

Apuntes Tel131 - Electrónica Digital

Marie González-Inostroza

Autor: Marie González-Inostroza

Institución: Universidad Técnica Federico Santa María

Fecha: agosto, 2023

Versión: 0.1.0

Índice general

Capítulo 1 Circuitos no lineales

1.1 Definiciones

1.1.1 Circuito lineal

Un circuito lineal posee una relación lineal entre la señal de entrada y la de salida, por lo que posee la propiedad de superposición. Esto significa que para dos señales de entrada, se cumple que la salida es la suma de las respuestas de cada una por separado. Por ejemplo, si la respuesta para A es Y y la respuesta para B es X, al aplicar ambas señales de entrada simultáneamente ($A + B$), la salida será igual a la suma de las respuestas individuales ($X + Y$).

Los componentes electrónicos lineales típicos con la resistencia, inductancia y capacitancia. Para estos, sus relaciones de voltaje-corriente son funciones lineales, como la ley de Ohm.

1.1.2 Circuito No-Lineal

Un circuito no lineal, por su parte, posee componentes que no siguen la propiedad de superposición. Esto significa que al aplicar dos señales de entrada simultáneamente, la salida no es simplemente la suma de las respuestas individuales. Ejemplos de componentes no lineales incluyen diodos y transistores. De hecho, la mayoría de los semiconductores se comportan de forma no lineal.

Para los circuitos no-lineales siguen siendo válidas las leyes de Kirchoff, pero no el principio de superposición. Por lo tanto, debemos utilizar algunas técnicas particulares para su análisis.

1.1.3 Semiconductores

Los semiconductores son materiales que pueden comportarse como conductores o aislantes, dependiendo de factores como la temperatura, el campo eléctrico, la presión y las características químicas del elemento. Los semiconductores más comunes son el Silicio (Si) y el Germanio (Ge).

Los semiconductores intrínsecos permiten que los electrones se muevan y generen un equilibrio dinámico de espacios vacíos que son ocupados. Además, se pueden dopar con impurezas para crear dos tipos de semiconductores:

1. Semiconductor tipo N: Se logra añadiendo átomos pentavalentes, lo que proporciona electrones adicionales y convierte al semiconductor en un conductor de electricidad.
2. Semiconductor tipo P: Se obtiene al añadir átomos trivalentes, creando huecos que actúan como portadores de carga y permiten la conductividad.

La unión de un semiconductor tipo N con uno tipo P crea un diodo.

1.1.3.1 Unión NP: Diodo

Cuando se unen semiconductores tipo N y tipo P, los electrones libres del semiconductor N se desplazan hacia los huecos del semiconductor P, generando enlaces covalentes. Esto resulta en una zona P con carga negativa y una zona N con carga positiva cerca de la unión, lo que crea un campo eléctrico que se opone al flujo de electrones.

La unión de los semiconductores N y P se conoce como diodo.

1.2 El diodo y su análisis

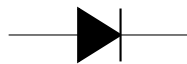
Un diodo es un componente semiconductor utilizado para controlar el flujo de corriente eléctrica. Generalmente consta de dos terminales etiquetados como ánodo y cátodo, siendo el cátodo el marcado.

Estructuralmente, un diodo se compone de dos regiones químicas llamadas "PN," que suelen ser dopadas con elementos como silicio o germanio. La región P (ánodo) contiene una cantidad reducida de electrones, mientras que la región N (cátodo) posee un exceso de electrones. Para que el diodo conduzca corriente, es necesario aplicar una tensión que supere su umbral de polarización y esté conectado en el circuito. El diodo opera en dos modos: polarización directa, que permite el flujo de corriente, y polarización inversa, que lo impide.

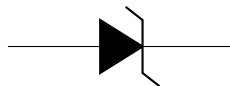
Existen diversos tipos de diodos, como los rectificadores, Zener, Schottky, así como otros como detectores de baja señal, varactores, emisores de luz, láseres, estabilizadores, diodos túnel, diodos PIN, diodos backward, fotodiodos, entre otros. Cada tipo de diodo tiene aplicaciones específicas en electrónica y circuitos.

