Lección 1

Teoría atómica y electricidad

La electricidad es la base de todo lo que existe. Nuestro mundo es un mundo eléctrico. Existen fenómenos naturales que dan origen a la electricidad y a sus efectos muy importantes como: la luz eléctrica, el calor, el movimiento en las máquinas y vehículos,etc. Fenómenos que son difíciles de entender porque suceden al interior de partículas tan pequeñas como el átomo que el ser humano no puede captar, y solo con ilustraciones podemos explicarlos. Esta lección analizará muchos de los fenómenos relativos al origen de la electricidad.

Introducción

¿Qué es la electricidad?

Pregunta de respuesta difícil porque el término ELECTRICIDAD es demasiado amplio. Rápidamente se podría decir que la electricidad es una forma de energía o que es un medio que actúa en la materia. Una definición más técnica es: ***la corriente eléctrica es un movimiento o flujo de electrones a través de un conductor; este movimiento no es posible sin la aplicación a dicho conductor de una fuerza especial llamada fuerza electromotriz.***

El conocimiento de la electricidad se ha ido ampliando a través de los años por medio de experimentos en muchos campos: en el magnetismo, en las pilas eléctricas, en el paso de la corriente a través de gases y en el vacío, estudiando los metales, el calor, la luz, etc. Anteriormente, la electricidad no se había utilizado de un modo tan amplio como se hace hoy en día. La importancia que tiene actualmente en nuestra vida individual y colectiva, se ha hecho tan evidente que no es fácil medirla.

Hoy por hoy no puede existir ninguna ciudad, por pequeña que sea, que no necesite la electricidad en su vida cotidiana: en la cocina, calefacción, frigoríficos, congeladores, televisores, ascensores, escaleras mecánicas, alumbrado público, incubadoras para recién nacidos, máquinas impresoras, tornos; inclusive los automóviles no pueden funcionar sin energía eléctrica para su arranque y alumbrado... y tantas otras cosas que no alcanzamos a mencionar.

Una de las grandes cualidades de la energía eléctrica es que se puede convertir rápida y eficazmente en diferentes formas de energía tales como: calórica (hornos, estufa eléctrica), lumínica (iluminación, rayo láser), mecánica (el motor eléctrico de todo tipo) y química (cargador de baterías, electrólisis), entre otras. Además, la energía eléctrica se puede transportar económicamente a grandes distancias para utilizarla donde sea necesaria como en las ciudades, fábricas, centros industriales, centros comerciales, centros de transporte, en el campo, etc.

A medida que avanza el desarrollo de la humanidad, la energía eléctrica se hace cada vez más indispensable ya que se puede utilizar fácilmente para numerosos y variados propósitos.

Una característica importante de la energía eléctrica es que está libre de toda clase de productos indeseables de la combustión como humos, cenizas y emanaciones que dañan la atmósfera. La aplicación de la electricidad se logra fácilmente si se posee un completo conocimiento de las leyes de la corriente eléctrica, sus relaciones con el magnetismo, así como la manera de producirla y de obtener efectos electromecánicos y electroquímicos, los cuales serán estudiados en próximas lecciones.

La materia

Todo lo que existe en el universo, que ocupa un lugar en el espacio y que podemos ver y tocar, e incluso, aquellas cosas que no podemos ver, pero

Figura 1.1. *La materia*

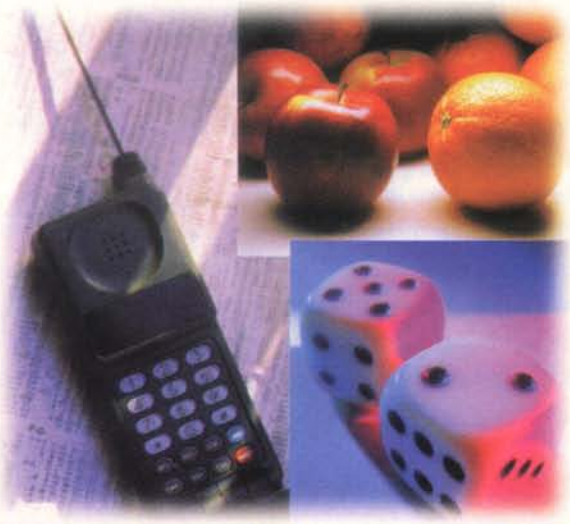


Figura 1.2. Estado sólido

que sabemos que existen, están formadas por materia. **Figura 1.1**

Después de muchos experimentos e investigaciones, se descubrió que los cuerpos no son indivisibles, sino que por el contrario, están formados por la unión de un gran número de partículas pequeñísimas. Gracias a este descubrimiento, los científicos han encontrado soluciones y leyes para muchos fenómenos químicos y físicos como por ejemplo, el caso de la energía nuclear.

Figura 1.3. Estado líquido

Dependiendo del grado de unión que haya entre estas partículas, los cuerpos pueden presentarse en tres diferentes estados:

Estado sólido. Cuando el contacto entre dichas partículas es muy fuerte. Se caracteriza por tener forma y volumen definidos. **Figura 1.2**

Estado líquido. Cuando el contacto entre ellas es más flojo. En este caso, la materia cambia constantemente de forma para adaptarse a la del recipiente que la contiene. **Figura 1.3**

Estado gaseoso. Las partículas están totalmente libres, es decir, no existe contacto entre ellas. Se caracteriza porque puede cambiar su volumen y su forma, adaptándose a cualquier espacio. **Figura 1.4**

Composición de la materia

Analicemos cualquier estado de la materia, por ejemplo, el estado líquido. Para entenderlo mejor, utilicemos una vasija con agua. Si observamos el agua en la vasija, podría usted imaginarse ¿cuántas gotas de agua caben en ella? miles y miles ¿verdad?

Si tomamos una gota de agua y la dividimos muchísimas veces, llegaría un momento en que no podríamos hacerlo más porque perdería sus propiedades y, por ser tan pequeña, para lograr verla debemos utilizar un microscopio. Dicha gotita recibe el nombre de MOLÉCULA. Ésta constituye la parte más pe-

Figura 1.4. Estado gaseoso

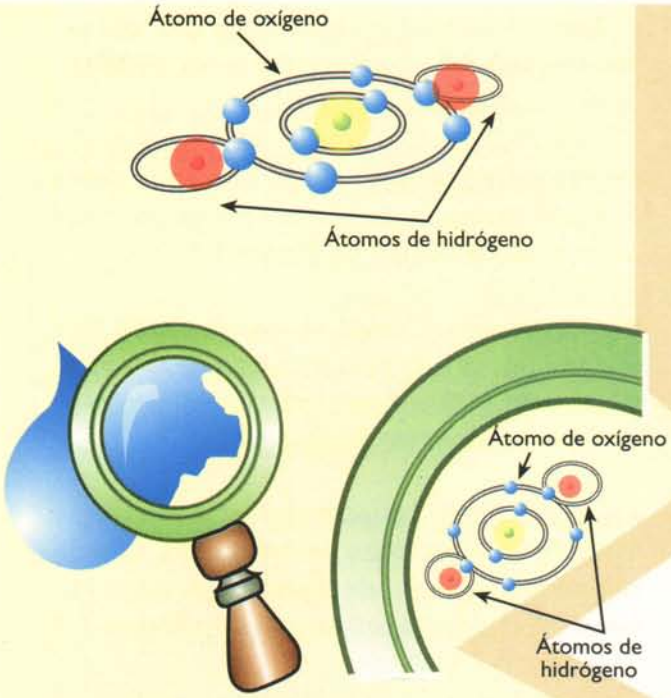


Figura 1.5. *La molécula del agua*

queña de cualquier cuerpo y conserva todas las características del mismo. En conclusión, todos los cuerpos están formados por millones de moléculas.

Seguramente usted ya se está haciendo una pregunta: ¿si dividimos dicha molécula, qué podríamos obtener? Efectivamente, esta molécula puede ser dividida en unas partículas mucho más pequeñas e invisibles llamadas ÁTOMOS, los cuales constituyen la unidad fundamental del universo, y solos o en combinación, forman todo lo que existe.

Retomemos el ejemplo de la gotita de agua. Si mediante un proceso químico la dividimos, encontraremos que esa gotita de agua tan pequeña está formada por tres elementos simples así: dos partes de hidrógeno y una parte de oxígeno, tal como se muestra en la **figura 1.5.** Luego, se puede concluir que la molécula de agua está formada por tres átomos: dos átomos de hidrógeno y un átomo de oxígeno. También se puede decir que la molécula de agua está formada por la combinación de dos elementos distintos, se dice entonces que es un cuerpo compuesto.

Estructura atómica

Una vez descubierto el átomo, la curiosidad del hombre lo impulsó a querer saber qué había en su interior. Fue así como, después de muchos experimentos, se descubrió que en el interior de éstos se encuentran encerradas una serie de partículas que poseen energía propia y que son las directas responsables de los fenómenos eléctricos.

En 1808, el físico y químico británico Jhon Dalton (1766- 1844) formuló las primeras bases que marcaron el inicio de la era atómica. Sin embargo, una de sus teorías que afirmaba que el átomo era indivisible fue modificada, ya que como se sabe el átomo sí puede ser dividido siendo éste el principio de la energía nuclear. En 1913, Niels Bohr, enunció lo que hoy se conoce como TEORÍA ELECTRÓNICA y explicó que, si fuera posible ver el interior de un átomo, éste sería semejante a un sistema solar

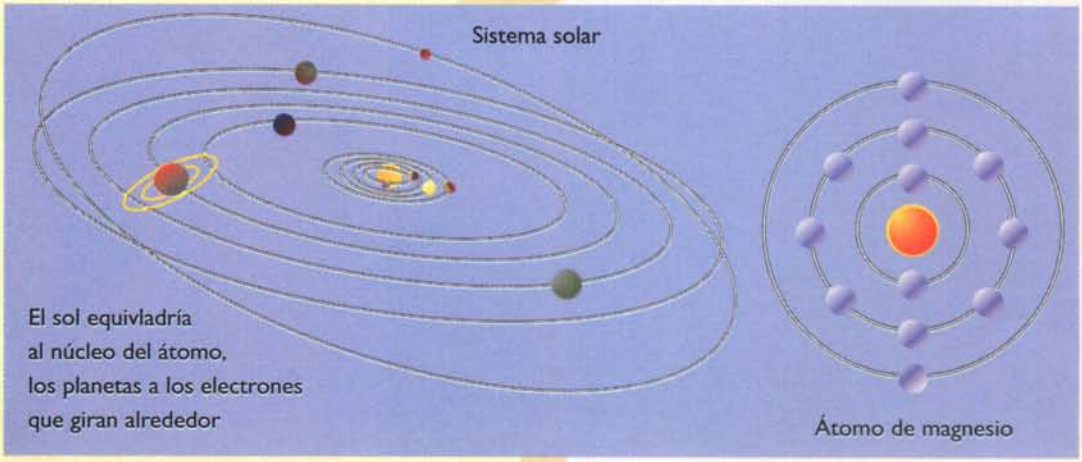


Figura 1.6. *Analogía hecha por Niels Bohr*

en miniatura. **Figura 1.6.** Hoy en día un átomo se representa como se muestra en la **figura 1.7 .**

Carga eléctrica del átomo

Cuando decimos que los electrones y los protones tienen carga eléctrica, esto quiere decir que poseen una fuerza la cual ejercen en todas las direcciones y que, gracias a ella, una partícula tiene el poder de atraer o rechazar otras partículas.

La **carga negativa** del electrón y la fuerza ejercida por ésta, se encuentra dirigida hacia adentro y tiene el mismo valor que la **carga positiva** del protón, cuya fuerza está siempre dirigida hacia afuera. Esto genera dos **CAMPOS ELÉCTRICOS** contrarios, pero de igual magnitud, por lo cual, los átomos son eléctricamente neutros.

Para que se produzcan cambios eléctricos en los átomos, éstos deben estar descompensados o desequilibrados, y reciben el nombre de **iones.** Un ion se forma cuando un átomo gana o pierde uno o varios electrones. Pueden ser de dos clases:

Ion positivo: cuando hay más protones que electrones, por haber perdido uno o más electrones.

Ion negativo: cuando hay más electrones que protones, por haber ganado uno o más electrones.

Para que el átomo se equilibre de nuevo, necesita tener el mismo número de protones y de electrones. Así, el átomo cargado positivamente necesita de otro electrón. Esto crea una fuerza entre dicho átomo y todos sus átomos vecinos. Dicha fuerza llega a ser tan grande que se puede robar un electrón de su átomo vecino para poder estabilizarse de nuevo. De esta forma el átomo, al cual le ha robado el electrón, queda también desequilibrado y por ello intentaría obtener otro electrón de sus átomos vecinos, y así sucesivamente. Así se crea una cadena de intercambio de electrones entre los átomos que forman un cuerpo. Lo anterior es la base para enunciar dos leyes fundamentales de la electricidad:

1. Cargas iguales se rechazan. **Figura 1.8**
2. Cargas distintas se atraen. **Figura 1.9**

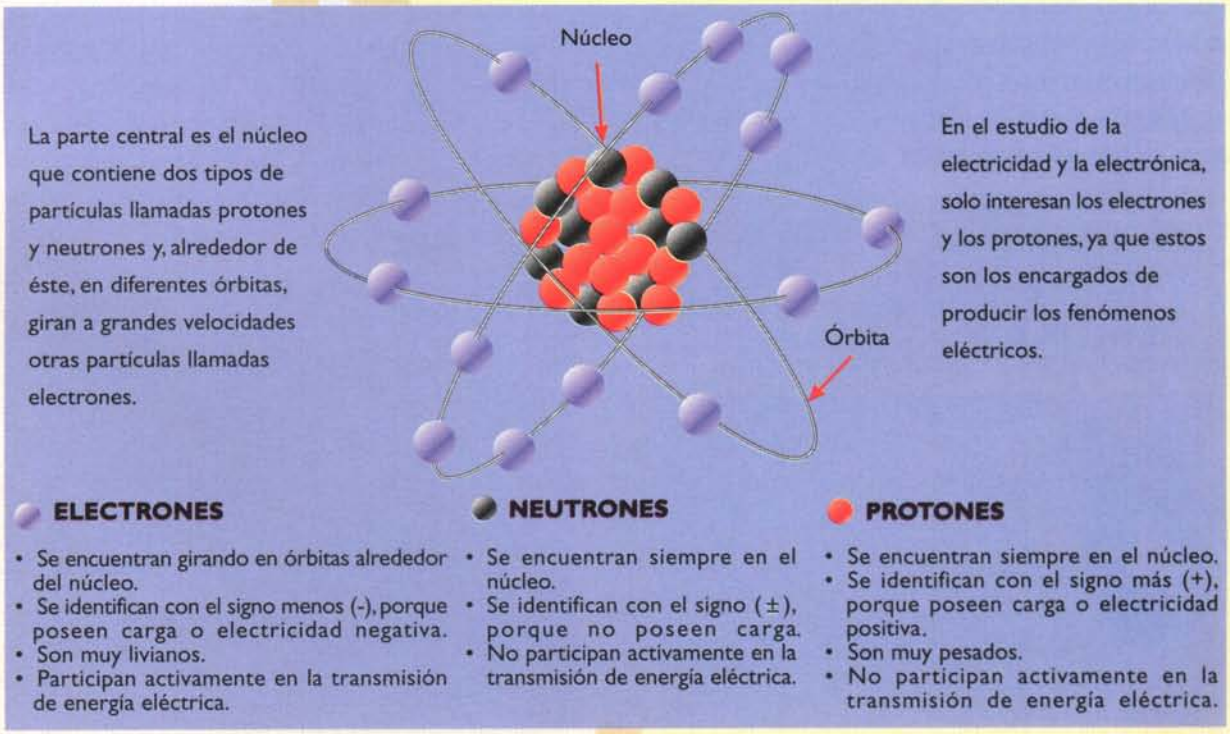


Figura 1.7. Representación moderna del átomo

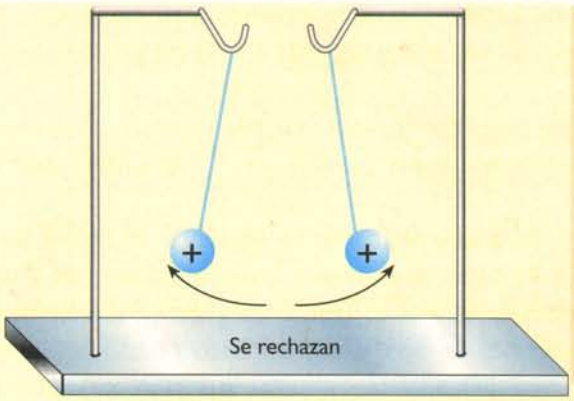


Figura 1.8. Cargas iguales se repelen

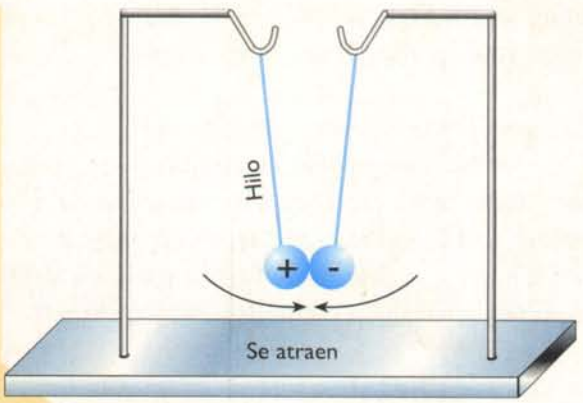


Figura 1.9. Cargas distintas se atraen

Número atómico

Todos los electrones y todos los protones son iguales, sin importar el material al que pertenecen. Entonces, si todos los materiales están formados por las mismas partículas ¿cómo es que son tan diferentes? Los materiales se diferencian unos de otros porque el número de electrones que poseen en cada átomo es diferente a los de los demás. El número de protones que hay en el núcleo de cada átomo es siempre igual al número de electrones que giran en torno de él. A esta característica se le conoce como **NÚMERO ATÓMICO.** Por ejemplo, el número atómico del oxígeno es 8 porque tiene 8 protones y 8 electrones, y se diferencia del aluminio, porque este último posee 13 electrones y 13 protones; es decir, su número atómico es 13; **figura 1.10**

Niveles de energía y distribución de los electrones en el átomo

Ya sabemos que los electrones se encuentran girando en órbitas alrededor del núcleo. Ahora la pregunta es: ¿cuántas órbitas pueden haber alrededor del núcleo y cuántos electrones pueden circular en cada una de ellas? Conforme a la **teoría electrónica** de Bohr y la cuantificación de la energía, los átomos pueden tener un máximo de siete órbitas o capas alrededor del núcleo, las cuales se denominan con las letras K, L, M, N, O, P, y Q, y cada una de ellas acepta solamente un cierto número de electrones así: la primera tendrá 2 electrones, la segunda 8, la tercera 18, la cuarta 32 y así sucesivamente, tal como se observa en la **figura 1.11.** Los electrones que se encuentran en las capas más cercanas al núcleo son atraídos con más fuerza por los protones, que los que se encuentran en las órbitas más alejadas. Como los electrones que hay en cada órbita poseen cierta cantidad de energía, a éstas también se les llama **niveles de energía**, y la cantidad de energía que tiene cada nivel, depende del número de electrones que posee.

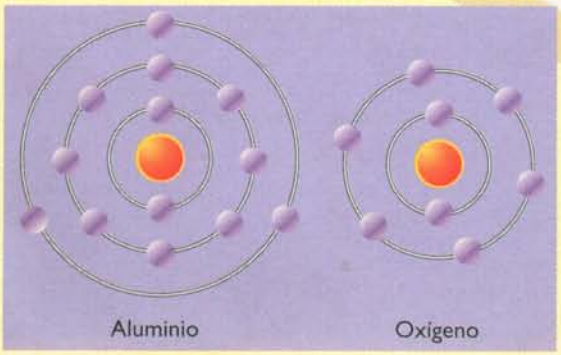


Figura 1.10. Número atómico

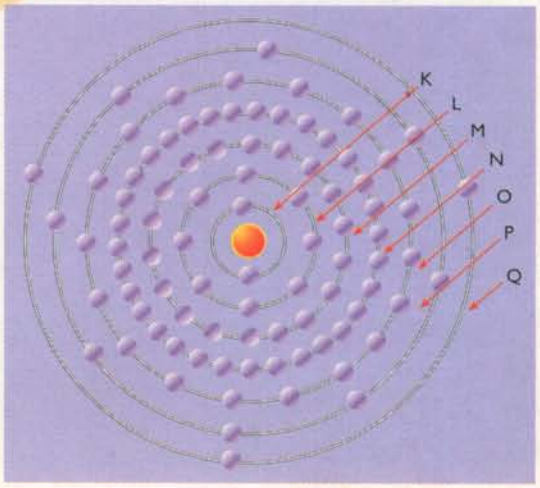


Figura 1.11. Niveles de energía

Electrones de valencia

Desde el punto de vista eléctrico, de todas las órbitas o niveles de energía, solo nos interesa estudiar la última de cada átomo, pues los electrones que se encuentran en ella son quienes determinan las propiedades químicas y físicas de los elementos y son directamente los responsables de los fenómenos eléctricos. Dichos electrones reciben el nombre de electrones de valencia y pueden ser un máximo de ocho. De acuerdo al número de ***electrones de valencia*** que tengan los átomos de un elemento, desde el punto de vista eléctrico, éstos pueden clasificarse como conductores, aislantes y semiconductores.

Conductores: a este grupo pertenecen los átomos que poseen menos de cuatro electrones de valencia, los cuales tienden a perder dichos electrones para lograr su equilibrio. Estos materiales reciben el nombre de **METALES** y son los más adecuados para producir fenómenos eléctricos; a este grupo pertenecen, por ejemplo, el cobre que tiene un electrón de valencia, el hierro dos y el aluminio tres. Podemos observar la distribución de sus electrones en la **figura 1.12.** Aquellos que poseen un solo electrón de valencia son los mejores conductores.

Aislantes: son aquellos que tienen más de cuatro electrones de valencia. Son llamados **METALOIDES**, porque tienden a ganar los electrones necesarios para lograr su equilibrio; ejemplos de éstos son el fósforo que tiene cinco electrones de valencia, el azufre que tiene seis y el cloro con siete. En la **figura 1.13** observamos la distribución de los electrones para estos elementos. Aquellos átomos que poseen ocho electrones de valencia son químicamente muy estables y por esta razón es muy difícil producir un fenómeno eléctrico con ellos, un ejemplo de éstos es el xenón.

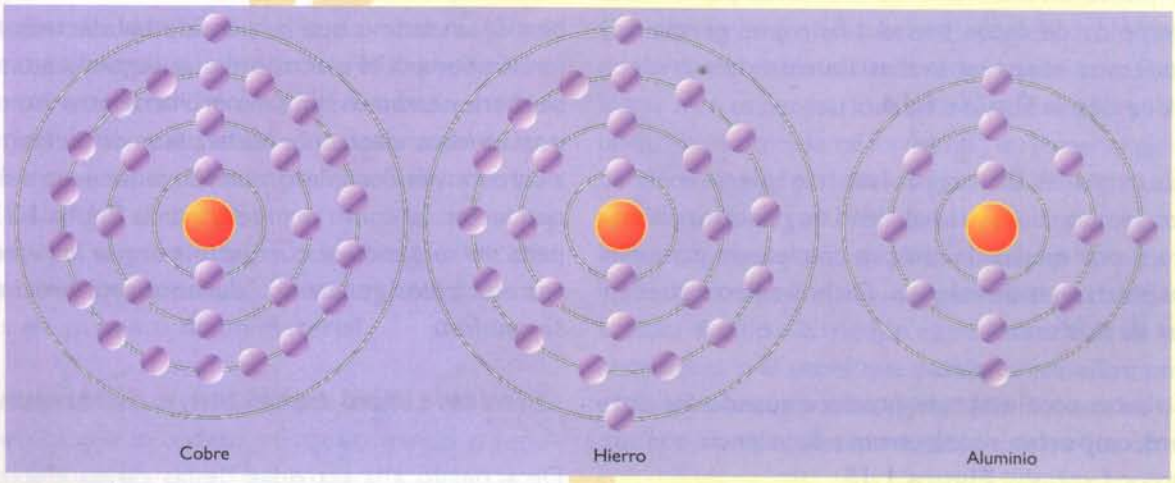


Figura 1.12. Átomos de los conductores

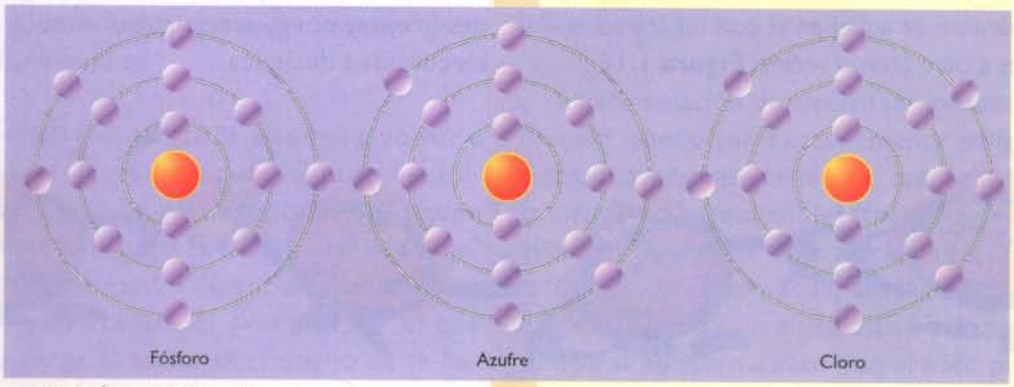


Figura 1.13. Átomos de los aislantes

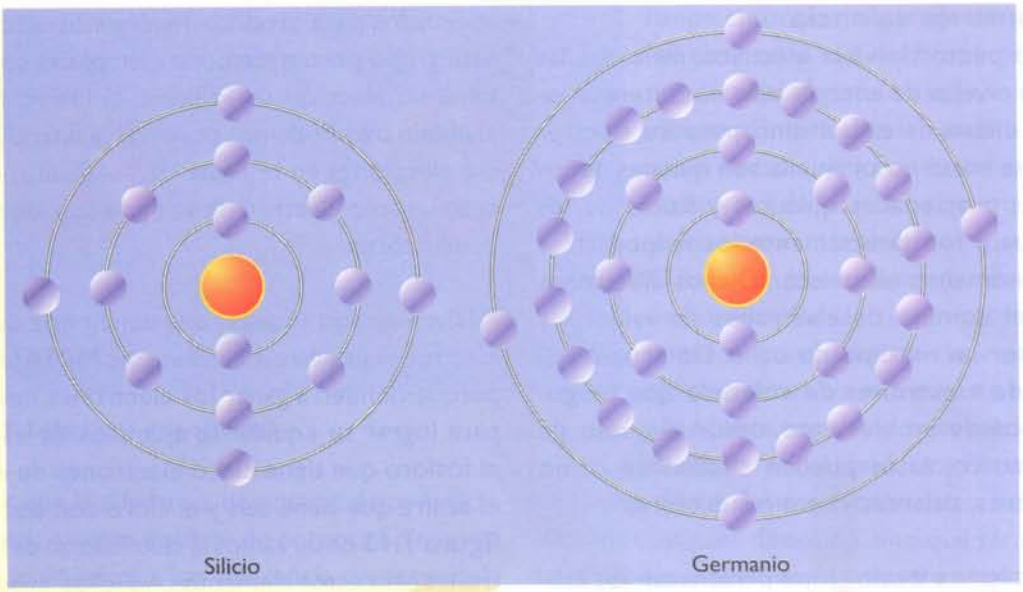


Figura 1.14. Átomos de los semiconductores

Semiconductores: poseen cuatro electrones de valencia y sus propiedades se encuentran en un punto medio entre conductores y aislantes. Ejemplos de éstos son el silicio y el germanio; podemos observar la distribución de sus electrones en la **figura 1.14.**

Electrones libres en los metales

Los átomos tienen la habilidad de relacionarse entre sí por medio de enlaces, empleando para ello los electrones de valencia. Dichos enlaces pueden ser de dos tipos:

Enlace covalente: se produce cuando los átomos, ***comparten*** sus electrones de valencia, con sus átomos vecinos. **Figura 1.15**

Enlace iónico: es aquel en el cual un átomo ***cede*** electrones a otro átomo vecino. **Figura 1.16**

Cuando un electrón de valencia se escapa de su órbita se convierte en un ***electrón libre.*** Dicho electrón puede entrar fácilmente en la última órbita de un átomo que ha perdido un electrón. Al mismo tiempo, el electrón de un segundo átomo se libera y entra en la última órbita de otro átomo y así muchos electrones libres pasan de un átomo a otro moviéndose desordenadamente dentro del conductor, tal como se muestra en la **figura 1.17**, pero ***no se produce corriente porque los efectos eléctricos generados durante este proceso se anulan.***

Electricidad estática y dinámica

De acuerdo a la actividad de las cargas eléctricas, la electricidad puede clasificarse en dos grandes grupos: como electricidad estática o como electricidad dinámica.

Figura 1.15. Enlace covalente

Figura 1.16. Enlace iónico

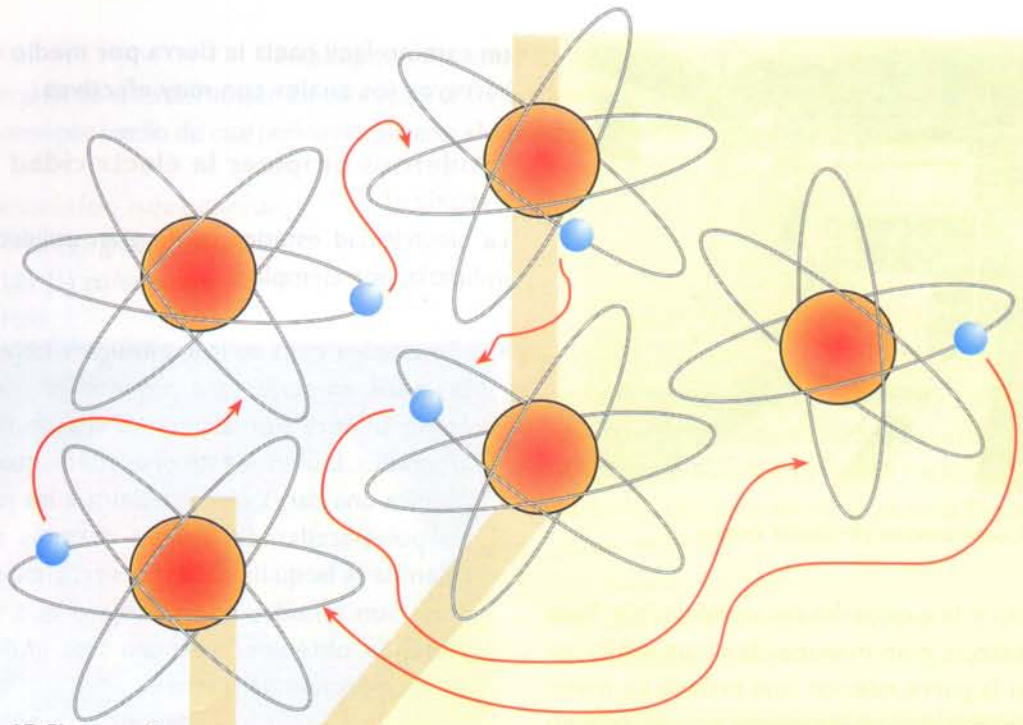


Figura 1.17. Electrones libres

¿Qué es la electricidad estática?

Recibe también el nombre de electrostática. Como su nombre lo indica, se refiere a los electrones estáticos o en reposo, es decir sin movimiento, aunque hablar de electrones en reposo no es muy común porque éstos siempre se visualizan como partículas inquietas y saltarinas que van de un lugar a otro. La electricidad estática se produce por la acumulación de cargas en un punto de un material.

Un cuerpo cargado siempre afecta a los demás cuerpos que lo rodean ya sea atrayendo o repeliendo sus electrones. Todo material cargado positivamente tiene en él escasez de electrones, mientras que todo material con carga negativa tiene exceso de electrones.

Los materiales cargados tienden a volver a su estado de equilibrio y para lograrlo necesitan descargarse. Al hacer esto, lo consiguen desprendiendo energía la cual se manifiesta generalmente por medio de acciones mecánicas o por simples chispas. El proceso por el que adquiere carga el material contiguo se le llama *inducción electrostática*.

Como crear electricidad estática

Cuando cargamos un material estamos acumulando partículas eléctricas en un punto del mismo. Para lograr esto es necesario mover electrones libres de un átomo a otro, de tal forma que un material pierda electrones y el otro los gane. El método más sencillo para cargar un material es por frotamiento. En las máquinas que se empleaban antiguamente para imprimir los periódicos, se generaba electricidad estática debido a la fricción entre los rodillos de las impresoras y el papel que pasaba entre ellos; por esta razón los operarios debían usar accesorios de protección especiales conectados a tierra que ofrecían una vía expresa a los electrones de manera que las cargas se neutralizaran; tal como se muestra en la **figura 1.18.**

La acumulación de electrones, resultado de la fricción, puede ser excesivamente peligrosa en ciertos casos, por ejemplo, los carro-tanques que transportan combustibles constituyen uno de ellos. A medida que el carro-tanque se desplaza, la fricción con el aire acumula electricidad estática en él. Si la tensión entre éste y cualquier objeto a su alrededor se hace muy grande, puede generarse una descarga eléctrica que podría causar

Figura 1.18. Generación de electricidad estática

un incendio y la explosión del combustible. Para prevenir esto, la gran mayoría de estos vehículos poseen en la parte inferior una cadena de metal que se arrastra constantemente por el camino para provocar un contacto con la tierra; de esta forma se descarga el vehículo y se previene de algún accidente. Este fenómeno se hace visible ya que se producen chispas contra el pavimento a medida que el vehículo se descarga.

Cuando los materiales se encuentran muy cargados, los electrones saltan de un material a otro antes de que se establezca un contacto real entre ellos. En estos casos la descarga se ve en forma de arco luminoso. Un claro ejemplo son las cargas que se producen en las nubes al frotarse con las moléculas del aire; la gran cantidad de electricidad acumulada en éstas puede descargarse a través de grandes espacios provocando arcos de muchos metros de longitud llamados rayos, tal como se muestra en la **figura 1.19**. El poder destructivo de ellos es un claro ejemplo de la cantidad de energía que pueden transportar los cuerpos cargados eléctricamente. La protección contra los rayos se obtiene solamente proporcionando a los electrones un camino fácil hacia la tierra por medio de pararrayos los cuales son muy efectivos.

¿Podemos emplear la electricidad estática?

La electricidad estática es de gran utilidad en la industria, por ejemplo:

- Se emplea para aplicar pintura a objetos fabricados en serie; este proceso es conocido como pintura por aspersión o pintura electrostática. Durante este procedimiento se comunica una carga electrostática a las partículas pulverizadas de pintura después de que salen de la boquilla del aspersor; dichas partículas son atraídas por el objeto que se está pintando, obteniendo así una capa uniforme y sin desperdicio de pintura.

- En la fabricación de papel abrasivo (de lija) para metales.

- En la fabricación de fibras para tejer alfombras y telas especiales.

- En los llamados precipitadores que cargan las partículas de humo de las grandes chimeneas para luego llevarlas a unas pantallas donde no puedan contaminar la atmósfera.

Figura 1.19. Rayos eléctricos

Manos a la obra: (Experimento)

Con el fin de entender mejor los conceptos anteriormente expuestos, vamos a desarrollar un sencillo experimento por medio del cual podremos generar electricidad estática y verificar los fenómenos que ésta produce.

Materiales necesarios:

- Dos (2) globos de inflar
- Un (1) paño suave
- Hilo

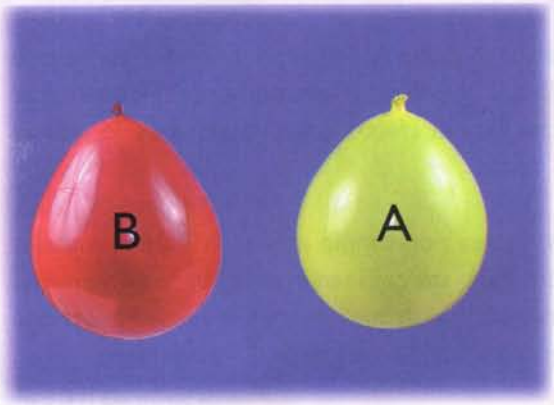


Figura 1.20

Procedimiento:

1. Infle dos globos de igual tamaño, sujételos pendiendo de un hilo y llámelos o márquelos con las letras A y B. Acérquelos un poco, teniendo cuidado de no llegar a juntarlos, tal como se muestra en la **figura 1.20.**
   - ¿Qué observa?
   - ¿Se unieron los globos?
   - ¿Se alejan uno del otro?
   - ¿Permanecen inmóviles?

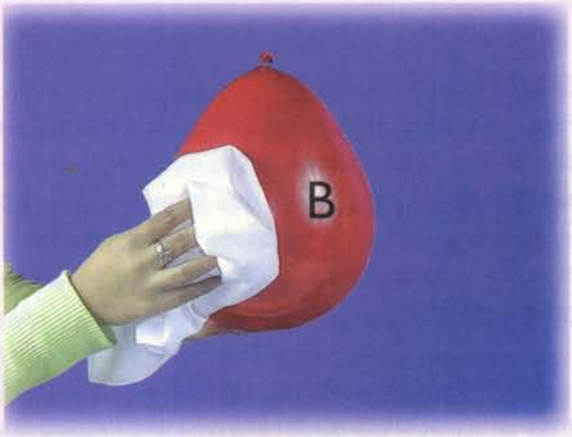


Figura 1.21

2. Tome el globo identificado con la letra B y frote suavemente la superficie de éste con un paño suave durante unos instantes, como se muestra en la **figura 1.21.**

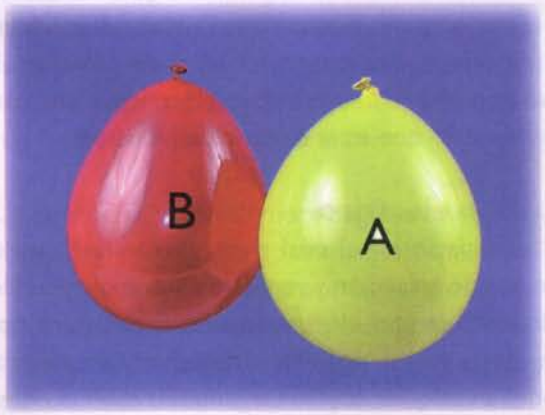


Figura 1.22

3. Acerque nuevamente los globos y observe lo que sucede. **Figura 1.22.**

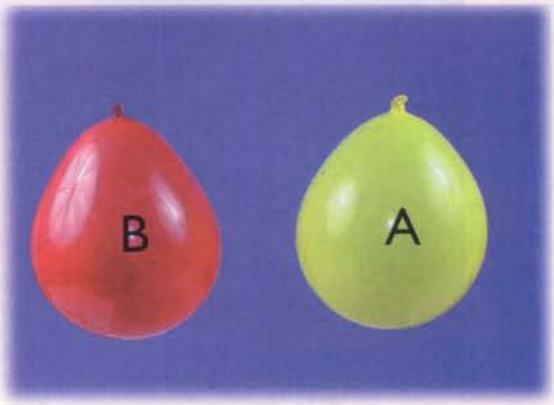


Figura 1.23

4. Espere unos cuantos segundos y observe si ocurre algún cambio en la posición de los globos. **Figura 1.23.**
   - ¿Qué sucedió?
   - ¿Cómo puede explicar esto?

Conclusiones

Antes de frotar el globo identificado con la letra B, las cargas eléctricas de los dos materiales (globo B y paño), se encontraban neutralizadas; al frotar el globo, algunas órbitas de valencia se relacionaron entre sí y el paño robó electrones de valencia al globo, quedando este último cargado positivamente. Tal como mencionamos anteriormente, los materiales cargados tienden a recuperar su estado de equilibrio y para lograrlo necesitan descargarse. En nuestro caso vemos como, al acercar nuevamente el globo identificado con la letra B al identificado con la letra A, éste lo atrae con facilidad ya que tiende a recuperar los electrones perdidos.

Cuando el globo B ha robado los electrones necesarios al globo A, éste volverá nuevamente a su estado inicial; es decir, después de unos minutos el globo B se separa nuevamente del globo A. Las cargas acumuladas en el globo B se llaman cargas estáticas y el efecto que producen es lo que se conoce como electricidad estática.

Este fenómeno se produce también en los metales, ya sea por simple contacto de dos metales diferentes o por medio de un proceso llamado inducción. Pero sea cual sea el caso, los fenómenos de carga y descarga son siempre los mismos, ya que siempre que se acerquen entre sí dos materiales con cargas opuestas el exceso de electrones de uno será atraído por las cargas positivas de otro.

Electricidad dinámica

Para que la electricidad sea realmente útil, ésta debe permanecer en movimiento, es decir, debe ser dinámica o activa y la fuente que la genere debe estar en constante renovación de sus cargas eléctricas para que no pierda su capacidad en pocos segundos de trabajo.

El conde italiano Alessandro Volta (1745-1827) inventó la pila eléctrica en 1799, lo que originó una revolución científica en ese tiempo; se dio cuenta que mediante la acción química pueden restituirse constantemente las cargas eléctricas y que a medida que circula la corriente por el circuito los electrones que salen del terminal negativo de la batería, son sustituidos por la misma cantidad de éstos (pertenecientes al conductor) que entran por el terminal positivo de la misma. **Figura 1.24**

Figura 1.24. *Pila de volta*

Solo después de que Volta descubrió una fuente de electricidad constante, se pudo conocer lo que es en realidad un circuito eléctrico, y por consiguiente, lo que es la electricidad dinámica.

Campo eléctrico

Es el espacio en el cual pueden manifestarse las fuerzas de atracción y repulsión entre cargas eléctricas. El campo eléctrico rodea a cualquier tipo de carga, ya sea positiva o negativa y en general, rodea a cualquier objeto cargado tal como se muestra en la **figura 1.25.** Dicho campo puede representarse mediante innumerables líneas rectas que salen radialmente desde el centro de la carga y van dirigidas en todas direcciones. Estas líneas reciben el nombre de **líneas de fuerza eléctrica,** las cuales tienen fuerza natural que actúa en un sentido determinado, hacia afuera en los protones y hacia adentro en los electrones. Éste es el origen de las leyes de atracción y repulsión de las cargas.

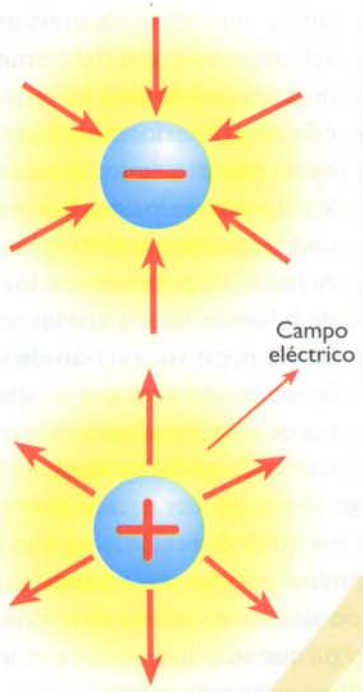


Figura 1.25. Campo eléctrico de una carga

De tal forma que cuando decimos que un electrón repele a otro **sin hacer contacto,** es la fuerza de repulsión entre las líneas de fuerza la que hace que las cargas se separen. Y, cuando decimos que un electrón y un protón se atraen, son las líneas de fuerza en el campo eléctrico quienes hacen que las cargas se unan.

De esta forma, podemos definir el campo eléctrico como ***la fuerza de origen eléctrico ejercida sobre una carga, capaz de orientarla y moverla de un átomo a otro.*** Si durante un proceso de carga se produce una acumulación de electrones sobre un objeto y de iones positivos sobre otro, cada cuerpo tiene su propio campo eléctrico. Estos campos son el resultado de la suma de todos los campos individuales de las cargas acumuladas y por tanto tienen una fuerza muy grande. **Figura 1.26**

Diferencia de potencial

En su estado natural, los átomos de los cuerpos se encuentran equilibrados o sea que todos poseen igual número de electrones y de protones. Un átomo o un cuerpo puede ser desequilibrado aplicando a éste una fuerza externa lo suficientemente

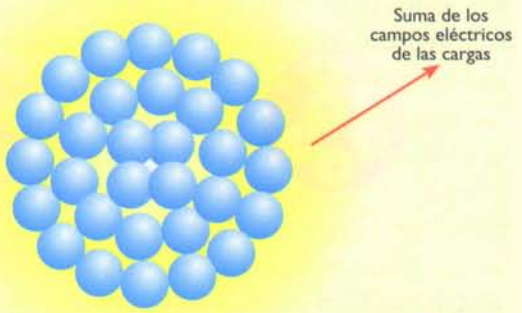


Figura 1.26. Campo eléctrico de un cuerpo

grande para hacer que el átomo pierda o gane electrones. Según lo anterior, se pueden presentar tres casos tal como se observa en la **figura 1.27.** En otras palabras, el potencial es el estado eléctrico en que se encuentra un cuerpo.

Observemos los dos átomos siguientes. Figura 1.28.

Comparando el estado de los dos átomos de la figura, vemos que existe una diferencia de potencial de cuatro electrones. De otra manera, pode-

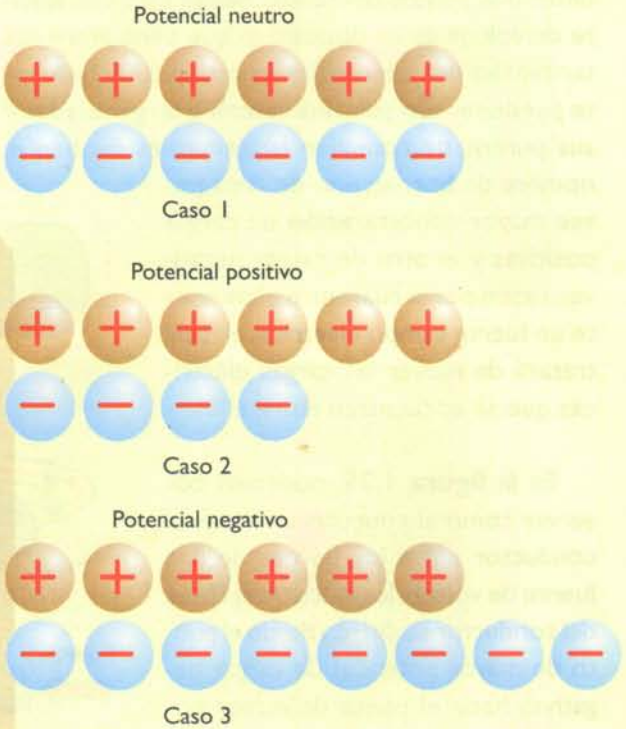


Figura 1.27. Potencial eléctrico

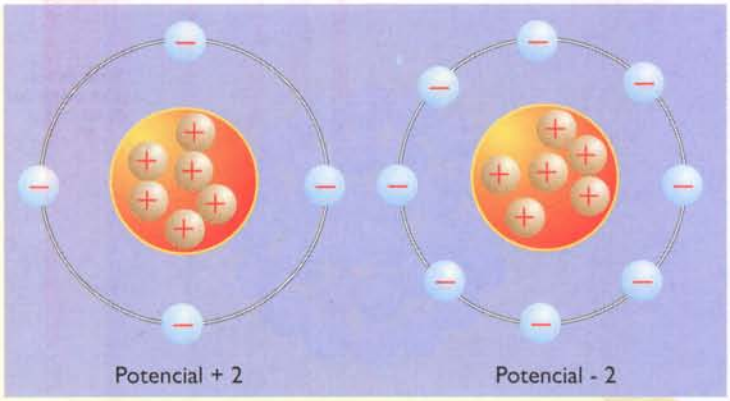


Figura 1.28. Diferencia de potencial

mos decir que la diferencia de potencial nos indica una diferencia entre átomos de potencial distinto, o lo que es lo mismo, hay diferencia de potencial cuando los átomos de uno y otro cuerpo son diferentes en su estado eléctrico. Esta diferencia de potencial se llama voltaje, tensión o fuerza electromotriz (FEM) y se define como la fuerza o presión capaz de obligar a los electrones libres de un conductor a moverse en una determinada dirección. Su unidad de medida es el voltio.

La diferencia de potencial solo puede existir entre dos puntos diferentes. Según esto una fuente de voltaje es un dispositivo que tiene entre sus terminales una diferencia de potencial. Dicha fuente puede ser una pila, una batería o un generador y sus puntos de conexión o terminales reciben el nombre de bornes; uno de ellos posee mayor concentración de cargas positivas y el otro de cargas negativas, razón por la cual entre ellos existe un fuerte campo eléctrico, el cual tratará de mover las cargas eléctricas que se encuentren entre ellos.

En la **figura 1.29**, podemos observar como al conectar un material conductor entre los bornes de una fuente de voltaje, los electrones libres del conductor se dirigen desde el punto de mayor potencial de cargas negativas hacia el punto de mayor potencial de cargas positivas. Nos formulamos entonces una pregunta: ¿por qué los electrones van del borne positivo al negativo de la fuente? La respuesta es sencilla: en el interior de la fuente se produce un efecto químico el cual desequilibra los átomos de los dos bornes, quedando un borne con más electrones que el otro. Al hacer un puente entre los dos bornes de la fuente, los electrones sobrantes del borne negativo tratarán de irse hacia el borne positivo ya que en éste hay escasez de ellos, impulsando a su paso los electrones libres del conductor. Por tanto, los electrones libres del conductor ahora no se moverán en cualquier dirección, sino que serán dirigidos al terminal positivo de la fuente originando así un flujo de electrones en esa dirección. Al impulso de la energía que se transfiere de electrón en electrón se llama corriente eléctrica. Esta solo es útil cuando se le hace desarrollar un trabajo a lo largo de un circuito eléctrico.

ES CONVENIENTE RECORDAR QUE: VOLTAJE, TENSIÓN, FUERZA ELECTROMOTRIZ Y DIFERENCIA DE POTENCIAL SE REFIEREN A LO MISMO.

La tensión se representa con la letra **U** en el sistema europeo y con la letra **E** en el sistema americano, para mayor facilidad emplearemos la letra **V** en el desarrollo del curso.

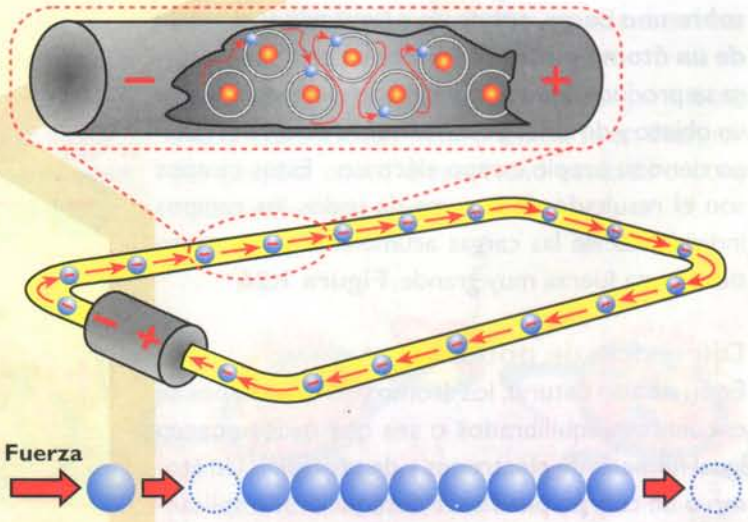


Figura 1.29. Circulación de los electrones

Formas de producir energía eléctrica en pequeñas cantidades

Por frotamiento o fricción

Como lo mencionamos anteriormente, el fenómeno de la electricidad es creado por el movimiento de electrones de sus órbitas naturales. La frotación o fricción fue la forma más antigua que conoció el hombre para generar electricidad. Se dice que fue el filósofo griego Tales de Mileto que vivió en el siglo 7 a.C. quien descubrió la electricidad; éste al frotar un trozo de ámbar con un trozo de tela o piel pudo atraer pequeños cuerpos livianos. Tales de Mileto no encontró la causa del fenómeno y quiso llamarlo de algún modo. Como ámbar en griego significa *elektron*, utilizó este nombre para esta fuerza invisible. Muchos siglos después se llamó ***electrones*** a las partículas de electricidad negativa que rodean el núcleo del átomo y que, cuando de alguna manera se mueven, forman la corriente eléctrica.

Hoy sabemos que la propiedad que Tales de Mileto descubrió en el ámbar no es solo de este material, sino que hay una gran cantidad de elementos con los que se puede repetir el experimento. En muchas de nuestras actividades diarias, voluntaria o involuntariamente se repite dicha experiencia. Por ejemplo, cuando se pasa varias veces un peine de plástico sobre el cabello seco, éste se carga eléctricamente; se comprueba si lo acercamos a unos trocitos de papel común, pues vemos como éstos son atraídos por el peine.

Ésta es una manifestación de la electricidad estática, la cual estudiamos al principio de esta lección. Al frotarse ambos materiales la piel pierde electrones y los mismos son ganados por el peine. La piel se electriza positivamente y el peine negativamente. **Figura 1.30**

Figura 1.30. *Producción de energía eléctrica por fricción*

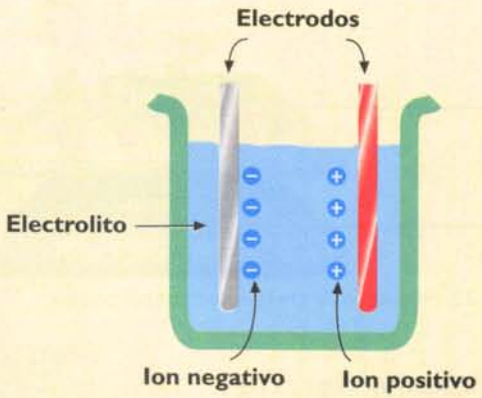


Figura 1.31. *Producción de energía eléctrica por reacción química*

Otros ejemplos de electricidad por frotación o fricción:

- El roce de las nubes con el aire.
- La fricción de un automóvil con el aire al desplazarse por una carretera.
- La fricción de una prenda de vestir de lana o material sintético con la piel.
- La piel con la pantalla del televisor.
- El caminar sobre una alfombra, etc.

Finalmente podemos decir que, aunque ésta es la forma más antigua que se conoce para producir electricidad, es muy difícil manejarla y dosificarla; ella existe y se emplea industrialmente en casos particulares, pero producirla en grandes cantidades para consumo doméstico no es posible.

Por reacciones químicas

Es muy sencilla la forma de producir electricidad por acción química; como ya se dijo en el tema de electricidad dinámica, esto lo hacen las pilas y las baterías eléctricas. Su funcionamiento se basa en la reacción química entre dos elementos diferentes. Si se introducen dos placas metálicas o electrodos metálicos como el cobre y el zinc en una solución ácida más agua, se puede comprobar la existencia de una fuerza electromotriz entre las dos placas, tal como se muestra en la **figura 1.31.** Este tema lo trataremos ampliamente en una próxima lección.

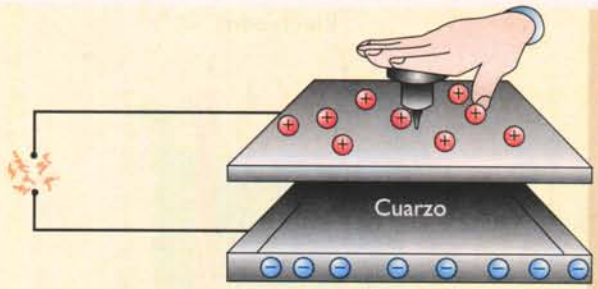


Figura 1.32. *Producción de energía eléctrica por presión*

Por presión o vibración

Ciertos cristales tienen propiedades piezoeléctricas, es decir, convierten la energía mecánica en energía eléctrica al ser sometidos a presión o vibración; estos son: el cuarzo, la turmalina, el titanio de bario, la sal de rochelle, etc. A este fenómeno se le llama ***piezoelectricidad.*** Como ejemplo de este principio, podemos mencionar los tocadiscos antiguos que utilizan un pequeño cristal piezoeléctrico con una aguja metálica, la cual, al pasar sobre la grabación del disco, presiona el cristal y genera pequeñas señales de fuerza electromotriz. Con la amplificación necesaria estas señales pueden hacer funcionar un parlante por medio del cual se escuchan los sonidos con un buen volumen.

Otra aplicación es el encendedor electrónico para la estufa de gas: cuando se acciona el pulsador, éste ejerce una presión sobre la superficie de un cristal de cuarzo y los electrones que se encontraban en dicha superficie saltan a la cara opuesta del cuarzo creando una diferencia de cargas entre ambas caras, generando la chispa. Los cristales piezoeléctricos tienen muchas aplicaciones en la industria: registran niveles de ruido, detectan cambios de presión, etc. **Figura 1.32**

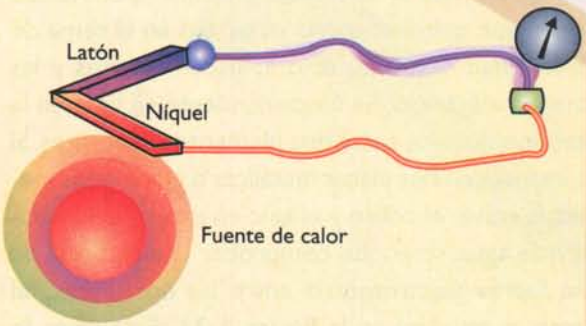


Figura 1.33. *Producción de energía eléctrica por efecto termoeléctrico*

Por el calor y por la luz

Energía radiante es el nombre que se le da a la energía proporcionada por fuentes de calor o de luz. Muchas clases de instrumentos eléctricos y electrónicos aprovechan este fenómeno llamado ***efecto termoeléctrico*** para convertir variaciones de temperatura en electricidad y con ello obtener mediciones de calor de cierta precisión a través de un termómetro eléctrico. El componente que produce electricidad a partir de la energía calórica se llama ***termopar*** y está formado por dos metales diferentes, por ejemplo, níquel y latón; en él la energía del calor lleva los electrones libres de un metal a otro, produciendo entre los dos una fuerza electromotriz (FEM). Los termopares tienen varias aplicaciones en el hogar y en la industria, se usan en termómetros, controles de temperatura en hornos y alarmas contra incendios, etc. **Figura 1.33**

También se puede obtener electricidad de la luz o de la energía lumínica; ello se consigue con una celda fotovoltaica, una celda fotoeléctrica o una batería solar, como las utilizadas en los satélites y naves espaciales para obtener energía eléctrica del sol. Una celda fotovoltaica es un sándwich de tres capas o materiales diferentes: una primera capa delgada y translúcida que deja deja pasar la luz que es recibida por una capa sensible de selenio o silicio, creándose de esta forma una fuerza electromotriz entre las dos capas exteriores. Las celdas fotovoltaicas también son utilizadas en estudios fotográficos, cámaras de vídeo, televisión, cámaras de fotografía automáticas, iluminación en vías públicas, ascensores, etc. **Figura 1.34**

Formas de producir grandes cantidades de energía eléctrica

Por medios magnéticos

Uno de los efectos mas familiares y más usados de la corriente eléctrica es la facultad que tiene de producir una fuerza invisible y poderosa que llamamos *electromagnetismo*. Esta fuerza magnética es la que hace posible la operación de motores, generadores, transformadores, instrumentos de medidas eléctricas, equipos de comunicación, etc. **Figura 1.35**

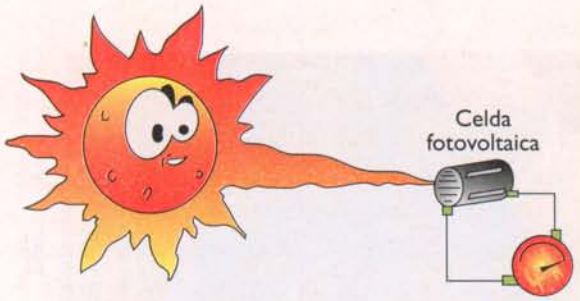


Figura 1.34. Producción de energía eléctrica por efecto de la luz

Es bueno entonces destacar lo importante que es la electricidad producida mediante el magnetismo, pues esta forma de energía posee características muy especiales que la hacen primero, la electricidad comercial más barata y segundo, la electricidad que prácticamente da origen a la electrónica. La electricidad por magnetismo se produce cuando un conductor, por ejemplo de cobre o una bobina, (alambre de cobre aislado y enrollado con muchas vueltas sobre un molde cilíndrico) se mueve dentro de la fuerza magnética de un imán. En ambos casos el campo magnético del imán impulsa los electrones libres del conductor de cobre.

Esta es la corriente que llega a través de los postes y extensas líneas de transmisión a nuestras casas para alimentar los aparatos eléctricos y que en muchos países se genera a una tensión de 120V y 60CPS (ciclos por segundo). Puede decirse entonces que esta corriente alterna se interrumpe 120 veces por segundo para que pueda cambiar de sentido y este fenómeno es tan rápido que prácticamente en una bombilla o lámpara eléctrica no se nota. La corriente alterna con todas sus características será estudiada con más profundidad en una próxima lección. **Figura 1.36.** La corriente alterna se produce a gran escala por intermedio de grandes generadores que se encuentran en las llamadas centrales eléctricas.

Centrales eléctricas

Una central eléctrica es esencialmente una instalación que emplea una fuente de energía primaria para hacer girar las paletas o álabes de una turbina mediante agua, vapor o gas; éstas a su vez, hacen girar una gran bobina en el interior de un campo magnético, generando así electricidad. Éste es el principio básico de funcionamiento de la mayoría de las centrales eléctricas que hay en el mundo: transformar energía mecánica en energía eléctrica. No ocurre así en las instalaciones de tipo fotovoltaico (centrales solares), que transforman la energía lumínica de la radiación solar en energía eléctrica. Los principales tipos de centrales eléctricas son: las hidroeléctricas, las termoeléctricas, las nucleares y las solares.

Centrales hidroeléctricas

Tienen por finalidad aprovechar, mediante un desnivel, la energía potencial contenida en la masa de agua que transportan los ríos para convertirla en energía eléctrica utilizando turbinas acopladas a un generador. **Figura 1.37**

Centrales termoeléctricas

Se denominan centrales termoeléctricas aquellas que producen energía a partir de la combustión de carbón, fuel-oil o gas en una caldera diseñada para tal efecto. **Figura 1.38**

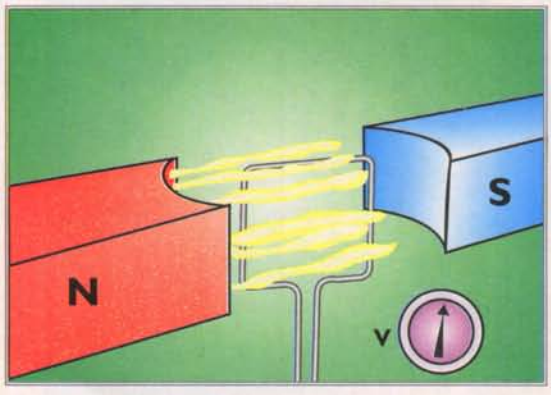


Figura 1.35. Producción de energía eléctrica por magnetismo

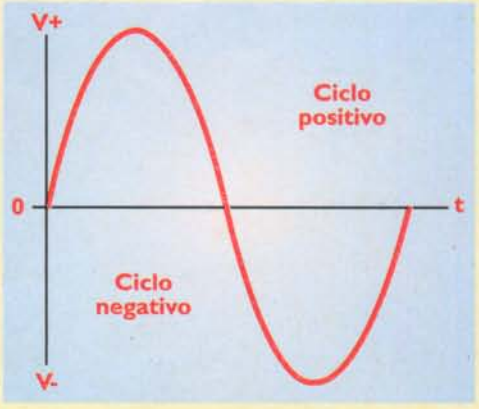


Figura 1.36. Forma de la corriente alterna

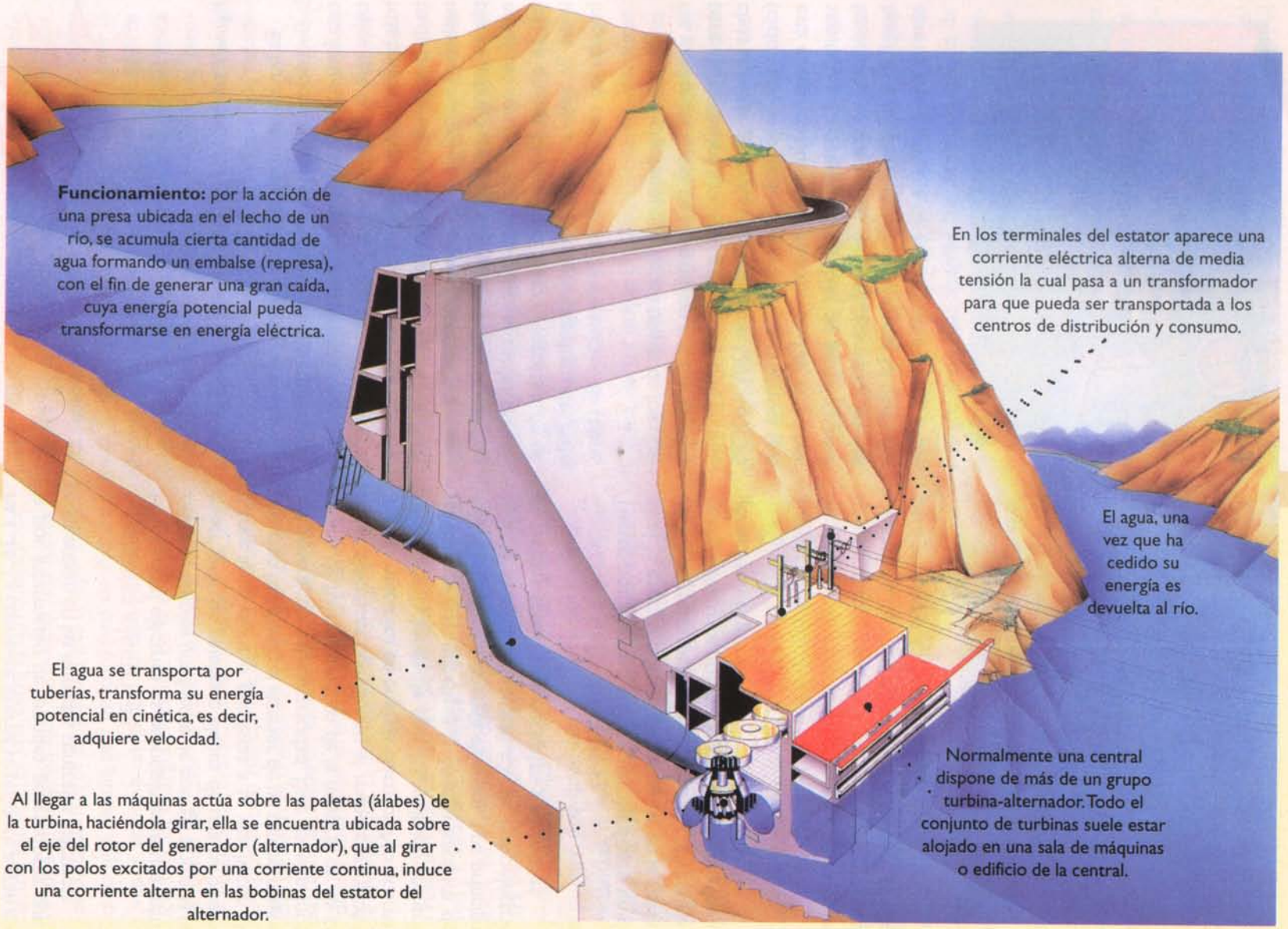


Figura 1.37. *Central hidroeléctrica*

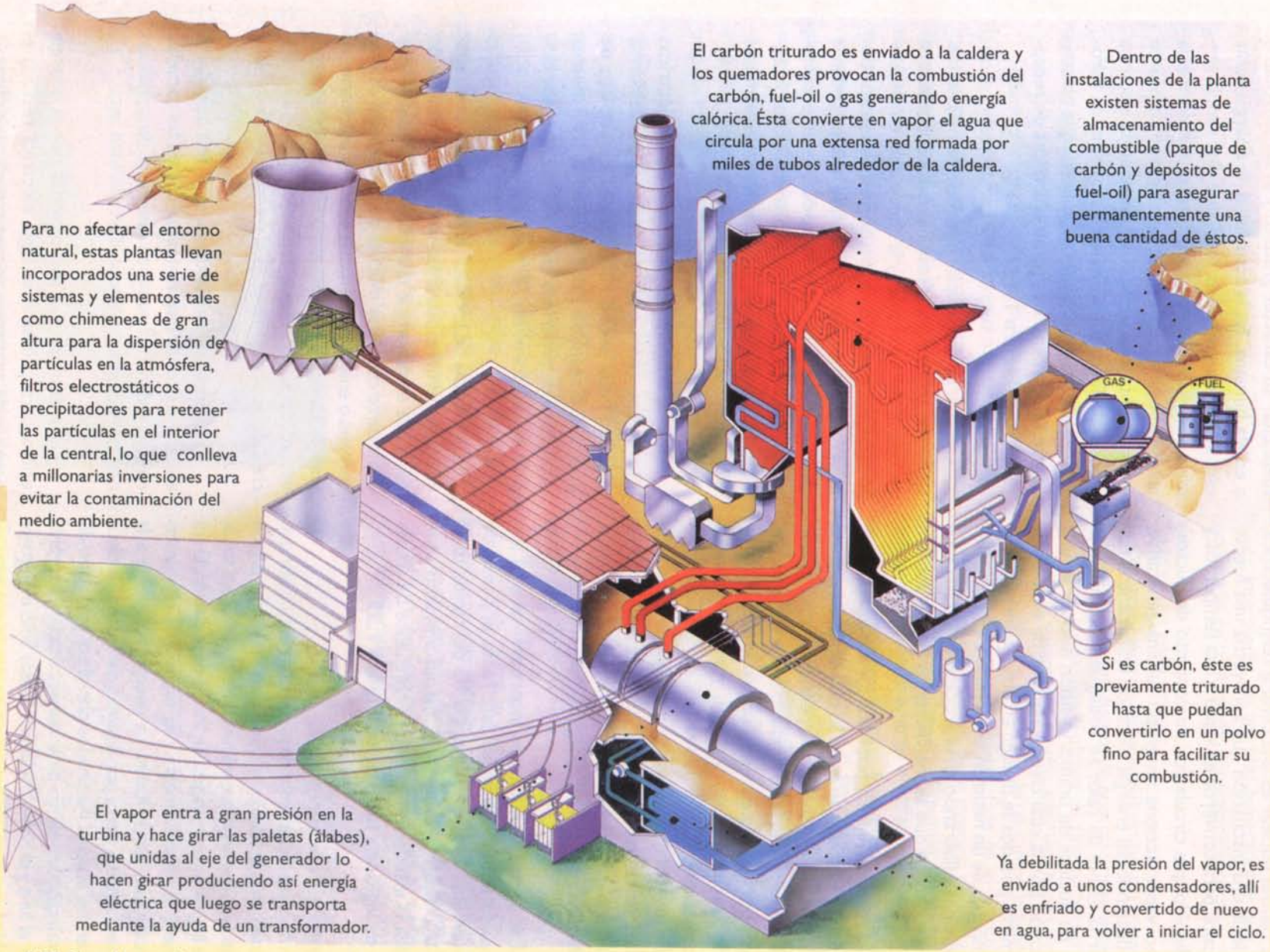


Figura 1.38. *Central termoeléctrica*

Centrales nucleares

Una central nuclear es una central termoeléctrica, es decir, una instalación que aprovecha una fuente de calor para convertir en vapor a alta temperatura un líquido que circula por un conjunto de ductos, dicho vapor acciona un grupo turbina-generador, produciendo así energía eléctrica. En la central nuclear la fuente de calor se consigue mediante la *fisión* de núcleos de uranio. La fisión nuclear es una reacción por la cual ciertos núcleos de elementos químicos pesados se dividen en dos fragmentos por el impacto de un neutrón, emitiendo a su vez varios neutrones y liberando en el proceso una gran cantidad de energía que se manifiesta en forma de calor.

La reacción nuclear por fisión fue descubierta por O. Hahn y F. Strassman en 1938 cuando detectaron la presencia de elementos de pequeña masa en una muestra de uranio puro irradiado por neutrones. Los neutrones que resultan emitidos en la reacción por fisión pueden provocar, a su vez, y en determinadas circunstancias, nuevas fisiones de otros núcleos. Se dice entonces que se está produciendo una reacción nuclear en cadena. Por tanto, los reactores nucleares son máquinas que permiten iniciar, mantener y controlar una reacción en cadena de fisión nuclear.

Las centrales nucleares incorporan el más sofisticado equipo de seguridad, hasta el punto de que en ellas se invierte más de 1/3 del capital total de la planta. Igualmente, el medio ambiente que rodea la instalación es objeto constante de trabajos de vigilancia radiológica. **Figura 1.39**

Centrales solares

Son diversos los sistemas de aprovechamiento solar que existen en la actualidad y que tratan de utilizar la gran cantidad de energía que emite constantemente el sol, la que llega a nuestro planeta en forma de radiación. El sol viene a ser efectivamente una especie de gigantesco reactor nuclear de fusión. La energía solar llega a la superficie de la tierra por dos vías diferentes: incidiendo en los objetos iluminados por el sol (radiación directa), o como reflejo de la radiación solar absorbida por el aire y el polvo (radiación difusa). Solo es aprovechable la primera de manera eficaz y en forma masiva.

Entre las ventajas que ofrece la energía solar se suele citar su carácter gratuito y el ser inagotable a escala humana. En la actualidad, la energía solar está siendo aprovechada mediante dos vías: la térmica y la fotovoltaica. La primera transforma la energía solar en calorífica. La segunda convierte directamente la energía solar en energía eléctrica gracias al efecto fotovoltaico; estos son los aprovechados para la producción de la energía eléctrica y se llaman centrales termoeléctricas de receptor central. **Figura 1.40**

Constan de una amplia superficie de helióstatos, es decir, grandes espejos sostenidos por soportes que reflejan la radiación solar y la concentran en un punto receptor instalado en una torre. Los espejos poseen mecanismos electrónicos que reciben órdenes que hacen que se muevan de modo que en todo momento estén en posición de recibir con mayor intensidad la radiación solar y concentrarla eficazmente en el receptor central instalado en la torre.

Una de las mayores centrales termoeléctricas solares tipo torre es la de Barstow, en California (E.E.U.U.) que posee 10 megavatios eléctricos de potencia. Consta de 1.818 espejos de 39.3 metros cuadrados de superficie cada uno y el receptor alojado en una torre de 77 metros de altura.

Otra forma de producir energía eléctrica en menor escala es utilizando la fuerza del viento, por medio de lo que se denomina una **central eólica.** Al igual que ocurre con otras muchas de las llamadas nuevas energías o energías alternas, la eólica es una fuente de energía. La energía eólica es producida por el movimiento del aire y ha sido empleada desde hace muchos siglos, por ejemplo, en el transporte marítimo.

La energía eólica puede ser utilizada con cierta eficacia en zonas determinadas donde las características del viento cumplen una serie de condiciones tales como continuidad, estabilidad, etc.

Las máquinas que son movidas por la energía eólica para producir energía eléctrica reciben el nombre de aerogeneradores o turbinas eólicas.

