

Notas del curso de Electrónica Analógica 4 Semestre

Manuel Moisés Miranda Velasco ¹, Miguel Enrique Martinez Rosas¹, and
Carlos G[Pleaseinsert “PrerenderUnicode–”intopreamble]mez Agis¹

¹Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño , Universidad Autónoma de
Baja California

9 de Enero de 2017

Índice

1. Introducción	5
1.1. ¿Qué es un ingeniero?	5
1.2. ¿Qué es la ingeniería?	6
1.3. ¿Qué es la electrónica?	6
1.4. ¿Cuál es la diferencia entre electricidad y electrónica?	6
1.4.1. Ejemplo	7
2. La valvula termoionica	8
3. Semiconductor	9
3.1. Banda de Valencia	10
3.2. Semiconductores intrínsecos	10
3.3. Semiconductores extrínsecos	12
3.3.1. Semiconductor tipo N	12
3.3.2. Semiconductor tipo P	13
4. Diodo	14
4.1. Definición	14
4.2. Historia	14
4.2.1. Diodo de Vacío	14
4.2.2. Representación eléctrica del diodo de vacio	15
4.2.3. Evolución.	16
4.3. Diodo Semiconductor.	16
4.3.1. Estructura Básica.	16
4.3.2. Funcionamiento.	17
4.3.3. Curva característica.	19
4.3.4. Modelo Matemático	20
5. Tipo de Diodos	22
6. Curvas Caracteristicas	24
7. Circuito con un diodo	25
7.1. Estimación	26
7.1.1. Ejemplo 1	26
7.2. Aproximación por una constante de V_d	27
8. Analisis de DC	28
8.1. Polarización directa	28
8.2. Polarización inversa	29
8.3. Circuitos con multiples diodos	29
8.4. Circuito Rectificador de Onda Completa	29
8.4.1. Ciclo positivo	30
8.4.2. Ciclo negativo	30

9. Fuente de voltaje de CD con diodos	30
9.1. Transformador	30
9.2. Fuente de Voltaje de CD	32
10.Circuito Modulador de AM	35
11.Transistor de Unión Bipolar (BJT)	35
11.1. Introducción	35
11.2. Triodo	36
11.3. Estructura básica.	37
11.4. Funcionamiento	38
11.5. Curvas Caracteristicas	39
11.5.1. Región activa en cuanto a la polaridad	41
11.5.2. Región inversa	41
11.5.3. Región de corte	41
11.5.4. Región de saturación	41
11.6. Configuraciones Básicas	42
11.6.1. Base Común	42
12.Circuito con un Transistor BJT	44
12.1. Analisis de DC	45

Índice de figuras

1.	Circuito Divisor de Voltaje	7
2.	Diodo de Vacío	8
3.	Curva de un diodo de vacío	9
4.	una image	10
5.	Bandas de energía en el extremo del átomo	10
6.	Curva de conducción de un semiconductor intrínseco	12
7.	Estructura de un semiconductor tipo “n”	13
8.	Estructura de un semiconductor tipo “p”	14
9.	Diodo de Vacío	14
10.	Curva de un diodo de vacío	15
11.	Cirucito equivalente de un diodo	15
12.	Estructura básica del diodo	16
13.	Polarización Directa de un Diodo	17
14.	Polarización Inversa de un Diodo	18
15.	Curva característica de un diodo de silicio	20
16.	Circuito básico del Diodo	24
17.	Circuito con un diodo polarizado en directa	28
18.	Circuito con un diodo polarizado en inversa	29
19.	Diodo en antiparalelo	29
20.	Rectificador de Onda Completa	30
21.	Rectificador de Onda Completa Ciclo Positivo	30
22.	Rectificador de Onda Completa Ciclo Negativo	30
23.	Transformador	31
24.	Fuente de DC simple	32
25.	Fuente de DC simple	33
26.	Salida Filtro	34
27.	Modulador AM con un diodo	36
28.	Triodo	36
29.	Estructura Básica del BJT	37
30.	Modelo con diodos	38
31.	Polarización del BJT	39
32.	Curva de Base-Emisor	40
33.	Curva de Colector-Emisor	40
34.	Polarización Directa	42
35.	Polarización Inversa	42
36.	Base Común	43
37.	Curva de Entrada	43
38.	Curva de salida	43
39.	Diodo de Vacío	44
40.	Circuito transistor	45
41.	Lazos de corriente	45
42.	Recta de carga	47

43.	Recta de carga y el punto de operacion	47
44.	Evolucion en tiempo de i_c y v_{ce}	47
45.	Recta de Carga	48
46.	Comportamineto de AC y la recta de carga	48
47.	Circuito equivalente de thevenin	49
48.	Circuito equivalente de thevenin	49
49.	Ciruito Amplificador con Un BJT	50

1. Introducción

El primer punto que se debe tratar antes de entrar en la materia, es la definición misma de ingeniero en electrónica.

1.1. ¿Qué es un ingeniero?

- Real Academia de la Lengua Española
 - Persona que profesa la ingeniería o alguna de sus ramas
 - Hombre que discurre con ingenio las trazas y modos de conseguir o ejecutar algo.

- Wikipedia
 - Su función principal es la de realizar diseños o desarrollar soluciones tecnológicas a necesidades sociales, industriales o económicas. Para ello el ingeniero debe identificar y comprender los obstáculos más importantes para poder realizar un buen diseño. Algunos de los obstáculos son los recursos disponibles, las limitaciones físicas o técnicas, la flexibilidad para futuras modificaciones y adiciones y otros factores como el coste, la posibilidad de llevarlo a cabo, las prestaciones y las consideraciones estéticas y comerciales. Mediante la comprensión de los obstáculos, los ingenieros deducen cuáles son las mejores soluciones para afrontar las limitaciones encontradas cuando se tiene que producir y utilizar un objeto o sistema.
 - An engineer is a professional practitioner of engineering, concerned with applying scientific knowledge, mathematics and ingenuity to develop solutions for technical problems. Engineers design materials, structures and systems while considering the limitations imposed by practicality, safety and cost.[1][2] The word engineer is derived from the Latin roots *ingeniare* (“to contrive, devise”) and *ingenium* (“cleverness”).[3][4] Engineers are grounded in applied sciences, and their work in research and development is distinct from the basic research focus of scientists.[2] The work of engineers forms the link between scientific discoveries and their subsequent applications to human needs.[1]

1.2. ¿Qué es la ingeniería?

- Real Academia de la Lengua Española

1. f. Estudio y aplicación, por especialistas, de las diversas ramas de la tecnología.
2. f. Actividad profesional del ingeniero.

- Wikipedia

La ingeniería es el conjunto de conocimientos y técnicas científicas aplicadas a la creación, perfeccionamiento e implementación de estructuras (tanto físicas como teóricas) para la resolución de problemas que afectan la actividad cotidiana de la sociedad. Aunque se considera una disciplina muy antigua, actualmente se obtiene en las universidades del mundo en su nivel básico de Diplomado, así como Licenciatura, llegando a especialidades; extendiéndose a niveles superiores como Posgrado, Maestrías y Doctorado.

Para ella, el estudio, conocimiento, manejo y dominio de las matemáticas, la física y otras ciencias es aplicado profesionalmente tanto para el desarrollo de tecnologías, como para el manejo eficiente de recursos y fuerzas de la naturaleza en beneficio de la sociedad. La ingeniería es la actividad de transformar el conocimiento en algo práctico.

1.3. ¿Qué es la electrónica?

La electrónica es la rama de la física y especialización de la ingeniería, que estudia y emplea sistemas cuyo funcionamiento se basa en la conducción y el control del flujo microscópico de los electrones u otras partículas cargadas eléctricamente.

Utiliza una gran variedad de conocimientos, materiales y dispositivos, desde los semiconductores hasta las válvulas termoiónicas. El diseño y la gran construcción de circuitos electrónicos para resolver problemas prácticos forma parte de la electrónica y de los campos de la ingeniería electrónica, electromecánica y la informática en el diseño de software para su control. El estudio de nuevos dispositivos semiconductores y su tecnología se suele considerar una rama de la física, más concretamente en la rama de ingeniería de materiales.

1.4. ¿Cuál es la diferencia entre electricidad y electrónica?

La ingeniería eléctrica es el campo de la ingeniería que se ocupa del estudio y la aplicación de la electricidad, la electrónica y el electromagnetismo. Aplica conocimientos de ciencias como la física y las matemáticas para diseñar sistemas y equipos que permiten generar, transportar, distribuir y utilizar la energía eléctrica.

Dicha área de la ingeniería es reconocida como carrera profesional en todo el mundo y constituye una de las áreas fundamentales de la ingeniería desde el siglo XIX con la comercialización del telégrafo eléctrico y la generación industrial de energía eléctrica. Dada su evolución en el tiempo, este campo ahora, abarca una serie de disciplinas que incluyen la electrotecnia, la electrónica, los sistemas de control, el procesamiento de señales y las telecomunicaciones.

Dependiendo del *lugar y del contexto* en que se use, el término ingeniería eléctrica puede o no abarcar a la ingeniería electrónica, la que surge como una subdivisión de la misma y ha tenido una importante evolución desde la invención del tubo o Válvula termoiónica y la radio. Cuando se hace esta distinción, generalmente se considera a la ingeniería eléctrica como aquella rama que aborda los problemas asociados a sistemas eléctricos de gran escala o potencia, como los sistemas eléctricos de transmisión de energía y de control de motores, etc. mientras que la ingeniería electrónica se considera abarca sistemas de baja potencia, denominados también corrientes débiles, sistemas de telecomunicaciones, control y procesamiento de señales constituidos por semiconductores y circuitos integrados(Wikipedia).

En México, la ingeniería eléctrica se especializa alderredor de la energía eléctrica en las siguientes tareas:

- Generación.
- Transporte.
- Distribución.
- Conversión o Adecuación.

1.4.1. Ejemplo

Un ejemplo simple, se puede ver con el siguiente circuito:

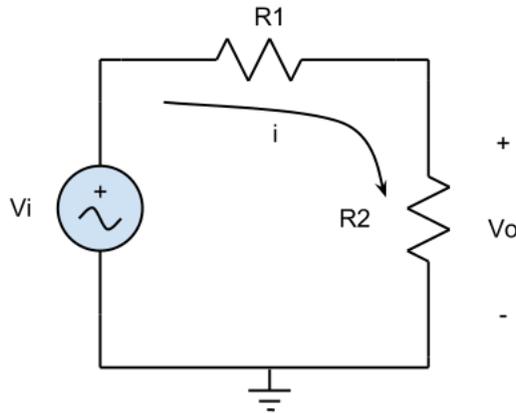


Figura 1: Circuito Divisor de Voltaje

tenemos que:

$$V_o = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_i. \quad (1)$$

La expresión 1 se obtiene de aplicar leyes físicas de circuitos eléctricos ([Ley de Ohm](#), [Leyes de Kirchhoff](#)). Podemos decir que este circuito simple procesa señales, si por ejemplo R_2 es ahora una foto-resistencia y su comportamiento es dado por la expresión:

$$R = kR_b. \quad (2)$$

Sustituyendo la expresión 2 en 1, tenemos que el V_o es dado por la expresión:

$$V_o = k_t V_i, \quad (3)$$

donde

$$k_t = k \frac{R_b}{R_b + R_1}.$$

Se puede decir que el circuito analizado permite saber la intensidad de luz que recibe.
 ¿Cuál es el primer dispositivo electrónico?

2. La valvula termoionica

Este es considerado el primer dispositivo de electrónico, basa en el efecto de emisión termoiónica.

La emisión termoiónica, conocida arcaicamente como efecto Edison es el flujo de partículas cargadas llamadas termiones desde una superficie de metal (u óxido de metal) causada por una energía térmica de tipo vibracional que provoca una fuerza electrostática que empuja a los electrones hacia la superficie. La carga de los termiones (que pueden ser positivos o negativos) será la misma a la carga del metal u óxido de metal. El efecto aumenta dramáticamente al subir la temperatura (1000–3000 K). La ciencia que estudia este fenómeno es la termoiónica.

Edison construyó muchas bombillas experimentales, algunas con un filamento adicional y una con una lámina metálica dentro de la lámpara, eléctricamente aislada del filamento. Edison conectó el electrodo adicional al filamento de la lámpara a través de un galvanómetro. Cuando la lámina tenía una carga negativa superior a la del filamento, no fluía corriente entre el filamento y la misma porque al estar frío emitía muy pocos electrones. Sin embargo, cuando cargó la lámina positivamente, la mayoría de electrones emitidos desde el filamento caliente fueron atraídos hacia ella causando un flujo de corriente estable. Esta forma de fluido eléctrico en un solo sentido fue llamada entonces el efecto Edison (aunque el término se usa en ocasiones para referirse a la emisión termoiónica específicamente).

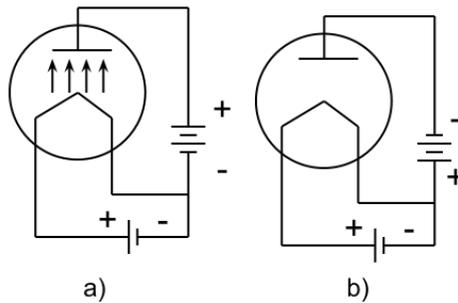


Figura 2: Diodo de Vacío

El comportamiento de conducción mostrado se conoce como ***Polarización Directa*** y el comportamiento de no conducción como ***Polarización Inversa***. El comportamiento de la bombilla de Edison se muestra en la siguiente gráfica,

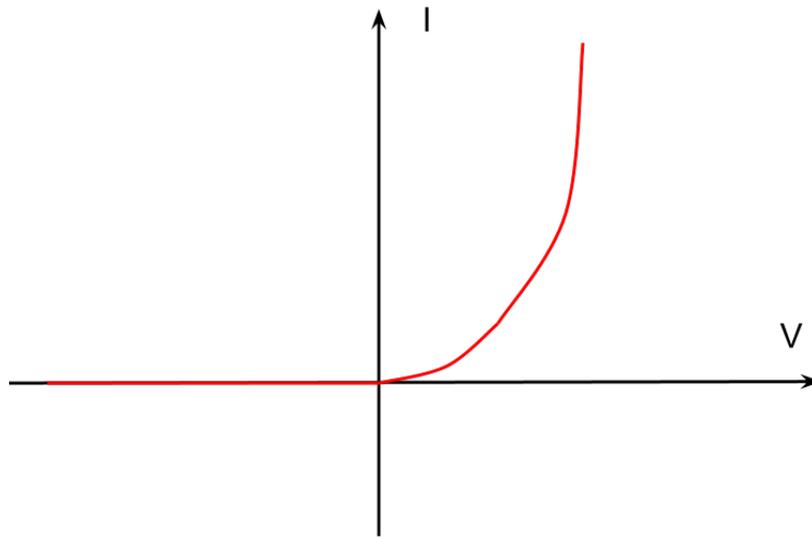


Figura 3: Curva de un diodo de vacío

Basándose en las observaciones de Edison, se inventó el **Diodo** desarrollado en 1904 por John Ambrose Fleming, empleado de la empresa Marconi

3. Semiconductor

Semiconductor es un elemento que se comporta como un conductor o como aislante dependiendo de diversos factores, como por ejemplo el campo eléctrico o magnético, la presión, la radiación que le incide, o la temperatura del ambiente en el que se encuentre. Los elementos químicos semiconductores de la tabla periódica se indican en la tabla adjunta.