1.2.1 Figuras electrónicas:

1. Diodo Rectificador.



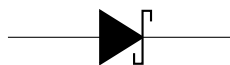
2. Diodo Zener.



3. Diodo Túnel o Esaki.



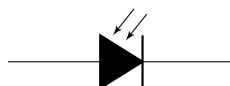
4. Diodo Schottky.



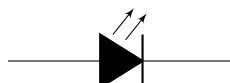
5. Diodo Varicap.



6. Foto Diodo.



7. Diodo Led.



1.3 Métodos de análisis de circuitos no lineales

1.3.1 Método Analítico aplicado al diodo

Comentario

El método analítico consiste en el análisis directamente algebraico utilizando las ecuaciones de los componentes.

Teniendo en cuenta la premisa del circuito básico con un diodo rectificador el cuál es el siguiente:

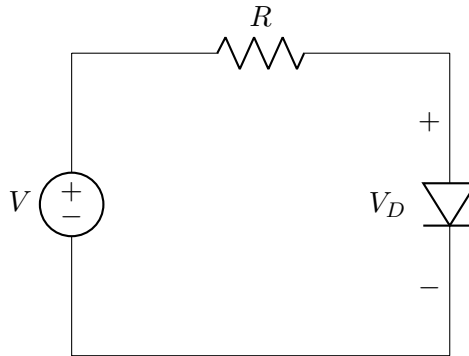


Figura 1.1: Diodo en serie con una resistencia

Para el uso de éste método, utilizaremos la siguiente ecuación, que relaciona I_d con V_d :

$$I_D = I_O \cdot (e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1) \quad (1.1)$$

Para este caso, la corriente que pasa por la resistencia es la misma que pasa por el diodo, por lo tanto se cumple que:

$$I_D = \frac{V - V_D}{R} \quad (1.2)$$

Reemplazando en (1):

$$\frac{V - V_D}{R} = I_O \cdot (e^{\frac{V_D}{V_t}} - 1) \quad (1.3)$$

Despejando, obtendremos:

$$V_D = I_O \cdot R + V_{in} - V_t \cdot \ln\left(\frac{e^{\frac{I_O \cdot R + V}{V_t}} \cdot I_O \cdot R}{V_t}\right) \quad (1.4)$$

1.3.2 Método gráfico aplicado a diodo

Comentario

El objetivo de este método es graficar las corrientes de las componentes con respecto al voltaje del diodo, obteniendo así el voltaje del diodo y la corriente del circuito.

Ahora, consideraremos las ecuaciones para el diodo y la resistencia del caso anterior:

$$i_D = I_s(e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1)$$

$$i_R = \frac{V_R}{R}$$

Donde $V_T = 0,25mV$ a temperatura ambiente $T = 290K$ y $I_s = 10^{-16}$ el cual es una corriente para diodos de circuitos integrados.

Esta última se puede reescribir de la siguiente forma: Con

$$V_R = V_s - V_d$$

Por lo que:

$$i_R = \frac{V_s - V_d}{R} = \frac{V_s}{R} - \frac{V_d}{R}$$

Para poder graficar, utilizaremos $V_s = 5V$ y $R = 1k\Omega$.

Utilizando estos valores tenemos:

$$i_R = \frac{5}{1000} - \frac{V_d}{1000}$$

Graficando las corrientes:

La recta verde es la corriente del diodo y la roja la de la resistencia.

Ahora para encontrar los valores de corriente y voltaje solo tenemos que ver la intersección de las 2 rectas.

Por lo que mirando el gráfico y su intersección tenemos que el V_d es de 1,15V y la corriente en el circuito es de 4mA.

Este método es rápido y fácil de aplicar ya que solo hay que graficar las rectas de los componentes y obtener su intersección, por otra parte también puede ser impreciso ya que el análisis de esta intersección puede tener errores por parte de la persona que lo observa.