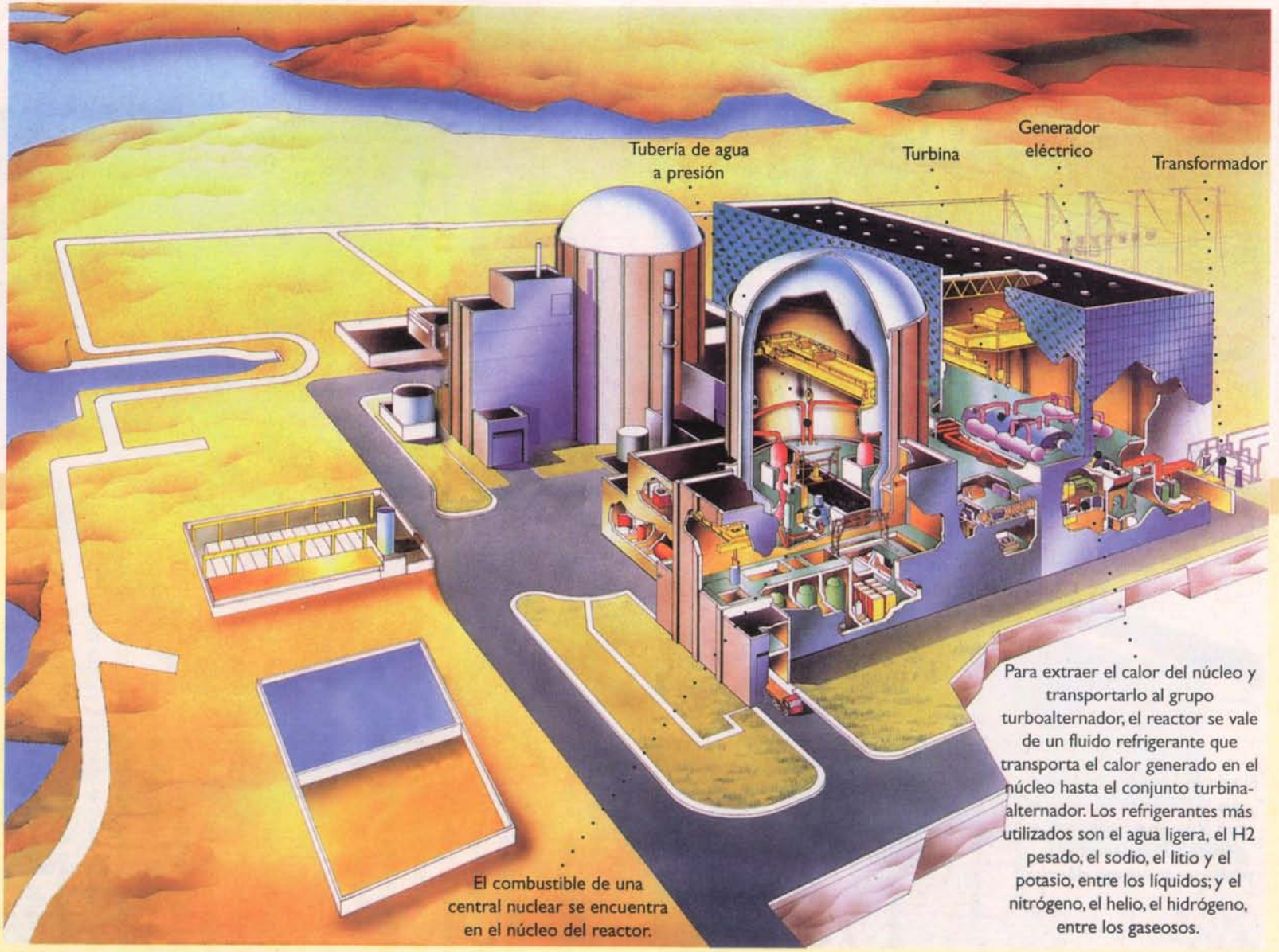


Figura 1.39. *Central nuclear*

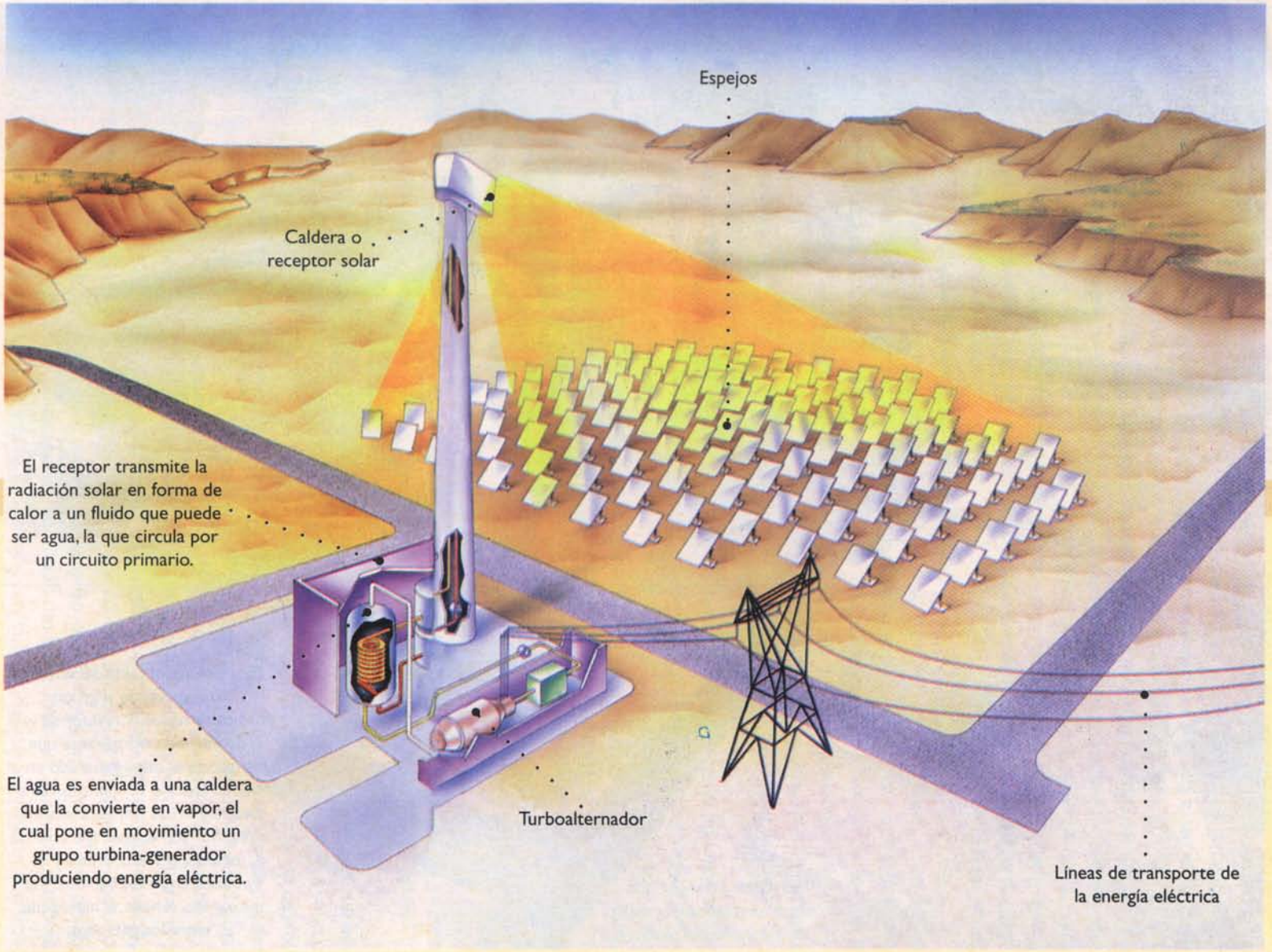
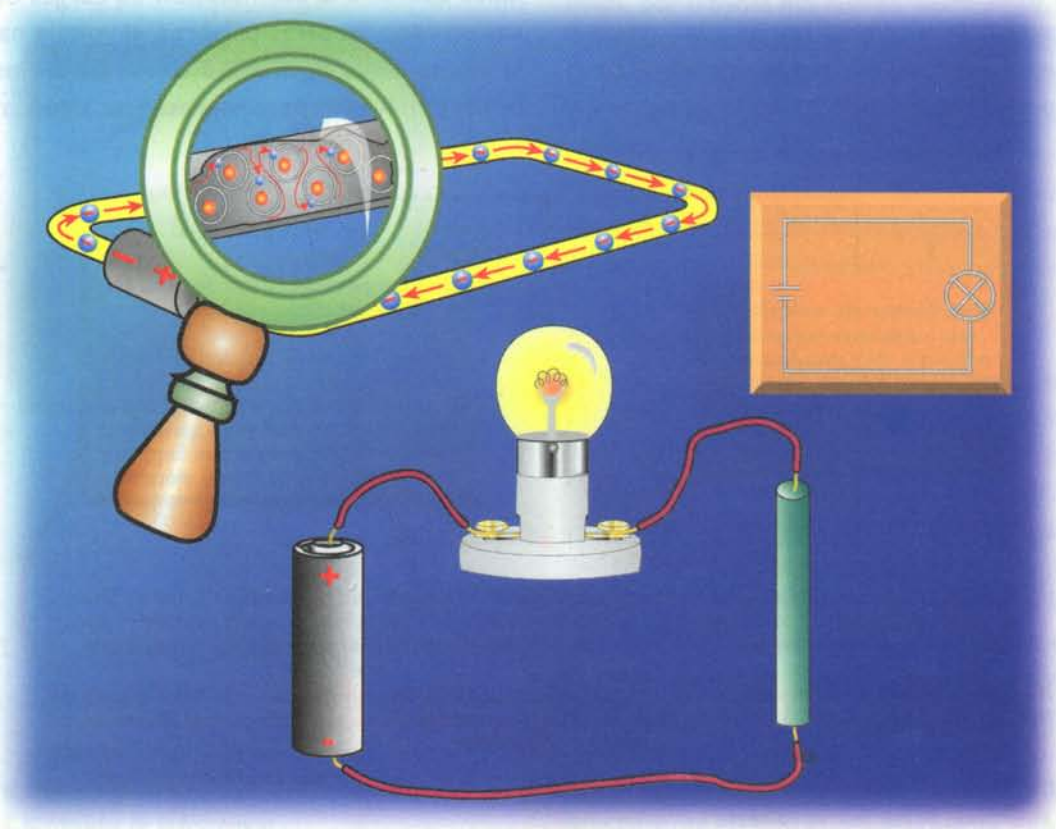


Figura 1.40. *Central solar*

Lección 2

Conceptos básicos acerca de los circuitos eléctricos y electrónicos

Después de que el hombre descubrió la energía eléctrica y la forma de producirla en grandes cantidades quiso emplearla de manera productiva, razón por la cual se crearon los llamados circuitos eléctricos. En esta lección nos dedicaremos al estudio de los circuitos y los elementos que los conforman.



¿Qué es un circuito eléctrico?

Es una combinación de componentes conectados entre sí de manera que proporcionen una o más trayectorias cerradas que permitan la circulación de la corriente y el aprovechamiento de ésta para la realización de un trabajo útil. Si el camino no es continuo, no hay circulación de la corriente. Dicho trabajo puede implicar:

- La conversión de la energía eléctrica en otras formas de energía o viceversa.
- La conversión de señales eléctricas de un tipo, en señales eléctricas de otro tipo.

Todo circuito, por sencillo que parezca, posee tres características importantes:

- Posee una fuente de voltaje; sin ésta no puede establecerse un flujo de corriente.
- Existe una trayectoria cerrada, por la cual circula la corriente desde un extremo de la fuente de voltaje hasta el otro, pasando por el circuito externo.
- La trayectoria o camino por el cual circula la corriente, presenta cierta oposición a su paso. Esto puede generar calor o limitar el paso de la corriente, lo que equivale también a una pérdida de energía que en la mayoría de los casos no se tiene en cuenta.

Los circuitos eléctricos y electrónicos, aunque pueden estar conformados físicamente por una gran cantidad de componentes, lo cual los hace ver muy complejos, están todos compuestos por tres elementos básicos. **Figura 2.1**

La fuente de voltaje

Suministra la fuerza necesaria para impulsar una corriente de electrones a través de los circuitos. Dicha fuerza recibe el nombre de **voltaje**.

El voltaje

Para que haya un flujo de corriente a través de un circuito es necesario aplicar una fuerza capaz de mover los electrones libres que se encuentren en el circuito, llamada **voltaje** y es proporcionada por una fuente la cual, recordemos, posee una diferencia de potencial entre sus terminales debido a la acumulación de cargas eléctricas en ellos. En otras palabras, el voltaje nace en la fuente. En la **figura 2.2** se muestran los símbolos empleados para representar algunos tipos

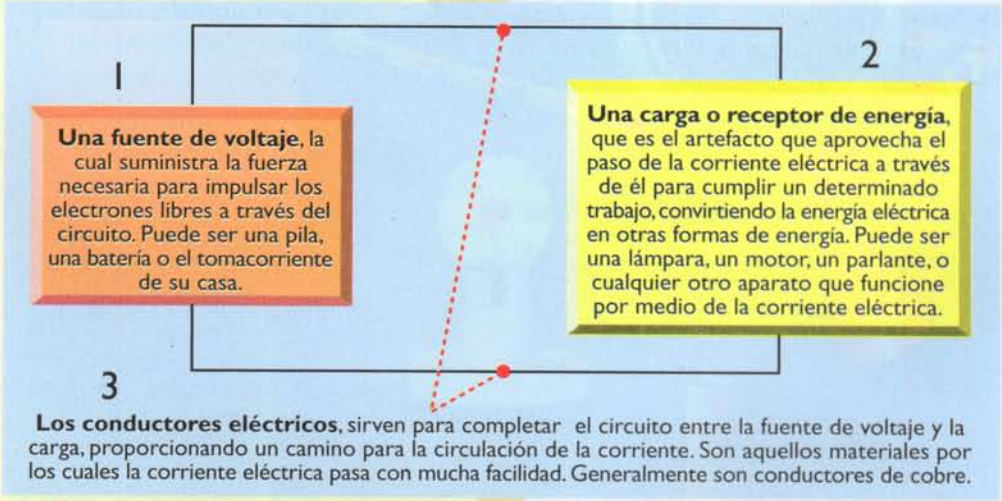


Figura 2.1. *Estructura básica de un circuito. El circuito eléctrico es un camino cerrado por el cual viaja la corriente eléctrica. Si el camino no es continuo, no hay flujo de corriente*

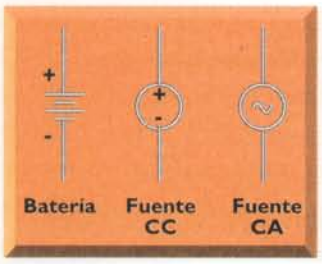


Figura 2.2. Simbología de las fuentes de voltaje comunes

de fuentes comunes. Los voltajes en un circuito se designan en varias formas dependiendo de su naturaleza, así:

- El voltaje entre los terminales de la fuente de alimentación, se denomina **fuerza electromotriz (FEM)**
- El voltaje entre los terminales de una carga, es llamado **caída de voltaje.**
- El voltaje entre dos puntos cualesquiera de un circuito, se llama **diferencia de potencial.**

El voltaje o fuerza aplicada a los circuitos puede ser básicamente de dos formas:

- Si los electrones se impulsan siempre en la misma dirección, es decir, que la fuente conserva siempre la misma polaridad, el voltaje es continuo (VCC).
- Si por el contrario, los electrones se impulsan primero en una dirección y luego en la otra alternando continuamente la dirección de la fuerza, es decir, cambiando alternativamente de polaridad, el voltaje es alterno (VCA).

Tanto la corriente como los componentes que conforman los circuitos reaccionan de manera diferente ante las dos formas de voltaje; esto lo estudiaremos en una próxima lección.

Unidad de medida

La unidad empleada para medir el trabajo realizado por la fuente al mover los electrones, recibe el nombre de **voltio (V).** El número de voltios representa la cantidad de fuerza aplicada a un circuito; a mayor voltaje, mayor será la fuerza aplicada al circuito y por lo tanto habrá mayor corriente. Sin embargo en electricidad y electrónica se manejan voltajes mayores y menores que el voltio, por lo cual es necesario disponer, además de la unidad fundamental, de otras unidades secundarias de medida denominadas múltiplos y submúltiplos.

- Los múltiplos, son unidades mayores que la unidad fundamental, y contienen a ésta varias veces exactamente.
- Los submúltiplos, por el contrario, son unidades de medida más pequeñas que la unidad fundamental y se encuentran contenidos en ésta varias veces exactamente.

En la **Tabla 2.1** se muestra un resumen de los múltiplos y submúltiplos del voltio.

Conversión de unidades

Para hacer los cálculos necesarios para la aplicación de fórmulas matemáticas en electricidad y electrónica, necesitaremos con frecuencia convertir una unidad dada en otra más grande o más pequeña. Para convertir pequeñas unidades en grandes y viceversa, se siguen las siguientes reglas prácticas:

- Para convertir de **voltios** a **milivoltios** se multiplica por mil (1.000) el número de voltios dados, lo que equivale a correr el punto decimal tres lugares a la derecha en la cantidad de voltios. Ejemplos:

  Convierta 0,532 voltios en milivoltios.
  Multiplicamos por 1.000 los voltios dados:

  0,532 x 1.000 = 532

  Es decir, 0,532 voltios equivalen a 532 mV.

	PREFIJO	SÍMBOLO	FACTOR DE MULTIPLICACIÓN
Múltiplos	Kilovoltio	KV	x 1.000
	Megavoltio	MV	x 1'000.000
Unidad básica	Voltio	V	x 1
Submúltiplos	milivoltio	mV	x 0,001
	microvoltio	µV	x 0,000001

Tabla 2.1. Múltiplos y submúltiplos del voltio

- Para convertir **milivoltios** en **voltios** se divide el número de milivoltios dados entre mil (1.000). Esto equivale a correr el punto decimal tres lugares a la izquierda en la cantidad de milivoltios. Ejemplos:

  Convierta 12 milivoltios en voltios.
  Dividimos entre 1.000 los milivoltios dados:

$$\frac{12}{1000} = 0{,}012$$

Es decir, 12 milivoltios equivalen a 0,012 voltios.

¿Con qué se mide?

El voltaje o fuerza electromotriz puede ser medido; para ello se emplea un instrumento llamado **voltímetro**. Éste debe conectarse en paralelo con el elemento en el cual desea hacerse la medición, tal como se muestra en la **figura 2.3.** Antes de usar este instrumento es necesario tener en cuenta la polaridad y seleccionar un rango o escala superior al voltaje máximo que se desea medir. Su manejo se trata con mayor profundidad en la sección de electrónica práctica.

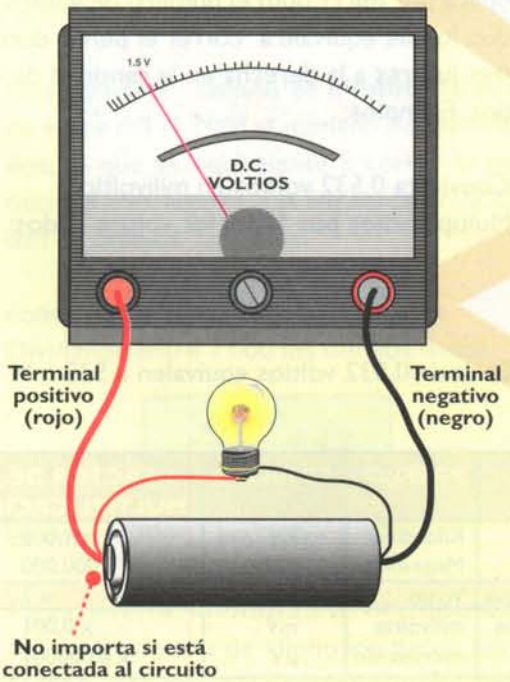


Figura 2.3. *Medición del voltaje*

Figura 2.4. *Simbología de las cargas comunes*

La carga o receptor de energía

Ésta convierte la energía de los electrones en movimiento en señales eléctricas u otras formas de energía. En la **figura 2.4** se muestran los símbolos empleados para representar algunos tipos de carga comunes como una resistencia, una lámpara, un motor o un parlante. El hecho de que un material por el cual está circulando corriente se caliente, demuestra que el voltaje aplicado efectúa un trabajo para mover electrones contra cierta oposición. Esta oposición al paso de la corriente, se denomina **resistencia**. Dicho concepto se estudiará más adelante.

Los conductores

Éstos proporcionan un camino fácil o de baja resistencia para la circulación de la corriente hacia y desde la carga. A este grupo pertenecen todos los materiales en los cuales la corriente eléctrica pasa con suma facilidad, como son los metales y el agua, entre otros. La habilidad de un material para conducir depende de la abundancia de electrones libres que haya en él. Se representan mediante líneas rectas, debido a que el grado de oposición que éstos presentan al paso de la corriente es tan pequeño (aproximadamente cero), que puede despreciarse.

Por el contrario, existe otro tipo de materiales que ofrecen mucha oposición al paso de la corriente y por tanto, se les utiliza para bloquear o aislar el paso de ellas. Se llaman también malos conductores o aislantes, debido a que poseen muy pocos electrones libres en sus átomos, por esto el paso de la corriente es tan pequeño que se considera equivalente a cero. El vidrio, la cerámica, los plásticos y las fibras sintéticas en general, son sustancias aisladoras.

Conductores más usados

En la lección No. 1 aprendimos que los mejores conductores son aquellos que en la órbita de valencia poseen menos de cuatro (4) electrones; en conclusión, podemos afirmar que el cobre, el oro, la plata y el aluminio son los metales mejores conductores. El hierro, aunque es un metal, no es tan buen conductor como los anteriores debido a que posee dos electrones de valencia, lo que lo hace más estable.

¿Con qué se prueban?

La prueba de los conductores se estudia en la sección de electrónica práctica. Pero aquí mostramos una forma sencilla de hacerlo que no requiere de ningún conocimiento previo sobre el manejo de equipos. Consiste en conectar el conductor con una pila y una lámpara como se muestra en la **figura 2.5**. Si la lámpara se enciende, podemos afirmar que el conductor se encuentra en buen estado, lo contrario significa que no lo está.

Los conductores pueden probarse también mediante el óhmetro, empleado para medir resistencias, o mediante un probador de continuidad. Como ya lo habíamos mencionado, la resistencia de los conductores es casi cero, por lo tanto, al conectar los dos extremos del conductor con el óhmetro, tal como se muestra en la **figura 2.6** éste debe marcar una lectura muy baja o igual a cero; lo contrario, si marca una lectura muy alta,

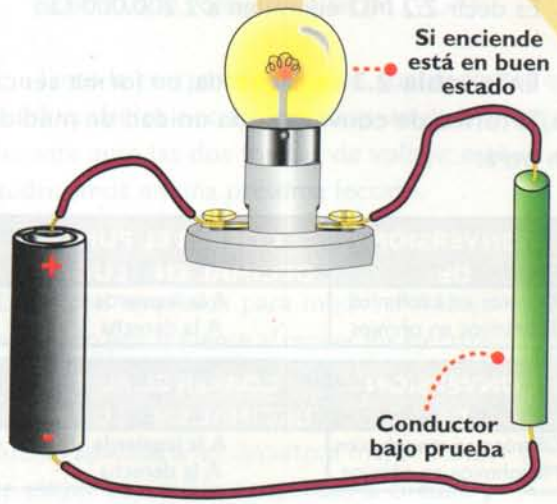


Figura 2.5. *Prueba de conductores*

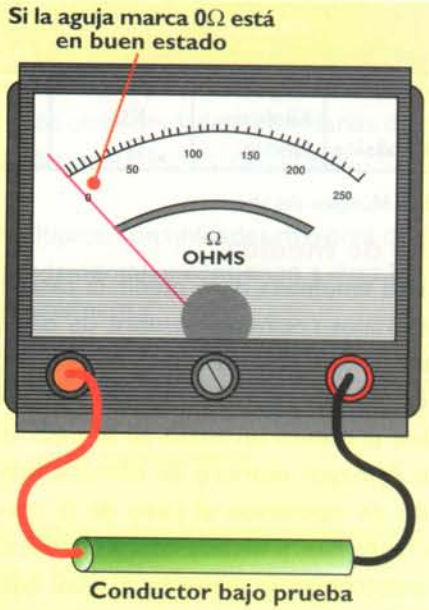


Figura 2.6. *Prueba con el óhmetro*

esto nos indicará que el conductor se encuentra roto o abierto. Para emplear el óhmetro no debe circular corriente por el elemento en el cual se desea hacer la medición. Para mayor información acerca de la prueba de conductores, consulte en la sección de electrónica práctica.

Resistencia

Todos los materiales conductores o aisladores ofrecen cierta oposición al paso de la corriente, propiedad que se llama **resistencia**. La facilidad de movimiento de los electrones en un material depende del tipo de átomos que lo constituyen. Así, los cuerpos aislantes son pobres en electrones libres, mientras que los materiales conductores son ricos en electrones libres. Se dice entonces que los aisladores tienen una resistencia muy alta y que los conductores una resistencia muy baja. Por lo tanto, no existe ningún conductor o aislador perfecto pues todos los materiales tienen resistencia. Por ello, la resistencia se define como el grado de oposición que ofrece un material al paso de la corriente eléctrica. La resistencia se representa con el símbolo que aparece en la **figura 2.7.**

Figura 2.7. *Símbolo de la resistencia*

	PREFIJO	SÍMBOLO	FACTOR DE MULTIPLICACIÓN
Múltiplos	Megohmio	MΩ	x 1'000.000
	Kilohmio	KΩ	x 1.000
Unidad básica	Ohmio	Ω	x 1

Tabla 2.2. *Múltiplos del ohmio*

Unidad de medida

La unidad empleada para medir la resistencia de los materiales recibe el nombre de **ohmio** y se representa con la letra griega *omega* (Ω). El número de ohmios representa la cantidad de oposición que presenta un material al paso de la corriente. A mayor número de ohmios, mayor será el grado de oposición al paso de la corriente y por lo tanto habrá menos corriente. En electricidad y electrónica se manejan, al igual que sucede con el voltaje, valores de resistencia mayores que el ohmio, por lo cual es necesario disponer también de otras unidades secundarias de medida. Los valores grandes de resistencia se nombran utilizando los prefijos kilo (1.000) y mega (1.000.000). En la **tabla 2.2**, se muestra un resumen de los múltiplos del ohmio.

Conversión de unidades

Para convertir una unidad de medida en otra se sigue el mismo procedimiento que con el voltaje, así:

- Para convertir ohmios en **kilohmios**, se divide entre mil (1.000) el número de ohmios dados, lo que es equivalente a correr el punto decimal tres lugares a la izquierda en la cantidad de ohmios. Ejemplos:

  convierta 4.700 ohmios en kilohmios.
  Dividimos entre 1.000 los ohmios dados:

$$\frac{4700}{1000} = 4{,}7$$

  Es decir, 4.700 Ω equivalen a 4,7 KΩ

- Para convertir **kilohmios** en **ohmios**, se multiplica el número de kilohmios dados por mil (1.000); esto equivale a correr el punto decimal tres lugares a la derecha en la cantidad de kilohmios dados. Ejemplo: convierta 220 kilohmios en ohmios. Para hacerlo multiplicamos por 1.000 los kilohmios dados:

$$220 \times 1000 = 220.000$$

  Es decir, 220 kΩ equivalen a 220.000 Ω.

- Para convertir **ohmios** en **megohmios**, se divide entre un millón (1.000.000) el número de ohmios dados, lo que es equivalente a correr el punto decimal seis lugares a la izquierda en la cantidad de ohmios. Ejemplo: convierta 1.000.000 ohmios en megohmios. Para hacerlo dividimos entre 1.000.000 los ohmios dados:

$$\frac{1'000.000}{1'000.000} = 1$$

  Es decir 1.000.000 Ω equivalen a 1 MΩ.

- Para convertir **megohmios** en **ohmios**, se multiplica el número de ohmios dados por un millón (1'000.000); esto equivale a correr el punto decimal seis lugares a la derecha en la cantidad de megohmios dados. Ejemplo: convierta 2.2 megohmios en ohmios. Para hacerlo, multiplicamos por 1.000.000 los ohmios dados:

$$2.2 \times 1'000.000 = 2'200.000$$

  Es decir 2.2 MΩ equivalen a 2.200.000 Ω.

En la **tabla 2.3** se recuerda, en forma sencilla, la forma de convertir una unidad de medida en otra.

CONVERSIÓN DE	CORRER EL PUNTO DECIMAL EN 3 LUGARES
Ohmios en kilohmios	A la izquierda
Kilohmios en ohmios	A la derecha

CONVERSIÓN DE	CORRER EL PUNTO DECIMAL EN 6 LUGARES
Ohmios en megohmios	A la izquierda
Megohmios en ohmios	A la derecha

Tabla 2.3. *Resumen conversión de unidades*

¿Con qué se miden?

En la práctica las resistencias son medidas con un instrumento llamado óhmetro, el cual debe ser conectado con la resistencia que se quiere medir sin importar la polaridad, tal como se observa en la **figura 2.8**.

Nunca debemos medir la resistencia en un circuito por el cual está circulando corriente. La forma correcta de manejar el óhmetro se trata con detalle en la sección de electrónica práctica.

Circuito abierto (open circuit)

Como lo hemos venido mencionando, para que haya flujo de corriente en el circuito es indispensable que exista una trayectoria continua, es decir, un camino cerrado. Cuando cualquier parte de la trayectoria se abre, decimos que el circuito se encuentra abierto puesto que no hay continuidad en la trayectoria de conducción y por consiguiente el flujo de electrones se detiene. La resistencia de un circuito abierto es infinitamente alta.

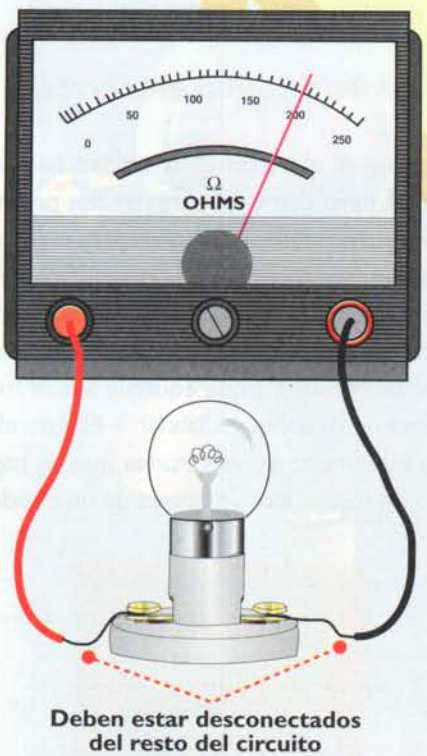


Figura 2.8. *Medidor de la resistencia*

Figura 2.9. *Causas de un circuito abierto*

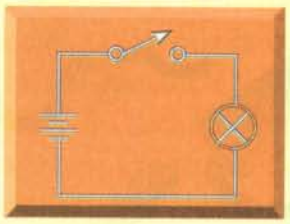


Figura 2.10. *Representación del circuito abierto*

Un circuito abierto puede producirse por una conexión suelta, porque la resistencia de carga está quemada, por uniones mal hechas, por contactos flojos o roturas en el conductor. Si se están usando dispositivos de protección, posiblemente ellos estén quemados. Algunos de estos casos se observan en la **figura 2.9.** Dichas fallas se detectan generalmente a simple vista. Además, cada vez que abrimos un interruptor, estamos produciendo un circuito abierto. En la **figura 2.10** se muestra la manera como se representa un circuito abierto.

Cortocircuito (short circuit)

Ya vimos como un circuito abierto impide el flujo de corriente. Estudiemos ahora el caso contrario, los cortocircuitos. En este caso existe una trayectoria cerrada entre los terminales de la fuente, pero la resistencia de esta trayectoria es prácticamente igual a cero, lo cual hará circular un flujo de corriente mayor al normal. En la **figura 2.11** se muestra la forma de representar esta situación. Generalmente el cortocircuito se produce por una derivación a través de la resistencia de carga, es decir, por instalar un alambre entre los dos bordes del receptor, cuando se tocan dos conductores desnudos, o cuando se conectan directamente los terminales de la fuente. **Figura 2.12**

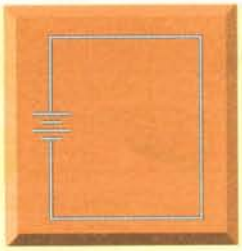


Figura 2.11. Cortocircuito

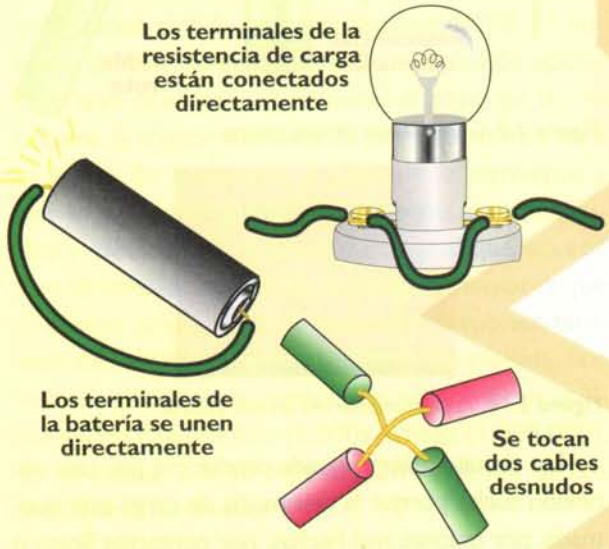


Figura 2.12. Posibles causas de cortocircuito

¿Qué puede suceder si se ocasiona un cortocircuito?

Al aumentar la corriente en forma excesiva, se produce en el circuito un calentamiento de los conductores que deteriora los aislamientos y produce chispas que pueden ocasionar incendios y daños en los equipos. Analicemos el ejemplo de la **figura 2.13**. Un cortocircuito a través de los alambres que llevan la corriente a la lámpara, provocará que por éstos fluya

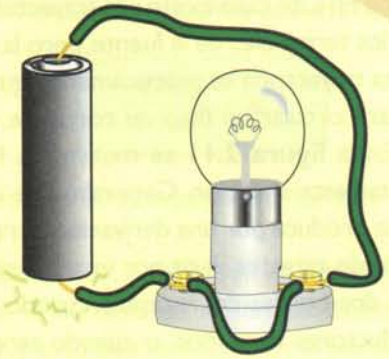


Figura 2.13. Cortocircuito real

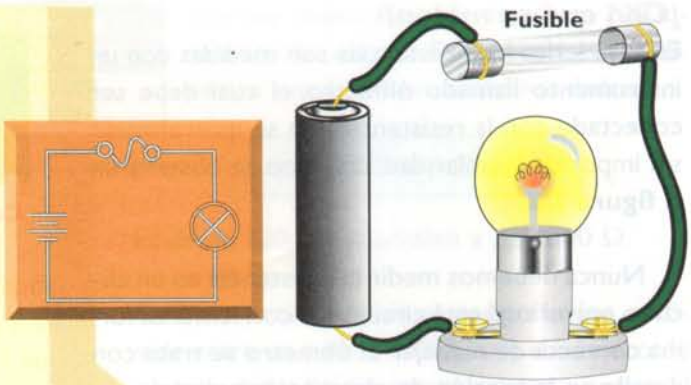


Figura 2.14. Protección contra cortocircuito

una corriente muy grande, pero ninguna a través de la lámpara. En este caso decimos que la lámpara está en cortocircuito, ésta no sufre ningún daño, pero los conductores pueden calentarse hasta quemarse. Para evitar esto se pueden usar unos dispositivos que protejan al circuito contra el flujo excesivo de corriente, llamados ***fusibles***, los cuales se estudian detalladamente en la sección de componentes. **Figura 2.14**

Queda entonces claro que para que haya circulación de corriente el circuito debe estar cerrado y además, debe existir una carga que controle el flujo de corriente. **Figura 2.15**

La corriente eléctrica

Sabemos que el electrón es la unidad básica de la electricidad, pero como su carga es tan pequeña, es necesario mover millones de ellos para producir una corriente que sea apreciable. Como dichos números son tan grandes sería muy difícil expresarlos con palabras. Por ello se ha creado una unidad más práctica llamada **culombio** (**C**) que equivale a 6.28 millones de millones de millones (6.28×10^{18}). El culombio representa el número de electrones que se hayan en reposo o en movimiento a través de un conductor.

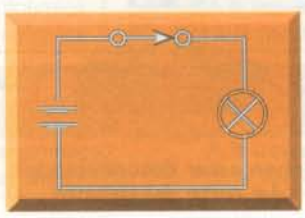


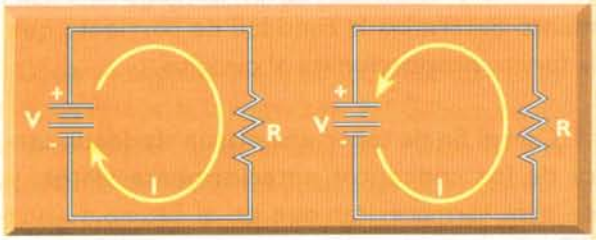
Figura 2.15. Circuito cerrado

Intensidad de la corriente

Es la cantidad de electrones que pasan o circulan por un conductor en una determinada unidad de tiempo. Se representa con una flecha, se nombra con la letra i ó I y se mide en amperios (A). Para medirla debemos ubicarnos en un punto del conductor y establecer la cantidad de electrones que pasan por éste en un segundo.

Como el número de electrones (carga eléctrica) se mide en culombios, un amperio representa el paso de un culombio en un segundo a través de un circuito; es decir, el movimiento de $6{,}28 \times 10^{18}$ electrones en un segundo. Esta unidad de medida se ha llamado amperio en honor de André M. Ampere (1775 - 1836), científico francés que contribuyó en forma importante con sus investigaciones al conocimiento de los fenómenos eléctricos y magnéticos.

Es importante notar que la corriente siempre partirá del polo negativo de la batería, circulará a través de todo el circuito externo y volverá a entrar a la fuente por el polo positivo. A esta corriente se le llama corriente electrónica, porque los electrones libres siempre se mueven del polo negativo al positivo. Antes de que naciera la "teoría electrónica" se creía que la corriente circulaba del polo positivo al negativo, lo cual realmente es erróneo pero se ha aceptado por convención y en muchos circuitos encontrará el llamado "sentido convencional de la corriente". En el desarrollo del curso manejaremos el **sentido convencional** para representar la corriente eléctrica. **Figura 2.16.**



a. Sentido convencional (de positivo a negativo) **b.** Corriente electrónica (de negativo a positivo)

Figura 2.16. *Dirección de la corriente*

CONVERSIÓN DE	CORRER EL PUNTO DECIMAL EN 3 LUGARES
Amperios en miliamperios	A la derecha
Miliamperios en amperios	A la izquierda

CONVERSIÓN DE	CORRER EL PUNTO DECIMAL EN 6 LUGARES
Amperios en microamperios	A la derecha
Microamperios en amperios	A la izquierda

Tabla 2.4. *Resumen de la conversión para las unidades de medida de la corriente*

Conversión de unidades

La unidad fundamental de la corriente y la más empleada en electricidad es el **amperio** (**A**). Sin embargo, en los circuitos electrónicos se manejan normalmente corrientes menores a un amperio en cuyo caso se emplea otra unidad llamada **miliamperio** (**mA**) la cual es equivalente a la milésima parte de un amperio, es decir un amperio dividido en 1.000 partes. Para corrientes mucho más pequeñas se emplea el **microamperio** (**μA**) que equivale a la millonésima parte de un amperio, es decir un amperio dividido en un millón de partes.

Para convertir unidades pequeñas de corriente a grandes y viceversa, se siguen los mismos pasos que para el voltaje y la resistencia. En la **Tabla 2.4** se recuerda, en forma sencilla, la forma de convertir una unidad de medida en otra.

Como se mide la corriente

La intensidad de la corriente a través de un circuito se mide con un instrumento llamado amperímetro. Para conectar éste, lo primero que debemos tener en cuenta es que el amperímetro **SIEMPRE** se conecta en serie con la línea que suministra corriente al circuito, tal como se muestra en la **figura 2.17**; de esta manera obligamos a la corriente a circular a través del amperímetro y nos aseguraremos de que la medida sea la correcta.

La teoría y el manejo del amperímetro se estudia detalladamente en la sección de Electrónica Práctica.

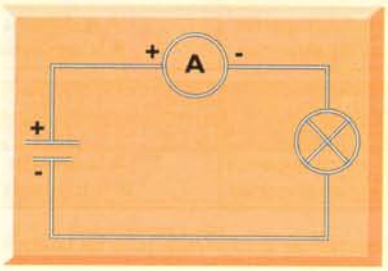


Figura 2.17. *Medición de la corriente conectando el amperímetro en* ***serie*** *con la carga*

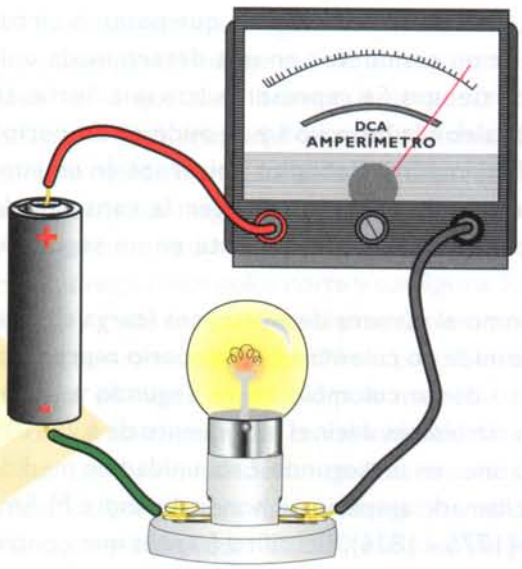


Figura 2.18. Circuito eléctrico simple. *Es una trayectoria cerrada que recibe voltaje (V) y en la cual se produce una corriente (I) limitada por una resistencia (R). El circuito proporciona los medios para emplear la energía de la batería como fuente de voltaje.*

Una vez conocidos cada uno de los elementos que conforman el circuito eléctrico, analicemos su funcionamiento mediante el siguiente ejemplo. **Figura 2.18**

El circuito, en este caso formado por los conductores, es el medio por el cual circula la corriente que lleva la energía de la fuente de voltaje al filamento de la bombilla, donde se emplea para hacer un trabajo útil, en este caso generar luz y calor. La resistencia de dicho filamento determina la cantidad de corriente que la fuente proporcionará al circuito.

Con el fin de tener una mayor claridad acerca de los conceptos anteriormente vistos, y de esta forma evitar que en el futuro se nos dificulte comprender los nuevos elementos que se le irán agregando al circuito básico, haremos un sencillo experimento.

Experimento N° 2. Circuito eléctrico simple

Parte I

El propósito de este experimento es ensamblar el circuito eléctrico más simple que existe: una batería de 9V alimentando una lámpara o bombilla.

Materiales necesarios:

- 1 Bombilla (lámpara) para linterna (9V)
- 1 Portalámpara para dicha bombilla
- 50 cm de alambre para conexiones
- 1 Interruptor unipolar
- 1 Batería de 9V

Figura 2.19. *Materiales para el experimento*

Figura 2.20. *Circuito ensamblado*

Monte el circuito cuyo diagrama se muestra en la **figura 2.18**. Éste debe quedar tal como se muestra en la **figura 2.20**

Cuestionario:

1. ¿Qué observa?
2. ¿Qué sucede si no quisiéramos utilizar la luz de la lámpara?
3. ¿Podríamos controlar el flujo de corriente?
4. ¿Cómo?

Conclusiones:

Al hacer todas las conexiones indicadas anteriormente, le hemos proporcionado un camino a la corriente. La bombilla emite luz cuando el filamento de tungsteno que se encuentra en su interior se calienta, lo que produce un brillo incandescente. El filamento por sí mismo no puede producir corriente, por lo que es necesario que exista una diferencia de potencial. Debido a que la batería tiene una diferencia de potencial de 9V entre sus terminales, al conectar ésta a los dos terminales de la bombilla mediante alambres, se produce una corriente que circula a través del filamento.

Parte 2

Con el fin de controlar el flujo de corriente en el circuito, vamos a agregarle un interruptor. Este componente controla la corriente permitiendo o interrumpiendo el paso de ésta ya que puede abrir o cerrar el circuito a medida que cambia de posición. Para ello debemos seguir los siguientes pasos:

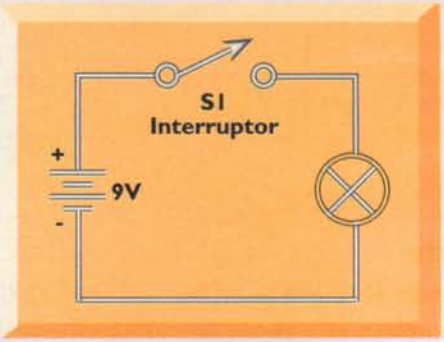


Figura 2.21. *Circuito simple con interruptor*

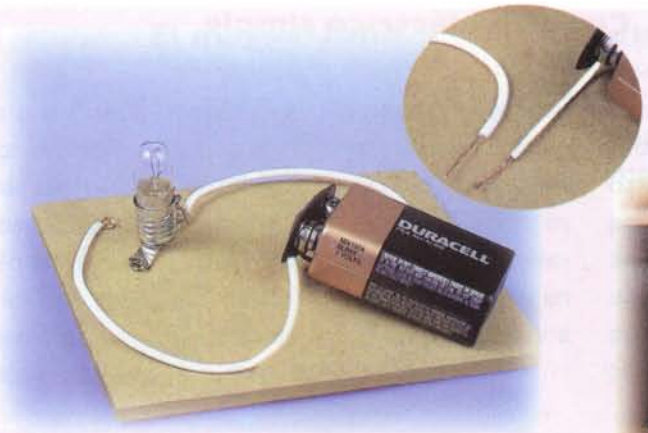


Figura 2.22

1. Desconecte un cable del portalámpara y córtelo por la mitad. **Figura 2.22**

Figura 2.23

2. Conecte un extremo del cable libre a uno de los terminales del interruptor. **Figura 2.23**

Figura 2.24

3. Conecte el otro borne del interruptor al extremo sobrante del cable. **Figura 2.24**

Figura 2.25

4. Conecte nuevamente el cable suelto al portalámpara. **Figura 2.25**

Figura 2.26

Cuestionario:

1. Cierre y abra varias veces el interruptor. ¿Qué observa? **Figura 2.26**
2. De acuerdo con lo anterior, ¿Cuáles son las condiciones necesarias para que haya circuito cerrado?

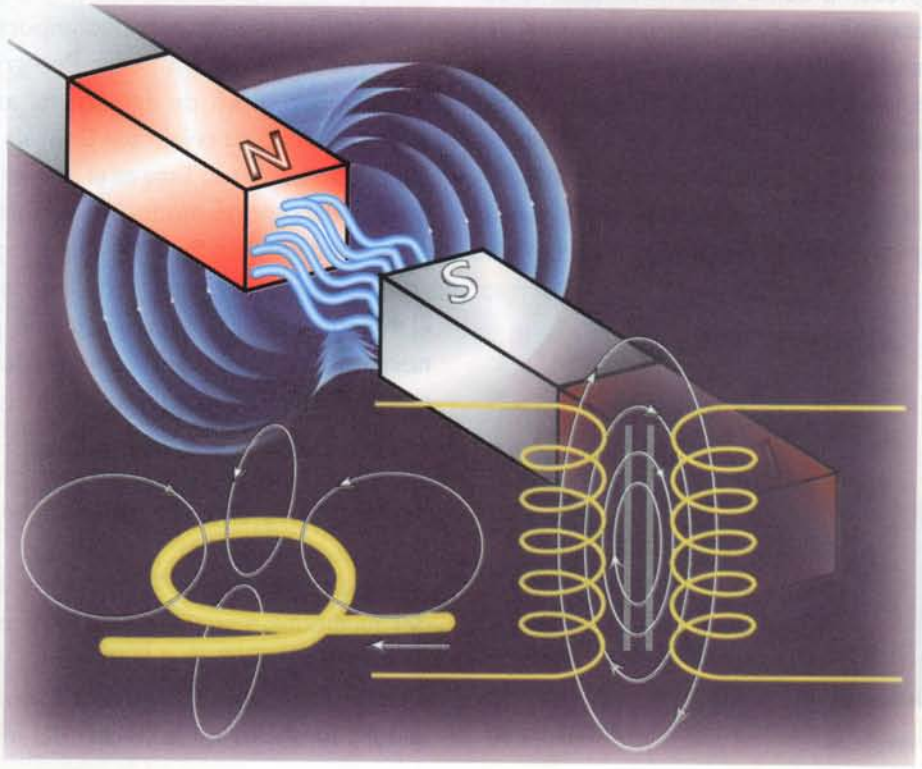
Conclusiones:

- Cuando se cierra el interruptor, el circuito proporciona un camino continuo para que pueda circular la corriente eléctrica; a esto se le llama **circuito cerrado**.
- Cuando el interruptor está abierto, el circuito se abre haciendo que la trayectoria eléctrica sea incompleta, por ello la corriente no puede pasar y circular por el circuito por lo que la lámpara no encenderá; a ésto se le llama **circuito abierto.**

Lección 3

El magnetismo y el electromagnetismo

Ningún estudio de la electrónica sería completo si no se tratan los temas del magnetismo y el electromagnetismo. Muchos de los componentes, los aparatos y las tecnologías modernas, se basan para su funcionamiento en estos fenómenos de la naturaleza. Entre ellos están los transformadores, las bobinas, los parlantes, los motores, los instrumentos de medida, las cintas magnéticas, los discos duros de las computadoras, la comunicación por ondas de radio, los equipos médicos de resonancia magnética, las bandas magnéticas de las tarjetas de crédito, los trenes de levitación magnética, etc. En esta lección estudiaremos qué es el magnetismo y su relación con la electricidad, llamada electromagnetismo.



El magnetismo

Es una fuerza invisible que sólo puede detectarse por el efecto de atracción que produce entre dos o más cuerpos. Si el efecto es permanente, estos cuerpos reciben el nombre de **imanes** y si el efecto es producido por la circulación de una corriente eléctrica por un conductor, ya sea recto o enrollado en forma de bobina, se llama electromagnetismo y a este dispositivo se le llama **electroimán**.

Breve historia

El término **magnetismo** tiene su origen en el nombre que en la época de los filósofos griegos recibía una región del Asia Menor, entonces denominada Magnesia; en ella abundaba una piedra negra o piedra imán capaz de atraer objetos de hierro y de comunicarles por contacto un poder similar. Desde la más remota antigüedad se tenía conocimiento de que un mineral, la magnetita (óxido ferroso-férrico) **figura 3.1**, tenía la propiedad natural de atraer al hierro. A esta propiedad se le llamó magnetismo, e imanes a los cuerpos que la poseen. A pesar de que ya en el siglo VI a. C. se conocían un cierto número de fenómenos magnéticos, el magnetismo como tema de estudio no comienza a desarrollarse hasta más de veinte siglos después, cuando la experimentación se convierte en una herramienta esencial para el desarrollo del conocimiento.

También se observó en la antigüedad que un cuerpo magnético puede comunicar su propiedad al hierro (imantar). En el caso del hierro, la imantación cesa cuando se vuelve a separar del imán que la causó. Gracias al conocimiento del imán natural (magnetita), pudo construirse la brújula. La leyenda dice que Hoang-ti, fundador del Imperio Chino, perseguía con sus tropas a un príncipe rebelde y se perdió en la niebla. Para orientarse, construyó una brújula en la cual la figura de una mujer supuestamente imantada, siempre apuntaba al sur y así atrapó a los rebeldes.

Figura 3.1. *La magnetita*

Se dice que los chinos utilizaban una especie de brújula en el siglo XII a.C., pero hasta el final del siglo XII d. C. no se tiene una clara referencia de un compás marítimo. Para ese entonces los europeos habían ya desarrollado una brújula, pues ya en 1200 d.C., Neckam of St. Albans muestra agujas pivotadas que marcan la ruta en su libro De Utensilibus. Aproximadamente en la misma época, Guyot de Provoins, un trovador de la corte de Barbarroja, se refiere en la llamada Bible Guyot al empleo de una piedra que se utiliza para tocar a una aguja. Ésta se montaba sobre una paja que flotaba y podía girar libremente. El uso de esta brújula de flotación era ya común en el siglo XIII d. C.

El primer tratado europeo importante sobre el magnetismo se debe a Pedro Peregrinos de Maricourt, quien el «8 de agosto del año del Señor 1269» escribió su celebrada Epístola a Sygerius de Foucaucort, soldado. Este es el primer informe científico, en el sentido moderno de la palabra, del que poseemos noticias. Peregrinos distingue claramente los polos de un imán permanente; observa que el Norte y el Sur se atraen y que polos iguales, norte por ejemplo, se repelen; además describe cómo, si se fragmenta un imán, se crean otros polos, y discute sobre la aguja pivotada. Asegura también que es de los polos magnéticos de la Tierra de donde los polos del imán reciben su virtud.

Lo que podríamos llamar la etapa precientífica del magnetismo termina y culmina con la aparición de la imponente figura de William Gilbert de Colchester (1544-1603), **figura 3.2**, quien fue el verdadero fundador de la ciencia del magnetismo. Su

Figura 3.2. *William Gilbert (1544 - 1603). Estudioso del magnetismo*

Magnete Magnetiasque Corporibus et de Magno Magnete Tellure Physiologia Nova, usualmente y por fortuna conocido como *De Magnete*, fue publicado en 1600 y puede considerarse como uno de los trabajos clave de la revolución científica que se llevaba a cabo por esas épocas.

Gilbert fue de los primeros "filósofos naturales" que hizo hincapié en el método experimental y que lo utilizó para ahondar en el conocimiento del magnetismo. En los seis libros de que consta *De Magnete*, Gilbert describe múltiples fenómenos, entre los cuales destaca como la atracción entre el hierro y la magnetita imantada puede ser aumentada "armando" la magnetita, esto es, poniendo casquetes de hierro en las juntas de la piedra. Esto hace que el peso que puede ser levantado aumente en un factor de cinco.

Observó además que la atracción se concentra en los extremos de la magnetita. Así, Gilbert detalla como se pueden hacer imanes por medio de tres métodos: tocando objetos imantados; por deformación plástica; y fabricando barras de hierro, calentándolas y dejándolas enfriar. De hecho, estos métodos fueron los que se usaron hasta 1820. Observó también que el calor destruye el magnetismo. En su último libro presenta sus teorías y trata de encuadrar el magnetismo en el sistema de Copérnico. Uno de sus éxitos fue el de deducir las propiedades de atracción de polos opuestos y otro, el de que la Tierra se comporta como si tuviera un imán enterrado en ella. **Figura 3.3**

Cómo se produce el magnetismo

En el caso de los imanes naturales, o de los cuerpos imantados, la corriente que origina el magnetismo es el conjunto de todas las corrientes elementales que poseen los electrones girando alrededor de sus núcleos. En la mayoría de las sustancias, estos imanes elementales están desordenados, cada uno orientado en una dirección del espacio, por lo que su resultante es nula, y no presentan magnetismo. En ciertas sustancias, como la magnetita, estos pequeños dominios magnéticos pueden orientarse muy fácilmente, debido a influencias externas (puede ser el mismo magnetismo terrestre); cuando varios dominios elementales magnéticos se orientan en una misma dirección espacial, su resultante ya no es nula, y el cuerpo resulta imantado ejerciendo atracción hacia otros cuerpos.

Los cuerpos cuyos dominios magnéticos son fácilmente orientables o sea fáciles de magnetizar, se llaman PARAMAGNÉTICOS. Aquellos otros que por el contrario, resultan difícilmente o nada imantables, se llaman DIAMAGNÉTICOS. Existe un grupo de materiales como el hierro, el cobalto, el níquel y ciertos compuestos especiales que son ex-

Figura 3.3. *La tierra es un imán gigantesco*

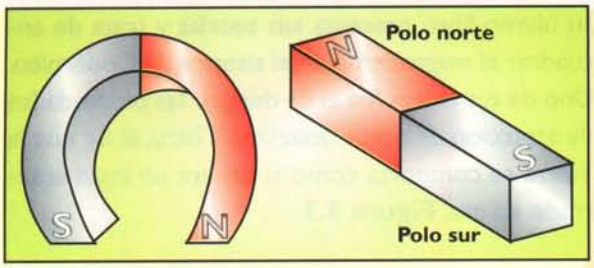


Figura 3.4. Los polos de un imán

tremadamente paramagnéticos. Dado que el hierro es el primero que se descubrió con tal comportamiento, estos materiales reciben el nombre de materiales FERROMAGNÉTICOS.

Naturaleza del magnetismo

El estudio del comportamiento de los imanes pone de manifiesto la existencia en cualquier imán de dos zonas extremas llamadas **polos** en donde la acción magnética es más intensa, **figura 3.4**. Para distinguir los dos polos de un imán recto se les llama **polo norte** y **polo sur**. Esta referencia geográfica está relacionada con el hecho de que la Tierra se comporta como un gran imán. **Figura 3.3**

El principio básico del magnetismo establece que: polos de distinto tipo (N-S y S-N) se atraen, **figura 3.5a** y polos del mismo tipo (N-N y S-S) se repelen, **Figura 3.5b**. Las experiencias con brújulas indican que los polos del imán terrestre se encuentran próximos a los polos sur y norte geográficos respectivamente. Por tal motivo, el polo de la brújula que se orienta aproximadamente hacia el Norte terrestre se denomina polo Norte y el opuesto constituye el polo Sur. Tal distinción entre polos magnéticos se puede extender a cualquier tipo de imanes.

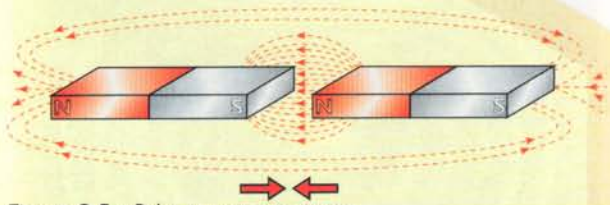


Figura 3.5a. Polos opuestos se atraen

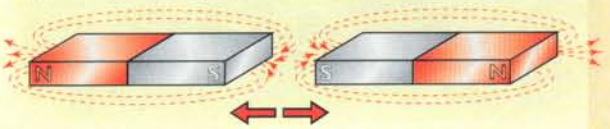


Figura 3.5b. Polos iguales se repelen

Esta característica del magnetismo de los imanes fue explicada por los antiguos como la consecuencia de una propiedad más general de la naturaleza consistente en lo que ellos llamaron la «atracción de los opuestos». Otra propiedad característica del comportamiento de los imanes consiste en la imposibilidad de aislar sus polos magnéticos. Así, si se corta un imán recto en dos mitades se reproducen otros dos imanes con sus respectivos polos norte y sur, **figura 3.6**, y lo mismo sucederá si se repite el procedimiento nuevamente con cada uno de ellos. No es posible entonces, obtener un imán con un solo polo magnético semejante a un cuerpo cargado con electricidad de un solo signo. Como ya lo mencionamos, dicha experiencia fue efectuada por primera vez por Peregrinos, sabio francés que vivió alrededor de 1270 y a quien se debe el perfeccionamiento de la brújula, así como un importante aporte al estudio de los imanes.

Características de las fuerzas magnéticas

A diferencia de lo que sucede con una barra de ámbar electrizada por frotamiento, la cual atrae hacia sí todo tipo de objetos con la condición de que sean livianos, un imán ordinario sólo ejerce fuerzas magnéticas sobre cierto tipo de materiales, en particular sobre el hierro. Éste fue uno de los obstáculos que impidieron una aproximación más temprana entre el estudio de la electricidad y el magnetismo. Las fuerzas magnéticas son fuerzas de acción a distancia, es decir, se producen sin que exista contacto físico entre los dos imanes. Esta circunstancia, que excitó la imaginación de los filósofos antiguos por su difícil explicación, contribuyó más adelante al desarrollo del concepto de campo de fuerzas o **campo magnético**.

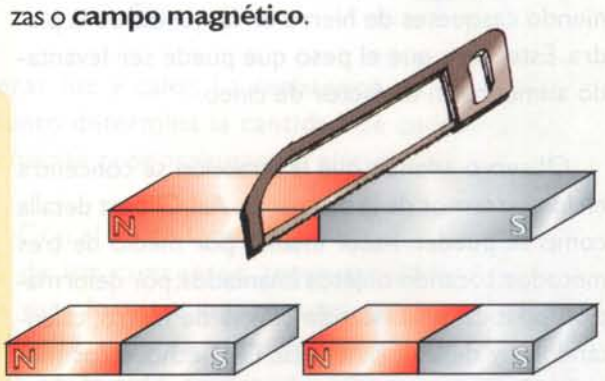


Figura 3.6. Si se corta un imán, quedan dos imanes con sus dos polos N y S

¿ Qué es un campo?

Es una extensión o espacio imaginario, en el cual se hace perceptible un determinado fenómeno, por ejemplo: campo gravitacional, campo magnético, etc.

¿ Qué es el campo magnético?

Como se vió anteriormente, la atracción y repulsión de polos se debe a una fuerza que actúa alrededor de ellos y es capaz de provocar acciones. Pero la fuerza no sólo actúa en los polos sino que rodea a todo el imán. A ese espacio donde actúa la *fuerza magnética* se le llama campo magnético. Como el magnetismo es una fuerza que no es visible y solo se puede detectar por los efectos que produce, se suele representar por medio de líneas entre los polos como se ilustra en la figura 3.5. Estas se denominan líneas de fuerza o líneas de campo, las cuales tienen fuerza y movimiento.

Líneas de fuerza

Michael Faraday, de origen inglés, visualizó en 1840 el campo magnético como una zona de influencia ocupada por infinidad de *líneas de fuerza*. Cada línea de fuerza es un lazo de energía magnética que tiene una duración definida: parte del polo norte, atraviesa el espacio encerrado por el campo magnético y regresa al polo sur, volviendo al polo norte. Estas líneas son siempre continuas y no tienen interrupción; por tanto forman un *circuito magnético* cerrado en el imán es decir, lo recorren por fuera y por dentro, (dentro del imán las líneas se moverán de sur a norte). Su intensidad es mayor en los extremos y disminuye en el centro. **Figura 3.7**

Una característica importante de las líneas magnéticas es que no se cruzan entre sí, van en forma curvada y paralela, es decir, de polo norte a polo sur. Resumiendo, las líneas de fuerza muestran la dirección en que se orientaría el polo norte de una brújula, en un punto determinado; todo el conjunto de líneas de fuerza recibe el nombre de *flujo magnético*. Un campo magnético fuerte tiene más líneas de fuerza que uno débil.

Permeabilidad magnética

Es la facilidad con que pueden pasar las líneas de fuerza magnética a través de una sustancia. Puesto que las líneas de fuerza o flujo magnético pueden atravesar el aire, se toma como base para medirla, la permeabilidad de éste. El término **permeabilidad** es común cuando nos referimos a una prenda de vestir, a una tienda de campaña, a un paraguas, etc., para indicar si el agua se filtra con cierta facilidad o no; luego un paraguas es bueno cuando es impermeable. Del mismo modo los materiales *ferromagnéticos* son aquellos que tienen una elevada permeabilidad; por ello ciertas aleaciones de acero se utilizan en la fabricación de núcleos para bobinas, transformadores, electroimanes, máquinas eléctricas, etc.

Reluctancia magnética

Es el efecto contrario a la permeabilidad magnética, o sea la oposición o dificultad que ofrece una sustancia al paso de las líneas de fuerza. Dicho así, si un material deja pasar con mucha facilidad estas líneas se dice que tiene poca reluctancia o mucha permeabilidad. Es cierto que las líneas de flujo atraviesan cualquier material, pero no todos las dejan pasar con la misma facilidad; esto es similar a la corriente de electrones que circulan por un conductor; en realidad el conductor perfecto no existe, siempre existirá una pequeña resistencia que impedirá, aunque levemente, el paso de los electrones. Por ejemplo el *hierro dulce* tiene poca reluctancia y el aire tiene mayor reluctancia.

El circuito magnético

Como se vió anteriormente, las líneas de fuerza magnética no terminan en los polos del imán, sino que son continuas y cerradas, como la corriente

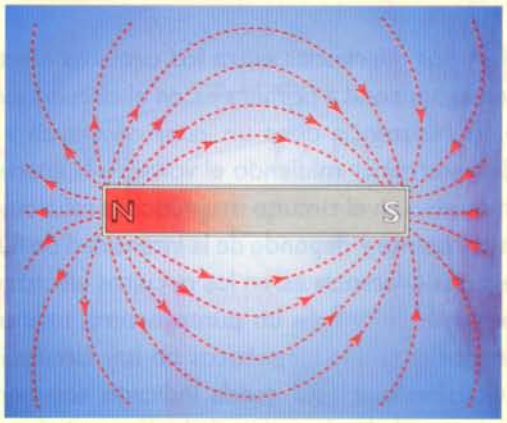


Figura 3.7. *Líneas de fuerza*

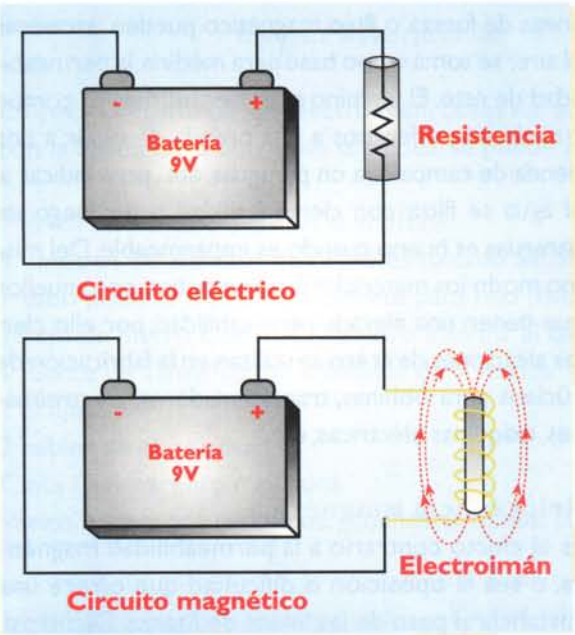


Figura 3.8. *El circuito eléctrico y el circuito magnético*

eléctrica a través de un conductor o un circuito eléctrico. Así, el circuito magnético es en muchos aspectos, similar al circuito eléctrico. **Figura 3.8**

Veamos las semejanzas entre ambos circuitos. Para producir una corriente eléctrica se requiere de una fuerza electromotriz. Así mismo, para producir un flujo magnético, se necesita una fuerza llamada *magnetomotriz*. En el circuito eléctrico, para una cantidad dada de fuerza electromotriz, la cantidad de corriente depende de la resistencia del circuito. Igualmente, en un circuito magnético, para una cantidad dada de fuerza magnetomotriz, la densidad de flujo depende de la oposición de la sustancia que atraviesa, o sea, de la reluctancia del material.

Hay dos diferencias entre los circuitos eléctricos y magnéticos. La primera es: en el circuito eléctrico la resistencia tiene un valor constante y se puede determinar midiendo el voltaje y la corriente. En cambio en el circuito magnético la reluctancia no es constante y depende de la intensidad de flujo. La segunda diferencia es: en los circuitos eléctricos, la corriente circula de un punto a otro, mientras que en los circuitos magnéticos no hay circulación de flujo, sino que éste queda indicado solamente por la intensidad y dirección de las líneas de fuerza.

Clasificación de los imanes

Los imanes se clasifican en:

1. Naturales: derivados de la magnetita, un mineral de hierro con propiedades magnéticas.

2. Artificiales: hechos por el hombre. Se pueden construir con aleaciones metálicas muy variadas siendo la de más uso el Alnico 5, una aleación de hierro, cobalto, níquel, aluminio y cobre. Son de gran utilidad en las industrias eléctrica y electrónica. Se usan en pequeños motores de corriente continua conocidos como motores de imán permanente, generadores de corriente continua, aparatos de medida, parlantes, bocinas, micrófonos dinámicos, altavoces, pastillas para tocadiscos, etc, **figura 3.9.** También se emplean en aplicaciones industriales.

3. Temporales: se imantan fácil e intensamente, pero pierden su fuerza magnética cuando se suprime la corriente magnetizante. El primer material usado para imanes temporales fue el hierro puro, el cual se calienta y luego se ablanda con un enfriamiento lento. Hoy en día el material más empleado es el hierro con silicio, una aleación que se usa en los núcleos de los transformadores, motores eléctricos, generadores eléctricos y otros equipos.

Procesos de imantación

Normalmente, en un trozo de hierro sus átomos son imanes muy pequeños agrupados sin ningún orden, con los polos norte y sur orientados en todos los sentidos. **Figura 3.10**. Esto hace que sus fuerzas magnéticas se neutralicen y por tanto el trozo de hierro carezca de magnetismo. Cuando este material se somete al frotamiento con un imán o a la

Figura 3.9. *Imanes artificiales*

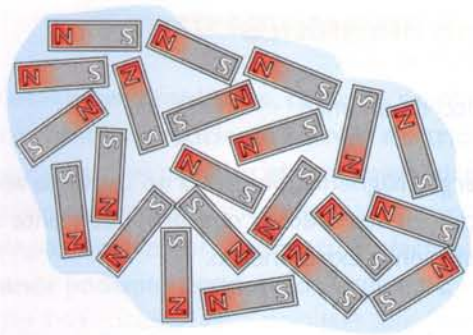


Figura 3.10. Trozos de hierro sin imantar

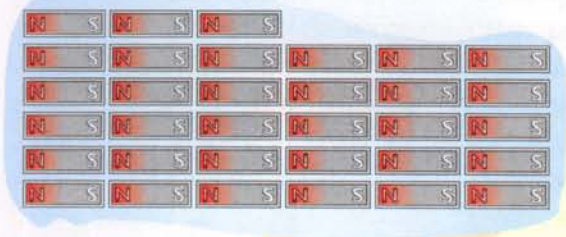


Figura 3.11. Trozos de hierro imantado

acción de una corriente eléctrica, es decir a un proceso de *imantación*, las moléculas de este material se acomodan de tal manera que los lados de los átomos del polo norte se ordenan en la misma dirección, e igualmente los del polo sur. Para hacerlo, se debe aplicar una fuerza magnética. Tal fuerza deberá actuar en contra del campo magnético de cada molécula, obligándolas de esta manera a orientarse ordenadamente, **figura 3.11**. Esto puede hacerse de dos maneras:

1. Por frotamiento o contacto directo con otro imán: cuando un imán se frota sobre la superficie de una pieza de hierro no magnetizado, el campo magnético del imán alinea las moléculas del hierro y lo magnetiza. **Figura 3.12.** La pieza de hierro se frota siempre en el mismo sentido (sin regresar) y con el mismo polo.

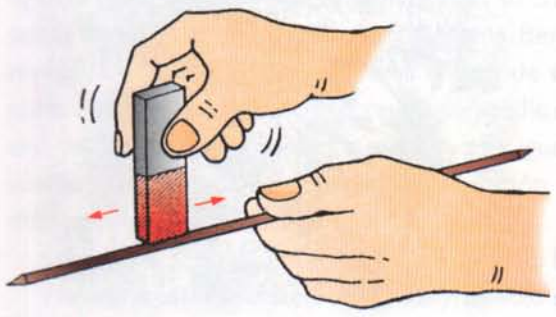


Figura 3.12. Imantación por frotamiento

2. Por acción de la corriente eléctrica: se envuelve un alambre de cobre aislado (bobina) sobre un trozo de hierro o acero. Los terminales del alambre se conectan a una fuente de corriente continua, por ejemplo una batería. **Figura 3.13.** La corriente eléctrica produce un campo magnético, el cual magnetiza al hierro. Este tema lo explicaremos más adelante.

La corriente eléctrica, al circular en un mismo sentido, ordenará todas las moléculas del material de modo que éste quedará magnetizado. Cuando se retira la bobina, gracias a la aleación del material, sus moléculas se quedan orientadas y así tenemos un imán artificial permanente. El proceso de imantación se puede ir perdiendo con el tiempo. En electrónica se emplean algunas herramientas magnetizadas en sus extremos para hacer algunos trabajos, por ejemplo: desatornilladores con la punta imantada, pinzas pequeñas, etc.

Como desmagnetizar un imán

Para desmagnetizar un imán, las moléculas deben modificarse magnéticamente de nuevo, de tal forma que sus campos magnéticos se opongan uno con otro y se anulen. Si el imán es fuertemente golpeado o calentado, las moléculas vibrarán lo suficiente como para volverse a dispersar desordenadamente. Si un imán se coloca rápidamente en un campo magnético inverso, las moléculas del material se desordenarán tratando de seguir al campo aplicado. Un *campo magnético inverso* rápido se puede obtener por medio de una corriente alterna que se aplica a los extremos del imán instantáneamente. En el siguiente experimento verificaremos como trabaja un imán y visualizaremos su campo magnético.

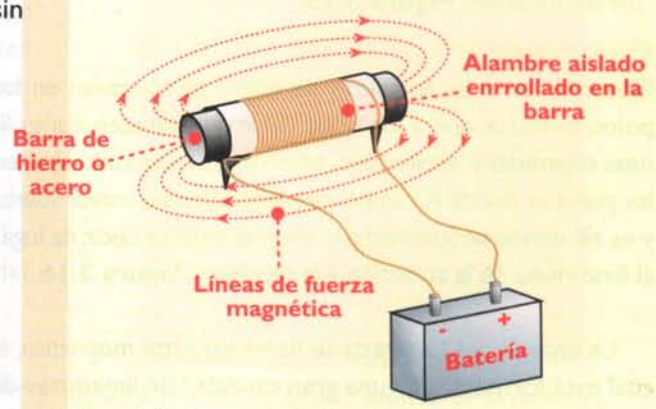


Figura 3.13. Imantación por acción de la corriente eléctrica

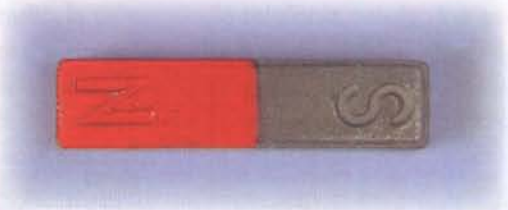
Experimento No. 3. Campo magnético

Objetivo: observar las líneas de fuerza del campo magnético de un imán

Los imanes están rodeados de una poderosa fuerza o energía magnética, pero esta no se puede ver, oler, gustar, oír, ni palpar. Podemos reconocer su presencia por los efectos que produce frente a ciertos materiales. Esto podemos apreciarlo mediante el siguiente experimento.

Materiales que se van a utilizar

1 imán
1 hoja de papel
Un poco de limaduras de hierro



Pasos que se deben seguir:

Paso 1. Tome la hoja de papel, debajo coloque el imán y deje caer pausadamente algunas limaduras de hierro. **Figura 3.14**

Figura 3.14

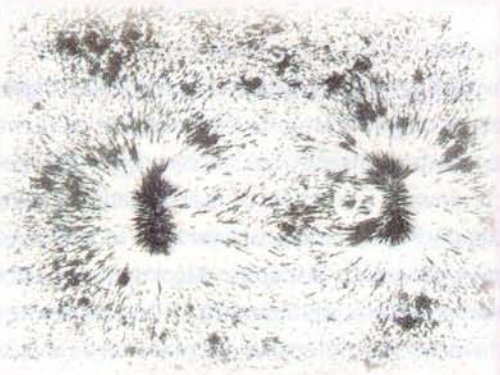


Figura 3.15

Paso 2. Continúe regando las limaduras y podrá observar como éstas se acomodan a medida que se depositan sobre el papel y van formando unas líneas entre los dos polos del imán. Cada limadura de hierro actúa como la aguja de una brújula, atrayendo a otras limaduras a sus extremos y así sucesivamente hasta conectar el polo norte con el polo sur. Estas cadenas de limaduras condujeron a la suposición de que la región que rodea al imán contiene *líneas de fuerza invisibles*. **Figura 3.15**

Conclusión

Observe como las limaduras de hierro se acumulan en los polos, mientras que a los lados del imán aparecen como líneas separadas y débiles; esta acumulación nos indica que en los polos es donde el campo magnético tiene la mayor fuerza y es allí donde se aprovecha el magnetismo, es decir, da lugar al fenómeno de la atracción y la repulsión. **Figura 3.16**

La imagen así generada se llama *espectro magnético*, el cual está formado por una gran cantidad de limaduras de hierro que unen los polos del imán.

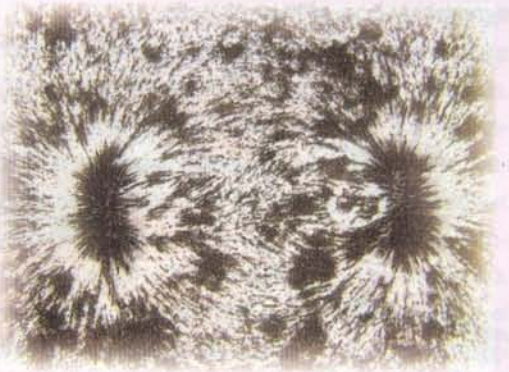


Figura 3.16

El electromagnetismo

El **electromagnetismo**, como su nombre lo indica, estudia las relaciones entre la electricidad y el magnetismo, es decir los efectos magnéticos de las corrientes eléctricas y los efectos eléctricos de los campos magnéticos. Entre estos efectos o fenómenos podemos destacar los siguientes:

1. Si se aplica una corriente eléctrica a un alambre, alrededor de éste se produce un campo magnético. En este fenómeno se basan, por ejemplo, los electroimanes, los relés, los solenoides y los timbres eléctricos. En la mayoría de los casos, el efecto magnético de la corriente se intensifica dándole al alambre la forma de una bobina.
2. Si se coloca un alambre en el interior de un campo magnético, en el alambre se produce una corriente eléctrica. En este fenómeno, llamado **inducción electromagnética**, se basan, por ejemplo, los transformadores y los generadores.
3. Si se coloca un alambre con corriente en el interior de un campo magnético, sobre el alambre se produce una fuerza que lo mueve en una u otra dirección. En este fenómeno, llamado **acción motor,** se basan, precisamente, los motores eléctricos, así como muchos instrumentos para la medición de corriente, voltaje, resistencia, potencia, etc.

Historia

En 1675 Robert Boyle, científico irlandés, publicó el primer libro sobre la electricidad y allí narra lo que ocurre cuando se frota un pedazo de ámbar con un trozo de seda: el ámbar atraerá materiales ligeros como trozos de papel, igual como se comporta un imán con las limaduras de hierro. Benjamin Franklin, en 1752, obtuvo una chispa de una nube cargada de electricidad por intermedio de una cometa; esto demostró que el rayo es igual a una chispa eléctrica. Pero, ¿cuál era la relación del magnetismo con la electricidad?

Hans Christian Oersted, científico y filósofo danés, en 1819 se sorprendió y sorprendió al mundo cuando descubrió que el magnetismo y la electricidad tenían una relación muy cercana. Observó que en un conductor conectado a una batería, la corriente que circulaba afectaba la aguja magnética de una brújula que se colocaba cerca al conductor y la posicionaba en forma perpendicular a éste. Este experimento pone al descubierto que una corriente eléctrica produce un campo magnético. **Figura 3.17**

Si desconectamos la batería ya no circulará corriente por el conductor y por consiguiente la aguja de la brújula se orientará según el campo magnético de la tierra. La íntima relación existente entre el magnetismo y la electricidad, descubierta por Oersted, fue el principio de una nueva rama del conocimiento científico: el *electromagnetismo*. Esto condujo al descubrimiento de que puede crearse un imán si se envuelve un alambre aislado sobre una barra de hierro, y se hace circular una corriente eléctrica a través del alambre.

El primero que lo demostró fue el francés Dominique Francois Arago en 1820 y el primer electroimán, en forma de herradura, fue construido por el inglés William Sturgeon en 1824.

Con el descubrimiento del electromagnetismo, los científicos empezaron a buscar la manera de convertir en fuerza la relación entre el magnetismo y la electricidad. Si la electricidad podía producir magnetismo, ¿por qué no el magnetismo debía ser capaz de producir electricidad?

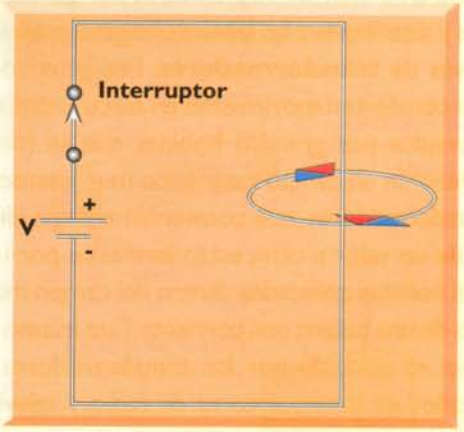


Figura 3.17. *Campo magnético alrededor de un conductor, cuando circula corriente por él*

Entre 1830 y 1860 los científicos trabajaron en la idea del motor eléctrico, uno de los inventos más importantes en el que se usa un electroimán. En 1831, Michael Faraday construyó el primer motor eléctrico y en esa misma época Joseph Henry también estaba trabajando en ese tema. Tomas Davenport un herrero de Nueva Inglaterra, E.U.A., patentó el primer motor eléctrico en 1837.

Como otra aplicación del electromagnetismo, en 1844, Samuel F.B. Morse envió por primera vez un mensaje por medio del telégrafo eléctrico. Con este produjo sonidos como golpes secos, largos y cortos comparables con puntos y rayas; esto lo logró con una barra móvil suspendida en un electroimán, la que estaba unida por conductores a un interruptor, este último, al cerrarse, enviaba una corriente eléctrica que magnetizaba el electroimán, el cual entonces atraía la barra, produciendo un sonido seco. El mayor o menor impulso eléctrico creaba, en el receptor puntos y rayas, según este código.

Importancia del magnetismo y el electromagnetismo

Los fenómenos magnéticos y electromagnéticos juegan un papel clave en la vida moderna puesto que constituyen el principio de funcionamiento de muchos dispositivos, equipos y sistemas eléctricos y electrónicos que forman parte de nuestra actividad diaria. Por ejemplo:

1. La mayor parte de la energía eléctrica que se consume en el mundo es producida por **generadores** y distribuida a las fábricas, hogares y oficinas a través de **transformadores**. Los generadores, que convierten movimiento en electricidad, están formados por grandes bobinas que se mueven dentro de un campo magnético muy intenso. Los transformadores, que convierten energía eléctrica de un valor a otro, están formados por una o más bobinas colocadas dentro del campo magnético de una bobina con corriente. Este mismo principio es utilizado por los transformadores empleados en los receptores de radio y televisión, los estabilizadores de voltaje y las fuentes de alimentación de todo tipo de equipos electrónicos.
2. La mayor parte de la fuerza que impulsa las máquinas en la industria es producida por **motores**, formados por bobinas con corriente sumergidas dentro del campo magnético creado por unos imanes u otras bobinas con corriente. En este mismo principio se basan los motores utilizados en los electrodomésticos, juguetes, computadoras, ascensores, herramientas, etc., así como los instrumentos de medida analógicos.
3. La radio, la televisión, la telefonía celular, los satélites, y otros tipos de sistemas de comunicaciones dependen de la interacción de fenómenos eléctricos y magnéticos para transmitir voces, imágenes y datos entre un par de puntos.
4. Muchos dispositivos utilizados para convertir en electricidad otras formas de energía y viceversa, están basados en fenómenos electromagnéticos. Por ejemplo, en un micrófono dinámico los cambios en la presión del aire producidos al hablar hacen que se mueva una bobina sumergida dentro de un campo magnético y se produzca una corriente que representa la voz.
5. Muchos dispositivos utilizados como interruptores automáticos en equipos eléctricos y electrónicos son esencialmente electroimanes. Por ejemplo, un relé está formado por una bobina unida mecánicamente a unos contactos. Cuando se aplica una corriente a la bobina, ésta produce a su alrededor un campo magnético, el cual atrae una pieza móvil que cierra automáticamente los contactos normalmente abiertos y abre los normalmente cerrados. En este mismo principio se basan los llamados contactores.

Los fenómenos magnéticos y electromagnéticos se utilizan también para efectuar diagnósticos médicos, localizar tesoros enterrados bajo el suelo, fundir metales, medir la velocidad del viento, almacenar información en discos y cintas, etc. Definitivamente, muchos de los grandes avances de la ciencia, la técnica y la ingeniería, que caracterizan nuestro mundo moderno, han sido posibles sólo gracias a la comprensión y el aprovechamiento inteligente de las características magnéticas y electromagnéticas de la materia.