Elemento	Grupos	Electrones en la última capa
Cd	12	$2e^-$
Al, Ga, B, In	13	$3e^-$
Si, C, Ge	14	$4e^-$
P, As, Sb	15	$5e^-$
Se, Te, (S)	16	$6e^-$

Cuadro 1: Elementos semiconductores

El elemento semiconductor más usado es el silicio, el segundo el germanio, aunque idéntico comportamiento presentan las combinaciones de elementos de los grupos 12 y 13 con los de los grupos 14 y 15 respectivamente (\sim AsGa, \sim PIn, \sim AsGaAl, \sim TeCd, \sim SeCd y \sim SCd). Posteriormente se ha comenzado a emplear también el azufre. La característica común a

todos ellos es que son tetravalentes, teniendo el silicio una configuración electrónica s^2p^2 . La estructura cristalina se muestra en la siguiente figura:

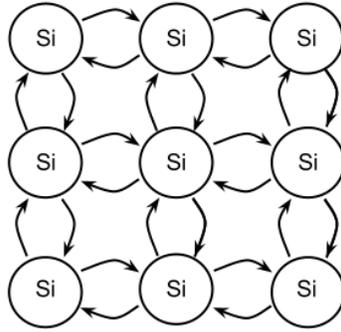


Figura 4: una image

3.1. Banda de Valencia

En la teoría de sólidos, se denomina banda de valencia al más alto de los intervalos de energías electrónicas (o bandas) que se encuentra ocupado por electrones en el cero absoluto. En semiconductores y aislantes aparece una banda prohibida o gap por encima de la banda de valencia, seguida de una banda de conducción a energías aún mayores. En los metales, por el contrario, no hay ningún intervalo de energías prohibidas entre las bandas de valencia y de conducción.

3.2. Semiconductores intrínsecos

Es un cristal de Silicio o Germanio que forma una estructura tetraédrica similar a la del carbono mediante enlaces covalentes entre sus átomos, en la figura representados en el plano por simplicidad. Cuando el cristal se encuentra a temperatura ambiente algunos electrones pueden absorber la energía necesaria para saltar a la banda de conducción dejando el correspondiente hueco en la [banda de valencia](#). Las energías requeridas, a temperatura ambiente, son de 1,1 eV y 0,7 eV para el silicio y el germanio respectivamente, esto se ilustra en la siguiente figura:

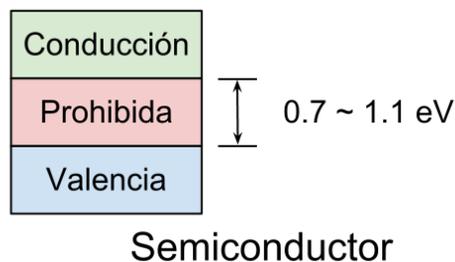


Figura 5: Bandas de energía en el extremo del atomo

Obviamente el proceso inverso también se produce, de modo que los electrones pueden caer, desde el estado energético correspondiente a la banda de conducción, a un hueco en la banda de valencia liberando energía. A este fenómeno se le denomina recombinación. Sucede que, a una determinada temperatura, las velocidades de creación de pares $e-h$, y de recombinación se igualan, de modo que la concentración global de electrones y huecos permanece constante. Siendo n la concentración de electrones (cargas negativas) y p la concentración de huecos (cargas positivas), se cumple que:

$$n_i = n = p$$

siendo n_i la concentración intrínseca del semiconductor, función exclusiva de la temperatura y del tipo de elemento. El número de portadores en un semiconductor se puede calcular con la expresión:

$$n_i = BT^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_G}{2kT}} \quad (4)$$

donde B es un coeficiente relacionado con el material semiconductor, E_G es el espacio de energía entre bandas (eV) y T es la temperatura (°K), k es la constante de Boltzman.

Los electrones y los huecos reciben el nombre de **portadores**. En los semiconductores, ambos tipos de portadores contribuyen al paso de la corriente eléctrica. Si se somete el cristal a una **diferencia de potencial** se producen dos corrientes eléctricas. Por un lado la debida al movimiento de los electrones libres de la banda de conducción, y por otro, la debida al desplazamiento de los electrones en la banda de valencia, que tenderán a saltar a los huecos próximos, originando una corriente de huecos con 4 capas ideales y en la dirección contraria al campo eléctrico cuya velocidad y magnitud es muy inferior a la de la banda de conducción, esta corriente se le llama **Corriente Inversa de Saturación**, la corriente total producida por el la aplicación de la diferencia de potencial se llama **Corriente de Deriva**.

La densidad de corriente de deriva se calcula con la expresión

$$J = (en\mu_n + ep\mu_p)E \quad (5)$$

donde, n es la concentración de electrones ($\#/cm^2$), p es la concentración de huecos ($\#/cm^2$), μ_x es la movilidad de portador ($cm^2/V-s$) y e es la magnitud de la carga eléctrica. De la expresión anterior y recordando la **Ley de Ohm** podemos definir la resistividad del semiconductor como:

$$\rho = \frac{1}{en\mu_n + ep\mu_p} \quad (6)$$

donde las unidades de ρ son $\Omega \cdot cm$.

Los materiales semiconductores como ya se mencionó a diferencia de los aislantes, bajo ciertas circunstancias pueden conducir. En el caso del silicio a temperatura ambiente si se le aplica un potencial eléctrico lo suficientemente (V_d) grande entra en modo de conducción sin sufrir daño en su estructura cristalina. En la siguiente figura se muestra el comportamiento en la gráfica **Voltaje-Corriente**.

Normalmente al voltaje necesario para que se de el fenómeno de conducción se le llama **Voltaje de Disparo** V_d .

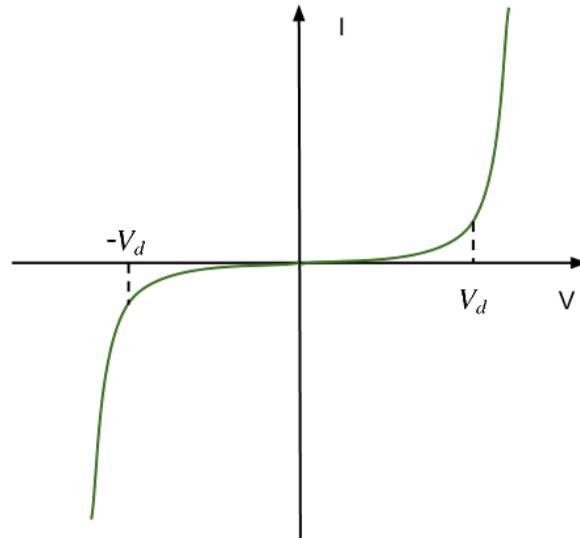


Figura 6: Curva de conducción de un semiconductor intrínseco

3.3. Semiconductores extrínsecos

Si a un semiconductor intrínseco, como el anterior, se le añade un pequeño porcentaje de impurezas, es decir, elementos trivalentes o pentavalentes, el semiconductor se denomina extrínseco, y se dice que está dopado. Evidentemente, las impurezas deberán formar parte de la estructura cristalina sustituyendo al correspondiente átomo de silicio. Hoy en día se han logrado añadir impurezas de una parte por cada 10 millones, logrando con ello una modificación del material.

3.3.1. Semiconductor tipo N

Un Semiconductor tipo N se obtiene llevando a cabo un proceso de dopado añadiendo un cierto tipo de átomos al semiconductor para poder aumentar el número de portadores de carga libres (en este caso negativos o electrones). Cuando se añade el material dopante aporta sus electrones más débilmente vinculados a los átomos del semiconductor. Este tipo de agente dopante es también conocido como “material donante” ya que da algunos de sus electrones.

El propósito del dopaje tipo n es el de producir abundancia de electrones portadores en el material. Para ayudar a entender cómo se produce el dopaje tipo n considérese el caso del silicio (Si). Los átomos del silicio tienen una valencia atómica de cuatro, por lo que se forma un enlace covalente con cada uno de los átomos de silicio adyacentes. Si un átomo con cinco electrones de valencia, tales como los del grupo 15 de la tabla periódica (ej. fósforo (P), arsénico (As) o antimonio (Sb)), se incorpora a la red cristalina en el lugar de un átomo de silicio, entonces ese átomo tendrá cuatro enlaces covalentes y un electrón no enlazado. Este electrón extra da como resultado la formación de “electrones libres”, el número de electrones en el material supera ampliamente el número de huecos, en ese caso los electrones son los portadores mayoritarios y los huecos son los portadores minoritarios. A causa de que los

átomos con cinco electrones de valencia tienen un electrón extra que “dar”, son llamados átomos donadores. Nótese que cada electrón libre en el semiconductor nunca está lejos de un ion dopante positivo inmóvil, y el material dopado tipo N generalmente tiene una carga eléctrica neta final de cero.

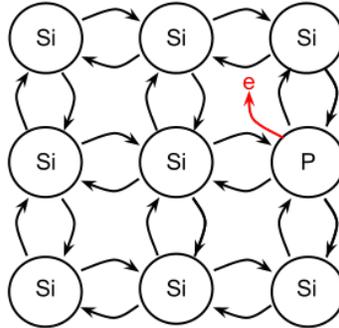


Figura 7: Estructura de un semiconductor tipo “n”

3.3.2. Semiconductor tipo P

Un Semiconductor tipo P se obtiene llevando a cabo un proceso de dopado, añadiendo un cierto tipo de átomos al semiconductor para poder aumentar el número de portadores de carga libres (en este caso positivos o huecos). Cuando se añade el material dopante libera los electrones más débilmente vinculados de los átomos del semiconductor. Este agente dopante es también conocido como “material aceptor” y los átomos del semiconductor que han perdido un electrón son conocidos como huecos.

El propósito del dopaje tipo P es el de crear abundancia de huecos. En el caso del silicio, un átomo tetravalente (típicamente del grupo 14 de la tabla periódica) se le une un átomo con tres electrones de valencia, tales como los del grupo 13 de la tabla periódica (ej. Al, Ga, B, In), y se incorpora a la red cristalina en el lugar de un átomo de silicio, entonces ese átomo tendrá tres enlaces covalentes y un hueco producido que se encontrará en condición de aceptar un electrón libre. Así los dopantes crean los “huecos”. No obstante, cuando cada hueco se ha desplazado por la red, un protón del átomo situado en la posición del hueco se ve “expuesto” y en breve se ve equilibrado como una cierta carga positiva. Cuando un número suficiente de aceptores son añadidos, los huecos superan ampliamente la excitación térmica de los electrones. Así, los huecos son los portadores mayoritarios, mientras que los electrones son los portadores minoritarios en los materiales tipo P. Los diamantes azules (tipo ~IIb), que contienen impurezas de boro (B), son un ejemplo de un semiconductor tipo P que se produce de manera natural.

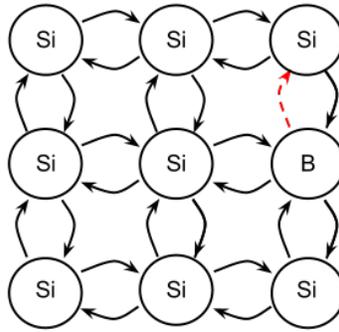


Figura 8: Estructura de un semiconductor tipo “p”

4. Diodo

4.1. Definición

Un diodo es un componente electrónico de dos terminales que permite la circulación de la corriente eléctrica a través de él en un solo sentido. Este término generalmente se usa para referirse al diodo semiconductor, el más común en la actualidad; consta de una pieza de cristal semiconductor conectada a dos terminales eléctricos. El diodo de vacío (que actualmente ya no se usa, excepto para tecnologías de alta potencia).

4.2. Historia

4.2.1. Diodo de Vacío

El invento fue desarrollado en 1904 por John Ambrose Fleming, empleado de la empresa Marconi, basándose en observaciones realizadas por Thomas Alva Edison.

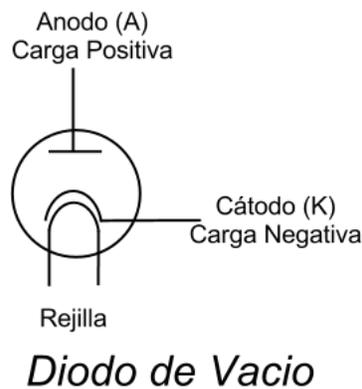


Figura 9: Diodo de Vacío

Este es considerado el primer dispositivo electrónico, ya que controla el flujo electrónico a través de una señal externa, la cual puede ser de baja potencia. La curva de Voltaje-Corriente del diodo de vacío es la misma que la que presenta la válvula termionica con el efecto Edison,

la diferencia radica en que el calentamiento de la placa del cátodo (k) es independiente al voltaje de ánodo-catodo, por lo que puede ser incluso una señal de AC. Este sistema se le llama de "caldeo indirecto"

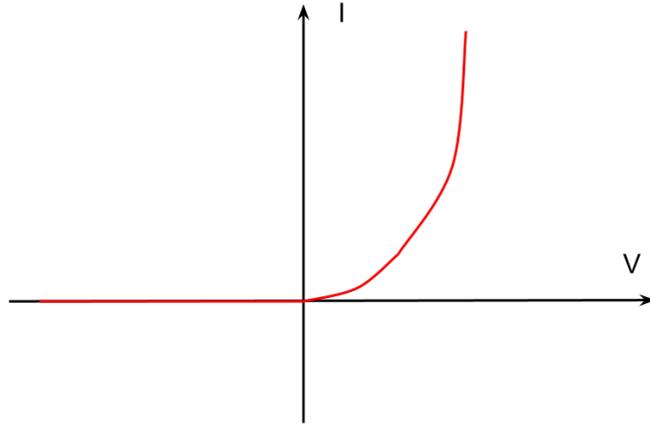


Figura 10: Curva de un diodo de vacío

4.2.2. Representación eléctrica del diodo de vacío

El comportamiento mostrado en curva Voltaje-Corriente del diodo nos muestra que el solo se tiene comportamiento en los cuadrantes I y III, los mismos cuadrantes que una Resistencia según la [Ley de Ohm](#). Sin embargo, el comportamiento en el III cuadrante es de un circuito abierto o una resistencia infinita, es decir no importa el voltaje aplicado la corriente es 0, en el cuadrante I, la resistencia presente un comportamiento lineal, mientras que el diodo cambia su comportamiento de acuerdo al voltaje aplicado. De manera general se puede representar por medio del circuito equivalente que se muestra en la siguiente figura:

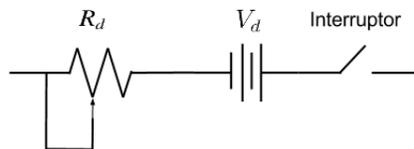


Figura 11: Circuito equivalente de un diodo

La resistencia dinámica R_d representa el comportamiento del diodo en el primer cuadrante. La batería V_d representa un voltaje de disparo, este voltaje es necesario porque el diodo no conduce inmediatamente después de ser polarizado en directa. Finalmente el interruptor representa el comportamiento del diodo en el III cuadrante, donde no se tiene conducción.