1.3.3 Método de circuitos equivalentes aplicado a diodo

Comentario

Este método consiste en identificar los posibles circuitos equivalentes y evaluar cuál no entra en contradicción. Los pasos del método son:

1. Reemplazar por posibles circuitos equivalentes
2. Analizar cada circuito equivalente
3. Descartar contradicciones
4. La respuesta correcta es el circuito que no tiene contradicciones

Para aplicar el método debemos definir qué modelo del diodo usaremos:

1. Modelo CircuitoAbierto-CortoCircuito: En caso de no conducir, el diodo se comporta como circuito abierto y en caso de conducir tendremos un circuito cerrado ideal. El primer caso ocurre si el voltaje del diodo es menor al de conducción. A este modelo también le llamaremos modelo ideal.
2. Modelo CircuitoAbierto-FuenteVoltaje: En caso de no conducir, el diodo se comporta como circuito abierto y en caso de conducir tendremos una fuente de voltaje. El primer caso ocurre si el voltaje del diodo es menor al de conducción. Este modelo nos permite simbolizar que existe una caída de voltaje en el diodo.

1.3.3.1 Análisis de diodo con modelo ideal

1. Reemplazaremos el diodo con los dos posibles estados para este modelo y realizamos el análisis de circuitos para cada caso.

- **Diodo OFF** En este caso, el diodo se reemplaza por un circuito abierto, como muestra la figura ??.
- Entonces, para la resistencia tendremos

$$V_R = 0$$

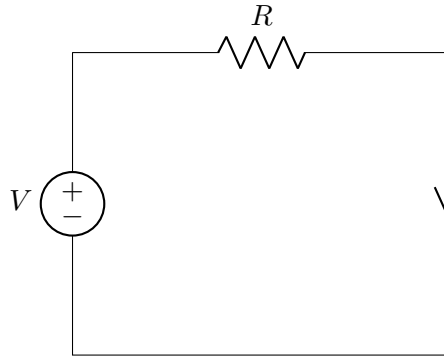
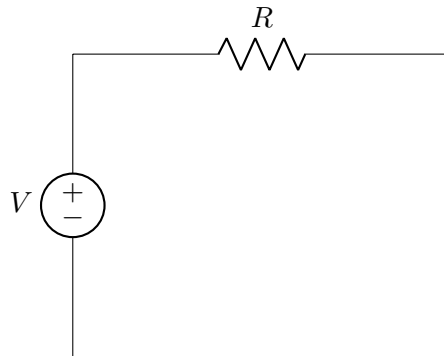
$$I_R = 0$$

Y para el diodo:

$$V_D = V$$

$$I_D = 0$$

- **Diodo ON** En este caso se reemplaza el diodo por un cable, como muestra la figura ??. Entonces,

**Figura 1.2:** Caso 2: Diodo en estado Off**Figura 1.3:** Caso 1: Diodo en estado ON con modelo ideal

para la resistencia tendremos

$$V_R = V$$

$$I_R = V/R$$

Y para el diodo:

$$V_D = 0$$

$$I_D = V/R$$

2. Luego, analizamos las contradicciones. Por como se comporta el diodo, sabemos que se espera que para valores de voltaje mayores al voltaje de conducción V_f , la corriente sea alta. Luego, consideramos esto para el análisis.

- Si $V < V_f$

Sabemos que, para voltajes bajos, el diodo no conduce. Por lo tanto, se descarta la opción de que la corriente sea $I_D = V/R$ (Diodo ON).

- Si $V > V_f$

Sabemos que, para voltajes altos, el diodo conduce. Por lo tanto, se descarta la opción de que la corriente sea $I_D = 0$ (Diodo OFF).

3. Finalmente, notamos que sólo un modelo es posible para cada caso analizado, por lo que

- Si $V < V_f$

El diodo no conduce (Diodo OFF). Con esto $ID = 0$.

- Si $V > V_f$

El diodo conduce (Diodo ON). Con esto $ID = V/R$.

1.3.3.2 Análisis de diodo con fuente

1. Siguiendo con el ejemplo trabajado anteriormente, reemplazaremos el diodo con los dos posibles estados para este modelo.