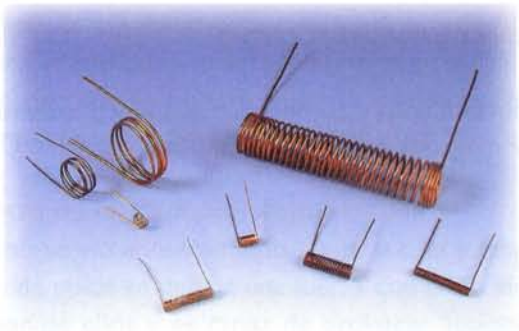


Figura 3.18. Bobinas

Las bobinas

Como hemos visto, el electromagnetismo está muy relacionado con un elemento llamado **bobina**. Una bobina es un enrollamiento de alambre de más de dos vueltas; generalmente están formadas por muchas vueltas de alambre; cada vuelta recibe el nombre de *espira*. **Figura 3.18**

Tipos de bobinas

1. Con núcleo de aire: ya sabemos que la corriente que circula por un alambre conductor tiene asociado un campo magnético. Si ese alambre se enrolla formamos una bobina llamada *solenoide*. Si la bobina se conecta a una fuente de CC, tanto la corriente como el campo magnético se concentran en un espacio muy reducido, pero da como resultado un gran campo magnético. El solenoide actúa como imán en forma de barra con los polos ubicados en los extremos. Como la espira está rodeada de su propio campo magnético, estos pequeños campos se combinan formando un campo muy grande que como se ve, rodea toda la bobina. Puede decirse que esta bobina tiene un núcleo de aire. **Figura 3.19**

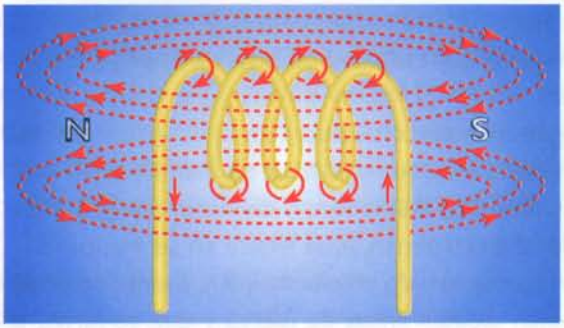


Figura 3.19. Bobina con núcleo de aire

Figura 3.20. Bobina con núcleo de hierro

2. Con núcleo de hierro: si a la misma bobina le introducimos un trozo de hierro dulce y se conecta al mismo voltaje CC, obtenemos un *electroimán*, es decir un solenoide con núcleo magnético. Como el hierro tiene una reluctancia mucho menor, las líneas de fuerza van de un extremo a otro; éstas se concentrarán en el núcleo metálico creando un campo magnético muy intenso. **Figura 3.20**

Polos de un electroimán

Cuando hablábamos del campo magnético indicábamos que las líneas magnéticas se mueven en un sentido definido y es el sentido del flujo magnético quien define los polos norte y sur del campo. En un electroimán, al igual que en un imán permanente, las líneas de fuerza cierran el circuito magnético que es continuo, éstas salen por el polo norte y entran por el polo sur, dentro del imán hacen el recorrido de sur a norte.

Sin embargo, algo muy importante: en un imán permanente sus polos están en el mismo lugar de acuerdo a la magnetización obtenida en su fabricación; en un electroimán no pasa igual, pues el sentido de las líneas de fuerza de una bobina depende de la dirección de la corriente eléctrica, si ésta se invierte, las líneas de fuerza también. **Figura 3.21**

Figura 3.21. Polos de un electroimán

Experimento N° 4. El electromagnetismo

Objetivo: construir un electroimán, observar su comportamiento y comprobar que efectivamente, con la ayuda de la corriente eléctrica, se puede obtener magnetismo.

Materiales que se van a utilizar

5 metros de alambre de cobre esmaltado calibre # 30
1 tubo plástico o pequeño carrete para hilo (tubino)
10 cm de hierro dulce de diámetro inferior al del tubo
1 fuente de alimentación o batería de 9 voltios
1 brújula
2 cables de conexión
Cinta transparente o silicona
Varios elementos metálicos: ganchos, broches, puntillas, etc.

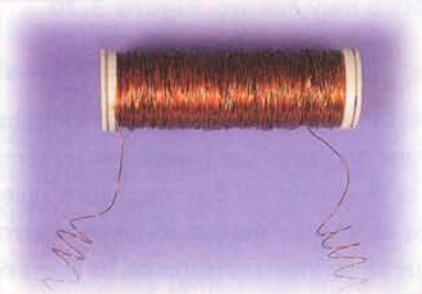


Figura 3.22

Pasos que se van a seguir:

Paso 1. Se envuelve apretadamente el alambre de cobre barnizado sobre el trozo de tubo plástico, de tal manera que las vueltas queden una enseguida de la otra hasta obtener una bobina, como se ve en la gráfica. Para evitar que el alambre se desenrolle, se puede envolver encima cinta transparente o aplicar silicona en los extremos. **Figura 3.22**

Paso 2. Introduzca dentro del tubo plástico el trozo de hierro dulce. **Figura 3.23**

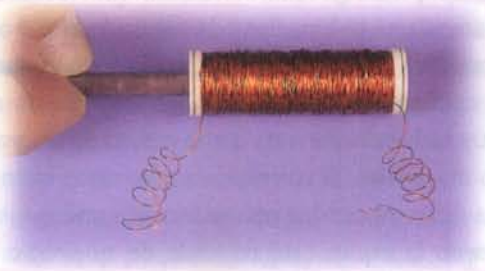


Figura 3.23

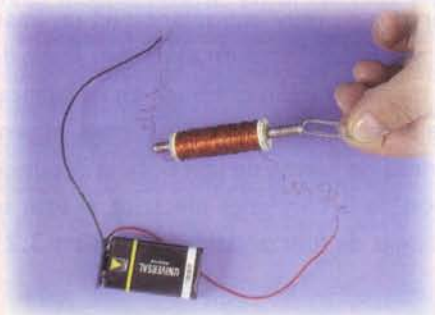


Figura 3.24a

Paso 3. Conecte los terminales de la bobina a una fuente de CC (batería o fuente de alimentación), y aplique un voltaje de nueve voltios. **Figura 3.24a**

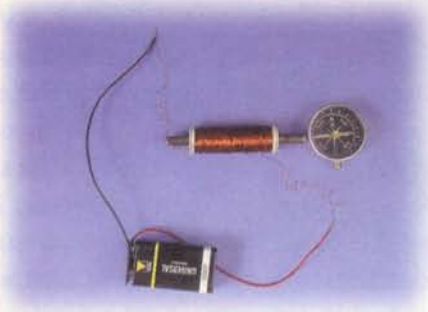


Figura 3.24b

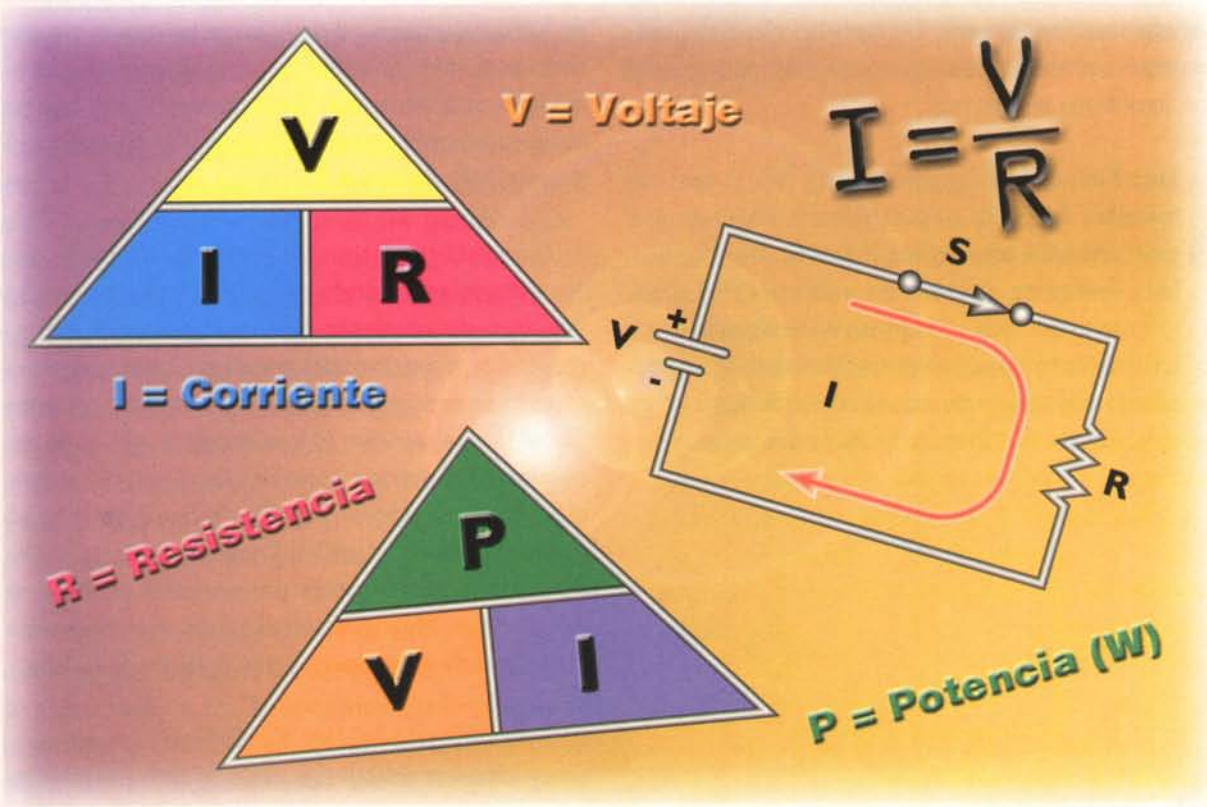
Observaciones:

1. Acerque una brújula a cada uno de los extremos ¿qué puede observar?
2. Acerque algún elemento metálico: un broche, un gancho, un destornillador, etc. ¿qué siente en su mano?
3. Ahora tome un trozo de madera o de plástico e igualmente acérquelo al electroimán, ¿qué siente en su mano?
4. Como usted ha construido un electroimán, ahora compruebe que también existen líneas de fuerza y que se forma el espectro magnético. Repita los pasos del experimento N° 3.

Lección 4

Leyes básicas de los circuitos eléctricos

Hasta ahora hemos estudiado los aspectos relacionados con los circuitos eléctricos, destacando los elementos que los componen (fuente, conductores, cargas) y las magnitudes físicas que los definen (voltaje, corriente, resistencia). En esta lección examinaremos la forma como están relacionadas matemáticamente estas magnitudes e introduciremos el importante concepto de potencia. Para ello será necesario conocer la ley de Ohm y la ley de Watt, dos principios básicos de la teoría eléctrica.



La ley de Ohm

La corriente y el voltaje, asociados con una resistencia, se relacionan entre sí mediante una fórmula muy útil y sencilla llamada la **ley de Ohm**. Esta ley, que examinaremos en detalle más adelante, es una de las fórmulas más utilizadas en electricidad y electrónica por parte de ingenieros, técnicos, estudiantes y principiantes, para el análisis y diseño de todo tipo de circuitos, incluyendo amplificadores, fuentes de alimentación, etc., así como para la selección apropiada de conductores, fusibles, interruptores, tomacorrientes, y otros tipos de componentes.

Antes de conocer la ley de Ohm, es conveniente recordar qué es, cómo está estructurado y cómo funciona un circuito eléctrico simple. **Figura 4.1.** Según vimos en una lección anterior, un **circuito eléctrico**, en un sentido general, es una combinación de componentes conectados de tal forma que proporcionen una trayectoria cerrada para la circulación de la corriente y permitan aprovechar la energía de los electrones en movimiento para producir otras formas de energía, por ejemplo, luz, calor, sonido, movimiento, etc. Un circuito eléctrico simple como el anterior se compone, básicamente, de los siguientes elementos:

- Una fuente de energía eléctrica (V), la cual suministra la fuerza necesaria para impulsar una corriente de electrones a través del circuito. Esta fuerza se expresa en **voltios** (V). La corriente producida se expresa en **amperios** (A).
- Un conjunto de conductores, los cuales proporcionan un camino de poca resistencia para la circulación de la corriente a través del circuito.

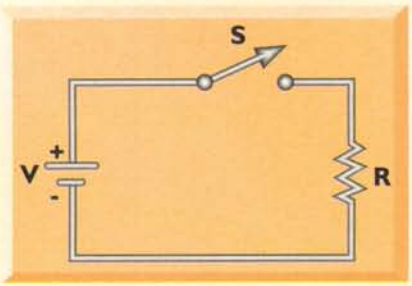


Figura 4.1. *El circuito eléctrico simple*

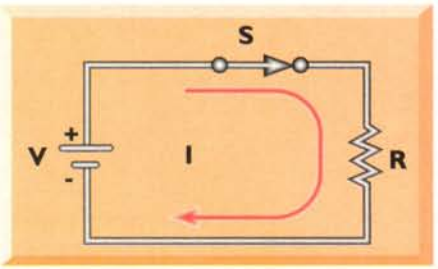


Figura 4.2. *El circuito eléctrico cerrado*

- Una **carga,** la cual convierte la energía de los electrones en movimiento en otras forma de energía. En este caso, la carga está representada por una **resistencia** (R), la cual convierte energía eléctrica en calor. La resistencia se expresa en ohmios (Ω). En el resto de este capítulo asumiremos que la carga o cargas de un circuito son resistencias puras.
- Un interruptor (S), el cual actúa como elemento de control del circuito, regulando el paso de corriente hacia la carga.

Examinemos como funciona este circuito eléctrico simple. Supongamos inicialmente que el interruptor (S) está en la posición abierta (OFF). Bajo esta condición, no circula corriente alguna a través de los conductores ni de la carga porque la trayectoria está interrumpida. Se dice, entonces, que el circuito está **abierto**. Supongamos ahora que se acciona el interruptor y se pasa a la posición cerrada (ON), **figura 4.2.**

Bajo está condición, los electrones tendrán una trayectoria por donde circular y la fuente podrá impulsar una corriente eléctrica (I). Se dice, entonces, que el circuito está **cerrado**. Considerando el sentido convencional, la corriente sale de la fuente por el borne positivo (+), se desplaza a lo largo del conductor superior, atraviesa la carga (R), continúa por el conductor superior y regresa a la fuente por el borne negativo. El proceso se repite indefinidamente mientras permanezca cerrado el interruptor. Hecho este recuento, estamos ya en capacidad de conocer y asimilar la ley de Ohm.

Enunciado de la ley de Ohm

En un circuito resistivo, o sea que solo tiene resis-

tencias, el voltaje (V), la resistencia (R) y la corriente (I) están relacionados entre sí mediante una fórmula muy útil y sencilla llamada la **ley de Ohm**, descubierta por el físico alemán Georg Simon Ohm (1789-1854) y dada a conocer públicamente en 1828. Esta ley establece lo siguiente:

"La intensidad (I) de la corriente eléctrica que circula por un circuito es directamente proporcional al voltaje aplicado (V) e inversamente proporcional a la resistencia (R) del mismo"

Matemáticamente, esta relación se puede representar en forma resumida mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Intensidad} = \frac{\text{Voltaje}}{\text{Resistencia}} \longrightarrow I = \frac{V}{R}$$

El significado de cada uno de los términos de esta ecuación es el siguiente:

- **V** es la tensión aplicada, expresada en voltios (V)
- **I** es la corriente que circula por el circuito, expresada en amperios (A).
- **R** es la resistencia u oposición al paso de la corriente, expresada en ohmios (Ω).

Para que la aplicación de esta fórmula produzca los resultados correctos, las cantidades deben expresarse en las unidades básicas o patrón, es decir el voltaje en **voltios**, la corriente en **amperios** y la resistencia en **ohmios**. Si estas magnitudes están expresadas en múltiplos o submúltiplos de las unidades básicas, las mismas deben convertirse primero a estas unidades antes de aplicar la ley de Ohm. Por ejemplo, 20mV (milivoltios) deben expresarse como 0,020 V, 10kΩ (kiloohmios) como 10.000Ω y 30μA (microamperios) como 0,000030A.

Por tanto, la ley de Ohm nos permite calcular una magnitud, digamos la corriente (I), conociendo las otros dos (V, R). También nos confirma que la intensidad o cantidad de corriente de un circuito depende del voltaje aplicado por la fuente y de la resistencia que le presenta la carga. En otras palabras, si por un circuito pasa cierta cantidad de corriente, esto se debe a la existencia de un voltaje aplicado y de una resistencia presentada por la carga. Esta última limita la cantidad de corriente que circula por el circuito. **Si la resistencia es alta, la corriente será baja, mientras que si la resistencia es baja, la corriente será alta**. Los siguientes ejemplos de aplicación de la ley de Ohm aclararán estos conceptos.

Ejemplo No. 1. En el circuito eléctrico de la **figura 4.3**, el voltaje entregado por la fuente tiene un valor de 110 voltios y la resistencia ofrecida por la carga un valor de 10 ohmios. ¿Cuál es el valor de la corriente que circula por el circuito?

Solución. Las magnitudes de este circuito son:

$$V = 110\,V$$
$$R = 10\,\Omega$$
$$I = ?\,A$$

Para calcular la corriente (I), aplicamos la ley de Ohm (I=V/R), reemplazando las letras que representan los parámetros del circuito por sus valores numéricos, expresados en unidades básicas. Esto es:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{110V}{10\Omega} = 11A$$

Por tanto, la corriente a través del circuito es de 11 amperios.

Ejemplo No. 2. Consideremos el mismo circuito de la **figura 4.3**, pero ahora aumentemos el voltaje, por ejemplo al doble, es decir 220 voltios, dejando el mismo valor de resistencia, es decir 10 ohmios. ¿Qué sucederá con la intensidad? **Figura 4.4**

Solución. Las nuevas magnitudes del circuito son las siguientes:

$$V = 220\,V$$
$$R = 10\,\Omega$$
$$I = ?\,A$$

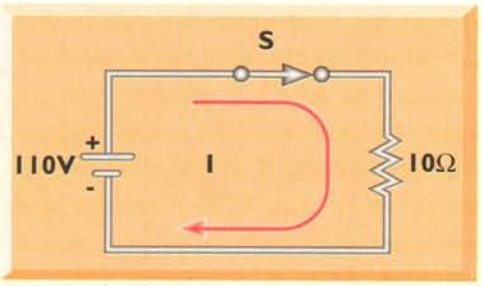


Figura 4.3. Ejemplo No. 1

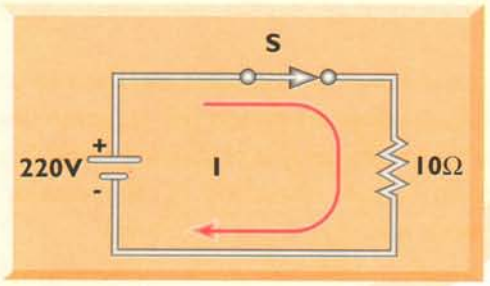


Figura 4.4. ejemplo No. 2

Aplicando la ley de Ohm (I=V/ R) y reemplazando las letras por sus valores, tenemos:

$$I = \frac{220V}{10\Omega} = 22A$$

Por tanto, la nueva corriente a través del circuito es de 22 amperios. Como conclusión, al aumentar el voltaje al doble, la intensidad también aumenta el doble. Este resultado confirma el siguiente enunciado, derivado de la ley de Ohm:

La intensidad de la corriente es directamente proporcional al voltaje aplicado

Ejemplo No. 3. Consideremos nuevamente el circuito de la **figura 4.3**, pero ahora cambiemos la resistencia al doble, es decir 20 ohmios y mantengamos el valor de la fuente en 110 voltios. ¿Qué sucederá con la intensidad? **Figura 4.5**

Solución. Las nuevas magnitudes del circuito son las siguientes:

$$V = 110V$$
$$R = 20\,\Omega$$
$$I = ?A$$

Aplicando la ley de Ohm (I=V/ R) y reemplazando las letras por sus valores, tenemos:

$$I = \frac{110V}{20\Omega} = 5,5A$$

Por tanto, la nueva corriente a través del circuito es 5,5 amperios. Como conclusión, al aumentar la resistencia al doble, la intensidad disminuye a la mitad. Este resultado confirma el siguiente enunciado, derivado de la ley de Ohm:

La intensidad de la corriente es inversamente proporcional al valor de la resistencia

Como se puede observar a partir de los ejemplos anteriores, al modificar las condiciones del circuito, cambiando el valor del voltaje o la resistencia, cambia también el valor de la corriente, lo cual explica el comportamiento del circuito ante estas situaciones. De ahí la importancia de la ley de Ohm. Por esta razón le recomendamos memorizarla y tenerla muy en cuenta en lo sucesivo, puesto que la misma le será de gran ayuda para resolver un buen número de problemas reales que se presentan en la práctica de la electricidad y la electrónica. De todas formas, recuerde siempre que la ley de Ohm relaciona el voltaje, la resistencia y la intensidad en circuitos eléctricos ***cerrados***, es decir por donde puede circular una corriente eléctrica.

Otras formas de representar la ley de Ohm

Matemáticamente la ley de Ohm, originalmente expresada como I=V/R, se puede representar mediante otras dos ecuaciones equivalentes así:

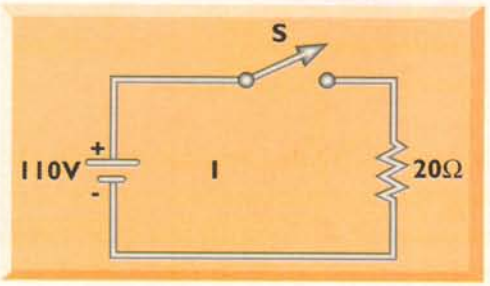


Figura 4.5. Ejemplo No. 3

Voltaje = Intensidad x Resistencia

$$V = I \times R$$

Mediante esta fórmula se puede obtener el valor del voltaje (V) de la fuente de alimentación, conociendo la intensidad (I) de la corriente y la resistencia (R).

$$\text{Resistencia} = \frac{\text{Voltaje}}{\text{Intensidad}} \longrightarrow R = \frac{V}{I}$$

Mediante esta fórmula se puede obtener el valor de la resistencia (R), conociendo la intensidad de la corriente (I) y el voltaje (V).

Los siguientes ejemplos aclararán estos conceptos.

Ejemplo No. 4. En el circuito de la **figura 4.6** se tiene como carga una resistencia de 6 ohmios y se ha medido una corriente de 2 amperios. ¿Cuál será el voltaje de la fuente de alimentación?

Solución. En este caso tenemos los siguientes valores:

$$I = 2\,A$$
$$R = 6\,\Omega$$
$$V = ?\,V$$

Aplicando la ley de Ohm en la forma **V = I x R** y reemplazando las letras por sus valores, tenemos:

$$V = 2A \times 6\Omega = 12V$$

Por tanto, la fuente debe tener un voltaje de 12 voltios.

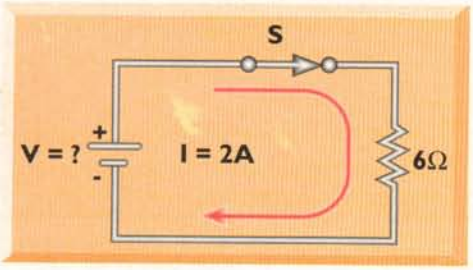


Figura 4.6. Ejemplo No.4

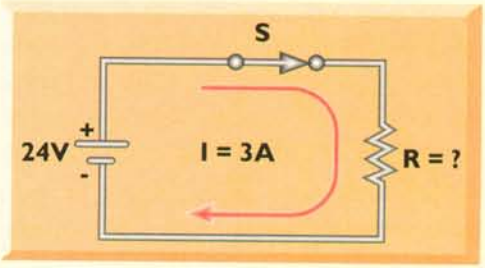


Figura 4.7. Ejemplo No. 5

Ejemplo No. 5. En el circuito de la **figura 4.7** se tiene una fuente de alimentación de 24 voltios y se mide una corriente de 3 amperios. ¿Cuál será el valor de la resistencia en ohmios?

Solución. En este caso tenemos los siguientes valores:

$$V = 24\,V$$
$$I = 3\,A$$
$$R = ?\,\Omega$$

Utilizando la ley de Ohm en la forma R=V/I, obtenemos:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{24V}{3A} = 8\Omega$$

Por tanto, el valor de la resistencia es de 8 ohmios.

El triángulo de la ley de Ohm

Las diferentes formas de expresar la ley de Ohm, examinadas hasta el momento, se pueden recordar con facilidad utilizando el triángulo de la **figura 4.8,** donde se encuentran representadas, en forma gráfica, las tres magnitudes de cualquier circuito, es decir el voltaje (V), la intensidad de la corriente (I) y la resistencia (R). Para la utilización

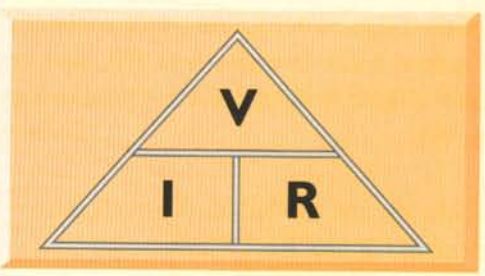


Figura 4.8. El triángulo de la ley de Ohm

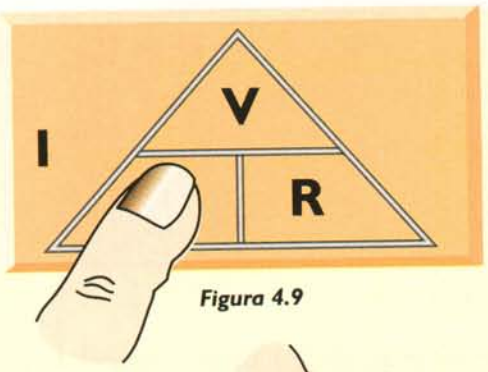


Figura 4.9

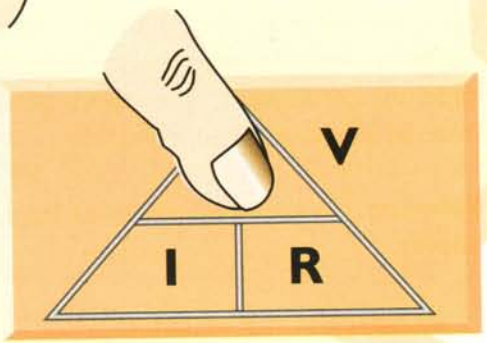


Figura 4.10

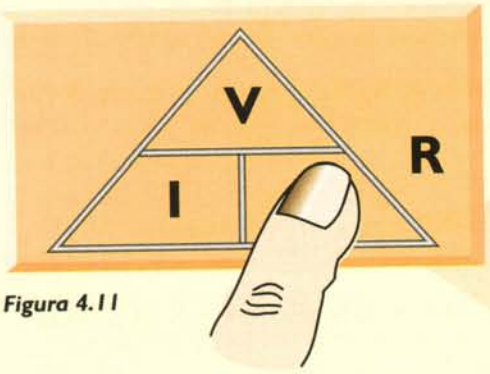


Figura 4.11

de esta ayuda, simplemente tape con un dedo en el triángulo la magnitud de interés y efectúe la multiplicación o división que quede indicada. Esto es:

1. Si quiere hallar la intensidad (**I**), tape con un dedo la letra I, **figura 4.9.** Obtendrá entonces **V/R**.
2. Si quiere hallar el voltaje (**V**), tape con un dedo la letra V, **figura 4.10.** Obtendrá entonces **IxR.**
3. Si quiere hallar la resistencia (**R**), tape con un dedo la letra R, **figura 4.11.** Obtendrá entonces **V/I**.

Análisis de un circuito eléctrico mediante la ley de Ohm

La ley de Ohm es siempre válida en todo circuito eléctrico y en cada parte del mismo. Esto significa que si en una parte de un circuito eléctrico se conocen los valores particulares de dos de las tres magnitudes fundamentales (I, V, R), la tercera magnitud debe tener un valor tal que satisfaga la ecuación matemática descrita por la ley de Ohm. Para comprobar esta afirmación, consideremos el circuito eléctrico de la **figura 4.12.**

En este caso, si el interruptor S se encuentra cerrado, como se muestra en la figura, el amperímetro nos indicará la magnitud de la corriente (I) que circula a través del circuito. Esta corriente está dada por:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{9V}{3\Omega} = 3A$$

Verifiquemos ahora la ley de Ohm en otra parte del circuito, por ejemplo en la resistencia. En este caso, el voltímetro nos indicará el voltaje o diferencia de potencial en los extremos de la resistencia. Este voltaje (V1) está dado por:

$$V1 = I \times R = 3\,A \times 3\Omega = 9\,V$$

Es decir, toda la tensión de la fuente aparece en la resistencia, como era de esperarse. Incluso si el interruptor de la **figura 4.12**, se abre, la ley de Ohm sigue teniendo validez porque al ser infinita la resistencia del interruptor, deja de circular la corriente en el circuito. Bajo esta condición, la corriente medida por el amperímetro (I) será cero (0), lo mismo

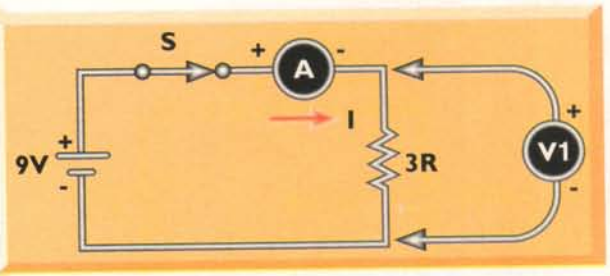


Figura 4.12. *Circuito eléctrico simple para la demostración de la ley de Ohm*

el voltaje en la resistencia medido con el voltímetro (V1). Este voltaje estará dado por:

$$V1 = I \times R = 0A \times 3\Omega = 0V$$

A continuación examinaremos otros problemas que nos permitirán apreciar la utilidad y versatilidad de la ley de Ohm.

Problemas de aplicación de la ley de Ohm

Problema No. 1. Un equipo eléctrico que tiene una resistencia interna de 8 ohmios se debe conectar a una fuente de 110 voltios. Calcular:

a. La corriente que circula por el equipo.
b. El calibre mínimo del conductor o cordón eléctrico que se debe utilizar para que el equipo funcione en forma segura.

Solución. El problema nos ofrece los siguientes datos:

$$V = 110V$$
$$R = 8\,\Omega$$
$$I = ?A$$

Aplicando la ley de Ohm obtenemos los siguientes resultados:

a.

$$I = \frac{V}{R} = \frac{110V}{8\Omega} = 13,75A$$

Esto es, la corriente que circula por el equipo es de 13,75 amperios.

b. Con el valor de corriente obtenido anteriormente, nos apoyamos con la tabla de conductores eléctricos de la página N°17 de la sección de componentes para determinar el calibre mínimo del cable de potencia. Para ello, localicemos en la columna de ampacidad cual es el valor más cercano a 13,75 amperios. Notaremos que este valor es 15 amperios, el cual corresponde, en la columna de calibres, a un conductor número 14. Por tanto, podemos concluir que el cordón de alimentación para el equipo debe ser, como mínimo, de calibre N° 14.

Problema No. 2. Una resistencia de 300 ohmios perteneciente a un receptor de radio es atravesada por una corriente de 40 miliamperios. ¿Qué voltaje existe en los extremos de la resistencia?

Solución. El problema nos ofrece los siguientes datos:

$$I = 40\,mA$$
$$R = 300\,\Omega$$
$$V = ?V$$

Antes de aplicar la ley de Ohm, es necesario tener las magnitudes en unidades en forma homogénea, es decir expresadas en unidades patrón. Note que la resistencia sí lo está (en ohmios), pero no la corriente, la cual está expresada en un submúltiplo (miliamperios o milésimas de amperio).

Por tanto, debemos convertir los 40 miliamperios en amperios. Para convertir miliamperios en amperios dividimos por 1000 así:

$$\frac{40mA}{1000} = 0,040A$$

Ahora sí, aplicando la ley de Ohm, obtenemos:

$$V = I \times R$$
$$V = 0,040A \times 300\Omega$$
$$V = 12\ voltios$$

Para fijar de una manera práctica la relación que existe entre el voltaje aplicado a un circuito y la intensidad de corriente que circula por él, vamos a practicar a continuación un experimento sencillo.

Experimento N° 5. La ley de Ohm

Objetivo: comprobar en forma experimental la ley de Ohm.

Materiales necesarios

2 resistencias de 820Ω, 5W
1 interruptor de codillo
4 pilas de 1,5 voltios
1 multímetro digital
1 metro de conductor eléctrico No. 22

Práctica N° 1. En esta práctica comprobaremos que la corriente (I) en un circuito eléctrico es igual a la relación entre el voltaje aplicado (V) y la resistencia de la carga (R). Esto es: I=V/R. Para ello, siga estos pasos:

a. Efectúe el montaje de la **figura 4.13**, situando inicialmente el interruptor en la posición abierta (OFF) y utilizando un voltaje de alimentación de 3V (2 pilas de 1,5V conectadas en serie).

b. Sin cerrar el interruptor y con la ayuda del multímetro digital, efectúe las siguientes mediciones:

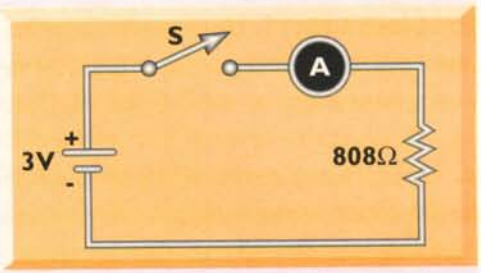


Figura 4.13

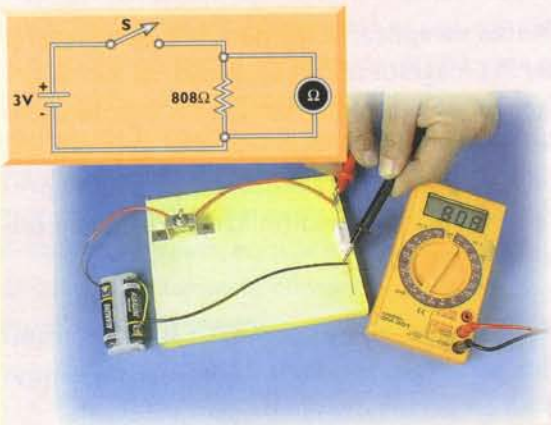


Figura 4.14

1. Mida el valor de la resistencia. Utilice el multímetro como óhmetro. **Figura 4.14.** Anote el valor leído (R=808Ω).
2. Mida el voltaje entregado por las pilas. **Figura 4.15.** Utilice el multímetro como voltímetro de CC. Anote el valor leído (V=3,12V).

Figura 4.15

3. Con los valores obtenidos, calcule la corriente del circuito. Aplique la ley de Ohm. En nuestro caso:
   I = V / R = 3,12V/808Ω =0,0038A = 3,8mA.
   ¿Que valor obtuvo usted ?

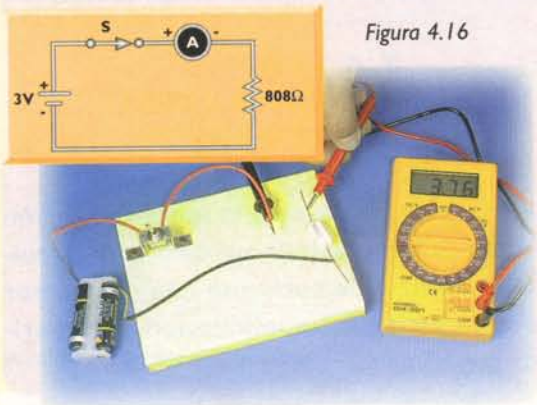


Figura 4.16

c. Configure el multímetro como amperímetro de CC en la escala de 20mA y conéctelo como se muestra en la **figura 4.16**. Cierre el interruptor y tome la lectura. Teóricamente, el valor medido debería ser igual o muy parecido al calculado matemáticamente (3,8mA en nuestro caso).

Práctica No. 2. En esta práctica comprobaremos que, si en un circuito eléctrico se aumenta o disminuye el voltaje aplicado (V) y se mantiene constante la resistencia (R), la corriente producida (I) aumenta o disminuye en la misma proporción. Para ello, siga estos pasos:

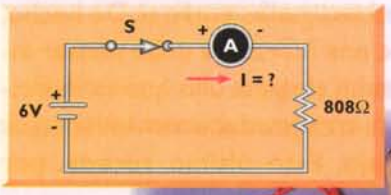


Figura 4.17

a. Efectúe nuevamente el montaje de la figura 4.13, pero cambiando el valor del voltaje de alimentación a 6 voltios (4 pilas de 1,5V conectadas en serie). Siga los mismos pasos de la Práctica 1 para medir la resistencia y el voltaje de la fuente. Calcule la corriente a través del circuito. En nuestro caso, obtuvimos R=808Ω, V=6,14V e I = V / R = 6,14V / 808Ω = 0,0075A=7,5mA.

b. Cierre ahora el interruptor y tome la lectura del amperímetro. **Figura 4.17.** Anote el valor leído en el amperímetro (I= 7,6mA).

Práctica No. 3. En esta práctica comprobaremos que, si en un circuito eléctrico se aumenta o disminuye la resistencia de la carga (R) y se mantiene constante el voltaje aplicado (V), la corriente producida (I) disminuye o aumenta en la misma proporción. Para ello, siga estos pasos:

a. Efectúe nuevamente el montaje de la **figura 4.13**, pero utilizando dos resistencias en lugar de una. De este modo, la resistencia del circuito aumentará al doble. Siga los mismos procedimientos de la Práctica 1 para medir la resistencia y el voltaje de la fuente. Calcule la corriente a través del circuito. En nuestro caso, obtuvimos R=1.616 Ω, V=3,12 V e I = V / R = 3,12V/1.616Ω = 0,0019A =1,9mA.

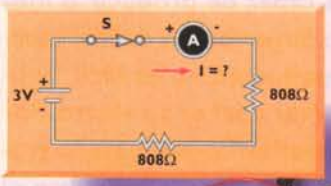


Figura 4.18

b. Cierre ahora el interruptor y tome la lectura del amperímetro. **Figura 4.18.** Anote el valor leído en el amperímetro (I=1,9mA). ¿Coincide este valor con el calculado teóricamente?

Conclusiones

En este experimento hemos comprobado, en forma práctica, que:

- La corriente en un circuito es igual a la relación entre el voltaje aplicado y la resistencia
- Si se aumenta o disminuye el voltaje aplicado a un circuito, manteniendo constante la resistencia, la corriente aumenta o disminuye en la misma proporción. En nuestro caso, aumentamos el voltaje al doble (de 3V a 6V). Por esta razón, la corriente también aumentó al doble (0,38mA a 0,76mA)
- Si se aumenta o disminuye la resistencia de un circuito, manteniendo constante el voltaje aplicado, la corriente disminuye o aumenta en la misma proporción. En nuestro caso, aumentamos la resistencia al doble (de 808Ω a 1.616Ω). Por esta razón, la corriente disminuyó a la mitad (de 3,8mA a 1,9mA)

Concepto de potencia eléctrica

Como ya sabemos, en todo circuito eléctrico simple, cuando se cierra un interruptor, hay un movimiento de electrones y un desplazamiento de carga debido a la *fuerza* que le transmite la fuente de voltaje; esto representa un trabajo. Por tanto, la corriente eléctrica produce un trabajo, consistente en trasladar una carga a través de un conductor.

El término *potencia* se asocia a cualquier dispositivo capaz de hacer un trabajo útil. Por ejemplo, un motor eléctrico es potente cuando es capaz de mover una máquina. La idea de potencia eléctrica surge del hecho que la electricidad es una forma de energía que puede ser convertida en un trabajo útil, como encender una lámpara, calentar una resistencia de una estufa eléctrica, mover la hélice de un ventilador, etc. Antes de hablar de potencia eléctrica, es conveniente analizar primero el significado de los siguientes cuatro conceptos fundamentales de la física clásica: fuerza, trabajo, energía y potencia.

Concepto de fuerza

Fuerza es toda causa capaz de producir o modificar un movimiento. Sin embargo, definir exactamente lo que es una fuerza no es fácil, aunque sí podemos observar cual es su efecto. Por ejemplo: podemos mover un objeto pesado gracias a la fuerza de *empuje* que ejerce sobre el mismo nuestro sistema muscular; un automóvil se pone en movimiento debido al impulso que recibe del motor, pues de lo contrario se quedaría en reposo. De lo anterior se desprende otra definición de fuerza: es todo aquello que produce una variación de la velocidad de un cuerpo. La unidad de medida de la fuerza es el newton (N)

Concepto de trabajo

Cuando una fuerza mueve un cuerpo, se desarrolla un **trabajo**, equivalente al producto de la fuerza por la distancia a lo largo de la cual actúa la misma. La unidad de medida del trabajo es el julio (J), equivalente a 1 Nm (newton por metro).

Los conceptos de fuerza y trabajo, son muy distintos, pero están ligados entre sí. De hecho, cuando se ejerce una fuerza, se debe pensar inmediatamente en un trabajo, o lo que es lo mismo: cuando una fuerza produce movimiento, se efectúa un trabajo. Esto último sucede, por ejemplo, cuando:

- Un atleta lanza una jabalina
- Se arrastra una carreta
- Se golpea un cincel con un martillo
- Se hace girar el timón de un barco

En estos y en muchos casos más se consigue el movimiento de un cuerpo cuando aplicamos una fuerza. Esto implica que si un cuerpo permanece en reposo, sobre él no se está ejecutando trabajo alguno.

Concepto de energía

La energía es la capacidad para efectuar un trabajo. Por tanto, en cada trabajo que se produzca siempre hay una forma de energía involucrada. Algunas de las formas más comunes de energía son las siguientes:

Energía potencial

Es la energía que posee un cuerpo debido a su posición. Ejemplo: el agua que se encuentra almacenada en un tanque de reserva está en posición de reposo cuando las llaves están cerradas. Por tanto tiene una energía potencial asociada.

Energía cinética

Es la que posee un cuerpo cuando está en movimiento. Ejemplo: si se abren las llaves del tanque de reserva mencionado, entonces el agua corre por las tuberías. Por tanto, el flujo de agua lleva una energía cinética.

Energía calórica

Es la producida por la fricción o el roce de dos o

más cuerpos. Ejemplo: la acción de frotarse las manos genera necesariamente energía calórica.

Energía radiante

Es la energía asociada con las ondas que viajan por el aire y el vacío. Ejemplo: las ondas sonoras, las señales de radio, la luz del sol, etc., poseen una energía radiante.

Energía química

Es la energía producida por la reacción de dos o más sustancias para formar nuevas sustancias.

Energía eléctrica

Es la energía producida por el flujo o movimiento de electrones dentro de un material. La corriente eléctrica no se puede ver, pero sí se puede comprobar su existencia por medio de los efectos que produce al circular por un circuito o convertirse en otras formas de energía (calor, movimiento, sonido, luz, etc.)

Concepto de potencia

Si usted tuviera que escoger entre dos computadoras para llevar a cabo un trabajo complicado, ¿cuál elegiría? Lo más lógico es que usted escogería la de manejo más sencillo y, lo más importante, la más rápida. En esta última decisión juega un papel importante el factor *tiempo* y por tanto en la misma está implícito el concepto de **potencia**, definida como el trabajo realizado en la unidad de tiempo. En nuestro caso, el equipo de cómputo más potente es el que hace su trabajo en el menor tiempo.

En un principio establecimos que la corriente eléctrica produce un trabajo cuando traslada una carga por un conductor. Luego, este trabajo supone la existencia de una potencia que dependerá del tiempo que dure desplazándose la carga. La unidad de medida de la potencia es el **vatio** (W), equivalente a 1 J/s (julio por segundo) y denominada así en honor de James Watt (1736-1819), inventor de la máquina de vapor. La potencia en un circuito eléctrico se determina con ayuda de la **ley de Watt**, la cual estudiaremos a continuación.

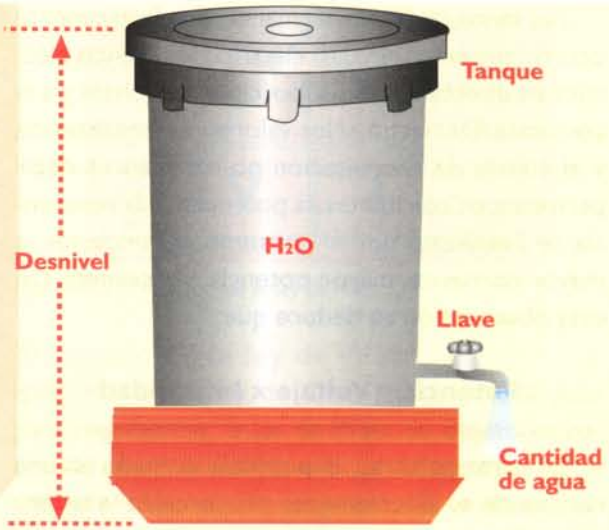


Figura 4.19. *Tanque de reserva de agua*

La ley de Watt

Examinemos nuevamente el caso del tanque de reserva. **Figura 4.19.** La potencia eléctrica se compara aquí con el tanque, el cual almacena agua y nos suministra una potencia hidráulica. En este caso, la potencia de la corriente de agua es directamente proporcional al desnivel del tanque, es decir su altura con respecto al suelo, así como a la cantidad de agua por unidad de tiempo que sale cuando se abre la llave.

Comparemos ahora el tanque de reserva de la figura 4.19 con un circuito eléctrico simple, **Figura 4.20.** Podemos establecer las siguientes analogías:

a. El desnivel se asemeja al voltaje de la fuente (V).

b. La cantidad de agua que sale por la llave en un segundo es semejante a la corriente (I).

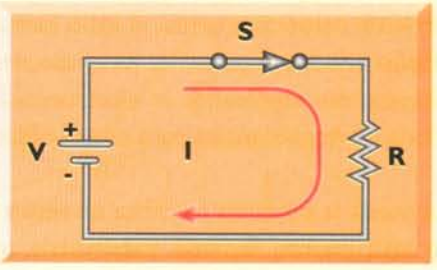


Figura 4.20. *Circuito eléctrico*

Por tanto, podemos afirmar, como efectivamente ocurre, que en un circuito eléctrico la potencia eléctrica es directamente proporcional al voltaje y a la corriente. De hecho, si los valores de la resistencia y el voltaje de alimentación no cambian, es decir permanecen constantes, la potencia en la resistencia se manifiesta por el consumo de amperios: a mayor corriente, mayor potencia, y viceversa. De esta observación se deduce que:

Potencia = Voltaje x Intensidad

En otras palabras, la potencia disipada en una resistencia es directamente proporcional a la tensión aplicada y a la cantidad de corriente que circula en el circuito. Este enunciado se puede expresar matemáticamente como una ecuación así:

$$P = V \times I$$

donde:

P es la potencia disipada, en vatios (W)
V es la tensión aplicada, en voltios (V)
I es la cantidad de corriente que circula, en amperios (A)

La fórmula P=VxI se conoce como la **ley de Watt**. Para que su empleo produzca los resultados correctos las cantidades se deben expresar en unidades patrón: vatios, voltios y amperios. Si, por algún motivo se toman cantidades múltiplos o submúltiplos, estas unidades se deben convertir en unidades básicas antes de usar la fórmula representada por la ley de Watt.

Como se mencionó anteriormente, la unidad de medida de la potencia es el **vatio** y para su representación se utiliza la letra **W** (mayúscula). Igual que sucede con el voltio y el amperio, las unidades de voltaje y corriente respectivamente, el vatio también tiene múltiplos, usados principalmente en electricidad, y submúltiplos, muy empleados en electrónica. La tabla 1 relaciona las equivalencias para estas unidades.

Para medir la potencia eléctrica en vatios se emplea un instrumento llamado **vatímetro**, utilizado principalmente en electricidad. En electrónica se utiliza con más frecuencia el multímetro. Para ello, se efectúan primero mediciones de voltaje y de corriente. A continuación, para hallar la potencia, basta con obtener el producto de estas dos magnitudes. Los siguientes ejemplos aclaran el uso de la ley de Watt.

Múltiplos y submúltiplos	Símbolo	Equivalencia
Megavatio	MW	1.000.000 W
Kilovatio	kW	1.000 W
Vatio	W	1 W
Milivatio	mW	0,001 W
Microvatio	mW	0,000001 W

Tabla 1. *Equivalencia de unidades de potencia*

Ejemplos de aplicaciones de la ley de Watt

Ejemplo No. 1. En el circuito de la **figura 4.21**, la fuente tiene un valor de 110 voltios y por la resistencia circulan 11 amperios. Calcular el valor de la potencia entregada por la fuente y absorbida por la resistencia.

Solución. En este caso tenemos:

V = 110 voltios
I = 11 amperios
P = ? vatios

Aplicando la ley de Watt: **P = V x I**

Reemplazando las letras por sus valores
P = 100V x 11 A
P = 1.210 vatios
P = 1,21kW

Por tanto la potencia disipada en la resistencia es 1.210 vatios.

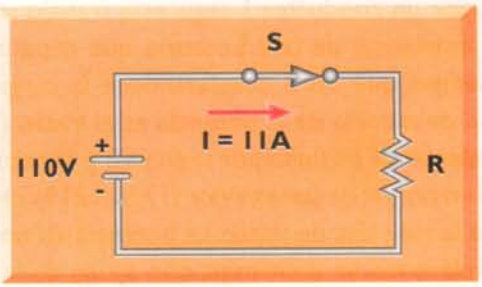


Figura 4.21. *Ejemplo No. 1*

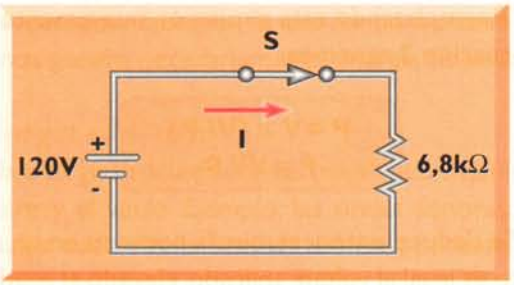


Figura 4.22. Ejemplo No. 2

Ejemplo No. 2. En el circuito de la **figura 4.22**, la fuente de alimentación suministra 120 voltios y la resistencia es de 6,8 kΩ. Calcular:

a. La corriente que circula por el circuito

b. La potencia disipada en la resistencia

Solución

a. En este caso tenemos:

V = 120 voltios
R = 6,8 kilohmios
I = ?

Antes de aplicar cualquier fórmula, se deben convertir los 6,8 kΩ a ohmios (Ω). En este caso basta con multiplicar por mil:

$$6{,}8k\Omega \times 1.000 = 6.800\Omega$$

Ahora sí podemos aplicar la ley de Ohm para hallar I:

$$I = V/R = 120V / 6.800\Omega = 0{,}0014 \text{ amperios}$$

b. Puesto que acabamos de hallar la corriente del circuito, podemos entonces aplicar la ley de Watt para calcular la potencia. Tenemos:

V = 120 voltios
I = 0,0014 amperios
P = ? vatios
P = V x I
P = 120 x 0,0014 A
P = 0,168 W

Es decir la potencia disipada en la resistencia es de 0,168 vatios

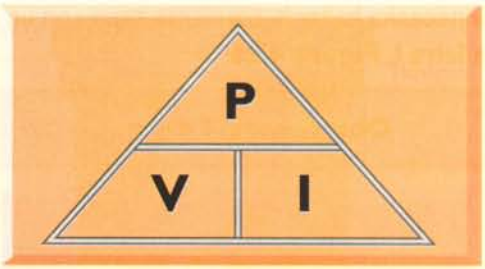


Figura 4.23. Triángulo de la ley de Watt

Triángulo de la ley de Watt

Igual que con la ley de Ohm existe un triángulo para representar la ley de Watt. Su objeto es recordar con facilidad las relaciones entre V, I y P y así poder encontrar la magnitud que se desee, conociendo dos de las tres magnitudes involucradas. **Figura 4.23.** Para usar esta ayuda, se tapa con un dedo la magnitud que se quiere encontrar y se hace la división o multiplicación que quede indicada, así:

1. Si necesita hallar la potencia, tape con un dedo la letra P. **Figura 4.24**

Obtenemos: P = V x I

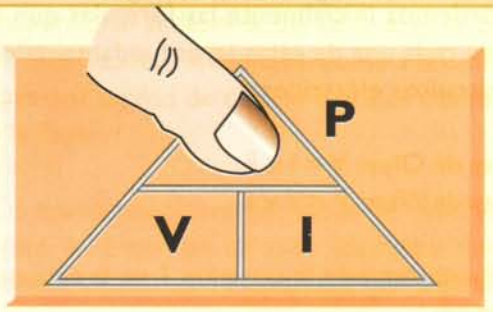


Figura 4.24

2. Se necesita hallar el voltaje tape con un dedo la letra V. **Figura 4.25**

Obtenemos: $V = \frac{P}{I}$

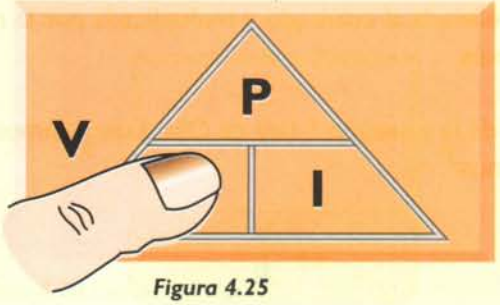


Figura 4.25

3. Si necesita hallar la corriente, tape con un dedo la letra I. **Figura 4.26**

Obtenemos: $I = \frac{P}{V}$

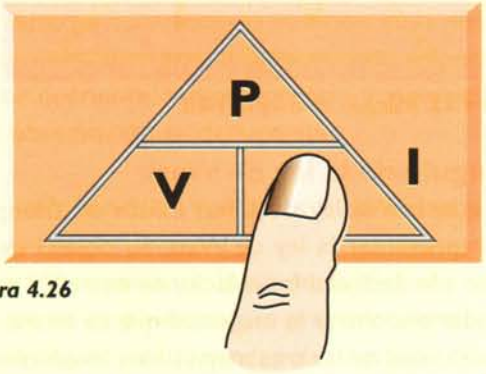


Figura 4.26

Combinación de las leyes de Ohm y Watt

Las leyes de Ohm y de Watt se pueden combinar matemáticamente para obtener otras relaciones útiles que nos permiten calcular la potencia, el voltaje, la corriente o la resistencia en un circuito, conociendo otras dos magnitudes. Recordemos inicialmente las fórmulas que describen cada una de estas leyes fundamentales de los circuitos eléctricos:

1. Ley de Ohm: $V = I \times R$
2. Ley de Watt: $P = V \times I$

Reemplazando la ecuación **1** en la ecuación **2** tenemos:

$$P = I \times R \times I$$
$$P = I^2 \times R$$

Es decir, la potencia en un circuito es directamente proporcional a la corriente que circula por éste, elevada al cuadrado y multiplicada por la resistencia.

Si de la ecuación **1** (ley de Ohm) despejamos I, tenemos:

$$I = \frac{V}{R}$$

Reemplazando esta expresión nuevamente en la ecuación **2** tenemos:

$$P = V \times (V/R)$$
$$P = V^2/R$$

Se deduce, entonces, que la potencia en un circuito es igual al voltaje aplicado, elevado al cuadrado y dividido por la resistencia.

Resumen

Para hallar la potencia en vatios de un circuito disponemos de tres expresiones:

1. $P = V \times I$, si se conocen el voltaje (V) y la corriente (I).
2. $P = I^2 \times R$, si se conocen la corriente (I) y la resistencia (R)
3. $P = V^2 / R$, si se conocen el voltaje (V) y la resistencia (R)

De estas tres ecuaciones, se puede despejar V, I ó R, y así encontrar otras expresiones para hallar el voltaje, la corriente y la resistencia en función de la potencia. En los siguientes problemas veremos como aplicar estos conceptos.

Problemas de aplicación de la ley de Watt

Problema No. 1. Una bombilla de uso doméstico se compra en el mercado con las siguientes especificaciones: voltaje de alimentación = 110 voltios, potencia = 100 W. Calcular la corriente que circula por la bombilla, así como su resistencia interna. **Figura 4.27**

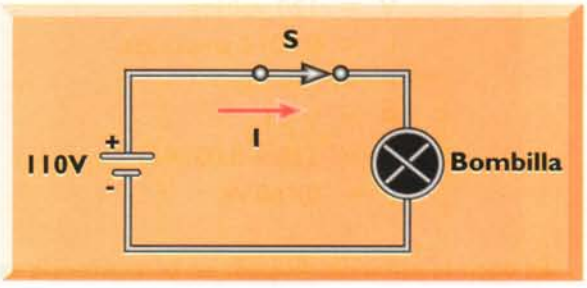


Figura 4.27. *Problema No. 1*

Solución: En este caso tenemos:

V = 110 voltios
P = 100 vatios
I = ? amperios

Del triángulo de la ley de Watt: I = P / V. Reemplazando las letras por valores

I = 100 W / 110 V = 0,9 A

Por tanto, por la bombilla circula una corriente de 0,9 amperios.

En el mismo problema, después de conocer la corriente, se puede calcular la resistencia de la bombilla aplicando la ley de Ohm así:

R = V / I
R = 110V / 0,9 A
R = 122,2 ohmios

Por tanto, la resistencia interna de la bombilla es 122,2Ω

Problema No. 2. Calcular la potencia que absorbe y transforma en calor una resistencia de 800Ω cuando se aplica una tensión de 12 voltios. **Figura 4.28**

Solución. Tenemos:

V = 12 voltios
R = 800 ohmios
P = ? vatios

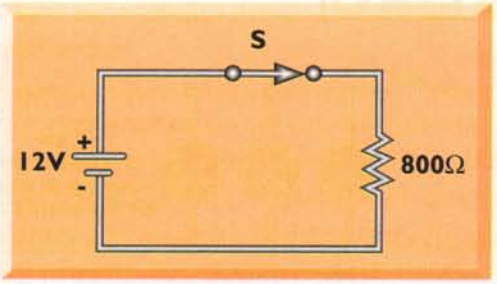


Figura 4.28. *Problema No. 2*

Según la ecuación No. 3 del resumen: $P = V^2 / R$. En este caso, conocemos los valores de V y R. Reemplazando los valores, tenemos:

$$P = \frac{(12V)^2}{800\Omega} = 0{,}18\,W$$

La resistencia absorbe una potencia eléctrica de 0,18 vatios, la cual se convierte en potencia calórica.

Problema No. 3. En el circuito de la **figura 4.29**, la resistencia tiene un valor de 2.200 ohmios y a través de ella circula una intensidad de 2 amperios. Calcular la potencia asociada con la resistencia.

Solución: La ecuación No. 2 del resumen nos permite calcular la potencia, conociendo la corriente (I) y la resistencia (R). Esto es: $P = I^2 \times R$. Reemplazando las letras por sus valores tenemos:

$$P = (2\,A)^2 \times 2.200\Omega$$
$$P = 8.800W$$

Es decir, la potencia de la resistencia es de 8.800 vatios.

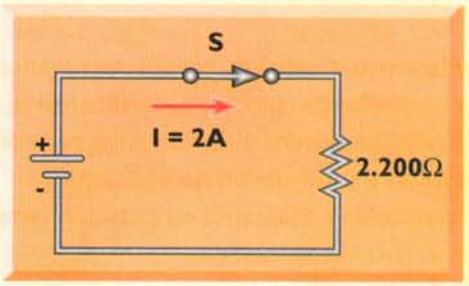


Figura 4.29. *Problema No. 3*

Como hemos visto, estas dos leyes son fundamentales para hacer los cálculos de las cuatro magnitudes más comúnmente empleadas en electricidad y electrónica, a saber: I, V, R y P. En la siguiente circunferencia hay un resumen de las fórmulas vistas hasta ahora. ***Figura 4.30.***

La circunferencia se ha dividido en 4 cuadrantes. En cada uno de estos (en el centro de la circunferencia) tenemos el factor desconocido o lo

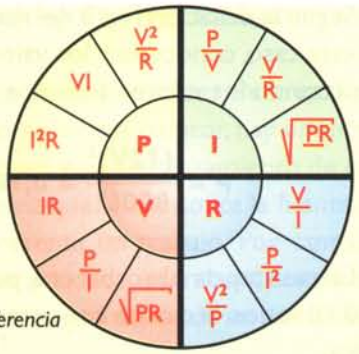


Figura 4.30. *Circunferencia de ecuaciones*

que queremos hallar. Además, cada cuadrante a su vez, se ha dividido en 3; donde hemos incluido las soluciones para cada factor a partir de las cantidades conocidas. Utilicemos la circunferencia con un ejemplo práctico.

Para las fiestas de Navidad usted desea hacer un arreglo para la casa con bombillas de colores; y para el caso, vienen varios interrogantes.

a. ¿Qué tipo de bombillas se pueden emplear?
b. ¿Qué corriente circula por cada una?
c. ¿Qué resistencia tiene cada una?
d. ¿Cuántas se pueden conectar?
e. ¿Qué potencia consumen las bombillas instaladas?
f. ¿Qué calibre de conductor se debe emplear para un buen funcionamiento?

Le ayudaremos a resolver estos interrogantes:

a. Las bombillas de color comercialmente se compran de una potencia de 25 vatios para ser conectados a una tensión de 110 voltios.

b. Para calcular la corriente en cada una, tenemos: como valores conocidos:
V = 110V
P = 25W

Observemos la circunferencia, vamos al cuadrante de corriente (I) y busquemos la fórmula donde estén los valores conocidos y encontramos:
I = P / V

Reemplazando las letras por sus valores.
I = 25W / 110V = 0,227 amperios.

Entonces, por cada bombilla circula una corriente de 0,227 amperios.

c. Para calcular el valor de la resistencia de cada bombilla, tenemos como valores conocidos:
V = 110V
P = 25W
I = 0,227 A
En la circunferencia, observamos en el cuadrante de resistencia (R) y buscamos las fórmulas:
$R = V / I$ y $R = V^2 / P$
Cualquiera de las fórmulas que empleemos debe dar el mismo valor:
$R = V / I = 110V / 0,227\,A = 484\Omega$
$R = V^2/P = (110V)^2 / 25W = 12.100 / 25 = 484\Omega$

d. El número de bombillas que se van a conectar depende de factores como: espacio donde se quieren instalar, costo de las mismas, etc. Tomemos como ejemplo la instalación de 50 bombillas.

e. La potencia total consumida por las 50 bombillas es: 25W (de cada una) x 50 = 1.250W

f. Calibre del conductor: tomando como base 1.250W debemos calcular la corriente total que circula por el circuito. Utilizando la circunferencia, conocemos:
V = 110V
P = 1250W
Observamos el cuadrante de corriente (I) y la formula que incluye los valores conocidos es:
I = P / V Reemplazando los valores.
I = 1.250W / 110V = 11,36 amperios

Ahora nos apoyamos en la tabla de conductores que usted ya conoce. En la página No. 17 de la sección de componentes , en la columna de ampacidad se busca el valor más cercano a 11,36 amperios, es 15 amperios, que corresponde al No.14 en la columna de calibre del conductor. Con el siguiente diagrama le ayudamos a terminar su instalación navideña. **Figura 4.31**

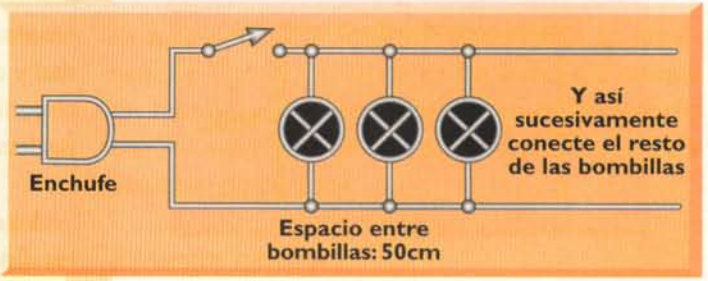
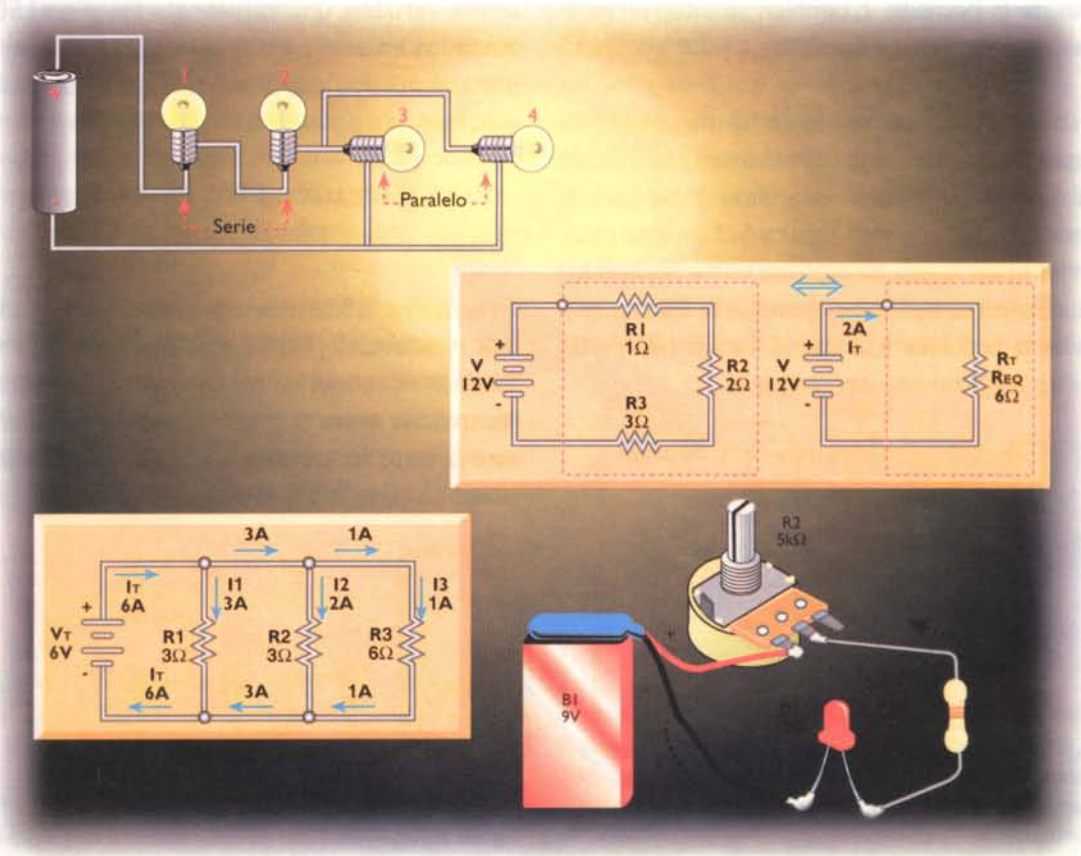


Figura 4.31. *Circuito para instalación navideña*

Lección 5

Circuitos en serie, paralelo y mixtos

En la mayoría de circuitos eléctricos y electrónicos prácticos, una misma fuente debe alimentar dos o más cargas, las cuales pueden estar conectadas en serie, en paralelo o en una configuración mixta. En esta lección estudiaremos las características generales de estos tipos de circuitos. Es importante que usted conozca y se familiarice con sus propiedades para entender como operan otros circuitos más complejos, como por ejemplo amplificadores, osciladores, filtros, etc.



Introducción

Los circuitos eléctricos examinados hasta el momento constan básicamente de una fuente de alimentación y una carga. En la práctica, puede haber más de una carga conectada a la fuente de alimentación. Dependiendo de la forma como estén conectadas las cargas entre sí y con respecto a la fuente, se habla de circuitos en **serie**, en **paralelo** y **mixtos**, también llamados **serie-paralelo**.

Un **circuito en serie** se forma cuando se conectan dos o más cargas a una fuente, de modo que solo exista una trayectoria para la circulación de la corriente. Para ello, es necesario que las cargas estén conectadas una tras otra a la fuente de alimentación, formando una cadena, **figura 5.1**.

En este caso, la corriente de electrones que sale por el polo negativo (-) de la pila circula primero por la bombilla 1, a continuación por la bombilla 2 y luego por la bombilla 3, ingresando nuevamente por el polo positivo (+). Si se interrumpe, por ejemplo, la corriente a través de la bombilla 2, también se interrumpe la corriente a través de las bombillas 1 y 3.

Un circ**uito en paralelo** se forma cuando se conectan dos o más cargas a una misma fuente, de modo que existe más de una trayectoria para la circulación de la corriente, **figura 5.2**. En este caso, la corriente de la pila se reparte entre las bombillas. Si se interrumpe, por ejemplo, la corriente a través de la bombilla 1, la corriente a través de las bombillas 2 y 3 no se interrumpe.

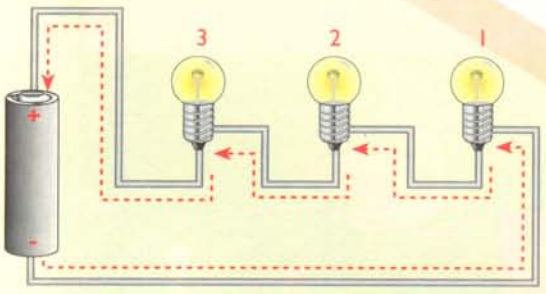


***Figura 5.1**. Ejemplo de un **circuito en serie**. Las flechas muestran la dirección del flujo de electrones (corriente real). Note que solo existe una trayectoria cerrada para la circulación de la corriente.*

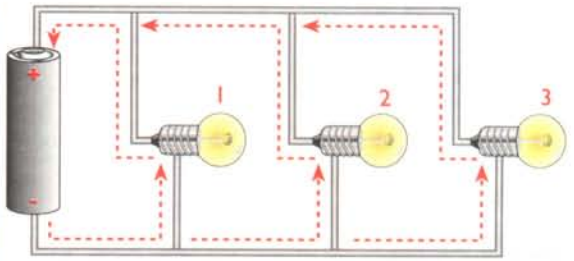


***Figura 5.2**. Ejemplo de un **circuito en paralelo**. Nuevamente, las flechas indican la dirección del flujo de electrones (corriente real). Cada carga proporciona una trayectoria cerrada para la circulación de la corriente.*

Un circuito **mixto** se forma por la combinación de cargas en serie y en paralelo, **figura 5.3**. En este caso si se interrumpe, por ejemplo, la corriente a través de la bombilla 1, también se interrumpe la corriente a través de las otras tres bombillas. Sin embargo, si solo se retira la bombilla 3, las bombillas 1, 2 y 4 siguen encendidas. Lo único que cambia es el nivel de brillo de cada una.

Las ideas anteriores son también aplicables a otros componentes eléctricos y electrónicos. En la **figura 5.4** se muestra, como ejemplo, una resistencia variable, una resistencia fija y un LED conectados en **serie**. En esta lección examinaremos únicamente los casos relacionados con resistencias, baterías, condensadores y bobinas.

Circuitos en serie con resistencias

En la **figura 5.5** se muestra un circuito formado por tres resistencias (R1, R2, R3) conectadas en **serie**. También se indican los conductores que conectan las resistencias entre sí y con la fuente. Apliquemos a este circuito las características generales de los circuitos en serie examinadas anteriormente:

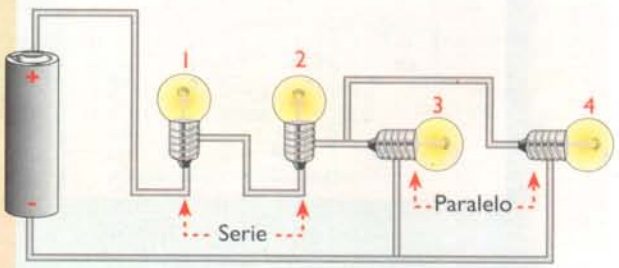


***Figura 5.3**. Ejemplo de un **circuito mixto** o en serie- paralelo*

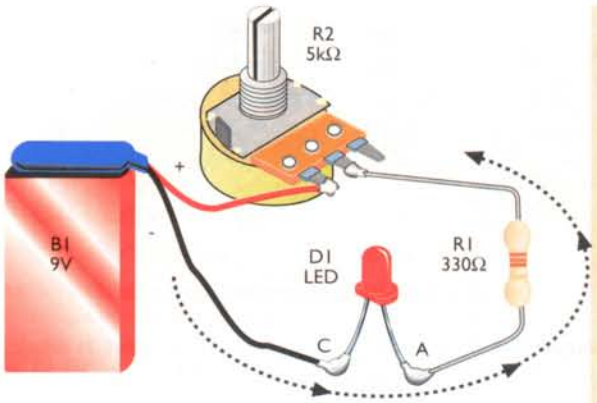


Figura 5.4 Ejemplo de conexión de componentes eléctrónicos en serie. En este caso, el potenciómetro regula la cantidad de corriente que circula por el circuito y, por tanto, controla el nivel de brillo del LED.

1. Todos los elementos del circuito, incluída la fuente, están conectados uno después de otro, a través de los conductores, formando una cadena. En este caso, el polo positivo (+) de la batería está conectado a un extremo de R1, el otro extremo de R1 a un extremo de R2, el otro extremo de R2 a un extremo de R3 , y el otro extremo de R3 al polo negativo (-) de la batería, cerrándose el circuito.
2. Solo existe una trayectoría para la circulación de la corriente. Si el circuito se abre o se rompe en cualquier punto, por ejemplo en el conductor «b» o en la resistencia «R3», todo el circuito queda desconectado y no circula corriente a través de ningún elemento.

Esta última característica es muy empleada para controlar y proteger sistemas eléctricos y electrónicos. Por esta razón, los dispositivos como interruptores y fusibles se conectan siempre en serie con los circuitos. Otro ejemplo muy común de cargas conectadas en serie son las lámparas ornamentales, como las utilizadas en los árboles de Navidad. Usted seguramente habrá notado que cuando se funde o retira una de estas bombillitas, también dejan de iluminar todas las demás, o un grupo de ellas. Esto se debe a que están conectadas en serie con la bombilla faltante o defectuosa.

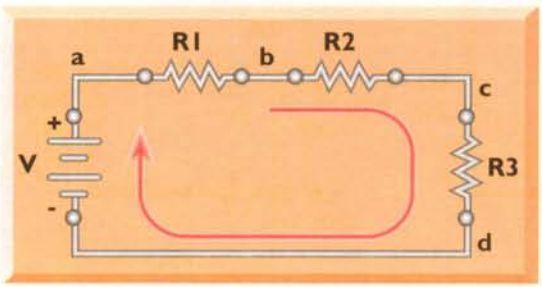


Figura 5.5. Circuito en serie con tres cargas resistivas

Corriente en un circuito en serie

Debido a que en los circuitos en serie solo se tiene una trayectoria para la circulación de la corriente, la cantidad de electrones que pasan por un punto del circuito es la misma en cualquier otro punto. Por tanto, **la corriente a través de los elementos de un circuito en serie es siempre la misma, figura 5.6**.

En este caso, la corriente (I) a través del conductor «a» es la misma corriente que pasa a través de los conductores «b», «c» y «d»; las resistencias R1, R2 y R3; y la fuente V. En todos estos casos, el valor de la corriente a través del circuito es 2A.

Voltajes en un circuito en serie

El voltaje total aplicado por la fuente a un circuito en serie se distribuye a través de cada una de las cargas, de modo que entre más baja sea su resistencia, menor será el voltaje a través suyo, y viceversa. Esta situación se ilustra en la **figura 5.7**.

En este caso, sobre cada carga aparece un voltaje (V1, V2 o V3) cuyo valor depende de su resistencia (R1, R2 o R3) y de la corriente a través suyo

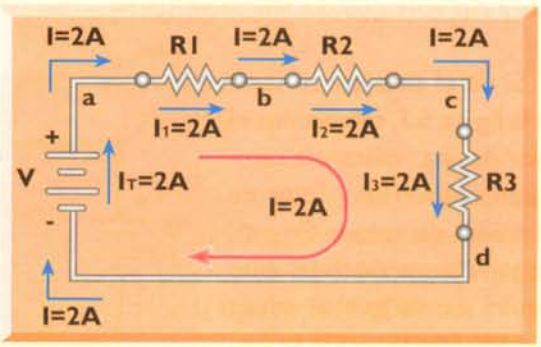


Figura 5.6. Distribución de la corriente en un circuito en serie. Solo existe una trayectoria para la circulación de la corriente. Por tanto, todos sus elementos son atravesados por la misma corriente.

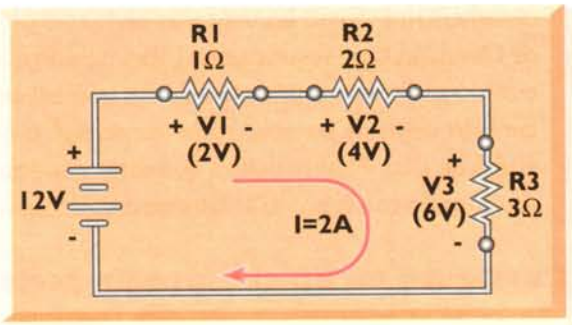


Figura 5.7. División del voltaje en un circuito en serie

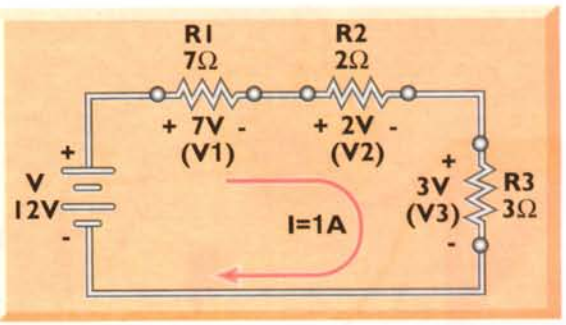


Figura 5.8. En un circuito serie, la suma de las caidas de voltaje en cada resistencia es siempre igual al voltaje aplicado.

(I), que es la misma en todo el circuito. El voltaje sobre cada resistencia se denomina una **caída de voltaje**. Veamos entonces como se distribuyen estas caídas de voltaje a través del circuito.

De acuerdo con la ley de Ohm, la caída de voltaje a través de cualquier carga es igual al producto de su corriente por su resistencia. Por tanto, en nuestro caso, tenemos las siguientes relaciones:

Voltaje	**=**	**Corriente**	**x**	**Resistencia**		
V1	=	2A	x	1Ω	=	2V
V2	=	2A	x	2Ω	=	4V
V3	=	2A	x	3Ω	=	6V
Suma de caídas	**=**	**V1 + V2 + V3**			**=**	**12V**

Observe que la suma de las caídas de voltaje a través de cada resistencia es igual al voltaje aplicado al circuito. Este resultado, que examinaremos en detalle en una lección posterior, se conoce como la **ley de voltajes de Kirchoff** (LVK).

Si en el circuito en serie de la figura 5.7, cambiamos el valor de una resistencia, cambiarán también los valores de las caídas de voltaje. Sin embargo, la suma de todas ellas seguirá siendo igual al voltaje aplicado. Esta situación se ilustra en la **figura 5.8**, donde la resistencia de 1Ω (R1) ha sido sustituida por una de 7Ω.

