_b = 150\mu A$

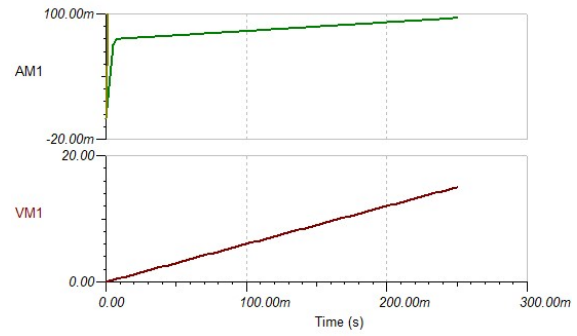


Figura 25: Curvas de V_{ce}, I_c en el transistor TBJ como funciones del tiempo para $I_b = 350\mu A$

$I_b = 200\mu A$

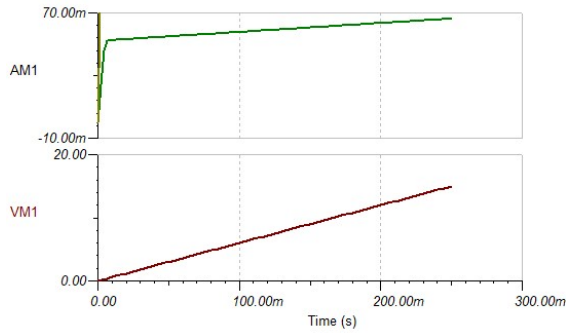


Figura 22: Curvas de V_{ce}, I_c en el transistor TBJ como funciones del tiempo para $I_b = 200\mu A$

$I_b = 400\mu A$

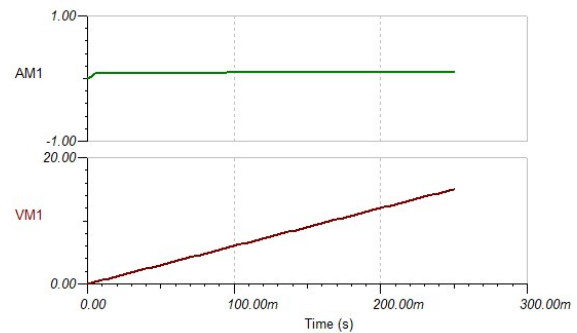


Figura 26: Curvas de V_{ce}, I_c en el transistor TBJ como funciones del tiempo para $I_b = 400\mu A$

$I_b = 250\mu A$

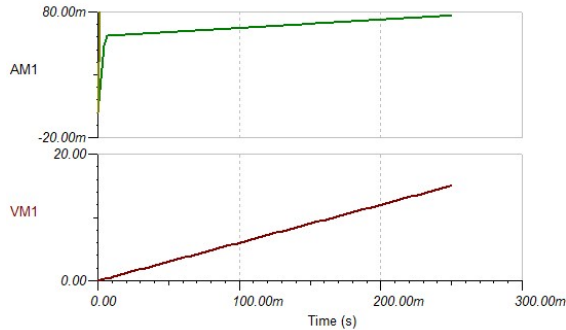


Figura 23: Curvas de V_{ce}, I_c en el transistor TBJ como funciones del tiempo para $I_b = 250\mu A$

$I_b = 300\mu A$

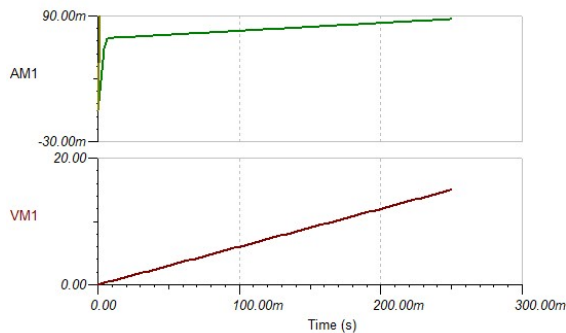


Figura 24: Curvas de V_{ce}, I_c en el transistor TBJ como funciones del tiempo para $I_b = 300\mu A$

$I_b = 350\mu A$

Ahora mostramos las gráficas de V_{ds} y de I_{ds} como funciones del tiempo para el MOSFET. Se tienen varias gráficas para distintos valores del voltaje del gate V_g

$V_g = 1V$

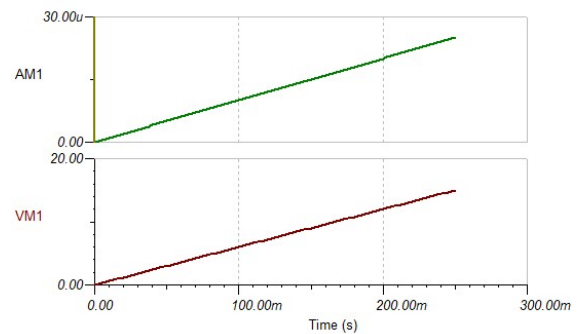


Figura 27: Curvas de V_{ds}, I_{ds} en el MOSFET como funciones del tiempo para $V_g = 1V$

$V_g = 5V$

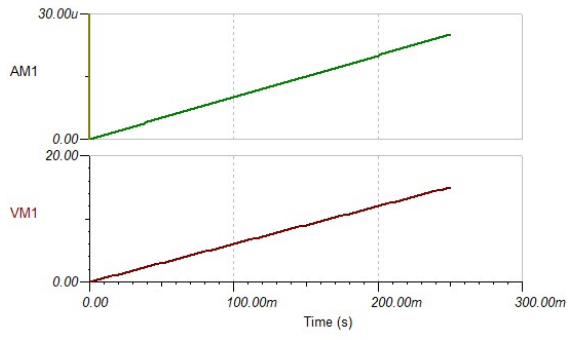


Figura 28: Curvas de V_{ds} , I_{ds} en el MOSFET como funciones del tiempo para $V_g = 5V$

$$V_g = 8V$$

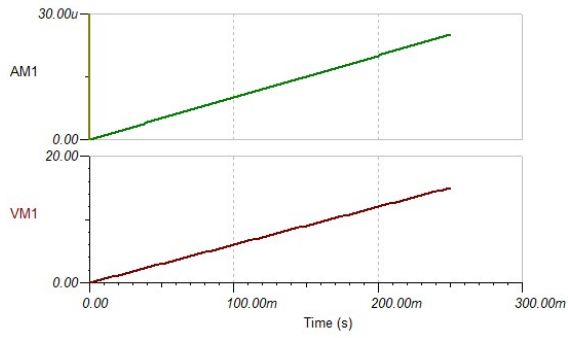


Figura 29: Curvas de V_{ds} , I_{ds} en el MOSFET como funciones del tiempo para $V_g = 8V$

$$V_g = 10V$$

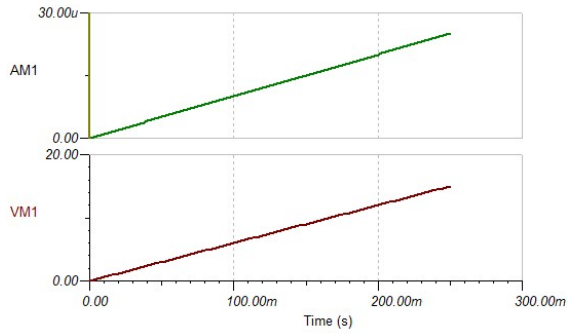


Figura 30: Curvas de V_{ds} , I_{ds} en el MOSFET como funciones del tiempo para $V_g = 10V$