4.2.3. Evolución.

Los tubos de vacío presentan dos grandes problemas; * El primero es relacionado con su proceso de fabricación, ya que el fenómeno termionico se presenta solo en el vacío o gases inertes, por lo que era necesario utilizar una cubierta para lograrlo, haciendo estos dispositivos frágiles ante vibraciones o cambios extremos, además de ocupar una gran espacio. * El segundo era relacionado a la potencia necesaria para hacerlos funcionar, ya que la nube de electrones en la rejilla o el catodo tenia que tener un mínimo para que se presentará el fenómeno de conducción. Buscando una solución a estos problemas en los laboratorios Bell en la década de los 50's del siglo pasado se logra perfeccionar el uso de semiconductores para la fabricación de dispositivos electrónicos. Uno de los dispositivos [Semiconductor](#) más simple es el diodo semiconductor.

4.3. Diodo Semiconductor.

Un diodo semiconductor moderno está hecho de cristal semiconductor como el silicio con impurezas en él para crear una región que contiene portadores de carga negativos (electrones), llamado semiconductor de tipo n, y una región en el otro lado que contiene portadores de carga positiva (huecos), llamado semiconductor tipo p. Las terminales del diodo se unen a cada región. El límite dentro del cristal de estas dos regiones, llamado una unión PN, es donde la importancia del diodo toma su lugar. El cristal conduce una corriente de electrones del lado n (llamado cátodo), pero no en la dirección opuesta; es decir, cuando una corriente convencional fluye del ánodo al cátodo (opuesto al flujo de los electrones).

4.3.1. Estructura Básica.

La estructura básica de un diodo semiconductor se muestra en la siguiente figura:

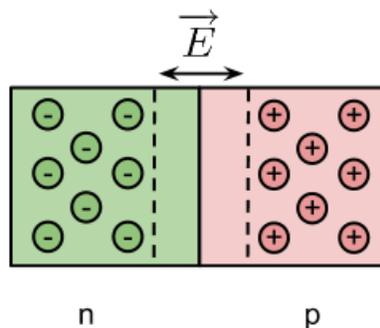


Figura 12: Estructura básica del diodo

Al unir ambos cristales, se manifiesta una difusión de electrones del cristal n al p (\vec{E}). Al establecerse una corriente de difusión, estas corrientes aparecen cargas fijas en una zona a ambos lados de la unión, zona que recibe el nombre de "región de agotamiento". A medida que progresa el proceso de difusión, la región de agotamiento va incrementando su anchura profundizando en los cristales a ambos lados de la unión. Sin embargo, la acumulación de iones positivos en la zona n y de iones negativos en la zona p, crea un campo eléctrico que

actuará sobre los electrones libres de la zona n con una determinada fuerza de desplazamiento, que se opondrá a la corriente de electrones y terminará deteniéndolos. Este campo eléctrico ocasiona que aparezca una diferencia de tensión entre las zonas p y n. Esta diferencia de potencial (V_d) es de 0,7 V en el caso del silicio y 0,3 V para los cristales de germanio.

4.3.2. Funcionamiento.

La anchura de la región de agotamiento una vez alcanzado el equilibrio, suele ser del orden de 0,5 micras pero cuando uno de los cristales está mucho más dopado que el otro, la zona de carga espacial es mucho mayor. Cuando se somete al diodo a una diferencia de tensión externa, se dice que el diodo está polarizado, pudiendo ser la polarización directa o inversa.

Polarización Directa. En este caso, la batería disminuye la barrera de potencial de la zona de carga espacial, permitiendo el paso de la corriente de electrones a través de la unión; es decir, el diodo polarizado directamente conduce la electricidad.

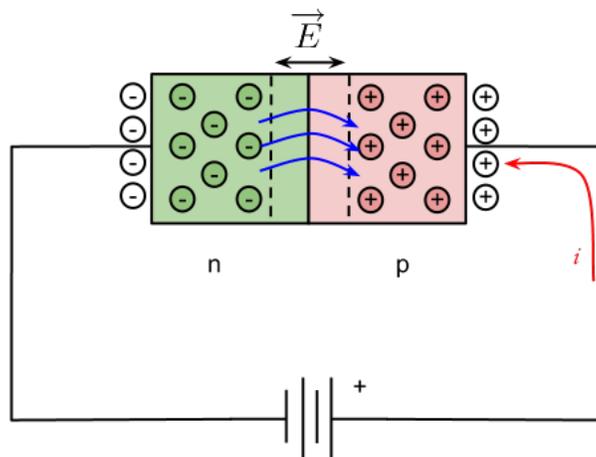


Figura 13: Polarización Directa de un Diodo

Para que un diodo esté polarizado directamente, se debe conectar el polo positivo de la batería al ánodo del diodo y el polo negativo al cátodo. En estas condiciones podemos observar que: * El polo negativo de la batería repele los electrones libres del cristal n, con lo que estos electrones se dirigen hacia la unión p-n. * El polo positivo de la batería atrae a los electrones de valencia del cristal p, esto es equivalente a decir que empuja a los huecos hacia la unión p-n.

El proceso de movimiento electrónico se da a través del siguiente proceso: Cuando la diferencia de potencial entre las terminales de la batería es mayor que la diferencia de potencial en la región de agotamiento, los electrones libres del cristal n, adquieren la energía suficiente para saltar a los huecos del cristal p, los cuales previamente se han desplazado hacia la unión p-n. * Una vez que un electrón libre de la zona n salta a la zona p atravesando la región de agotamiento, cae en uno de los múltiples huecos de la zona p convirtiéndose en electrón de valencia. Una vez ocurrido esto el electrón es atraído por el

polo positivo de la batería y se desplaza de átomo en átomo hasta llegar al final del cristal p, desde el cual se introduce en el hilo conductor y llega hasta la batería.

De este modo, con la batería cediendo electrones libres a la zona n y atrayendo electrones de valencia de la zona p, aparece a través del diodo una corriente eléctrica constante hasta el final.

Polarización Inversa En este caso, el polo negativo de la batería se conecta a la zona p y el polo positivo a la zona n, lo que hace aumentar la región de agotamiento, y la tensión en dicha zona hasta que se alcanza el valor de la tensión de la batería, tal y como se explica a continuación: * El polo positivo de la batería atrae a los electrones libres de la zona n, los cuales salen del cristal n y se introducen en el conductor dentro del cual se desplazan hasta llegar a la batería. A medida que los electrones libres abandonan la zona n, los átomos pentavalentes que antes eran neutros, al verse desprendidos de su electrón en el orbital de conducción, adquieren estabilidad y una carga eléctrica neta de +1, con lo que se convierten en iones positivos. * El polo negativo de la batería cede electrones libres a los átomos trivalentes de la zona p. Recordemos que estos átomos sólo tienen 3 electrones de valencia, con lo que una vez que han formado los enlaces covalentes con los átomos de silicio, tienen solamente 7 electrones de valencia, siendo el electrón que falta el denominado hueco. El caso es que cuando los electrones libres cedidos por la batería entran en la zona p, caen dentro de estos huecos con lo que los átomos trivalentes adquieren estabilidad (8 electrones en su orbital de valencia) y una carga eléctrica neta de -1, convirtiéndose así en iones negativos. * Este proceso se repite una y otra vez hasta que la zona de carga espacial adquiere el mismo potencial eléctrico que la batería.

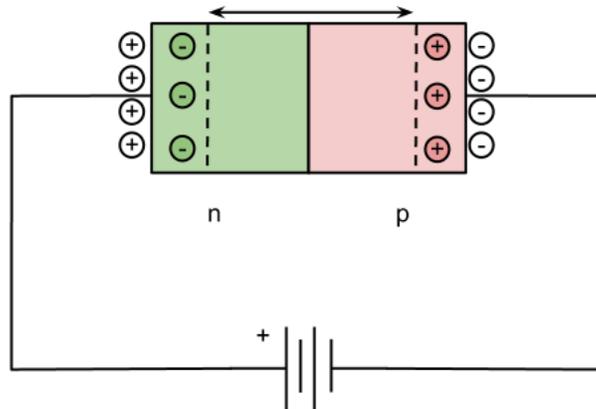


Figura 14: Polarización Inversa de un Diodo

En esta situación, el diodo no debería conducir la corriente; sin embargo, debido al efecto de la temperatura se formarán pares electrón-hueco (ver [Semiconductor](#)) a ambos lados de la unión produciendo una pequeña corriente (del orden de $1\mu A$) denominada ‘corriente inversa de saturación’. Además, existe también una denominada ‘corriente superficial de fuga’ la cual, como su propio nombre indica, conduce una pequeña corriente por la superficie del

diodo; ya que en la superficie, los átomos de silicio no están rodeados de suficientes átomos para realizar los cuatro enlaces covalentes necesarios para obtener estabilidad. Esto hace que los átomos de la superficie del diodo, tanto de la zona n como de la p, tengan huecos en su orbital de valencia con lo que los electrones circulan sin dificultad a través de ellos. No obstante, al igual que la corriente inversa de saturación, la corriente superficial de fuga es despreciable.

Un fenómeno que ocurre en la polarización en inversa es el de "Voltaje de Ruptura" (V_r), que es el voltaje en inversa máximo que el diodo puede soportar antes de darse el efecto avalancha. Teóricamente, al polarizar inversamente el diodo, este conducirá la corriente inversa de saturación; en la realidad, a partir de un determinado valor de la tensión, en el diodo normal o de unión abrupta la ruptura se debe al efecto avalancha; no obstante hay otro tipo de diodos, como los Zener, en los que la ruptura puede deberse a dos efectos: * *Efecto avalancha (diodos poco dopados)*. En polarización inversa se generan pares electrón-hueco que provocan la corriente inversa de saturación; cuando el voltaje en inversa alcanza un valor crítico (V_a) los electrones se aceleran incrementando su energía cinética de forma que al chocar con electrones de valencia pueden provocar su salto a la banda de conducción. Estos electrones liberados, a su vez, se aceleran por efecto de la tensión, chocando con más electrones de valencia y liberándolos a su vez. El resultado es una avalancha de electrones que provoca una corriente grande. El valor de voltaje necesario para que ocurra este fenómeno depende del tipo de construcción del diodo. * *Efecto Zener (diodos muy dopados)*. Cuanto más dopado está el material, menor es la anchura de la zona de carga. Puesto que el campo eléctrico \vec{E} puede expresarse como cociente del voltaje entre la distancia V/d ; cuando el diodo esté muy dopado, y por tanto d sea pequeño, si el campo eléctrico en la región de agotamiento crece lo suficiente, entonces bajo estas condiciones, el propio campo puede ser capaz de arrancar electrones de valencia incrementándose la corriente. El voltaje necesario para que se produzca este efecto se llama *Voltaje Zener* (V_z).

Para tensiones inversas entre 4 y 6 V la ruptura de diodos especiales, como los Zener, se puede producir por ambos efectos.

4.3.3. Curva característica

El comportamiento global de un diodo semiconductor se representa en la siguiente gráfica:

Los puntos importantes en la curva característica del diodo aparte de V_z y V_a son: * *Voltaje de disparo* (V_d). El voltaje de disparo (también llamado *barrera de potencial*) de polarización directa coincide en valor con la diferencia de potencial en la región de agotamiento del diodo no polarizado. Al polarizar directamente el diodo, la barrera de potencial inicial se va reduciendo, incrementando la corriente ligeramente, alrededor del 1% de la nominal. Sin embargo, cuando voltaje externo supera el voltaje de disparo, la barrera de potencial desaparece, de forma que para pequeños incrementos de voltaje se producen grandes variaciones de la intensidad de corriente. * *Corriente máxima* (I_{max}). Es la intensidad de corriente máxima que puede conducir el diodo sin fundirse por el efecto Joule. Dado que es función de la cantidad de calor que puede disipar el diodo, depende sobre todo del diseño del mismo. * *Corriente inversa de saturación* (I_s). Es la pequeña corriente que se establece al polarizar inversamente el diodo por la formación de pares electrón-hueco debido a la temperatura.

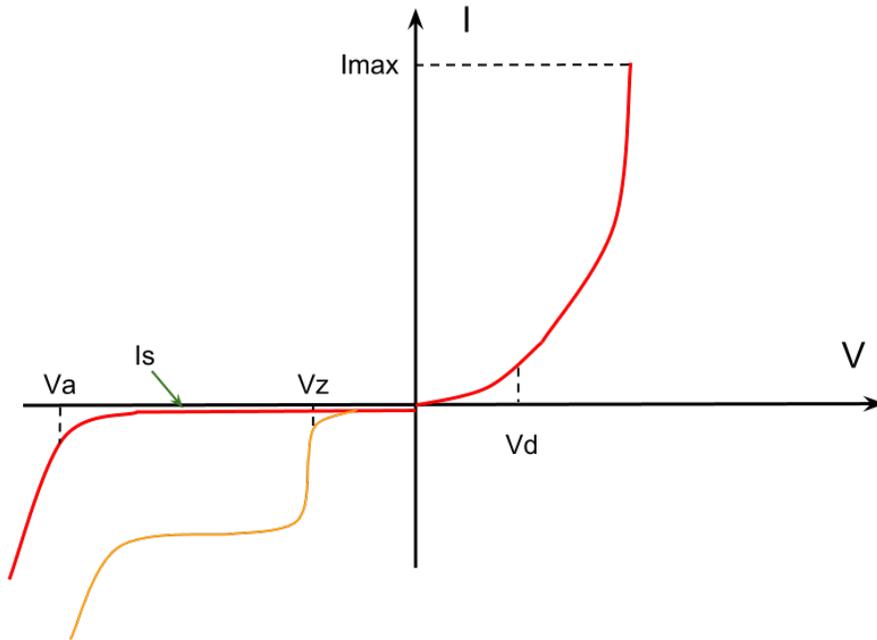


Figura 15: Curva característica de un diodo de silicio

- *Corriente superficial de fuga.* Es la pequeña corriente que circula por la superficie del diodo (ver **Polarización Inversa**, esta corriente es función de la tensión aplicada al diodo, con lo que al aumentar la tensión, aumenta la corriente superficial de fugas.

4.3.4. Modelo Matemático

El modelo matemático más empleado es el de Shockley (en honor a [William Bradford Shockley](#) que permite aproximar el comportamiento del diodo en la mayoría de las aplicaciones. La ecuación que liga la intensidad de corriente y la diferencia de potencial es:

$$I = I_S \left(e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1 \right), \quad (7)$$

Donde: I es la intensidad de la corriente que atraviesa el diodo V_D es la diferencia de tensión entre sus extremos. I_S es la corriente de saturación (aproximadamente $10^{-12}A$) n es el coeficiente de emisión, dependiente del proceso de fabricación del diodo y que suele adoptar valores entre 1 (para el germanio) y del orden de 2 (para el silicio).