Resistencia total o equivalente de un circuito en serie

En un circuito cualquiera (serie, paralelo o mixto), la corriente entregada por la fuente depende de la resistencia total o equivalente (R_T ó R_{EQ}) que le presenten en conjunto todas las cargas. En un circuito en serie, en particular, esta resistencia es igual a la suma de todas las resistencias individuales del circuito. Esta situación se ilustra en la **figura 5.9**. En este caso:

Resistencia total	**=**	**Suma de las resistencias individuales**
R_T	=	R1 + R2 + R3
R_T	=	1Ω + 2Ω + 3Ω
R_T	=	6Ω

En otras palabras, la fuente considera todo el conjunto de cargas como una sola resistencia, de valor R_T (6Ω). Por esta razón, impulsa a través del circuito una corriente I de valor igual a V/R_T (12V/6Ω), que es la misma para todos los elementos del circuito. En nuestro caso, tenemos:

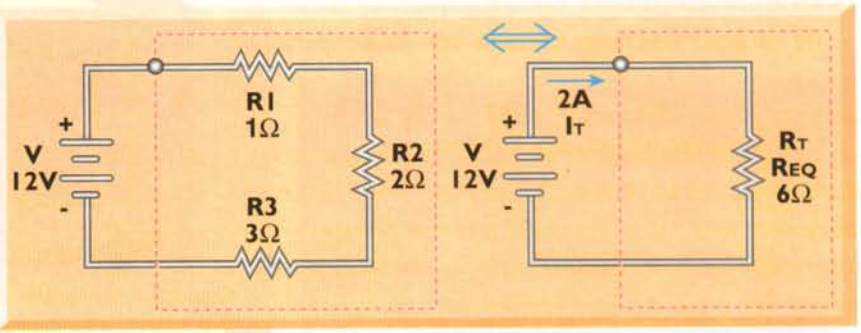


Figura 5.9. Resistencia equivalente de un circuito en serie. La resistencia equivalente del circuito es la suma de las resistencias

Corriente total	=	Voltaje aplicado	÷	Resistencia total	
I_T	=	V	÷	R_T	
IT	=	12V	÷	6Ω	= 2A

En el cálculo de la resistencia total (R_T) de un circuito en serie se nos pueden presentar las siguientes situaciones particulares:

1. El circuito está formado por dos o más resistencias del mismo valor (R). En este caso, la resistencia total (R_T) está dada por:

R_T	=	Número de resistencias	x	Valor de una resistencia
R_T	**=**	**n**	**x**	**R**

2. El circuito está formado por dos o más resistencias de diferente valor (R1, R2, R3, etc.). En este caso, que es el más general, la resistencia total (R_T) está dada por:

R_T = Suma de los valores de cada resistencia
RT = R1 + R2 + R3 + ...

Por ejemplo, si tenemos ocho resistencias de 1kΩ conectadas en serie, la resistencia total es RT= nxR = 8x1kΩ = 8kΩ. Así mismo, si tenemos dos resistencias de 100Ω conectadas en serie con una resistencia de 470Ω y una resistencia de 820Ω, la resistencia total es $R_T = R_1+R_2+R_3+R_4$ = 100Ω + 100Ω + 470Ω + 820Ω = 1.490Ω. De cualquier modo, tenga siempre presente esta regla práctica:

"**La resistencia total o equivalente de un grupo de resistencias conectadas en serie es siempre mayor que la mayor de las resistencias**".

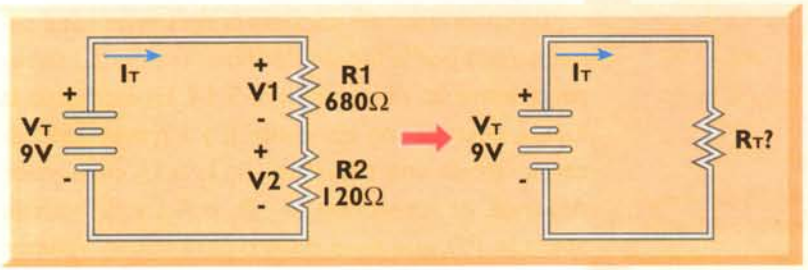


Figura 5.10. Resistencias en serie para el ejemplo 5.1

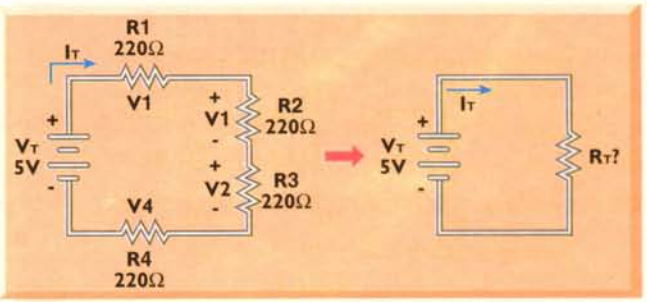


Figura 5.11. Figura para el ejemplo 5.2

En nuestro segundo caso, por ejemplo, 1.490Ω (R_T) es mayor que 820Ω, la resistencia más alta del circuito. Los siguientes ejemplos aclararán el uso de estas fórmulas. El **experimento 5.1** fijará de manera práctica los conocimientos adquiridos.

Ejemplo 5.1. Dos resistencias de 680Ω y 120Ω están conectadas en serie con una batería de 9V, como se muestra en la **figura 5.10**. Calcule:

a. La resistencia total del circuito (R_T)
b. La corriente a través del circuito (I_T)
c. Las caídas de voltaje en las resistencias (V_1,V_2)
d. Demuestre que la suma de las caídas de voltaje anteriores es igual al voltaje aplicado (V_T)

Solución. En nuestro caso, V=9V, R1=680Ω y R2=120Ω. Por tanto:

a. $R_T = R_1 + R_2$ = 680Ω + 120Ω = 800Ω
b. $I_T = V/R_T$ = 9V/800Ω = 0,01125 A = 11,25mA
c. $V_1 = I_T \times R_1$ = 0,01125A x 680Ω = 7,65V
$V_2 = I_T \times R_2$ = 0,01125A x 120Ω = 1,35V
d. $V_1 + V_2 = V_T$
7,65V + 1,35V = 9V
12V = 9V

Ejemplo 5.2. Cuatro resistencias de 220Ω se conectan en serie con una fuente de 5V, como se indica en la **figura 5.11**. Calcule:

a. La resistencia total (R_T)
b. La corriente total (I_T)
c. Las caídas de voltaje (V_1...V_4)

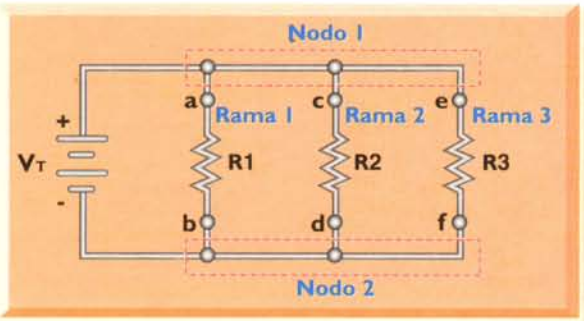


Figura 5.12. Circuito en paralelo con tres cargas resistivas

Solución. En nuestro caso, V=5V, $R_1=R_2=R_3=R_4=R$ = 220Ω y n=4. Por tanto:

a. $R_T = n \times R = 4x250\Omega = 1.000\Omega$
b. $I_T = V/R_T = 5V/1.000\Omega = 0{,}005A = 5mA$
c. $V1=V2=V3=V4 = IxR = 0{,}005Ax250\Omega = 1{,}25V$

Circuitos en paralelo con resistencias

En la **figura 5.12** se muestra un circuito formado por tres resistencias conectadas en **paralelo**. Apliquemos a este circuito las características de los circuitos en paralelo examinadas anteriormente:

1. Todas las cargas están conectadas simultáneamente a los terminales de la fuente de alimentación. Las cargas y sus alambres de conexión a la fuente se denominan comúnmente **ramas**. Los puntos comunes de conexión de las ramas con la fuente se denominan **nodos**. En este caso, tenemos tres ramas y dos nodos. La rama 1, por ejemplo, está formada por la resistencia R1 y los conductores "a" y "b".

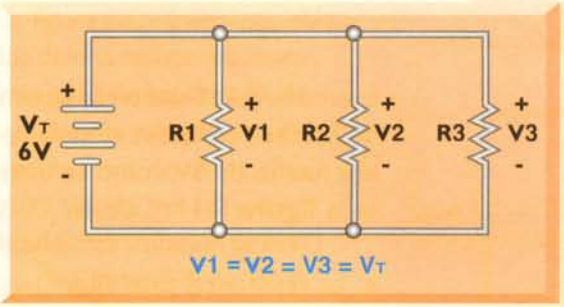


Figura 5.13. Distribución del voltaje en un circuito en paralelo. En este caso, se tiene el mismo voltaje entre todas las ramas

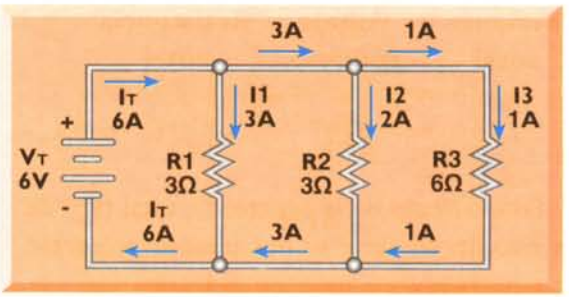


Figura 5.14. División de la corriente en un circuito en paralelo. La corriente total es igual a la suma de las corrientes en las ramas

2. Existe más de una trayectoria para la circulación de la corriente. Si el circuito se abre o se rompe en cualquier punto de una rama, por ejemplo en el conductor «b» o en la resistencia «R1» de la rama 1, todas las demás ramas continuan operando en forma normal.

Esta última característica es muy empleada en las instalaciones eléctricas para permitir la operación de lámparas y electrodomésticos al mismo voltaje, digamos 120V, así como su conexión y desconexión de manera independiente. De hecho, la mayor parte de los circuitos eléctricos utilizados en las casas, fábricas y oficinas para alimentar computadoras, máquinas, etc. son circuitos en paralelo.

Voltaje en un circuito en paralelo

En un circuito en paralelo todas las ramas están conectadas a la fuente. Por tanto, el voltaje aplicado a todas las cargas es el mismo, **figura 5.13.** En este caso las caídas de voltaje sobre R_1 (V_1), R_2 (V_2) y R_3 (V_3) son idénticas e iguales al voltaje de alimentación. Es decir, $V_1=V_2=V_3=V_T=6V$.

Distribución de la corriente en un circuito en paralelo

En un circuito en paralelo la corriente total suministrada por la fuente de alimentación (I_T) se reparte entre las ramas, **figura 5.14**. En este caso, la fuente entrega una corriente I_T y a través de cada carga circula una corriente (I_1, I_2 o I_3) cuyo valor depende su resistencia (R_1, R_2 o R_3) y del voltaje aplicado (V), que es el mismo para todas . Veamos entonces como se distribuyen estas corrientes.

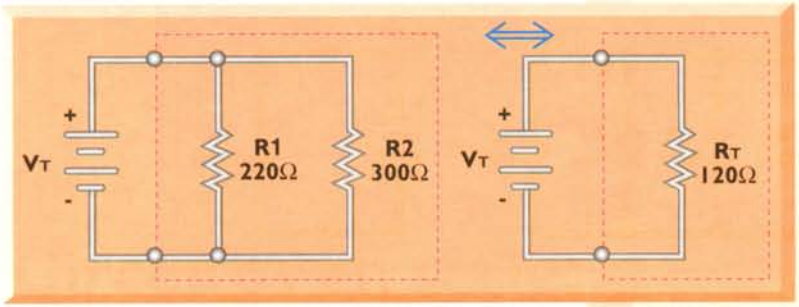


Figura 5.15 Resistencia total de un circuito en paralelo formado por dos resistencias de valores diferentes

De acuerdo con la ley de Ohm, la corriente a través de cualquier carga es igual a la relación entre el voltaje aplicado y su resistencia. Por tanto, en nuestro caso, tenemos las siguientes relaciones:

Corriente	=	Voltaje	÷	Resistencia	
I_1	=	6V	÷	2Ω	= 3A
I_2	=	6V	÷	3Ω	= 2A
I_3	=	6V	÷	6Ω	= 1A
Suma de corrientes	=	I1 + I2 + I3			= 6A

Observe que la suma de las corrientes a través de las resistencias, es igual a la corriente total entregada por la fuente (6A). Este resultado se conoce como la **ley de corrientes de Kirchoff** (LCK). Note también que a medida que se conectan nuevas cargas a un circuito en paralelo, aumenta también la corriente entregada por la fuente.

Esta última es la razón por la cual se quema un fusible o se dispara un disyuntor (*breaker*) en una instalación eléctrica cuando se conectan demasiadas lámparas o aparatos en los tomacorrientes. En este caso, conforme se añaden cargas y aumenta la demanda de corriente, llega un momento en el cual la corriente total supera la capacidad nominal del fusible o *breaker*, y éste se funde o dispara, desconectando el circuito. Se dice, entonces, que ha ocurrido una **sobrecarga** o que el circuito está **sobrecargado.**

Resistencia total o equivalente de un circuito en paralelo

En un circuito en paralelo, la corriente total entregada por la fuente depende de la resistencia total o equivalente (R_T o R_{EQ}) ofrecida por el conjunto de cargas. Esta resistencia puede calcularse de las siguientes formas:

1. Si el circuito está formado por dos resistencias diferentes (R_1 y R_2), la resistencia total es:

$$R_T = \frac{\text{Producto de las resistencias}}{\text{Suma de las resistencias}}$$

$$R_T = (R_1 \times R_2)/(R_1 + R_2)$$

En la **figura 5.15** se muestra un ejemplo. En este caso, R1=200Ω y R2=300Ω. Por tanto:

R_T = (R1R2)/(R1+R2)
R_T= (200x300)/(200+300) Ω
R_T=60.000/500 Ω
R_T = 120 Ω

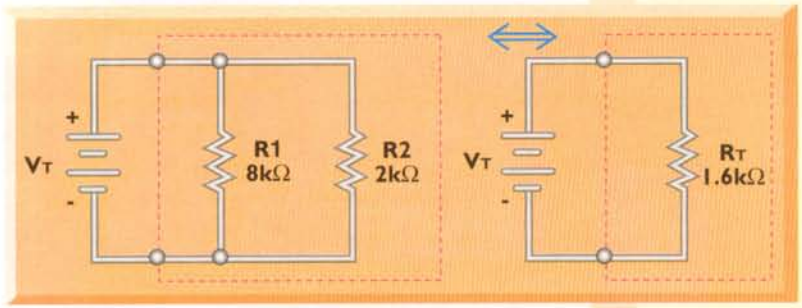


Figura 5.16. Resistencia total de un circuito en paralelo formado por dos resistencias de valores múltiplos

2. Si el circuito está formado por una resistencia de valor R_1=R en paralelo con otra de valor R_2=R/n, es decir **n** veces menor, la resistencia total es :

$$R_T = \frac{\text{Resistencia mayor}}{1 + \text{número de veces}}$$

$$R_T = R/1+n$$

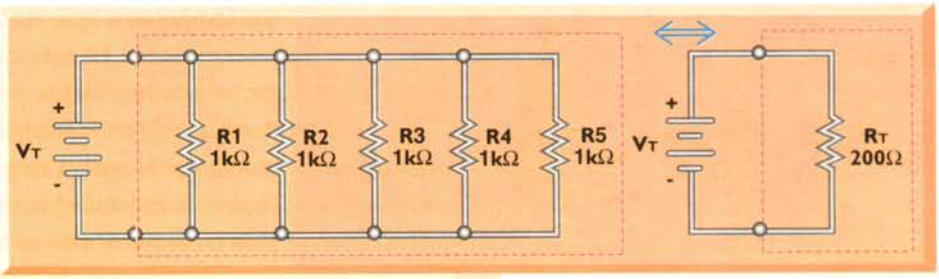


Figura 5.17. Resistencia total de un circuito en paralelo formado por resistencias del mismo valor.

En la **figura 5.16** se muestra un ejemplo. En este caso, R_1=8kΩ=R y R_2=2kΩ= R/4. Es decir, R=8kΩ y n=4. Por tanto:

$R_T = R/(n+1)$
R_T=8kΩ/(4+1)
R_T=8kΩ/5
R_T=1,6kΩ

3. Si el circuito está formado por dos o más resistencias del mismo valor (R), la resistencia total es:

$$R_T = \frac{\text{Valor de una resistencia}}{\text{Número de resistencias}}$$

$$R_T = R/n$$

En la **figura 5.17** se muestra un ejemplo. En este caso, hay cinco resistencias idénticas (n=5), cuyos valores son R_1=R_2=R_3=R_4=R_5=R=1kΩ. Por tanto:

$R_T = R/5 = 1k\Omega/5$
$R_T = 0,2k\Omega = 200\Omega$

4. Si el circuito está formado por dos o más resistencias de diferente valor (R_1, R_2, R_3,...), la resistencia total es:

$$R_T = \frac{1}{\text{Suma de los inversos de las resistencias}}$$

$$R_T = 1/(1/R_1 + 1/R_2 + 1/R3 + ...)$$

Este es el caso más general y se aplica a cualquier circuito en paralelo, incluyendo los tres casos particulares examinados anteriormente.

En la **figura 5.18** se presenta un ejemplo. En este caso, R1= 2kΩ, R2= 2,5kΩ y R3=10kΩ. Por tanto:

$R_T = 1/(1/R1 + 1/R2 + 1/R3)$
$R_T = 1/(1/2 + 1/2,5 + 1/10)\ k\Omega$
$R_T = 1/(0,5 + 0,4 + 0,1)\ k\Omega$
$R_T = 1/1,0\ k\Omega$
$R_T = 1\ k\Omega$

De cualquier modo, cuando efectúe el cálculo de resistencias en paralelo, tenga siempre presente esta regla práctica:

"La resistencia total o equivalente de un grupo de resistencias conectadas en paralelo es siempre menor que la menor de las resistencias involucradas"

En nuestro último caso, por ejemplo, **figura 5.18**, la resistencia total (1kΩ), es menor que 2kΩ. Asimismo, en el primer caso, **figura 5.15**, R_T=120Ω es menor que R1=200Ω. Igualmente, en el segundo caso, **figura 5.16**, R_T=1,6kΩ es menor que R_2=2kΩ. Por lo mismo, en el tercer caso, **figura 5.17**, R_T=200Ω es menor que R=1kΩ. El **experimento 5.1** fijará de manera práctica todos los conocimientos adquiridos hasta el momento sobre los circuitos en paralelo.

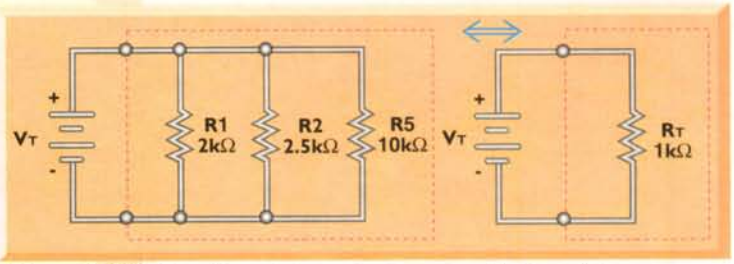
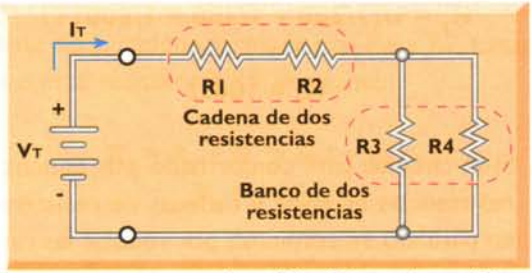
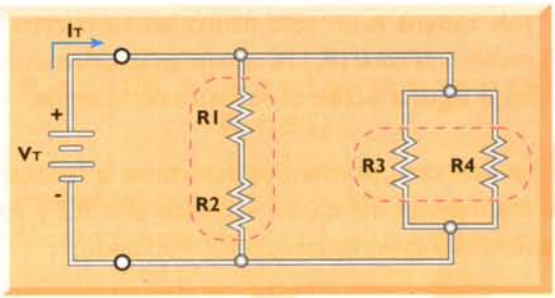


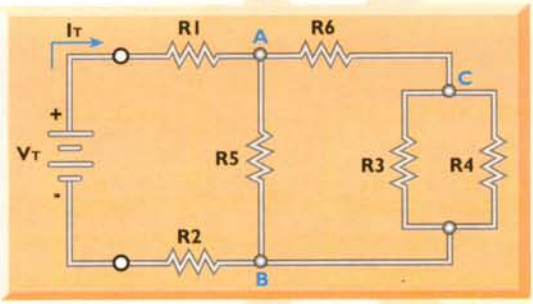
Figura 5.18. Resistencia total de un circuito en paralelo formado por resistencias de diferente valor.



a. Circuito mixto con una cadena (R1 y R2) y un banco (R3 y R4) en serie



b. Circuito mixto con una cadena (R1 y R2) y un banco (R3 y R4) en paralelo



c. Circuito mixto con bancos y cadenas de resistencias en serie-paralelo

Figura 5.19. *Ejemplos de circuitos mixtos*

Circuitos mixtos con resistencias

En un circuito mixto se combinan las características de un circuito en serie y un circuito en paralelo. Por tanto, algunas cargas están conectadas en serie para que por ellas circule la misma corriente, mientras que otras lo están en paralelo para que tengan el mismo voltaje. En la **figura 5.19** se muestran algunos ejemplos. En todos estos casos, un grupo de resistencias en serie forman lo que se denomina una **cadena** y un grupo de resistencias en paralelo lo que se denomina un **banco**.

Resistencia total o equivalente en circuitos mixtos

En un circuito mixto, la corriente total entregada por la fuente depende de la resistencia total o equivalente (R_T ó R_{EQ}) ofrecida por el conjunto de cargas. Esta resistencia puede calcularse de las siguientes formas:

1. Si el circuito está conformado por bancos de resistencias conectados en serie, deben primero calcularse las resistencias equivalentes de los bancos. Puesto que estas resistencias quedan en serie con las demás resistencias, el problema se reduce al cálculo de la resistencia total (R_T) de un circuito en serie. En la figura **5.20a** se muestra un ejemplo.

En este caso, primero se determina la resistencia equivalente del banco formado por R2 y R3. Llamamos a esta resistencia R5. Por tanto:

$$R_5 = R_2 || R_3 = (4x6)/(4+6)\ k\Omega = 2{,}4\ k\Omega$$

Puesto que R5 queda ahora en serie con R1 y con R4, la resistencia total (R_T) del circuito es:

$$R_T = R_1 + R_5 + R_4 = 1k\Omega + 2{,}4k\Omega + 3k\Omega = 6{,}4k\Omega$$

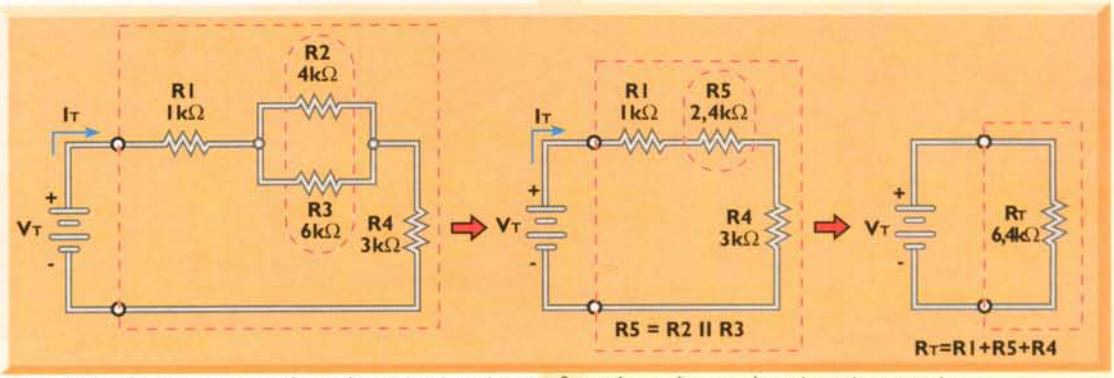


Figura 5.20a. *Resistencia equivalente de un circuito mixto conformado por bancos de resistencias en serie*

2. Si el circuito está conformado por cadenas de resistencias conectadas en paralelo, deben determinarse primero las resistencias equivalentes de las cadenas. Puesto que estas resistencias quedan en paralelo con las demás resistencias, el problema se reduce al cálculo de la resistencia total de un circuito en paralelo (R_T). En la **figura 5.20b** se muestra un ejemplo.

En este caso, primero se determina la resistencia equivalente de la cadena formada por R1 y R2. Llamamos a esta resistencia R5. Por tanto:

$$R_5 = R_1 + R_2 = 100\Omega + 100\Omega = 200\ \Omega$$

Puesto que R5 queda ahora en paralelo con R3 y R4, la resistencia total (R_T) del circuito es:

$$R_T = 1/(1/R_5 + 1/R_3 + 1/R_4)$$

$$R_T = 1/(1/200 + 1/300 + 1/600)\ \Omega$$

$$R_T = 100\Omega$$

3. Si el circuito está conformado por bancos de resistencias en serie y cadenas de resistencias en paralelo, se comienza por reducir las ramas más alejadas de la fuente. El proceso se continúa en dirección de la fuente hasta obtener una sola cadena o un solo banco, en cuyo caso la resistencia total (R_T) se calcula en la forma usual. En la **figura 5.20c** se muestra un ejemplo.

En este caso, primero se determina la resistencia equivalente del banco formado por R3 y R4. Llamamos a esta resistencia R7. Por tanto:

$$R_7 = 1/(1/R_3 + 1/R_4) = 1/(1/12 + 1/12)\ \Omega$$
$$R_7 = 6\ \Omega$$

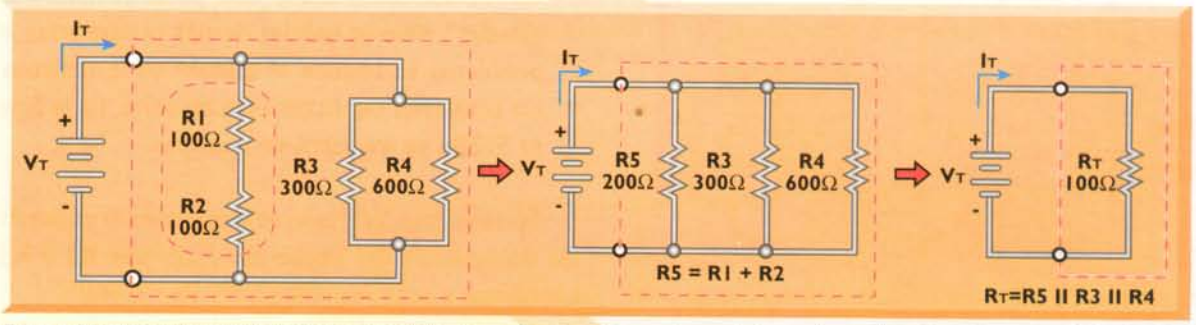


Figura 20b. Cálculo de la resistencia equivalente de un circuito mixto conformado por cadenas de resistencias en paralelo

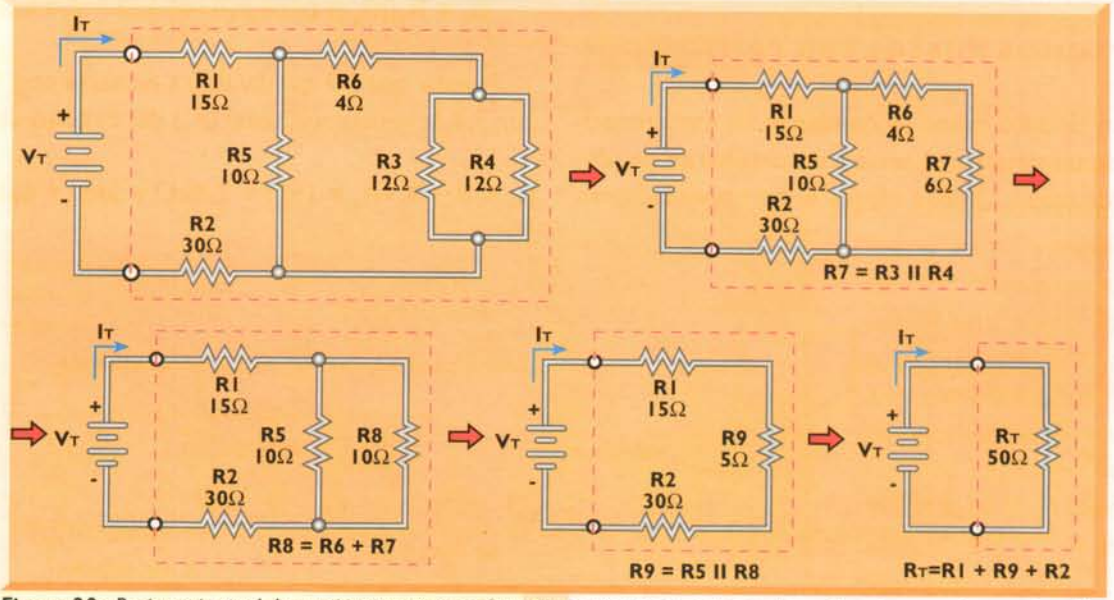


Figura 20c Resistencia total de un circuito mixto conformado por bancos y cadenas de resistencias en serie y en paralelo

A continuación, calculamos la resistencia equivalente de la cadena formada por R6 y R7. Llamamos a esta resistencia R8. Por tanto:

$$R_8 = R_6 + R_7 = 4\Omega + 6\Omega$$
$$R_8 = 10\ \Omega$$

Seguidamente, calculamos la resistencia equivalente del banco formado por R5 y R8. Llamamos a esta resistencia R9. Por tanto:

$$R_9 = 1/(1/R_5 + 1/R_8) = 1/(1/10 + 1/10)\ \Omega$$
$$R_9 = 5\ \Omega$$

Finalmente, calculamos la resistencia equivalente de la cadena formada por R1, R2 y R9. Ésta es la resistencia total (R_T) del circuito. Por tanto:

$$R_T = R_1 + R_9 + R_2 = 15\Omega + 5\Omega + 30\Omega$$
$$R_T = 50\ \Omega$$

Voltajes y corrientes en un circuito mixto

Para determinar las corrientes y los voltajes en un circuito mixto, deben calcularse primero la resistencia total (R_T) y la corriente total (I_T). El análisis se efectúa desde la fuente hacia las cargas. Como ejemplo, consideremos el cálculo de las corrientes y voltajes a través del circuito de la **figura 5.20(c)** cuando se aplica un voltaje de alimentación (V_T) de 100V. Esta situación se ilustra en la **figura 5.21.** En este caso, V_T=100V y R_T= 50Ω. Por tanto:

$$I_T = \frac{V_T}{R_T} = \frac{100V}{50\Omega} = 2A$$

Esta corriente es la misma que circula a través de R1, R2 y la resistencia equivalente R9. Es decir $I_T=I_1=I_2=I_9$. Por tanto, las caídas de voltaje en estas resistencias son:

$$V_1 = IT \times R_1 = 2A \times 15\Omega = 30V$$
$$V_2 = I_T \times R_2 = 2A \times 30\Omega = 60V$$
$$V9 = I_T \times R_9 = 2A \times 5\Omega = 10V$$

La caída de voltaje sobre R9 es en realidad la diferencia de potencial que existe entre los puntos A y B del circuito. Esto significa que V9=V5=V8, es decir las caídas de voltaje a través de la resistencia R5 (V5) y la resistencia equivalente R8 (V8) son ambas iguales a 10V. Por tanto, las corrientes a través de estas resistencias son:

$$I_5 = V_5/R_5 = 10V/10\Omega = 1A$$
$$I_8 = V_8/R_8 = 10V/10\Omega = 1A$$

La corriente I8 es en realidad la corriente que circula a través de R6 y la resistencia equivalente R7. Esto significa que I8=I6=I7. Por tanto, las caídas de voltaje en estas resistencias son:

$$V_6 = I_6 \times R_6 = 1A \times 4\Omega = 4V$$
$$V_7 = I_7 \times R_7 = 1A \times 6\Omega = 6V$$

La caída de voltaje sobre R7 es en realidad la diferencia de potencial que existe entre los puntos C y B del circuito. Esto significa que V7=V3=V4. Por tanto, las corrientes a través de estas resistencias son:

$$I_3 = V_3/R_3 = 6V/12\Omega = 0{,}5A$$
$$I_4 = V_4/R_4 = 6V/12\Omega = 0{,}5A$$

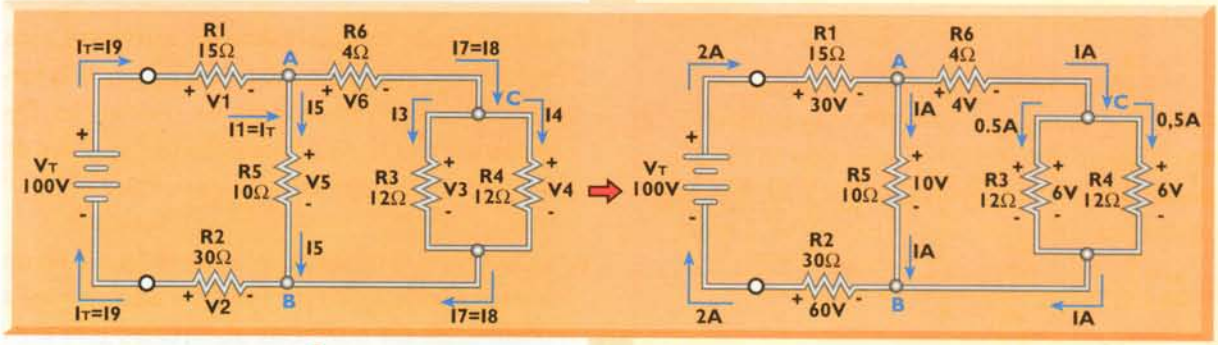


Figura 5.21. Corrientes y voltajes en un circuito mixto

Los resultados de nuestros cálculos se resumen en el circuito de la **figura 5.21b**.

Potencia en circuitos en serie, en paralelo y mixtos

En cualquier circuito con resistencias, la potencia proveniente de la fuente de alimentación del circuito se disipa en forma de calor en cada una de las resistencias. En otras palabras, la potencia total (P_T) entregada por la fuente es igual a la suma de las potencias absorbidas por las resistencias, sin importar si estas últimas están conectadas en serie, en paralelo o en una configuración mixta. Esto es:

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 + \ldots$$

Como ejemplo, consideremos nuevamente el circuito mixto de **la figura 5.21(b)**, reproducido en la **figura 5.22** para mayor comodidad. En este caso, la potencia entregada por la fuente (P_T) es:

$$P_T = V_T \times I_T = 100V \times 2A = 200W$$

Asimismo, las potencias absorbidas por cada una de las resistencias son:

$$P_1 = V_1 \times I_T = 30V \times 2A = 60W$$
$$P_2 = V_2 \times I_T = 60V \times 2A = 120W$$
$$P_3 = V_3 \times I_3 = 6V \times 0.5A = 3W$$
$$P_4 = V_4 \times I_4 = 6V \times 0.5Ax = 3W$$
$$P_5 = V_5 \times I5 = 10V \times 1A = 10W$$
$$P_6 = V_6 \times I6 = 4V \times 1A = 4W$$

Por tanto:

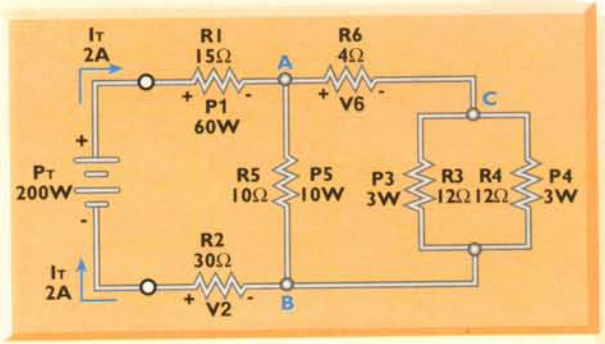


***Figura 5.22**. Distribución de potencias en un circuito mixto*

$$P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 = 200W = P_T$$

El siguiente experimento fijará de manera práctica todo lo que usted ha aprendido acerca de los circuitos de resistencias en serie, en paralelo y en configuraciones mixtas. Le recomendamos seguirlo con atención, efectuar las mediciones y cálculos con cuidado y observar todos los detalles, sin omitir ninguno. En este experimento usted comprobará, entre otras, las siguientes características generales de estos tipos de circuitos:

1. La resistencia total en un circuito en serie es mayor que la mayor de las resistencias.

2. La resistencia total en un circuito en paralelo es menor que la menor de las resistencias.

3. La corriente total entregada por la fuente en un circuito en serie es la misma que circula a través de todas las resistencias.

4. La corriente total entregada por la fuente en un circuito en paralelo se distribuye entre las resistencias y es igual a la suma de las corrientes que circulan por cada una.

5. El voltaje total entregado por la fuente en un circuito en serie se distribuye entre las resistencias y es igual a la suma de las caídas de voltaje sobre cada una.

6. El voltaje total entregado por la fuente en un circuito en paralelo es el mismo aplicado a través de cada una de las resistencias.

7. La resistencia total, así como las corrientes y los voltajes en un circuito mixto, dependen de la forma como estén conectadas las resistencias. De todas formas, se siguen cumpliendo las leyes de Kirchoff de las corrientes y los voltajes.

8. La potencia total entregada por la fuente en un circuito en serie, en paralelo o mixto es igual a la suma de las potencias absorbidas por cada una de las resistencias.

Experimento 5.1. Análisis de circuitos con resistencias en serie, en paralelo y en configuraciones mixtas

Objetivos

- Verificar, de manera práctica, las características de los circuitos en serie, en paralelo y mixtos utilizando resistencias como cargas
- Observar el comportamiento del voltaje, la corriente y la potencia en los mismos circuitos
- Demostrar el cumplimiento las leyes de Kirchoff de los voltajes y las corrientes en los mismos circuitos
- Medir la resistencia equivalente de los mismos circuitos y compararla con los valores calculados teóricamente

Materiales necesarios

1 Tablero de conexiones sin soldadura (*protoboard*)
1 Batería de 9V, preferiblemente alcalina
1 Conector para batería
1 Resistencia de 1kΩ (marrón-negro-rojo)
1 Resistencia de 1,8kΩ (marrón-gris-rojo)
1 Resistencia de 4,7kΩ, (amarillo-violeta-rojo)
1 Resistencia de 8,2kΩ (gris-rojo-rojo)
1 Metro de alambre telefónico #24 para puentes
1 Multímetro digital
1 Calculadora

Nota. Todas las resistencias son de composición de carbón y 5% de tolerancia (última banda dorada). Pueden ser de 1/2W o 1/4W.

Procedimiento

Primera parte. Generalidades

1. Configure su multímetro digital como medidor de resistencia. Mida el valor real de cada una de las resistencias utilizadas, **figura 5.23**. Registre estos valores en una tabla. Llame R1 la resistencia de 1kΩ, R2 la de 1,8kΩ, R3 la de 4,7kΩ y R4 la de 8,2kΩ. En nuestro caso, obtuvimos los siguientes resultados:

R1= 0,99 kΩ **R2 = 1,804 kΩ**
R3 = 4,63 kΩ **R4 = 7,93kΩ**

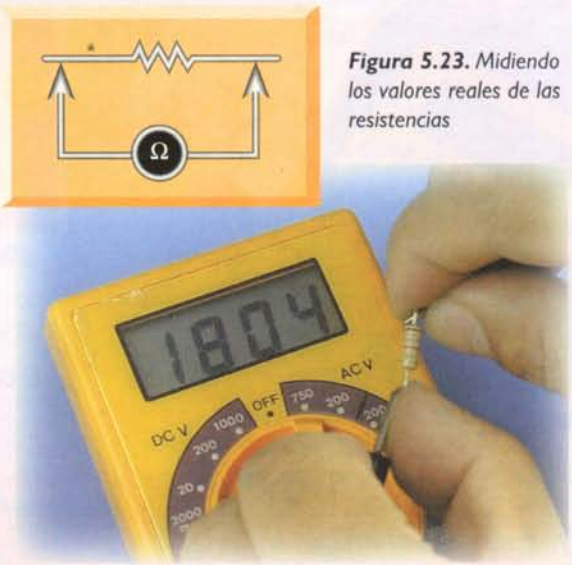
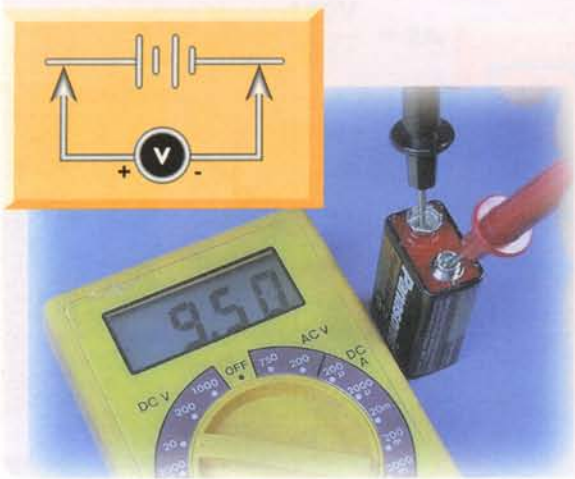


Figura 5.23. *Midiendo los valores reales de las resistencias*



2. Configure su multímetro como voltímetro para CC. Mida entonces el voltaje entregado por la batería en condiciones de circuito abierto, **figura 5.24**. Registre este valor (V). En nuestro caso, obtuvimos **V=9,5V**.

Figura 5.24. *Midiendo el voltaje de salida de la batería en condiciones de circuito abierto*

3. Provea la batería con su respectivo conector. Si es necesario, estañe las puntas del conector para facilitar su inserción en el *protoboard*.

4. Utilizando el alambre telefónico, corte unos 10 puentes de alambre de unos 12 mm de longitud. En las prácticas que siguen, estos puentes le servirán como conductores de conexión removibles para facilitar las mediciones de corriente con el multímetro.

Segunda parte. Conexión de resistencias en serie

5. Seleccione las resistencias R1 (1kΩ), R2 (1,8kΩ) y R3 (4,7kΩ). Conéctelas entonces en serie sobre el *protoboard*, **figura 5.25**. Utilice los puentes de alambre previamente cortados para formar el circuito.

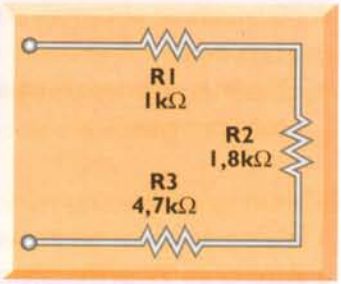
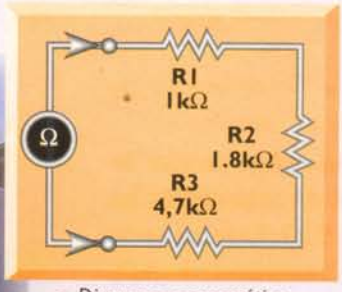


Figura 5.25. *Conectando las resistencias en serie*

6. Con su multímetro configurado como óhmetro, mida la resistencia total o equivalente (RT o REQ) del circuito, **figura 5.26**. Anote el resultado obtenido. ¿Coincide razonablemente este valor con el esperado teóricamente? En nuestro caso, medimos **RT=7,47kΩ**. El valor esperado era:

RT = R1 + R2 + R3
RT = 0,99kΩ + 1,804kΩ + 4,63 kΩ
RT = 7,424 kΩ



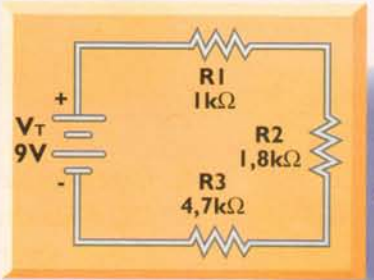
a. *Diagrama esquemático*

b. *Circuito práctico*

Figura 5.26 *Midiendo la resistencia total*

Por tanto, el valor medido (7,47kΩ) coincide razonablemente con el esperado (7,424kΩ). La diferencia o error es de apenas de 46Ω, es decir el 0,62%. ¿Cuánto obtuvo usted?

7. Complete el circuito en serie alimentándolo mediante la batería, como se indica en la **figura 5.27**.



a. *Diagrama esquemático*

b. *Circuito práctico*

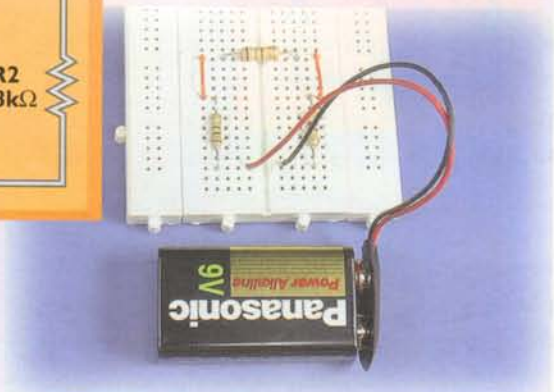
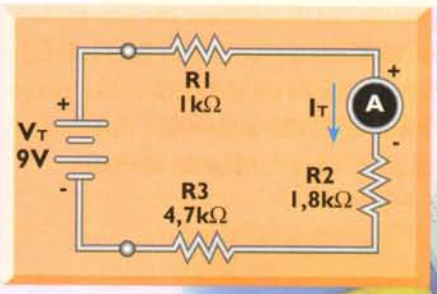


Figura 5.27. *Alimentando el circuito en serie con la batería*

8. Configure su multímetro digital como miliamperímetro para CC. Mida entonces la corriente a través del circuito, **figura 5.28**. Para ello, retire cualquiera de los puentes de conexión y conecte en su lugar el multímetro. Como puntos de contacto puede utilizar los terminales desnudos de las resistencias. Anote el valor medido y compárelo con el esperado teóricamente. Una vez hecha esta medida, reinstale el puente. En nuestro caso, obtuvimos **IT=1,27 mA**. El valor esperado era:

IT = V/RT = 9,5V/7,47kΩ = 1,27 mA



a. Diagrama esquemático

b. Circuito práctico

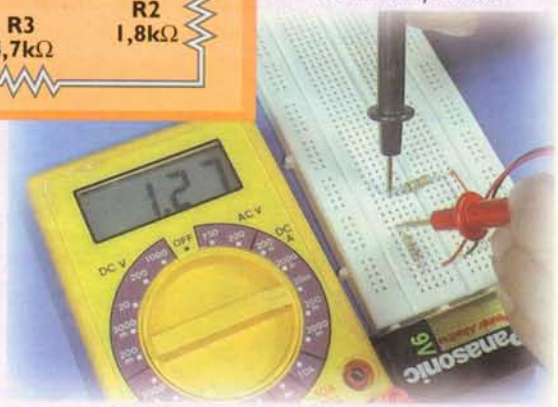
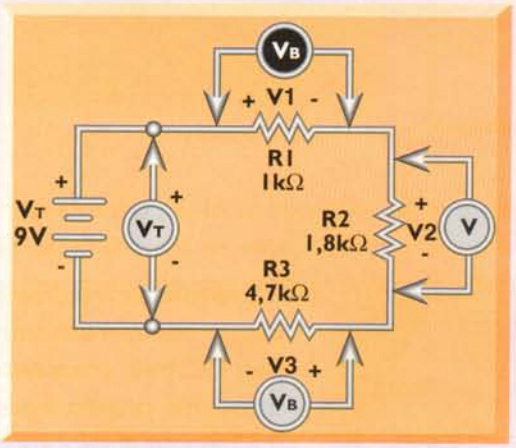


***Figura 5.28**. Midiendo la corriente en un circuito en serie*

9. Configure su multímetro como voltímetro para CC. Mida entonces la caída de voltaje a través de cada resistencia (V1,V2,V3) y compare su suma con el voltaje entregado por la batería (VT), **figura 5.29**. Anote los valores obtenidos y compárelos con los esperados teóricamente. En nuestro caso, obtuvimos **VT = 9,48V**, **V1 = 1,26V**, **V2 = 2,28V** y **V3 = 5,90V**. Los valores esperados eran:

V1 = I x R1 = 1,27mA x 0,99kΩ = 1,257V
V2 = I x R2 = 1,27mA x 1,804kΩ = 2,291V
V3 = I x R3 = 1,27mA x 4,63 kΩ = 5,880V
VT = I x RT = 1,27mA x 7,47kΩ = 9,487V
VT = V1 + V2 + V3 = 9,428V



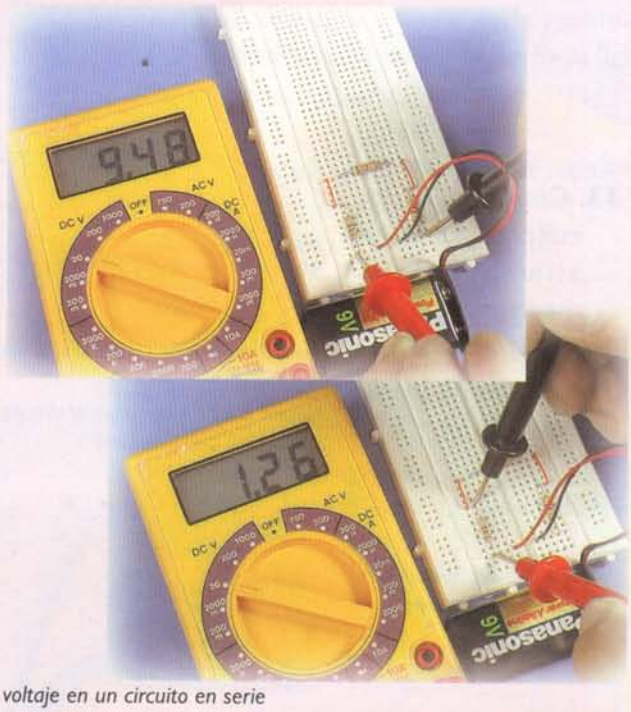


***Figura 5.29**. Midiendo el voltaje de entrada y las caídas de voltaje en un circuito en serie*

10. Calcule la potencia entregada por la fuente (PT) y compárela con la suma de las potencias absorbidas por cada resistencia. En nuestro caso:

PT = VTxIT = 9,48V x 1,27mA = 12,04 mW
P1 = V1xIT = 1,26V x 1,27mA = 1,60 mW
P2 = V2xIT= 2,28V x 1,27mA = 2,90 mW
P3 = V3xIT = 5,90V x 1,27mA = 7,49 mW
P1 + P2 + P3 = 11,99 mW ≈ PT

Tercera parte. Conexión de resistencias en paralelo

11. Seleccione otra vez las resistencias R1 (1kΩ), R2 (1,8kΩ) y R3 (4,7kΩ), pero conéctelas ahora en paralelo sobre el *protoboard*, **figura 5.30**. Nuevamente, utilice los puentes de alambre que sean necesarios para formar el circuito.

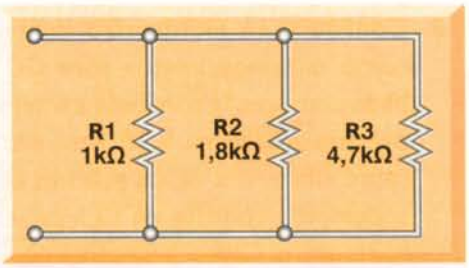


Figura 5.30 *Conexión de las resistencias en paralelo*

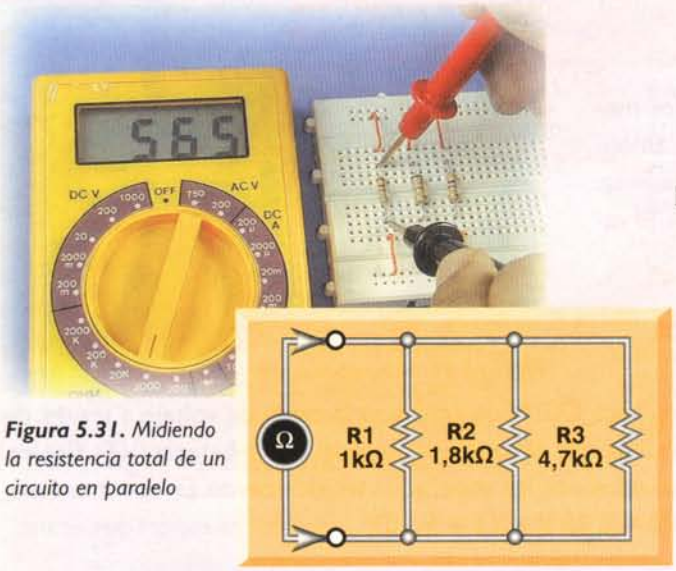


Figura 5.31. *Midiendo la resistencia total de un circuito en paralelo*

12. Con su multímetro configurado como óhmetro, mida la resistencia total o equivalente (RT o REQ) del circuito, **figura 5.31**. Anote el resultado obtenido. En nuestro caso, medimos **RT = 565Ω**. El valor esperado era **RT = 562 Ω** ¿Por qué?

13. Complete el circuito en paralelo alimentándolo mediante la batería, **figura 5.32**.

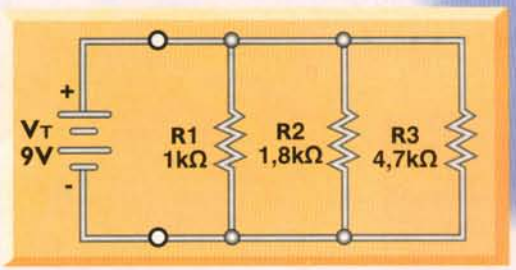


Figura 5.32 *Alimentando el circuito en paralelo con la batería*

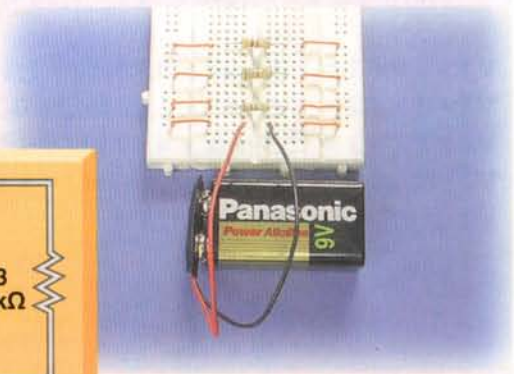
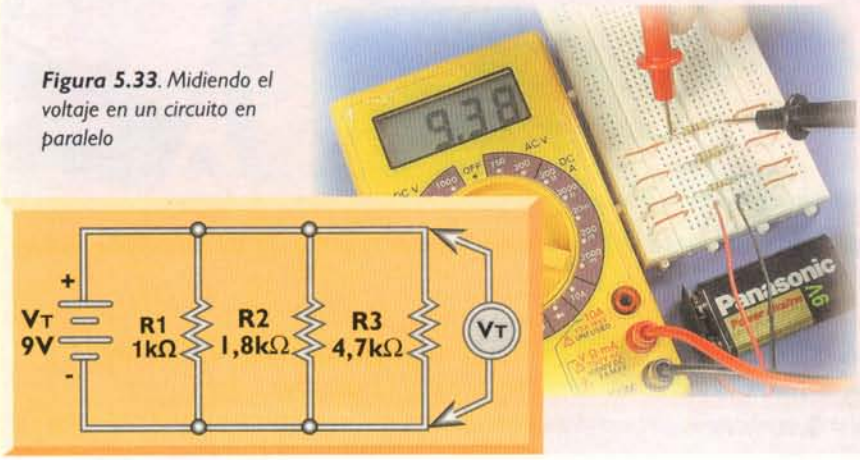


Figura 5.33. *Midiendo el voltaje en un circuito en paralelo*



14. Configure su multímetro digital como voltímetro para CC. Mida entonces el voltaje del circuito, **figura 5.33**. Anote el valor medido y compárelo con el esperado teóricamente. En nuestro caso, obtuvimos **VT = 9,38 V**. El valor esperado era **VT = 9,5 V** ¿Por qué?

15. Configure su multímetro como miliamperímetro para CC. Mida entonces la corriente entregada por la fuente (IT) y la corriente a través de cada resistencia (I1, I2, I3), **figuras 5.34** y **5.35**. Anote los valores obtenidos y compárelos con los esperados teóricamente. En nuestro caso, obtuvimos **IT=16,5mA**, **I1=9,3mA**, **I2=5,1mA** e **I3=2,0mA**. Los valores esperados eran **I1 = 9,475mA**, **12 = 5,2mA**, **I3 = 2,062mA** e **IT = 16,4 mA** ¿Por qué?

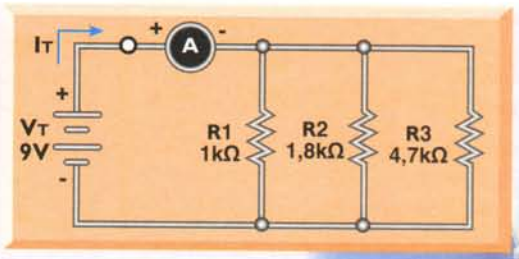


Figura 5.34. *Midiendo la corriente total en un circuito en paralelo*

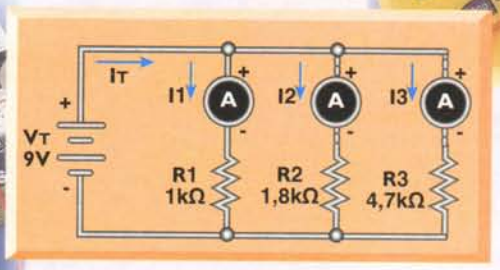


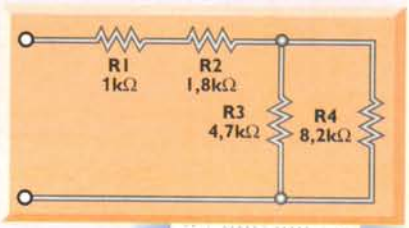
Figura 5.35. *Midiendo las corrientes de rama en un circuito en paralelo*

16. Calcule la potencia entregada por la fuente (PT) y compárela con la suma de las potencias absorbidas por cada resistencia. En nuestro caso:

PT = VTxIT = 9,38V x 16,5mA = **154,77 mW**
P1 = VTxI1 = 9,38V x 9,3mA = **87,23 mW**
P2 = VTxI2= 9,38V x 5,1mA = **47,84 mW**
P3 = VTxI3 = 9,38V x 2,0mA = **18,76 mW**
P1+P2+P3 = 153,83 mW ≈ PT

Tercera parte. Conexión de resistencias en serie-paralelo

17. Seleccione las resistencias R1 (1kΩ), R2 (1,8kΩ), R3 (4,7kΩ) y R4 (8,2kΩ) y conéctelas sobre el *protoboard* en una configuración mixta, **figura 5.36**. Nuevamente, utilice los puentes de alambre que sean necesarios para formar el circuito.



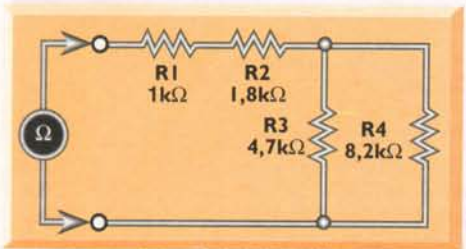


Figura 5.36. *Conectando las resistencias en una configuración mixta o serie paraleo*

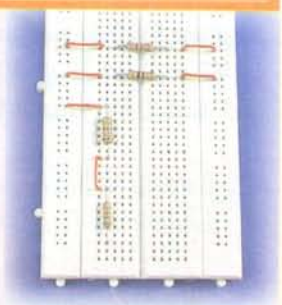
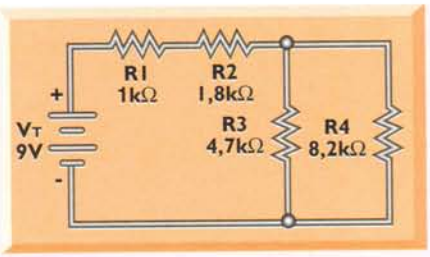


Figura 5.37. *Midiendo la resistencia total de un circuito mixto*

18. Con su multímetro configurado como óhmetro, mida la resistencia total o equivalente (RT o REQ) del circuito, **figura 5.37**. Anote el resultado obtenido. En nuestro caso, medimos **RT = 5,76 kΩ**. El valor esperado era **5,714kΩ**. ¿Por qué?

19. Complete el circuito alimentándolo mediante la batería, **figura 5.38**.



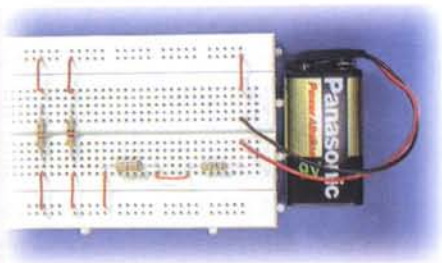


Figura 5.38. *Alimentando el circuito mixto con la batería*

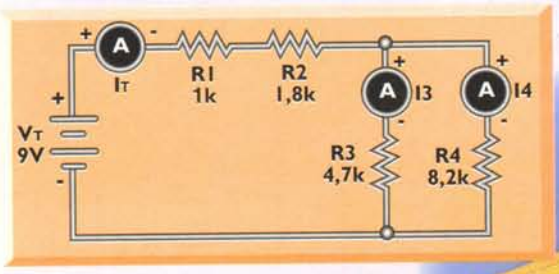
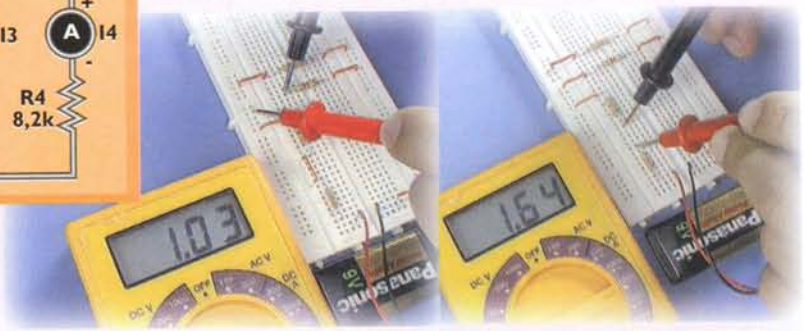
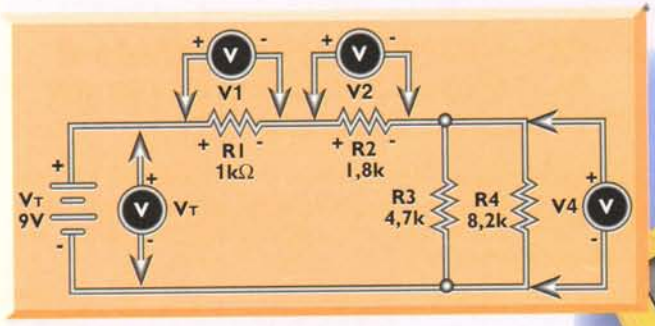


Figura 5.39. *Midiendo las corrientes del circuito mixto*



20. Configure su multímetro como amperímetro para CC y mida las corrientes del circuito, **figura 5.39**. Anote los valores obtenidos. En nuestro caso, obtuvimos **IT = 1,64mA**, **I3 = 1,03mA** e **I4 = 0,59mA**. Los valores esperados eran **I3 = 1,03mA**, **I4 = 0,60mA** e **IT = 1,62mA** ¿Por que?



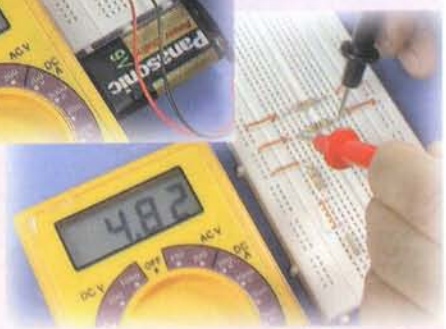


Figura 5.40. *Midiendo los voltajes del circuito mixto*

21. Configure su multímetro como voltímetro para CC y mida lo voltajes del circuito, **figura 5.40**. En nuestro caso, obtuvimos **VT = 9,39 V**, **V1 = 1,62V**, **V2 = 2,94 V** y **V3 = 4,82V**. Los valores esperados eran **V1=1,61V**, **V2=2,94V**, **V3=4,76V** y **VT=9,38V** ¿Por qué?

22. Calcule la potencia entregada por la fuente y compárela con la suma de las absorbidas por las resistencias. En nuestro caso:

PT = VTxIT = 9,39V x 1,64mA = **15,40 mW**
P1 = V1xIT = 1,62V x 1,64mA = **2,66 mW**
P2 = V2xIT = 2,94V x 1,64mA = **4,82 mW**
P3 = V3xI3 = 4,82V x 1,03mA = **4,96 mW**
P4 = V3xI4 = 4,82V x 0,59mA = **2,84 mW**
P1+P2+P3+P4 = 15,28 mW ≈ PT

23. Derive sus propias conclusiones a partir de cada uno de los resultados de este experimento. ¿Coinciden con lo que esperaba obtener? ¿Por qué?

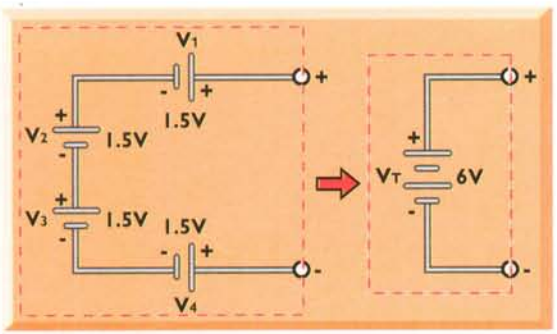


Figura 5.41 *Voltaje equivalente de baterías en serie. Todo el conjunto se comporta como una batería de 6V con una capacidad de corriente igual a la de la pila de menor capacidad*

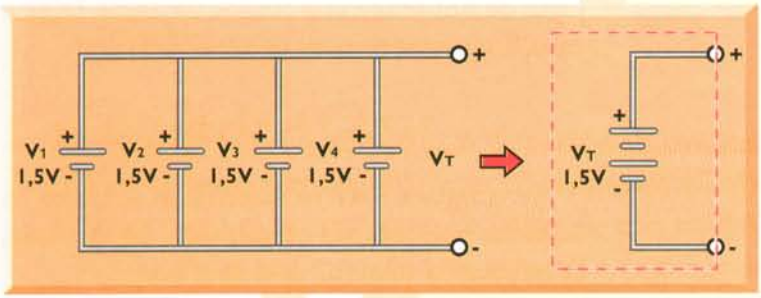


Figura 5.42 *Voltaje equivalente de baterías en paralelo. Todo el conjunto se comporta como una batería de 1,5V con una capacidad de corriente igual a la suma de las capacidades de cada pila*

Conexión de pilas en serie y en paralelo

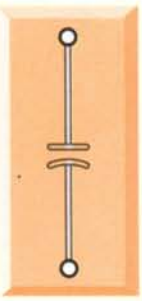
Las fuentes de energía eléctrica, como las pilas y las baterías, pueden ser conectadas en serie o en paralelo para aumentar su capacidad de voltaje o de corriente. En la **figura 5.41** se muestra un grupo de **pilas conectadas en serie aditiva**. El voltaje total (V_T) entregado es igual a la suma de los voltajes individuales. Esto es:

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3 + ...$$

En este modo de conexión se basan las **baterías**, como las utilizadas en los automóviles, las cuales se construyen a partir de varios elementos llamados **celdas** conectados en serie.

En la **figura 5.42** se muestra un grupo de **pilas conectadas en paralelo**. En este caso, el voltaje total (V_T) es igual al voltaje de cada unidad. La capacidad de corriente es igual a la suma de las capacidades individuales de todas las pilas. Esto es:

Figura 5.43 *Símbolo de un condensador*



$$VT = V1=V2=V3=...$$

En nuestro caso, cada pila entrega 1,5V. Por tanto, el voltaje resultante es 1,5V. Si cada pila entrega 100 mA, todo el conjunto se comporta como una pila de 1,5V con una capacidad de 4x100 mA, es decir 400 mA. En este modo de conexión se basan las **baterías de refuerzo**, como las que se conectan temporalmente a las baterías «muertas» de los automóviles para encender el motor. Las pilas y baterías se estudían en detalle en la sección Componentes de este curso.

Conexión de condensadores en serie y en paralelo

Los condensadores son componentes que se utilizan para almacenar temporalmente energía eléctrica en forma de voltaje. Estan formados por un material aislante, llamado **dieléctrico**, colocado entre dos conductores, llamados **placas**, **figura 5.43**. Los condensadores se identifican por su ***capacitancia***, la cual se especifica en **faradios** (F) o submúltiplos, principalmente microfaradios (µF), nanofaradios (nF) y picofaradios (pF).

Los condensadores se pueden conectar en serie o en paralelo para obtener capacidades menores o mayores que la proporcionada por uno solo. En la **figura 5.44** se muestra un conjunto de **con-**

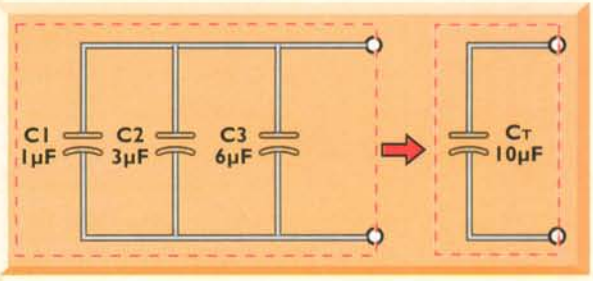


Figura 5.44 *Capacitancia equivalente de condensadores en paralelo*

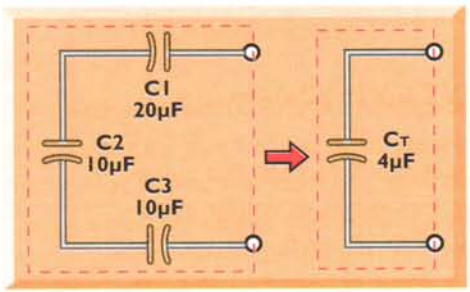


Figura 5.45 *Capacitancia equivalente de condensadores en serie*

densadores conectados en paralelo. En este caso, la capacidad total (C_T) está dada por:

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 + ...$$

En la **figura 5.45** se muestra un conjunto de **condensadores conectados en serie**. En este caso, la capacidad total (C_T) está dada por:

$$C_T = 1/(1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3 + ...)$$

Los condensadores se estudian en detalle en la sección Componentes de este curso.

Conexión de bobinas en serie y en paralelo

Las bobinas son componentes que se utilizan para almacenar temporalmente corriente eléctrica y producir un voltaje cuando cambia la corriente. Están formadas por un alambre enrollado (devanado) alrededor de un núcleo aislante o de material magnético, por ejemplo hierro, **figura 5.46**. Las bobinas se identifican por su **inductancia**, la cual se especifica en **henrios** (H) o submúltiplos, principalmente milihenrios (mH) y microhenrios (µH).

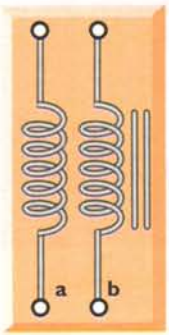


Figura 5.46 *Símbolo de una bobina con núcleo de aire (a) o hierro (b)*

Las bobinas, al igual que las resistencias y los condensadores, pueden ser conectadas en serie o en paralelo para obtener inductancias mayores o menores que la proporcionada por una sola. En la **figura 5.47** se muestra un conjunto de **bobinas conectados en serie**. En este caso, la inductancia total (L_T) está dada por:

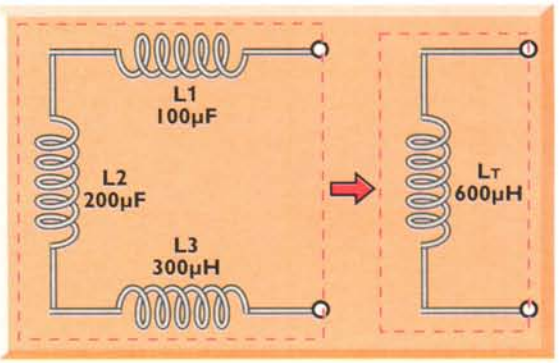


Figura 5.47 *Inductancia equivalente de bobinas conectadas en serie*

$$L_T = L_1 + L_2 + L_3 + ...$$

En la **figura 5.47** se muestra un conjunto de **bobinas conectadas en paralelo**. En este caso, la inductancia total (L_T) está dada por:

$$L_T = 1/(1/L_1 + 1/L_2 + 1/L_3 + ...)$$

Las fórmulas anteriores asumen que las bobinas están físicamente distantes y no están **acopladas magnéticamente**, es decir no están construidas sobre el mismo núcleo. También suponen que están devanadas en la misma dirección. En la práctica, la inductancia real obtenida depende de estos factores y de la llamada **inductancia mutua** (L_M), un parámetro que define el grado de acoplamiento magnético entre ellas. Dos o más bobinas acopladas sobre un mismo núcleo constituyen un **transformador.** Las bobinas y los transformadores se estudian en detalle en la sección Componentes de este curso.

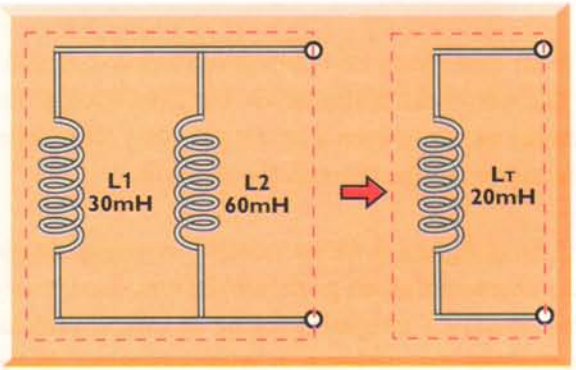
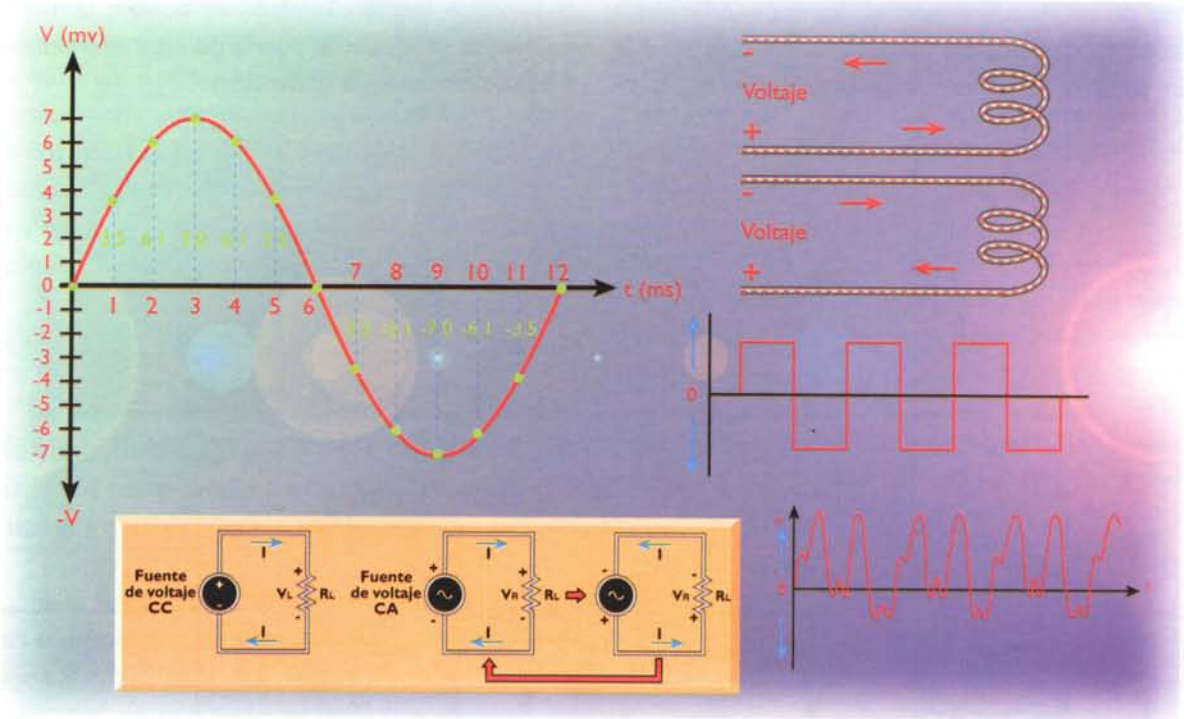


Figura 5.48 *Inductancia equivalente de bobinas en paralelo*

Lección 6

Conceptos básicos de corriente alterna (CA) y corriente continua (CC)

La polaridad de un voltaje o la dirección de una corriente en cualquier punto de un circuito, puede permanecer invariable o cambiar alternativamente con el tiempo. En el primer caso se habla de una tensión o una corriente continua (CC) y en el segundo de una tensión o una corriente alterna (CA). Ambos tipos de señales son ampliamente utilizadas en los circuitos eléctricos y electrónicos. En esta lección examinaremos sus características generales, haciendo énfasis en las señales alternas senoidales y los voltajes continuos constantes y pulsantes.



Introducción

La **corriente alterna** (CA) y la **corriente continua** (CC), son las dos formas de energía predominantes en los circuitos eléctricos y electrónicos. Cada una afecta de manera diferente la polaridad de los voltajes y la dirección de las corrientes en un circuito. También se diferencian en la forma como varía su valor a medida que transcurre el tiempo.

Las **corrientes continuas** se caracterizan porque circulan siempre en la misma dirección. Las **corrientes alternas**, por su parte, cambian alternativamente, circulando primero en una dirección y luego en la opuesta. Del mismo modo, los **voltajes continuos** se caracterizan porque mantienen siempre la misma polaridad, mientras que los **voltajes alternos** la cambian alternativamente, **figura 6.1**

Los voltajes que suministran las compañías de electricidad a sus usuarios, por ejemplo, son alternos (CA), mientras que los suministrados por las baterías son continuos (CC). En el primer caso, el valor del voltaje cambia con el tiempo siguiendo la forma de una onda seno. Por eso se dice que se trata de un voltaje **senoidal, figura 6.2**. En el segundo caso, el voltaje no cambia. Por eso se dice que se trata de un voltaje **constante.** En la práctica, también se utilizan voltajes y corrientes que varían siguiendo otros patrones. Todos los circuitos que hemos examinado hasta el momento utilizan voltajes y corrientes de CC constantes.

Las corrientes y los voltajes de CA y CC son muy importantes en la práctica. La mayor parte de los productos eléctricos y electrónicos, por ejemplo, televisores, planchas, computadoras, etc., operan con corriente alterna. Así mismo, los motores y transformadores utilizados en muchas máquinas y electrodomésticos necesitan también de corriente alterna para operar. Las señales utilizadas en los sistemas de audio, radio, televisión, etc., para representar voz, música, imágenes y otras formas de información son igualmente alternas.

Sin embargo, todos los circuitos electrónicos, desde el más simple amplificador hasta la más sofisticada computadora, necesitan, en última instancia, de una fuente de corriente continua para operar. Esta corriente puede ser suministrada directamente por una pila o una batería, o derivada de una fuente de corriente alterna a través de un proceso llamado **rectificación,** que estudiaremos en la próxima lección. También es posible convertir corriente continua en corriente alterna mediante un proceso llamado **inversión.**

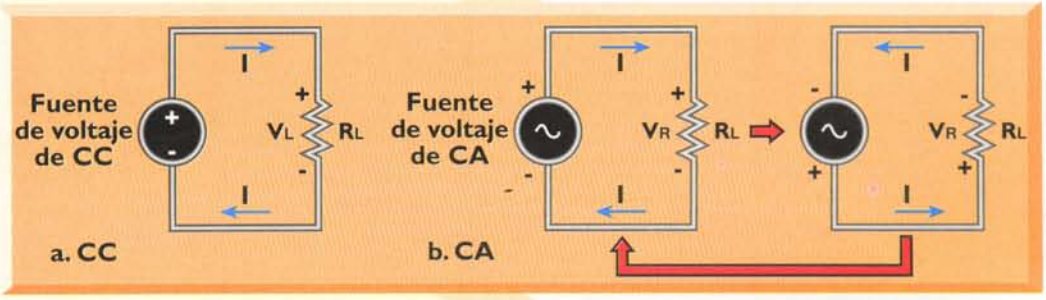


Figura 6.1 En un circuito de CA, la polaridad del voltaje, así como la dirección de la corriente, se alternan o cambian periódicamente, mientras que en un circuito de CC no cambian.

