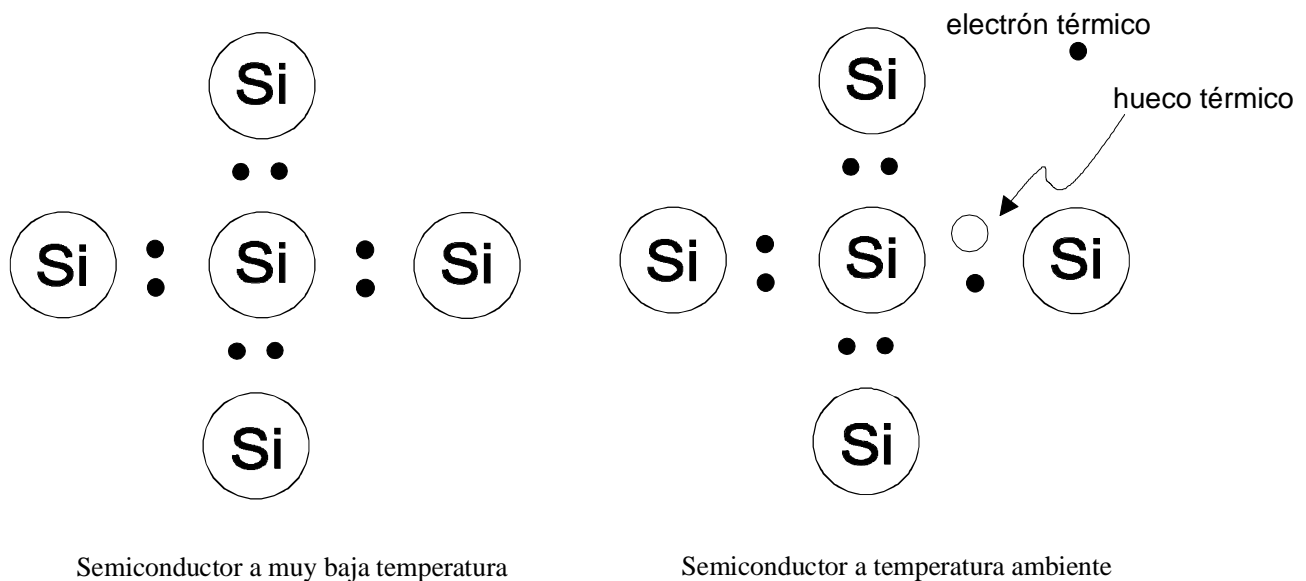


Tema 3: Semiconductores

3.1 Semiconductores intrínsecos y dopados.

Los semiconductores son sustancias cuya conductividad oscila entre 10^{-3} y 10^3 Siemen/metro y cuyo valor varia bastante con la temperatura. Los semiconductores más empleados son, por orden histórico, el **Germanio** y el **Silicio**. Un átomo de cualquiera de estos elementos posee cuatro electrones en su última capa y por ello se une a sus átomos vecinos mediante enlaces covalentes. A temperaturas bajas los cuatro electrones están formando dichos enlaces, por lo que permanecen ligados a los átomos y no pueden moverse aunque se aplique un campo eléctrico exterior, esto es, se comportan como aislantes. A temperaturas superiores, como la temperatura ambiente, hay electrones que poseen suficiente energía térmica como para saltar de su enlace covalente a niveles energéticos superiores donde no están ligados.

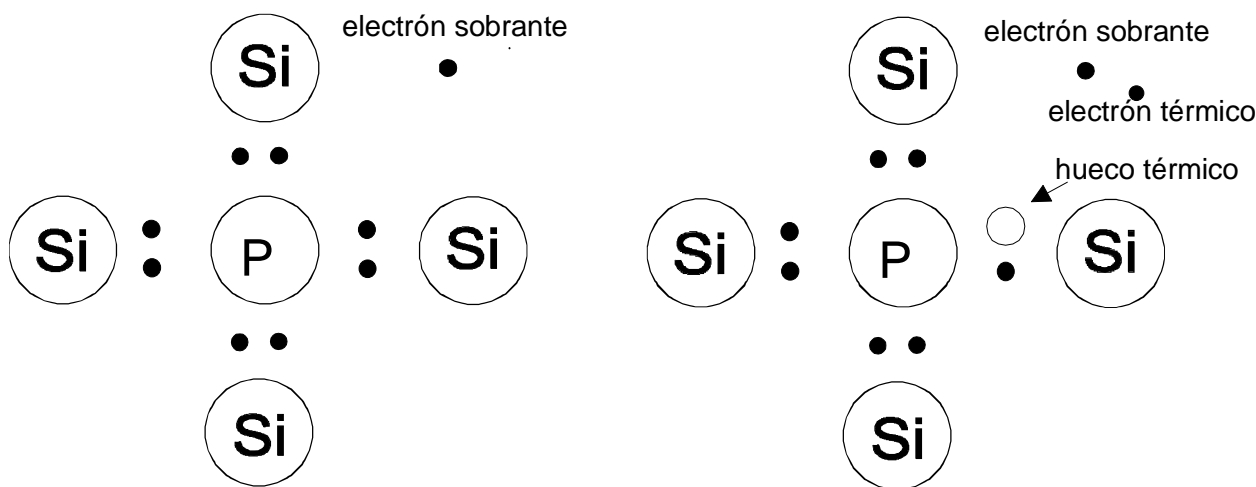
Estos electrones sí pueden moverse en caso de aplicarse un campo eléctrico exterior, y se comportan como conductores (aunque no tan buenos como los metales). Si se aumenta mas aun la temperatura, mas electrones se desligan de sus enlaces y contribuyen a la corriente eléctrica. Así pues los semiconductores aumentan su conductividad al aumentar su temperatura. Cuando un electrón salta de su enlace covalente, se dice que deja un hueco puesto que es susceptible de ser llenado por otro electrón. Los electrones liberados por energía térmica a veces también caen en los huecos que han dejado otros electrones. Existe un equilibrio dinámico entre los electrones que se liberan por energía térmica y los electrones que, vuelven a caer en los huecos, esto es, el número de electrones libres (que será exactamente igual que el número de huecos) es constante a temperatura constante. Este tipo de semiconductores se denomina semiconductores **INTRINSECOS**.