El Voltaje térmico V_T es aproximadamente 25.85mV en 300K, una temperatura cercana a la temperatura ambiente, muy usada en los programas de simulación de circuitos. Para cada temperatura existe una constante conocida definida por:

$$V_T = \frac{kT}{q}$$

Donde k es la constante de Boltzmann, T es la temperatura absoluta de la unión pn, y q es la magnitud de la carga de un electrón (la carga elemental). La ecuación de diodo

ideal de Shockley o la ley de diodo se deriva de asumir que solo los procesos que le dan corriente al diodo son por el flujo (debido al campo eléctrico), difusión, y la recombinación térmica. También asume que la corriente de recombinación en la región de agotamiento es insignificante. Esto significa que la ecuación de Shockley no tiene en cuenta los procesos relacionados con la región de ruptura e inducción por fotones. Adicionalmente, no describe la estabilización de la curva Voltaje-Corriente en polarización activa debido a la resistencia interna.

Bajo voltajes negativos, la exponencial en la ecuación del diodo es insignificante. y la corriente es una constante negativa del valor de I_s . **La región de ruptura no esta modelada** en la ecuación de diodo de Shockley.

Para voltajes positivos en la región de polarización directa, se puede eliminar el 1 de la ecuación, quedando como resultado:

$$I = I_s e^{\frac{V_D}{nV_T}}$$

Con objeto de evitar el uso de exponenciales, en ocasiones se emplean modelos más simples aún, que modelan las zonas de funcionamiento del diodo por tramos rectos; son los llamados modelos de continua o de Ram-senal. El más simple de todos es el diodo ideal.

La resistencia en DC del diodo se puede calculara partir de la grafica de V-I. Esto se tiene que realizar considerando la ley de Ohm

$$r_d = \frac{\Delta v_d}{\Delta i_d} \quad (8)$$

Sin embargo, cuando el voltaje aplicado es de AC la resistencia es dinámica por lo que para calcular su valor se utiliza la expresion:

$$r_d = \frac{dv_d}{di_d} \quad (9)$$

dado que la expresion que modela al diodo es para i_d es conveniente desarrollar para la admitancia $1/R$

$$\frac{d}{dv_d} = I_s \left(e^{\frac{v_d}{nV_T}} - 1 \right), \quad (10)$$

$$= \frac{1}{nV_T} (I - I_s) \quad (11)$$

dado que $I_D \gg I_s$ entonces se tiene que la resistencia del diodo r_d es dada por la expresion

$$r_d = \frac{nV_T}{I_D} \quad (12)$$

la expresión anterior es valida solo si el voltaje en el diodo v_d es igual o mayor al voltaje de disparo del mismo

5. Tipo de Diodos

Existen varios tipos de diodos, que pueden diferir en su aspecto físico, impurezas, uso de electrodos, que tienen características eléctricas particulares usados para una aplicación especial en un circuito. El funcionamiento de estos diodos es fundamentado por principios de la mecánica cuántica y teoría de bandas.

Los diodos normales, los cuales operan como se describía más arriba, se hacen generalmente de silicio dopado o germanio. Antes del desarrollo de estos diodos rectificadores de silicio, se usaba el óxido cuproso y el selenio: su baja eficiencia le dio una caída de tensión muy alta (desde 1,4 a 1,7V) y requerían de una gran disipación de calor mucho más grande que un diodo de silicio. La gran mayoría de los diodos pn se encuentran en circuitos integrados CMOS, que incluyen dos diodos por pin y muchos otros diodos internos.

- *Diodo avalancha*: Diodos que conducen en dirección contraria cuando el voltaje en inverso supera el voltaje de ruptura. Electricamente son similares a los diodos Zener, pero funciona bajo otro fenómeno, el efecto avalancha. Esto sucede cuando el campo eléctrico inverso que atraviesa la unión p-n produce una onda de ionización, similar a una avalancha, produciendo una corriente. Los diodos avalancha están diseñados para operar en un voltaje inverso definido sin que se destruya. La diferencia entre el diodo avalancha (el cual tiene un voltaje de reversa de aproximadamente 6.2V) y el diodo zener es que el ancho del canal del primero excede la “libre asociación” de los electrones, por lo que se producen colisiones entre ellos en el camino. La única diferencia práctica es que los dos tienen coeficientes de temperatura de polaridades opuestas.
- *Diodo de Silicio*: Suelen tener un tamaño milimétrico y, alineados, constituyen detectores multicanal que permiten obtener espectros en milisegundos. Son menos sensibles que los fotomultiplicadores. Es un semiconductor de tipo p (con huecos) en contacto con un semiconductor de tipo n (electrones). La radiación comunica la energía para liberar los electrones que se desplazan hacia los huecos, estableciendo una corriente eléctrica proporcional a la potencia radiante.
- *Diodo de cristal* : Es un tipo de diodo de contacto. El diodo cristal consiste de un cable de metal afilado presionado contra un cristal semiconductor, generalmente galena o de una parte de carbón. El cable forma el ánodo y el cristal forma el cátodo. Los diodos de cristal tienen una gran aplicación en los radio a galena. Los diodos de cristal están obsoletos, pero puede conseguirse todavía de algunos fabricantes.
- *Diodo de corriente constante*: Realmente es un JFET, con su compuerta conectada a la fuente, y funciona como un limitador de corriente de dos terminales análogo al diodo Zener, el cual limita el voltaje. Ellos permiten una corriente a través de ellos para alcanzar un valor adecuado y así estabilizarse en un valor específico. También suele llamarse CLDs (por sus siglas en inglés) o diodo regulador de corriente.
- *Diodo túnel o Esaki*: Tienen una región de operación que produce una resistencia negativa debido al efecto túnel, permitiendo amplificar señales y circuitos muy simples que poseen dos estados. Debido a la alta concentración de carga, los diodos túnel son

muy rápidos, pueden usarse en temperaturas muy bajas, campos magnéticos de gran magnitud y en entornos con radiación alta. Por estas propiedades, suelen usarse en viajes espaciales.

- *Diodo Gunn*: Similar al diodo túnel son construidos de materiales como GaAs o InP que produce una resistencia negativa. Bajo condiciones apropiadas, las formas de dominio del dipolo y propagación a través del diodo, permitiendo osciladores de ondas microondas de alta frecuencia.
- *Diodo emisor de luz*: En un diodo formado de un semiconductor con huecos en su banda de energía, tal como arseniuro de galio, los portadores de carga que cruzan la unión emiten fotones cuando se recombinan con los portadores mayoritarios en el otro lado. Dependiendo del material, la longitud de onda que se pueden producir varía desde el infrarrojo hasta longitudes de onda cercanas al ultravioleta. El potencial que admiten estos diodos dependen de la longitud de onda que ellos emiten: 2.1V corresponde al rojo, 4.0V al violeta. Los primeros LEDs fueron rojos y amarillos. Los LEDs blancos son en realidad combinaciones de tres LEDs de diferente color o un LED azul revestido con un centelleador amarillo. Los LEDs también pueden usarse como fotodiodos de baja eficiencia en aplicaciones de señales. Un LED puede usarse con un fotodiodo o fototransistor para formar un optoacoplador.
- *Diodo láser*: Cuando la estructura de un LED se introduce en una cavidad resonante formada al pulir las caras de los extremos, se puede formar un láser. Los diodos láser se usan frecuentemente en dispositivos de almacenamiento ópticos y para la comunicación óptica de alta velocidad.
- *Diodo térmico*: Este término también se usa para los diodos convencionales usados para monitorear la temperatura a la variación de voltaje con la temperatura, y para refrigeradores termoeléctricos para la refrigeración termoeléctrica. Los refrigeradores termoeléctricos se hacen de semiconductores, aunque ellos no tienen ninguna unión de rectificación, aprovechan el comportamiento distinto de portadores de carga de los semiconductores tipo P y N para transportar el calor.
- *Fotodiodos*: Todos los semiconductores están sujetos a portadores de carga ópticos. Generalmente es un efecto no deseado, por lo que muchos de los semiconductores están empacados en materiales que bloquean el paso de la luz. Los fotodiodos tienen la función de ser sensibles a la luz (fotocelda), por lo que están empacados en materiales que permiten el paso de la luz y son por lo general PIN (tipo de diodo más sensible a la luz). Un fotodiodo puede usarse en celdas solares, en fotometría o en comunicación óptica. Varios fotodiodos pueden empacarse en un dispositivo como un arreglo lineal o como un arreglo de dos dimensiones. Estos arreglos no deben confundirse con los dispositivos de carga acoplada.
- *Diodo con puntas de contacto*: Funcionan igual que los diodos semiconductores de unión mencionados anteriormente aunque su construcción es más simple. Se fabrica una sección de semiconductor tipo n, y se hace un conductor de punta aguda con un metal del grupo 3 de manera que haga contacto con el semiconductor. Algo del

metal migra hacia el semiconductor para hacer una pequeña región de tipo p cerca del contacto. El muy usado 1N34 (de fabricación alemana) aún se usa en receptores de radio como un detector y ocasionalmente en dispositivos analógicos especializados.

- *Diodo PIN*: Un diodo PIN tiene una sección central sin doparse o en otras palabras una capa intrínseca formando una estructura p-intrinseca-n. Son usados como interruptores de alta frecuencia y atenuadores. También son usados como detectores de radiación ionizante de gran volumen y como fotodetectores. Los diodos PIN también se usan en la electrónica de potencia y su capa central puede soportar altos voltajes. Además, la estructura del PIN puede encontrarse en dispositivos semiconductores de potencia, tales como IGBTs, MOSFETs de potencia y tiristores.
- *Diodo Schottky*: El diodo Schottky están contruidos de un metal a un contacto de semiconductor. Tiene una tensión de ruptura mucho menor que los diodos pn. Su tensión de ruptura en corrientes de 1mA está en el rango de 0.15V a 0.45V, lo cual los hace útiles en aplicaciones de fijación y prevención de saturación en un transistor. También se pueden usar como rectificadores con bajas pérdidas aunque su corriente de fuga es mucho más alta que la de otros diodos. Los diodos Schottky son portadores de carga mayoritarios por lo que no sufren de problemas de almacenamiento de los portadores de carga minoritarios que ralentizan la mayoría de los demás diodos (por lo que este tipo de diodos tiene una recuperación inversa más rápida que los diodos de unión pn. Tienden a tener una capacitancia de unión mucho más baja que los diodos pn que funcionan como interruptores veloces y se usan para circuitos de alta velocidad como fuentes conmutadas, mezclador de frecuencias y detectores.
- *Stabistor*: El stabistor (también llamado Diodo de Referencia en Directa) es un tipo especial de diodo de silicio cuyas características de tensión en directa son extremadamente estables. Estos dispositivos están diseñados especialmente para aplicaciones de estabilización en bajas tensiones donde se requiera mantener la tensión muy estable dentro de un amplio rango de corriente y temperatura.

Dada la variedad de diodos resulta difícil explicar cada una de las posibles aplicaciones en las cuales se utilizan los diodos, por lo que solo nos enfocaremos en las

6. Curvas Características

Con un circuito simple se puede utilizar el circuito que se muestra a continuación:

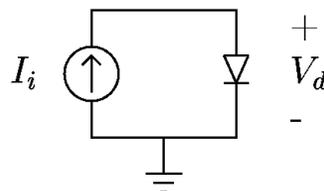
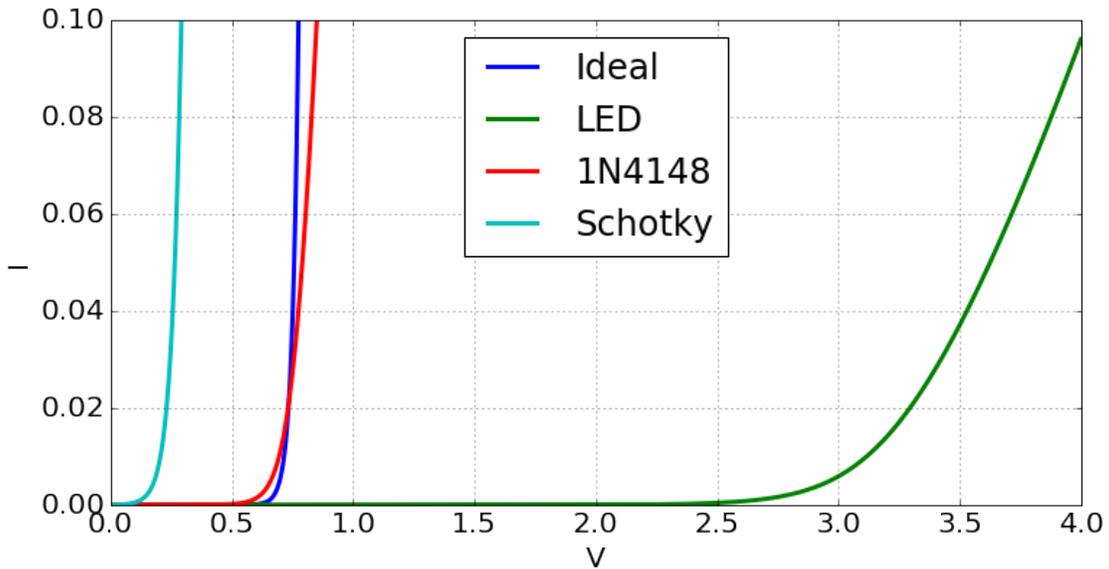


Figura 16: Circuito básico del Diodo

dado que la fuente de corriente puede tener cualquier valor de voltaje (teóricamente), si controlamos la corriente I_D entonces obtendremos una variación en el voltaje del diodo V_D , la cual debe de ser similar al expresado por la expresión:

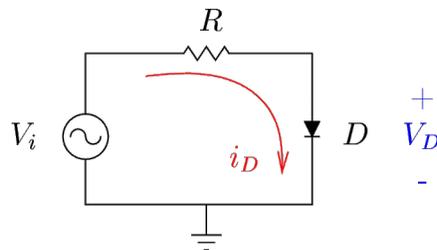
$$I_D = I_s \left(e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1 \right) \quad (13)$$

Utilizando el program LTspice para obtener el comportamiento de diferentes diodos se obtiene la siguiente gráfica. (Los archivos son: [diodos.curvas.asc](#) el archivo de LTspice y el de [curvasdiodos.txt](#) contiene los datos que se usan en el ejemplo.



7. Circuito con un diodo

El circuito más simple con un diodo es el conocido como rectificador de media onda el cual consiste de una fuente de voltaje V_i , un resistencia R y un diodo D en serie, como se muestra en la siguiente figura



Utilizando la ley de Kirchof de voltajes y la ley de Ohm se tiene

$$V_i = I_D R + V_D \quad (14)$$

dado que los elementos estan en serie se tiene que corriente es la misma, por lo tanto es posible encontrar la corriente total con la expresión para la corriente del diodo

$$I_D = I_s \left(e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1 \right) \quad (15)$$

sustituyendo 15 en 14

$$V_i = I_s \left(e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1 \right) R + V_D \quad (16)$$

La expresión 16 es una ecuación trascendente (Una ecuación trascendente es una igualdad entre dos expresiones matemáticas en las que aparecen una o más incógnitas relacionadas mediante operaciones matemáticas, que no son únicamente algebraicas, y cuya solución no puede obtenerse empleando solo las herramientas propias del álgebra.) lo cual no permite encontrar una solución analítica.