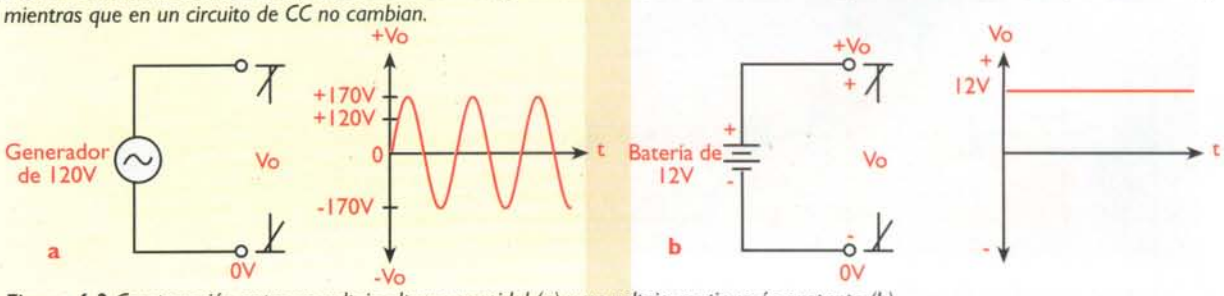


Figura 6.2 Comparación entre un voltaje alterno senoidal (a) y un voltaje continuo ó constante (b).

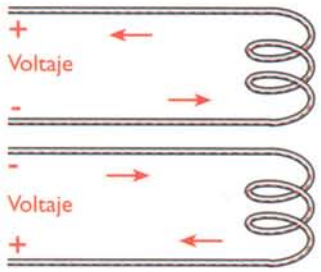


Figura 6.3. Ilustración pictórica del concepto de una corriente alterna

Corriente alterna

La corriente alterna (CA) se produce cuando se alimenta un circuito con una fuente de voltaje cuya polaridad cambia o se alterna con el tiempo. Esto causa que los electrones circulen alternativamente en una dirección y luego en la dirección opuesta, **figura 6.3.** Además de cambiar de dirección, casi todos los tipos de corrientes alternas cambian también de valor con el tiempo.

La representación gráfica de la manera particular como varía el valor de un voltaje o una corriente con el tiempo se denomina su **forma de onda**. En la **figura 6.4** se muestran algunos ejemplos. Cuando la variación sigue la forma de una onda seno, se tiene lo que se denomina una **corriente alterna senoidal o sinusoidal.** Este es el tipo de forma de onda de la corriente alterna más común y utilizada. Por esta razón, la examinaremos en detalle.

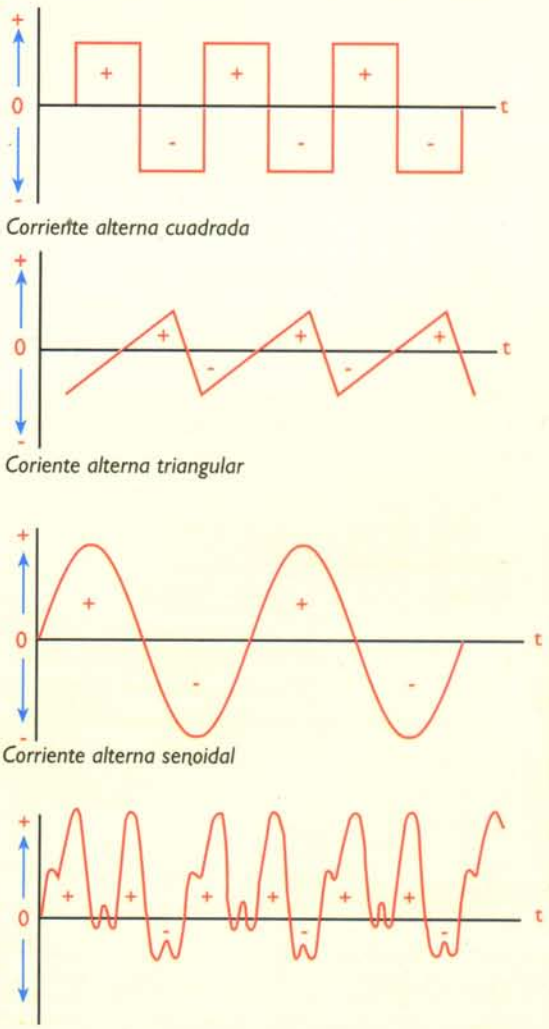
En todos los casos mostrados en la **figura 6.4**, sobre el eje horizontal están representados los valores de tiempo (t) y sobre el eje vertical los valores de voltaje (v) o corriente (i). Las porciones de la forma de onda marcadas como (+) y (-) representan una polaridad del voltaje o una direccción de movimiento de la corriente. En la **figura 6.5** se muestran algunos valores que adopta una onda seno de voltaje particular, en instantes de tiempo específicos.

Concepto de ciclo. Valores angulares

La mayoría de corrientes y tensiones alternas de interés práctico son **periódicas**, es decir sus formas de onda tienen un patrón regular que se repite exactamente de la misma forma cada cierto tiempo. El patrón de una forma de onda que se repite periódicamente se denomina un **ciclo**. En la **figura 6.6**, por ejemplo, se muestra un ciclo de una forma de onda senoidal.

Observe que, durante una alternancia o semiciclo (medio ciclo) de la onda, la corriente aumenta desde cero hasta un valor máximo, y posteriormente regresa a cero. A partir de entonces, la corriente empieza a aumentar otra vez, pero en dirección opuesta, hasta alcanzar un valor máximo y luego disminuye a cero. De esta forma se completa **un ciclo**. El proceso se repite indefinidamente.

En general, un ciclo incluye las variaciones entre cualquier par de puntos sucesivos de una forma de



a. Corriente alterna cuadrada

b. Coriente alterna triangular

c. Corriente alterna senoidal

d. Corriente alterna compleja

***Figura 6.4** Formas de onda de corrientes alternas*

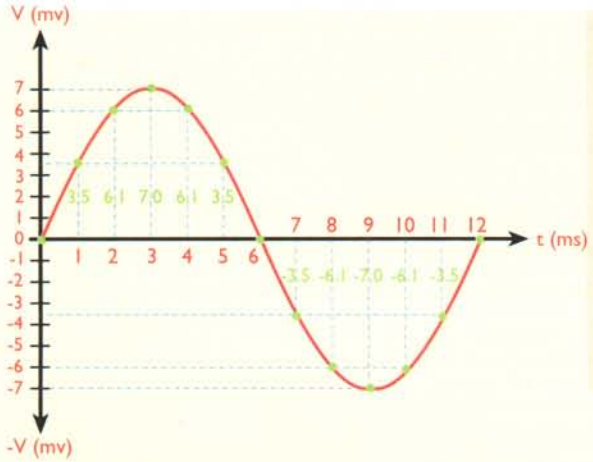


Figura 6.5. *Valores particulares de voltaje en una onda seno para algunos valores de tiempo*

Figura 6.6 *Ciclo de una forma de onda senoidal. Las corrientes y voltajes senoidales son las formas de onda que más se presentan y más se utilizan en los circuitos eléctricos y electrónicos.*

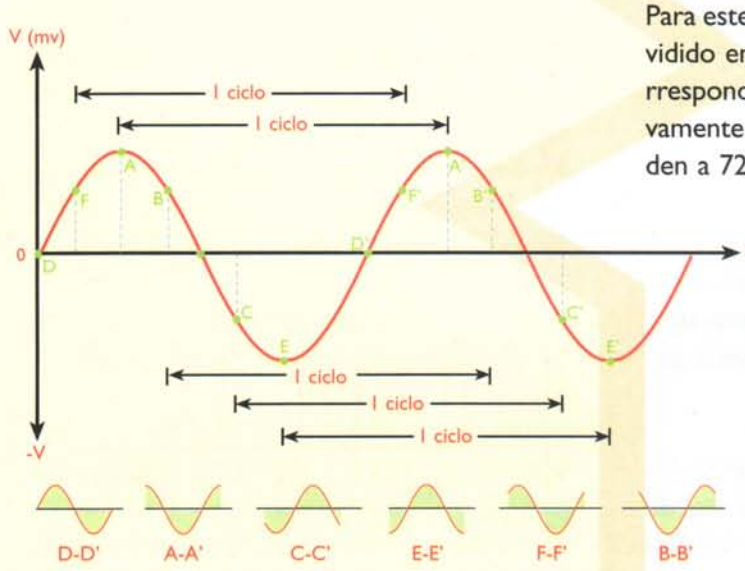
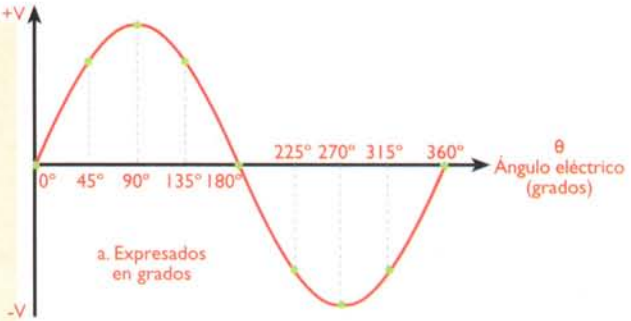


Figura 6.7. *Distintas formas de considerar un ciclo de una forma de onda seno*



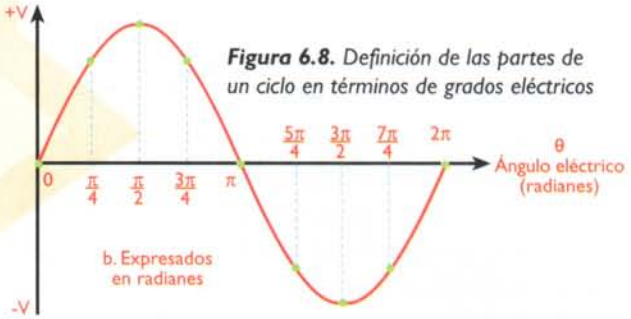


Figura 6.8. *Definición de las partes de un ciclo en términos de grados eléctricos*

onda periódica que tienen el mismo valor y que varían en el mismo sentido. En la **figura 6.7** se ilustra este concepto. Todos los patrones mostrados se repiten exactamente una y otra vez para constituir la onda seno. Lo mismo se aplica a cualquier otra forma de onda periódica.

En muchas situaciones es conveniente considerar los diferentes puntos de un ciclo como ángulos. Para este efecto, un ciclo completo se considera dividido en 360°. Por tanto, la mitad de un ciclo corresponde a 180°, la cuarta parte a 90°, y así sucesivamente. Del mismo modo, dos ciclos corresponden a 720°, tres ciclos y medio a 1.260°, etc. En la **figura 6.8** se ilustran estos conceptos.

Los ángulos se pueden también expresar en **radianes** (rad), siendo un radian equivalente a 57.3°. Desde este punto de vista, un ciclo completo (360°) corresponde a 2π radianes, medio ciclo a π radianes, un cuarto de ciclo a π/2 radianes, dos ciclos a 4π radianes, y así sucesivamente, **figura 6.8(b)** . Recuerde que la constante π (leáse **pi**) es aproximadamente igual a **3,1416**.

Ángulo (θ)		
Grados (°)	Radianes (rad)	Sen θ
0	0	0
30	≠/6	0,5
45	≠/4	0,707
60	≠/3	0,866
90	≠/2	1,0
180	≠	0
270	3≠/2	-1,0
360	2≠	0

Figura 6.9. *Valores del seno de ángulos importantes*

Cuando trabaje con grados y radianes, tenga en cuenta las siguientes reglas de conversión:

1. Para convertir grados en radianes, multiplique por π (3,1416) y divida por 180. Esto es:

Ángulo en radianes = (Ángulo en grados x π) ÷ 180

2. Para convertir radianes en grados, multiplique por 180 y divida por π (3,1416). Esto es:

Ángulo en grados = (Ángulo en radianes x 180) ÷ π

Por ejemplo, 30° corresponden a 30π/180 radianes, es decir π/6 ó 0,52 rad. Del mismo modo, 1,5 rad corresponden a 1,5 x 180/π grados, es decir 30°.

En general, la magnitud de la corriente o el voltaje de una onda seno para un ángulo cualquiera es proporcional al **seno** de ese ángulo. En el caso de las ondas de la **figura 6.8**, esta magnitud es cero para 0°, máxima positiva para 90° (π/2), cero para 180° (π), máxima negativa para 270° (3π/2), cero para 360° (2π), y así sucesivamente. La función seno se comporta de la misma manera: vale 0 para 0° y 180°, +1 para 90° y -1 para 270°, **figura 6.9**.

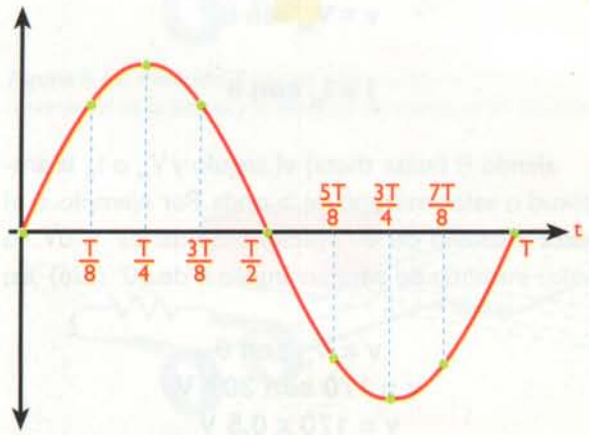


Figura 6.10. *Definición de las partes de un ciclo en términos de fracciones de período*

Concepto de periodo

El tiempo que dura un ciclo de una corriente o una tensión alterna define el **período** (T) de la onda. El período se mide en **segundos** (s). También es común el uso de submúltiplos, como el milisegundo (ms), el microsegundo (μs) y el nanosegundo (ns). Un ciclo corresponde a T segundos, medio ciclo a T/2, un cuarto de ciclo a T/4, y así sucesivamente, **figura 6.10.**

Concepto de frecuencia

El número de ciclos de una corriente o una tensión alterna que ocurren o se repiten en un segundo, define la **frecuencia** (f) de la onda, **figura 6.11**. La unidad de medida de la frecuen

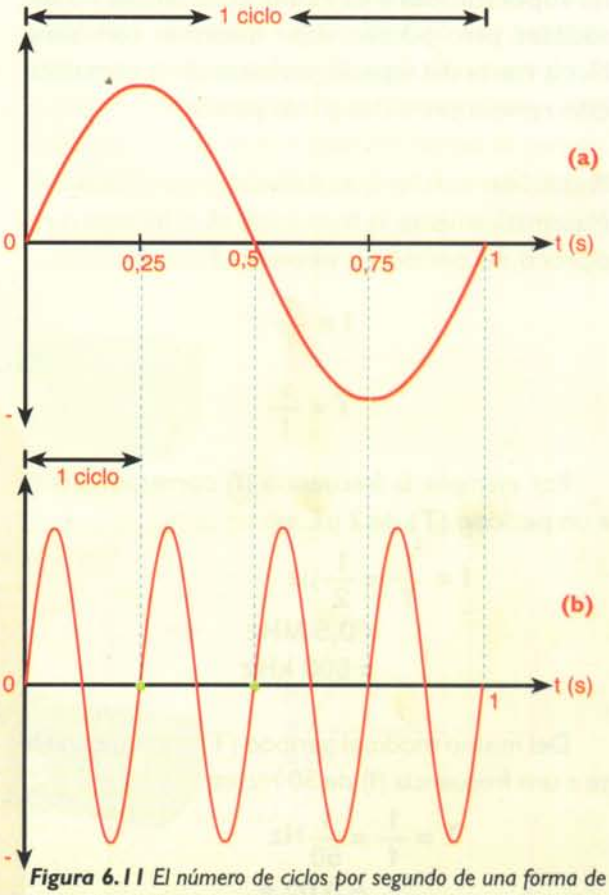


Figura 6.11 *El número de ciclos por segundo de una forma de onda define su frecuencia. En (a) se muestra una onda seno de 1 Hz y en (b) una onda seno de 4 Hz*

cia es el **hertz** o **hertzio** (**Hz**), denominado así en honor del físico alemán **Heinrich Hertz** (1857-1894), descubridor de las ondas de radio. También es común el uso de múltiplos como el kilohertz (kHz), el megahertz (MHz) y el gigahertz (GHz). Un kilohertz, por ejemplo, equivale a mil hertz (1 kHz = 1.000 Hz = 10^3Hz).

Las corrientes alternas con frecuencias desde 20 Hz hasta unos 20 kHz se denominan **señales de audio**. Este nombre se debe a que producen sonidos audibles cuando se reproducen en un parlante. Las corrientes alternas con frecuencias por encima de 20kHz, por su parte, se denominan señales **supersónicas** o de **radio**. Estas señales no son audibles, pero pueden viajar distancias considerables a través del espacio, permitiendo la comunicación remota entre dos o más puntos.

Relación entre frecuencia y período

Matemáticamente, la frecuencia es el inverso o recíproco del período, y viceversa. Esto es:

$$f = \frac{1}{T}$$

$$T = \frac{1}{f}$$

Por ejemplo, la frecuencia (**f**) correspondiente a un período (**T**) de 2 µs, es:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2}\mu s$$
$$= 0{,}5 \text{ MHz}$$
$$= 500 \text{ kHz}$$

Del mismo modo, el período (**T**) correspondiente a una frecuencia (**f**) de 50 Hz, es:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} Hz$$
$$= 0{,}02 \text{ s}$$
$$= 20 \text{ ms}$$

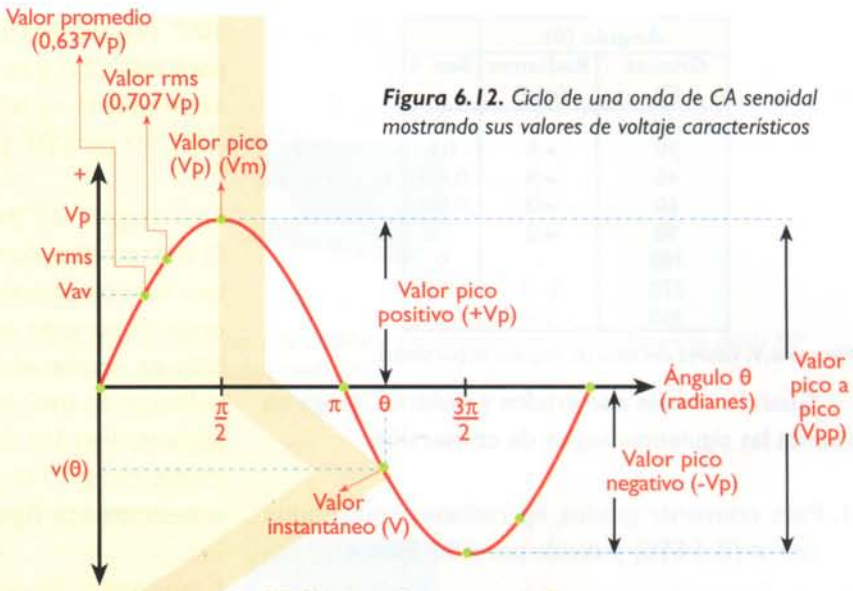


Figura 6.12. *Ciclo de una onda de CA senoidal mostrando sus valores de voltaje característicos*

Valores de una onda seno

En un ciclo de una onda seno de voltaje o corriente alterna se distinguen varios valores característicos, los cuales permiten comparar una forma de onda con otra y describir su comportamiento en términos cuantitativos. Los más importantes son el valor instantáneo, el valor pico, el valor pico a pico, el valor promedio y el valor efectivo o rms, **figura 6.12.**

Concepto de valor instantáneo

El **valor instantáneo**, como su nombre lo indica, es el valor de voltaje o corriente que tiene la onda en cualquier instante de tiempo. Este valor, que designaremos como ***v*** o ***i*** (en minúsculas), es proporcional al seno del ángulo correspondiente al instante considerado. Esto es:

$$v = V_M \text{ sen } \theta$$

$$i = I_M \text{ sen } \theta$$

siendo θ (leáse theta) el ángulo y V_M o I_M la amplitud o valor máximo de la onda. Por ejemplo, si el valor máximo de un voltaje senoidal es 170V, su valor instantáneo para un ángulo θ de 30° (π/6) es:

$$v = V_M \text{ sen } \theta$$
$$v = 170 \text{ sen } 30º \text{ V}$$
$$v = 170 \times 0{,}5 \text{ V}$$
$$v = 85 \text{ V}$$

Concepto de valor pico y de valor pico a pico

El **valor pico**, que designaremos como I_p o V_p, es el máximo valor positivo o negativo que alcanza la onda. En el ejemplo anterior, la onda tiene un valor pico positivo de +170V y un valor pico negativo de -170V. La magnitud absoluta del valor pico se conoce también como **amplitud**. En nuestro caso, la amplitud de la onda (V_M) es simplemente 170 V. En general, para una onda seno pura, la magnitud del valor pico positivo es igual a la del valor pico negativo. Sin embargo, éste no es el caso general, **figura 6.13**.

El **valor pico a pico**, que designaremos como I_{pp} o V_{pp}, es la amplitud neta de la onda desde el pico positivo hasta el pico negativo. En otras palabras, es la suma de los valores pico absolutos. En nuestro caso, la onda tiene un valor pico a pico de 170V+170V, es decir 340V. En general, para una onda seno pura, el valor pico a pico es siempre el doble del valor pico. Lo mismo sucede con otras formas de onda, pero no es el caso general.

Concepto de valor promedio

El **valor promedio**, que designaremos como I_{av} o V_{av}, es el promedio artimético de todos los valores instantáneos que tiene una onda durante un semiciclo. En el caso de una onda seno pura, el valor promedio está dado por:

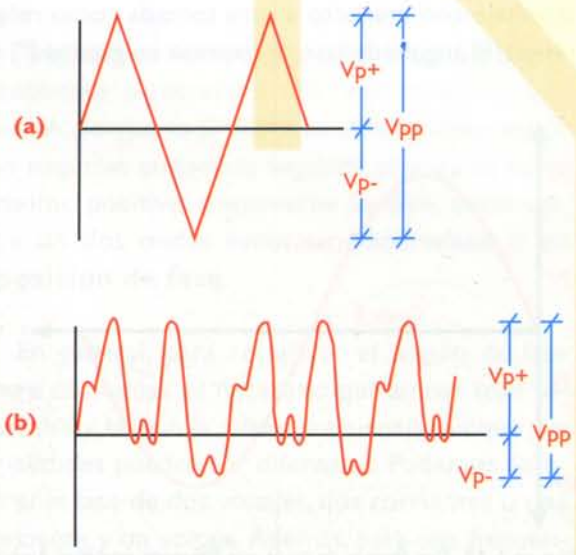


Figura 6.13. Formas de onda alterna no senoidales que tienen valores pico iguales (a) y diferentes (b)

$$\text{Valor promedio} = 0{,}637 \times \text{valor pico}$$
$$V_{av} = 0{,}637 V_p$$

En nuestro caso, la onda tiene un valor pico de 170V. Por tanto, su valor promedio es 0,637x170 V, es decir 108,29 V.

Concepto de valor efectivo o rms. Definición de factor de forma

El **valor efectivo, eficaz o rms** de una onda seno, que designaremos como V_{rms} o I_{rms}, o simplemente como **V** o **I** (en mayúsculas), es el valor de voltaje o corriente continua (CC) que produce sobre una resistencia la misma disipación de potencia que la onda. Se obtiene extrayendo la raíz cuadrada del promedio de los cuadrados de todos los valores instantáneos que adopta la onda durante un ciclo, de donde se deriva el nombre de **rms** (*root-mean-square*: raíz media cuadrática). En el caso de una onda seno pura, el valor rms o efectivo está dado por:

$$\text{Valor rms} = 0{,}707 \times \text{valor pico}$$
$$V_{rms} = 0{,}707 \times V_p = \frac{V_p}{\sqrt{2}}$$
$$I_{rms} = 0{,}707 \times I_p = \frac{I_p}{\sqrt{2}}$$

En nuestro caso, la onda de CA tiene un valor pico de 170V. Por tanto, su valor efectivo o rms es 0,707 x 170 V, es decir 120V, aproximadamente. Esto significa que cuando la onda de CA alimenta una resistencia, produce en ella la misma disipación de potencia que un voltaje de CC de 120 V. Este concepto se ilustra en la **figura 6.14**.

En este caso, la carga, representada por una resistencia de 96Ω, se alimenta primero con una fuente de voltaje CA de 120V rms, produciéndose una corriente de 1,25 A rms, **figura 6.14b**. A continuación, la misma carga se alimenta desde una fuente de voltaje de CC en serie con una resistencia variable, **figura 6.14c**. Esta última se ajusta entonces hasta que la lectura en el amperímetro sea también de 1,25 A. Bajo

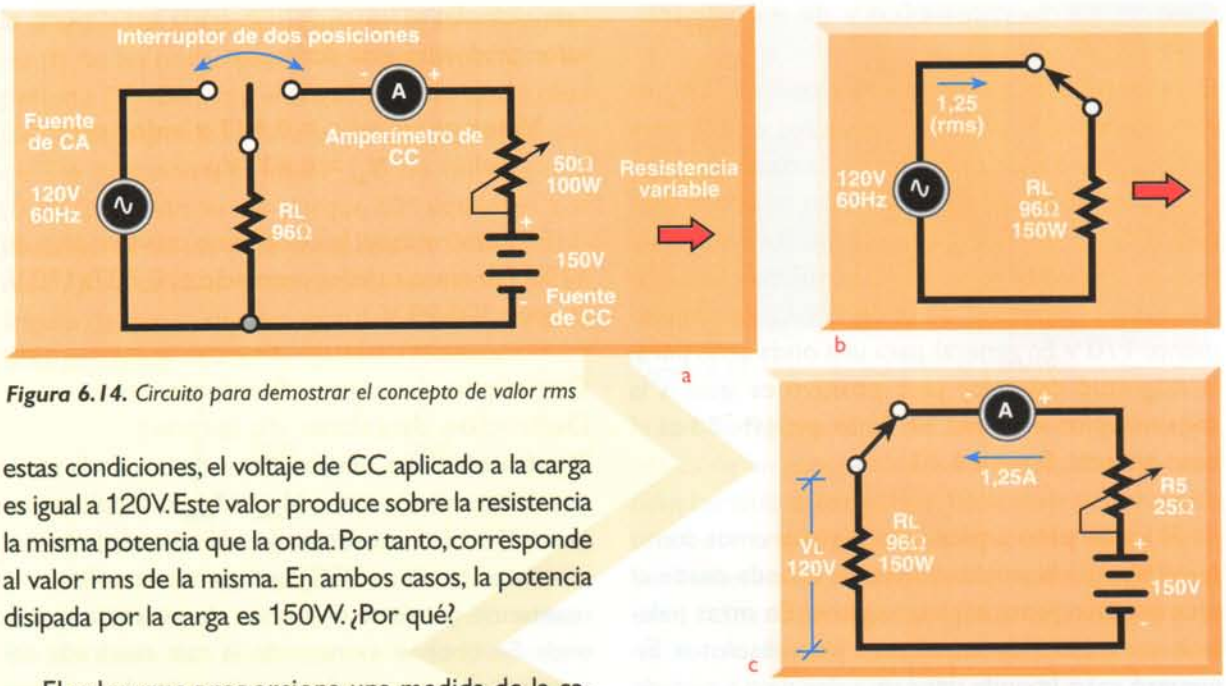


Figura 6.14. *Circuito para demostrar el concepto de valor rms*

estas condiciones, el voltaje de CC aplicado a la carga es igual a 120V. Este valor produce sobre la resistencia la misma potencia que la onda. Por tanto, corresponde al valor rms de la misma. En ambos casos, la potencia disipada por la carga es 150W. ¿Por qué?

El valor rms proporciona una medida de la capacidad de una forma de onda cualquiera de voltaje o de corriente para producir potencia. Por esta razón, la magnitud de los voltajes y las corrientes alternas senoidales se especifica comúnmente utilizando valores rms. Además, al expresar estas cantidades en valores rms, los circuitos de corriente alterna pueden ser analizados mediante las mismas técnicas empleadas para analizar circuitos de corriente continua. Por otra parte, la lectura de los instrumentos que miden voltajes y corrientes alternas está calibrada en términos de valores rms.

En general, siempre que se diga que un voltaje o una corriente alterna tiene un valor determinado, digamos 12V o 3A, se sobreentiende que se trata del valor rms, a menos que se especifique otra cosa. Para indicar valores rms utilizaremos siempre letras mayúsculas, por ejemplo I, V, I_2, V_3, etc.

La relación entre el valor rms y el valor promedio de una forma de onda cualquiera se denomina **factor de forma (FF)**. En el caso de una onda seno pura, el factor de forma está dado por:

factor de forma = valor rms ÷ valor promedio

$$FF = \frac{V_{rms}}{V_{av}} = \frac{0{,}707V_p}{0{,}37V_p} = 1{,}11$$

Por tanto, cualquier corriente o voltaje alterno senoidal tiene un factor de forma de **1,11**. En la **figura 6.15** se ilustra este concepto. Aquí, las ondas A y B son de amplitudes diferentes, pero tienen el mismo factor de forma por ser ambas senoidales.

Concepto de ángulo de fase. Relaciones de tiempo de ondas seno

El **ángulo de fase** se refiere al atraso o adelanto que experimenta una onda senoidal de corriente o voltaje con respecto a otra tomada como referencia. El ángulo de fase se expresa en grados (°) o

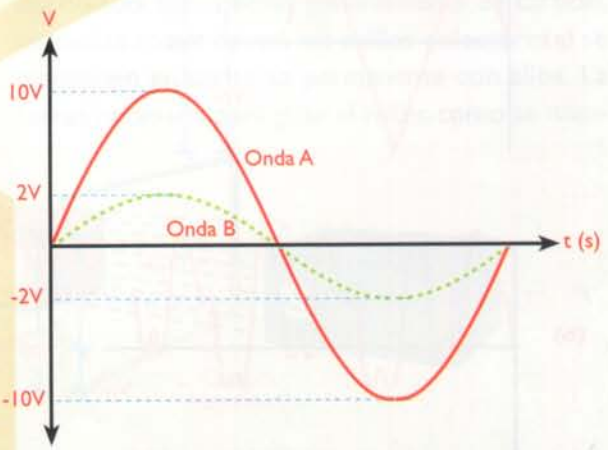


Figura 6.15. *Dos formas de onda con diferente amplitud. Ambas son ondas seno y tienen el mismo factor de forma. Además, son de la misma frecuencia y están en fase*

radianes (rad) y puede adoptar cualquier valor entre 0° (0 rad) y 180° (π rad). En la **figura 6.16** se muestran algunos ejemplos. El concepto de ángulo de fase es muy importante para el ánalisis y diseño de circuitos eléctricos y electrónicos.

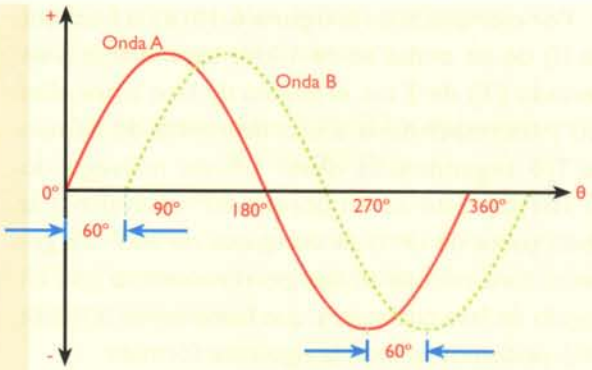
En la **figura 6.16a**, por ejemplo, la onda B está retrasada 60° con respecto a la onda A, porque la primera alcanza su valor máximo, positivo o negativo, 60° después que la segunda. En otras palabras, el ángulo de fase entre las dos señales es de 60°. Note que si se toma la onda B como referencia, entonces la onda A estaría adelantada 60°. ¿Por qué?

En la **figura 6.16b**, la onda B está adelantada 90° con respecto a la onda A porque la primera alcanza su valor máximo positivo o negativo cuando la segunda es cero, y viceversa. Se dice, entonces, que las dos ondas están en **cuadratura de fase**. Note que si se toma la onda B como referencia, entonces la onda A estaría retrasada 90° ¿Por qué?

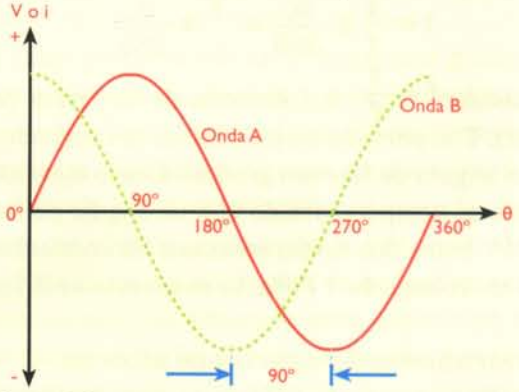
En la **figura 6.16c**, la onda B no está adelantada ni retrasada con respecto a la onda A, tomada como referencia, porque ambas alcanzan su valor máximo, positivo o negativo, al mismo tiempo. Se dice, entonces, que las dos ondas están **en fase**, es decir su ángulo de fase es 0°.

Finalmente, en la **figura 6.16d**, la onda B está adelantada o retrasada 180° con respecto a la onda A, porque la primera alcanza su valor máximo negativo cuando la segunda alcanza su valor máximo positivo, y viceversa. Se dice, entonces, que las dos ondas están en **contrafase** o en **oposición de fase**.

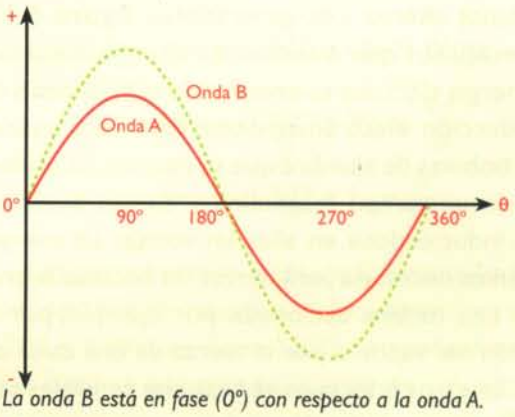
En general, para comparar el ángulo de fase entre dos ondas, es necesario que ambas sean senoidales y tengan la misma frecuencia, aunque sus amplitudes pueden ser diferentes. Podemos comparar la fase de dos voltajes, dos corrientes o una corriente y un voltaje. Además, para una frecuencia dada, el ángulo de fase corresponde a una diferencia específica de tiempo.



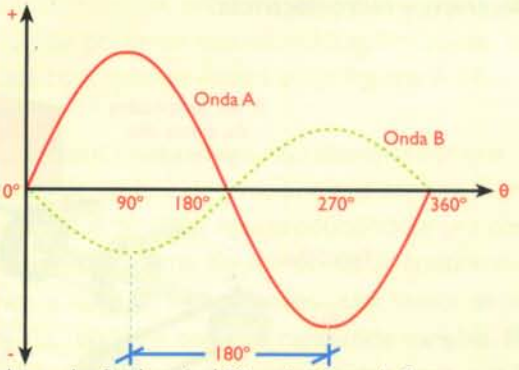
a. La onda B está retrasada 60° con respecto a la onda A..



b. La onda B está en cuadratura o adelantada 90° con respecto a la onda A.



c. La onda B está en fase (0°) con respecto a la onda A.



d. Las ondas B y A están 180 grados fuera de fase.

***Figura 6.16.** Ejemplos de ángulos de fase entre dos ondas seno*

Por ejemplo, si en la **figura 6.16(a)** la frecuencia (**f**) de las ondas es de 1 kHz, equivalente a un período (**T**) de 1 ms, el ángulo de fase entre ellas (60°) correspondería a una diferencia de tiempo de T/6 segundos, es decir 1/6 de milisegundo (0,167µs). Esto es así porque 60° equivalen a la sexta parte de un ciclo completo de 360°. En general, para calcular el tiempo (**t**) asociado con un ángulo de fase cualquiera, que llamaremos α (leáse alfa), podemos utilizar la siguiente fórmula:

$$t = \frac{1}{f} \times \frac{\alpha}{360} = T \times \frac{\alpha}{360}$$

siendo $f = \frac{1}{T}$ la frecuencia de las ondas (en hertz), **T** el período de las mismas (en segundos) y α el ángulo de fase (en grados). Como ejercicio, calcule el tiempo asociado con un ángulo de fase de 36° entre dos ondas seno, una de corriente y otra de voltaje, de 1 MHz. La respuesta es 0,1µs.

Generadores de corriente alterna

Actualmente, más del 95% de la energía eléctrica mundial se suministra mediante **generadores** de corriente alterna. Los generadores, **figura 6.17**, son máquinas que transforman energía mecánica en energía eléctrica aprovechando el fenómeno de la inducción electromagnética. Para ello, utilizan unas bobinas de alambre que se mueven en el interior de un campo magnético y cortan líneas de flujo, induciéndose en ellas un voltaje. La energía mecánica necesaria para mover las bobinas la produce una turbina accionada, por ejemplo, por la presión del vapor o por la fuerza de una caída de agua. En estos principios se basan las centrales termoeléctricas e hidroeléctricas.

Figura 6.17. *Alternador industrial de 300MW*

En la **figura 6.18** se muestra la estructura básica de un generador de corriente alterna, también llamado **alternador**. Básicamente consta de una bobina que gira entre los polos de un imán permanente. La bobina se denomina **inducido** y está colocada sobre un cilindro, generalmente de hierro, llamado **armadura**. El conjunto formado por el inducido y la armadura se conoce como **rotor**, porque es el elemento rotatorio de la máquina. Los imanes, encargados de producir el campo magnético, constituyen el **estator** o parte estacionaria. Los extremos de la bobina están conectados a un par de **anillos colectores**, que constituyen los terminales de salida primarios del generador.

Los anillos colectores están aislados entre sí y del eje de la armadura, sobre el cual giran. Por esta razón, para llevar el voltaje de salida del generador hacia el mundo externo, se necesitan un par de **escobillas** fijas, hechas generalmente de carbón, las cuales rozan contra los anillos colectores y se mantienen en contacto permanente con ellos. La fuerza necesaria para girar el rotor, como se men-

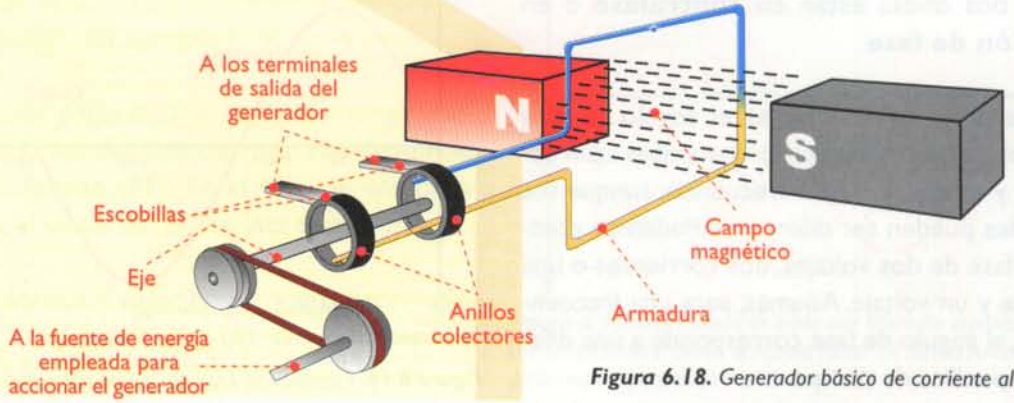


Figura 6.18. *Generador básico de corriente alterna*

cionó anteriormente, la proporciona un agente externo. El valor instantáneo del voltaje de salida depende básicamente de tres factores:

1. La **densidad** o cantidad de líneas de flujo por unidad de área del campo magnético a través del cual se mueve la bobina.
2. La velocidad de rotación de la bobina.
3. El ángulo con el cual la bobina corta las líneas de flujo.

En general, entre mayor sea la densidad de flujo o la velocidad de movimiento, mayor será el valor del voltaje inducido, y viceversa. En cualquier caso, el voltaje de salida es máximo cuando el ángulo de corte es de 90° y mínimo cuando es de 0°

Cada giro completo de 360° de la bobina produce un ciclo completo de 360° del voltaje de salida, el cual tiene una forma de onda senoidal. En la secuencia de las **figuras 6.19** hasta la **6.23** se ilustra como sucede esto.

En la posición 1, **figura 6.19**, el plano o área transversal de la bobina es perpendicular a la dirección del campo magnético y por tanto no corta líneas de flujo. Como resultado, el voltaje de salida es 0. Esto se debe a que el ángulo entre la dirección del campo y la dirección del movimiento de la bobina (conductor oscuro) es 0°.

A medida que la bobina se desplaza desde la posición 1 hasta la posición 2, **figura 6.20**, el ángulo entre la dirección de movimiento de la misma y la dirección del campo aumenta desde 0° hasta 90°, cortando cada vez más líneas de flujo por segundo. Como resultado, el voltaje de salida aumenta desde 0V hasta su valor máximo positivo. Este último se alcanza cuando la dirección del campo es paralela al plano de la bobina, es decir forma un ángulo de 90° con la dirección de movimiento de la misma. Hasta aquí tenemos un cuarto de ciclo.

A medida que la bobina se desplaza desde la posición 2 hasta la posición 3, **figura 6.21**, el ángulo entre la dirección de movimiento de la misma y la dirección del campo disminuye desde 90° hasta 0°, cortando cada vez menos líneas de flujo por segundo. Como resultado, el voltaje de salida disminuye desde su valor máximo positivo hasta 0V. Este último valor se alcanza cuando la dirección del campo es perpendicular al plano de la bobina, es decir forma un ángulo

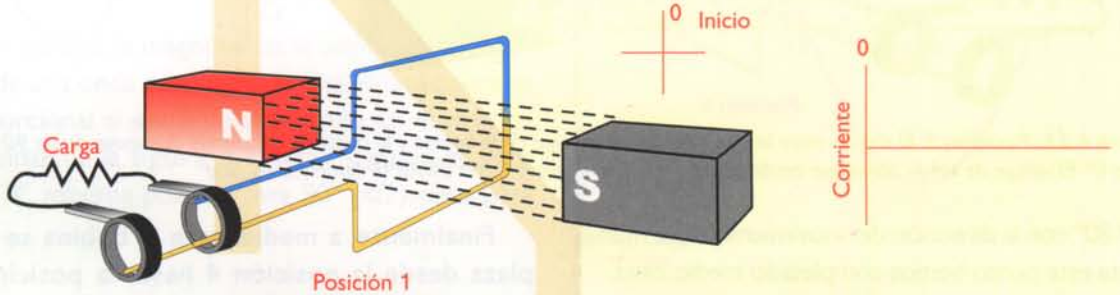


***Figura 6.19. Posición 1** (inicial) para analizar el funcionamiento del generador básico de CA. El ángulo entre la dirección de movimiento de la bobina y la dirección del campo es 0°. El voltaje de salida es 0*

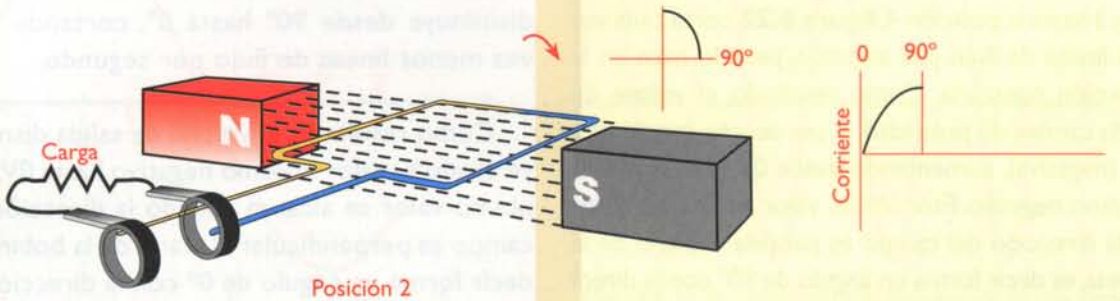


***Figura 6.20. Posición 2**. El ángulo entre la dirección de movimiento de la bobina y la dirección del campo aumenta desde 0° hasta 90°. El voltaje de salida varía desde 0V hasta su valor máximo positivo*

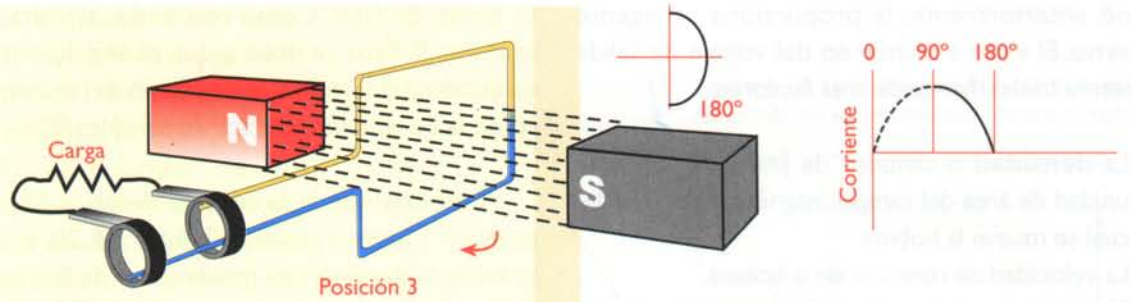


***Figura 6.21. Posición 3**. El ángulo entre la dirección del movimiento de la bobina y la dirección del campo disminuye desde 90° hasta 0°. El voltaje de salida disminuye desde su valor máximo positivo hasta 0V*

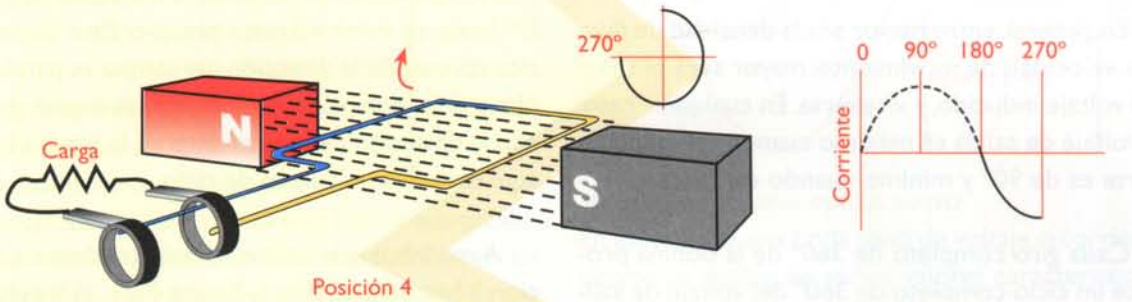


***Figura 6.22. Posición 4**. El ángulo entre la dirección de movimiento de la bobina y la dirección del campo aumenta desde 0° hasta 90°, pero el corte de las líneas de fuerza se efectúa en sentido contrario. El voltaje de salida cambia de polaridad, aumentando desde 0V hasta su valor máximo negativo*

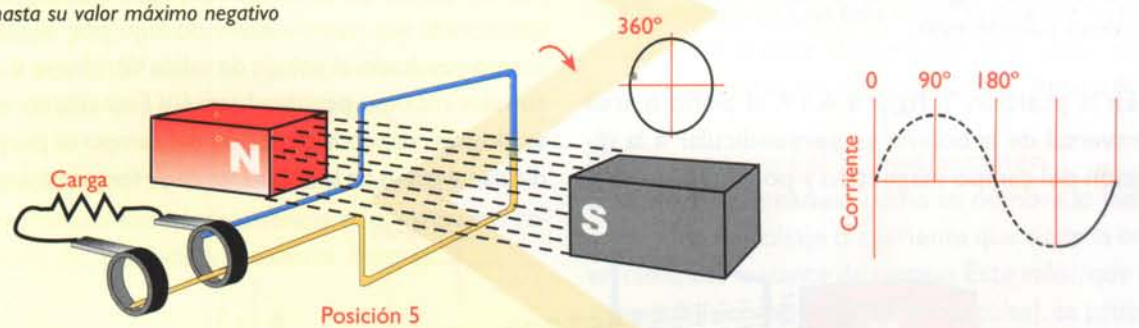


***Figura 6.23. Posición 5**. El ángulo entre la dirección de movimiento de la bobina y la dirección del campo disminuye desde 90° hasta 0°. El voltaje de salida disminuye desde su valor máximo negativo hasta 0V. Así se completa un ciclo*

de 180° con la dirección del movimiento de la misma. Hasta este punto hemos completado medio ciclo.

A medida que la bobina se desplaza desde la posición 3 hasta la posición 4, **figura 6.22**, corta cada vez más líneas de flujo por segundo, pero lo hace en la dirección contraria. Como resultado, el voltaje de salida cambia de polaridad, o sea de «+» (positiva) a «-» (negativa), aumentando desde 0V hasta su valor máximo negativo. Este último valor se alcanza cuando la dirección del campo es paralela al plano de la bobina, es decir forma un ángulo de 90° con la dirección del movimiento de la misma. Hasta aquí, se han completado tres cuartos de ciclo de la onda.

Finalmente, a medida que la bobina se desplaza desde la posición 4 hasta la posición 5, **figura 6.23**, el ángulo entre la dirección de movimiento de la misma y la dirección del campo disminuye desde 90° hasta 0°, cortando cada vez menos líneas de flujo por segundo.

Como resultado, el voltaje de salida disminuye desde su valor máximo negativo hasta 0V. Este último valor se alcanza cuando la dirección del campo es perpendicular al plano de la bobina, es decir forma un ángulo de 0° con la dirección de movimiento de la misma. Hasta este punto hemos completado un ciclo. El proceso se repite.

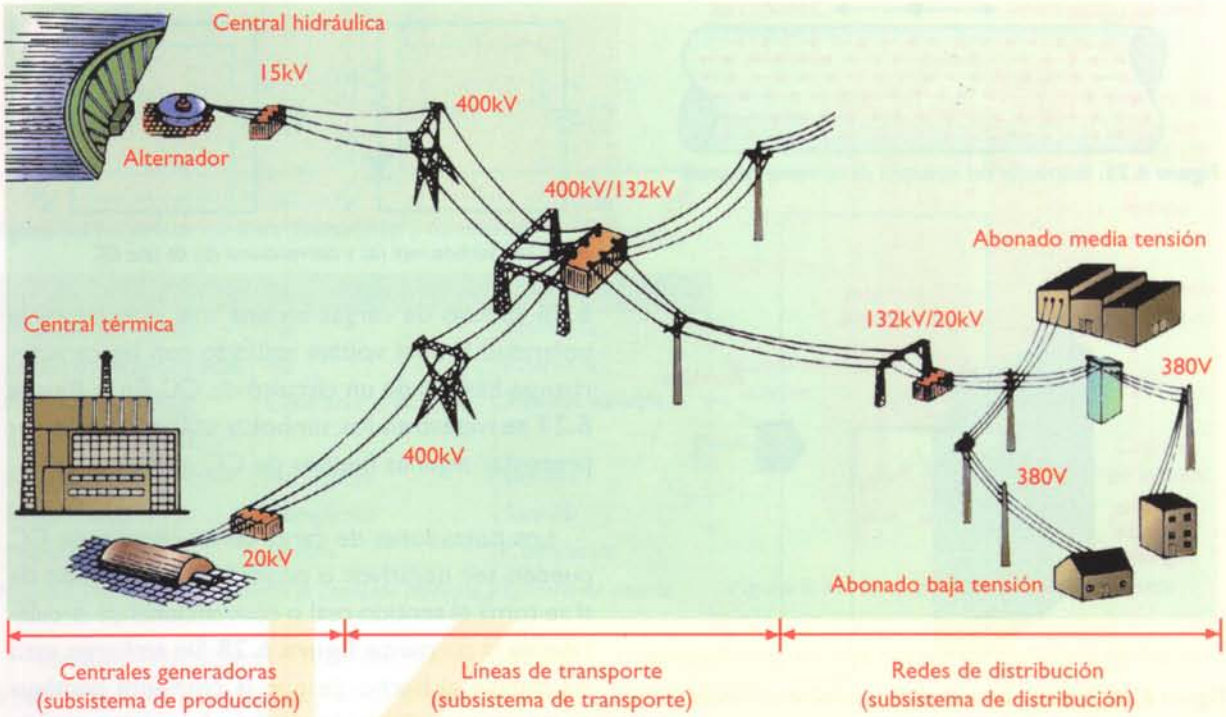


Figura 6.24. *Estructura típica de un sistema de generación, transporte y distribución de corriente alterna en un país*

En la práctica, el voltaje inducido en una sola espira de alambre es muy pequeño. Por esta razón, para producir voltajes razonables, se utilizan una gran cantidad de espiras conectadas en serie. Estas espiras se dividen físicamente entre varias bobinas, las cuales se colocan en ranuras distribuidas a lo largo de la superficie del rotor. Además, en lugar de un solo par de polos magnéticos se utilizan varios pares. De este modo, durante un giro completo del rotor no se produce un solo ciclo sino muchos ciclos. Estos polos pueden ser también producidos por electroimanes, llamados **devanados** o **bobinas de campo**.

También se dispone de **alternadores de campo rotatorio**, en los cuales las bobinas del inducido o armadura están alojadas en el estator, permaneciendo estacionarias, mientras que las bobinas de campo están en el rotor, enrolladas alrededor de piezas polares y conectadas a los anillos colectores. De este modo se crea un campo magnético rotatorio, el cual induce un voltaje alterno en las bobinas del estator. Este tipo de generadores se utilizan principalmente en las grandes centrales generadoras de energía eléctrica.

En cualquier caso, la frecuencia del voltaje de salida producido por un alternador depende de la velocidad de giro del rotor y del número de polos magnéticos creados por las bobinas de campo. El valor rms del voltaje de salida, por su parte, depende principalmente de la velocidad del rotor, del número de bobinas de la armadura y de la intensidad del campo magnético producido por los devanados de campo.

En las centrales generadoras de energía eléctrica de los Estados Unidos de América y otros países del mundo, incluída Colombia, la frecuencia del voltaje de salida de los alternadores ha sido normalizada en 60Hz; mientras que en Europa y otra gran parte del resto del mundo, incluída Argentina, el valor estándar de la misma es 50 Hz. Los generadores de propósito especial, como los utilizados en los aviones, pueden tener una frecuencia diferente, digamos 400 Hz.

El valor rms del voltaje de salida entregado por las centrales de generación alcanza valores de varios miles de voltios, digamos 15 ó 20 kV. Mediante el uso de transformadores, este voltaje se convierte a un valor mucho más alto, por ejemplo 400kV, para llevarlo hasta las llamadas **subestaciones de trans-**

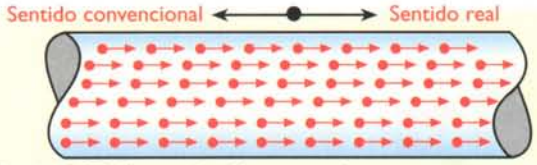


Figura 6.25. *Ilustración del concepto de corriente continua*

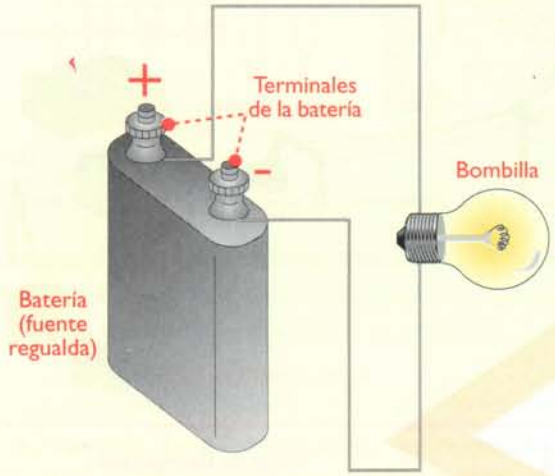


Figura 6.26. *Ejemplo de un circuito de corriente continua*

formación, desde donde parten las redes eléctricas de distribución pública, encargadas de repartir y hacer llegar la energía eléctrica a todos los abonados o usuarios. Así es como llega la corriente alterna a su hogar o sitio de trabajo, **figura 6.24**.

Segunda parte. Corriente continua

Una **corriente continua** (CC), en general, es un flujo de portadores de carga (electrones) en una misma dirección, **figura 6.25**. Para impulsar una corriente continua, a través de un circuito, se necesita una fuente de voltaje cuya polaridad no cambie con el tiempo, por ejemplo una batería, **figura**

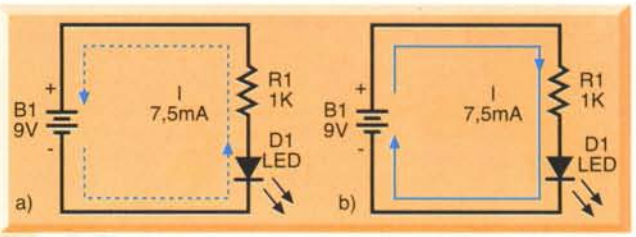


Figura 6.28. *Sentido real (a) y convencional (b) de una CC*

6.26. El flujo de cargas en una sola dirección y la polaridad fija del voltaje aplicado son las características básicas de un circuito de CC. En la **figura 6.27** se muestran los símbolos utilizados para representar algunas fuentes de CC comunes.

Los portadores de carga en un circuito de CC pueden ser negativos o positivos, dependiendo de si se toma el sentido real o convencional de circulación de la corriente, **figura 6.28**. Sin embargo, esto no cambia el hecho de que la corriente continua tiene una sola dirección de flujo. Lo mismo sucede si el voltaje entregado por la fuente permanece constante o cambia de valor, pero mantiene siempre su misma polaridad, **figura 6.29**. La tabla de la **figura 6.30** compara algunas características importantes de una corriente continua y una corriente alterna.

Formas de producir una CC

La fuerza necesaria para causar que fluya una corriente continua, a través de un circuito, puede ser suministrada por diversos tipos de fuentes. Las más conocidas son las **pilas y las baterías**, **figura 6.31**, las cuales producen una fuerza electromotriz (fem) debido a reacciones químicas que ocurren en su interior. Las baterías se examinan en detalle en la sección **Componentes** de este curso.

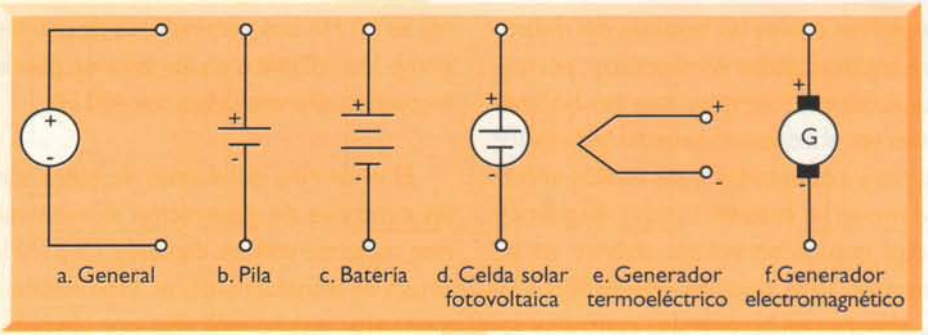


Figura 6.27. *Símbolos comunes de algunas fuentes de voltaje de CC*

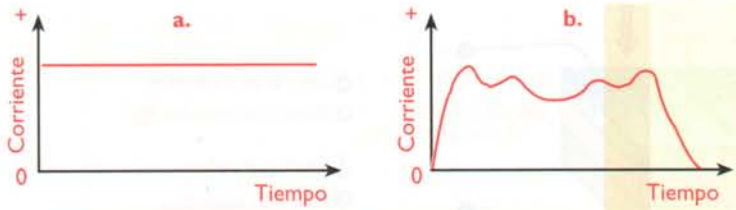


Figura 6.29. *Corriente continua constante (a) y variable (b).*

	Corriente continua	Corriente alterna
Polaridad del voltaje	Fija	Alternada
Dirección de la corriente	Fija	Alternada
Magnitud del voltaje	Constante o variable	Siempre variable
Aumento o disminución mediante transformador	No factible	Factible
Amplificación	Complicada	Sencilla
Medición	Sencilla	Complicada

Figura 6.30. *Comparación entre la corriente continua y la corriente alterna*

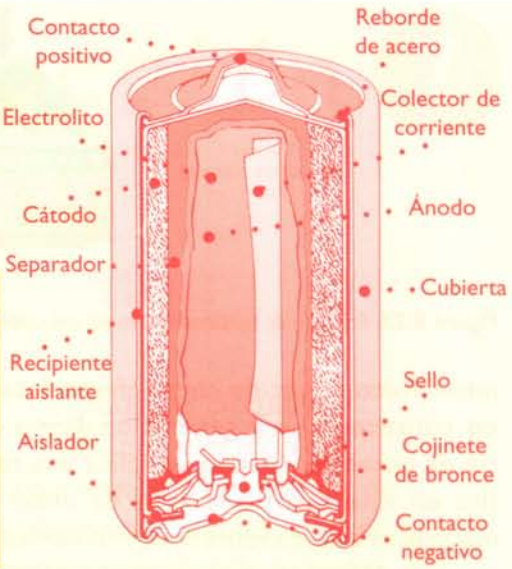


Figura 6.31. *Estructura interna de una pila seca*

También es posible producir corriente continua a partir de corriente alterna y otras formas de energía, como magnetismo, movimiento, calor, luz, etc. En estos principios se basan, por ejemplo, las fuentes de alimentación, los generadores electromagnéticos, las celdas solares, las celdas de combustible y los generadores termoeléctricos.

Las **fuentes de alimentación**, en particular, que se examinan en detalle en la siguiente lección de este curso, son realmente convertidores electrónicos que producen corriente continua (CC) a partir de corriente alterna (CA). Esta última es generalmente suministrada por la red de distribución pública de 120V o 220V, pero puede ser también proporcionada por un alternador, como sucede en un automóvil. El proceso de conversión de una corriente alterna en una corriente continua se denomina **rectificación**.

Los **generadores de CC, figura 6.32**, operan en forma similar a los generadores de CA, excepto que los extremos de la bobina o bobinas, que constituyen la armadura, están conectados a un **conmutador**. Este último es simplemente un anillo formado por unas piezas metálicas llamadas **segmentos**, las cuales están aisladas eléctricamente entre sí y del eje sobre el cual se montan.

Las **celdas solares, figura 6.33**, son dispositivos que producen un voltaje de CC cuando son iluminadas mediante luz solar. Las mismas dependen para su funcionamiento de un fenó-

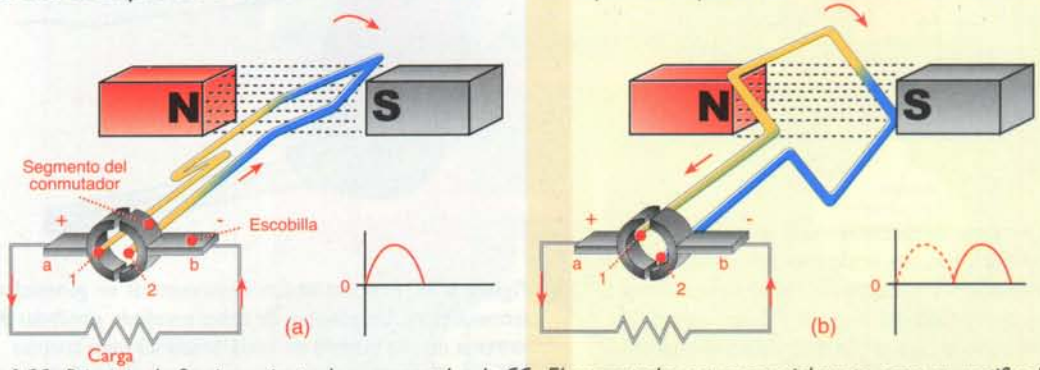


Figura 6.32. *Principio de funcionamiento de un generador de CC. El conmutador actua esencialmente como un rectificador. En (a), el segmento 1 del conmutador esta en contacto con la escobilla "a" y el segmento 2 lo está con la escobilla "(b)". En (b), la situación se invierte. Por tanto, las escobillas "a" y "b" tienen una polaridad constante*

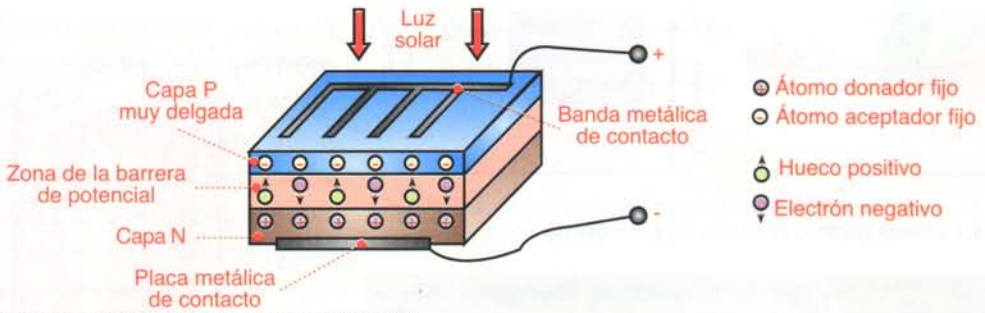


Figura 6.33. *Principio de funcionamiento de una celda solar*

meno físico conocido como efecto **fotovoltaico**, consistente en la generación de una diferencia de potencial cuando se aplica una radiación (luz en este caso) a la zona de unión de dos materiales semiconductores, uno llamado P, que tiene un déficit de electrones, y otro llamado N, que tiene un exceso de ellos.

Las **celdas de combustible**, **figura 6.34**, al igual que las baterías convencionales, generan un voltaje de CC por reacciones químicas. Asimismo, tienen un ánodo, un cátodo y un electrolito, así como un terminal positivo y uno negativo. La diferencia radica en que no necesitan ser recargadas porque se alimentan de una inyección continua de combustible, generalmente hidrógeno, metano, o aire. Además, sus electrodos (ánodo y cátodo) no se desgastan y tienen una vida útil prácticamente ilimitada.

Los **generadores termoeléctricos**, **figura 6.35**, son dispositivos que producen un voltaje de CC cuando se calientan. Los mismos dependen para su funcionamiento de un fenómeno físico conocido como **efecto Seebeck**, descubierto en 1822 por Thomas J. Seebeck, el cual establece que, si se calienta la unión de dos metales diferentes y homogéneos, aparece entonces una fuerza termoelectromotriz (ftem) entre sus terminales. En este principio se basan las llamadas **termocuplas**, utilizadas para la medición de temperatura en la industria.

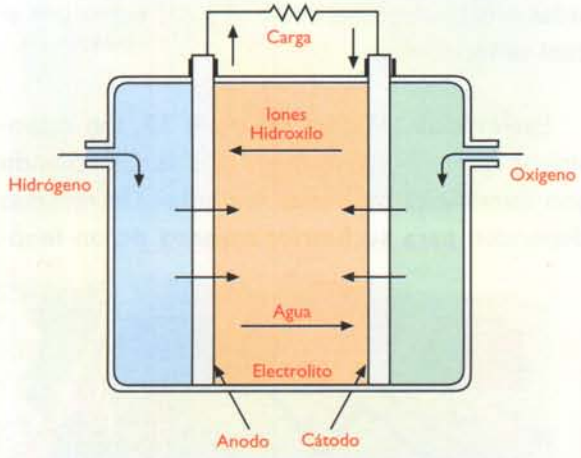


Figura 6.34. *Principio de funcionamiento de una celda de combustible. El hidrógeno, que actúa como combustible líquido o gaseoso, se distribuye por el electrolito, obligándolo a liberar electrones que se depositan en el ánodo y fluyen a través del circuito externo hacia el cátodo . En este último, el oxígeno reacciona con el agua del electrolito y los electrones del circuito externo para formar iones, los cuales, al reaccionar con el hidrógeno, producen agua como subproducto.*

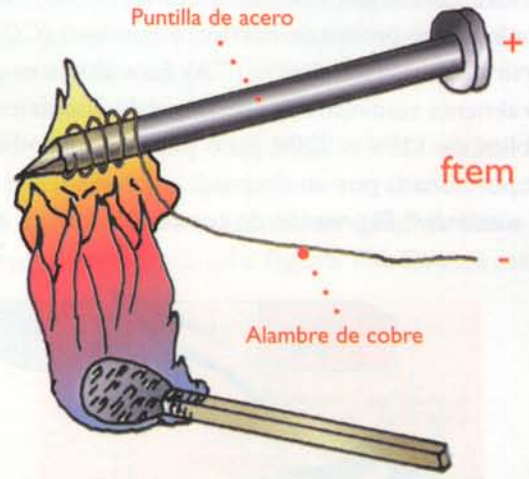
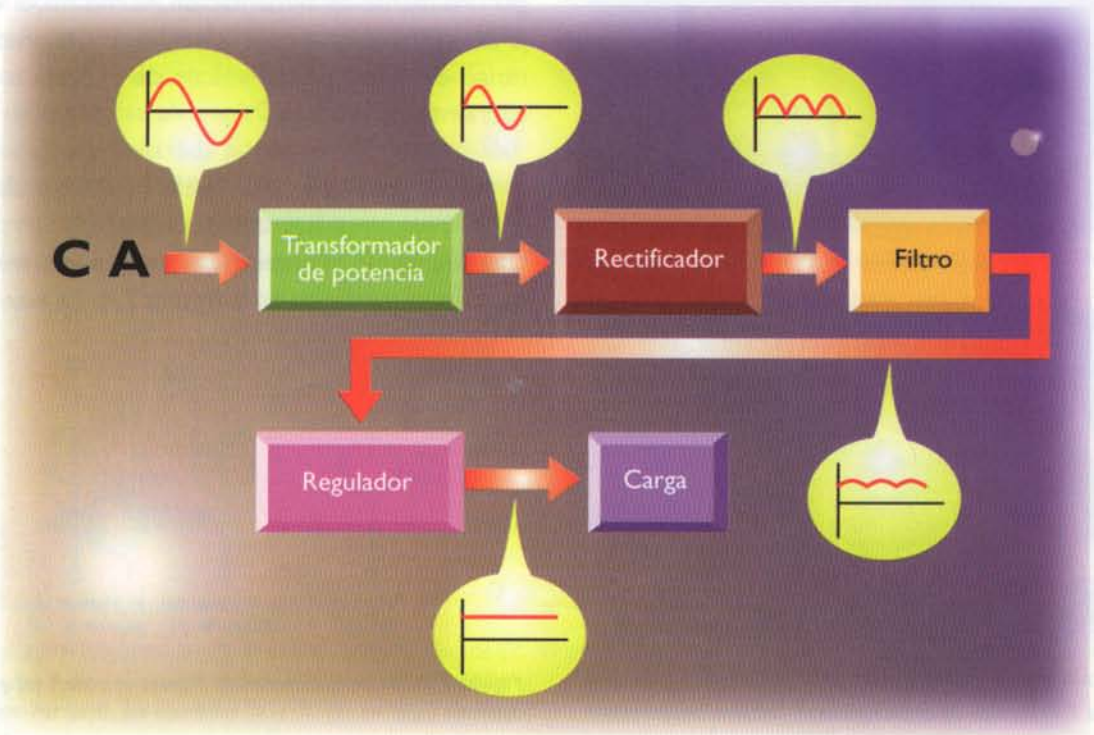


Figura 6.35. *Principio de funcionamiento de un generador termoeléctrico. Un alambre de cobre enrollado alrededor de un extremo de una puntilla de acero producirá unos cuantos milivoltios cuando se calienta con la llama de un fósforo. Las uniones como el hierro y el constantán (aleación de cobre y zinc) producen voltajes mucho más altos.*

Lección 7

Las fuentes de alimentación

Todos los circuitos y equipos electrónicos requieren de una fuente de alimentación para operar correctamente. Si falla la fuente, falla todo el equipo. En esta lección examinaremos el funcionamiento de algunas de las configuraciones de fuentes de alimentación más comúnmente utilizadas en la práctica.



Introducción

La mayor parte de los circuitos electrónicos prácticos trabajan a partir de un voltaje de alimentación de CC. Este último puede ser suministrado, por ejemplo, por una batería. Las baterías ofrecen varias ventajas, siendo la más importante su naturaleza portátil. Sin embargo, existen situaciones en las cuales el uso de baterías puede resultar muy costoso. En estos casos, debe recurrirse al uso de **fuentes de alimentación**, las cuales operan desde la red pública de CA y proporcionan voltajes de CC más económicos, estables y potentes, **figura 7.1**.

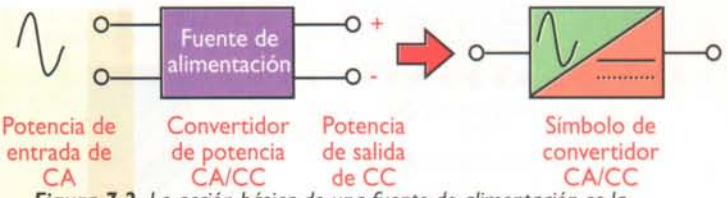


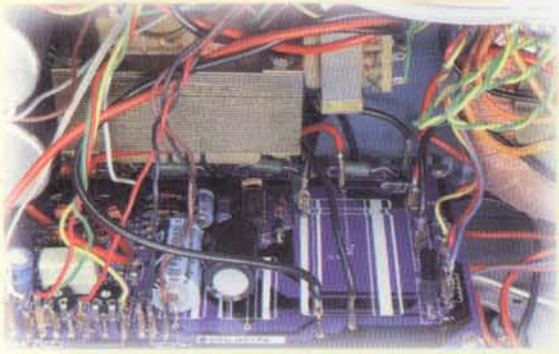
Figura 7.2. *La acción básica de una fuente de alimentación es la conversión de CA en CC*

Una **fuente de alimentación** es esencialmente un convertidor de potencia de CA en potencia de CC, **figura 7.2**. Esto significa que reciben en su entrada una corriente o un voltaje de CA y lo transforman, mediante procesos electrónicos, en una corriente o un voltaje de CC en su salida. La potencia de CA de entrada proviene generalmente de la red pública de 120V o 220V, mientras que la potencia de CC de salida alimenta la carga, donde se convierte en calor, movimiento, luz, señales eléctricas, etc.

La mayor parte de las fuentes de alimentación utilizadas en los circuitos electrónicos son **fuentes de voltaje**, lo cual significa que proporcionan en su salida un voltaje de CC, constante o variable. También existen **fuentes de corriente**, pero su uso se limita a situaciones muy especiales, **figura 7.3**. En esta lección nos referiremos exclusivamente a las fuentes de alimentación que operan como fuentes de voltaje.

Idealmente, una fuente de alimentación debería entregar en su salida un voltaje de CC constante, independiente de las variaciones del voltaje de CA de entrada y de la cantidad de corriente exigida por la carga. En la práctica siempre hay un límite a la máxima cantidad de corriente que puede entregar una fuente de alimentación. Asimismo, el voltaje de salida sólo es constante dentro de un cierto rango de variación del voltaje de entrada o de la corriente de la carga.

a. Equipos alimentados por baterías



b. Equipo alimentado por una fuente de poder

Figura 7.1. *Formas de alimentación de circuitos electrónicos*

Estructura de una fuente de alimentación

Una fuente de alimentación, en general, tiene la estructura mostrada en la **figura 7.4.** En este caso,

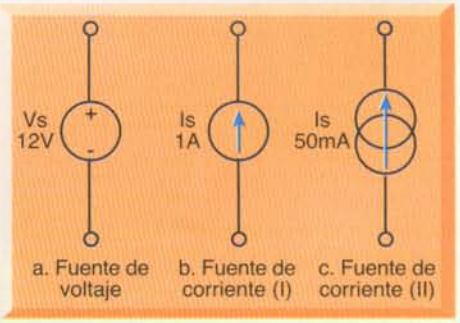


Figura 7.3. *Simbolos comunes de fuentes de voltaje (a) y de corriente (b, c)*

Figura 7.4. Estructura típica de una fuente de alimentación. El regulador es característico de las fuentes reguladas

el voltaje de CA de entrada, proveniente de la red pública, se aplica a un **transformador**, el cual se encarga de reducir su valor, por ejemplo, de 120V a 12V para adaptarlo a las necesidades de la carga, **figura 7.5**. Por tanto, el transformador actúa como un convertidor CA/CA. Algunas fuentes pueden operar directamente desde la red de CA, sin necesidad de un transformador, pero éste no es el caso general, ni el más seguro.

El voltaje de CA, obtenido a la salida del transformador, alimenta entonces un circuito **rectificador**, el cual se encarga de convertirlo en un voltaje de CC **pulsante, figura 7.6**. Este último, aunque ya tiene una polaridad +/- definida, presenta notables variaciones de amplitud, las cuales deben ser filtradas para conseguir un voltaje de CC **uniforme, figura 7.7**. Esta función la hace un **filtro**, conformado generalmente por uno o más condensadores.

El voltaje de salida del filtro puede aplicarse a la carga en forma directa o a través de un **regulador**. Este último es un circuito electrónico que se encarga de mantener constante el voltaje sobre la carga, independientemente de las variaciones en el voltaje de entrada o de la corriente demandada por la carga. Las fuentes provistas de regulador se denominan **fuentes reguladas**.

El elemento final de cualquier fuente de alimentación es la **carga**, es decir el componente o circuito que recibe la potencia de CC. En un televisor, por ejemplo, la carga de la fuente principal puede estar representada por los circuitos electrónicos que procesan la señal recibida en la antena y la convierten en una imagen en la pantalla. En otras aplicaciones la carga puede ser un motor, una bombilla, una batería recargable, etc.

Tipos de fuentes de alimentación

Las fuentes de alimentación pueden ser **reguladas** y **no reguladas**, dependiendo de si utilizan o no un elemento o circuito regulador de voltaje como parte de su estructura, **figura 7.8**. En esta lección examinaremos las características ge-

Figura 7.5. Acción básica del transformador en una fuente de alimentación

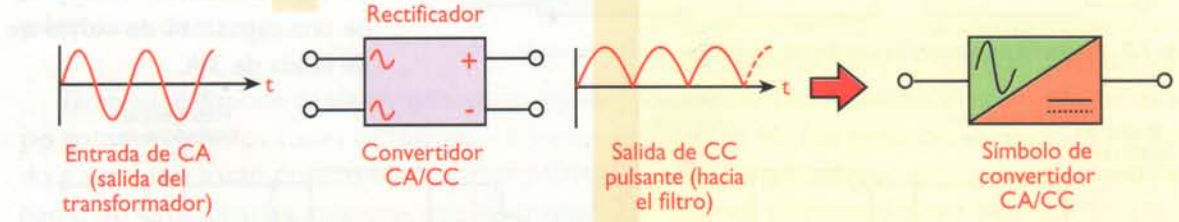


Figura 7.6. Acción básica del rectificador en una fuente de alimentación

Figura 7.7. Acción básica del filtro en una fuente de alimentación

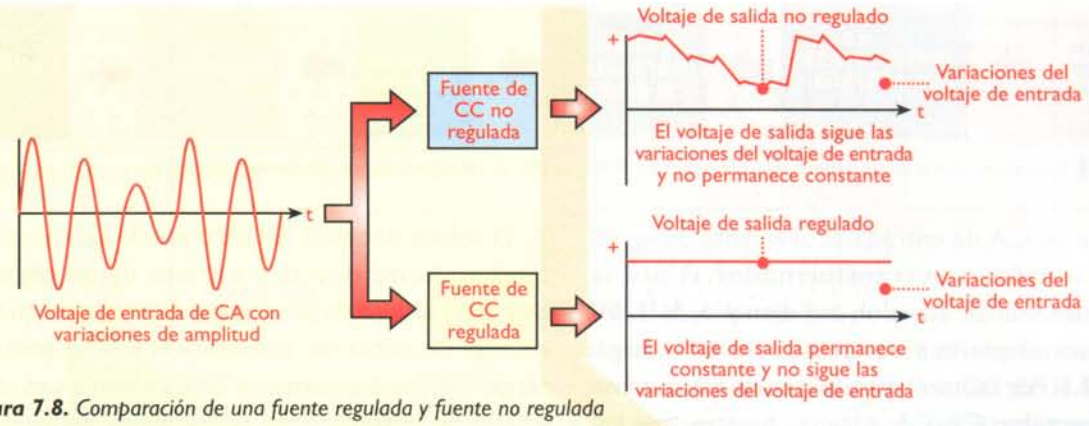


Figura 7.8. *Comparación de una fuente regulada y fuente no regulada*

nerales y las configuraciones más comunes de ambos tipos, comenzando por las fuentes no reguladas, que son las más sencillas y económicas.