Cuando se conecta un generador a un semiconductor intrínseco, los electrones libres se mueven hacia el polo positivo del generador y los electrones del polo negativo del generador, saltan a los huecos del semiconductor y se mueven también hacia el polo positivo saltando de hueco en hueco. Esto último equivale a decir que los huecos se mueven hacia el polo negativo del generador. Se dice pues que la corriente que circula por un semiconductor posee dos contribuciones: una debida a movimiento de electrones (con carga negativa) hacia el polo positivo y otra debida a movimiento de huecos (con carga positiva) hacia el polo negativo. La carga positiva del hueco es en realidad la carga positiva del núcleo del átomo del cual ha saltado el electrón debido a la energía térmica.

Existe otro tipo de semiconductores que se obtienen artificialmente añadiendo impurezas a los semiconductores intrínsecos. Estos nuevos semiconductores se denominan **DOPADOS**. Existen dos clase de semiconductores dopados: semiconductores **N** y semiconductores **P**.

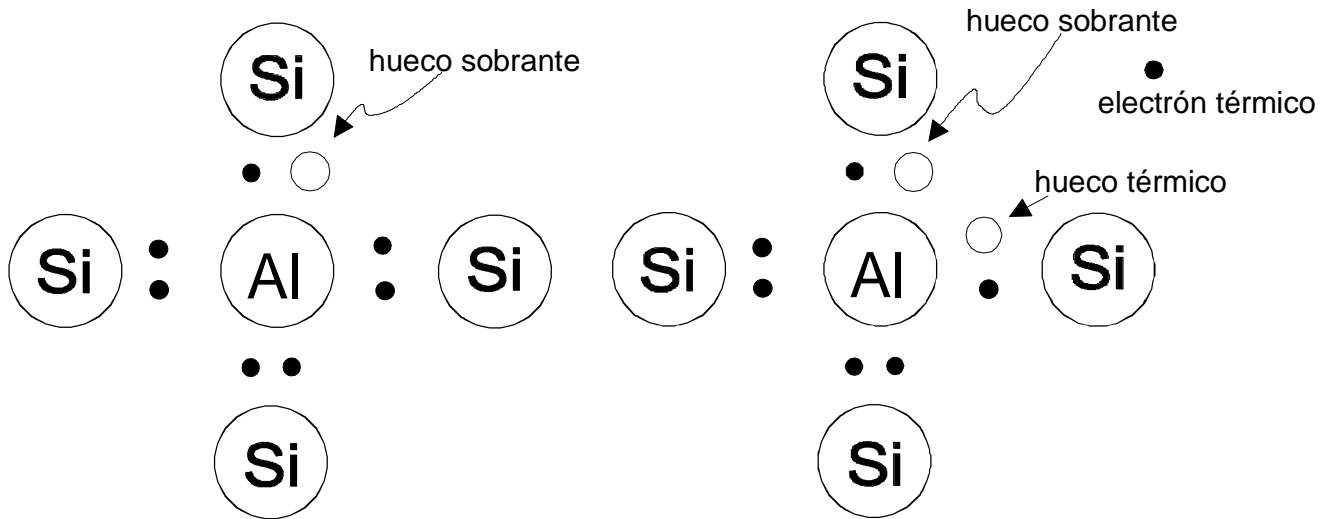
Un semiconductor **N** se obtiene añadiendo un pequeño número de átomos pentavalentes (con cinco electrones en su última capa) a un semiconductor intrínseco. Estos átomos pueden ser de **P**, **As** o **Sb**. De los cinco electrones, cuatro realizan enlaces covalentes con los átomos del semiconductor intrínseco y el otro será libre. A temperatura ambiente los electrones libres de un semiconductor **N** provienen de los electrones sobrantes de las impurezas y de los electrones térmicos (o liberados por energía térmica). Así pues, un semiconductor tipo **N** posee más electrones libres que el correspondiente semiconductor intrínseco y por tanto la conductividad será mayor. También el número de electrones libres es mayor que el de huecos. La corriente eléctrica en el semiconductor **N** es también debida a electrones y huecos. Los electrones son portadores mayoritarios y los huecos son portadores minoritarios.



Semiconductor N a muy baja temperatura

Semiconductor N a temperatura ambiente

Un semiconductor tipo **P** es el resultado de añadir un pequeño número de átomos trivalentes (con tres electrones en la última capa) a un semiconductor intrínseco. Estos tres electrones formaran enlaces covalentes con los átomos del semiconductor intrínseco. Queda por lo tanto un electrón del semiconductor intrínseco sin emparejar para formar el enlace covalente. Esto es, habrá un hueco donde cabría un electrón. Los átomos que se añaden pueden ser de **Al**, **B** o **Bi**. En un semiconductor **P** existen, pues, huecos debidos a la falta de electrones para formar enlaces covalentes, electrones libres térmicos y sus correspondientes huecos. El número de huecos será por lo tanto mayor en un semiconductor dopado **P** que en el correspondientes semiconductor intrínseco. Al conectar un generador externo, los huecos se moverán hacia el polo negativo del generador y los electrones libres hacia el polo positivo. Los huecos serán los portadores mayoritarios y los electrones térmicos los portadores minoritarios.