- **Diodo OFF** Se conserva el análisis anterior. Por lo tanto, para la resistencia tendremos

$$V_R = V$$

$$I_R = V/R$$

Y para el diodo:

$$V_D = 0$$

$$I_D = V/R$$

- **Diodo ON** En este caso se reemplaza por una fuente del voltaje de conducción (forward), como se

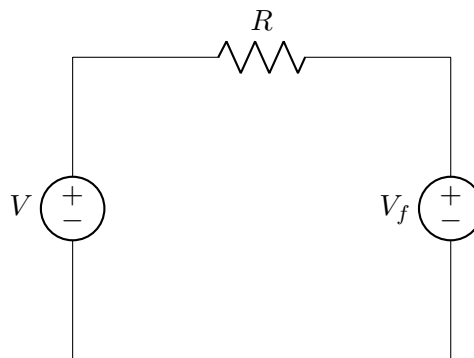


Figura 1.4: Caso 1: Diodo en estado ON

observa en la figura ???. En este caso, usaremos 0,7 [V]:

Luego, tendremos que para la resistencia:

$$V_R = V - V_f$$

$$I_R = (V - V_f)/R$$

Y para el diodo

$$V_D = V_f$$

$$I_D = (V - V_f)/R$$

2. Luego, analizamos las contradicciones. Por como se comporta el diodo, sabemos que se espera que para valores de voltaje mayores al voltaje de conducción V_f , la corriente sea alta. Luego, consideramos esto para el análisis.

- Si $V < V_f$

Sabemos que, para voltajes menores a V_f , el diodo no conduce. Por lo tanto, se descarta la opción de que la corriente sea $I_D = (V - V_f)/R$ (Diodo ON).

- Si $V > V_f$

Sabemos que, para voltajes mayores a V_f , el diodo conduce. Por lo tanto, se descarta la opción de

que la corriente sea $I_D = 0$ (Diodo OFF).

3. Finalmente, notamos que sólo un modelo es posible para cada caso analizado, por lo que

- Si $V < V_f$

El diodo no conduce (Diodo OFF). Con esto $ID = 0$.

- Si $V > V_f$

El diodo conduce (Diodo ON). Con esto $I_D = (V - V_f)/R$.

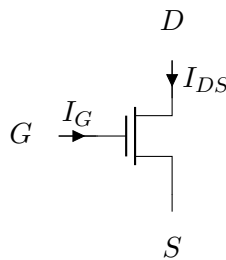
1.4 Transistores

Comentario

Los transistores son dispositivos electrónicos que controlan y amplifican el flujo de corriente eléctrica en un circuito

1.4.1 El MOSFET

Los transistores de tipo MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) son semiconductores con tres terminales que utilizan un campo eléctrico (voltaje) para controlar el flujo de corriente entre su fuente y drenaje.



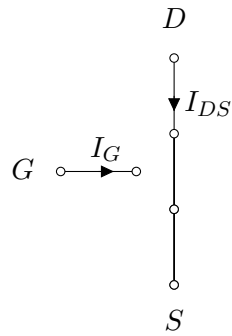
La primera terminal se llama G en referencia a "Gate"(puerta). En ella, se aplica un voltaje que modifica el estado del transistor. La segunda terminal es la de entrada, identificada como D en relación a "Drain"(drenaje), mientras que la tercera terminal se conoce como terminal de salida, marcada como S en relación a "Source"(fuente).

Cuando el MOSFET está en estado ON, facilita la conexión entre las terminales D y S , permitiendo así el flujo de corriente desde D a S .

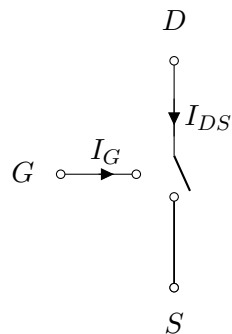
1.4.1.1 Modelos tipo Switch (S)

En este modelo del MOSFET, se realizan circuitos equivalentes entendiendo el transistor como switch ideal. Cuando el MOSFET conduce, no se considera una caída de voltaje que se produce entre D y S .