Fuentes de alimentación no reguladas

Una **fuente de alimentación no regulada** es una fuente que entrega como salida un voltaje de CC cuyo valor no es absolutamente constante, sino que varía dependiendo de los cambios en el voltaje de entrada o la corriente exigida por la carga. Esto se debe a que no utilizan elementos reguladores de voltaje. Por tanto, constan básicamente del transformador, el rectificador y el filtro, **figura 7.9**. Este tipo de fuentes se utilizan cuando las variaciones del voltaje de salida no son críticas. Su empleo es muy común en algunos circuitos de audio, radio y televisión, así como en juguetes y cargadores de baterías.

Figura 7.9. *Diagrama de bloques de una fuente de alimentación no regulada*

Las fuentes de alimentación no reguladas pueden ser de varias clases, dependiendo principalmente de la configuración del circuito rectificador. En esta lección examinaremos los siguientes tipos:

- Fuentes con rectificador de media onda
- Fuentes con rectificador de onda completa
- Fuentes con rectificador de puente
- Fuentes con multiplicador de voltaje

En nuestro estudio de las fuentes de alimentación no reguladas procederemos de una manera sistemática, examinando por separado las características generales de cada uno de los elementos que las componen. En la **figura 7.10** se muestra el diagrama esquemático completo de una fuente de alimentación no regulada práctica, la cual tomaremos como ejemplo. Con los valores y referencias de componentes que se indican, esta fuente entrega una tensión de CC nominal de +13V y tiene una capacidad de corriente de salida de 3 A.

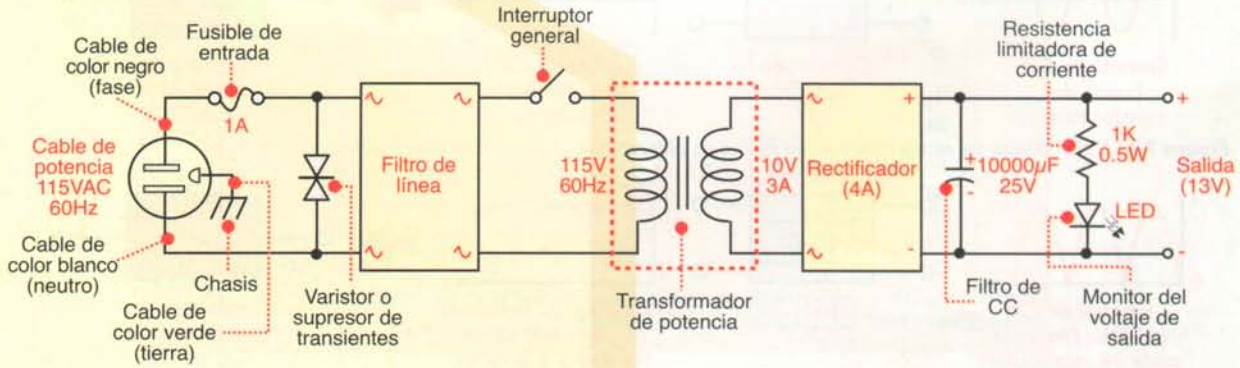


Figura 7.10. *Fuente de alimentación no regulada completa*

La fuente anterior consta de las siguientes partes o bloques constructivos generales, cada uno de los cuales será explicado en las siguientes secciones :

- Un circuito de entrada, constituido por el cable de potencia (PL1), el fusible general (F1), el supresor de picos (MOV1), el filtro de línea (LF1) y el interruptor general (S1)
- Un transformador (T1)
- Un rectificador (BR1)
- Un filtro de rizado (C1)
- Un circuito de salida, constituido en este caso por un diodo emisor de luz o LED (D1) y su correspondiente resistencia limitadora de corriente (R1)

El circuito de entrada

La función básica del circuito de entrada de una fuente de alimentación, es llevar el voltaje de CA de entrada desde la fuente de suministro, generalmente la red pública de distribución de corriente alterna de 120V o 220V, hasta el primario del transformador, **figura 7.11**. También cumple funciones auxiliares de protección, control y señalización. El circuito de entrada puede incluir, entre otros componentes, un cable o cordón de potencia, un fusible general, un interruptor general, un supresor de picos de voltaje, un filtro de línea y un indicador luminoso de presencia de voltaje. Algunos de estos elementos son obligatorios, mientras que otros son opcionales y se pueden omitir en muchos casos.

Para llevar el voltaje de CA de entrada desde la fuente de suministro, generalmente un tomacorriente monofásico, hasta el primario del transformador, se necesita, como mínimo, un **cable o cordón de potencia** de longitud apropiada y dotado de un enchufe o clavija de conexión. Los cables de potencia monofásicos pueden ser de dos o tres conductores, **figura 7.12**. Los primeros, **figura 7.13a**, conectan la fuente únicamente con la fase y el neutro de la instalación eléctrica, mientras que los segundos, **figura 7.13b**, la conectan también con el conductor de protección o tierra. Estos últimos son los más recomendados. El conductor de tierra debe conectarse al *chasís*, bastidor o estructura metálica de la fuente.

Figura 7.11 *Función básica del circuito de entrada de una fuente de alimentación*

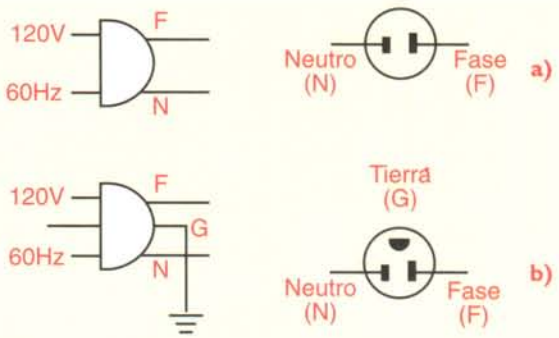


Figura 7.12. *Aspecto físico y símbolos de los cables de potencia monofásicos para fuentes de alimentación*

Los cables de potencia se especifican de acuerdo al voltaje y la corriente máxima que pueden soportar, por ejemplo 250V/6A. Como regla general, el voltaje de alimentación de la fuente y la máxima corriente esperada en el circuito de entrada deben ser siempre inferiores a estos valores. De este modo, si su fuente se alimenta con

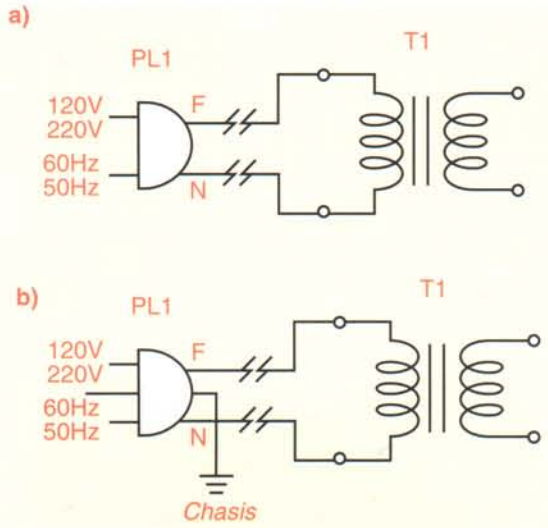


Figura 7.13 *Circuito de entrada básico de una fuente de alimentación con un cable de potencia monofásico de dos hilos (a) y uno de tres hilos (b). El conductor de tierra debe conectarse al chasis del equipo.*

120V rms y la máxima corriente de entrada esperada es 1A rms, un cable de 250V/3A es más que suficiente.

Además del cable de potencia, es conveniente que el circuito de entrada de una fuente disponga de un fusible y un interruptor general. El interruptor, **figura 7.14**, permite conectar y desconectar voluntariamente la fuente de la red de potencia, mientras que el fusible, **figura 7.15**, la protege en caso de una sobrecarga o un cortocircuito. Los fusibles se alojan normalmente en portafusibles para facilitar su remoción en caso de una falla, **figura 7.16**. El interruptor y el fusible se conectan en serie y sobre el lado del conductor de fase del circuito de entrada, **figura 7.17.** Tanto los interruptores como los fusibles y portafusibles se estudian en la sección de **componentes**.

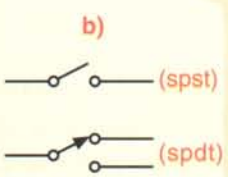


Figura 7.14. *Aspecto físico (a) y símbolos (b) de un interruptor sencillo para fuente de alimentación*

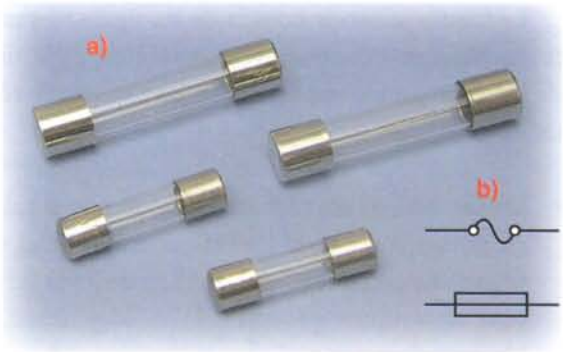


Figura 7.15. *Aspecto físico (a) y símbolos (b) de fusibles para fuente de alimentación.*

Los interruptores vienen en diferentes formas, tamaños y configuraciones de contactos, y se especifican de acuerdo al voltaje y la corriente máxima que pueden soportar, por ejemplo 250V/3A. Como regla general, el voltaje de alimentación de la fuente y la máxima corriente esperada en el circuito de entrada, deben ser siempre inferiores a estos valores.

Los fusibles, por su parte, pueden ser de **acción rápida** o de **acción lenta, y** se especifican

Figura 7.16. *Aspecto físico de portafusibles para fuentes de alimentación*

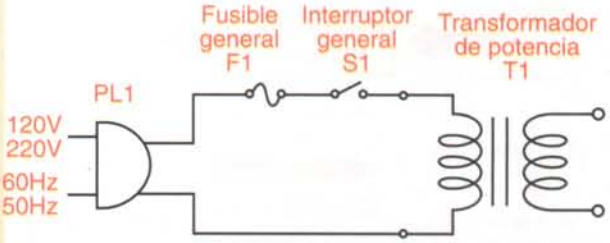


Figura 7.17. *Circuito de entrada de una fuente de alimentación con la adición de un fusiible y un interruptor general.*

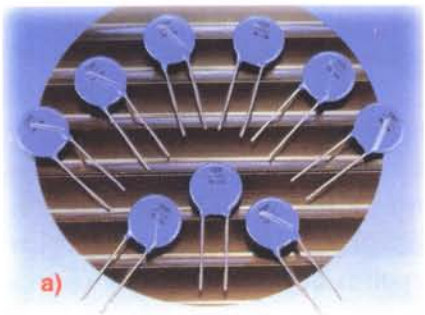


Figura 7.18. *Aspecto físico (a) y símbolos (b) de varistores representativos*

de acuerdo a la máxima corriente que pueden soportar antes de abrir el circuito al cual están incorporados, por ejemplo 2,5A. Los fusibles más adecuados para circuitos de entrada de fuentes de alimentación son los de acción **lenta** (*slow-blow*). Los fusibles de acción rápida (*fast-blow*) pueden fundirse fácilmente en el momento de conectar la fuente a la red de potencia, sin que exista realmente una falla. Como regla práctica, la corriente nominal de un fusible puede elegirse de modo que sea alrededor de un 50% mayor que la corriente máxima esperada en el circuito de entrada. Si esta última es, por ejemplo, de 500 mA rms, puede utilizarse un fusible de 750 mA.

También es conveniente proteger la fuente y los circuitos conectados a ella de las variaciones súbitas de voltaje que se presentan ocasionalmente en las líneas de potencia, las cuales pueden alcanzar amplitudes de varios miles de voltios y causar daños en circuitos sensibles. Para esta función se utiliza un componente conocido como **varistor, MOV** (*metal oxide varistor*) o **supresor de picos, figura 7.18**, el cual conduce cuando el voltaje entre sus terminales excede de un cierto valor límite. De este modo, absorbe la energía de los picos de voltaje y evita que continúen hacia el resto del circuito. Los varistores se conectan en paralelo con el cable de potencia, después del fusible, **figura 7.19**.

Los varistores se especifican de acuerdo al máximo voltaje que pueden soportar antes de actuar y la máxima energía

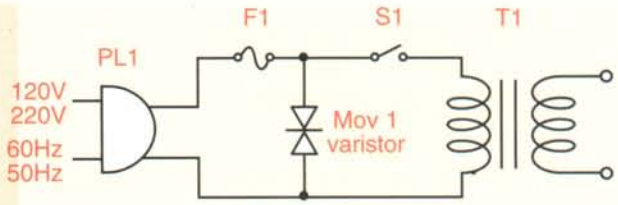


Figura 7.19. *Circuito de entrada de una fuente de alimentación con la adición de un varistor o supresor de picos*

del pico que pueden absorber cuando se disparan. Esta última, que se expresa en **julios** (J), está relacionada con su capacidad de conducción de corriente y el tiempo de duración máximo del pico. Por ejemplo, el varistor V130LA2 tiene una tensión de ruptura de 184V (130Vrms), una capacidad de corriente de 400A y una capacidad de absorción de energía de 10J. Esto significa que recortará picos de voltaje por encima de 184V con una duración máxima hasta de 62,5µs. Si los picos duran más de este tiempo, el varistor se destruye y se abre el fusible principal.

Como parte del esquema de protección de una fuente, puede también utilizarse, opcionalmente, un **filtro de línea**, **figura 7.20**. Este último es simplemente un circuito formado por bobinas y condensadores que elimina los ruidos de

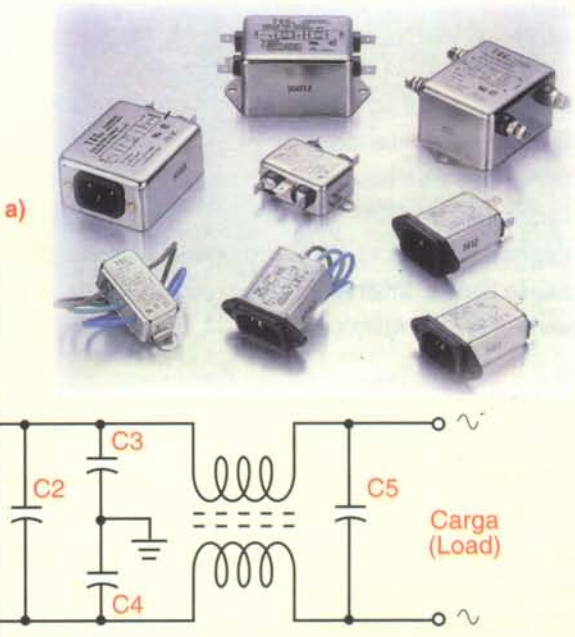


Figura 7.20. *Aspecto físico (a) y circuito interno (b) de filtros de línea representativos*

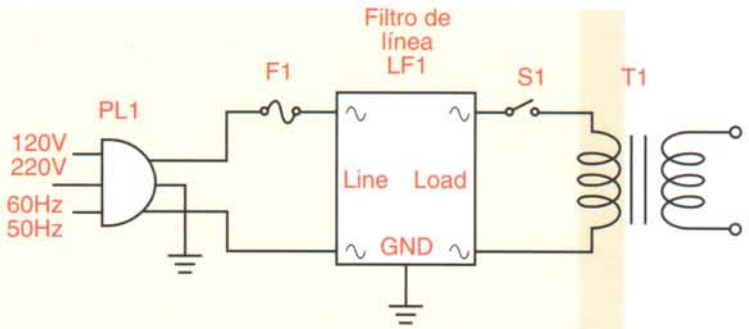


Figura 7.21. *Circuito de entrada de una fuente de alimentación con la adición de un filtro de línea*

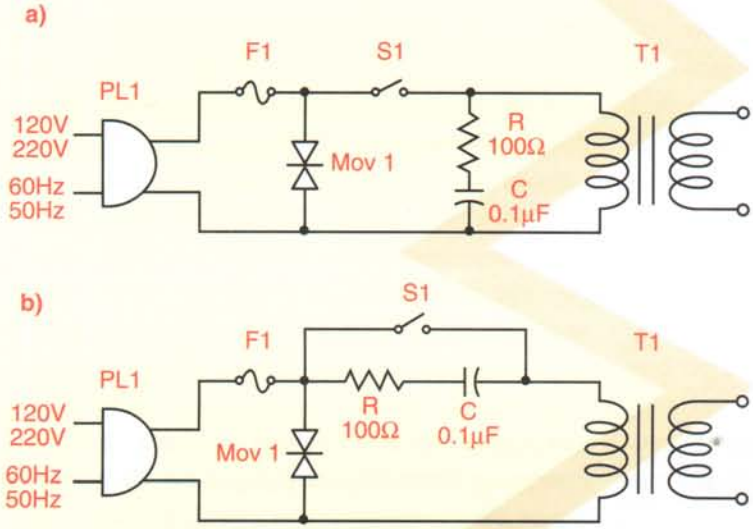


Figura 7.22. *Circuito de entrada con una red RC de amortiguamiento (**snubber**) conectada a través del primario del transformador (a) o del interruptor general (b). En ambos casos el efecto es el mismo. Los valores indicados de R y C son típicos.*

alta frecuencia inducidos en el circuito de entrada, por parte del propio circuito de carga de la fuente u otros equipos vecinos. Si este ruido, conocido como **EMI** o **RFI** (interferencia electromagnética o de radio-frecuencia) no se elimina, puede causar interferencias en otros equipos conectados a la misma línea.

El filtro de línea se conecta entre el cable de potencia y el transformador, después del fusible y antes del interruptor, **figura 7.21**. Su uso es muy común en equipos de comunicaciones. Se especifican principalmente de acuerdo al voltaje y la corriente máxima que pueden soportar, por ejemplo 250V/5A rms. También es importante conocer su circuito interno y el tipo de señales de interferencia que filtran.

Otra adición útil en el circuito de entrada de una fuente de alimentación es un circuito de amortiguamiento (*snubber*), formado generalmente por una resistencia en serie con un condensador, **figura 7.22**. Este circuito es opcional y se utiliza para amortiguar los pulsos de alto voltaje que se producen en el circuito de entrada en el instante de desconectar el transformador de la red de potencia. Si estos pulsos no se eliminan, pueden inducir ruido o interferencia en otros equipos sensibles localizados en las proximidades de la fuente. La red de *snubber* se conecta en paralelo con el primario del transformador o a través del interruptor, como se indica en la figura.

Finalmente, en el circuito de entrada de una fuente es conveniente disponer de algún tipo de indicador luminoso para monitorear la presencia de voltaje de CA en el primario del transformador. Para esta función se utiliza normalmente una luz piloto de neón, **figura 7.23**. Esta última está provista generalmente de una resistencia limitadora de corriente y se conecta en paralelo con el primario del transformador, **figura 7.24**. Algunos interruptores incluyen una luz piloto de neón como parte integral, **figura 7.25**,

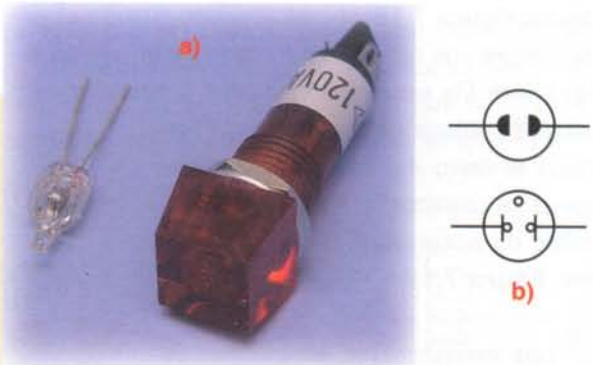


Figura 7.23. *Aspecto físico (a) y símbolo (b) de una luz piloto de neón*

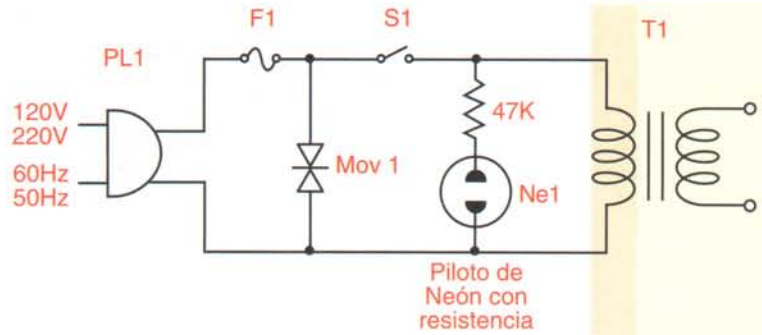


Figura 7.24. *Circuito de entrada de una fuente de alimentación con la adición de una luz piloto de neón*

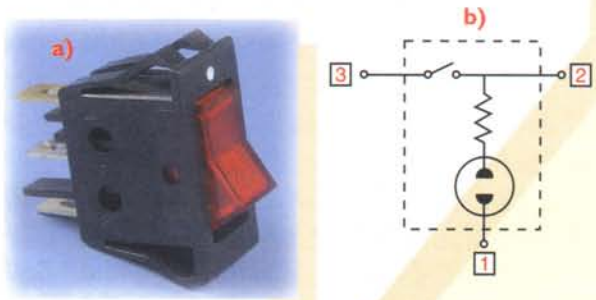


Figura 7.25. *Aspecto físico (a) y circuito interno (b) de un interruptor con piloto de neón incorporado*

combinando así las funciones de control y señalización en una misma estructura.

En lugar de una lámpara de neón puede también utilizarse un LED, como se muestra en la **figura 7.26**. En el primer caso (a), el LED se ilumina durante los semiciclos positivos y se apaga durante los negativos. El diodo (D) evita que sobre el LED quede aplicado un voltaje excesivo, capaz de destruirlo. En el segundo caso se utiliza un LED tricolor, formado por un LED rojo, que se ilumina durante los semiciclos positivos, y uno amarillo, que se ilumina durante los semiciclos negativos. Debido a que el cambio de polaridad se efectúa a una velocidad alta para la retina (50 o 60 veces por segundo), el ojo percibe realmente una luz de color verde.

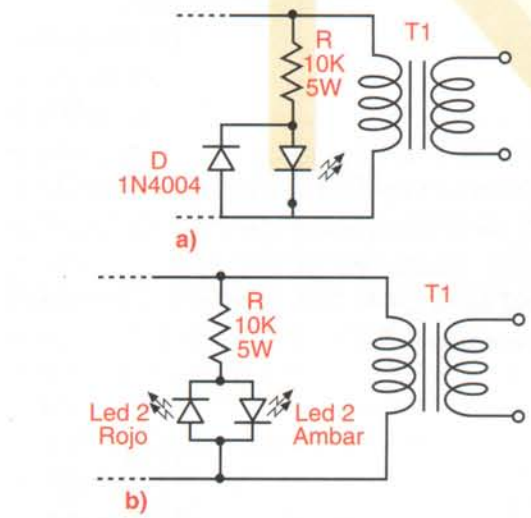


Figura 7.26. *Circuito de entrada de una fuente de alimentación utilizando un LED sencillo (a) o tricolor (b) en lugar de una luz de neón. La resistencia (R) limita la corriente a través de cada LED a un valor seguro.*

El transformador

En la mayoría de los casos, la tensión de la red de CA es demasiado alta para los requisitos de operación de los componentes utilizados en los circuitos electrónicos. Por esta razón, el voltaje de CA suministrado por el circuito de entrada de una fuente de alimentación debe ser reducido a niveles más manejables, por ejemplo de 120V a 9V. Esta función de reducción la efectúa un dispositivo llamado **transformador**, **figura 7.27**, formado por

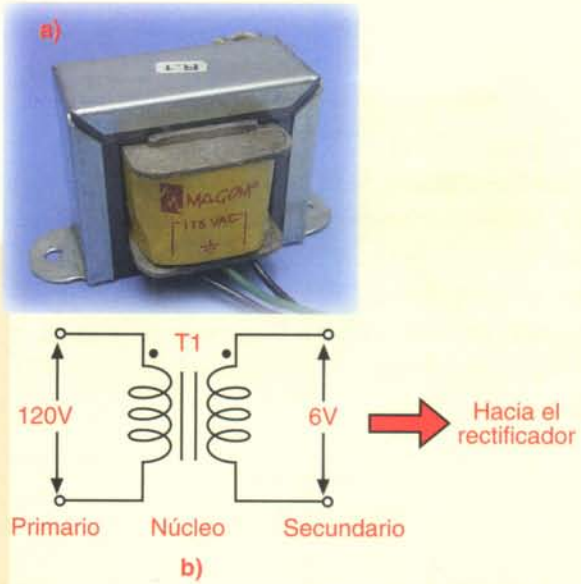
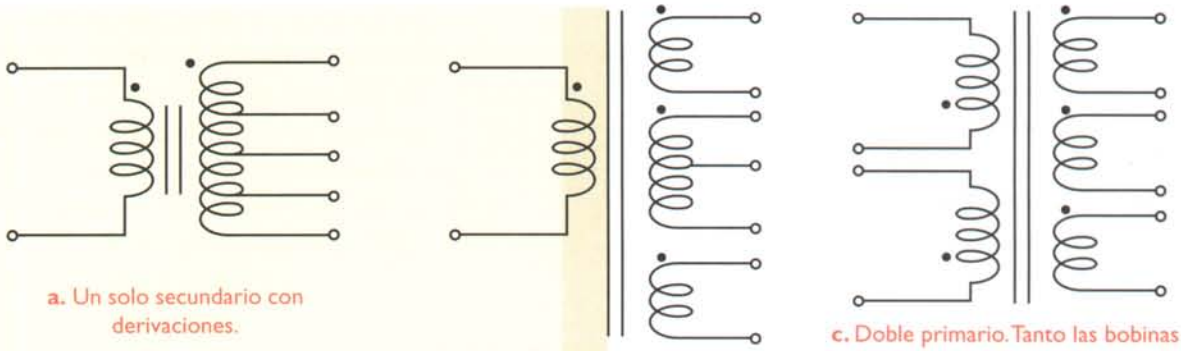


Figura 7.27. *Aspecto físico (a) y símbolo básico (b) de un transformador con primario y secundario aislados. Las rayas verticales indican que el primario y el secundario están devanados sobre un núcleo de hierro común. Los puntos indican que los extremos marcados tienen la misma polaridad en cada instante.*



a. Un solo secundario con derivaciones.

b. Varios secundarios independientes.

c. Doble primario. Tanto las bobinas primarias como secundarias se pueden conectar en serie o en paralelo para conseguir diversas combinaciones de voltajes y corrientes de salida

Figura 7.28 *Otras configuraciones comunes transformadores monofásicos aislados.*

dos bobinas, llamadas **primario** y **secundario**, enrolladas sobre un mismo núcleo magnético. El primario recibe el alto voltaje de entrada y el secundario entrega el voltaje o voltajes reducidos al circuito de carga.

El voltaje de salida entregado por un transformador (V2), depende principalmente del voltaje de entrada (V1) y del número de espiras tanto del enrollamiento primario (N1) como del secundario (N2). Para un transformador con núcleo de hierro, este voltaje está dado por la siguiente ecuación:

$$V2 = \frac{N2}{N1} \times V1 = NV1$$

donde N2/N1=N representa la **relación de transformación**. Si N2 es mayor o menor que N1, entonces V2 es mayor o menor que V1. El primer caso (V2>V1) corresponde a un transformador **elevador** y el segundo (V2<V1) a uno **reductor**. En ambos casos, si se conecta la carga, la potencia de entrada (P1) es igual a la de salida (P2). Esto es:

$$P2 = P1$$
$$V_2 \times 2 = V_1 \times 1$$

siendo I2 la corriente en el secundario e I1 la corriente en el primario. Por ejemplo, si V1=220V, V2=10V e I2=2A, entonces la corriente en el primario debe ser del orden de 0,091A, puesto que 10V x 2A = 220V x 0.091A = 20W.

Los transformadores utilizados en las fuentes de alimentación deben ser preferiblemente **aislados**, lo cual significa que el devanado primario debe estar separado eléctricamente del devanado secundario, **figura 7.28**. Esto ser hace por razones de seguridad. No es conveniente utilizar los llamados **autotransformadores**, **figura 7.29**, constituidos por una única bobina y provistos de varias salidas, ya que los mismos no aislan la carga de la red de CA y se corre el riesgo de recibir un choque eléctrico. Los transformadores se estudian en la sección de **componentes** de este curso.

Los transformadores para fuentes de alimentación se especifican principalmente por su voltaje de entrada, su voltaje de salida y su potencia nominal. Esta última determina la capacidad de corriente del secundario. En general, la potencia de entrada de entrada de un transformador es igual a la potencia de salida. Por ejemplo, el transformador **MAGOM** M-1 recibe 115V en el primario, entrega 24V en el secundario y tiene una capacidad de corriente máxima de 1A. Por tanto, su potencia nominal es de 24W. Esto significa que la máxima corriente permisible en el primario es 24/115 A =

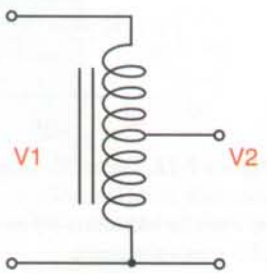


Figura 7.29. *Estructura básica de un autotransformador*

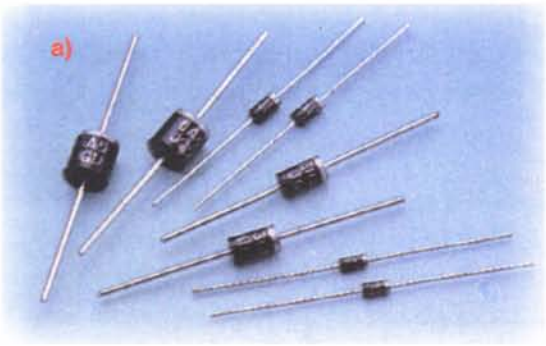


Figura 7.30. *Aspecto físico (a) y símbolo (b) de un diodo rectificador.*

0.21A, lo cual implica que el fusible de entrada debe ser del orden de 250mA.

El circuito rectificador

La función básica del circuito rectificador en una fuente de alimentación es convertir el voltaje de CA obtenido a la salida del transformador en un voltaje de CC **pulsante**, el cual tiene una polaridad única. Este proceso, denominado **rectificación,** es posible gracias a la utilización de unos componentes electrónicos llamados **diodos**, **figura 7.30**, diseñados específicamente para permitir la circulación de la corriente en un solo sentido y bloquearla en el sentido opuesto. Esta característica los hace adecuados para convertir corriente alterna bidireccional en corriente continua unidireccional, **figura 7.31**. Los diodos se estudian en la sección de **componentes** de este curso.

Un diodo permite el paso de corriente cuando el ánodo (A) es positivo con respecto al cátodo (K), y lo bloquea en el caso contrario, **figura 7.32**.

Figura 7.31. *Acción básica de un diodo rectificador (media onda)*

En el primer caso se dice que está polarizado **directamente** y en el segundo que lo está **inversamente.** Un diodo polarizado directamente se comporta como un interruptor cerrado y uno polarizado inversamente como un interruptor abierto. En el primer caso, la corriente a través del diodo es la misma de la carga (IL), mientras que en el segundo el voltaje entre sus terminales es igual al voltaje de alimentación (Vcc).

Los diodos rectificadores se especifican por su máxima capacidad de corriente en condiciones de polarización directa y de voltaje en condiciones de polarización inversa. El diodo **1N4001**, por ejemplo, es de 50V/1A. Esto significa que puede soportar hasta 50V con polarización inversa o hasta 1A con polarización directa. Cuando el voltaje o la corriente, bajo estas condiciones, exceden los valores especificados, el diodo se destruye. Como regla práctica, estos valores pueden escogerse de modo que sean, por lo menos, el doble de los valores máximos utilizados en el circuito.

Tipos de rectificadores

Los rectificadores pueden ser de **media onda** o de **onda completa**, dependiendo de si utilizan uno o ambos semiciclos de la tensión de CA para producir la tensión de CC pulsante. El rectificador de la **figura 7.31**, por ejemplo, es de media onda, porque ignora los semiciclos negativos y deja pasar únicamente los semiciclos positivos. En el caso de un rec-

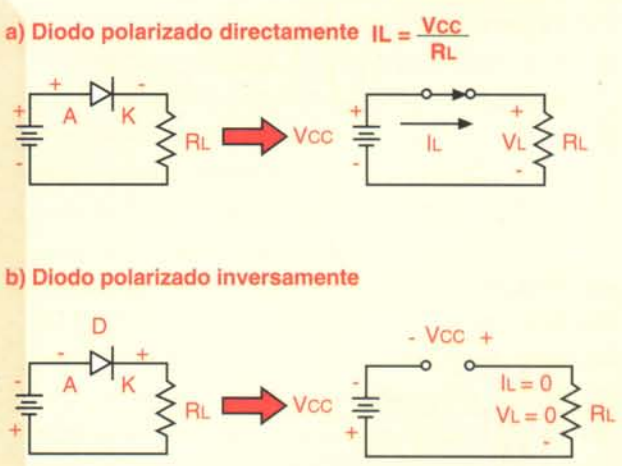


Figura 7.32. *Polarización directa (a) e inversa (b) de un diodo. Circuitos equivalentes*

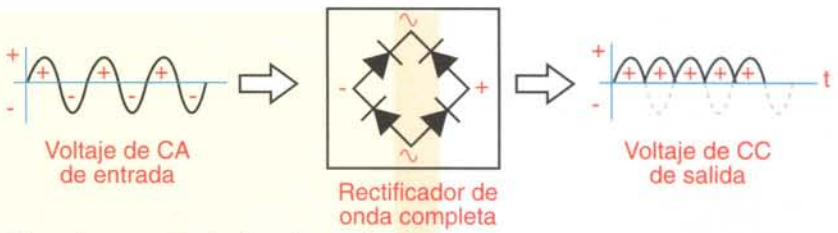


Figura 7.33. *Acción básica de un rectificador de onda completa*

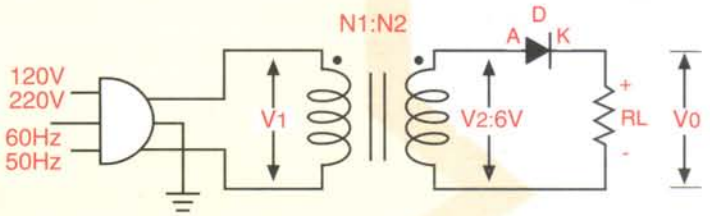


Figura 7.34. *Circuito práctico de un rectificador de media onda*

tificador de onda completa, **figura 7.33**, también pasan los semiciclos negativos, pero con su polaridad invertida, quedando así convertidos en semiciclos positivos. A continuación examinaremos la forma como estos procesos se llevan a cabo.

El rectificador de media onda

La forma más sencilla de convertir corriente alterna en corriente continua es utilizando un **rectificador de media onda**, como el mostrado en la **figura 7.34**. En este caso, durante los semiciclos positivos de la tensión de entrada aplicada al primario del transformador, el secundario tiene una tensión positiva entre sus extremos. Por tanto, el diodo queda polarizado directamente, permitiendo la circulación de corriente hacia la carga , **figura 7.35**.

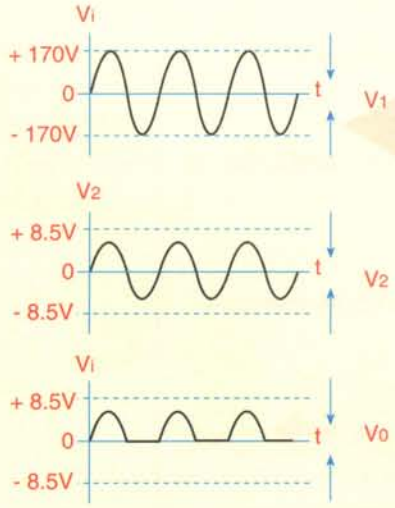


Figura 7.35. *Formas de onda de un rectificador de media onda*

Durante los semiciclos negativos de la tensión de entrada, el secundario entrega una tensión negativa entre sus extremos. Por tanto, el diodo queda polarizado inversamente, impidiendo el paso de corriente. En otras palabras, el diodo se comporta como un interruptor cerrado durante los semiciclos positivos y como un interruptor abierto durante los semiciclos negativos, **figura 7.36**. Como resultado, sobre la carga (RL) se produce un voltaje de CC pulsante formado por pulsos sinusoidales positivos. Debido a que los semiciclos negativos han sido cortados o eliminados, esta forma de señal se denomina una **media onda**.

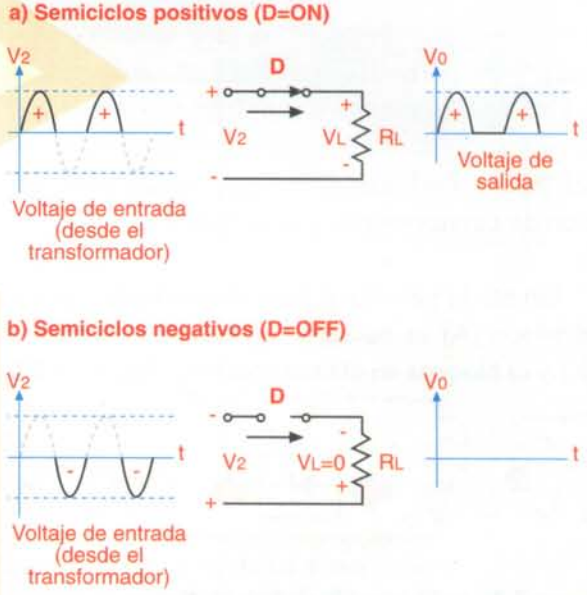


Figura 7.36. *Circuitos equivalentes de un rectificador de media onda*

El voltaje de CC pulsante obtenido a la salida de un rectificador de media onda tiene una frecuencia (f) igual a la de la tensión de la red, es decir 50 o 60 Hz, y una amplitud igual al valor pico (Vp) de la tensión en el secundario. Si se conecta un voltímetro de CC entre los extremos de la carga, el mismo proporcionará una lectura (Vcc) igual al **valor medio** de la tensión de salida. Para una señal de media onda, este valor está dado por:

$$Vcc = \frac{Vp}{\pi} = 0{,}318Vp$$

siendo Vp el valor pico. En la práctica, el voltaje real obtenido sobre la carga es ligeramente inferior a este valor, debido a que sobre el diodo se presenta una pequeña caída de voltaje, del orden de 0,7V, en condiciones de polarización directa. El siguiente ejemplo aclarará estos conceptos. El **experimento 7.1** los fijará de manera práctica.

Ejemplo 7.1. Un rectificador de media onda como el de la **figura 7.37** tiene aplicada una tensión de entrada de CA de 120V/60 Hz. Si el secundario entrega una tensión de salida de 15V a una carga de 100Ω, ¿cuál será el valor medio de la tensión de CC medida por el voltímetro?. Asuma que la caída de tensión en el diodo (VD) es de 0.7V.

Solución. Inicialmente debemos calcular el valor pico de la tensión de CA del secundario (Vp2). Este último puede calcularse a partir del valor rms dado (15V) así:

$$Vp = \sqrt{2}\, Vrms = 1{,}4142 \times 15V = 21{,}21V$$

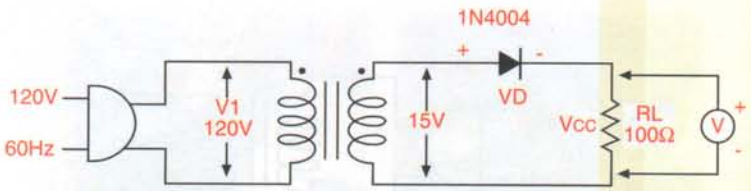


Figura 7.37. *Rectificador de media onda para el ejemplo 7.1*

Por tanto, idealmente, el valor medio del voltaje de salida medido por el voltímetro es:

$$Vcc(ideal) = \frac{Vp}{\pi} = 0{,}318 \times 21{,}21V = 6{,}75\ V$$

En la práctica, a este valor debemos restarle la caída de voltaje sobre el diodo (0.7V) para obtener el voltaje de salida real. Por tanto:

$$Vcc(real) = Vcc(ideal) - Vd$$
$$= 6{,}75V - 0{,}7V = 6{,}05V$$

Este último sería el valor finalmente leído en el voltímetro.

Ejemplo 7.2. Se desea diseñar un transformador para un rectificador de media onda que suministre 1A de CC de salida a una carga de 10Ω a partir de una tensión de red de 220V, 50Hz. Para ello se selecciona un diodo rectificador que tiene una caída de voltaje directa de 0.45V. ¿Cuál debe ser el valor nominal de la tensión en el secundario?

Solución. El valor medio del voltaje de CC sobre la carga (VL) es simplemente:

$$VL = IL \times RL = 1A \times 10\Omega = 10V$$

Este valor debe ser igual al valor medio ideal de la tensión secundaria rectificada (0,318Vp) menos la caída de voltaje en el diodo (Vd=0,45V). Por tanto:

$$0{,}318Vp = VL + Vd = 10{,}45V$$

siendo Vp el valor pico de la tensión de salida del secundario. Por tanto:

$$Vp = \frac{10.45V}{0.318} = 32.86\ V$$

y

$$Vrms = \frac{Vp}{\sqrt{2}} = 23.3V$$

Lo anterior implica que debe utilizarse un transformador reductor de 220V a 23.3V con una capacidad de corriente superior a 1A.

Experimento 7.1. Rectificador de media onda

Objetivos

- Aprender a identificar los devanados de un transformador
- Medir los voltajes de entrada y salida de un transformador
- Aprender a identificar los terminales de un diodo rectificador
- Aprender a probar diodos rectificadores con el multímetro
- Medir el voltaje y la corriente de salida de un rectificador de media onda
- Observar en un osciloscopio las formas de onda de un rectificador de media onda

Materiales necesarios

1 Cable de potencia monofásico
1 Transformador de potencia (M501 o similar)
Primario: 115V ó 220V
Secundario: 9V - 0 - 9V
Corriente: 200 mA
1 Diodo rectificador 1N4004
1 Resistencia 1.000Ω, 1/2W
1 Multímetro digital
1 Osciloscopio de dos canales
1 Tablero de conexiones sin soldadura (*protoboard*)
1 Cautín
Soldadura, alambre de conexiones

Procedimiento

1. Identifique los terminales de los devanados primario y secundario. En nuestro caso, el primario tiene dos terminales, identificados con los rótulos 0V y 115V (ó 0V y 220V). El secundario, por su parte, tiene tres terminales, identificados con los rótulos 9V, 0V y 9V. Se trata, por tanto, de un transformador reductor. En este experimento no utilizaremos la derivación central (0V).

2. Los devanados del transformador pueden ser también probados e identificados midiendo su resistencia interna. Para ello, configure su multímetro como óhmetro y mida, en su orden, las resistencias del primario (R1) y del secundario (R2), como se indica en la **figura 7.38**. En nuestro caso obtuvimos R1=795 Ω y R2=15 Ω. Notará que la resistencia del primario es mayor que la del secundario, ¿por qué?

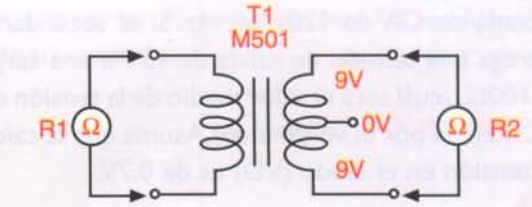
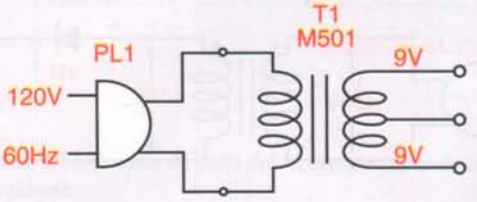


Figura 7.38. *Midiendo la resistencia de los devanados*

3. Una vez identificado el primario, suelde entre sus terminales los extremos del cable de potencia, **figura 7.39**. Suelde también tres alambres telefónicos de 15 cm, u otra longitud adecuada, a los terminales del secundario. Estos últimos permitirán conectar el transformador al *protoboard*.

Figura 7.39. *Conectando el cable de potencia*



4. Conecte el cable de potencia a un tomacorriente monofásico común de 120V/60Hz ó 220V/50Hz. Con su multímetro configurado como voltímetro de CA, mida, en su orden, el valor real de los voltajes del primario (V1) y del secundario (V2) en circuito abierto, **figura 7.40.** En nuestro caso obtuvimos V1=119,2V y V2= 18,2V. Por tanto, la relación de transformación es V2 / V1=119,2V / 18,2V = 6,34

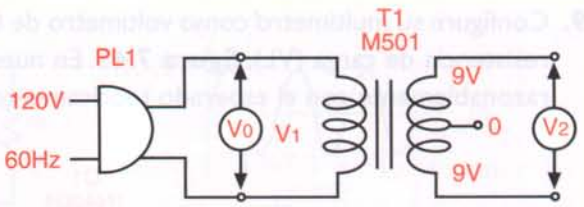


Figura 7.40. *Midiendo los voltajes primario y secundario en circuito abierto*

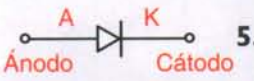


Figura 7.41. *Identificando los terminales del diodo*

5. Tome ahora el diodo rectificador e identifique sus terminales, **figura 7.41**. En nuestro caso, el cátodo (K) o negativo es el terminal marcado con la banda. Por tanto, el terminal no marcado corresponde al ánodo (A) o positivo.

6. Los terminales de un diodo pueden ser también identificados mediante pruebas de resistencia. Para ello, configure su multímetro como óhmetro y mida, en su orden, la resistencia entre ánodo y cátodo en polarización directa (RF) e inversa (RR), **figura 7.42.** Esta última debe ser prácticamente infinita. En general, la resistencia de un diodo en polarización directa es siempre inferior a su resistencia en polarización inversa, ¿por qué?

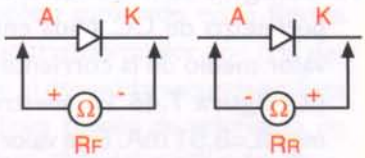
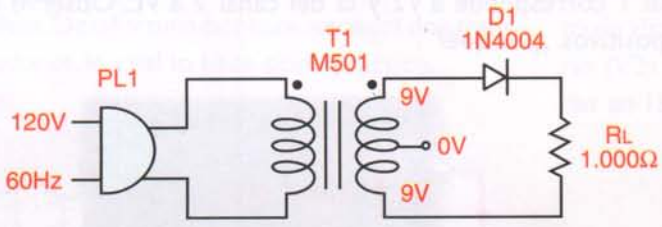


Figura 7.42. *Probando el diodo rectificador*

7. Arme sobre el *protoboard* el rectificador de media onda mostrado en la **figura 7.43.** Antes de instalar la resistencia de carga, mida su valor real (RL) con el multímetro configurado como óhmetro. En nuestro caso obtuvimos RL= 980 Ω



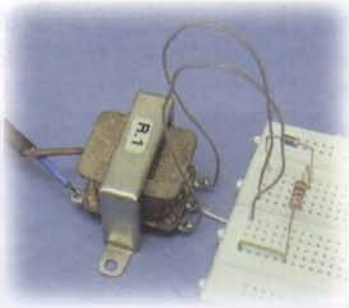


Figura 7.43. *Montaje del rectificador de media onda en el* protoboard

8. Configure su multímetro como voltímetro de CA. Mida entonces el valor rms del voltaje de salida del secundario (V2) con carga, **figura 7.44.** En nuestro caso obtuvimos V2 = 18,8V. Por tanto, el valor pico de este voltaje (V2p) es V2p=26,59V. Verifique también el valor del voltaje de entrada del primario.

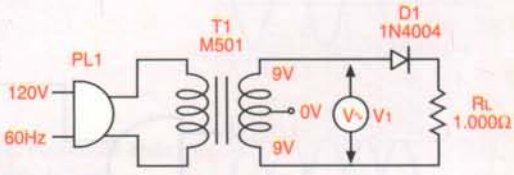


Figura 7.44. *Medición del voltaje CA del secundario con carga*

9. Configure su multímetro como voltímetro de CC. Mida entonces el valor medio del voltaje sobre la resistencia de carga (VL), **figura 7.45**. En nuestro caso obtuvimos VL=8,35V. Este valor concuerda razonablemente con el esperado teóricamente, ¿por qué?

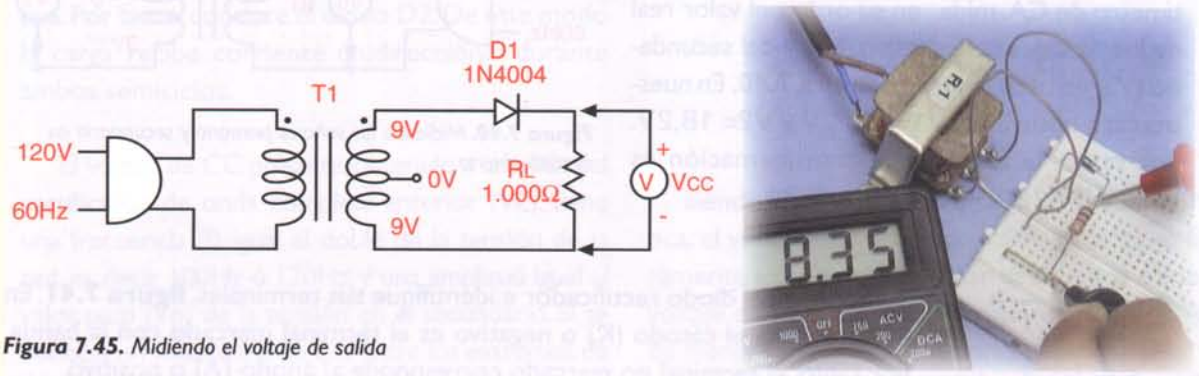


Figura 7.45. *Midiendo el voltaje de salida*

10. Configure su multímetro como amperímetro de CC. Mida entonces el valor medio de la corriente de salida (IL), **figura 7.46**. En nuestro obtuvimos IL=8,51 mA. Este valor concuerda razonablemente con el esperado teóricamente, ¿por qué?

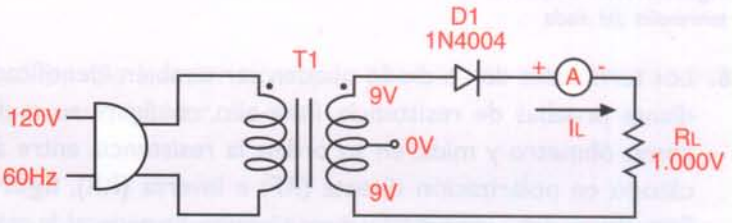


Figura 7.46. *Midiendo la coriente de salida*

11. Las formas de onda reales del voltaje de salida del secundario (V2) y del voltaje sobre la carga (VL) pueden ser también observadas y comparadas en un osciloscopio. En la **figura 7.47** se muestran las formas de onda obtenidas. También se indican los principales valores de voltaje y tiempo de las mismas . En este caso, la señal del canal 1 corresponde a V2 y la del canal 2 a VL. Observe que únicamente se rectifican los semiciclos positivos, ¿por qué?

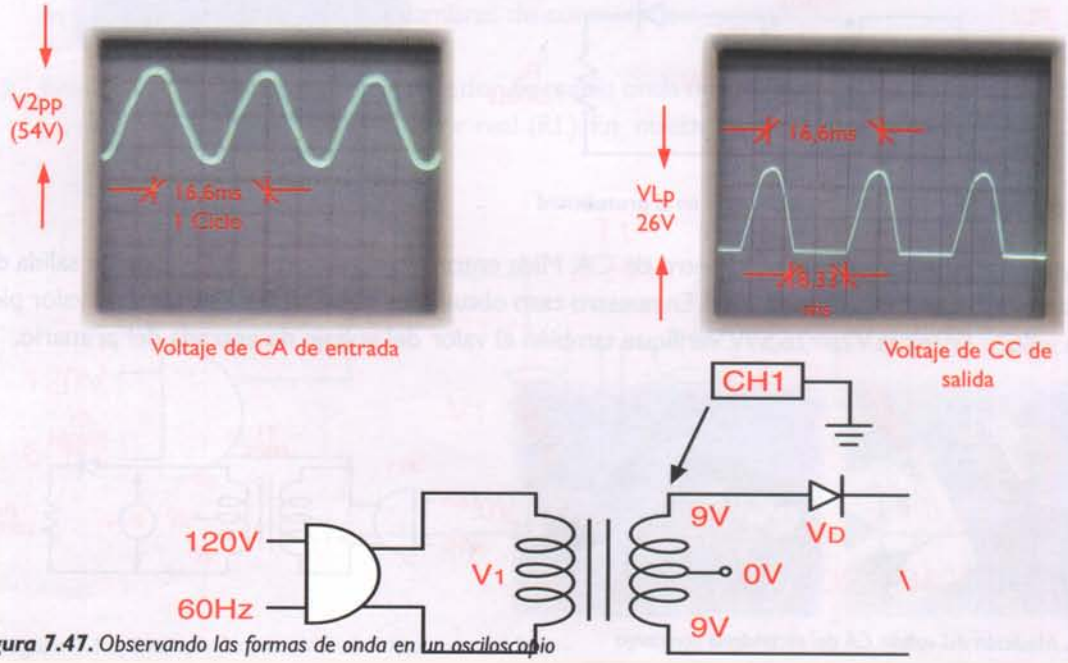


Figura 7.47. *Observando las formas de onda en un osciloscopio*

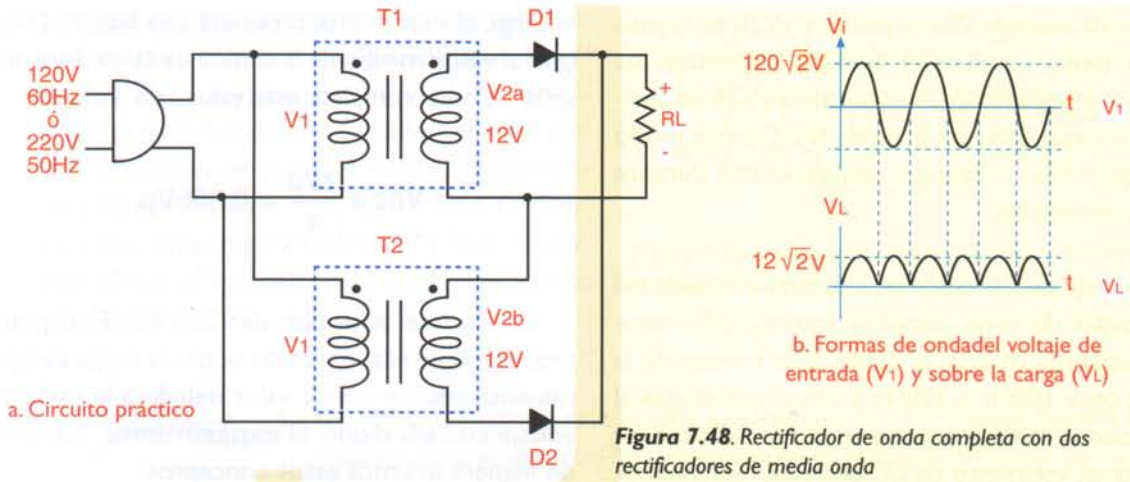


Figura 7.48. *Rectificador de onda completa con dos rectificadores de media onda*

El rectificador de onda completa con transformador de toma intermedia.

El rectificador de media onda anterior es muy sencillo porque utiliza un mínimo de componentes. Sin embargo, no es muy eficiente, porque solo permite que circule corriente a través de la carga durante los semiciclos positivos. Una alternativa es utilizar dos rectificadores de media onda independientes, **figura 7.48**. En este caso, el rectificador superior proporciona corriente a la carga durante los semiciclos positivos de la tensión de entrada y el inferior durante los semiciclos negativos. Por tanto, el circuito proporciona rectificación de onda completa. Desafortunadamente, necesita dos transformadores, lo cual lo hace poco práctico.

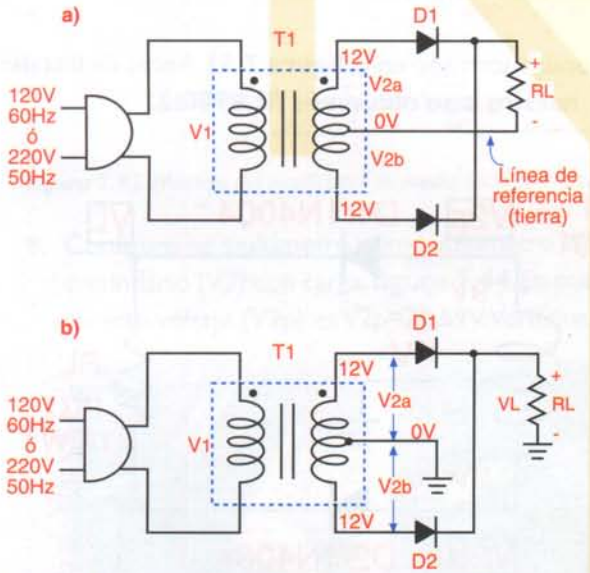


Figura 7.49. *Rectificador de onda completa con transformador de toma intermedia. Dos versiones del mismo circuito*

Un refinamiento del circuito anterior es el rectificador de onda completa mostrado en la **figura 7.49a**, el cual utiliza un transformador con una derivación intermedia en el devanado secundario. Esta última es la tierra o línea común de referencia de los voltajes de entrada y salida del rectificador, **figura 7.49b**. Debido a este modo de conexión, el circuito es equivalente a dos rectificadores de media onda, excepto que utiliza un solo transformador.

En la **figura 7.50** se muestran las formas de onda de los voltajes producidos en el circuito. Todos ellos están referidos a tierra. Desde este punto de vista, las tensiones producidas en el secundario (V2a y V2b) son idénticas, pero están desfasadas en 180°. Durante los semiciclos positivos de la

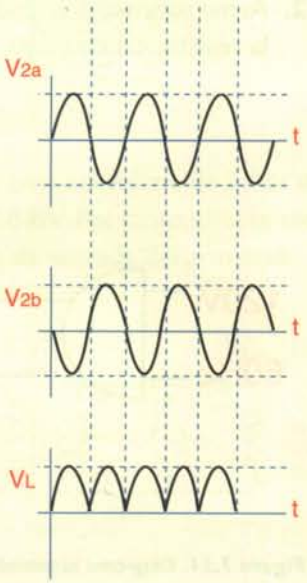


Figura 7.50. *Formas de onda del rectificador de onda completa con transformador derivado*

tensión de entrada, V2a es positiva y V2b es negativa. Por tanto, conduce el diodo D1. Durante los semiciclos negativos, V2a es negativa y V2b es positiva. Por tanto, conduce el diodo D2. De este modo la carga recibe corriente unidireccional durante ambos semiciclos.

El voltaje de CC pulsante, obtenido a la salida del rectificador de onda completa anterior (VL), tiene una frecuencia (f) igual al doble de la tensión de la red, es decir 100Hz ó 120Hz, y una amplitud igual al valor pico (Vp) de la tensión en el secundario. Si se conecta un voltímetro de CC entre los extremos de la carga, el mismo proporcionará una lectura (Vcc) igual al **valor medio** de la tensión de salida. Para una señal de onda completa, este valor está dado por:

$$Vcc = \frac{2Vp}{\pi} = 0{,}636Vp$$

siendo Vp el valor pico de V2a o V2b. En la práctica, el voltaje real obtenido sobre la carga es ligeramente inferior a este valor debido a la caída de voltaje en cada diodo. El **experimento 7.2** fijará de manera práctica estos conceptos.

Experimento 7.2. Rectificador de onda completa con transformador de toma intermedia

Objetivos

- Medir el voltaje y la corriente de salida de un rectificador de onda completa
- Observar en un osciloscopio las formas de onda de un rectificador de onda completa

Materiales necesarios

Los mismos del experimento 7.1, más un diodo IN4004 (D2)

Procedimiento

1. Repita los pasos 1 hasta 6 del **Experimento 7.1,** si no lo ha hecho. En caso contrario, continúe con el siguiente paso. Se supone que el transformador ya ha sido probado y está provisto de su respectivo cable de potencia, y de los alambres de conexión del secundario.

2. Arme sobre el *protoboard* el rectificador de media onda mostrado en la **figura 7.51**. Antes de instalar la resistencia de carga, mida su valor real (RL). En nuestro caso obtuvimos **RL=980Ω.**

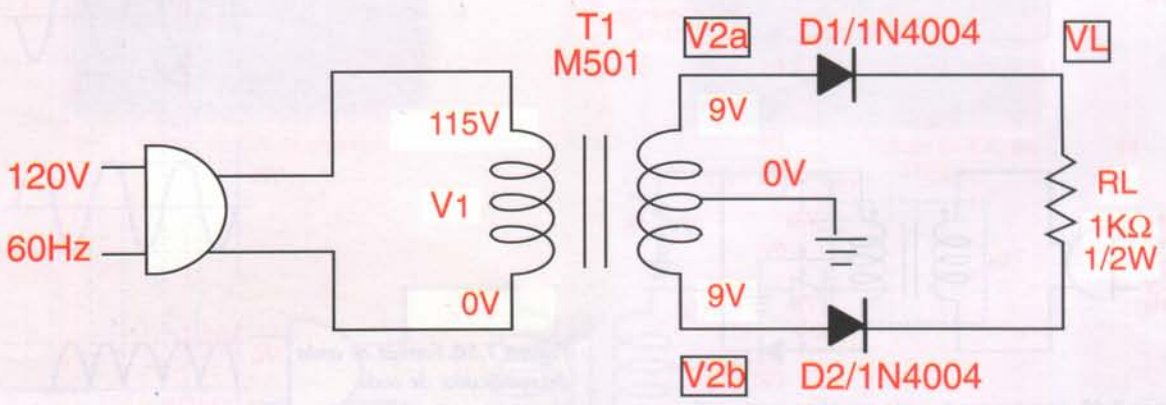


Figura 7.51. *Diagrama esquemático del experimento 7.2*

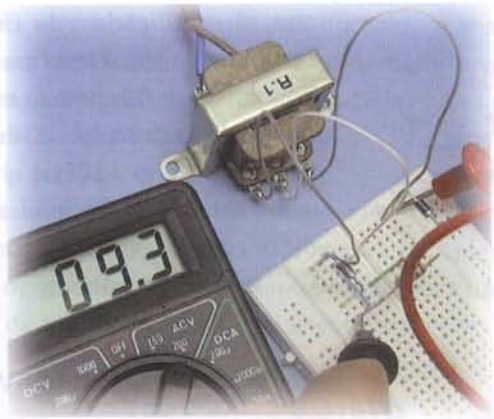


Figura 7.52. *Medición de los voltaje de CA del secundario con carga*

3. Mida el valor rms del voltaje de CA de salida de cada secundario (V2a y V2b), **figura 7.52**. En nuestro caso obtuvimos **V2a=V2b=9,3V**. Por tanto, el valor pico de este voltaje (V2p) es **V2p=13,15V**.

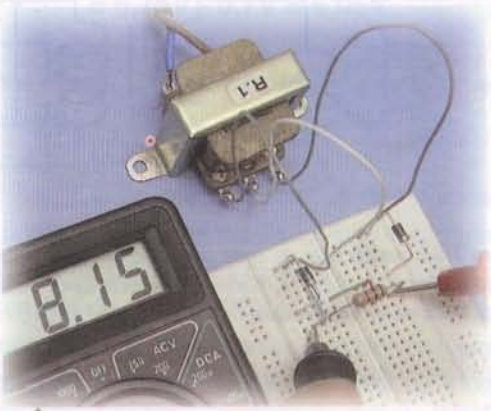
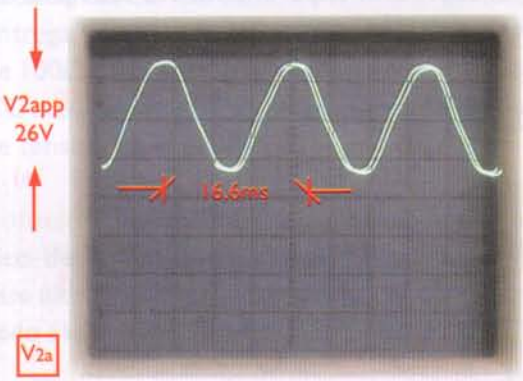


Figura 7.53. *Midiendo el voltaje de salida*

4. Mida el valor medio del voltaje de CC sobre la resistencia de carga (VL), **figura 7.53**. En nuestro caso obtuvimos **VL=8,15V**. Este valor concuerda razonablemente con el esperado teóricamente. ¿Por qué?



5. Las formas de onda reales del voltaje de salida del secundario (V2a y V2b), así como del voltaje sobre la carga (VL) pueden ser también observadas y comparadas en un osciloscopio. En la **figura 7.54** se muestran las formas de onda obtenidas. También se indican los principales valores de voltaje y tiempo de las mismas.

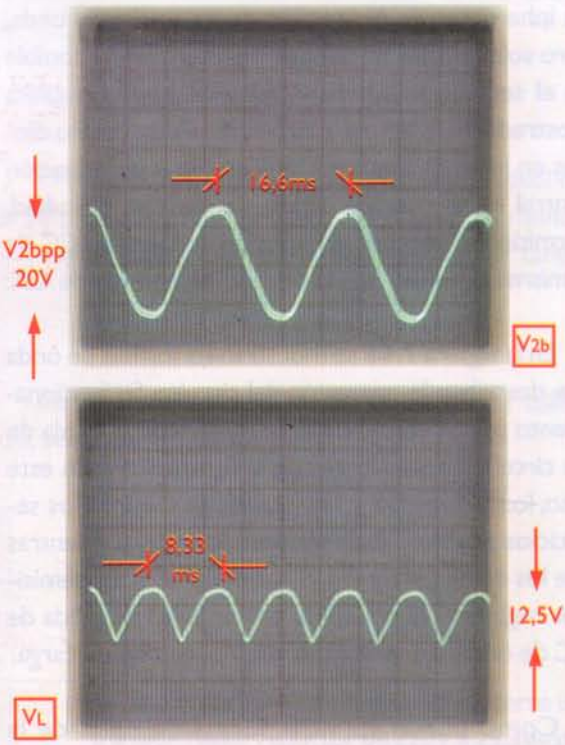


Figura 7.54. *Observando las formas de onda en un osciloscopio*

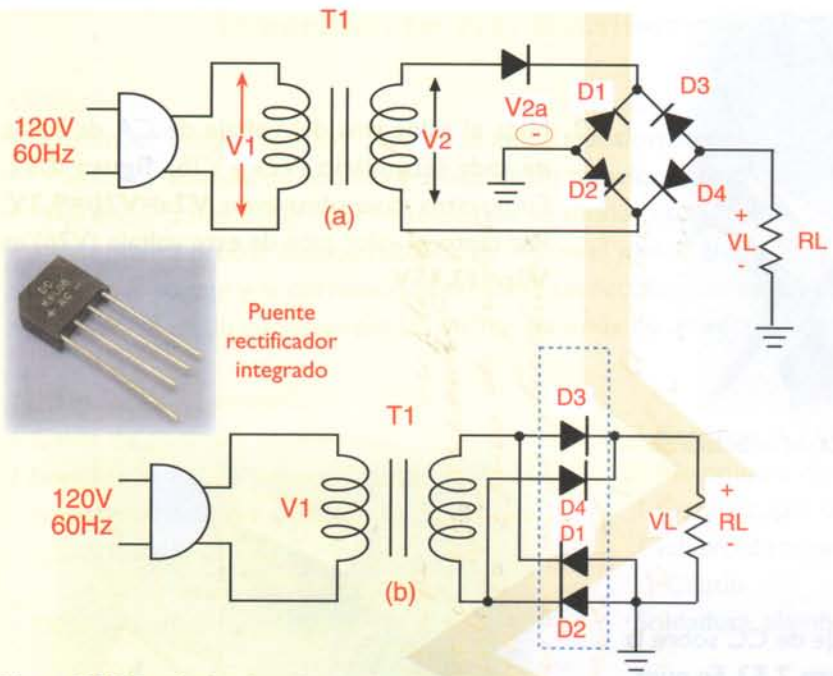


Figura 7.55. *Rectificador de onda completa con puente de diodos. Dos versiones del mismo esquema. También se muestra el aspecto típico de un puente de diodos encapsulado en un solo módulo*

Rectificador de onda completa tipo puente

El rectificador de onda completa con transformador de toma intermedia elimina algunas de las desventajas inherentes de los rectificadores de media onda, pero solo aprovecha la mitad de la tensión disponible en el secundario. El rectificador de onda completa mostrado en la **figura 7.55**, el cual utiliza cuatro diodos en lugar de dos y no requiere de una derivación central en el transformador, supera esta dificultad, permitiendo obtener una tensión de salida en CC de la misma amplitud que la tensión de entrada de CA.

En la **figura 7.56** se muestran las formas de onda que describen la operación del circuito. Su funcionamiento puede comprenderse mejor con la ayuda de los circuitos equivalentes de la **figura 7.57**. En este caso, los diodos D2 y D3 conducen durante los semiciclos positivos de la tensión de entrada, mientras que los diodos D1 y D4 lo hacen durante los semiciclos negativos. El resultado es una señal de salida de CC de onda completa sobre la resistencia de carga.

Como puede verse, la forma de onda de la tensión sobre la carga es idéntica a la obtenida con el rectificador de onda completa de toma intermedia. Por tanto, su frecuencia es el doble de la frecuencia de la red (100Hz o 120Hz) y su valor medio, es decir el medido con un voltímetro de CC, está dado por:

$$Vcc = \frac{2Vp}{\pi} = 0{,}636Vp$$

siendo Vp el valor pico de la tensión de CA de salida del secundario. En la práctica, el valor obtenido es ligeramente menor, debido a las caídas que se presentan en los dos diodos que entran en conducción durante cada semiciclo. Por tanto, a la tensión obtenida mediante la fórmula anterior deben descontarse alrededor de 1.4V para obtener la tensión de salida real. El siguiente ejemplo aclarará estos conceptos. El experimento 7.3 los fijará de manera práctica.

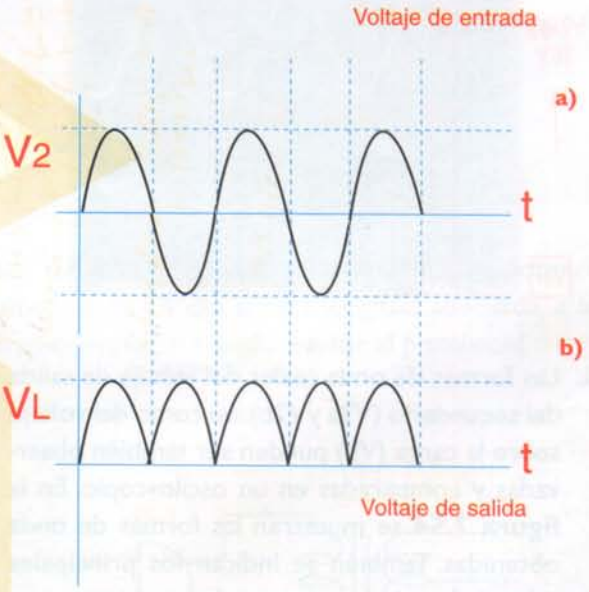


Figura 7.56. *Formas de onda del rectificador de onda completa tipo puente*
a. *Circuito de voltaje de entrada*
b. *Cicuito de voltaje de salida*

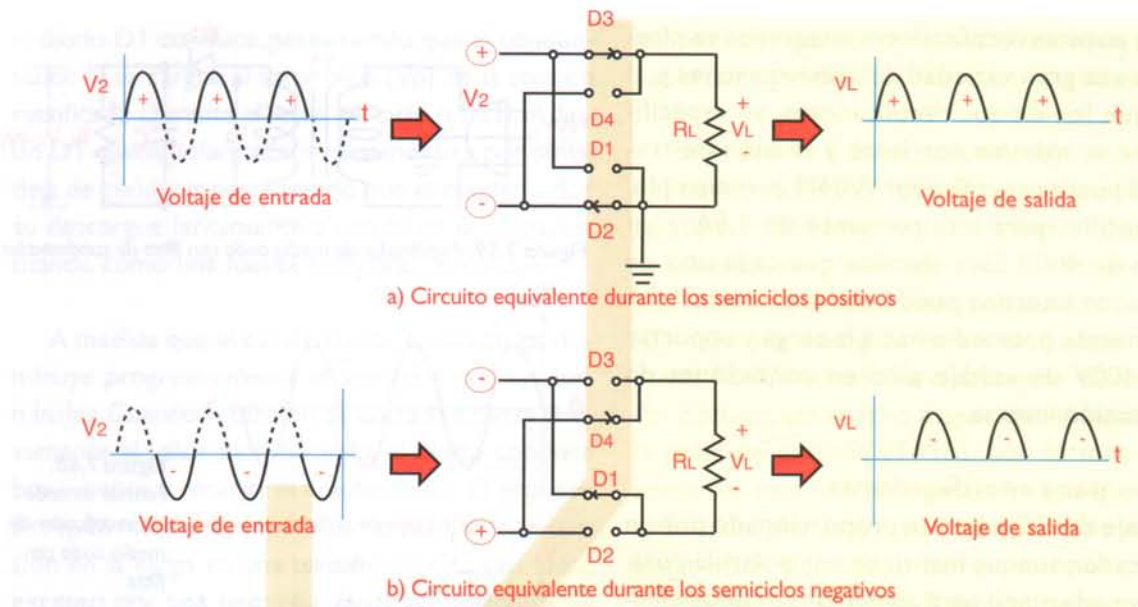


Figura 7.57. *Circuitos equivalentes de un rectificador de onda completa con puente de diodos durante los semiciclos positivos (a) y negativos (b)*

Ejemplo 7.3. Suponga que en el circuito de la figura 7.55b, la tensión de CA de entrada es de 220V/ 50Hz. Si el transformador T1 tiene una relación de espiras de 20 a 1 (20:1) y no se tienen en cuenta las caídas de voltaje en los diodos del puente rectificador, ¿cuál será el valor del voltaje de CC medido en la carga?

Solución. Inicialmente calculamos los valores rms y pico requeridos para el voltaje de salida del secundario (V2):

$$\frac{V1}{V2} = 20$$

$$V2 = \frac{V1}{20} = \frac{220}{20} = 11V\ (rms)$$

$$V2p = \sqrt{2}V2 = 1{,}4142 \times 11 = 15{,}6V$$

Por tanto, ignorando las caídas de voltaje en los diodos, el valor medio del voltaje de salida es:

$$Vcc = 2V\pi = 0{,}636 \times 15{,}6 = 9{,}90V$$

Éste sería, idealmente, el valor medido en un voltímetro de CC. Asumiendo una caída total de 1,4V en los diodos del puente rectificador, el valor real medido sería del orden de 9,90V 1,4V = 8,5 V

Puentes rectificadores integrados

La rectificación de onda completa, mediante un puente de diodos, es una de las técnicas de conversión de CA a CC más utilizadas en el diseño de fuentes de alimentación, debido principalmente a que no requiere un transformador con derivación central y proporciona un voltaje de salida con un valor máximo igual al valor pico de entrada. Aunque los puentes rectificadores pueden ser construidos con diodos **discretos** (individuales), una práctica muy común es el empleo de puentes rectificadores **integrados**, los cuales incorporan los cuatro diodos de un circuito puente, con sus respectivas conexiones, en una misma cápsula, **figura 7.58**

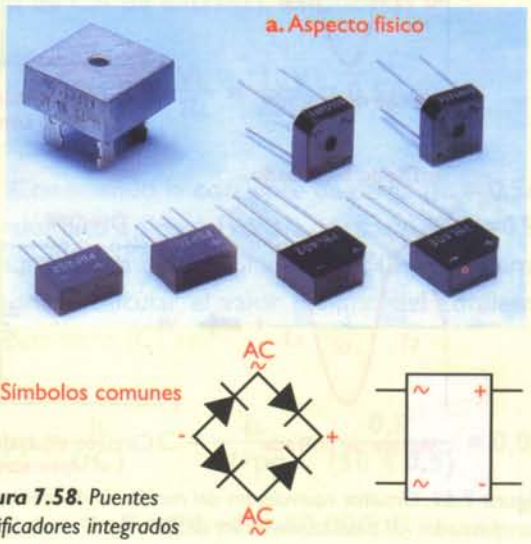


Figura 7.58. *Puentes rectificadores integrados*

Los puentes rectificadores integrados se ofrecen en una gran variedad de presentaciones y, al igual que los diodos rectificadores, se especifican por su máxima corriente y tensión de trabajo. El puente rectificador W04M, por ejemplo, se especifica para una corriente de 1,5A y un voltaje de 400V. Esto significa que cada uno de sus diodos internos puede conducir hasta 1,5A de corriente promedio hacia la carga y soportar hasta 400V de voltaje pico en condiciones de polarización inversa.

Filtros para rectificadores

El voltaje de CC pulsante proporcionado por un rectificador, aunque mantiene una polaridad única, no es adecuado para alimentar circuitos electrónicos. Esto se debe a que su valor no se mantiene constante, sino que varía periódicamente entre cero y el valor máximo de la onda seno de entrada. Para suavizar este voltaje y convertirlo en un voltaje de CC uniforme, similar al de una batería, debe utilizarse un filtro. Este último es generalmente un condensador electrolítico de muy alta capacidad. Los condensadores se examinan en detalle en la sección **Componentes** de este curso.

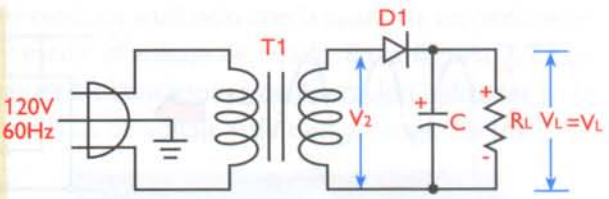


Figura 7.59. *Rectificador de media onda con filtro de condensador*

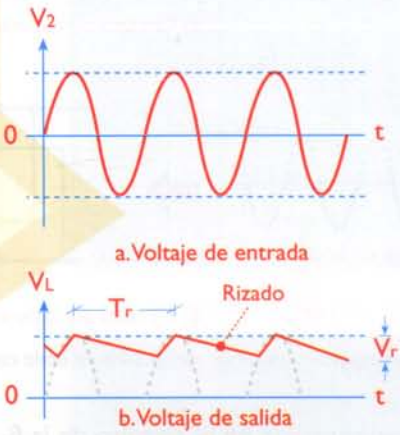


Figura 7.60. *Formas de onda del rectificador de media onda con filtro*

En la **figura 7.59** se muestra como ejemplo un rectificador de media onda con filtro de condensador. En la **figura 7.60** se observa la forma de onda del voltaje de salida obtenido. El funcionamiento del circuito puede comprenderse fácilmente con ayuda de los circuitos equivalentes de la **figura 7.61**. Durante el primer cuarto de ciclo (to-t1),

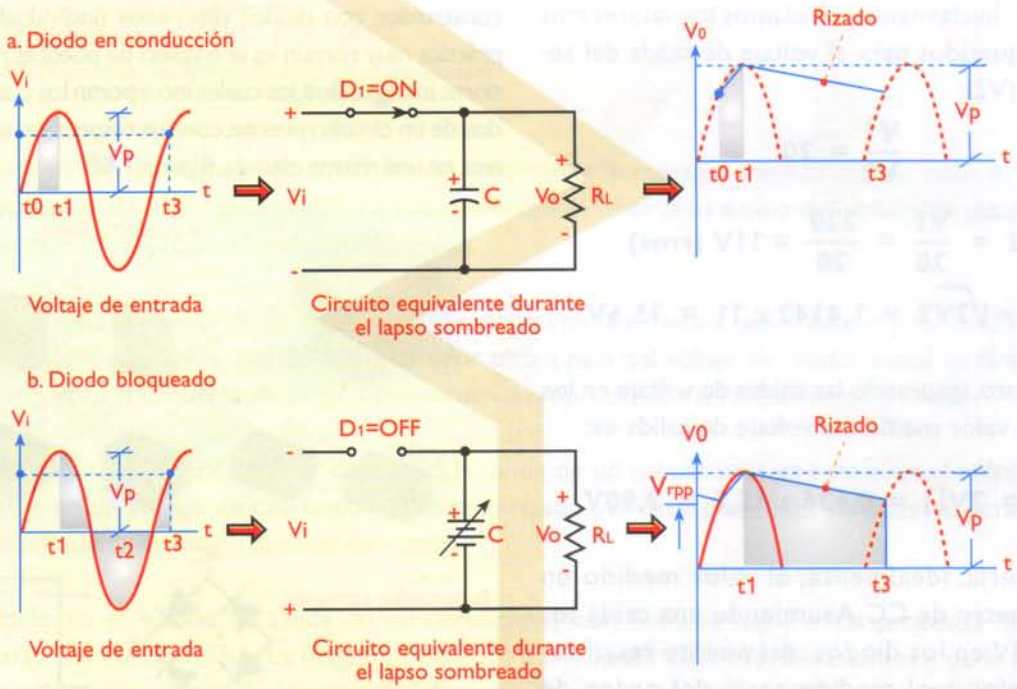


Figura 7.61. *Circuitos equivalentes del rectificado de media onda con filtro. La carga siempre está recibiendo corriente procedente del transformador (a) o del condensador de filtro (b). El diodo D1 permanece bloqueado entre t1 y t3, ¿por qué?*

el diodo D1 conduce, permitiendo que el condensador C se cargue al valor pico (Vp) de la tensión rectificada. Durante el resto del ciclo (t1-t3), el diodo D1 queda polarizado inversamente y por tanto deja de conducir, permitiendo que el condensador se descargue lentamente a través de la carga, actuando como una fuente temporal de voltaje.