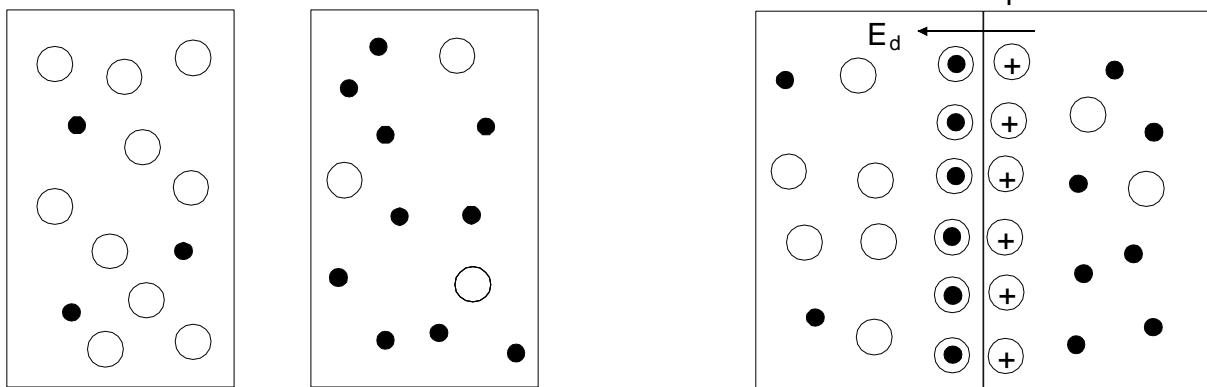


Semiconductor P a muy baja temperatura

Semiconductor P a temperatura ambiente

3.2. Unión PN: el diodo. Aplicaciones

Cuando se unen dos semiconductores dopados, **P** y **N**, aparece un fenómeno interesante: los electrones libres del semiconductor **N** que están cerca de la unión saltan a los huecos del semiconductor **P** para completar los enlaces covalentes que faltaban. Por cada electrón que salta de **N** a **P** aparece una carga negativa en la zona **P** (la carga del electrón que ha saltado) y aparece una carga positiva en **N** (la del núcleo del átomo al que pertenecía el electrón fugado). Al cabo de un cierto tiempo la zona **P**, cerca de la unión, se queda cargada negativamente y la zona **N** cargada positivamente. Estas cargas producen un campo eléctrico dirigido de **N** a **P** el cual se opone a que pasen más electrones de **N** a **P**. Los electrones que han conseguido saltar a **P** se mantienen cerca de la unión ya que son atraídos por los núcleos positivos de la zona **N**.



Semiconductores P y N antes de la unión

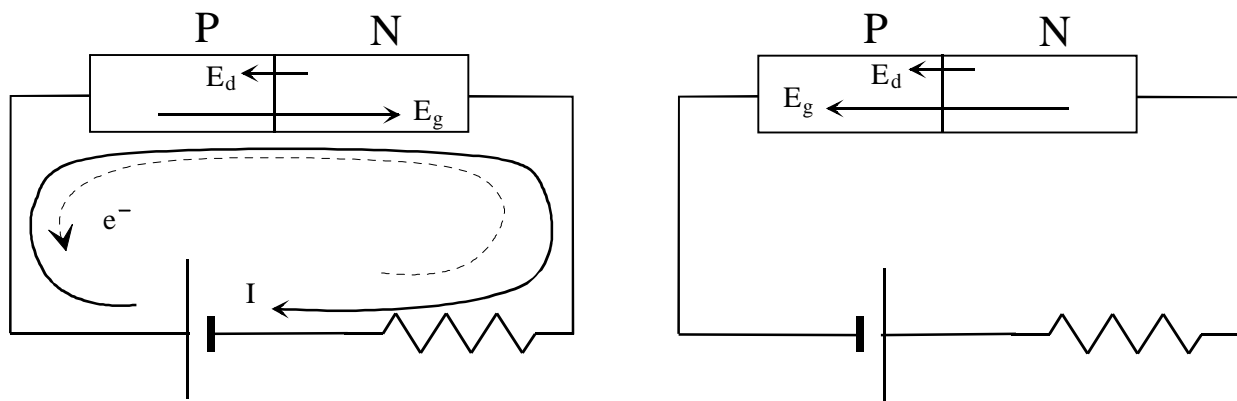
Semiconductores P y N después de la unión

La unión de los dos semiconductores **P** y **N** se denomina diodo. Si se conecta un generador de continua a un diodo, ocurren fenómenos que tienen gran aplicación. La conexión de un generador de continua a un diodo se denomina **polarización** del diodo. La polarización de un diodo puede ser directa o inversa y el comportamiento del diodo depende de esta polarización.