Si la entrada supera el voltaje *threshold* V_T (que es el voltaje necesario para cambiar de estado), el transistor queda en ON, por lo que se puede simbolizar como un switch cerrado, donde $V_{DS} = 0$

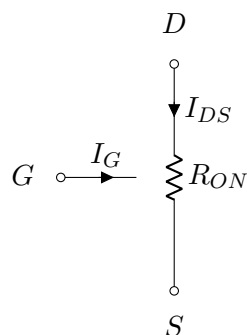


Si el voltaje es menor a V_T , este permanece en OFF, por lo que se simboliza como un switch abierto, donde $I_{DS} = 0$

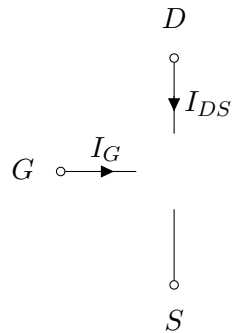


1.4.1.2 Modelos tipo Switch-Resistencia (SR)

Es un modelo más fiel al comportamiento del MOSFET, en el que hay una caída de tensión provocada por el transistor. Si el MOSFET está en ON, en vez de representarse como un switch, este se va a simbolizar como una resistencia R_{ON} .



Si el MOSFET se encuentra en estado OFF, al igual que en el modelo anterior, este se representa como un circuito abierto, donde $I_{DS} = 0$.



1.4.2 BJT: Transistor de unión bipolar

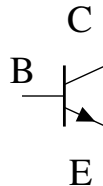


Figura 1.5: Transistor BJT npn

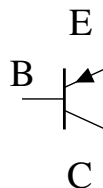


Figura 1.6: Transistor BJT pnp

Los BJT (del inglés Bipolar-junction transistor) son semiconductores que cuentan con 3 zonas que constituyen dos uniones de tipo np. Tienen tres terminales: B (base/base), E(emisor/emitter) y C (colector/collector).

El transistor BJT puede ser entendido como la unión de dos diodos, por lo que debemos analizar qué debe cumplirse para saber en qué estado está la conducción de cada parte de este.

Existen dos tipos principales de estos transistores: npn y pnp. Estos se simbolizan según las figuras ?? y ??, donde la flecha indica el flujo de la corriente. Notamos que, en el caso del transistor npn, la corriente fluye desde C a E y en el pnp desde E a C.

Los transistores BJT tienen 3 zonas de operación principales:

1. Corte (cut-off): No pasa corriente por el transistor. Actúa como interruptor abierto.
2. Saturación: Pasa corriente por el transistor. Actúa como interruptor cerrado.
3. Activa: La corriente que pasa por el colector es constante y depende de la corriente en la base. Por tanto, actúa como fuente de corriente.

Para transistores de tipo NPN, tendremos que para cada zona:

Zona de operación	Condición	Característica
Corte (switch abierto)	$V_{BE} < V_{BE_{sat}} \sim 0,6V$	$I_B = I_C = I_E = 0$
Saturación (switch cerrado)	$V_{BE} > V_{BE_{sat}} \sim 0,6V$ $V_{CB} < -0,4V$ $I_B > \frac{I_C}{\beta} \sim \frac{I_{C_{sat}}}{10}$	$I_C = I_{C_{sat}}$ $V_{CE} < V_{CE_{sat}}$
Activa (fuente de corriente)	$V_{BE} > V_{BE_{sat}} \sim 0,6V$ $V_{CB} > -0,4V$	$I_C = constante$

Los transistores tipo PNP tienen las mismas características, pero invierten los valores de las condiciones, es decir:

Zona de operación	Condición	Característica
Corte (switch abierto)	$V_{BE} > V_{BE_{sat}} \sim -0,6V$	$I_B = I_C = I_E = 0$
Saturación (switch cerrado)	$V_{BE} < V_{BE_{sat}} \sim -0,6V$ $V_{CB} > 0,4V$ $I_B > \frac{I_C}{\beta} \sim \frac{I_{C_{sat}}}{10}$	$I_C = I_{C_{sat}}$ $V_{CE} > V_{CE_{sat}}$
Activa (fuente de corriente)	$V_{BE} < V_{BE_{sat}} \sim -0,6V$ $V_{CB} < 0,4V$	$I_C = constante$

1.4.2.1 Análisis de BJT como switch

Para lograr el funcionamiento de switch de un BJT, debemos usar el modo de operación de corte para el modo OFF y el modo de saturación para el modo ON en el circuito de la figura ???. Notamos que si $V_{IN} = 0V$, el circuito está en corte ya que $V_{BE} = 0$. El caso en que conduce (switch en ON) utilizaremos la zona de operación de saturación, en que el voltaje V_{CE} es muy bajo, por lo que se comportará parecido a un switch cerrado. Sin embargo, debemos asegurarnos de estar trabajando en saturación y no en la zona activa.