Para resolver una ecuación trascendente se utilizan dos métodos que son: por estimación y gráfico.

7.1. Estimación

Considerese una expresión del tipo

$$y = f(x, p) \quad (17)$$

donde y es una salida conocida (Variable dependiente), x es una entrada (Variable independiente) y p son un conjunto de parámetros. Si $f(x, p)$ es una ecuación que no tiene solución analítica, entonces no se puede calcular su solución exacta. Sin embargo, es posible estimar una solución aproximada \hat{y} con el método de estimación. En este método se asignan valores a la incognita hasta que el error (E_y) entre la solución exacta y y la solución estimada \hat{y} es menor a un cierto valor establecido. Esto se puede expresar como:

$$E_y = |y - \hat{y}| \leq k$$

Por lo que este metodo requiere que los coeficientes de la expresión a evaluar sea conocidos.

7.1.1. Ejemplo 1

En el caso de la expresión 16 consideramos que $R = 2k\Omega$, $V_i = 5$, $n = 2$, y $V_T = 26mV$. En la siguiente gráfica se muestra el valor estimado de la expresión 16 al sustituir valores de los parámetros y considerar $0 \leq V_D \leq 1$

De la gráfica anterior se observa que para valores de V_D mayores a 0.8, la salida estimada es mucho mayor que la salida esperada, por lo que haciendo una nueva iteración $0 \leq V_D \leq 0,7$, se obtiene la siguiente gráfica

De los resultados mostrados en la gráfica anterior se puede concluir que el valor estimado se aproxima al valor deseado cuando $0,5 \leq V_D \leq 0,6$, para realizar una mejor aproximación se utiliza el error de estimación

$$E = V_i - \hat{V}_i \quad (18)$$

donde \hat{V}_i es el valor estimado a través de la expresión 16

De la gráfica anterior se observa que el error E es igual a 0 cuando $0,55 \leq V_D \leq 0,56$, por lo que haciendo una nueva aproximación es posible encontrar un valor exacto. El siguiente paso es proponer que el intervalo $0,55 \leq V_D \leq 0,56$.

<IPython.core.display.HTML object>

Se observa que el error $E = 0$ se encuentra en el intervalo $0,556 \leq V_D \leq 0,557$, para encontrar un error con una buena precisión se tiene que realizar este proceso más iteraciones, en este caso con ayuda de los **métodos numéricos** se cuenta con algoritmos que hacen posible el cálculo de estos valores de forma automática.

Utilizando el método de bisección para obtener el valor donde el error es 0, se tiene que el valor del voltaje del diodo V_D encontrado es: $\{\{\text{estimación}\}\}$.

Al utilizar este valor en la expresión 15 se tiene que el valor de corriente en el diodo I_d es de: $\{\{I_d\}\}$

7.2. Aproximación por una constante de V_d

En general la expresión 13 nos permite un cálculo exacto del valor de la corriente y voltaje del diodo. Sin embargo, como se muestra en la expresión 16 al utilizar la solución exacta se tiene una ecuación trascendental, la cual no se puede resolver de forma analítica. Por lo anterior, por convención se considera que el valor de V_d es constante, el valor de la constante depende del tipo de diodo a utilizar. El valor de V_d es un máximo a partir del cual la mayoría de los diodos de cierto tipo funcionan de forma similar, en el caso de los diodos de silicio o rectificador se considera que $V_d \approx 0,7$.

Si se considera el ejemplo anterior, con $V_d = 0,7$ entonces de la expresión 14 se tiene

$$I_d = \frac{V_i - V_d}{R} \quad (19)$$

utilizando los valores dados en el ejemplo, se tiene que:

$$I_d = 4.2999999999999995e-05$$

El resultado anterior es muy similar al que se obtuvo en el ejemplo con la fórmula de Shockley. Sin embargo, hay que tener cuidado que la aproximación de V_d no necesariamente se cumple para valores de R extremos (muy pequeños o muy grandes).

Considerando la expresión 19 con $V_d = 0,7$ y diferentes valores de R , se tiene que el valor aproximado de I_d es:

<IPython.core.display.HTML object>

Para ilustrar esta aproximación se utiliza el simulador LTspice y se simula para el mismo intervalo de resistencia, obteniendo los datos de la gráfica siguiente:

<IPython.core.display.HTML object>

8. Análisis de DC

En el caso de un circuito con diodos el sistema se puede analizar en dos partes, cuando el diodo está polarizado en directa y cuando está polarizado en inversa.

8.1. Polarización directa

En el caso ideal se tiene que un circuito con un diodo que está polarizado en directa el diodo se puede considerar como un interruptor cerrado, tal como se muestra en la siguiente circuito

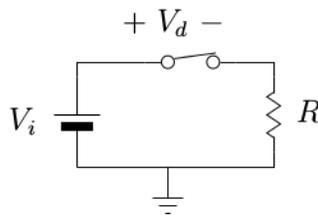


Figura 17: Circuito con un diodo polarizado en directa

donde $V_d = 0$ y por lo tanto la corriente se obtiene con la expresión

$$I_d = \frac{V_i}{R} \quad (20)$$

Sin embargo, la expresión anterior es incorrecta si consideramos que la corriente dada en el diodo es determinada por la expresión 13. En general del ejemplo anterior se observa que es difícil calcular el valor de la corriente con las ecuaciones exactas, por lo que se simplifica el problema que una vez establecida la corriente de DC, el voltaje del diodo $V_d = V_k$ donde $V_k \geq 0$, siendo el valor de V_k determinado de forma heurística en función del tipo de diodo, por lo que una función aproximada para calcular la corriente sería:

$$I_d = \frac{V_i - V_k}{R} \quad (21)$$

Si consideramos la expresión 21 en el ejemplo 1, considerando que $V_k = 0,7$ se tiene

$$I_d = \frac{V_i - V_k}{R} = \frac{(5 - 0,7)V}{2k\Omega} = 2,15mA$$

lo cual solo tiene un error de $0,08mA$ con respecto al cálculo utilizando la expresión 13

8.2. Polarización inversa

En el caso de la polarización inversa se tiene que el diodo se puede sustituir con un interruptor abierto como se muestra en la figura que sigue:

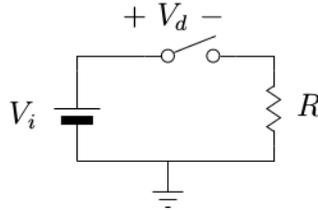


Figura 18: Circuito con un diodo polarizado en inversa

en el caso del circuito anterior se tiene que el voltaje en la resistencia $V_R = 0$, ya que no fluye corriente alguna, por lo que se tiene que $V_d = V_i$. Lo anterior será valido mientras no se alcance el voltaje de conducción en inversa (Voltaje de avalancha V_a o Voltaje Zener V_z), ya que al alcanzar el voltaje de conducción en inversa el diodo se comporta de forma similar cuando esta polarizado en directa. Solo que ahora el voltaje utilizado para la expresión 21 no es V_k sino el voltaje de avalancha V_A

$$I_d = \frac{V_i - V_A}{R} \quad (22)$$

8.3. Circuitos con multiples diodos

En la figura 19, se muestra la configuración conocida como antiparalelo. Está configuración permite controlar que el voltaje se reduzca al del diodo polarizado, sin importar la polaridad del voltaje de alimentacion

<IPython.core.display.HTML object>

8.4. Circuito Rectificador de Onda Completa

El circuito rectificador de onda completa se muestra en la siguiente figura.

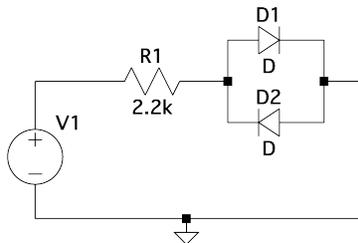


Figura 19: Diodo en antiparalelo

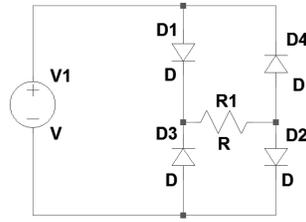


Figura 20: Rectificador de Onda Completa

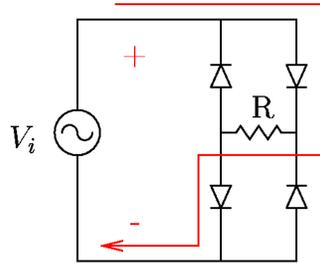


Figura 21: Rectificador de Onda Completa Ciclo Positivo

8.4.1. Ciclo positivo

8.4.2. Ciclo negativo

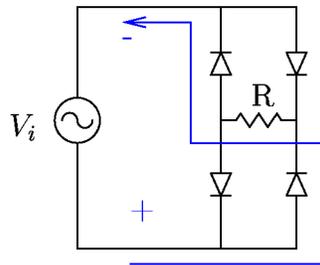


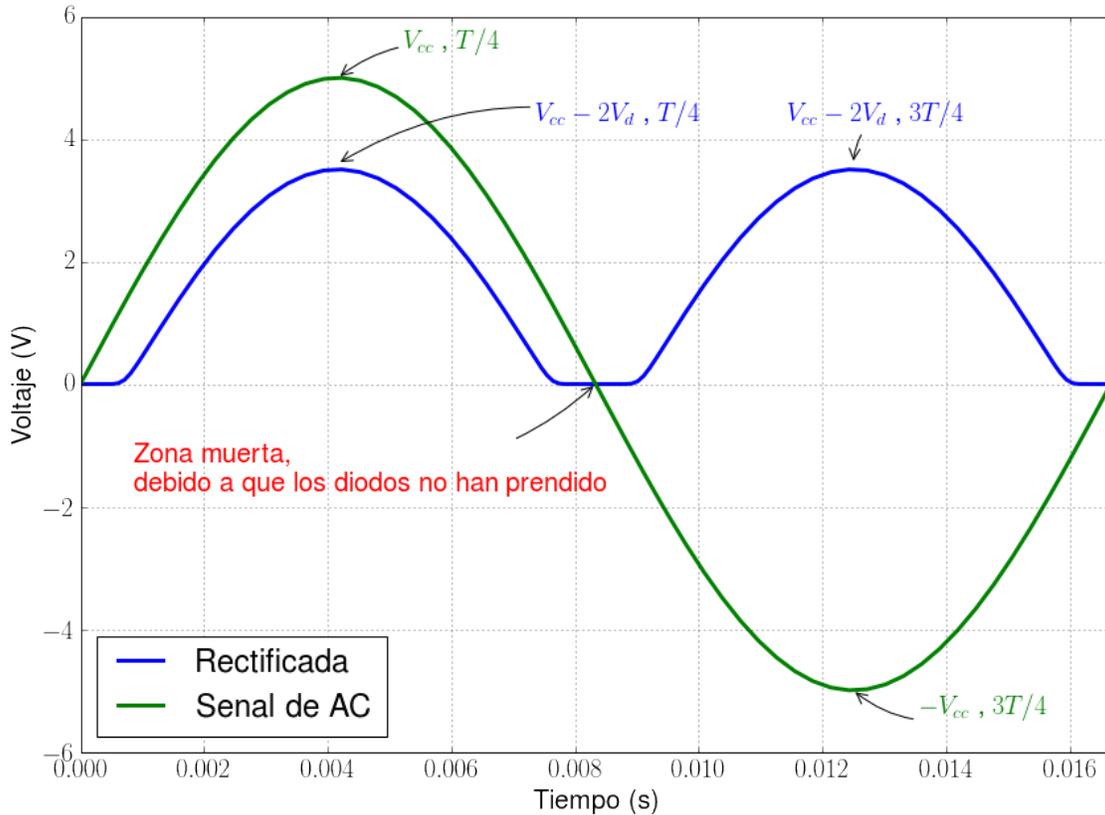
Figura 22: Rectificador de Onda Completa Ciclo Negativo

9. Fuente de voltaje de CD con diodos

9.1. Transformador

Se denomina transformador a un dispositivo eléctrico que permite aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico de corriente alterna, manteniendo la potencia. La potencia que ingresa al equipo, en el caso de un transformador ideal (esto es, sin pérdidas), es igual a la que se obtiene a la salida. Las máquinas reales presentan un pequeño porcentaje de pérdidas, dependiendo de su diseño y tamaño, entre otros factores.

El transformador es un dispositivo que convierte la energía eléctrica alterna de un cierto nivel de tensión, en energía alterna de otro nivel de tensión, basándose en el fenómeno de la



inducción electromagnética. Está constituido por dos o más bobinas de material conductor, devanadas sobre un núcleo cerrado de material ferromagnético, pero aisladas entre sí eléctricamente. La única conexión entre las bobinas la constituye el flujo magnético común que se establece en el núcleo. El núcleo, generalmente, es fabricado bien sea de hierro o de láminas apiladas de acero eléctrico, aleación apropiada para optimizar el flujo magnético. Las bobinas o devanados se denominan primario y secundario según correspondan a la entrada o salida del sistema en cuestión, respectivamente. También existen transformadores con más devanados; en este caso, puede existir un devanado “terciario”, de menor tensión que el secundario.