Se denomina polarización directa de un diodo al hecho de conectarle un generador del siguiente modo: el polo positivo a la zona **P** y el polo negativo a la zona **N**. En este caso el campo eléctrico creado por el generador (por sus bornes) va dirigido de la zona **P** a la zona **N**. es evidente que dicho campo es contrario

al que existe dentro del diodo (debido al salto de los electrones antes explicado). Por lo tanto el campo total será menor y no se opondrá a nuevos saltos de **N** a **P**. Además los electrones que ya han saltado a **P** son atraído por el polo positivo del generador y se moverán hacia él, generando una corriente eléctrica. También los electrones del polo negativo del generador penetrarán en la zona **N** del diodo para completar el circuito e impulsados por el campo eléctrico creado por el generador y atraídos, además, por los restos positivos que había en la zona **N** cerca de la unión. Estos electrones llegarán a la unión y saltarán a los huecos de la zona **P** donde continuarán moviéndose hacia el generador. Resumiendo: cuando un diodo se polariza directamente circula corriente por su interior en el sentido de **P** a **N** (sentido contrario al movimiento de los electrones). Los electrones que circulan por la unión primero se mueven por la zona **N** como electrones libres, después saltan de **N** a **P** en la unión y luego van saltando de hueco en hueco por la zona **P** hasta salir del diodo.

Se denomina polarización inversa del diodo a la conexión de un generador externo, uniendo el polo positivo a la zona **N** y el polo negativo a la zona **P**. En este caso, el campo eléctrico creado por el generador tiene el mismo sentido que el campo eléctrico propio del diodo. El campo eléctrico total será mayor, lo que impedirá que los electrones de la zona **N** salten a la zona **P** (los electrones que han saltado de **N** a **P** y han quedado atrapados por los huecos, esto es, en los enlaces covalentes, no pueden regresar a su zona **N** de donde provenían salvo que adquieran energía térmica suficiente). En otras palabras, los electrones del polo negativo del generador penetran en la zona **P** para llenar huecos pero no pueden continuar moviéndose hacia la zona **N** porque allí no hay huecos y deberían saltar a electrones libres y ello no es posible sin adquirir energía térmica suficiente. Resumiendo: cuando un diodo se polariza inversamente no circula corriente por él.



Dado el comportamiento tan peculiar del diodo, el signo que se ha convenido para representarle es el siguiente: .El triángulo representa la zona **P** y la raya la zona **N**, y el sentido que indica el dibujo es el de la corriente eléctrica (sentido contrario al movimiento de los electrones).

La aplicación inmediata que se hace del diodo es la de **rectificar** la corriente alterna: todos los aparatos de medida electrónicos necesitan ser alimentados con corriente continua, sin embargo la corriente eléctrica disponible en los laboratorios es corriente alterna. El diodo se encarga de **rectificar** la corriente alterna (transformarla en corriente continua). El esquema es el siguiente:

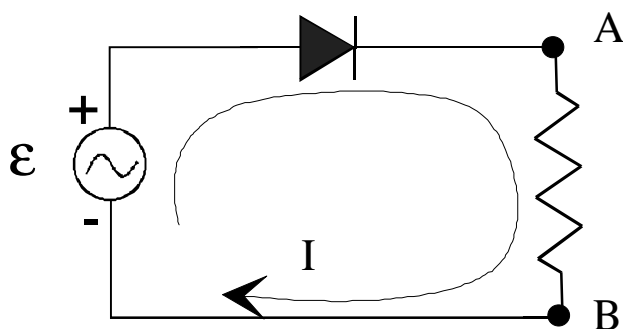


Figura 1-a

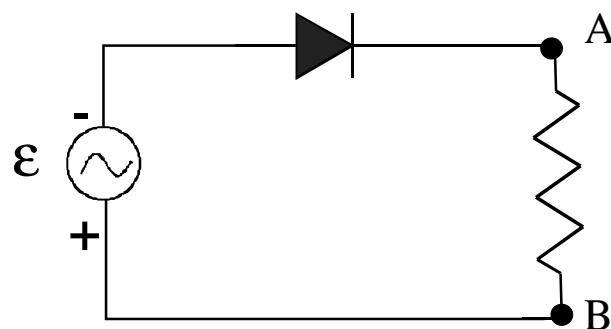


Figura 1-b

En este esquema, la resistencia representa la de entrada del circuito electrónico al que se va a alimentar con la corriente continua. Cuando la polaridad del generador de alterna es la de la figura 1-a, el diodo está polarizado directamente y entonces conduce corriente. Cuando la polaridad del generador es la de la figura 1-b, el diodo está polarizado inversamente y el diodo impide el paso de corriente. Como la corriente alterna tiene una dependencia temporal de tipo sinusoidal, las semiondas positivas, (que corresponden a la polaridad de la figura 1-a) dan lugar al paso de corriente a través del diodo y en la resistencia habrá una ddp que tendrá la misma forma que la semionda del generador. En el circuito de la figura 1-a se cumplen las ecuaciones:

$$\epsilon = V_d + (V_A - V_B) \quad \text{y} \quad V_A - V_B = IR \tag{4.1}$$

donde V_d es la ddp en los extremos del diodo. Dicha ddp tiene un valor comprendido entre **0.6** y **0.8** voltios para los diodos de Silicio (los más empleados para rectificar corriente alterna). Por lo tanto la ddp entre los extremos de la resistencia será casi igual a la fem del generador para las semiondas positivas, y será cero en las semiondas negativas (figura 2):

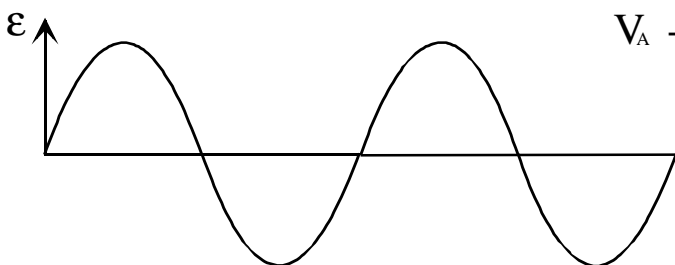


Figura 2-a



Figura 2-b

La corriente continua que se obtiene con un diodo rectificador no es constante en el tiempo y se denomina **rectificación de media onda**. Para mejorar la rectificación se recurre a un montaje especial denominado **punto de diodos**, cuyo esquema se representa en la figura 3:

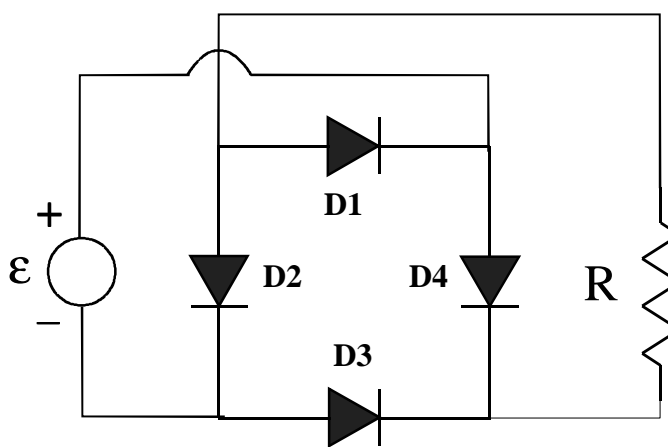


Figura 3-a

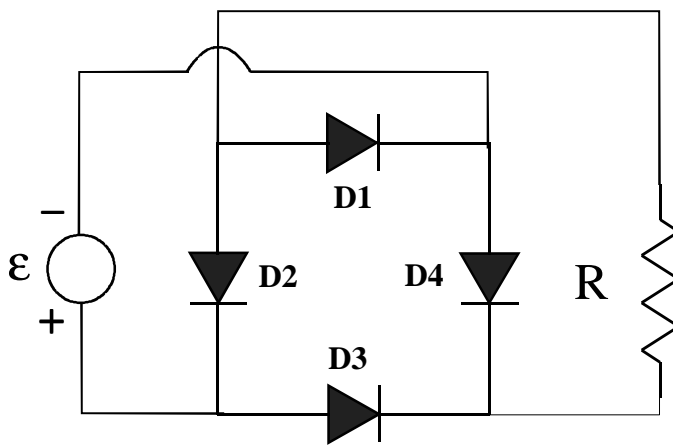


Figura 3-b

Cuando la polaridad del generador de alterna es la de la figura 3-a, los diodos D2 y D4 están polarizados directamente y conducen la corriente. Los diodos D1 y D3 están polarizados inversamente y no dejan pasar la corriente. La línea dibujada es la que sigue la corriente eléctrica. Cuando la polaridad del generador es la de la figura 3-b, ocurre lo contrario: los diodos D2 y D4 no conducen y sí lo hacen los diodos D1 y D3. La corriente sigue el camino del dibujo. Se ve que la corriente siempre circula en el mismo sentido a través de la resistencia, sea cual sea la semionda del generador. Entonces la ddp en los extremos de la resistencia tendrá la forma de la figura 4.

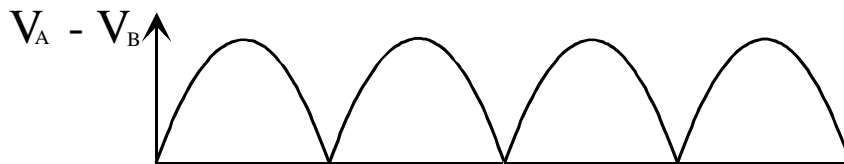
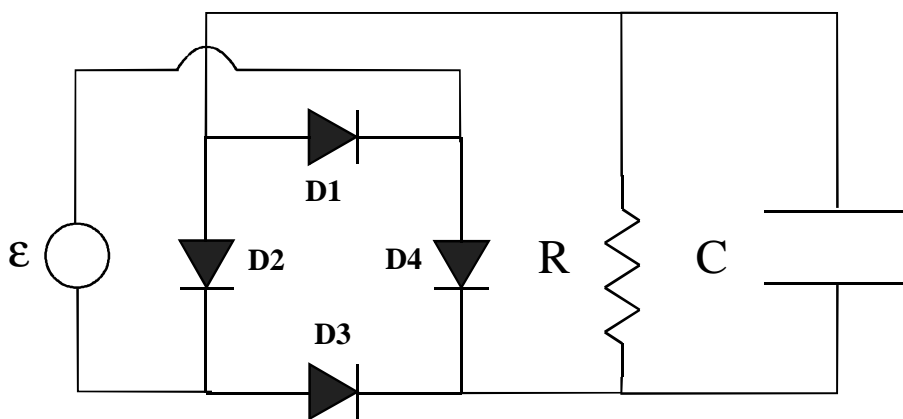


Figura 4



La corriente continua así obtenida, aunque circula siempre en el mismo sentido, todavía no es constante en el tiempo. Esta rectificación se denomina de onda completa. Para conseguir esto último se añade un condensador en paralelo con la resistencia, como se ve en la figura 5

Figura 5

En cualquier semionda del generador, cuando la fem está subiendo, el condensador se carga a la vez que circula corriente por la resistencia, y cuando la fem empieza a bajar el condensador empieza a descargarse a través de la misma resistencia. El resultado es el indicado en la figura 6



Figura 6-a



Figura 6-b

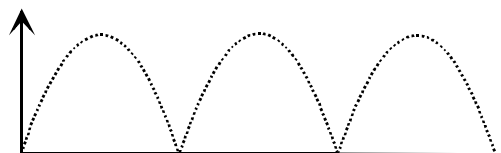


Figura 6-c

En la figura 6-a La capacidad del condensador no es muy grande y la carga acumulada no proporciona mucha corriente a la resistencia, por lo que todavía disminuye la ddp en la resistencia y no permanece constante en el tiempo. En las figuras 6-b y 6-c, la capacidad del condensador es mayor y el efecto

producido es aumentar el valor de las intensidades de descarga a través de la resistencia y por tanto las ddp en ella. Se ve como el valor de la ddp en la resistencia es cada vez mas constante en el tiempo (se acerca más a una línea recta). La colocación del condensador en paralelo con la resistencia se denomina **filtrado** de la corriente continua.