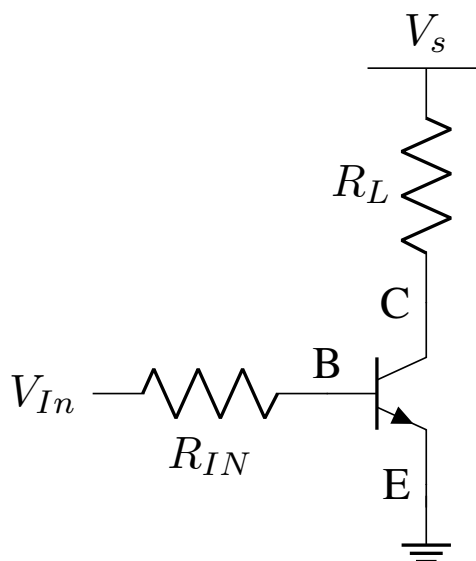


Figura 1.7: Circuito switch con transistor BJT npn

Para establecer si el transistor se encuentra en saturación, debemos realizar los siguientes pasos:

1. Asumir que se cumple el estado de saturación. Por lo tanto, se cumplen todas las condiciones y características relativas al transistor en análisis.
2. Establecer la corriente de saturación $I_{C_{sat}}$ a la que deseamos trabajar.
3. Calcular las corrientes y voltajes del BJT. Si no hay contradicción, estamos en saturación.

Ejemplo 1.1 Determinar si BJT está en zona de saturación

Consideraremos el circuito de la figura ??, con $R_L = 22\Omega$, $R_{IN} = 50\Omega$, $V_{In} = 5V$, $V_S = 12V$. Realizaremos cada uno de los pasos señalados anteriormente con el transistor 2N222A:

1. Asumir que se cumple el estado de saturación

Entonces, todas las condiciones y características de saturación son ciertas.

2. Establecer la corriente de saturación $I_{C_{sat}}$ a la que deseamos trabajar.

En este caso, usaremos 0.5A.

Para la corriente de operación definida, encontramos que el máximo valor en saturación $V_{CE_{sat}}$ se encuentra en el datasheet del transistor y es 1.6V. Por lo tanto, $V_{CE} < V_{CE_{sat}} = 1.6V$

3. Calcular las corrientes y voltajes.

Podemos establecer qué ocurre analizando cada parte del BJT

- Para el emisor, notamos que $V_E = 0V$. Por lo tanto, tendremos que las condiciones de V_{BE} y V_{CE} quedan como:

- $V_B > 0.6V$

- $V_C = 1.6V$

- Para el colector, se definió la corriente $I_{C_{sat}} = 0.5A$. Además, notamos que esta corriente es la misma que pasa por R_L , con lo que se debe cumplir que

$$i_{R_L} = \frac{V_{R_L}}{R_L} = \frac{V_S - V_C}{R_L} = \frac{12V - V_C}{10\Omega} \quad (1.5)$$

Igualemos a 0.5A y obtenemos que $V_C = 1V$. Por lo tanto, se cumple la característica respecto al voltaje de saturación.

- Para la base, tendremos que la corriente está dada por la corriente de R_{IN} , que cumple con:

$$i_B = i_{R_{IN}} = \frac{V_{in} - V_B}{R_{IN}} = \frac{3.3V - V_B}{1k\Omega}$$

Además, como estamos en saturación, la corriente i_B debe ser mayor a $I_{C_{sat}}/10 = 0.5A/10 = 50mA$. Por lo tanto,

$$i_B = \frac{5V - V_B}{50\Omega} > 50mA$$

Podemos asumir que el transistor se encuentra justo en ese punto de operación, con lo que obtenemos que $V_B = 2.5V$. Con esto, cumplimos la condición de $V_{BE} > 0.6V$.

Finalmente, sólo nos falta comprobar $V_{CB} < -0.4V$. Reemplazamos y obtenemos: $1V - 2.5V = -1.5V < -0.4V$. Por lo que no se encuentra ninguna contradicción y concluimos que estamos en región de saturación.