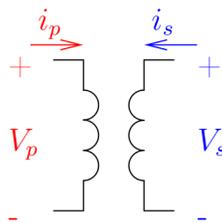


Figura 23: Transformador

En un transformador ideal, en el que el acoplamiento magnético es perfecto se tiene que la energía de la bobina primaria es reflejada totalmente en la bobina secundaria, por lo que

se tiene:

$$V_p i_p = V_s i_s \quad (23)$$

de la expresión 23 se puede relacionar el voltaje de las bobinas con el numero de vueltas de las mismas bobinas, a través de la expresión

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} = \frac{i_s}{i_o} = \sqrt{\frac{L_p}{L_s}} = m \quad (24)$$

en la expresión anteriores se tiene que la relación del primario y del secundario de un transformador, se puede expresar por el numero de vueltas de las bobinas N_x o la inductancia de cada uno de los transformadores L_x . Si conocemos el valor de la L_p entonces de 24 se tiene

$$L_s = \frac{L_p}{m^2} \quad (25)$$

9.2. Fuente de Voltaje de CD

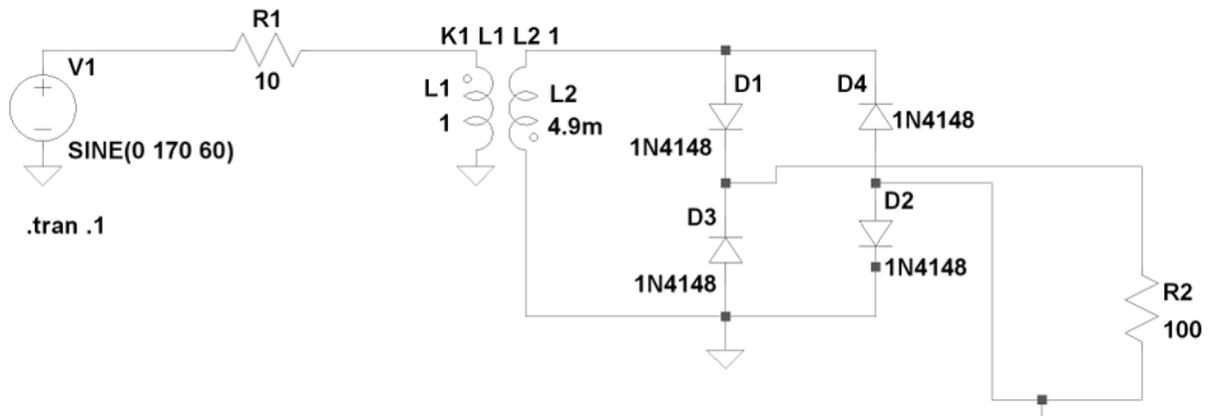
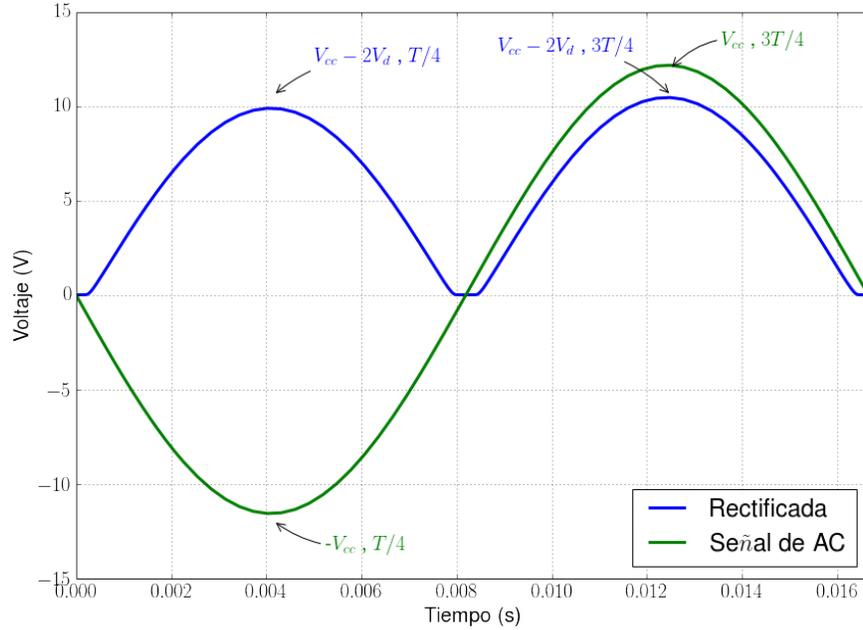


Figura 24: Fuente de DC simple

El circuito de la figura anterior solamente rectificara una señal de AC con voltaje V_p a la entrada del primario del transformador a $V_s - 2 * V_d$ y una frecuencia de $2f_p$, donde V_s es el voltaje en el secundario del transformador, V_d es el voltaje de disparo del diodo y f_p es la frecuencia de la señal en el primario del transformador. Que es el comportamiento de un puente de diodos.



Para lograr una señal de DC, se agrega un capacitor C en paralelo a la Resistencia R_2 , tal como se muestra en la siguiente figura

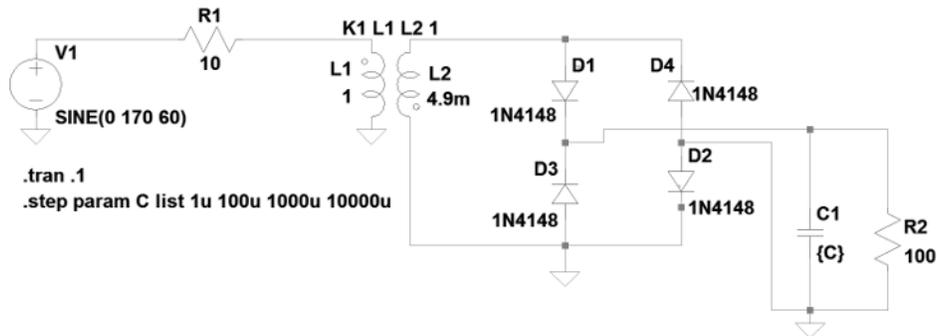


Figura 25: Fuente de DC simple

El comportamiento de este circuito se muestra en la siguiente figura:

El comportamiento mostrado en la figura anteriores se puede considerar el voltaje de salida (grafica verde) V_c tiene un componente de DC (offset) más un componente de AC llamado voltaje de rizo.

Se tiene que el voltaje máximo del capacitor V_m es:

$$V_m = V_s - 2V_d \quad (26)$$

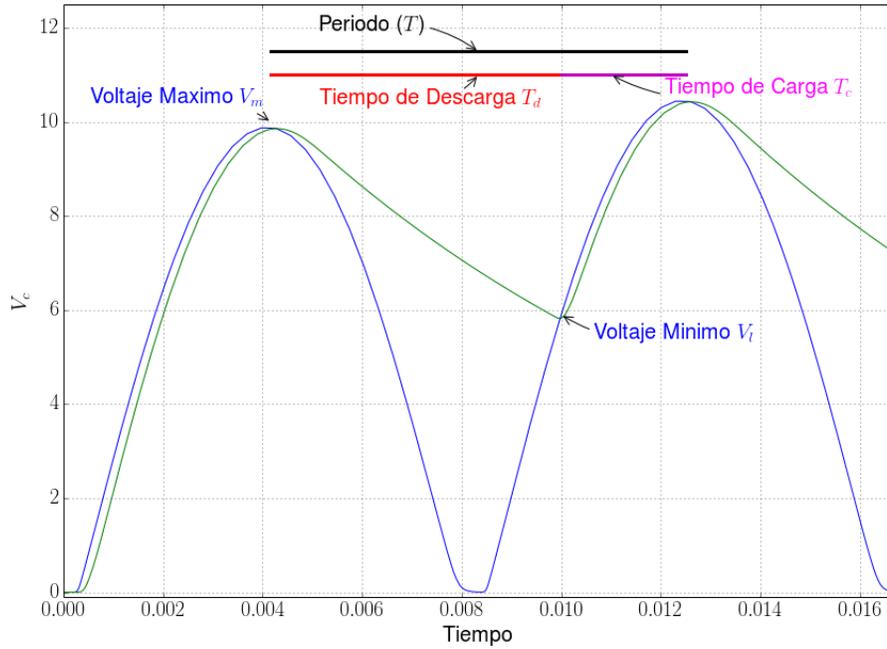


Figura 26: Salida Filtro

el voltaje mínimo V_l es determinado por la expresión:

$$V_l = V_m e^{-\frac{T_d}{RC}} \quad (27)$$

a partir de las expresiones 26 y 27 se define el voltaje de rizo como:

$$V_r = V_m - V_l = V_m - V_m e^{-\frac{T_d}{RC}} = V_m (1 - e^{-\frac{T_d}{RC}}) \quad (28)$$

la expresión 28 es una ecuación trascendente por lo que no tiene solución analítica, por lo que para obtener una solución aproximada se utiliza la expansión en series de Taylor de la siguiente manera:

$$e^{-\frac{T_d}{RC}} \approx 1 - \frac{T_d}{RC} \quad (29)$$

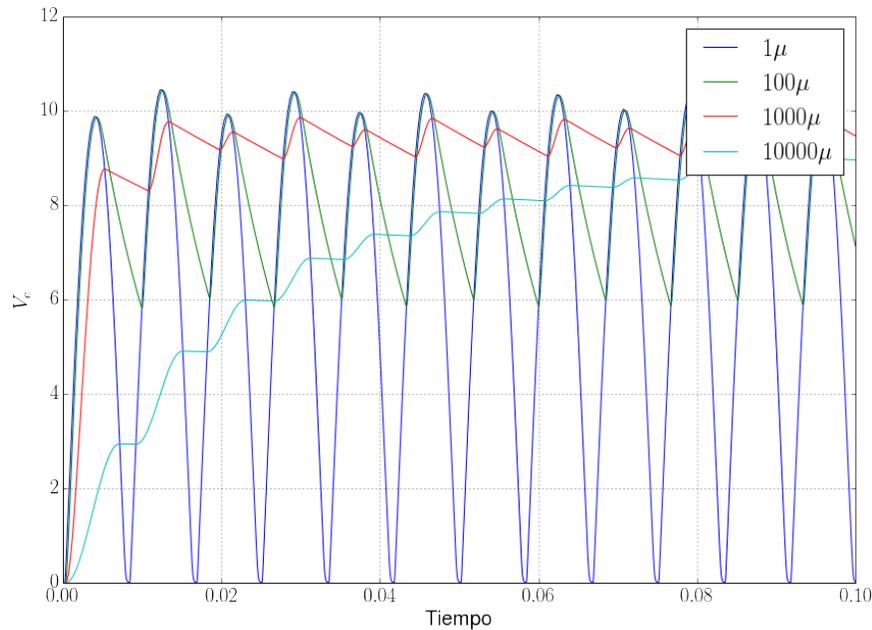
sustituyendo 29 en 28 se tiene

$$V_r \approx V_m \frac{T_d}{RC} \quad (30)$$

Se tiene que el tiempo de descarga del capacitor $T_d \leq T$, por lo que se considera que

$$V_r \leq V_m \frac{T}{RC} \quad (31)$$

Se encontraron 4 pasos en la simulacion
[902, 916, 969, 1067]



10. Circuito Modulador de AM

Uno de los primeros circuitos usados en la electrónica fueron los relacionados con las comunicaciones, siendo la [modulación en amplitud](#) una de las primeras técnicas utilizadas. Uno de los circuitos teóricos más fáciles de usar es el que se muestra a continuación.

11. Transistor de Unión Bipolar (BJT)

11.1. Introducción

El transistor es un dispositivo electrónico semiconductor que cumple funciones de amplificador, oscilador, conmutador o rectificador. El término *transistor* es la contracción en inglés de transfer resistor (*resistencia de transferencia*). Actualmente se encuentran prácticamente en todos los aparatos electrónicos de uso diario: radios, televisores, reproductores de audio y video, relojes de cuarzo, computadoras, lámparas fluorescentes, tomógrafos, teléfonos celulares, etc.

El transistor bipolar fue inventado en los Laboratorios Bell de EE. UU. en diciembre de 1947 por John Bardeen, Walter Houser Brattain y William Bradford Shockley, quienes fueron galardonados con el Premio Nobel de Física en 1956. Fue el sustituto de la válvula termoiónica de tres electrodos, o triodo.

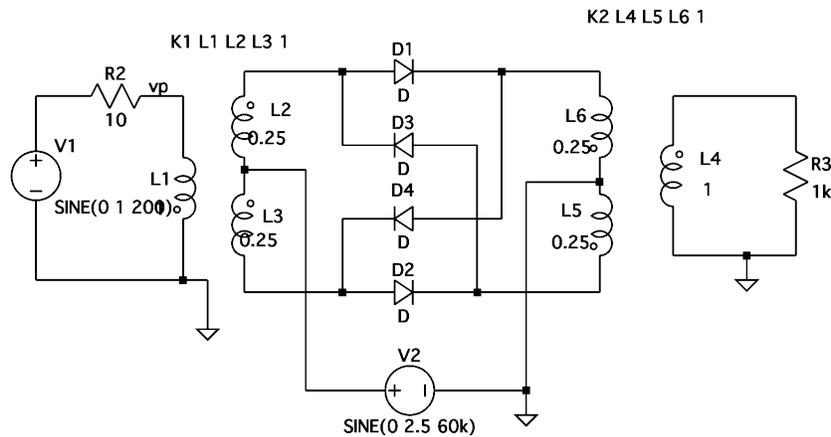


Figura 27: Modulador AM con un diodo

El transistor de efecto de campo fue descubierto antes que el transistor (1930), pero no se encontró una aplicación útil ni se disponía de la tecnología necesaria para fabricarlos masivamente. Es por ello que al principio se usaron transistores bipolares y luego los denominados transistores de efecto de campo ([FET]). En los últimos, la corriente entre el surtidor o fuente (source) y el drenaje (drain) se controla mediante el campo eléctrico establecido en el canal. Por último, apareció el MOSFET (transistor FET de tipo Metal-Óxido-Semiconductor). Los MOSFET permitieron un diseño extremadamente compacto, necesario para los circuitos altamente integrados (CI).

Hoy la mayoría de los circuitos se construyen con tecnología CMOS. La tecnología CMOS (Complementary MOS ó MOS Complementario) es un diseño con dos diferentes MOSFET (MOSFET de canal n y p), que se complementan mutuamente y consumen muy poca corriente en un funcionamiento sin carga.

11.2. Triodo

Se denomina triodo a la válvula termoiónica de tres electrodos, ánodo, cátodo y rejilla de control.

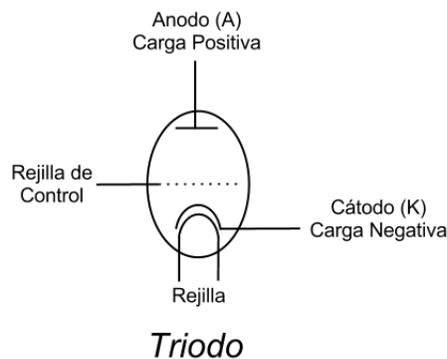


Figura 28: Triodo

La tensión aplicada a la rejilla hace que el flujo de electrones desde el cátodo al ánodo sea mayor o menor. Esto es muy interesante pues aplicando una señal de muy débil intensidad entre cátodo y rejilla podemos conseguir que la variación del flujo de electrones entre éste y el ánodo sea muy grande. Es decir, con una pequeña tensión controlamos una gran corriente. A ese fenómeno se le llama amplificación. Por eso, el triodo es un amplificador.

11.3. Estructura básica.

El transistor consta de un sustrato (usualmente silicio) y tres partes dopadas artificialmente (contaminadas con materiales específicos en cantidades específicas) que forman dos uniones bipolares, el emisor que emite portadores, el colector que los recibe o recolecta y la tercera, que está intercalada entre las dos primeras, modula el paso de dichos portadores (base).

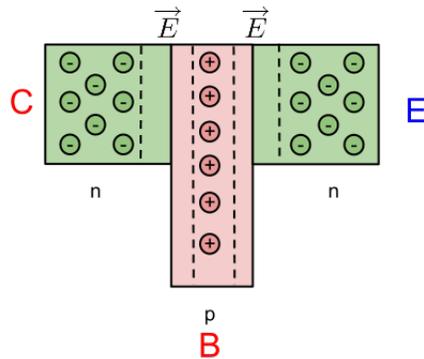


Figura 29: Estructura Básica del BJT

A diferencia de las válvulas, el transistor es un dispositivo controlado por corriente y del que se obtiene corriente amplificada. En el diseño de circuitos a los transistores se les considera un elemento activo, a diferencia de los resistores, condensadores e inductores que son elementos pasivos. "Su funcionamiento sólo puede explicarse mediante mecánica cuántica." De manera simplificada, la corriente que circula por el colector es función amplificada de la que se inyecta en el emisor, pero el transistor sólo gradúa la corriente que circula a través de sí mismo, si desde una fuente de corriente continua se alimenta la base para que circule la carga por el colector, según el tipo de circuito que se utilice. El factor de amplificación o ganancia logrado entre corriente de colector y corriente de base, se denomina "Beta del transistor".

$$\beta = \frac{i_c}{i_b} \quad (32)$$

Otros parámetros a tener en cuenta y que son particulares de cada tipo de transistor son:

- Tensiones de ruptura de Colector Emisor.
- Tensiones de ruptura de Base Emisor.
- Tensiones de ruptura de Colector Base.