Con el esquema de la figura se tiene una fuente de tensión rectificadora y filtrada que proporciona una ddp continua que, en principio, es constante en el tiempo. Tal como indican las expresiones (4.1), la ddp en la resistencia es prácticamente igual a la fem del generador en una fuente rectificadora. Si además se filtra con un condensador, el valor de la ddp obtenida es prácticamente igual al valor máximo de la fem del generador de alterna, esto es, a la amplitud (o valor de pico) de la función temporal que representa la fem del generador de alterna.

3.3 Diodo Zener: estabilizadores

Hemos dicho en el apartado anterior que un diodo **PN** no conduce cuando se polariza inversamente. Esta afirmación no es del todo cierta. Si la ddp inversa entre los bornes del diodo es muy elevada, los electrones que habían saltado a **P** desde **N** son capaces de regresar a la zona **N** y dirigirse hacia el generador. El resultado es una corriente eléctrica que circula en sentido contrario al que indica el símbolo representativo del diodo. Este fenómeno se denomina efecto Zener. La característica fundamental del fenómeno es que mientras la intensidad de la corriente puede variar mucho de valor la ddp en los bornes del diodo, que se denomina tensión Zener, varía poquísimos y se toma como constante. La representación gráfica I-V será una recta vertical de ecuación $V = V_Z$. La curva completa I-V para un diodo será:

$$I = I_S \{ \exp(V_a/25) - 1 \}.$$

$$V = V_Z$$

El diodo Zener se emplea para obtener diferencias de potencial que sean muy constantes en el tiempo e independientes de la intensidad de corriente. Para aclarar este hecho partiremos del esquema práctico de la figura 7-a:

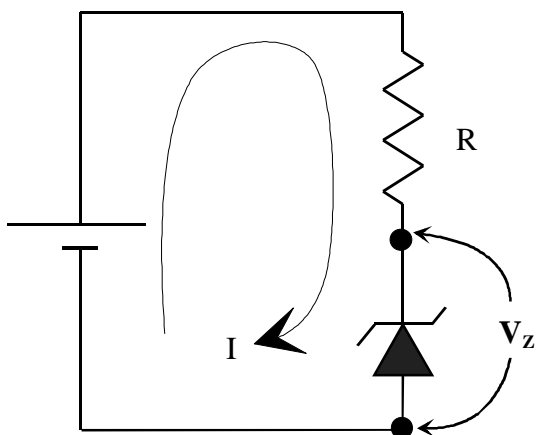


Figura 7-a

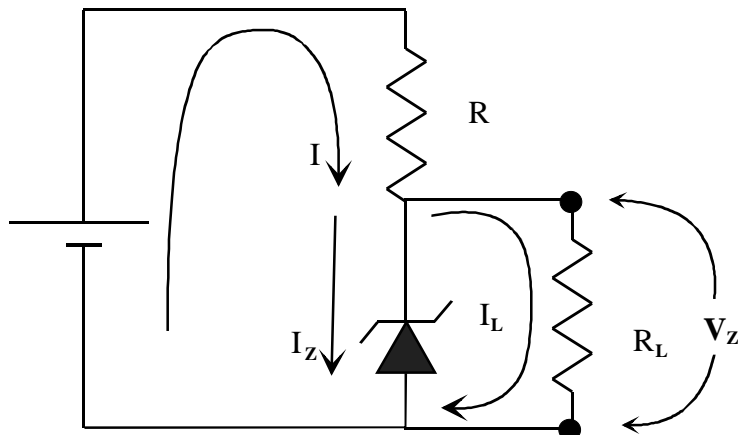


Figura 7-b

Si $\mathcal{E} > V_Z$ el diodo Zener trabajará en la zona vertical. La corriente que circula por el diodo cumplirá la ecuación:

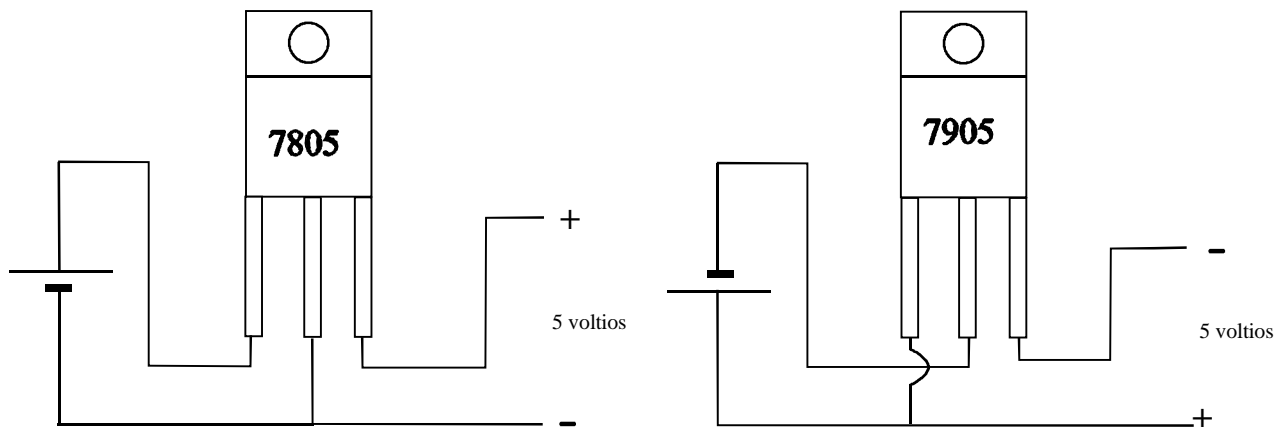
$$\mathcal{E} = IR + V_Z \quad (4.2)$$

y si se escoge un valor de la intensidad I , el valor de la resistencia R se obtendrá despejándola de (4.2).