A medida que el condensador se descarga, disminuye progresivamente el voltaje entre sus terminales. Cuando la tensión de entrada alcanza nuevamente el valor pico positivo, el diodo conduce brevemente y recarga el condensador. El proceso se repite indefinidamente. Como resultado, la tensión en la carga es una tensión de CC casi ideal, excepto por una pequeña variación periódica de amplitud ocasionada por la carga y la descarga del condensador. Esta variación se denomina **rizado** (*ripple*) y tiene la misma frecuencia del voltaje rectificado. Su amplitud pico a pico (Vrpp) está dada, en forma aproximada, por la siguiente fórmula:

$$Vrpp = \frac{I_L}{(fC)}$$

siendo **IL** la corriente de la carga (A), **f** la frecuencia de la señal de rizado (Hz) y **C** la capacidad del condensador de filtro (F). La frecuencia de rizado (f) es igual a la frecuencia del voltaje CA de entrada para el caso de un rectificador de media onda y el doble de este valor para el caso de uno de onda completa. De este modo, si la frecuencia de entrada es de 50Hz, el rizado puede ser de 50Hz o de 100 Hz, dependido del esquema de rectificación empleado. En general, entre más alta sea la frecuencia de rizado, más fácil es la operación de filtrado.

Observe que, si el circuito de la **figura 7.59** no tiene conectada una carga, el valor de la corriente de carga (IL) es 0 A y, por tanto, la amplitud del rizado (Vrpp) es 0V. Bajo estas condiciones, el voltaje de salida es constante e igual al valor pico de la tensión de entrada (VL=V2p). Note también que cuando el diodo no conduce, el voltaje entre sus terminales puede llegar a ser igual al doble del valor pico de entrada, ¿por qué? Este dato es muy importante para el diseño de este tipo de circuitos.

En la práctica, debe buscarse que la amplitud del rizado (Vrpp) sea lo más pequeña posible ya que este voltaje alterno puede manifestarse como un ruido en los amplificadores de audio, por ejemplo. Para ello, el valor del condensador de filtro (C) debe ser escogido de tal modo que el producto RLxC, llamado la **constante de tiempo** del circuito, sea mucho mayor que el período de la señal de entrada (T=1/f), por lo menos diez veces. De este modo se garantiza que el condensador solo pierda una pequeña parte de su carga almacenada durante el tiempo en que el diodo D1 permanece cortado. El siguiente ejemplo aclarará estos conceptos

Ejemplo. En un rectificador de media onda, con filtro como el de la figura 7.59, el voltaje de CA de entrada (V2) tiene un valor pico de 10V y una frecuencia de 50 Hz. Si el circuito alimenta una carga de 20Ω, ¿cuál debe ser el valor mínimo del condensador de filtro C para que la tensión de rizado esté por debajo de 0,5Vpp? Asuma que la caída de voltaje sobre el diodo, en condiciones de polarización directa, es cero.

Solución. Inicialmente calculamos la corriente de la carga (IL). Puesto que RL=20Ω y VL~10V (aproximadamente igual al valor pico de la tensión de CA de entrada), entonces:

$$I_L = \frac{V_L}{R_L} = \frac{10V}{20\Omega} = 0{,}5A$$

Conociendo la corriente de carga (IL = 0,5A), el valor pico a pico del voltaje de rizado (Vrpp=0,5V) y la frecuencia de este último (f = 50Hz), podemos entonces calcular el valor mínimo del condensador de filtro (C) así:

$$Vrpp = \frac{I_L}{(fC)} \quad C = \frac{I_L}{fVrpp} = \frac{0{,}5}{(50 \times 0{,}5)} = 0{,}02F$$

$$F = 20mF = 20.000\mu F$$

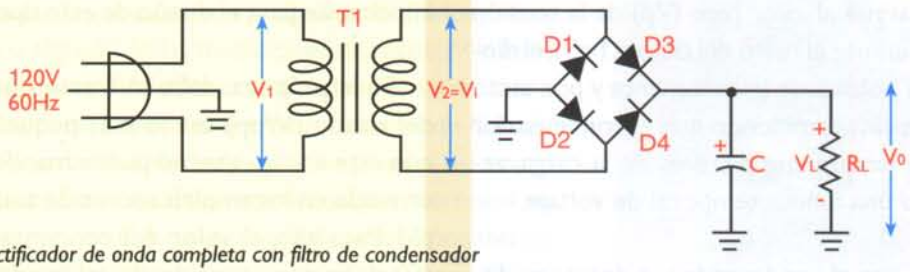


Figura 7.62. *Rectificador de onda completa con filtro de condensador*

Por tanto, se requiere como mínimo un condensador de filtro de 20.000µF. Este último puede ser obtenido, por ejemplo, conectando en paralelo 2 condensadores electrolíticos de 10.000 µF, 6 de 3.300µF, 10 de 2.200µF, etc.

Puesto que el valor máximo de la tensión de salida es de 10V, el voltaje nominal de este condensador puede ser de 16V o más. Observe que el producto RL x C (400 ms) es mucho mayor que el período del voltaje de entrada (20ms).

Rectificador de onda completa con filtro

En un rectificador de media onda, el condensador de filtro se recarga solamente una vez durante cada ciclo del voltaje de entrada. Por tanto, debe suministrar corriente a la carga durante la mayor parte del tiempo. Esto obliga a utilizar condensadores de gran capacidad para minimizar el rizado y sostener la corriente de la carga.

Un mejor resultado se obtiene utilizando un rectificador de onda completa, **figura 7.62**. En este caso, el condensador se recarga dos veces por semiciclo, lo cual implica que su tiempo de descarga se reduce a la mitad. Como resultado, disminuye el rizado y el voltaje de salida se mantiene casi constante, muy próximo al valor pico.

Observe que los diodos D3 y D2 conducen durante los semiciclos positivos del voltaje de entrada (V2), mientras que los diodos D1 y D4 lo hacen durante los semiciclos negativos.

En cada caso, a través de los diodos circula la mitad de la corriente de carga, ya que la otra mitad es suministrada por el condensador de filtro. En la figura 7.63 se observa la forma de onda del voltaje de salida de CC de este circuito. La amplitud del rizado se calcula de la misma forma que para el rectificador de media onda, excepto que ahora la frecuencia de la ondulación (f) es el doble de la frecuencia de entrada. El siguiente experimento aclarará estos conceptos.

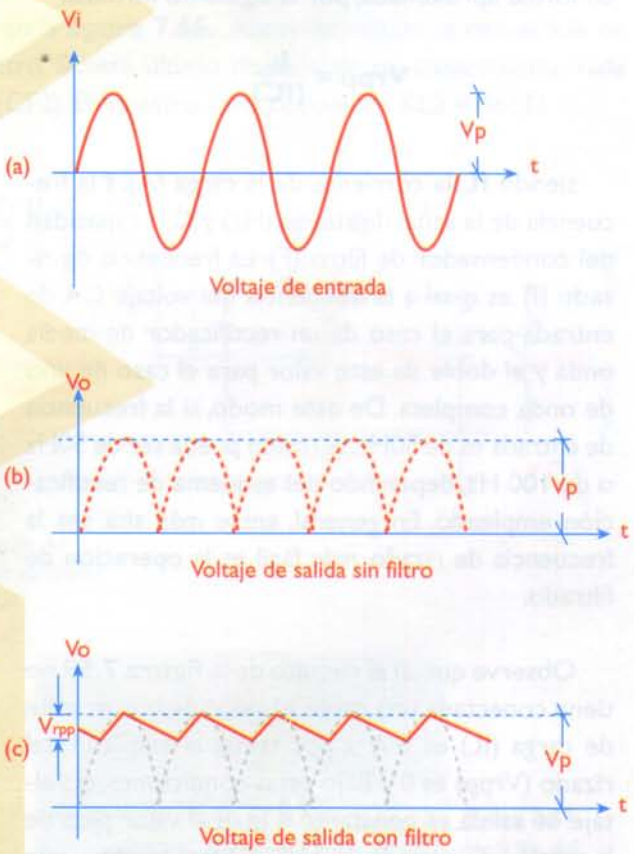


Figura 7.63. *Forma de onda del voltaje de salida de un rectificador de onda completa con filtro de condensador*

Experimento 7.3. Rectificador de onda completa tipo puente con filtro de condensador

Objetivos

- Comparar cuantitativamente el funcionamiento de un rectificador de onda completa con y sin filtro de salida.
- Observar en un osciloscopio las formas de onda del voltaje de salida de un rectificador de onda completa con y sin filtro
- Medir la amplitud del voltaje de rizado de un rectificador de onda completa para distintos valores del condensador de filtro

Materiales necesarios

Los mismos del **experimento 7.1** junto con los siguientes elementos adicionales:

- 1 Puente rectificador de 1A/400V (W04M o equivalente) (BR1)
- 1 Resistencia de 470 Ω, 1/2W (RL2)
- 1 Resistencia de 100Ω, 2W (RL3)
- 1 Condensador electrolítico de 3.300µF/35V (CF1)
- 1 Condensador electrolítico de 1.000µF/35V (CF2)
- 1 Condensador electrolítico de 220µF/35V (CF3)

Procedimiento

1. Repita los pasos 1 hasta 4 del **experimento 7.1**, si todavía no lo ha hecho, para probar el transformador y proveerlo de sus respectivos cables de conexión. En caso contrario, continúe con el siguiente paso.

2. Tome el puente rectificador e identifique sus terminales, **figura 7.64**. Observe que los terminales de entrada de CA están ambos marcados con el símbolo «~», mientras que los terminales de salida de CC están marcados con los símbolos «+» (positivo) y «-» (negativo).

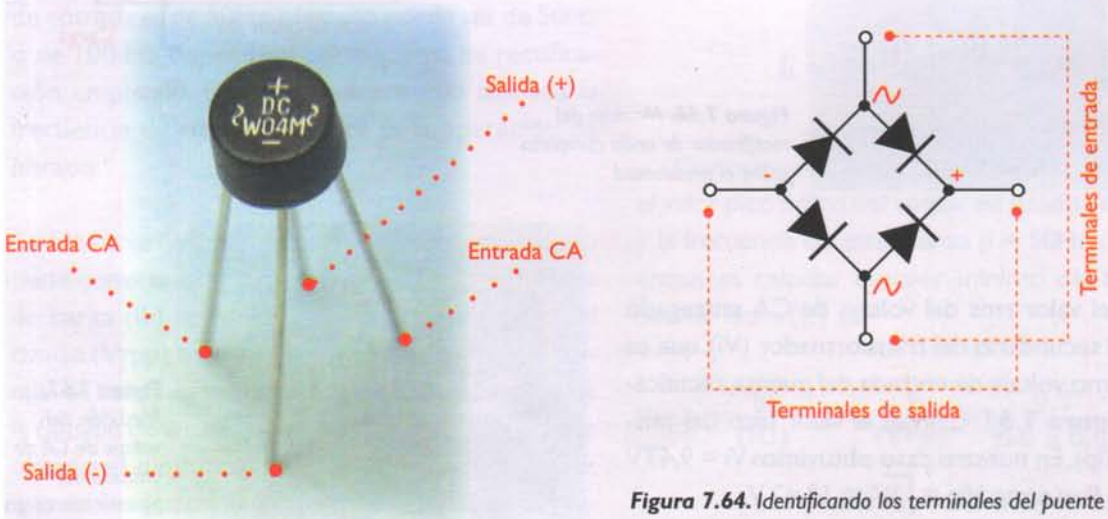


Figura 7.64. *Identificando los terminales del puente rectificador*

3. Pruebe el puente rectificador. Para ello, configure su multímetro como óhmetro o como probador de diodos y efectúe todas o algunas de las mediciones de resistencia indicadas en la **figura 7.65**. Observe que debe obtenerse una lectura de alta resistencia entre los terminales de CA, sin importar la polaridad de las puntas de prueba, así como entre los terminales de CC o entre cualquier terminal de CC y cualquiera de CA con la punta de prueba positiva en «+», o la negativa en «-». Bajo cualquier otra condición, debe obtenerse una lectura de baja resistencia. ¿Podría usted explicar por qué se obtienen estas lecturas?

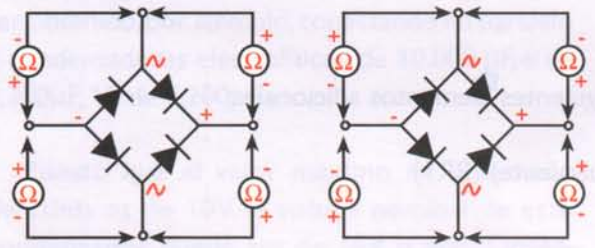
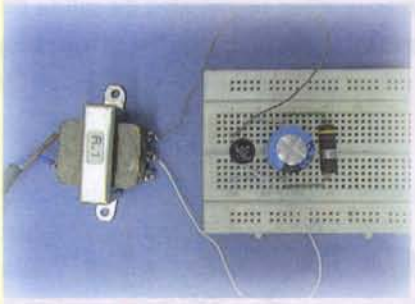


Figura 7.65. *Probando el puente rectificador*

4. Arme sobre el *protoboard* el circuito mostrado en la **figura 7.66.** Antes de instalar la resistencia de carga (RL2), mida su valor real con el multímetro. Si este último dispone de un capacímetro, mida también el valor real del condensador de filtro (CF2). En nuestro caso, obtuvimos RL2 = 465Ω



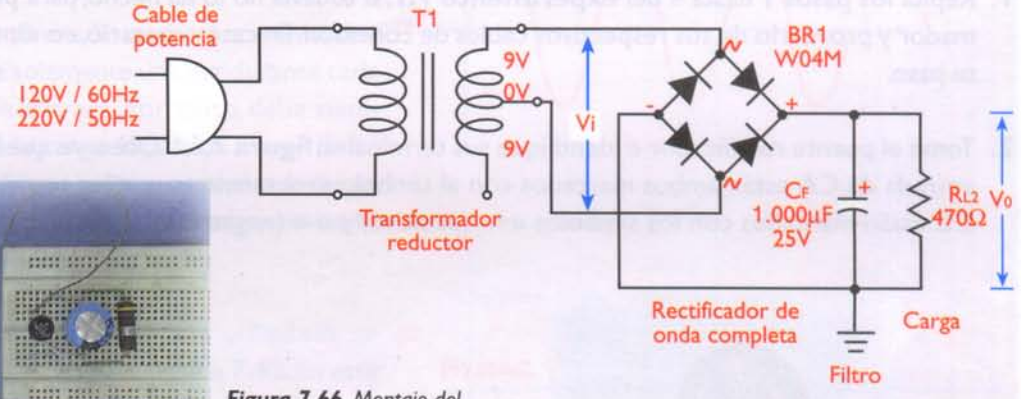


Figura 7.66. *Montaje del rectificador de onda completa sobre el protoboard*

5. Mida el valor rms del voltaje de CA entregado por el secundario del transformador (Vi), que es el mismo voltaje de entrada del puente rectificador, **figura 7.67**. Calcule el valor pico del mismo (Vip). En nuestro caso obtuvimos Vi = 9,49V (rms). Por tanto, $Vip = \sqrt{2}Vi = 13,42V$

Figura 7.67. *Medición del voltaje de CA de entrada del puente con carga*

6. Mida el valor medio del voltaje de CC sobre la carga (Vo), que es el mismo voltaje de salida del rectificador o entre los terminales del condensador, **figura 7.68.** En nuestro caso, obtuvimos Vo= 12,01 V (práctico). El valor teórico esperado de este último, asumiendo una caída de 0V en el puente y una frecuencia de red de 60Hz, era Vo = 13,28 V.

Figura 7.68. *Midiendo el voltaje de CC de salida*

Figura 7.69. *Medición del voltaje de salida del rectificador sin filtro*

7. Retire ahora el condensador de filtro, **figura 7.69**. Mida nuevamente el valor del voltaje de CA de entrada (Vi) y del voltaje de CC de salida (Vo). En nuestro caso obtuvimos Vi= 9,49 V (rms) y Vo = 7,38V (práctico). El valor teórico esperado de este último era 8,54 V

8. Reinstale ahora el condensador de filtro en su posición original y retire la resistencia de carga, **figura 7.70**. Mida nuevamente el valor del voltaje de CA de entrada (Vi) y del voltaje de CC de salida (Vo). En nuestro caso obtuvimos Vi= 9,49 V (rms) y Vo = 13,42V (práctico). El valor teórico esperado de este último era Vo = 12,02V

Figura 7.70. *Medición del voltaje de salida del rectificador con filtro y sin carga*

Carga	Filtro	Voltaje de salida Vo		
RL	CF	Con RL y CF	Sin CF	Sin RL
470Ω	1.000µF			
470Ω	100µF			
470Ω	3300µF			
100Ω	1.000µF			
100Ω	100µF			
100Ω	3.300µF			

Figura 7.71. *Tabla de resultados*

9. Repita los pasos 7, 8 y 9 con las demás combinaciones de resistencias de carga (RL) y de condensadores de filtro (CF), relacionados en la lista de materiales. Llene entonces una tabla como la mostrada en la **figura 7.71**, donde aparecen registrados los valores del voltaje de salida (Vo) medidos bajo diferentes condiciones. Derive sus propias conclusiones.

10. El comportamiento del circuito anterior puede ser también analizado con la ayuda de un osciloscopio. Este último nos permitirá, además, observar y medir el voltaje de rizado. En la **figura 7.72** se observan las formas de onda obtenidas para algunas de las condiciones de operación indicadas en la tabla de la figura 7.71. También se indican algunas medidas de voltaje y de tiempo importantes.

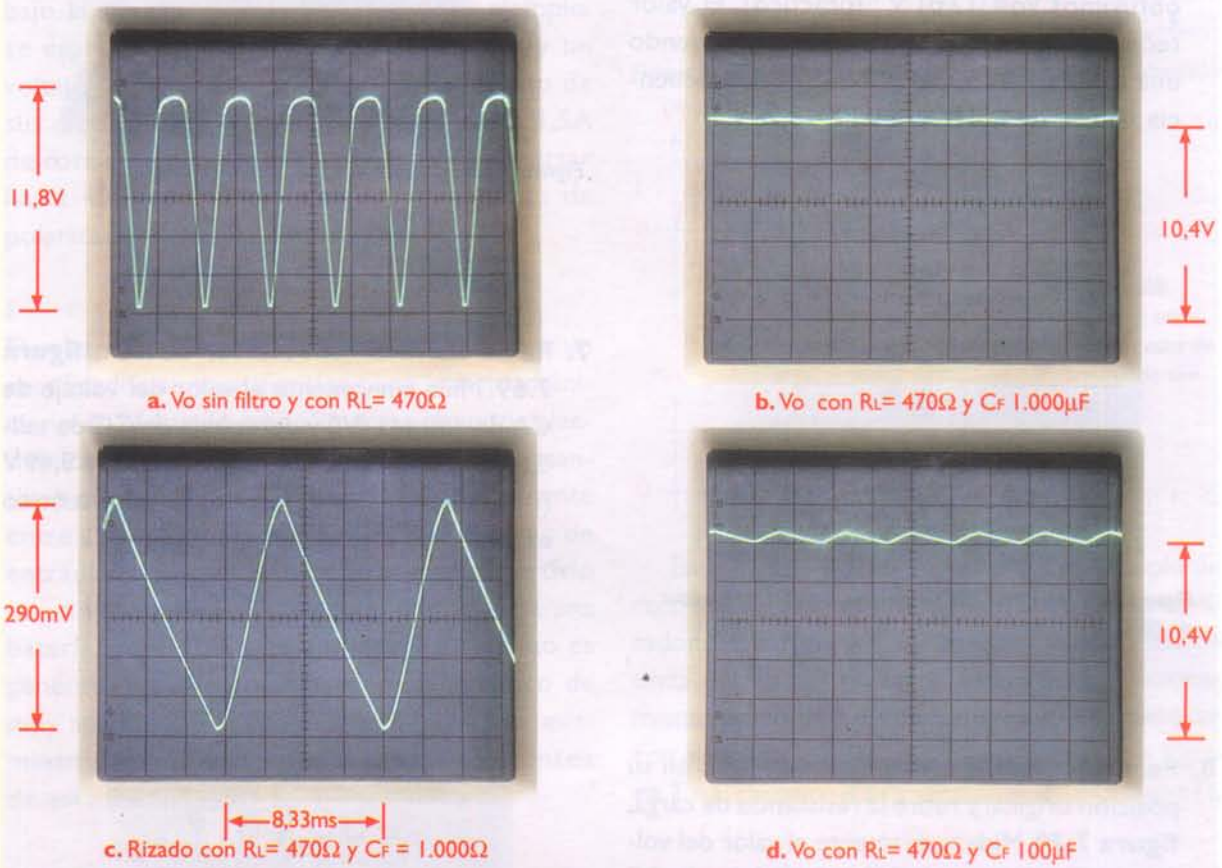


Figura 7.72. *Observando las formas de onda en un osciloscopio*

Conclusiones

1. El valor medio del voltaje de salida de un rectificador aumenta a medida que lo hace el valor del condensador de filtro. Esto se debe a que disminuye el valor pico a pico del voltaje de rizado, el cual es inversamente proporcional a la capacidad.

2. El valor medio del voltaje de salida de un rectificador aumenta a medida que lo hace el valor de la resistencia de carga. Esto se debe a que disminuye el valor pico a pico del voltaje de rizado, el cual es directamente proporcional a la corriente de carga e inversamente proporcional a la resistencia de la misma.

3. El efecto neto del condensador de filtro a la salida de un rectificador es convertir el voltaje de CC pulsante en un voltaje de casi uniforme, caracterizado por unas pequeñas variaciones periódicas de amplitud que constituyen la señal de rizado.

4. El rizado en el voltaje de salida de un rectificador con filtro se debe a los procesos de carga y descarga del condensador. La magnitud de estas variaciones depende, directamente de la corriente de carga e inversamente de la capacidad del filtro. En el caso de un rectificador de onda completa, la frecuencia del rizado es igual al doble de la frecuencia del voltaje de CA de entrada.

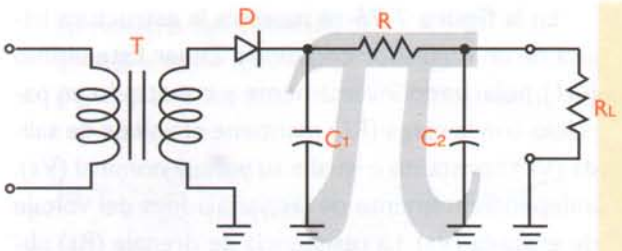


Figura 7.73. Rectificador de media onda

Otros tipos de filtros

Los voltajes rectificados en media onda son más difíciles de filtrar que los rectificados en onda completa, debido a que requieren condensadores de muy alta capacidad para compensar la ausencia de voltaje durante la mitad de cada ciclo y mantener el rizado dentro de límites razonables. Una alternativa, en estos casos, es utilizar un circuito como el mostrado en la **figura 7.73**, formado por dos condensadores (C1 y C2) y una resistencia (R) conectados de tal forma que recuerdan la letra griega phi (π). Por esta razón se denomina un filtro π.

La idea básica de un filtro pi es conseguir que la mayor parte del rizado aparezca sobre la resistencia en serie (R) en lugar de hacerlo sobre la resistencia de carga (RL). De este modo se atenúan considerablemente las variaciones del voltaje de salida. La principal desventaja de este tipo de filtro es la caída de voltaje que se presenta sobre la resistencia. Por esta razón, solo es adecuado para cargas que exigen muy poca corriente. En algunos casos, la resistencia R se sustituye por una bobina, con lo cual se minimiza la caída de voltaje y se mejora la acción de filtrado.

Fuentes de alimentación reguladas

Como hemos visto, es posible reducir el rizado en el voltaje de salida de un rectificador a cualquier nivel deseado utilizando un condensador de filtro suficientemente grande. Sin embargo, esto no garantiza que el voltaje sobre la carga permanezca constante. De hecho, este último puede variar debido a otras causas, por ejemplo, las fluctuaciones en el voltaje de CA de entrada del transformador o los cambios en la resistencia de la carga. Para minimizar el efecto de estos factores y garantizar un voltaje de salida verdaderamente constante, la mejor solución es utilizar un regulador entre el filtro y la carga, **figura 7.74.** Las fuentes de alimentación con esta característica se denominan **fuentes reguladas**.

La idea básica del regulador en una fuente regulada es, por tanto, mantener constante el voltaje de salida, independientemente de las variaciones en el voltaje de entrada o en la corriente de la carga. El regulador puede estar conectado en serie o en paralelo con la carga y actúa esencialmente como una resistencia variable. En un regulador en serie, por ejemplo, si aumenta el voltaje de entrada, debe aumentar la resistencia del regulador para que el voltaje sobre la carga no cambie. Lo mismo sucede si disminuye la demanda de corriente.

Los reguladores de voltaje están basados en el uso de dispositivos activos como los diodos Zener, los transistores y los circuitos integrados. Estos últimos, denominados comúnmente reguladores **monolíticos**, son los más populares debido a su bajo costo, facilidad de uso y excelentes características de funcionamiento. Además, requieren de una mínima cantidad de componentes externos y normalmente están protegidos contra cortocircuitos, sobrecalentamiento y otras adversidades. Por

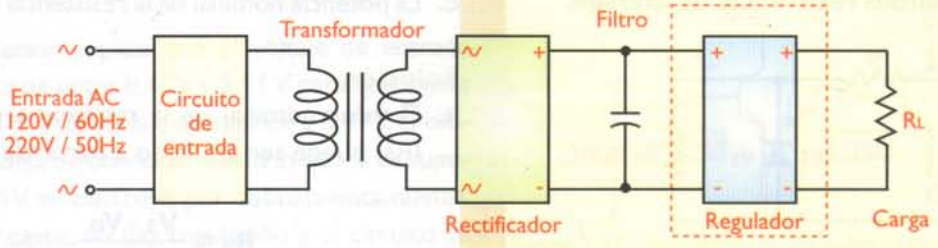


Figura 7.74. Estructura básica de una fuente de alimentación regulada

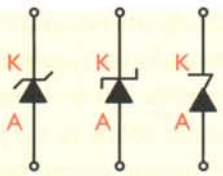


Figura 7.75. Símbolos de un diodo Zener

esta razón, a ellos dedicaremos la mayor parte de nuestra atención. Sin embargo, inicialmente revisaremos los aspectos básicos relacionados con los reguladores discretos, basados en diodos Zener y en transistores.

Reguladores de voltaje con diodo Zener

Un elemento regulador de voltaje muy común es el **diodo Zener, figura 7.75**. Estos diodos están especialmente diseñados para mantener un voltaje constante entre sus terminales, llamado voltaje Zener (Vz), cuando se polarizan inversamente, es decir, con una tensión positiva en el cátodo (K) y negativa en el ánodo (A). En condiciones de polarización directa o mientras la tensión inversa de entrada esté por debajo de Vz, un diodo Zener se comporta como un diodo rectificador común. Los diodos Zener se examinan en detalle en la sección de **Componentes** de este curso.

Los diodos Zener se especifican principalmente por su voltaje nominal (Vz) y la máxima potencia que pueden disipar (Pz). La relación entre Pz y Vz determina la máxima corriente inversa (Izmax) que puede conducir el diodo sin sobrecalentarse. Por ejemplo, la máxima corriente inversa de un diodo Zener de 5,1V y 0,5W es Pz/Vz = 0,5W/5,1V = 0,098A = 98 mA. Si se sobrepasa esta corriente, el diodo puede destruirse. Para evitar que esto suceda, los diodos Zener deben ser protegidos mediante una resistencia en serie, llamada **resistencia de drenaje**.

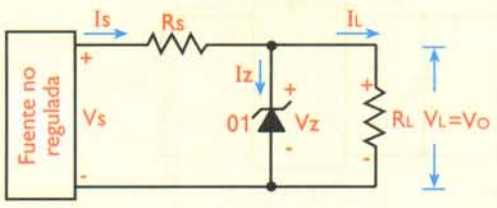


Figura 7.76. Regulador Zener básico con carga

En la **figura 7.76** se muestra la estructura básica de un regulador con diodo Zener. Este último (D1), polarizado inversamente y conectado en paralelo con la carga (RL) mantiene el voltaje de salida (VL) constante e igual a su voltaje nominal (Vz), independientemente de las variaciones del voltaje de entrada (Vs). La resistencia de drenaje (Rs) absorbe la diferencia entre el voltaje de entrada y el voltaje de salida. Su valor se puede evaluar en forma aproximada mediante la siguiente fórmula:

$$Rs = \frac{Vs - Vo}{I_L + Iz}$$

siendo Vs (V) el voltaje de entrada del regulador, procedente del filtro, Vo (V) el voltaje de salida, igual al voltaje Zener (Vz), I_L (A) la corriente de carga máxima e Iz la corriente a través del diodo Zener. Esta última se escoge normalmente de modo que está entre el 10% y el 20% de la corriente máxima. Este tipo de circuitos proporcionan regulación de voltaje únicamente para un cierto rango de voltajes de entrada y de resistencias de carga. Por fuera de estos rangos, el diodo Zener puede bloquearse e incluso destruirse. El siguiente ejemplo aclarará estos conceptos.

Ejemplo 7.5. Se desea diseñar un regulador Zener de 5,1V para alimentar una carga de 5 Ω a partir de una tensión de entrada de 9V. Para ello se utiliza un diodo Zener de 5,1V, 1W. Determine:

a. El valor de la resistencia de drenaje. Asuma una corriente Zener igual al 10% de la corriente máxima.
b. Los límites de variación del voltaje de entrada dentro de los cuales se mantiene la regulación. Asuma que la carga es constante.
c. La potencia nominal de la resistencia de drenaje.

Solución.

a. El valor nominal de la resistencia de drenaje (Rs) puede ser evaluado a partir de la fórmula

$$Rs = \frac{Vs - Vo}{I_L + Iz}$$

En nuestro caso, Vs = 9V, Vo = 5,1V,
$I_L = Vo \div RL = 5,1V \div 5\Omega = 1,02A$
e $Iz = I_L \div 10 = 1,02V \div 10 = 0,102A$. Por tanto:

$$Rs = \frac{(9 - 5,1)}{(1,02 + 0,102)} = \frac{3,9}{1,122} = 3,48\ \Omega$$

Puesto que el valor obtenido (3,48 Ω) no es estándar, puede utilizarse una resistencia de 3,3 Ω, que es el valor comercial más próximo.

b. Los valores mínimo y máximo del voltaje de entrada, entre los cuales el circuito mantiene regulado el voltaje de salida, pueden ser evaluados a partir de la formula $Rs = (Vs-Vo)/(I_L + Iz)$, despejando Vs y teniendo en cuenta que la corriente a través del diodo Zener (Iz) no puede ser superior a su valor máximo (Izm) ni inferior a cero. Esto es:

$$Vs = (I_L + Iz)\ Rs + Vo$$

El valor mínimo de Vs se obtiene haciendo Iz=0. Esto es:

$$Vsmin = (I_L)\ Rs + Vo$$

El valor máximo de Vs, por su parte, se obtiene haciendo Iz = Izm. Esto es:

$$Vsmax = (I_L + Izm)\ Rs + Vo$$

En nuestro caso, I_L=1,02A, Rs=3,3 Ω, Vo=5,1V e Izm=Pz/Vz=1W/5,1V = 0,196A. Por tanto:

$$Vsmin = 1,02A \times 3,3\Omega + 5,1V = 8,47V$$

$$V_{smax} = (1,02A + 0,196A) \times 3,3\ \Omega + 5,1V = 9,11V$$

Lo anterior implica que el voltaje de entrada puede fluctuar entre 8,47V y 9,11 V para que exista regulación. Si este voltaje es inferior a 8,47V, el diodo Zener deja de conducir, mientras que si es superior a 9,11V se destruye por sobrecalentamiento. En ambos casos, no hay regulación y el circuito se comporta como un divisor de voltaje ordinario.

c. La potencia nominal mínima de la resistencia de drenaje puede ser evaluada a partir de la fórmula $Ps = (Vsmax-Vo)^2 / Rs$ así:

$$Ps = \frac{(9,11V - 5,1V)^2}{3,3\ \Omega} = 4,87W$$

Por tanto, como mínimo, debe utilizarse una resistencia de 3,3 Ω/5W. En la práctica, por seguridad, debe escogerse una resistencia con una capacidad de potencia superior a este valor. De este modo, una resistencia de 3,3Ω/10W es más que apropiada.

Reguladores de voltaje con diodo Zener y transistor

Un diodo Zener sólo puede proporcionar regulación dentro de un rango limitado de voltajes de entrada o de corrientes de carga. Esto se debe a que la corriente a través suyo no puede exceder de un cierto valor límite. Para manejar altas corrientes con un diodo Zener, sin perder sus características de regulación, es necesario acoplarlo a un dispositivo activo que se encargue de transportar la corriente de la carga sin alterar el voltaje aplicado a ella. Esta función la puede efectuar un transistor bipolar, **figura 7.77**. Los transistores bipolares se examinan en detalle en la sección **Componentes** de este curso.

Un transistor bipolar es un dispositivo de tres terminales, llamados base (B), colector (C) y emisor (E), que se comporta como una fuente de corriente controlada por corriente. Esto significa que una corriente muy pequeña inyectada en la base (IB) puede controlar el paso de una corriente muy grande entre colector y emisor (IC). La relación entre IC e IB es fija y se denomina la ganancia de corriente del dispositivo. La misma se representa mediante el sím-

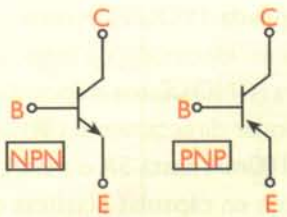


Figura 7.77. *Símbolos (b) de transistores bipolares representativos*

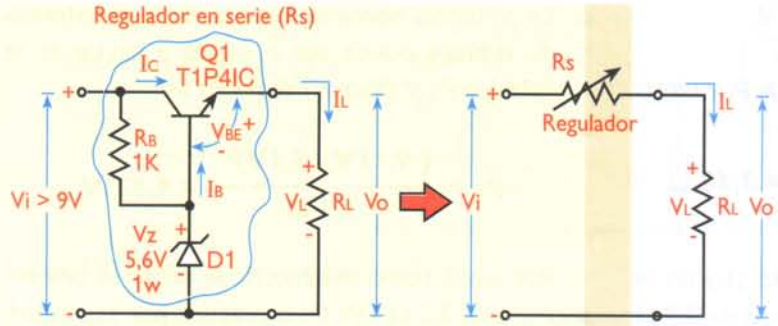


Figura 7.78. *Regulador básico con transistor y diodo Zener. Con los valores de componentes indicados, este circuito entrega una tensión de salida (Vo) de 5V con una capacidad de corriente (IL) superior a 1A. El transistor (Q1) debe estar provisto de un disipador de calor*

bolo ß (léase «beta»). Por tanto, IC=ßIB. Esta característica puede ser aprovechada para regular el voltaje sobre una carga, como se ilustra en la **figura 7.78**

En este caso, el transistor (Q1) actúa como una resistencia variable, conectada en serie con la carga y controlada por la corriente de base (IB), **figura 7.78** (b). El voltaje de salida (Vo) es igual a Vz-VBE, siendo Vz el voltaje del Zener y VBE la tensión entre la base y el emisor de Q1. Esta última es del orden de 0,7V. Si aumenta el voltaje de entrada (Vi), tiende a aumentar el voltaje de salida (Vo), pero esta tendencia es neutralizada automáticamente por Q1, el cual aumenta su resistencia entre colector y emisor para compensar el cambio y mantener así constante el voltaje de salida.

Fuentes de alimentación con reguladores de tres terminales

Actualmente, la mayor parte de las fuentes de alimentación prácticas se diseñan con reguladores de voltaje integrados o monolíticos, los cuales poseen solo tres terminales, **figura 7.79**: uno que recibe la tensión de entrada no regulada (VIN), otro que entrega la tensión de salida regulada (VOUT) y otro que actúa como electrodo de referencia o tierra (GND). Estos dispositivos pueden proporcionar directamente corrientes de carga desde 100mA hasta 5A o más. Los mismos se ofrecen en cápsulas plásticas o metálicas y son extremadamente populares debido a su bajo costo y facilidad de uso.

Los reguladores de tensión monolíticos de tres terminales pueden ser fijos o ajustables, dependiendo de si entregan una tensión de salida fija o variable sobre un cierto rango. Ambos tipos, a su vez, pueden ser positivos o negativos, dependiendo de si entregan una tensión de salida positiva o negativa con respecto a su terminal de referencia. Las series comerciales más populares de cada clase, junto con sus ejemplos representativos, son las siguientes:

Reguladores fijos positivos: LM340-5 (5V); LM340-12 (12V); LM340-15 (15V); LM7805 (5V); LM7806 (6V); LM7808 (8V); LM7809 (9V); LM7812 (12V), LM7815 (15V); LM7818 (18V); LM7824 (24V); LM7830 (30V)

Reguladores fijos negativos: LM320-5 (-5V); LM320-12 (-12V); LM320-15 (-15V); LM7905 (-5V); LM7912 (-12V); LM7915 (-15V)

Reguladores ajustables positivos: LM317 (desde +1.2V hasta +37V); LM317HV (desde +1.2V hasta +57V); LM338 (desde +1.2V hasta +32V)

Reguladores ajustables negativos: LM337 (desde -1.2V hasta -37V); LM337HV (desde -1.2V hasta -47V); LM333 (desde -1.2V hasta -32V)

Además del voltaje o rango de voltajes de salida, otra especificación importante de los reguladores

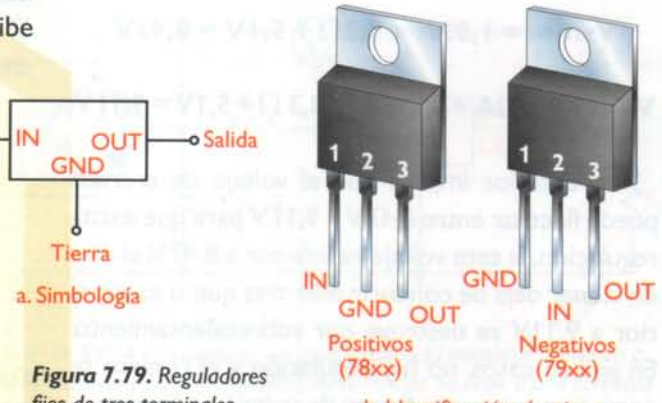


Figura 7.79. *Reguladores fijos de tres terminales*

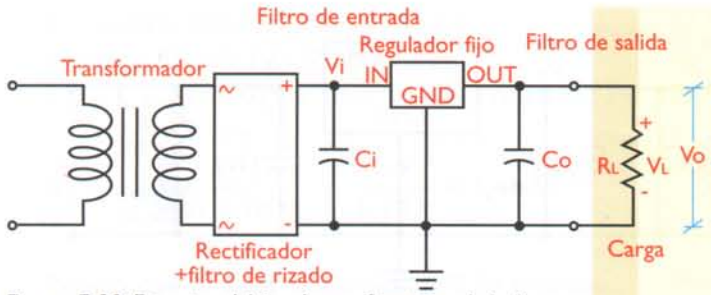


Figura 7.80. *Estructura básica de una fuente regulada fija con regulador de tres terminales*

de tres terminales es su capacidad de corriente. Esta última la determina el tipo de cápsula. En este curso trabajaremos principalmente con reguladores de 1A, los cuales se ofrecen en cápsulas plásticas T ó TO-220. Para corrientes más grandes (hasta 5A, inclusive) deben utilizarse reguladores de cápsula metálica K ó TO-3. Los reguladores mostrados en la **figura 7.79**, son de cápsula T0-220.

Fuentes reguladas fijas

En la **figura 7.80** se muestra la estructura básica de una fuente de alimentación con un regulador de tres terminales. Los condensadores Ci y Co actúan, respectivamente, como filtros de desacople de entrada y de salida. Sus valores están, típicamente, en el rango de 0,1µF a 1µF. Se utilizan para desacoplar o eliminar señales de ruido presentes en la entrada o en la salida del regulador. Por esta razón, deben conectarse tan cerca de este último como sea posible. Para garantizar una óptima regulación, el voltaje de entrada (Vi) debe ser, por lo menos, 2,5V mayor que el voltaje de salida (Vo) deseado. De todas formas, este último no debe ser superior al valor máximo especificado por el fabricante.

Como puede verse, el diseño de fuentes de alimentación con reguladores fijos de tres terminales es extremadamente simple, ya que solo se requiere un par de pequeños condensadores de desacople, uno a la entrada y otro a la salida. Este último puede omitirse en muchos casos. En la **figura 7.81** se muestra como ejemplo una fuente regulada de +15V/1A con un regulador LM7815T. La letra «T» al final de la designación indica que se trata de un regulador de 1A en cápsula TO-220. Las líneas punteadas alrededor del símbolo del regulador indican que el mismo debe estar provisto de un disipador de calor adecuado. Los disipadores de calor se examinan en la sección de **Componentes**.

Una fuente completa de 5V/1A con un regulador 7805, se presenta en la **figura 7.82**. Como regla práctica, el valor rms del voltaje de salida del transformador (9V, en este caso) debe ser, por lo menos, 3V mayor que el voltaje de salida deseado (5V, idem). Asimismo, la capacidad del condensador de filtro (C1) debe escogerse de modo que sea, por lo menos, del orden de 1.000 µF por cada amperio de salida. Nuevamente C2 y C3 actúan como filtros de desacople de ruido. El diodo LED, protegido mediante R1, proporciona una indicación visual de la presencia de voltaje en la salida del regulador.

Las fuentes anteriores entregan un voltaje de salida de una sola polaridad (positiva, en este caso). Muchos circuitos electrónicos, sin embargo, requieren una fuente de alimentación dual o de doble polaridad, por ejemplo ±15V. Para ello, pueden utilizarse dos reguladores de tres terminales complementarios, es decir uno positivo y uno negativo, como se indica en la **figura 7.83.** En este caso, la derivación central del transformador actúa como tierra (GND). La salida «+» del puente rectificador proporciona el voltaje de entrada del regulador positivo (7815), mientras que la salida «-» proporciona el voltaje de entrada del regulador negativo (7915).

En otras ocasiones, la carga exige una corriente superior a la máxima que puede suministrar el regula-

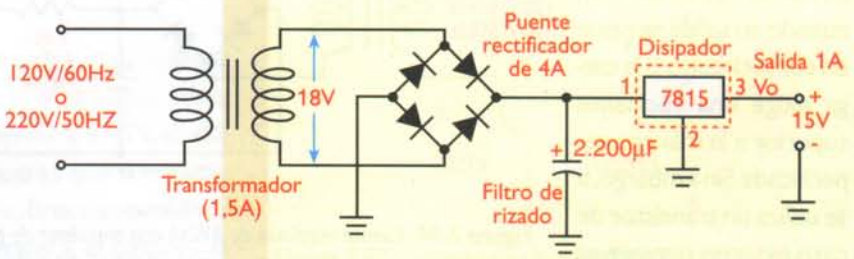


Figura 7.81. *Fuente regulada de 15V/1A.*

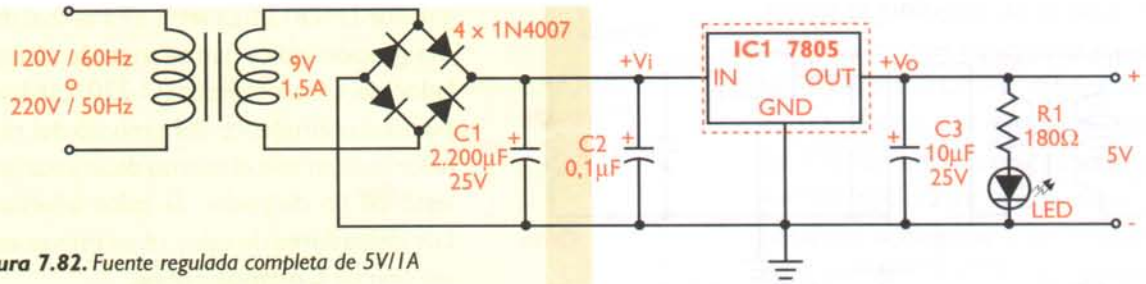


Figura 7.82. *Fuente regulada completa de 5V/1A*

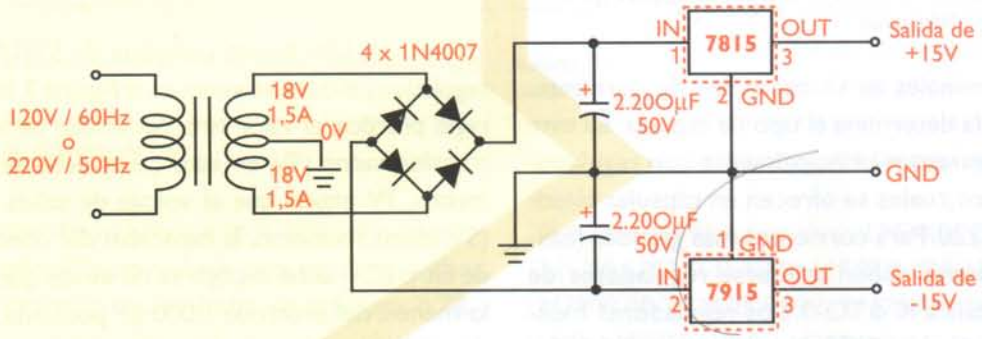


Figura 7.83. *Fuente regulada dual fija de 15V/1A con reguladores de tres terminales complementarios*

dor. En estos casos, debe utilizarse un transistor externo para transportar la corriente excedente, como se indica en la **figura 7.84.** La resistencia R1 se utiliza para detectar la corriente de entrada del regulador y, por tanto, la corriente de la carga. Cuando esta última es superior a 0,1A, el transistor Q1 conduce y transporta la corriente excedente. Por ejemplo, si la carga demanda 3A, el regulador entrega 0,1A y el transistor los 2,9A restantes. El voltaje sobre la carga lo determina el regulador. La máxima corriente de salida la determinan las potencias del transformador y el transistor de paso.

Otro factor muy importante que se debe tener en cuenta en el diseño de fuentes de alimentación, es la protección contra cortocircuitos y sobrecargas. Los reguladores de tres terminales, en particular, cuentan con un mecanismo interno de protección que evita su destrucción cuando su salida se pone en cortocircuito o la carga exige una corriente superior a la máxima especificada. Sin embargo, si se utiliza un transistor de paso externo, siempre es conveniente proteger este último contra tales eventualidades. Una forma de conseguir esta protección, que hace uso de un transistor adicional, se muestra en la **figura 7.85**

En este caso, Q1 actúa como transistor de paso y Q2 como transistor limitador de corriente. Cuando la corriente exigida por la carga es superior a 3,5A, debido a una sobrecarga o un cortocircuito en la salida, entra en conducción Q2, bloqueando la circulación de corriente a través de Q1 y activando el circuito interno de protección de IC1. Como resultado, el circuito deja de regular, reduciendo el voltaje de salida a cero y limitando la

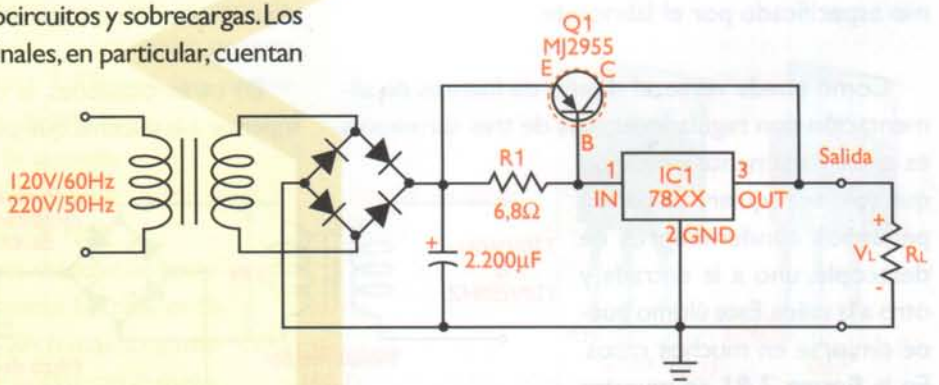


Figura 7.84. *Fuente regulada de 5V/3A con transistor de paso externo. El transistor comienza a conducir cuando el voltaje entre emisor y base es del orden de 0,7V. Esto equivale a una corriente de carga del orden de 100 mA.*

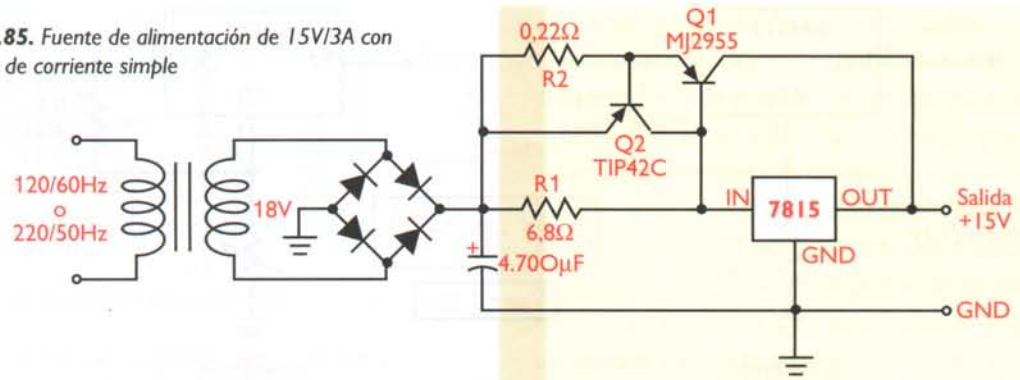


Figura 7.85. *Fuente de alimentación de 15V/3A con limitación de corriente simple*

corriente de cortocircuito a 1A, que es la máxima permitida por el regulador.

Fuentes de alimentación reguladas variables

Los reguladores examinados anteriormente entregan un voltaje de salida fijo, limitado a los valores estándar comercialmente disponibles (5V, 6V, 8V, 12V, etc.). Cuando se requiere de otros voltajes específicos, digamos 3,25V, la mejor alternativa es utilizar reguladores de tres terminales ajustables, **figura 7.86**. Estos dispositivos pueden ser fácilmente programados o configurados para suministrar cualquier voltaje de salida deseado dentro de un rango especificado de valores. Los reguladores ajustables más comunes son los de las series **LM317** (positivos) y **LM337** (negativos).

En la **figura 7.87** se muestra la estructura básica de una fuente de alimentación variable, desarrollada alrededor de un regulador ajustable de tres terminales. Los condensadores de entrada (Ci) y de salida (Co) cumplen la misma función que en un regulador fijo. El voltaje de salida (Vo) depende de la relación entre las resistencias R2 y R1. Para el LM317 y su complemento, el LM337, este voltaje está dado por la siguiente fórmula, válida en el rango desde 1,25V hasta 37V:

$$Vo = 1{,}25\left(1 + \frac{R2}{R1}\right)$$

Típicamente, R1 es del orden de 240 Ω (valor recomendado). En la **figura 7.88** se muestran los circuitos básicos de utilización del LM317 y el LM337. Con los valores de componentes indicados, el voltaje de salida (VOUT) es variable, aproximadamente, desde 1,25V (R2=0) hasta 27V (R2=5k). Para que esto sea posible, el voltaje de entrada (VIN) debe estar siempre, como mínimo, 3V por encima del voltaje de salida deseado. La máxima capacidad de corriente de estos reguladores es del orden de 1,5A en su versión

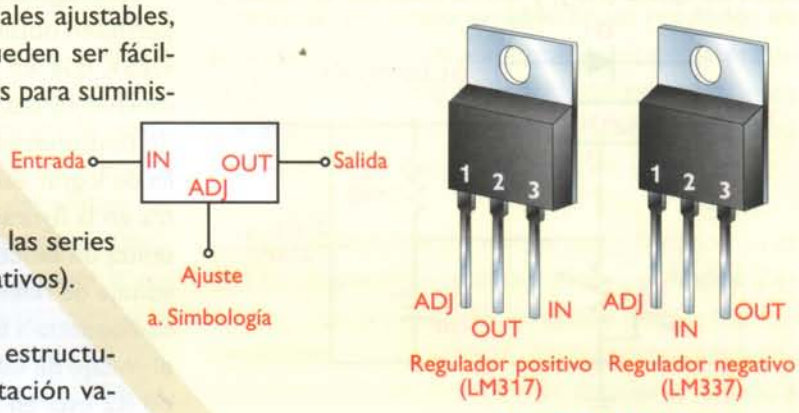


Figura 7.86. *Reguladores ajustables de tres terminales. El terminal de ajuste (ADJ) sustituye el terminal de tierra de los reguladores fijos*

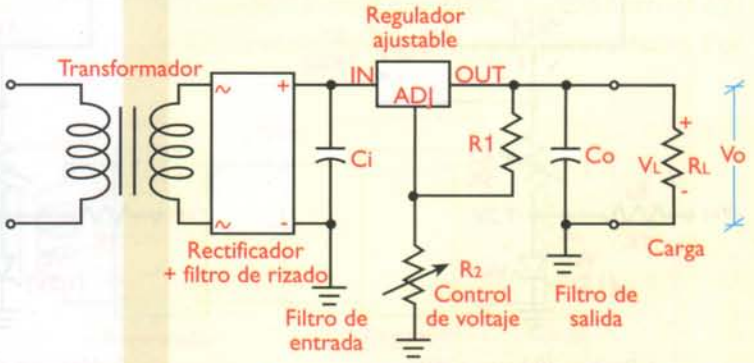
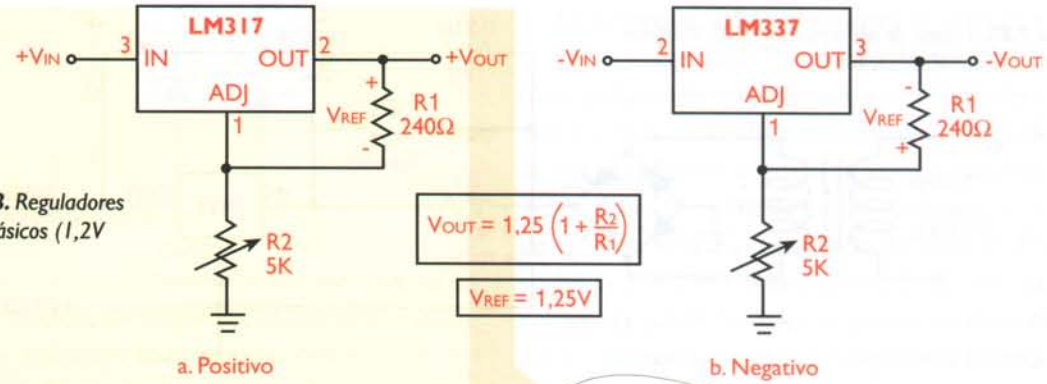


Figura 7.87. *Estructura básica de una fuente regulada ajustable*



a. Positivo

b. Negativo

Figura 7.88. *Reguladores ajustables básicos (1,2V hasta 27V)*

de cápsula TO-220 (LM317T). También se dispone de una versión de baja corriente (LM317L), que entrega hasta 100 mA, y de una versión de alto voltaje (LM317HV), que admite hasta 57V de entrada.

La estructura básica anterior puede ser mejorada mediante la introducción de algunos componentes adicionales, como se muestra en la **figura 7.89.** En este caso, el condensador C1, conectado entre el terminal de ajuste (ADJ) y tierra, minimiza el rizado y provee una mayor inmunidad al ruido. Asimismo, los diodos D1 y D2 protegen el regulador, proporcionando un camino de baja resistencia para la circulación de las altas corrientes de descarga de C1 y C2, generadas cuando se suspende el voltaje de entrada. Este tipo de protección también es aplicable a los reguladores fijos. Nuevamente, el voltaje de salida lo determinan R2 y R1, como se explicó anteriormente.

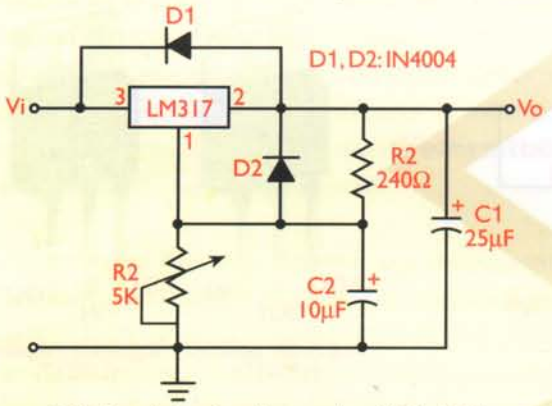
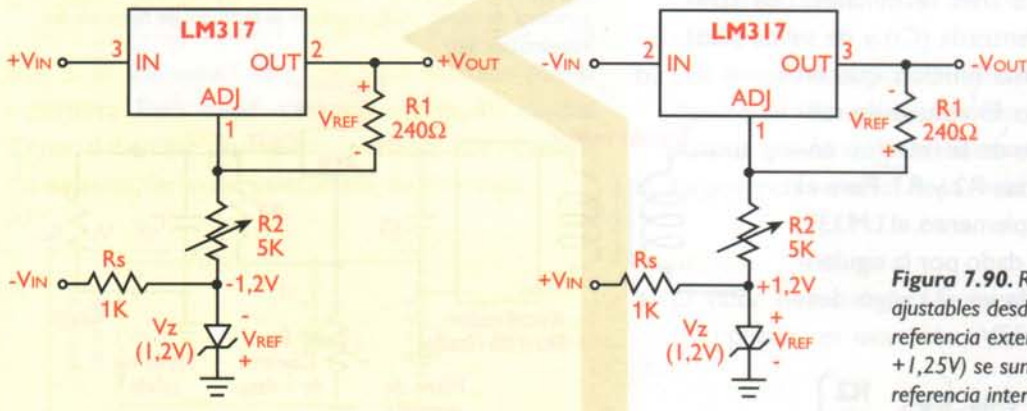


Figura 7.89. *Regulador ajustable completo (12V - 27V)*

Los reguladores ajustables LM317 y LM337 sólo permiten obtener voltajes de salida por encima de 1,25V, que es el valor interno de referencia. En muchas tareas, sin embargo, es deseable disponer de tensiones variables desde 0V. Una forma sencilla de lograr este modo de funcionamiento se ilustra en la figuras 7.90a y 7.90b. En ambos casos, se utiliza un diodo Zener (D1) para proporcionar un voltaje de referencia (Vz) de 1,25V, pero de polaridad opuesta a la del voltaje de salida. De este modo, el voltaje de salida es prácticamente igual a 0 cuando R2 está en su posición de mínima resistencia.



a. Positivo (0 hasta +26V)

b. Negativo (0 hasta -26)

Figura 7.90. *Reguladores ajustables desde 0V. El voltaje de referencia externo (-1,25V ó +1,25V) se suma con el voltaje de referencia interno (+1,25V ó -1,25V), permitiendo que el voltaje de salida pueda variarse desde 0V.*

Experimento 7.4. Experimentando con reguladores de voltaje (voltage regulators) de tres terminales

Objetivos

1. Examinar el funcionamiento de una fuente de alimentación con regulador fijo
2. Examinar el funcionamiento de una fuente de alimentación con regulador ajustable
3. Evaluar el comportamiento de una fuente de alimentación regulada con y sin carga

Materiales necesarios

- 1 Regulador de tres terminales fijo de 5V (LM7805 o LM340-5) (IC1)
- 1 Regulador de tres terminales ajustable (LM317) (IC2)
- 1 Cable de potencia (PL1)
- 1 Transformador (MAGOM 504 o similar) (T1)
  Primario: 120V o 220V
  Secundario: 9V - 6V - 0V - 6V - 9V
  Corriente: 450 mA
- 1 Puente rectificador de onda completa de 1A (W04M o similar)(BR1)
- 1 Condensador de 2.200µF/35V (C1)
- 1 Condensador de 0,22µF/50V (C2))
- 1 Condensador electrolítico de 1µF/25V (C3)
- 1 Condensador electrolítico de 10µF/25V (C4)
- 1 Resistencia de 100 Ω, 1/2W (RL1)
- 1 Resistencia de 47 Ω, 1W (RL2)
- 1 Resistencia de 220 Ω, 1/2W (RL3)
- 1 Resistencia de 220 Ω o 240 Ω, 1/2W (R1)
- 1 Resistencia de 1,2 kΩ, 1/2W (R2A)
- 1 Resistencia de 2,2 kΩ, 1/2W (R2B)
- 1 Resistencia de 470 Ω, 1/2W (R2C)
- 1 Resistencia de 820 Ω, 1/2W (R3)
- 1 LED de 20mA, cualquier color (D3)
- 1 Multímetro digital (DMM)

Procedimiento

1. Tome el regulador fijo (LM340-5 ó LM7805) e identifique sus terminales, **figura 7.91a**. Familiarícese también con la información impresa en la cápsula. Haga lo mismo con el regulador ajustable (LM317), **figura 7.91b**. En nuestro caso, por ejemplo, utilizamos un regulador LM340T5 de National. El prefijo «LM» identifica los circuitos integrados lineales de esta compañía. El número «340» indica que se trata de un regulador de voltaje fijo positivo. La letra «T» se refiere al tipo de cápsula (TO-220) y la capacidad de corriente (1A). El número «5» especifica el voltaje de salida nominal (5V). La cápsula también proporciona la fecha de fabricación y otros datos útiles.

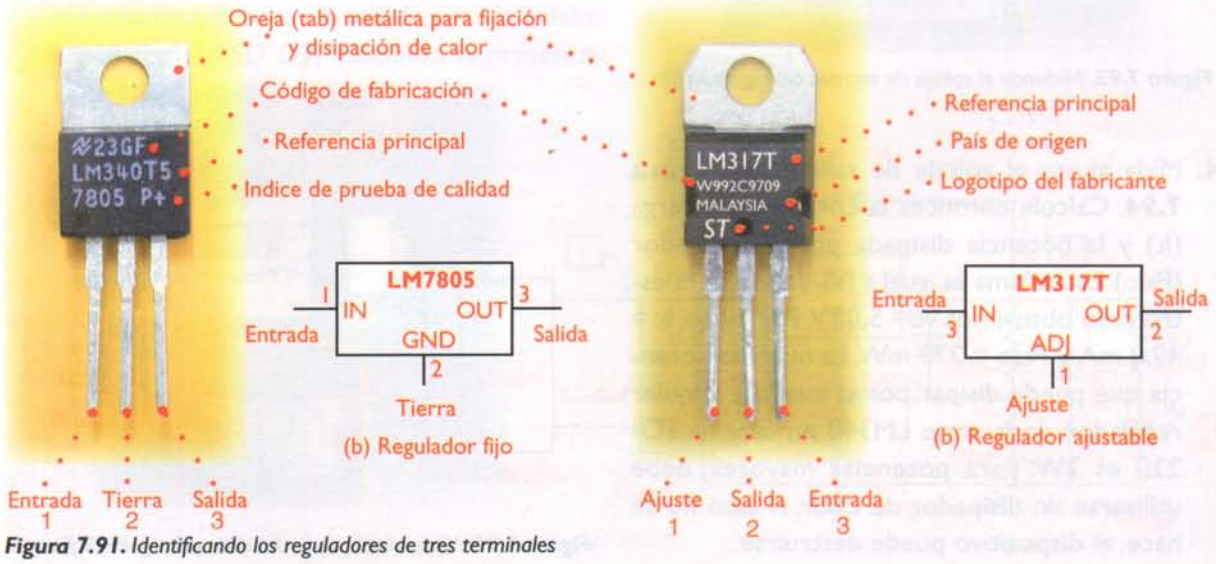
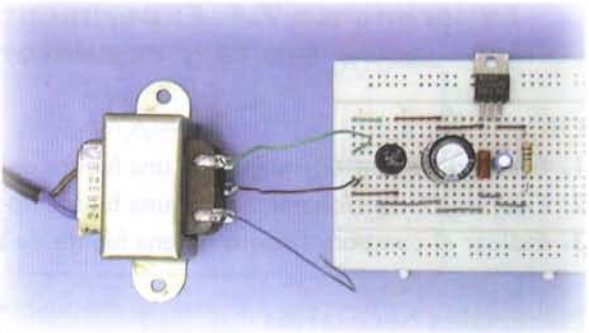


Figura 7.91. Identificando los reguladores de tres terminales

2. Arme sobre el *protoboard* el circuito de la **figura 7.92**, correspondiente a una fuente regulada de 5V. Tenga en cuenta que C2 y C3 deben quedar tan cerca del regulador como sea posible. Antes de instalar la resistencia de carga (RL1), mida su valor real con el multímetro. Mida también el valor real de las otras resistencias de carga (RL2, RL3). En nuestro caso, los valores reales medidos en estas resistencias fueron RL1=102Ω, RL2=47Ω y RL3=217Ω.



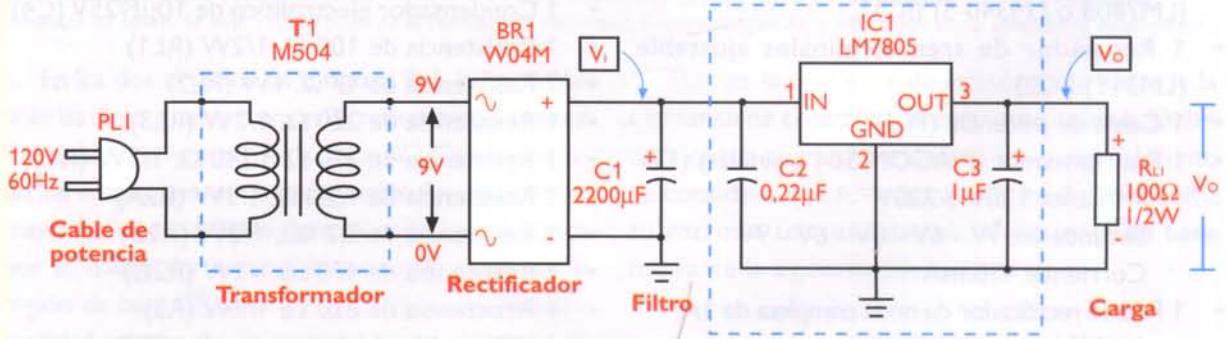


Figura 7.92. *Ensamblaje de la fuente de +5V sobre el protoboard*

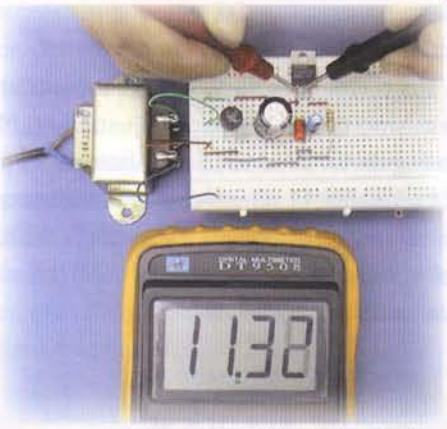


Figura 7.93. *Midiendo el voltaje de entrada del regulador fijo*

3. Con su multímetro configurado como voltímetro para CC, mida el voltaje de entrada del regulador (Vi), **figura 7.93**. En nuestro caso obtuvimos Vi= 11,32V

4. Mida ahora el voltaje de salida (Vo), **figura 7.94**. Calcule entonces la corriente de carga (I_L) y la potencia disipada por el regulador (P_{REG}). Esta última es igual a (Vi-Vo)xI_L. En nuestro caso obtuvimos Vo= 5,08 V. Por tanto, I_L = 49,8 mA y P_{REG} = 275 mW. La máxima potencia que puede disipar por sí misma cualquier regulador de la serie LM340 en cápsula TO-220 es 2W. Para potencias mayores, debe utilizarse un disipador de calor, si esto no se hace, el dispositivo puede destruirse.

Figura 7.94. *Midiendo el voltaje de salida del regulador fijo*

5. Retire la resistencia de carga (R_{L1}) y mida el voltaje de salida del circuito en condiciones de circuito abierto. Designe este voltaje como Voc. Calcule entonces el porcentaje de regulación de voltaje del circuito (RV) mediante la siguiente fórmula:

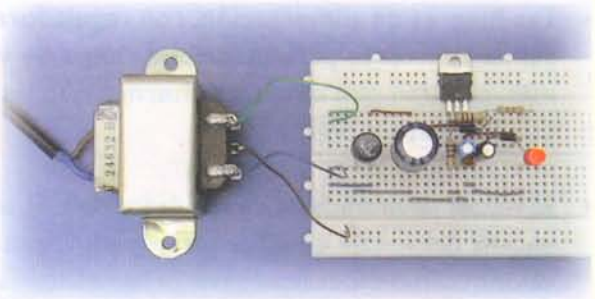
$$RV(\%) = \left[\frac{Voc - Vo}{Voc}\right] \times 100$$

En nuestro caso obtuvimos Voc=5,083 V. Por tanto, RV=0,06%. Repita los pasos 4 y 5 utilizando primero una resistencia de carga de 47 Ω (R_{L2}) y luego una resistencia de carga de 220 Ω (R_{L3}). Calcule en cada caso el porcentaje de regulación. En nuestro caso, con RL=47 Ω obtuvimos Vo=5,07 V y Voc=5,083 V. Por tanto, RV=0,26 %. Asimismo, con RL=220 Ω obtuvimos Vo=5,08 V y Voc=5,083 V. Por tanto, RV=0,06 %. En todos los casos, el porcentaje de regulación estuvo por debajo del 0,3%, que es el máximo especificado para los reguladores de la serie LM340.

Nota: Idealmente, una fuente debería tener un porcentaje de regulación del 0%, es decir, entregar el mismo voltaje con o sin carga (Voc=Vo). En la práctica, esto no siempre sucede debido a que toda fuente tiene una resistencia interna diferente de cero. Lo importante es que esta figura sea muy baja, digamos inferior al 1%.

6. Arme ahora sobre el *protoboard* el circuito de la **figura 7.95**, correspondiente a una fuente regulada ajustable. Nuevamente, asegúrese que C2, C3 y C4 queden tan cerca del regulador como sea posible.

Antes de instalar las resistencias R1 y R2, mida sus valores reales con el multímetro. En nuestro caso, los valores reales medidos de estas resistencias fueron R1=218 Ω y R2=1.197Ω. Al conectar la fuente a la red de potencia, debe iluminarse el LED D2, indicando la presencia de voltaje a la salida del regulador.



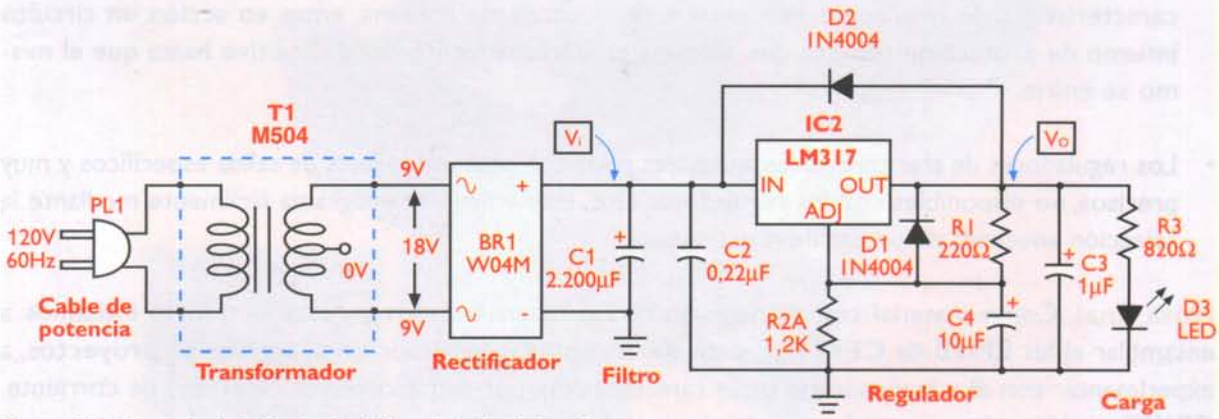


Figura 7.95. Montaje de la fuente ajustable sobre el protoboard

Figura 7.96. *Midiendo el voltaje de salida de la fuente ajustable*

3. Con su multímetro configurado como voltímetro para CC, mida el voltaje de salida de la fuente (Vo), **figura 7.96**. Compare este valor con el esperado teóricamente de acuerdo a la fórmula:

$$Vo = 1{,}25 \times \left[1 + \frac{R2}{R1}\right]$$

En nuestro caso, obtuvimos Vo = 8,16 V (medido) y Vo = 8,11 V (calculado). Por tanto, la fórmula anterior proporciona un grado de exactitud razonable. Repita este paso con otros valores de R2, por ejemplo 2,2 kΩ y 470Ω. En nuestro caso, con R2=2,2kΩ obtuvimos Vo = 13,83 V (medido) y Vo = 13,75 V (calculado). Asimismo, con R2=470Ω obtuvimos Vo=3,94 V (medido) y Vo=3,92 V (calculado).

8. Para finalizar, sustituya la resistencia R2 por un puente de alambre (0). Mida entonces el voltaje de salida (Vo). En nuestro caso obtuvimos Vo=1,257 V, ¿por qué?

Conclusiones

- Las fuentes de alimentación, con reguladores de tres terminales, proporcionan un voltaje de salida constante para un amplio rango de voltajes de entrada y de corrientes de carga. Además, cuentan con circuitos internos que las protegen automáticamente en caso de cortocircuitos y sobrecargas.

- El voltaje de entrada de un regulador de tres terminales debe estar, como mínimo, 2 o 3 voltios por encima del voltaje de salida para que la regulación sea eficiente. Asimismo, no debe ser superior al valor máximo especificado por el fabricante. Este último es del orden de 30 a 40 voltios.

- La corriente de salida suministrada por un regulador de tres terminales puede variar desde 0 (circuito abierto) hasta su valor máximo especificado, por ejemplo 1A, sin que esto afecte sus características de regulación. Por encima de la corriente máxima, entra en acción un circuito interno de protección térmica que bloquea el funcionamiento del dispositivo hasta que el mismo se enfríe.

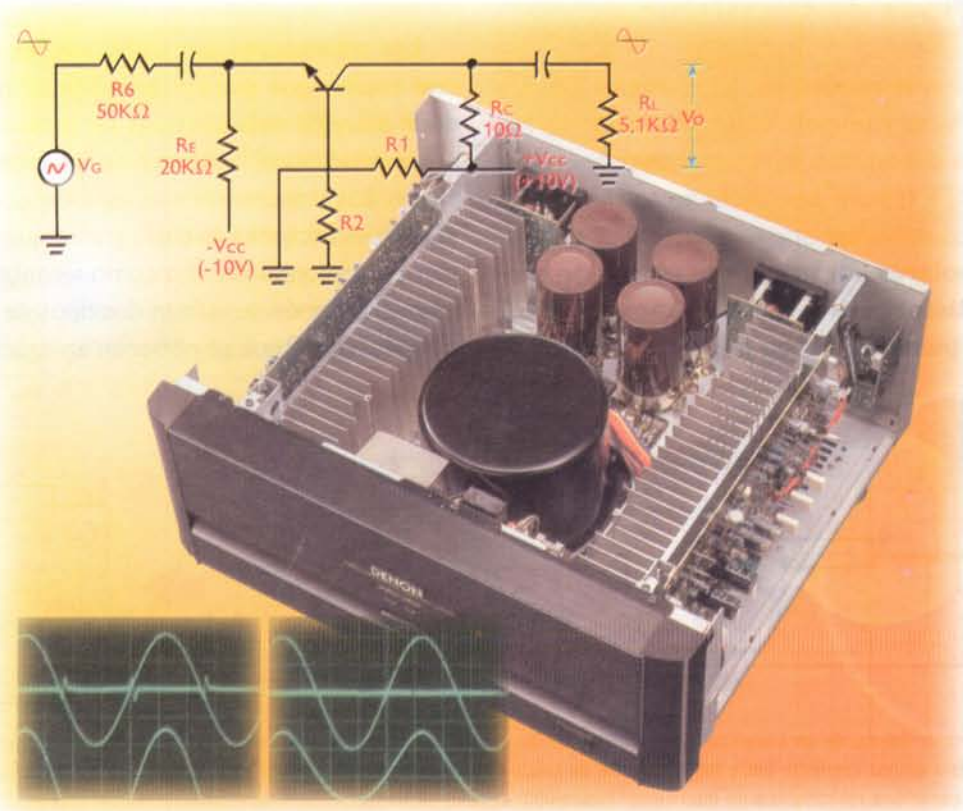
- Los reguladores de tres terminales ajustables permiten obtener voltajes de salida específicos y muy precisos, no disponibles con los reguladores fijos. Este voltaje se programa fácilmente mediante la selección adecuada de un par de resistencias.

Nota final. Como material complementario de los temas tratados en esta lección, lo invitamos a ensamblar el kit **EF-10** de **CEKIT** (Fuente triple regulada), explicado en la sección de **proyectos**, a experimentar con él e incorporarle otras características, por ejemplo, mayor capacidad de corriente. **CEKIT** también ofrece otras fuentes de alimentación para distintos usos. Consúltenos.

Lección 8

Amplificadores y otros circuitos con transistores

Los transistores, discretos o integrados, son los componentes más importantes de la electrónica moderna y los ingredientes esenciales de todos los circuitos electrónicos. En esta lección examinaremos las características generales de los transistores bipolares y de efecto de campo, haciendo énfasis en su aplicación como amplificadores y como interruptores.



¿Qué son los transistores ?

Los **transistores** (*transistors*) son dispositivos de tres terminales que se utilizan para controlar corrientes relativamente grandes a partir de señales de corriente o de voltaje muy débiles, actuando como resistencias o interruptores controlables electrónicamente, **figura 8.1**. Los circuitos que utilizan los transistores como resistencias variables se denominan **lineales** o **análogos**, y los que los utilizan como interruptores se denominan **digitales** o **lógicos**. La mayor parte de los circuitos electrónicos pertenecen a estas categorías.

Los transistores se fabrican no solamente como componentes discretos sino que forman parte vital de los **circuitos integrados** (*chips*), los cuales contienen miles o millones de ellos, construidos e interconectados sobre una diminuta pastilla de silicio. Son, por tanto, ingredientes esenciales de todos los circuitos electrónicos modernos, desde el más simple amplificador (*amplifier*) hasta la más sofisticada computadora.