- Potencia Máxima, disipación de calor.
- Frecuencia de trabajo.

Además, de varias tablas donde se grafican los distintos parámetros tales como corriente de base, tensión Colector Emisor, tensión Base Emisor, corriente de Emisor, etc. Los tres tipos de esquemas (configuraciones) básicos para utilización analógica de los transistores son:

- Emisor común.
- Colector común.
- Base común.

11.4. Funcionamiento

En una configuración normal, la unión emisor-base se polariza en directa y la unión base-colector en inversa. Debido a la agitación térmica los portadores de carga del emisor pueden atravesar la barrera de potencial emisor-base y llegar a la base. A su vez, prácticamente todos los portadores que llegaron son impulsados por el campo eléctrico que existe entre la base y el colector.

Un transistor NPN puede ser considerado como dos diodos con la región del ánodo compartida.

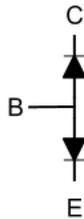


Figura 30: Modelo con diodos

En una operación típica, la unión base-emisor está polarizada en directa y la unión base-colector está polarizada en inversa. En un transistor NPN, por ejemplo, cuando una tensión positiva es aplicada en la unión base-emisor, el equilibrio entre los portadores generados térmicamente y el campo eléctrico repelente de la región agotada se desbalancea, permitiendo a los electrones excitados térmicamente inyectarse en la región de la base. Estos electrones "vagan" a través de la base, desde la región de alta concentración cercana al emisor hasta la región de baja concentración cercana al colector. Estos electrones en la base son llamados portadores minoritarios debido a que la base está dopada con material P, los cuales generan "huecos" como portadores mayoritarios en la base.

Utilizando la ley de Kirchhoff se tiene que;

$$i_e = i_c + i_b, \quad (33)$$

sustituyendo (32) en (33) se tiene que

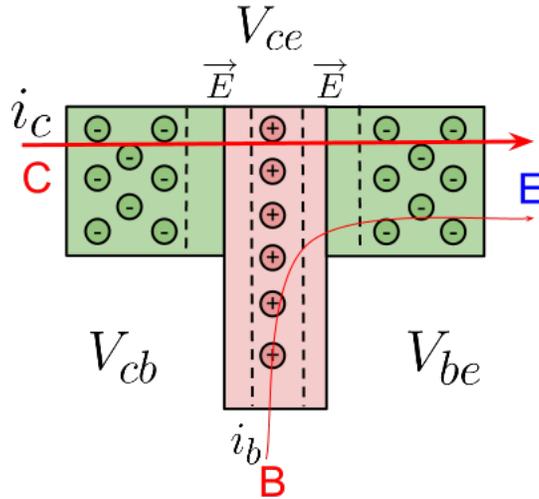


Figura 31: Polarizacion del BJT

$$i_b = \frac{i_e}{\beta + 1} \quad (34)$$

y

$$i_c = i_e \frac{\beta}{\beta + 1} \quad (35)$$

La región de la base en un transistor debe ser constructivamente delgada, para que los portadores puedan difundirse a través de esta en mucho menos tiempo que la vida útil del portador minoritario del semiconductor, para minimizar el porcentaje de portadores que se recombinan antes de alcanzar la unión base-colector. El espesor de la base debe ser menor al ancho de difusión de los electrones.

11.5. Curvas Características

El transistor en un dispositivo no lineal, por tanto es necesaria la representación gráfica de sus propiedades. Como la impedancia de entrada del transistor para cualquiera de las configuraciones es finita, se hace necesaria una curva característica de entrada y también una curva característica que represente las propiedades de salida del circuito. De modo que, para describir completamente el comportamiento del transistor se necesitan 2-conjuntos de curvas.

Las curvas características dependen de la configuración en la que se utilice el transistor, en el caso de utilizar la configuración de emisor común en un transistor NPN, se tiene que la curva de entrada es dada por V_{be} e i_b , y un bosquejo de curva característica de entrada se muestra en la siguiente figura

Los transistores de unión bipolar tienen diferentes regiones operativas, definidas principalmente por la forma en que son polarizados.

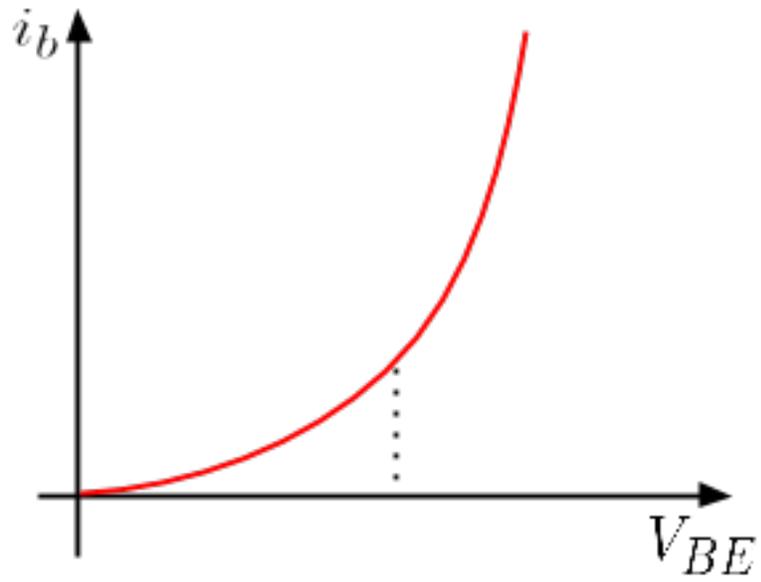


Figura 32: Curva de Base-Emisor

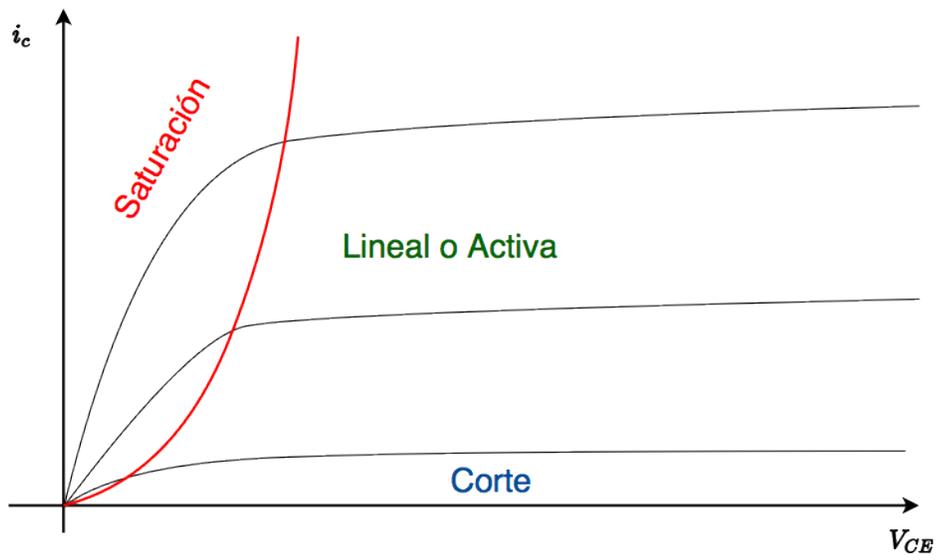


Figura 33: Curva de Colector-Emisor

11.5.1. Región activa en cuanto a la polaridad

En esta región el comportamiento del transistor BJT se puede aproximar por las expresiones (32) y (33). Cuando un transistor no está ni en su región de saturación ni en la región de corte entonces está en una región intermedia, la región activa. En la región activa la hipótesis más importante es:

$$I_c = \beta I_b \quad (36)$$

donde I_c es la corriente de colector, I_b es la corriente de base y β es la ganancia de corriente (dato proporcionado por el fabricante) y de los demás elementos que se encuentren conectados al transistor. Esta región es la más importante si lo que se desea es utilizar el transistor como un amplificador de señal.

11.5.2. Región inversa

Al invertir las condiciones de polaridad del funcionamiento en modo activo, el transistor bipolar entra en funcionamiento en modo inverso. En este modo, las regiones del colector y emisor intercambian roles. Debido a que la mayoría de los BJT son diseñados para maximizar la ganancia de corriente en modo activo, el parámetro beta en modo inverso es drásticamente menor al presente en modo activo.

11.5.3. Región de corte

Un transistor está en corte cuando:

$$I_c = I_e = 0 \quad (37)$$

En este caso el voltaje entre el colector y el emisor del transistor es el voltaje de alimentación del circuito. (como no hay corriente circulando, no hay caída de voltaje, ver Ley de Ohm). Este caso normalmente se presenta cuando $I_b = 0$. De forma simplificada, se puede decir que en la unión CE se comporta como un circuito abierto, ya que la corriente que lo atraviesa es cero.

11.5.4. Región de saturación

Un transistor está saturado cuando:

$$I_c \approx I_e = I_{max}$$

En este caso la magnitud de la corriente depende del voltaje de alimentación del circuito y de las resistencias conectadas en el colector o el emisor o en ambos, ver Ley de Ohm. Se presenta cuando la diferencia de potencial entre el colector y el emisor desciende por debajo del valor umbral $V_{CE(sat)}$. Cuando el transistor está en saturación, la relación lineal de amplificación $I_c = \beta I_b$ no se cumple. De forma simplificada, se puede decir que la unión CE se comporta como un cable, ya que la diferencia de potencial entre C y E es muy próxima a cero.

Como se puede ver, la región activa es útil para la electrónica analógica (especialmente útil para amplificación de señal) y las regiones de corte y saturación, para la electrónica digital, representando el estado lógico alto y bajo, respectivamente.

11.6. Configuraciones Básicas

Un transistor, al tener tres terminales, se puede conectar de varias formas. Cada manera de conectarlo se llama configuración, y según como esté unido se va a comportar de una forma u otra. Existen tres tipos de configuraciones básicas para el transistor BJT, a saber: *emisor común (EC)*, *base común (BC)* y *colector común (CC)*. En la ilustración correspondiente vemos representados estos tres tipos de circuitos, prescindiendo de cualquier otro elemento, como pueden ser baterías, capacitores, etc.

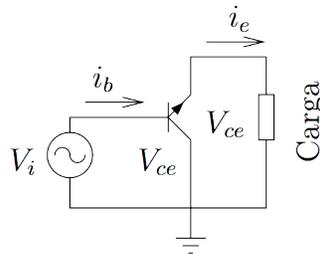


Figura 34: Polarización Directa

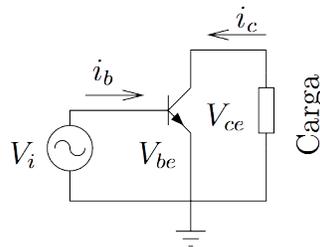


Figura 35: Polarización Inversa

11.6.1. Base Común

Esta configuración es la menos usada de las tres configuraciones básicas de amplificadores, proporciona alta ganancia de voltaje sin ganancia de corriente. La base es común a la entrada (emisor-base) y a la salida (colector-base).

Para describir el comportamiento, se requiere de dos conjuntos de características, uno para la entrada y otro para la salida. En siguiente figura, se muestra el conjunto de características de entrada para el amplificador de base común, relacionando la corriente de entrada (IE) con el voltaje entrada (VBE) para varios niveles de voltaje de salida (VCB)

El conjunto de características de salida para el amplificador de base común, relacionara a la corriente de salida (IC) con el voltaje de salida (VCB) para varios niveles de corriente de entrada (IE). Está relación se muestra en la siguiente figura.

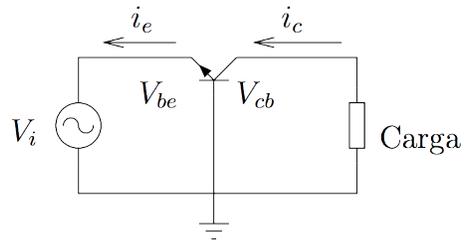


Figura 36: Base Común

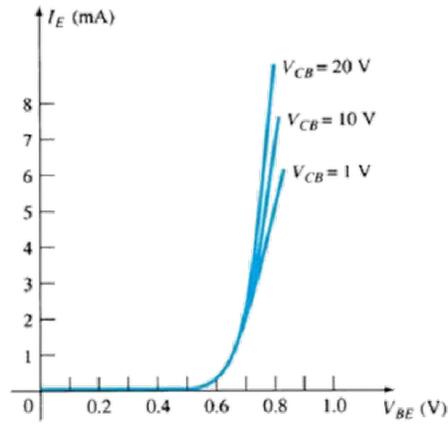


Figura 37: Curva de Entrada

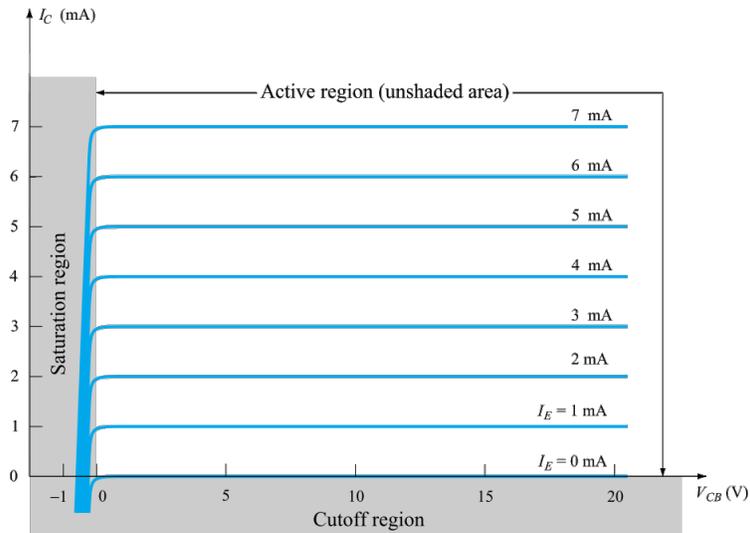


Figura 38: Curva de salida

El conjunto de características de salida tienen tres regiones operativas del transistor bipolar, como se indica en la figura anterior.

La región activa (Active region), la región de corte (Cutoff region) y la región de saturación (Saturation region).

APLICACIONES: Debido a que cuenta con una baja resistencia de entrada este amplificador es el tipo más apropiado para ciertas aplicaciones de alta frecuencia en donde las fuentes tienden a presentar muy bajas resistencias de salida.