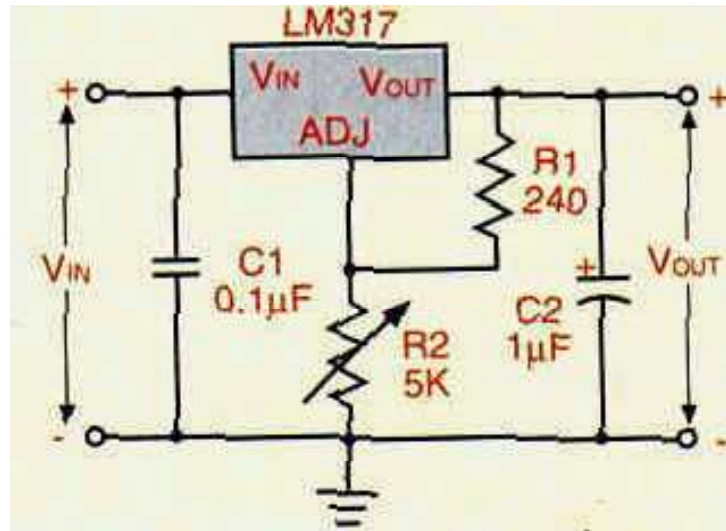
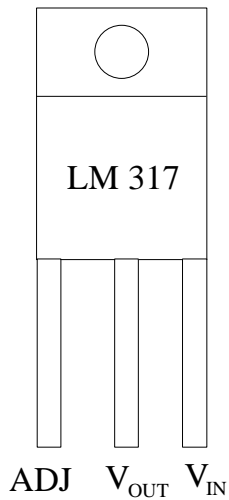
Si ahora se conecta una resistencia entre los extremos del diodo Zener, tal como se ve en la figura 7-b, circulará una corriente por dicha resistencia que valdrá $I_L = V_Z/R_L$. También se cumplirá que $I = I_Z + I_L$. Si varia R_L variará I_L pero la ddp en dicha resistencia no variará, y será V_Z siempre que se cumpla que $I_L < I$, ya que entonces $I_Z = I - I_L$ y mientras circule corriente por un diodo Zener, su ddp será constante e igual a V_Z . Si se mantiene constante la resistencia R_L conectada a los extremos del diodo Zener, podrá ocurrir que varia la \mathcal{E} , en cuyo caso variará I pero no variarán ni I_L ni V_Z . El aumento de \mathcal{E} y de I provocará un aumento en I_Z manteniéndose constante la ddp en la R_L .

Existe un valor máximo para I_L , que es precisamente I (la I que suministra la fuente) y si se quiere aumentar dicho valor máximo se montan circuitos electrónicos en los que además del diodo Zener, también se emplean transistores y resistencias. Estos circuitos se fabrican como circuitos integrados o chips que se denominan circuitos estabilizadores de tensión. Como ejemplo tenemos:

- Circuitos de la serie **78XX** y **79XX**. Estos circuitos integrados suministran una tensión preestablecida por el fabricante que viene indicada por las dos últimas cifras del nombre. Ejemplo: el 7805 suministra 5 voltios estabilizados; el 7815 suministra 15 voltios estabilizados. El circuito práctico para estos estabilizadores se da en la figura .



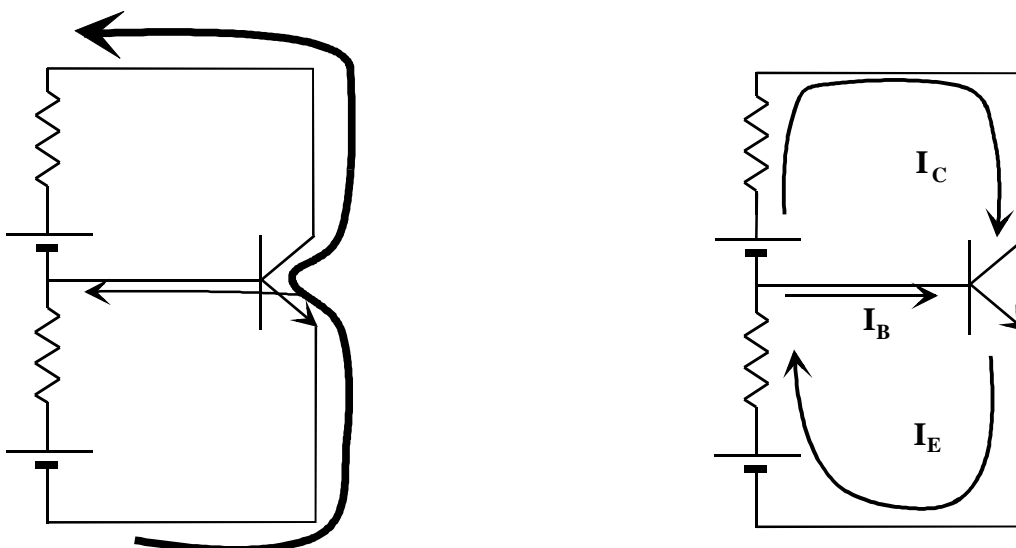
- Circuitos de la serie LM 317. Estos circuitos suministran una tensión estabilizada que se puede regular a voluntad mediante unas resistencias montada externamente como indica la figura.



3.4 El transistor de unión

El transistor se obtiene como resultado de unir tres semiconductores dopados en orden alternativo. Así pues se pueden obtener dos tipos de transistores: transistor **PNP** y transistor **NPN**. El funcionamiento de los dos transistores es el mismo sólo cambiando el sentido de circulación de los electrones. Explicaremos el funcionamiento del transistor **NPN** por ser el más utilizado.

Si suponemos que el semiconductor central **P** está dividido en dos mitades, podemos pensar que en definitiva un transistor resulta de unir dos diodos por la zona semiconductor del mismo nombre. En este caso los diodos estarán unidos por la zona **P**. Para que el transistor funcione de forma adecuada uno de los diodos se polariza directamente y el otro inversamente. El semiconductor central (**P** en este caso) se denomina **BASE**, el semiconductor (**N**) que forma el diodo con polarización directa se llama **EMISOR** y el semiconductor (**N**) que forma el diodo polarizado inversamente se denomina **COLECTOR**. La diferencia fundamental entre el transistor y la unión de dos diodos es que la **BASE** es mucho más estrecha que cada uno de los otros dos semiconductores. Esta peculiaridad es la que determina el funcionamiento del transistor. El esquema eléctrico para polarizar el transistor será:



El diodo base-emisor, que está polarizado directamente, conducirá la corriente. Los electrones subirán por el emisor (**N**) y se dirigirán, hacia la base (**P**). Debido a la estrechez de la base, los electrones, en vez de salirse por ella hacia el generador ϵ , atraviesan la base y se dirigen hacia el colector desde donde se dirigen

luego hacia el generador \mathbf{e} . En otras palabras, el diodo base-colector, que no debería conducir por estar polarizado inversamente, es atravesado por una corriente de electrones en sentido inverso (de **P** a **N**). Este fenómeno se denomina efecto transistor.

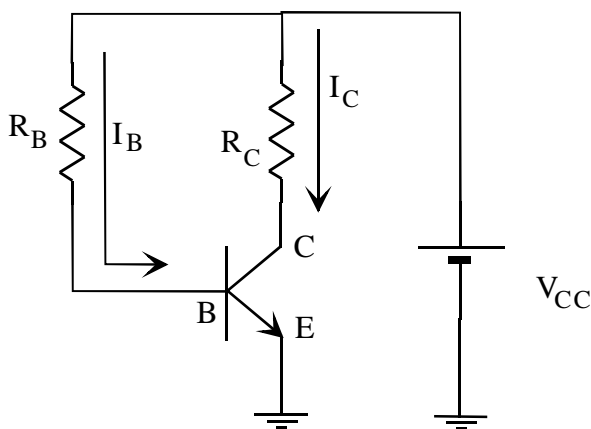
El sentido de las corrientes que circulan por el transistor serán, evidentemente, el inverso del sentido del movimiento de los electrones. La intensidad que sale del emisor se denomina corriente de emisor. Análogamente se denominarán corrientes de base y de colector a las que entran por estos terminales del transistor. Hablando en términos de corriente, el efecto transistor antes explicado se traduce en una relación proporcional entre las corrientes de base y de colector: la corriente de colector es igual a la de base multiplicada por una constante, **b**, denominada ganancia de corriente del transistor. También se cumple que la corriente de emisor será la suma de las de base y colector (el emisor se comporta como un nudo)

$$I_C = \beta I_B \quad (4.3)$$

$$I_E = I_C + I_B \quad (4.4)$$

La expresión (4.3) no solo establece la relación numérica entre las corrientes de base y de colector sino que además establece la condición necesaria para un funcionamiento adecuado del mismo: Si la corriente de base es nula también lo serán la de colector y la de emisor y el transistor no funcionará.

Es frecuente el empleo de una única fuente de tensión para alimentar al transistor pero debe cumplirse que el colector tenga **MAYOR** potencial que la base y ésta a su vez **MAYOR** potencial que el emisor. El esquema eléctrico y las ecuaciones que se cumplen en él serán (el potencial de emisor se toma igual a cero, esto es, como potencial de referencia):



$$V_{CC} = I_C R_C + V_C \quad (4.5)$$

$$V_{CC} = I_B R_B + V_B \quad (4.6)$$

Los potenciales del colector y de la base son ambos mayores que el del emisor puesto que las corrientes respectivas se dirigen hacia él (las corrientes van de mayor a menor potencial) pero la relación entre los potenciales de colector y de base no es evidente. Restando (4.4) menos

(4.5) y teniendo en cuenta la ecuación (4.2) se llega a:

$$V_C = V_B + I_B(R_B - \beta R_C) \quad (4.7)$$

Para que $V_C > V_B$ deberá ser $R_B > \beta R_C$. La elección de los valores de las resistencias R_C y R_B para que se cumpla $V_C > V_B$ se denomina **DISEÑO** de un transistor.

Para diseñar un transistor hay que plantear un sistema de ecuaciones que dependerán del esquema eléctrico empleado para polarizarlo. Dicho sistema contiene mas variables que número de ecuaciones. Existen pues variables que habrá que escoger previamente a la resolución del sistema.