12. Circuito con un Transistor BJT

Este es un circuito básico dentro del estudio de amplificadores con un transistor con la teoría de amplificadores de baja potencia y baja frecuencia.

Una de sus principales características es la que se conoce como **Insensibilidad a variaciones de la β** , la cual permite que el comportamiento del circuito no varíe significativamente ante pequeñas variaciones de la β . Sin embargo, para lograr esto se requiere cumplir ciertas condiciones que dificultan el diseño del circuito.

El esquema del circuito se muestra en la siguiente figura

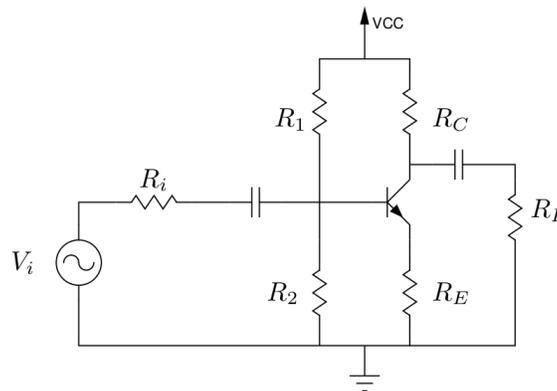


Figura 39: Diodo de Vacío

De forma general se puede considerar que el valor de los capacitores de acople es muy grande (idealmente $C \rightarrow \infty$) de forma tal que la impedancia del capacitor X_c es:

$$X_c = \begin{cases} \infty & w = 0 \\ 0 & w \neq 0 \end{cases} \quad (38)$$

De la expresión (38), entonces podemos concluir que la energía proporcionada por la fuente de DC se encuentra contenida únicamente en la parte del circuito relacionado con el transistor. Por lo tanto es posible analizar el circuito considerando primero la fuente de DC y luego agregar los efectos de la fuente de AC de forma similar al teorema de superposición de fuentes, con la diferencia que al analizar el efecto de la fuente de AC se considera que el transistor mantiene el efecto de la fuente de DC llamado punto de operación Q .

12.1. Analisis de DC

El circuito más simple con un transistor es el que se muestra en la siguiente figura

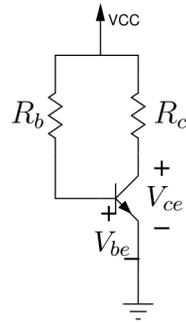


Figura 40: Circuito transistor

Al analizar el circuito anterior por medio del análisis de mallas, se tiene que:

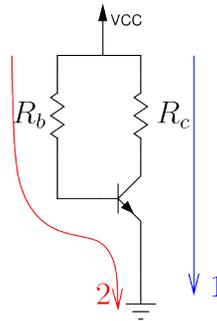


Figura 41: Lazos de corriente

de este circuito se obtienen para la maya 1 la expresión (39):

$$V_{cc} = V_{R_c} + V_{ce} \quad (39)$$

de la maya 2 se obtiene la expresión (40)

$$V_{cc} = V_{R_b} + V_{be} \quad (40)$$

Si suponemos que el transistor se encuentra en la region lineal entonces se tiene que:

$$i_c = \beta i_b \quad (41)$$

$$i_e = i_c + i_b \quad (42)$$

$$i_e = \alpha i_c \quad (43)$$

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} \quad (44)$$

Considerando la **ley de Ohm** en la expresión (39) se tiene que:

$$V_{cc} = i_{R_c} R_c + V_{ce} \quad (45)$$

dato que la resistencia R_c esta en serie con el transistor, entonces se puede considerar que $i_c = i_{R_c}$, por lo que la expresión (45) se puede reescribir como:

$$V_{cc} = i_c R_c + V_{ce} \quad (46)$$

En la expresión (46) se tiene que i_c y V_{ce} son parámetros del transistor y por lo tanto se consideran incognitas, lo cual lleva a que no se puede encontrar una solución única. Utilizando un análisis similar en la expresión (40) se tiene que:

$$V_{cc} = i_b R_b + V_{be} \quad (47)$$

En la expresión (47) se tiene que idelamente en un transistor de silicio $V_{be} = 0,7$, por lo que se tiene que:

$$i_b = \frac{V_{cc} + V_{be}}{R_b} \quad (48)$$

De la expresión (48) se observa que el valor de la corriente i_b es determinado por elementos externos al transistor (V_{cc} y R_b). Además, si se considera la expresión (41) en (46) entonces se tiene que el valor de i_c y de V_{ce} se determinarán por los elementos externos al transistor.

Si los elemento externos determinan los posibles valores de los parámetros del transistor (i_b, i_c y V_{ce}) entonces, sin importar el valor de β se puede representar graficamente cualquier posible valor de i_c y V_{ce} utilizando la expresión (46), se tiene que el máximo valor de i_c se obtiene cuando $V_{ce} = 0$ y su expresión es:

$$i_c = \frac{V_{cc}}{R_c} \quad (49)$$

el valor máximo de V_{ce} se obitene cuando $i_c = 0$ y su expresión es:

$$V_{ce} = V_{cc} \quad (50)$$

De las expresiones (46),(49) y (50) se puede concluir que un incremento en i_c o V_{ce} involucra un decremento en V_{ce} o i_c respectivamente. Dado que el transistor trabaja en el primer cuadrante de la grafica IV, entonces todo posible valor de i_c y V_{ce} se puede representar a través de la siguiente gráfica

La recta en la figura anterior es conocida como **Recta de Carga**, la cual se puede definir como: **La representación gráfica de todos los posibles valores de i_c y V_{ce}** . La Recta de carga, junto con las curvas características del transistor nos permiten determinar

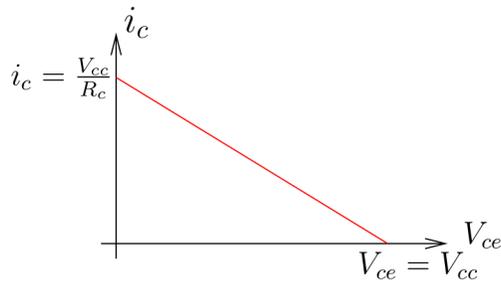


Figura 42: Recta de carga

el comportamiento del circuito, al poder determinar si en que región de funcionamiento se encuentra el transistor, es importante recordar una de las hipótesis en el análisis es considerar que el transistor se encuentra en la región lineal.

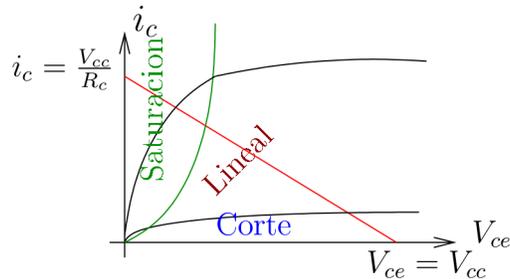


Figura 43: Recta de carga y el punto de operación

Aunque la Recta de Carga representa todos los posibles valores de i_c y V_{ce} , en la práctica se tiene que i_c y V_{ce} tienen un valor único, debido a que todos los elementos en el circuito se considera que tienen un valor constante, a ese valor específico de i_c y V_{ce} debido a los valores del circuito se le llama **Punto de Operación**.

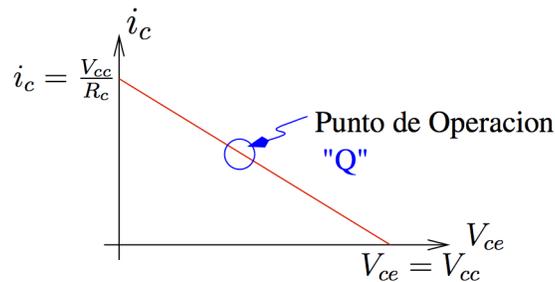


Figura 44: Evolucion en tiempo de i_c y v_{ce}

Dadas las expresiones (41) y (46) se puede considerar que V_{ce} es una señal de AC con un componente de DC (una señal de AC con un offset) considerar que i_c y V_{ce} . El punto de operación cuando la señal de AC es nula corresponde al compente de DC, y se llama **punto de reposo** es denota con la letra Q . En la siguiente figura se presenta un bosquejo de la evolución en tiempo de V_{ce} .

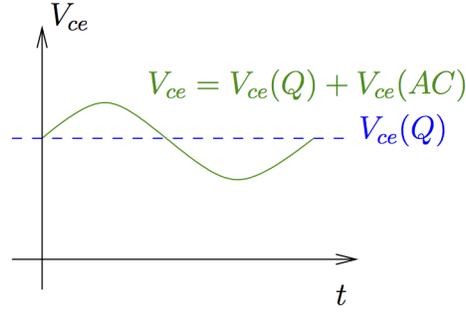


Figura 45: Recta de Carga

La amplitud de la señal V_{ce} está limitado por la expresión (50) y la naturaleza del transistor que requiere que $V_{ce} \geq 0$ por lo que se tiene que:

$$0 \leq V_{ce}(AC) \leq V_{cc} \quad (51)$$

Dado que el comportamiento de V_{ce} esta relacionado con i_c por la expresión $i_c = \frac{V_{cc} - V_{ce}}{R_c}$, entonces se concluye que i_c presente un comportamiento similar a V_{ce} pero de forma inversa, cuando V_{ce} aumenta i_c disminuye. Si consideramos el comportamiento de AC sobre la recta de carga, se tendra que el punto de reposo es el origen del sistema de AC. Además que los limites del comportamiento de AC por la expresión (51) y de forma similar i_c por:

$$0 \leq i_c(AC) \leq \frac{V_{cc}}{R_c} \quad (52)$$

graficamente se representa en la siguiente figura

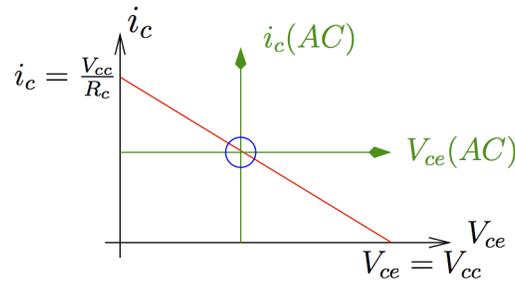


Figura 46: Comportamiento de AC y la recta de carga

Se tiene que

$$R_{th} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (53)$$

$$V_{th} = V_{cc} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (54)$$

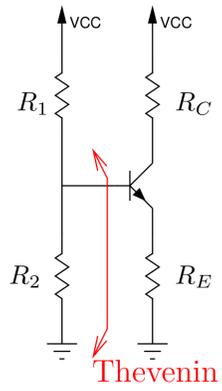


Figura 47: Circuito equivalente de thevenin

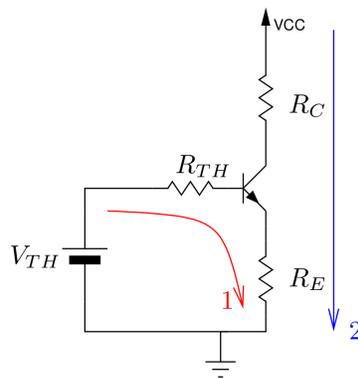


Figura 48: Circuito equivalente de thevenin

$$V_{TH} = V_{R_i} + V_{BE} + V_{RE} \quad (55)$$

$$V_{CC} = V_{R_C} + V_{CE} + V_{RE} \quad (56)$$

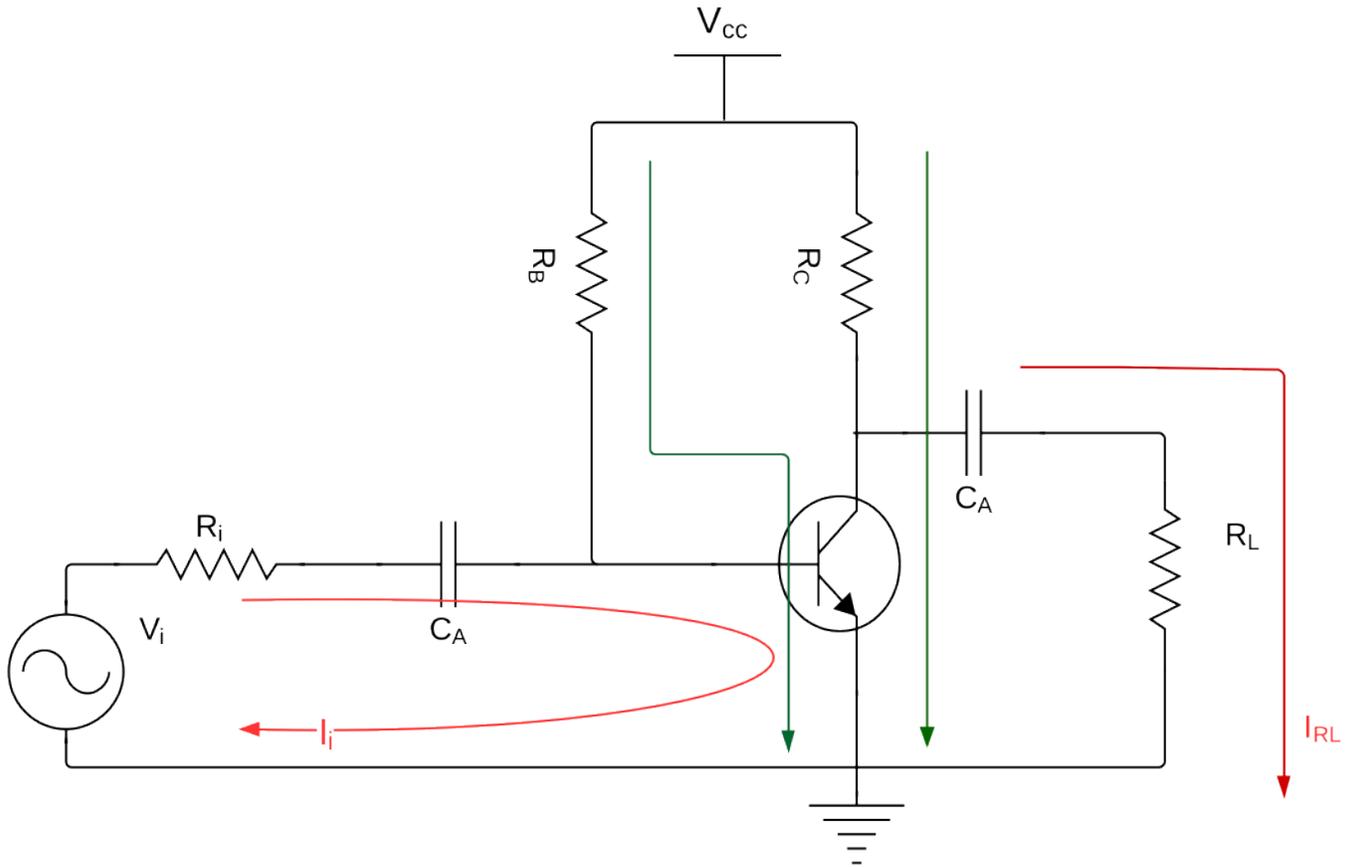


Figura 49: Circuito Amplificador con Un BJT