Tipos de transistores

Los transistores pueden ser básicamente de dos tipos: bipolares y unipolares. Los transistores **bipolares** se denominan también **transistores de unión** o **BJT** (*bipolar junction transistor*) y son dispositivos controlados por corriente. Los transistores **unipolares**, por su parte, se denominan también **transistores de efecto de campo** o **FET** (*field efect transistors*) y son dispositivos controlados por voltaje. Dentro de cada una de estas categorías existen sus propias variantes. En la **figura 8.2** se muestran los símbolos utilizados para identificar algunos de estos dispositivos en los esquemas. En esta lección nos referiremos a los transistores bipolares simplemente como transistores.

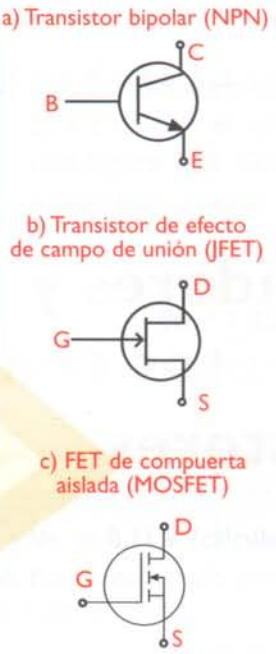


Figura 8.2. *Símbolos comunes de transistores bipolares (a) y de efecto de campo (b, c). Los terminales de un transistor bipolar se denominan base (base) (B), colector (collector) (C) y emisor (emitter) (E), siendo la base (B) el terminal de control. Los terminales de un transistor de efecto de campo, por su parte, se denominan compuerta (gate) (G), drenador (drain) (D) y surtidor (source) (S), actuando la compuerta (G) como terminal de control.*

Los transistores son componentes **activos**, lo cual implica que pueden **amplificar** potencia, es decir entregar más potencia de la que reciben. La potencia adicional la extraen de la fuente de alimentación. Los transistores son también componentes **semiconductores**, lo cual significa que pueden actuar como conductores o como aislantes. Para ello, en su fabricación se utilizan dos tipos de materiales, llamados N y P, que se obtienen agregando impure-

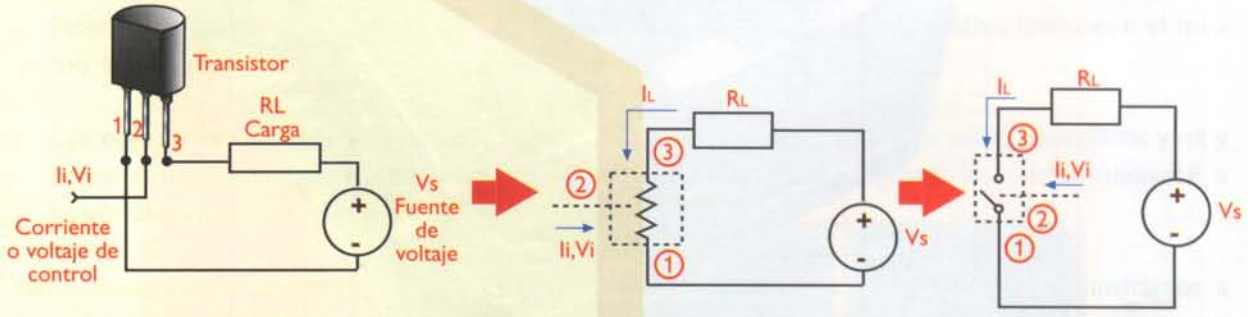


Figura 8.1. *Acción básica de un transistor. Dependiendo de la cantidad de corriente o de voltaje que se aplique al terminal de control (2) circula más o menos corriente entre los terminales de salida (1 y 3), y, por tanto, a través de la carga. En este sentido, un transistor puede actuar como una resistencia o un interruptor controlable electrónicamente.*

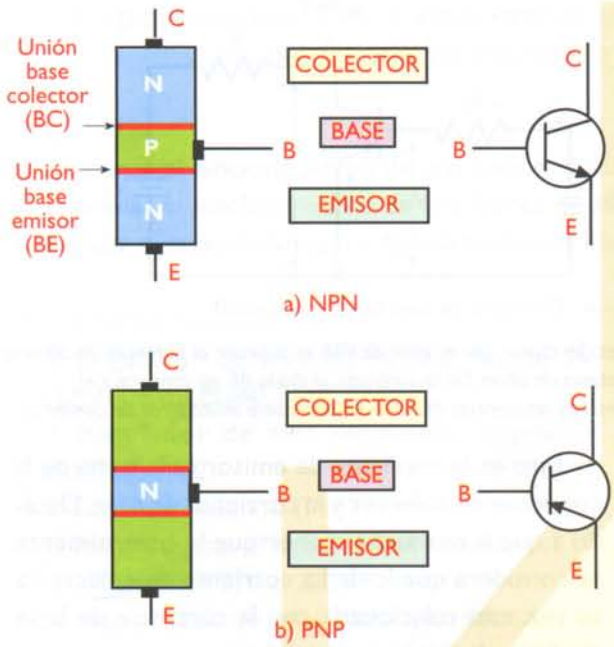


Figura 8.3. *Estructura básica y símbolos de los transistores bipolares. La flecha indica la dirección de circulación de la corriente convencional o de huecos (cargas positivas), que es contraria a la de la corriente real o de electrones (cargas negativas).*

zas a cristales de silicio puros. Este proceso se denomina **dopado**. Todos los dispositivos semiconductores son el resultado de la combinación de materiales tipo N y P en diferentes formas y con muy variados grados de dopado. La teoría de los semiconductores se estudia en la sección de **Componentes** de este curso.

Transistores bipolares

Un transistor bipolar es un dispositivo semiconductor de tres terminales formado por una capa muy delgada de material tipo N Ó P emparedada entre dos capas más gruesas de material del tipo opuesto. Esta disposición origina dos clases de transistores bipolares, uno llamado **NPN** y otro llamado **PNP**, como se muestra en la **figura 8.3**. Observe que la única diferencia entre los símbolos de ambos transistores es la dirección en que apunta la flecha del emisor: en un PNP la flecha entra (**penetra**), mientras que en un NPN la flecha sale (**no penetra**).

La región de la base está poco dopada en relación con el colector y el emisor. Esto significa que tiene una concentración muy baja de portadores mayoritarios de corriente. La región de emisor, por su parte, está fuertemente dopada, de modo que la concentración de portadores mayoritarios supera ampliamente la de la base. Finalmente, la región de colector es muy amplia y tiene una alta concentración de portadores minoritarios en relación a la base, y muy pocos portadores mayoritarios en comparación con el emisor. En un transistor NPN, los portadores mayoritarios son electrones (cargas negativas) mientras que en un transistor PNP son huecos (cargas positivas).

Como funciona un transistor bipolar. Polarización (*polarization*)

Debido a la forma como se alternan las capas P y N en un transistor, se forman dos uniones PN, una entre base y emisor (BE) y otra entre base y colector (BC). Estas uniones actúan esencialmente como diodos (*diodes*). Para que el dispositivo opere correctamente, las mismas deben estar polarizadas de modo que la unión BE quede en polarización directa y la unión BC en polarización inversa. Lo anterior implica que en un transistor NPN, por ejemplo, el colector debe ser más positivo que el emisor y la base más positiva que el emisor, pero más negativa que el colector. Lo contrario se aplica a un transistor PNP. Esta situación se ilustra en la **figura 8.4**.

Antes de continuar, es importante resaltar la notación empleada en este circuito para designar los voltajes entre cualquier par de puntos o entre un punto y tierra. Esta nomenclatura es típica de todos los circuitos con transistores. En general, un voltaje entre cualquier par de terminales se designa mediante un doble subíndice. Por ejemplo, V_{BE} es el voltaje entre la base (B) y el emisor (E). Para especificar el voltaje entre cualquier terminal y tierra se utiliza un solo subíndice. Por ejemplo, V_C es el voltaje de colector (C) referido a tierra. Los voltajes de alimentación se designan mediante un subíndice repetido. Por ejemplo, V_{CC} es el voltaje de la fuente de alimentación asociada con el colector y V_{BB} el de la fuente asociada con la base.

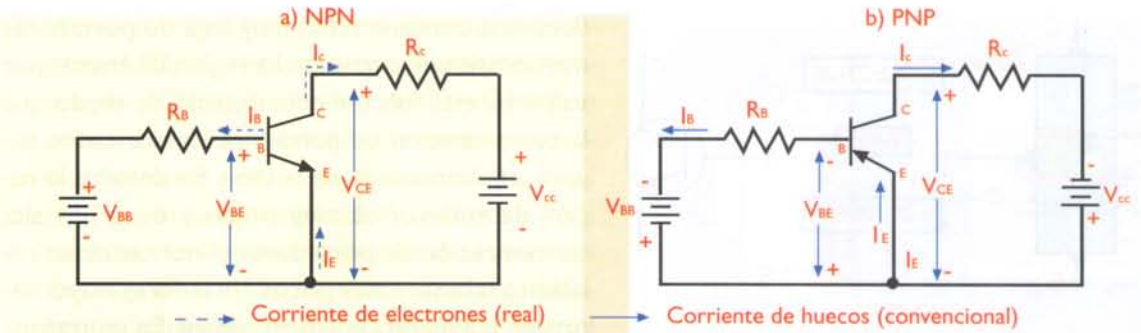


Figura 8.4. *Circuitos básicos de polarización de transistores bipolares. Se asume que el valor de VBB es superior al potencial de barrera de la unión base-emisor (VBE), que es del orden de 0,7V para transistores de silicio. De lo contrario, el diodo BE no conduce y el transistor no opera. Se indica la dirección de la corriente de electrones. Las resistencias RC y RB actúan como limitadoras de corriente.*

En los dos circuitos de la **figura 8.4,** la fuente V_{BB} polariza directamente la unión BE, mientras que la fuente V_{CC} polariza inversamente la unión BC. Como resultado de este esquema de polarización, los portadores mayoritarios en la región de emisor (E) son obligados por el voltaje V_{BB} a cruzar la unión BE y alcanzar la región de base (B). Una vez en la base, una pequeña cantidad (menos del 5%) se desvía hacía el circuito de entrada, atraída por el voltaje V_{BB}. El resto (más del 95%) atraviesan la unión BC y alcanzan la región de colector, donde son atraídos por el voltaje V_{CC}. Este efecto se denomina **acción transistor**.

Por tanto, en un transistor se desarrollan tres corrientes distintas, como se indica en la **figura 8.5**: una corriente de emisor (I_E), una corriente de base (I_B) y una corriente de colector (I_C). Estas tres corrientes están relacionadas mediante la siguiente fórmula:

$$I_E = I_C + I_B$$

Esto es, la corriente de emisor es la suma de la corriente de colector y la corriente de base. Debido a que I_B es mucho menor que I_C, normalmente se considera que $I_C = I_E$. La corriente de colector, a su vez, está relacionada con la corriente de base mediante la siguiente fórmula:

$$I_C = \beta I_B$$

siendo ß (leáse beta) un parámetro propio del transistor llamado la **ganancia de corriente**. Por ejemplo, si en el circuito de la **figura 8.4a**, la ganancia de corriente del transistor es ß =100 y la corriente de base es I_B=40µA, la corriente de colector es entonces $I_C = \beta I_B$ = 100x40 = 4.000µA, es decir 4mA. Usando diferentes valores de V_{BB} y R_B se puede controlar fácilmente la débil corriente de base y, por tanto, la corriente de colector, que puede llegar a ser cientos de veces más grande. Esta última es la propiedad más importante de un transistor y la que lo hace útil como amplificador.

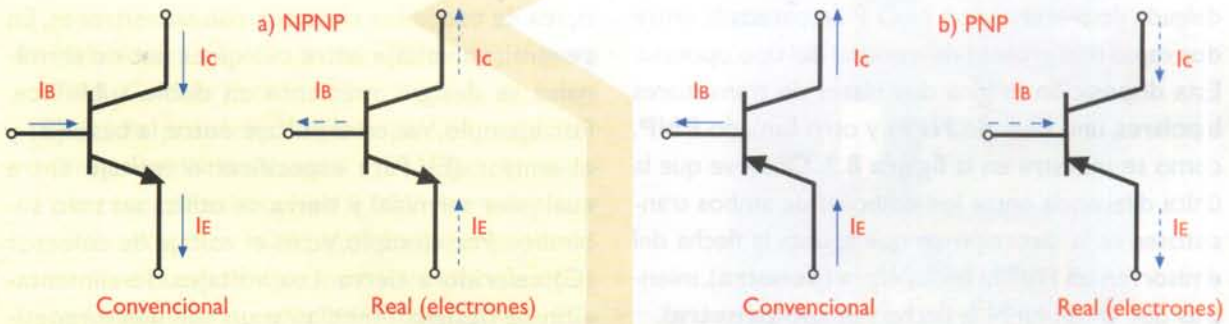


Figura 8.5. *Corrientes en un transistor. Los huecos o cargas positivas, que son los portadores mayoritarios en un transistor PNP, se mueven en dirección de la corriente convencional. Los electrones o cargas negativas, que son los portadores mayoritarios en un transistor NPN, se mueven en dirección de la corriente real. Ambos tipos de corrientes son idénticos desde el punto de vista de sus efectos eléctricos. En lo sucesivo, adoptaremos el sentido convencional de la corriente.*

Curvas características de un transistor

La operación de un transistor puede ser también comprendida gráficamente a partir del análisis de sus **curvas características** de entrada y de salida, **figura 8.6**. La **característica de entrada, figura 8.6b**, muestra como se comporta la corriente de base (IB) en función del voltaje base-emisor (VBE). Es la misma de un diodo normal, lo que significa que solamente comienza a circular una IB cuando VBE alcanza el valor del potencial de barrera de la unión BE, que es del orden de 0,7V. A partir de entonces, VBE crece muy lentamente. Para efectos prácticos, puede asumirse que VBE permanece constante e igual a 0,7V.

La corriente de base (IB) la establecen la fuente VBB y la resistencia RB. La misma se puede calcular a partir de la siguiente fórmula:

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} = \frac{V_{RB}}{R_B}$$

siendo VBB-VBE=VRB la caída de voltaje sobre la resistencia de base (RB). Por ejemplo, si VBB=15V y RB=150k, entonces, asumiendo VBE=0,7V, tendríamos:

$$I_B = \frac{15V - 0,7V}{150k\Omega} = 6,67\ \mu A$$

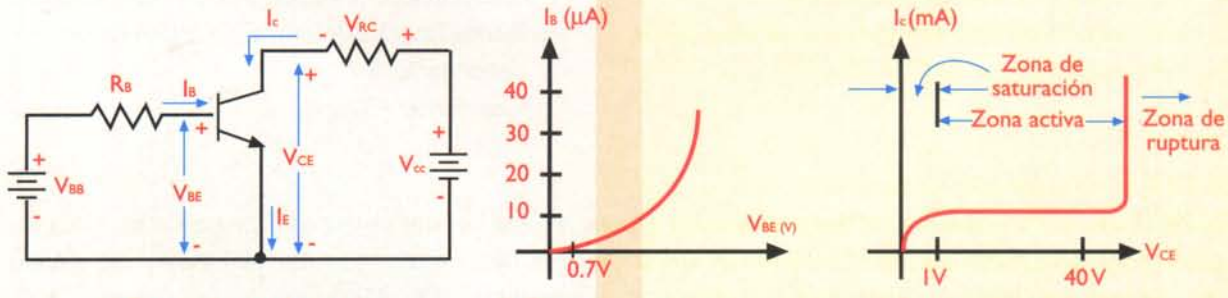
$$V_{RB} = 15V - 0,7V = 14,3V$$

La característica de salida, por su parte, **figura 8.6c**, muestra como se comporta la corriente de colector (IC) en función del voltaje entre colector y emisor (VCE) para una valor dado de la corriente de base (IB). Observe que para valores de VCE entre 0 y un cierto valor mínimo, la IC crece rápidamente hasta un determinado punto. Esta parte de la curva se denomina **zona de saturación**. A partir de entonces, se mantiene constante, hasta un cierto valor máximo de VCE. Esta parte de la curva se denomina **zona activa.** Por encima del VCE máximo, el transistor se destruye. Esta región se denomina **zona de ruptura**. Un transistor nunca debe operarse por encima del valor máximo de VCE.

La zona activa es la más importante de un transistor. En ella, los cambios en la tensión VCE no tienen efecto sobre la corriente IC. En esta zona trabajan los amplificadores y demás tipos de circuitos análogos. Existe también una cuarta zona, no indicada en la **figura 8.6b**, llamada **zona de corte**, que se presenta cuando la corriente de base (IB) es igual a cero. Bajo esta condición, a través del colector circula una corriente de fuga muy pequeña (Iceo), debida a los portadores minoritarios (huecos en un transistor NPN y electrones en un PNP). Las zona de saturación y de corte son utilizas por los circuitos digitales, como los empleados en las computadoras.

La tensión colector-emisor (VCE) la establecen la fuente VCC, la resistencia RC y la corriente IC. La misma se puede calcular a partir de la siguiente fórmula:

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C = V_{CC} - V_{RC}$$



a) Circuito básico de prueba b) Curva característica de entrada c) Curva característica de salida

Figura 8.6. *Curvas de entrada y de salida de un transistor. Observe que el lado común o tierra de cada fuente está conectado al emisor. Por esta razón, el circuito se denomina una configuración en emisor común. Variando VBB y VCC se pueden establecer diferentes tensiones y corrientes en el transistor*

siendo $I_CR_C=V_{RC}$ la caída de voltaje sobre la resistencia de colector (R_C). Por ejemplo, si IC=2mA, RC=4,7kΩ y VCC=12V, entonces:

$$V_{CE} = 12V - 2mA \times 4{,}7k\Omega = 2{,}6\,V$$
$$V_{RC} = 2mA \times 4{,}7k\Omega = 9{,}4V$$

Si se miden los valores de IC y VCE para diferentes valores de IB, se obtiene una familia de curvas características de salida, como la mostrada en la **figura 8.7**. Este tipo de curvas, llamadas también **características de colector** en configuración emisor común, son muy importantes para analizar y diseñar circuitos amplificadores con transistores, como veremos más adelante. Las mismas son suministradas por los fabricantes de transistores en las hojas de datos de sus productos. También se pueden obtener utilizando un instrumento de laboratorio especializado llamado **trazador de curvas**. En el siguiente experimento aclararemos estos conceptos.

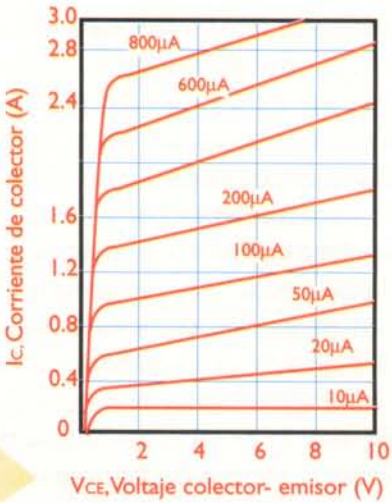


Figura 8.7. *Curvas características de salida de un transistor típico.*

Experimento 8.1 Obtención de las curvas características de un transistor

Objetivos

- Obtener las curvas características de salida de un transistor a partir de datos experimentales
- Observar las curvas características de un transistor con el osciloscopio
- Familiarizarse con la polarización de un transistor
- Aprender a probar transistores
- Aprender a medir la ganancia de corriente de un transistor (b)

Equipos y materiales necesarios

- 1 Multímetro digital
- 1 Osciloscopio de 20MHz, dos canales
- 1 Batería o una fuente regulada de 9V (VBB)
- 1 Batería o una fuente regulada de 12V (VCC)
- 1 Transistor NPN 2N3904 o equivalente (Q1)
- 2 Potenciómetros de 5kΩ (P1, P2)
- 1 Resistencia de 22kΩ, 1/2W (RB)
- 1 Resistencia de 100Ω, 1/2W (RC1)
- 1 Resistencia de 220Ω, 1/2W (RC2)
- 1 Diodo rectificador 1N4004 o equivalente (D1)
- 1 Transformador (MAGOM M504 o equivalente)
  Primario: 120V/60Hz o 220V/50Hz
  Secundario: 9V
  Corriente: 450mA

Información preliminar

El **2N3904** es un transistor NPN de propósito general. Puede ser utilizado como amplificador o como interruptor. Está especificado para una corriente máxima de colector (IC) de 200 mA y un voltaje colector-emisor (VCE) máximo de 40V. Su ganancia de corriente (ß o hFE) puede estar entre 40 y 300. Este parámetro varía mucho de un transistor a otro, aunque sean de la misma referencia y el mismo fabricante. La máxima potencia que puede disipar es de 625mW, lo cual implica que el producto $I_C \times V_{CE}$ debe mantenerse siempre por debajo de este valor.

En este experimento utilizaremos el transistor **2N3904** en la configuración **emisor común**, que es la más empleada en amplificadores. Este modo de conexión se denomina así porque el emisor es el terminal común a los circuitos de entrada y de salida.

Inicialmente, centraremos nuestro interés en analizar cuantitativamente como se comporta la corriente de colector (IC) en función del voltaje colector-emisor (VCE) para diferentes valores de la corriente de base (IB). Los resultados obtenidos los representaremos en una gráfica, la cual corresponderá a una familia de curvas características de salida para este dispositivo particular. También aprenderemos un método para visualizar directamente estas curvas en un osciloscopio y derivar información a partir de ellas.

Procedimiento

1. Tome el transistor **2N3904**. Identifique la base (B), el colector (C) y el emisor (E), **figura 8.8a**. Observe la forma de la cápsula y los datos inscritos en ella.

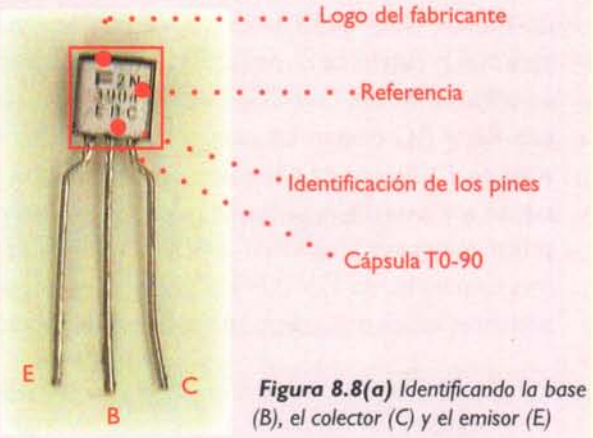


Figura 8.8(a) *Identificando la base (B), el colector (C) y el emisor (E)*

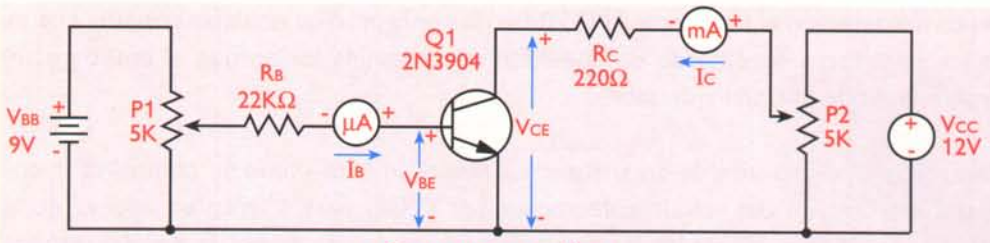
2. Con su multímetro configurado como óhmetro o como probador de diodos, pruebe las uniones BE y BC en condiciones de polarización directa y en condiciones de polarización inversa, como se indica en las **figura 8.8b** y **8.8c** respectivamente. Deberá obtener una lectura de baja resistencia en el primer caso y de alta resistencia en el segundo, ¿por qué?. También deberá obtener una lectura de alta resistencia entre el colector (C) y el emisor (E), con cualquier polaridad de las puntas de prueba, ¿por qué?.

Figura 8.8b. *Prueba de las uniones BE y BC en polarización directa*

Figura 8.8c. *Prueba de las uniones BE y BC en polarización inversa*

Figura 8.8d. *Midiendo la ganancia de coriente*

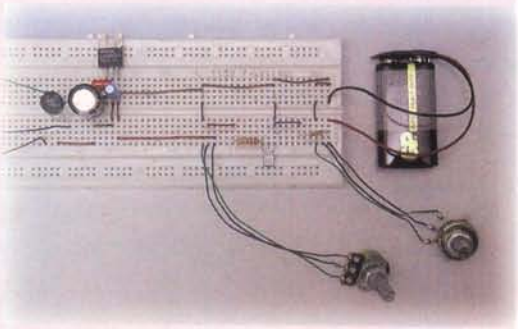
3. Si su multímetro posee la función de probador de transistores, mida también la ganancia de corriente (ß o h_{FE}), como se muestra en la **figura 8.8d.** En nuestro caso obtuvimos ß=226, que está dentro del rango de valores especificado para este dispositivo.



a. Diagrama esquemático

Figura 8.9 *Circuito experimental para determinar las curvas características de salida del transistor*

4. Arme ahora sobre el *protoboard* el circuito de prueba mostrado en la **figura 8.9**. En el lugar de los medidores de corriente (μA y mA), coloque puentes de alambre fácilmente removibles. Utilizaremos el potenciómetro P1 para fijar la corriente de base (IB) y el potenciómetro P2 para fijar el voltaje colector-emisor (VCE). Las resistencias RB y RC limitan las corrientes IB e IC a valores seguros. La fuente de alimentación de colector (VCC) puede ser externa o, como en nuestro caso, construida sobre el mismo *protoboard* utilizando un regulador de tres terminales de 12V (LM340T12) y unos pocos componentes asociados, como se explicó en la **lección 8**.



b. Fotografía del montaje

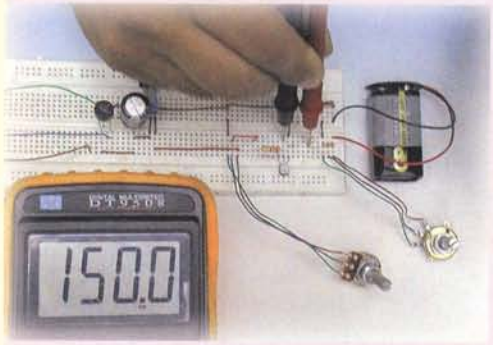


Figura 8,10a. *Midiendo la corriente de base (IB)*

5. Retire el puente del circuito de base e instale en su lugar el multímetro, configurado como microamperímetro, para medir la corriente de base (IB). Gire lentamente el potenciómetro P1 hasta que la corriente de base (IB) sea de 150μA, **figura 8.10(a).**

Retire el multímetro y reinstale el puente del circuito de base. Mida entonces el voltaje resultante entre base y emisor (VBE), **figura 8.10(b).** Anote los resultados obtenidos. En nuestro caso obtuvimos VBE=0,715V e IB=150μA.

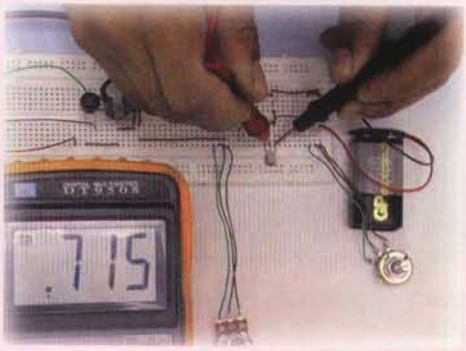


Figura 8.10b. *Midiendo el voltaje base-emisor (VBE)*

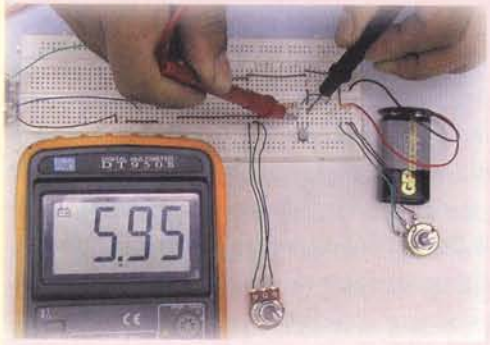


Figura 8.10c. *Midiendo el voltaje colector-emisor (VCE)*

6. Con su multímetro configurado como voltímetro de CC, mida el voltaje entre colector y emisor (VCE), girando lentamente el potenciómetro P2 hasta que la lectura sea de 6V o un valor muy próximo, **figura 8.10(c).** En nuestro caso obtuvimos V_{CE} = 5,95V

Retire entonces el puente del circuito de colector e instale en su lugar el multímetro, configurado como miliamperímetro, para medir la corriente de colector (IC), **figura 8.10(d).** Anote los valores obtenidos. Hecho esto, retire el multímetro y reinstale el puente de colector. En nuestro caso obtuvimos IC=30,8 mA para VCE = 5,95V.

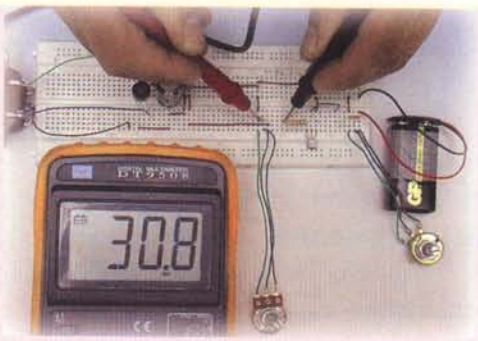


Figura 8.10d. *Midiendo la corriente de colector*

7. Repita el **paso 6** para diferentes valores de IB, desde 250µA hasta 0µA, en pasos de 50µA. En cada caso, repita el **paso 7** para diferentes valores de VCE, desde 12V hasta 0V, en pasos de 2V. Si es necesario, elimine la resistencia de colector (RC) por un puente de 0W. Registre todos los resultados obtenidos en una tabla de datos como la de la **figura 8.11a**

	V_{CE}=0V		V_{CE}=2V		V_{CE}=4V		V_{CE}=6V		V_{CE}=8V		V_{CE}=10V		V_{CE}=12V	
I_B	I_C	V_{BE}	I_C	V_{BE}	I_C	V_{BE}	I_C	V_{BE}	I_C	V_{BE}	I_C	V_{BE}	I_C	V_{BE}
0µF														
50µA														
100µA														
150µA					30,8	0,715								
200µA														
250µA														

Figura 8.11a. *Tabla de datos*

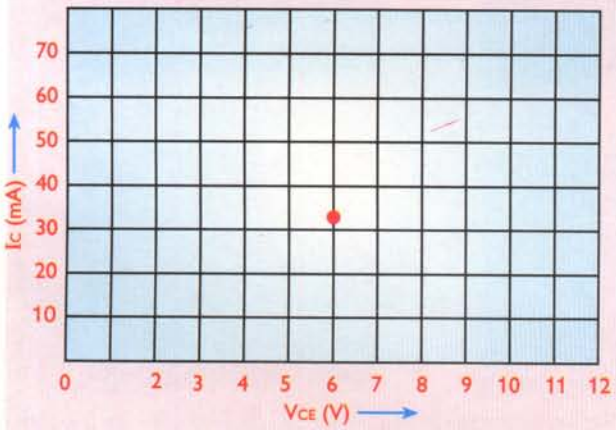


Figura 8.11b. *Plantilla para graficar las curvas características de colector.*

8. Utilizando los datos de la **tabla 8.11(a)**, dibuje para IB=150µA la curva característica de color correspondiente en una plantilla como la de la **figura 8.11(b)**. Para ello, represente cada pareja de valores de VCE e IC por un punto y luego una estos últimos mediante un trazo continuo. La gráfica obtenida es la curva solicitada. Identifíquela como IB=150µA. Repita el mismo el mismo procedimiento para los otros valores de IB registrados. Su resultado final será una **familia de curvas características de colector**, las cuales describen el comportamiento del transistor para una gran variedad de condiciones de funcionamiento del circuito. Derive sus propias conclusiones

9. Las curvas características de colector de nuestro transistor particular pueden ser también visualizadas en un osciloscopio de dos canales operando en el modo X-Y. Para ello, puede utilizarse un montaje como el de la **figura 8.12(a).** En las **figuras 8.12(b)** hasta **8.12(f)** se aprecian algunos de las curvas obtenidas. En este caso, el canal X (entrada horizontal) monitorea el voltaje colector-emisor (VCE), mientras que el canal Y (entrada vertical) monitorea el voltaje sobre la resistencia de colector (VTC), el cual es directamente proporcional a la corriente de colector (IC). Seleccionando unos factores de escala adecuados para estas entradas, pueden hacerse medidas de corriente y voltaje muy precisas.

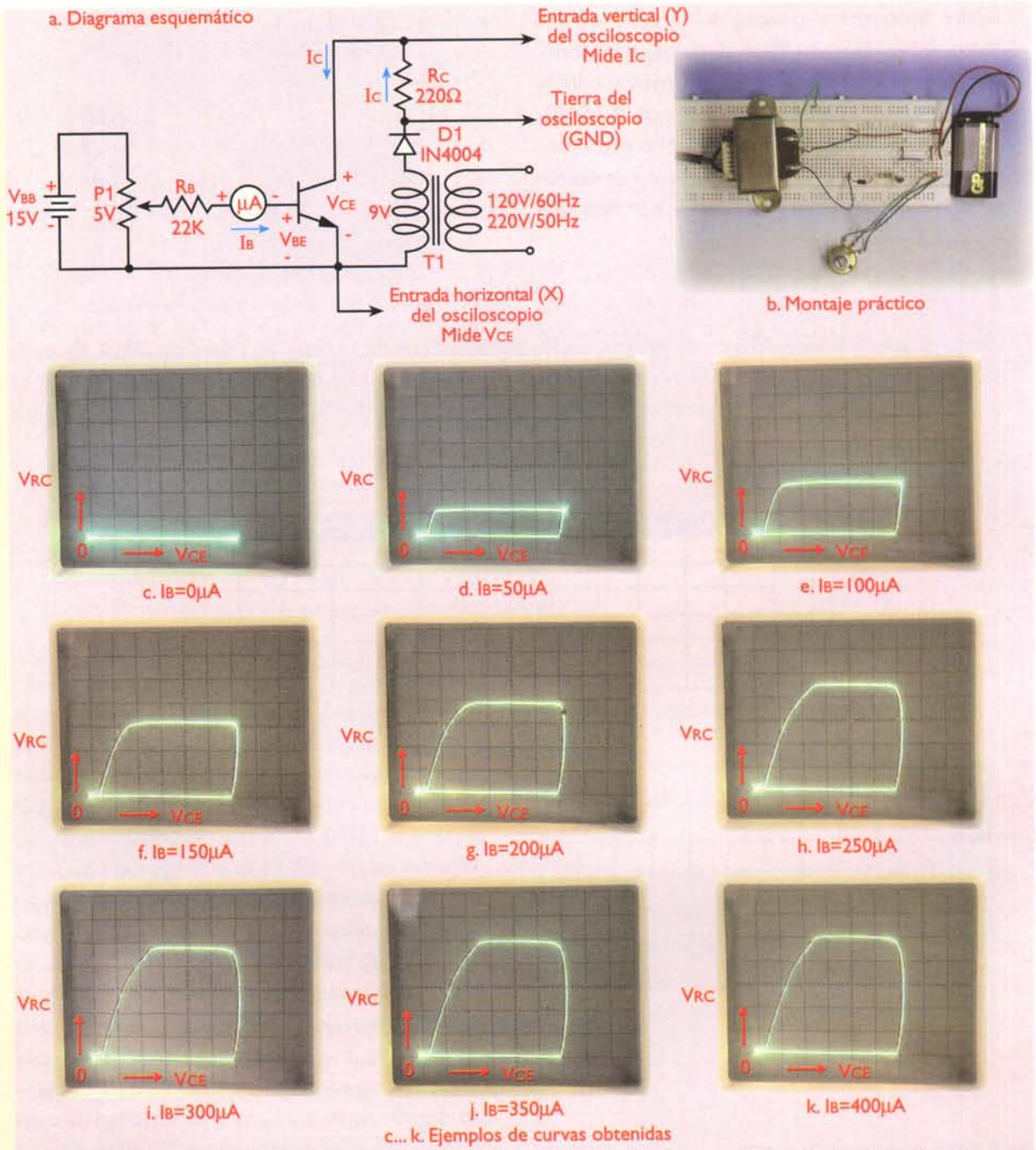


Figura 8.12. *Visualizando las curvas caracteristicas de salida en un osciloscopio. El efecto neto del rectificador de media onda formado por el diodo D1 y el secundario del transformador T1 es variar automáticamente el voltaje de alimentación de colector (VCC), y por tanto el voltaje colector-emisor (VCE) entre cero y un valor máximo (13V, aproximadamente). Este efecto se denomina un* ***barrido de voltaje****.*

En nuestro caso, por ejemplo, utilizamos un factor de escala de 2V/división para el canal horizontal o X (V_{CE}) y un factor de escala de 5V/división para el canal vertical o Y (V_{RC}). Puesto que la resistencia de colector (R_C) utilizada fue de 220Ω, lo anterior significa que cada división vertical corresponde a una corriente de colector (I_C) de 1V/220Ω=4,55 mA. La corriente de base (I_B) asociada a cada curva se obtiene variando el potenciómetro P1 y se mide igual que antes, es decir utilizando el multímetro como microamperímetro.

Concepto de recta de carga

Las curvas características de salida de un transistor, además de mostrar como varían la corriente de colector (IC) y el voltaje colector-emisor (VCE) en función de la corriente de base (IB), pueden ser también utilizadas para visualizar el comportamiento del dispositivo bajo cualquier condición de carga. Para ello se utiliza un recurso gráfico llamado **recta de carga**, que es simplemente una línea recta, trazada sobre las curvas de salida, donde aparecen todos valores posibles que pueden adoptar IC y VCE para diferentes valores de IB y bajo determinadas condiciones de VCC y RC. Este concepto se ilustra en la **figura 8.13**. En este caso, VCC=15V y RC=3kΩ.

Dependiendo del valor de RB, IB puede variar desde 0 hasta un valor máximo. Cuando IB=0, el transistor no conduce y, por tanto, **VCE=15V** e **IC=0**. Estos valores definen el extremo inferior de la recta de carga. A partir de un cierto valor de IB, llega un momento en el cual el transistor está conduciendo al máximo y, por tanto, **VCE=0** e **IC=5mA**. Estos valores definen el extremo superior de la recta de carga. Para valores intermedios de IB, el transistor conduce parcialmente y VCE e IC adoptan valores intermedios, definidos por los puntos de intersección de la recta de carga con las curvas de salida. Por ejemplo, cuando IB=30μA, entonces VCE=6,2V e IC=3mA.

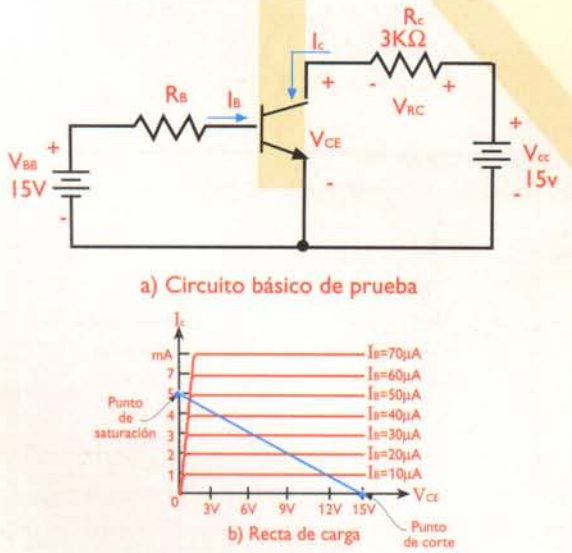


Figura 8.13. *Ilustración del concepto de recta de carga. Otros valores de VCC y RC darán una recta de carga diferente*

El punto superior de la recta de carga, donde la misma corta el eje de IC, se denomina **punto de saturación**. Igualmente, el punto inferior de la recta de carga, donde la misma corta el eje de VCE, se denomina **punto de corte**. Estos puntos indican, en su orden, la máxima corriente de colector (Ic-max) y la máxima tensión colector-emisor (VCE-max) que pueden alcanzarse en el circuito (5mA y 15V, respectivamente, en nuestro caso). Para el circuito en emisor común de la **figura 8.13(a)**, los valores de ICmax y VCEmax pueden ser calculados fácilmente a partir de las siguientes fórmulas:

$$I_{Cmax} = \frac{V_{CC}}{R_C}$$

$$V_{CEmax} = V_{CC}$$

Una forma sencilla de visualizar estos resultados es considerando que el transistor se comporta entre colector y emisor como un **cortocircuito** en el punto de saturación y como un **circuito abierto** en el punto de corte. En el primer caso, VCE=0 y, por tanto, toda la corriente de colector circula a través de RC. Se dice entonces, que el transistor está **saturado**. En el segundo, IC=0 y, por tanto, todo el voltaje de la fuente aparece a través del transistor. Se dice entonces, que este último está **cortado**. El siguiente ejemplo aclarará estos conceptos.

Ejemplo 8.1. Determine los puntos de corte y saturación de la recta de carga de un circuito como el de la **figura 8.13** con **RC=4,7kΩ** y **VCC=12V**. Dibuje la recta de carga obtenida sobre las curvas características de salida.

Solución. En el punto de corte, el transistor se comporta como un circuito abierto. Por tanto, la corriente de colector es cero y el voltaje colector-emisor es igual al voltaje de alimentación. Esto es:

Punto de corte

$$V_{CE} = V_{CC} = 12V$$

$$I_C = 0$$

En el punto de saturación, el transistor se comporta como un cortocircuito. Por tanto, el voltaje colector emisor es cero y la corriente de colector es igual a la corriente a través de la resistencia de colector. Esto es:

Punto de saturación

$$I_C = \frac{V_{CC}}{R_C} = \frac{12V}{4{,}7k\Omega} = 2{,}55\ mA$$

$$V_{CE} = 0$$

La recta de carga correspondiente se muestra en la **figura 8.13c**

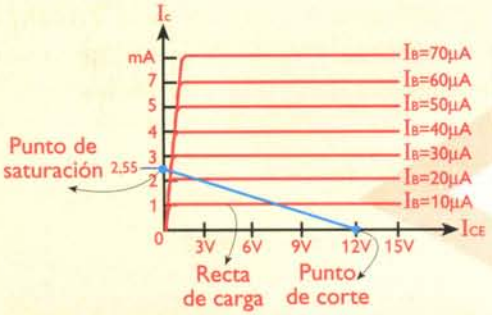


Figura 8.13c *Recta de carga con VCC=12V y RC=4,7kΩ (ejemplo 8.1)*

Concepto de punto de trabajo

El objetivo de una recta de carga es permitir la identificación visual de los posibles **puntos de trabajo** de un transistor y la selección del más adecuado para una aplicación específica. Este último se indica mediante la letra **Q** *(quiescent:* reposo). Cada pareja de valores de IC y VCE asociados a un valor dado de IB es un punto de trabajo posible. En la **figura 8.14** se ilustra este concepto. En este caso, el punto de trabajo **Q** corresponde a VCE=6V, IC=3µA e IB=30µA. Los puntos **QH** (VCE=1,5V, IC=4,5mA, IB=45µA) y **QL** (VCE=10,5V, IC=1,5mA, IB=15µA) son también puntos de trabajo posibles.

En amplificadores de baja señal, como los utilizados para amplificar señales provenientes de micrófonos, donde se requiere que la señal de salida sea una réplica ampliada, pero fiel, de la señal de entrada, sin ningún tipo de distorsión, la selección del punto de trabajo puede afectar sensiblemente la forma de onda de la señal de salida. En estos casos, como veremos más adelante, la mejor posición del punto de trabajo es en el **centro** de la línea de carga, o cerca de él. De este modo se garantiza que el transistor siempre trabaje en la zona activa. Si el punto Q se escoge muy cerca del punto de saturación o del punto de corte, la señal de salida puede aparecer recortada o distorsionada.

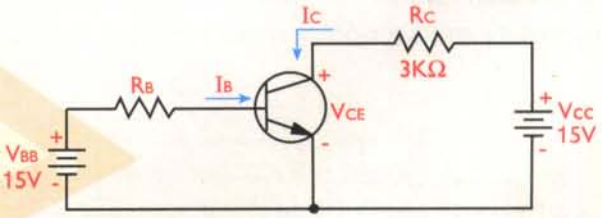
La corriente de base, la corriente de colector y el voltaje colector-emisor asociados con el punto de trabajo de un amplificador se designan generalmente, en su orden, como **IBQ**, **ICQ** y **VCEQ**. Estos valores representan las condiciones de operación del circuito en condiciones de **reposo**, es decir sin señal de entrada aplicada. Una vez aplicada esta última, las corrientes y voltajes del circuito varían por encima y por debajo de sus valores de reposo, como veremos más adelante. Para el circuito en emisor común de la **figura 8.14a**, los valores de IBQ, ICQ y VCEQ pueden ser evaluados a partir de las siguientes fórmulas:

$$I_{BQ} = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$$

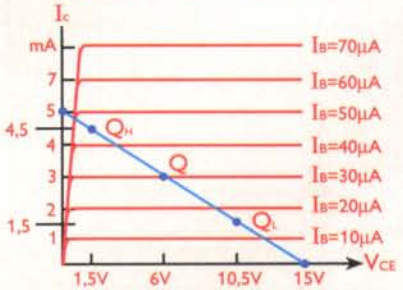
$$I_{CQ} = \beta I_{BQ}$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_C$$

siendo β o hFE la ganancia de corriente y VBE el voltaje base emisor. El siguiente ejemplo aclarará el uso de estas fórmulas.



a) Circuito básico de prueba



b)Puntos de trabajo posibles con VCC=15V y RC=3kΩ

Figura 8.14. *Ilustración del concepto de punto de trabajo. El punto Q, localizado en la parte central de la recta de carga, es más adecuado que los puntos QH y QL, especialmente si el circuito se utiliza para amplificar señales pequeñas*

Ejemplo 8.2. Para un circuito como el de la **figura 8.14a,** determine el valor de la resistencia de base (RB) necesario para conseguir que el punto de trabajo Q se localice, aproximadamente, en la mitad de la recta de carga cuando se utiliza una resistencia de colector (RC) de 3,9kΩ. La ganancia de corriente del transistor es ß=100. Dibuje la recta de carga del circuito sobre las curvas características de salida y especifique la ubicación del punto de trabajo.

Solución. Inicialmente debemos encontrar los puntos de corte y de saturación de la recta de carga para determinar el punto central de esta última, el cual, de acuerdo a los requisitos del problema, corresponde al punto de trabajo Q. En nuestro caso:

Punto de corte

$$V_{CEmax} = V_{CC} = 15V$$
$$I_C = 0$$

Punto de saturación

$$I_{Cmax} = \frac{V_{CC}}{R_C} = \frac{15V}{3{,}9k\Omega} = 3{,}85mA$$
$$V_{CE} = 0$$

Puesto que el punto de trabajo Q debe estar en la mitad de la recta de carga, los valores correspondientes de I_C, V_{CE} e I_B en condiciones de reposo, son:

Punto de trabajo

$$I_{CQ} = \frac{I_{Cmax}}{2} = \frac{3{,}85mA}{2} = 1{,}925\ mA$$

$$V_{CEQ} = \frac{V_{CEmax}}{2} = \frac{15V}{2} = 7{,}5\ V$$

$$I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{ß} = \frac{1{,}925mA}{100} = 19{,}25\mu A$$

El valor de R_B necesario para obtener una I_{BQ} de 19,25µA puede ser evaluado a partir de la fórmula $I_{BQ} = (V_{BB} - V_{BE})/R_B$. Despejando R_B, obtenemos:

$$R_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{I_{BQ}}$$

En nuestro caso, V_{BB} =15V, V_{BE} = 0,7V e I_{BQ} = 19,25µA. Por tanto:

$$R_B = \frac{15V - 0{,}7V}{19{,}25\mu A} = 0{,}743\ M\Omega = 743k\Omega$$

El valor comercial estándar más próximo es **R_B=750kΩ.** La recta de carga y el punto de trabajo resultantes se muestran en la **figura 8.14c**, junto con los valores originales.

Figura 8.14c. Recta de carga y punto de trabajo con R_C=3,9kΩ

Esquemas mejorados de polarización

En los circuitos de emisor común anteriores, el punto de trabajo (Q) depende, entre otros factores, del voltaje base-emisor (V_{BE}) y, principalmente, de la ganancia de corriente (ß), los cuales hemos supuesto que son constantes. En la práctica, estos parámetros varían de un transistor a otro, incluso aunque sean de la misma referencia, debido a las tolerancias que se manejan en los procesos de fabricación. También son afectados por la temperatura y el envejecimiento. Todo esto causa que la ubicación del punto Q cambie y, por tanto, no sea confiable. Se dice, entonces, que el punto de trabajo es **inestable**.

Para minimizar el efecto de estos factores, es necesario **estabilizar** el punto de trabajo de un amplificador. Esto implica utilizar un esquema de polarización donde los valores de corriente y vol-

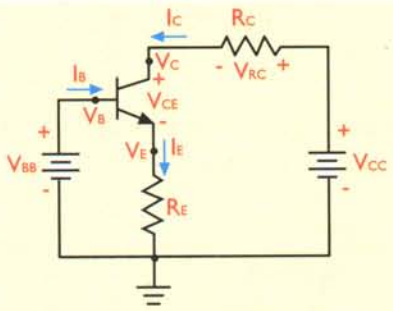


Figura 8.15. *Polarización de emisor. La resistencia de emsior (R_E) estabiliza el punto de trabajo Q y lo hace prácticamente inmune a las variaciones de la ganancia de corriente, que son muy comunes cuando se cambia un transistor por otro, incluso de la misma referencia.*

taje del circuito, en condiciones de reposo, no dependan de la ganancia de corriente del transistor, que es generalmente imprevisible, sino que sean determinados por componentes externos sobre los cuales se puede tener un mayor control. Desde este punto de vista, los métodos de estabilización más empleados son la **polarización de emisor** y la **polarización por divisor de tensión**, que examinaremos enseguida.

Polarización de emisor

En la **figura 8.15** se muestra la estructura básica de un circuito amplificador con polarización de emisor. En este caso, la fuente de polarización de base (V_{BB}) se aplica directamente a la base, sin necesidad de resistencia de base, mientras que el emisor está puesto a tierra a través de una resistencia (R_E). Esta última, encargada de establecer una corriente de emisor (I_E) fija, es la responsable de estabilizar el punto de trabajo del transistor e independizarlo razonablemente de las variaciones en la ganancia de corriente. Para determinar el punto Q del circuito, podemos seguir los siguientes pasos:

1. Determinamos el voltaje entre emisor y tierra (V_{EQ}). Este voltaje es simplemente la diferencia entre la tensión de polarización de base ($V_{BB}=V_B$) y la tensión base-emisor (V_{BE}), la cual asumiremos, como antes, que es prácticamente constante e igual a 0,7V. Recuerde que utilizamos un solo subíndice para designar el voltaje de un punto cualquiera con respecto a tierra. El subíndice Q indica que se trata de valores **estáticos**, es decir, en condiciones de reposo y sin señal aplicada. Por tanto:

$$V_{EQ} = V_{BB} - V_{BE}$$

2. Determinamos la corriente de emisor (I_{EQ}), que es prácticamente la misma corriente de colector (I_{CQ}). Puesto que la corriente I_{EQ} circula a través de la resistencia R_E y está última tiene conectado un voltaje V_{EQ}, podemos aplicar la ley de Ohm para encontrarla. Por tanto:

$$I_{EQ} = I_{CQ} = \frac{V_{EQ}}{R_E}$$

3. Determinamos el voltaje entre colector y tierra (V_{CQ}). Este voltaje es simplemente la diferencia entre la tensión de polarización de colector (V_{CC}) y la caída de voltaje en la resistencia de colector (V_{RCQ}). Esta última, a su vez, de acuerdo a la ley de Ohm, es el producto de la corriente I_{CQ} por la resistencia R_C. Por tanto:

$$V_{CQ} = V_{CC} - V_{RCQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_C$$

4. Determinamos el voltaje entre colector y emisor (V_{CEQ}). Este voltaje es simplemente la diferencia entre el voltaje de colector (V_{CQ}) y el voltaje de emisor (V_{EQ}). Por tanto:

$$V_{CEQ} = V_{CQ} - V_{EQ}$$

Resumiendo, nuestro punto de trabajo Q, para el circuito de la **figura 8.15**, está dado por las siguientes dos ecuaciones:

$$V_{CEQ} = V_{CQ} - V_{EQ}$$

$$I_{CQ} = \frac{V_{EQ}}{R_E}$$

Observe que en estas expresiones no interviene la ganancia de corriente (ß) del transistor, con lo cual queda demostrado que el punto de trabajo es inmune a las variaciones de este pará-

metro. Si, por ejemplo, ß se incrementa, la corriente I_C y el voltaje V_E tienden a aumentar. Puesto que el voltaje V_{BB} es constante, la tendencia de aumento de V_E causa que el voltaje V_{BE} y la corriente I_B tiendan a disminuir. Como resultado, las corrientes I_C e I_E tienden a disminuir, estabilizándose en sus valores iniciales. Por tanto, el punto de trabajo no cambia. Una situación similar se presenta cuando ß disminuye.

En este caso, la tendencia de disminución de I_C es compensada por un aumento del voltaje V_{BE}, con lo cual aumenta la corriente I_B y por tanto la corriente I_C. Nuevamente, el punto de trabajo permanece estable. Este proceso se denomina una **realimentación de corriente**. Por la misma razón, este esquema se conoce también como **estabilización por corriente de realimentación**. El siguiente ejemplo aclarará el uso de las fórmulas anteriores para evaluar el punto de trabajo.

Ejemplo 8.3. Determine el punto de trabajo (V_{CQ}, I_{CQ}) para un amplificador con polarización de emisor como el de la **figura 8.15** con V_{CC}=18V, V_{BB}=1,5V, R_C=10K y R_E=1K. Asuma V_{BE}=0,7V y ß variable entre 100 y 300.

Solución. Podemos seguir estos pasos:

1. Calculamos el voltaje de emisor (V_{EQ}):

$$V_{EQ} = V_{BB} - V_{BE} = 1{,}5V - 0{,}7V = 0{,}8V$$

2. Calculamos la corriente de emisor (I_{EQ}), que es prácticamente la misma corriente de colector (I_{CQ}):

$$I_{EQ} = I_{CQ} = \frac{V_{EQ}}{R_E} = \frac{0{,}8V}{1K} = 0{,}8\ mA$$

3. Calculamos el voltaje de colector (V_{CQ}):

$$V_{CQ} = 18V - (0{,}8mA \times 10K) = 18V - 8V = 10V$$

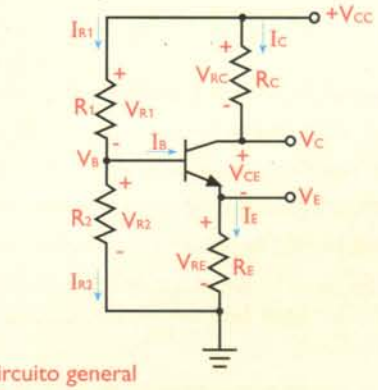
4. Calculamos el voltaje colector-emisor (V_{CEQ}):

$$V_{CEQ} = 10V - 0{,}8V = 9{,}2V$$

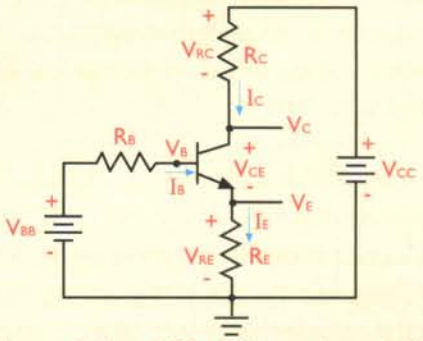
Por tanto, el punto de trabajo (**Q**) de este amplificador es $V_{CEQ} = 9{,}2V$ e $I_{CQ} = 0{,}8mA$

Polarización por divisor de tensión

La polarización de emisor, examinada anteriormente, proporciona una alta inmunidad del punto de trabajo con respecto a las variaciones en la ganancia del transistor. Sin embargo, requiere de dos fuentes de alimentación independientes: una para polarizar el circuito de base (V_{BB}) y otra para polarizar el circuito de colector (V_{CC}). Si solo se dispone de una fuente, como es el caso de la mayoría de sistemas electrónicos, la mejor opción es utilizar un **divisor de tensión** para obtener la tensión de polarización de base a partir de la tensión de polarización de colector, como se ilustra en la **figura 8.16a** para el caso de un transistor NPN. Este esquema se denomina también **polarización universal** y es el más utilizado en amplificadores de baja señal. Además, es térmicamente muy estable, lo cual significa que la ubicación del punto de trabajo no se afecta con los cambios de temperatura.



a. Circuito general



b. Circuito equivalente. VBB y RB reemplazan el divisor de tensión visto por la base, constituyendo lo que se denomina **un circuito equivalente de Thevenin**

Figura 8.16 *Polarización por divisor de tensión (transistor NPN).*

El proceso para determinar el punto de trabajo (Q) en un circuito como el de la **figura 8.16(a)** se puede resumir en los siguientes pasos:

1. Calculamos las corrientes I_{R1} e I_{R2} a través de las resistencias del divisor de voltaje. En la práctica, R1 y R2 se escogen de modo que estas corrientes sean muy altas comparadas con la corriente de base (I_B), por lo menos 20 veces mayores. Bajo esta condición:

$$I_{R1} = I_{R2} = I_{RB} = \frac{V_{CC}}{R_1+R_2}$$

2. Calculamos la tensión de base (V_B), equivalente a la caída de voltaje sobre R2. Por tanto:

$$V_B = I_{RB}R_2$$

3. Calculamos la tensión de emisor (V_E), equivalente al voltaje de base (V_B) menos la caída de tensión en la unión base-emisor (V_{BE}). Esto es:

$$V_E = V_B - V_{BE}$$

4. Calculamos la corriente de emisor (I_E), equivalente a la relación entre el voltaje de emisor (V_E) y la resistencia de emisor (R_E). Esta corriente es prácticamente igual a la corriente de colector (I_C). Por tanto:

$$I_E = I_C = \frac{V_E}{R_E}$$

5. Calculamos la tensión de colector (V_C), equivalente al voltaje de alimentación (V_{CC}) menos la caída de voltaje en la resistencia de colector ($V_{RC}=I_CR_C$). Esto es:

$$V_E = V_{CC} - V_{RC} = V_{CC} - I_CR_C$$

6. Calculamos la tensión entre colector y emisor (V_{CE}), equivalente a la diferencia entre la tensión de colector (V_C) y la tensión de emisor (V_E). Esto es:

$$V_{CE} = V_C - V_E$$

Resumiendo, nuestro punto de trabajo Q para el circuito de la **figura 8.16** está dado por las siguientes dos ecuaciones:

$$I_C = \frac{V_E}{R_E}$$

$$V_{CE} = V_C - V_E$$

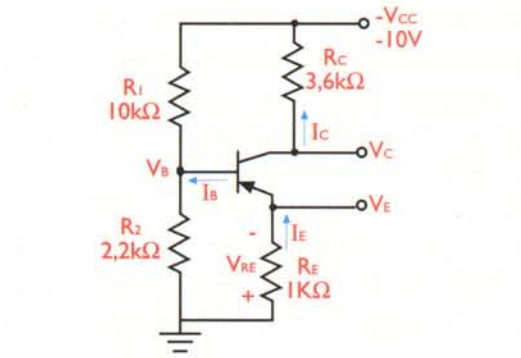
Al mantener la corriente de base (I_B) muy pequeña, los valores de I_C y V_{CE} no dependen de la ganancia de corriente del transistor (ß), sino de los valores de las resistencias externas. Esto se debe a que el divisor formado por R1 y R2 mantiene los voltajes V_B y V_E prácticamente constantes, lo mismo las corrientes I_E e I_C. Para efectos de análisis, el circuito de la **figura 8.16a** puede ser reducido a un circuito equivalente como el de la **figura 8.16b**, donde V_{BB} representa la tensión de polarización de base y R_B la resistencia de base. De este modo, el análisis se simplifica, permitiendo aplicar los mismos métodos de la polarización de emisor. El valor de V_{BB} es igual a la caída de voltaje sobre R2, mientras que el de R_B es equivalente a la asociación en paralelo de R1 y R2. Esto es:

$$V_{BB} = V_B = \frac{V_{CC} \times R_2}{R_1 + R_2}$$

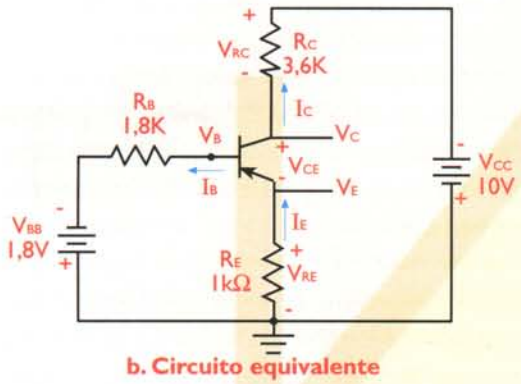
$$R_B = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}$$

Los mismos conceptos y procedimientos anteriores son aplicables a un transistor PNP, excepto que debe utilizarse una fuente de alimentación (V_{CC}) negativa para polarizar adecuadamente las uniones base-emisor (BE) y base-colector (BC) del dispositivo, **figura 8.17**. Como resultado, la polaridad de todas las tensiones y la dirección de todas las corrientes son opuestas a la del circuito de polarización de un transistor NPN.

El cálculo del punto de trabajo se efectúa de la misma forma. Como ejercicio, demuestre que con los valores de los componentes indicados en el circuito, los valores de I_C y V_{CE} en condiciones de reposo (Q) son **1,68mA** y **3,96V**, respectivamente. El siguiente ejemplo aclarará estos conceptos.



a. Circuito general



b. Circuito equivalente

Figura 8.17. *Polarización por divisor de tensión (transistor PNP)*

Ejemplo 8.4(a). Determine los valores de Ic y Vce en condiciones de reposo (Q) en un circuito como el de la **figura 8.16a ,** donde R1=20K, R2=5K, Rc=10K, Re=2K y Vcc= 12V. Asuma que la corriente de base (Ib) es muy pequeña comparada con la corriente a través de R1 y R2. **(b)** Calcule los valores reales de Ic y Vce utilizando el circuito equivalente de la **figura 8.16b** y asumiendo que la ganancia de corriente del transistor (ß) puede fluctuar entre 20 y 60. ¿Se modifica sustancialmente la posición del punto de trabajo? ¿Por qué?

Solución. (a) Calculamos inicialmente la corriente del divisor de tensión (Ir), la tensión de base (Vb), la tensión de emisor (Ve), la corriente de emisor (Ie) y la corriente de colector (Ic)

$$I_R = \frac{V_{CC}}{R_1+R_2} = \frac{12V}{20K+5K} = 0{,}48mA$$

$$V_B = I_R R_2 = 0.48mA \times 5K = 2{,}4V$$

$$V_E = V_B - V_{BE} = 2{,}4V - 0{,}7V = 1{,}7V$$

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{1{,}7V}{2K} = 0{,}85\ mA$$

$$I_E = I_C = 0{,}85mA$$

A continuación calculamos el voltaje de colector (Vc) y el voltaje colector-emisor (Vce):

$$V_C = V_{CC} - I_C R_C = 12V - 0{,}85mA \times 10K$$
$$= 12V - 8{,}5V = 3{,}5V$$

$$V_{CE} = V_C - V_E = 3{,}5V - 1{,}7V = 1{,}8V$$

Por tanto, el punto de trabajo (**Q**) del circuito corresponde a **Ic = 0,85mA** y **Vce = 1,8V**

(b) Calculamos inicialmente el voltaje de polarización de base (Vbb) y la resistencia de base (Rb) de circuito equivalente:

$$V_{BB} = \frac{V_{CC} \times R_1}{R_1 + R_2} = V_B = 2{,}4V$$

$$R_B = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} = \frac{20K \times 5K}{20K + 5K} = 4K$$

A continuación, planteamos las ecuaciones del voltaje de emisor (Ve), la corriente de emisor (Ie), la corriente de colector (Ic) y la corriente de base (Ib). Consideremos primero el caso de ß mínimo (20). Esto es:

$$V_E = I_E R_E = 2K \times I_E$$

$$I_E = I_C = \beta I_B = 20 I_B$$

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE} - V_E}{R_B} = \frac{2{,}4V - 0{,}7V - V_E}{4K} = \frac{1{,}7V - V_E}{4K}$$

Reemplazando las ecuaciones de Ve e Ie en las ecuaciones de Ib, obtenemos:

$$I_B = \frac{1{,}7V - V_E}{4K} = \frac{1{,}7V - (2K \times I_E)}{4K} = \frac{1{,}7V - (2K \times 20 I_B)}{4K}$$

$$4K \times I_B = 1,7V - 40K \times I_B$$

$$44\ K \times I_B = 1,7V$$

Por tanto:

$$I_B = \frac{1,7V}{44K} = 0,0386mA$$

$$I_E = I_C = 20 \times I_B = 0,773\ mA$$

$$V_E = 2K \times I_E = 1,545\ V$$

Finalmente, calculamos el voltaje de colector (V_C) y el voltaje colector-emisor (V_{CE}):

$$V_C = V_{CC} - I_C R_C = 12V - 0,773mA \times 10K = 4,27V$$

$$V_{CE} = V_C - V_E = 4,27V - 1,545V = 2,73V$$

Por tanto, con ß=30, el punto de trabajo quedará localizado en I_C=0,77mA y V_{CE}=2,73V. Estos valores son muy parecidos a los obtenidos en el primer análisis (I_C=0,85 mA y V_{CE}=1,8V). Por un procedimiento similar, usted puede demostrar que los valores reales de I_C y V_{CE} con el ß máximo (60) son 0,823mA y 2,13V, los cuales son también muy parecidos a los originales. Por tanto, podemos afirmar que el punto de trabajo Q se mantiene relativamente estable y no se afecta sensiblemente con los cambios en la ganancia de corriente. Esto se debe a que, por la presencia de R_E, el voltaje de emisor (V_E) no cambia significativamente, fluctuando entre 1,55V para ß=20 y 1,65V para ß=60

Otros tipos de polarización

Los circuitos de polarización de transistores se dividen en dos grupos, dependiendo de si el punto de trabajo (Q) depende o no de la ganancia de corriente (ß). Los esquemas de polarización de emisor y por divisor de tensión de las figuras **8.15** hasta **8,17,** son ejemplos de **circuitos independientes del beta**. En ellos, la ubicación del punto Q depende casi exclusivamente de los valores de componentes externos. Seleccionando adecuadamente estos valores, el transistor puede ser fácilmente polarizado en cualquier punto de la recta de carga, independientemente de sus características. También proporcionan una excelente estabilidad ante los cambios de temperatura.

La otra categoría son los **circuitos dependientes del beta**. En ellos, la ubicación del punto Q depende no solamente de los valores de los componentes externos, sino de la ganancia de corriente (ß), la cual varía mucho de un transistor a otro. Por tanto, dos transistores similares colocados en el mismo circuito pueden, como ocurre en la mayoría de los casos, operar en puntos completamente diferentes, llegando inclusive a la saturación o el corte, lo cual es inaceptable en circuitos amplificadores de baja señal.

En las **figuras 8.18a** hasta **8.18d**, se muestran algunos ejemplos de circuitos de polarización dependientes del beta. Debido a que su uso es poco frecuente en circuitos de amplificación bien diseñados (aunque sí en sistemas digitales), no vamos a profundizar en su análisis. Sin embargo, consideramos que es importante que usted los conozca, por si llega a encontrarse con ellos en algún circuito. Los valores de los componentes indicados son sólo ilustrativos y no implica que sean los más recomendables o los que deban siempre utilizarse.

El circuito de la **figura 8.18(a)** corresponde a un esquema de **polarización de base**. Es la forma más simple de polarizar un transistor, pero también la menos adecuada cuando se pretende mantener estable el punto de trabajo. En este caso, la corriente de base (I_B), la tensión colector-emi-

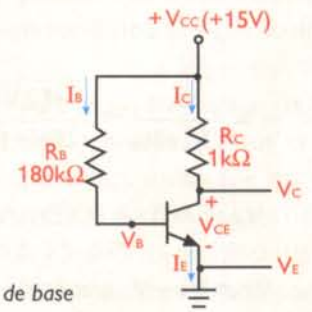


Figura 8.18a. Polarización de base

sor (V_{CE}) y la corriente de colector (I_C) en condiciones de reposo, están dadas por las siguientes ecuaciones:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$$

$$I_C = \beta I_B$$

siendo ß la ganancia de corriente. Por ejemplo, si V_{CC}=10V, ß=100, R_C=1K y R_B=180K, entonces I_B=62,78µA, I_C=6,28 mA y V_{CE}=5,72V, lo cual implica que el punto de trabajo estaría casi en el centro de la recta de carga. Sin embargo, si el ß se duplica (200), el punto de trabajo se desplazaría ahora a I_C=12 mA y V_{CE}=0V, lo cual corresponde a una condición de saturación. Por tanto, para este circuito, el punto Q no es estable y cambia de posición proporcionalmente con los cambios en la ganancia de corriente. Además, es muy sensible ante los cambios de temperatura.

Un intento por estabilizar el punto de trabajo en el circuito anterior es utilizando un esquema como el de la **figura 8.18b**, llamado **polarización con realimentación de emisor**. En este caso, la introducción de la resistencia de emisor (R_E) produce una tensión (V_E) que se opone a los cambios en la ganancia de corriente: si ß aumenta, aumentan I_C e I_E. Esto último provoca un aumento de V_E, lo cual, a su vez, hace que aumente V_B y disminuya I_B. Por tanto, disminuyen I_C e I_E, contrarrestando su tendencia inicial a aumentar y estabilizando, aparentemente, el punto de trabajo. Este fenómeno, donde el aumento o la disminución de una variable de salida (I_C) causa la disminución o el aumento de un variable de entrada (I_B), se denomina una **realimentación negativa**.

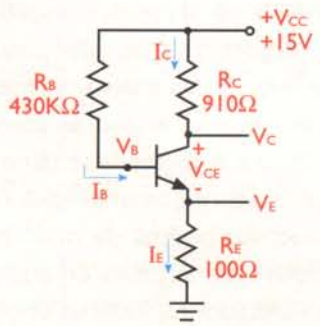


Figura 8.18b. Polarización con realimentación de emisor

En nuestro caso, la realimentación negativa sí reduce efectivamente los desplazamientos del punto Q con respecto a los cambios del ß, pero los mismos siguen muy grandes como para asegurar que se mantiene estable. Por esta razón, este tipo de polarización no es tan popular como la polarización por divisor de tensión. Las fórmulas para calcular el punto de trabajo (Q) son las siguientes:

$$V_{CE} = V_C - V_E$$

$$I_C = I_E = \beta I_B$$

$$V_C = V_{CC} - I_C R_C$$

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_B}{R_B}$$

$$V_E = I_E R_E$$

$$V_B = V_{BE} + V_E$$

Por ejemplo, si V_{CC}=15V, R_C=910Ω, R_E=100Ω, R_B=200kΩ y ß=100, entonces I_C=7,22 mA y V_{CE}=7,71V. Si se duplica el ß (200), entonces I_C=13,06 mA y V_{CE}= 1,81V, que es un punto muy cerca al de saturación. Asimismo, si el ß se reduce a la mitad (50), entonces I_C=3,56 mA y V_{CE}=11,40V, que es un punto muy cerca al de corte. Por tanto, el punto Q sigue siendo bastante inestable y muy dependiente de la ganancia de corriente, aunque no tanto como bajo un esquema de polarización de base.

Otro intento por estabilizar el punto de trabajo es el esquema de la **figura 8.18c**, llamado **polarización con realimentación de colector**. En este caso, la resistencia de base (R_B) introduce una realimentación negativa que disminuye o aumenta la corriente de base (I_B) cuando aumenta o disminuye la corriente de colector (I_C) cuando cambia la ganancia de corriente (ß). Por ejemplo, si ß

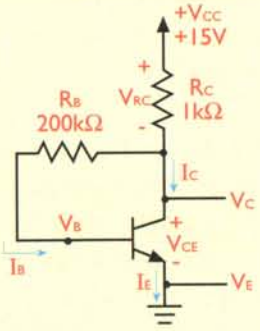


Figura 8.18c. Polarización con realimentación de colector

aumenta, aumenta IC y disminuye VC. Esto causa que disminuya IB y, por tanto, IC. De este modo se compensa la tendencia inicial de IC a aumentar, estabilizándose, aparentemente, el punto de trabajo (Q). Sin embargo, esta estabilidad es relativa. Las fórmulas para calcular el punto de trabajo de este circuito son las siguientes:

$$V_C = V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$$

$$I_C = \beta I_B$$

$$I_B = \frac{V_C - V_{BE}}{R_B}$$

Por ejemplo, si VCC=15V, RC=1K, RB=200K y ß=100, entonces IC=4,79mA y VCE=10,2V. Si la ganancia de corriente se duplica (ß=200), el punto de trabajo se desplaza hasta IC=7,17mA y VCE=7,83V. Asimismo, si la ganancia de corriente se reduce a la mitad (ß=200), la nueva posición del punto de trabajo es IC=2,9 mA y VCE=12,1V. Por tanto, el punto Q sigue siendo inestable y dependiente de la ganancia de corriente. Además, este circuito es más sensible a los cambios de temperatura que el anterior, lo cual limita aún más su uso.

Finalmente, en la **figura 8.18d**, se muestra un circuito de polarización **con realimentación de colector y emisor**, el cual combina las características de los dos anteriores. Sin embargo, aunque la realimentación proporcionada por las resistencias de base (RB) y de emisor (RE) reduce el efecto de las variaciones de la ganancia de corriente (ß) en la posición del punto de trabajo (Q), la estabilidad de este último no es tan confiable como en un

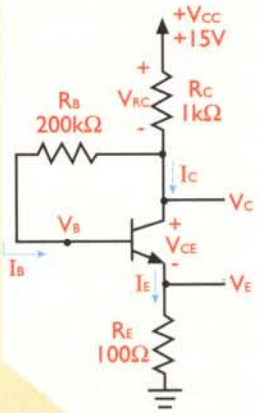


Figura 8.18d. Polarización con realimentación mixta

circuito de polarización con divisor de tensión. No obstante, este circuito exhibe buenas características de estabilidad térmica. Las fórmulas para calcular el punto de trabajo son las siguientes:

$$V_C = V_{CC} - I_C R_C$$

$$I_C = I_E = \beta I_B$$

$$V_E = I_E R_E$$

$$V_{CE} = V_C - V_E$$

$$V_B = V_{BE} + V_{BE}$$

$$I_B = \frac{V_C - V_B}{R_B}$$

Amplificadores de señales

Los transistores, tanto a nivel de componentes sueltos o *discretos* como incorporados en circuitos integrados o *chips*, se utilizan principalmente como amplificadores. Un **amplificador**, como su nombre lo indica, es un circuito que aumenta o *amplifica* la magnitud de una señal eléctrica. Esta señal puede ser obtenida, por ejemplo, de una antena, un micrófono o un sensor electrónico. La acción de convertir una señal pequeña en una más grande se denomina, por lo mismo, **amplificación**. Los amplificadores son los bloques constructivos básicos de muchos equipos electrónicos, incluyendo sistemas de audio y vídeo, sistemas de comunicaciones, sistemas de control, sistemas de seguridad, sistemas de potencia, etc.

Figura 8.19. *Diagrama de bloques de un amplificador genérico. El subíndice «i» (input) denota condiciones de entrada, y el subíndice «o» (output) condiciones de salida. Por ejemplo,* ***Ii*** *es la corriente de entrada y* ***Po*** *es la potencia de salida*

Para efectos de análisis, un amplificador puede ser representado mediante un diagrama de bloques como el de la **figura 8.19.** En este caso, **Ei** e **Ii** son las señales de voltaje y corriente de entrada, y **Eo** e **Io** las señales de voltaje y corriente de salida. La resistencia **RL** representa la **carga**, es decir el dispositivo o circuito que aprovecha la señal de salida, por ejemplo, un parlante, un motor, otro amplificador, etc. La potencia asociada con la señal de entrada es **Pi** y la asociada con la señal de salida es **Po**.

Tipos de amplificadores

Los amplificadores se clasifican de acuerdo a diversos criterios. Un primer criterio es el tipo de señales que amplifican. Desde este punto de vista, se habla de **amplificadores de voltaje, de corriente o de potencia.** Un amplificador de voltaje, por ejemplo, como el requerido para amplificar la señal de un micrófono, está optimizado para amplificar solamente señales de voltaje, y, por tanto, no necesariamente es capaz de excitar un parlante. Para esto último se requiere de un amplificador de potencia.

Otro criterio de clasificación es la magnitud de las señales que amplifican. Desde este punto de vista se habla de **amplificadores de señal pequeña o grande**. Los primeros, también llamados **amplificadores de baja señal**, amplifican señales del orden de los microvoltios o milivoltios, mientras que los segundos amplifican señales más grandes. Estos últimos se analizan generalmente mediante métodos gráficos, mientras que para los de baja señal se utilizan métodos algebraicos, como los que hemos trabajado hasta el momento. Los amplificadores de baja señal se utilizan principalmente como amplificadores de voltaje y los de señal grande como amplificadores de potencia.

Los amplificadores pueden ser también clasificados en términos de la cantidad de señal de entrada que recibe amplificación a la salida, **figura 8.20**. Desde este punto de vista, se habla de **amplificadores clase A, AB, B o C**. En un **amplificador clase A, figura 8.20(b)**, recibe amplificación la totalidad (el 100%) de la señal de entrada. Por tanto, a través de la carga, circula corriente durante los 360° de cada ciclo. Además, la forma de onda de la señal de salida es una réplica ampliada, pero fiel, de la señal de entrada.

En un **amplificador clase B, figura 8.20(c),** recibe amplificación solo la mitad (el 50%) de la señal de entrada. Por tanto, a través de la carga circula corriente únicamente durante 180° en cada ciclo. En un **amplificador clase**

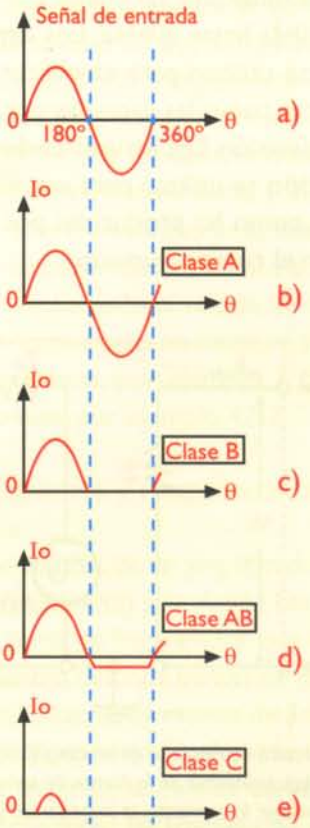


Figura 8.20. *Clases de funcionamiento básicas de los amplificadores. Existen también otras clases, llamadas D, G, H, etc., basadas en distintos criterios*

AB, figura 8.20(d), recibe amplificación más del 50% y menos del 100% de la señal de entrada. Así, a través de la carga circula corriente durante más de 180° y menos de 360° en cada ciclo. Finalmente, en un amplificador clase C, **figura 8.20(e),** recibe amplificación menos de la mitad de la señal de entrada. En esta forma, a través de la carga circula corriente durante menos de 180° en cada ciclo. Los amplificadores de clase A se utilizan para amplificar señales pequeñas, los de clases B y AB para amplificar señales grandes y los de clase C para amplificar señales de alta frecuencia.

Los amplificadores pueden ser también clasificados de acuerdo con su uso. Desde este punto de vista se habla de amplificadores de audio, radiofrecuencia (RF), vídeo, microondas, pulsos, instrumentación, etc. Los **amplificadores de audio**, por ejemplo, se utilizan para amplificar señales audibles, como las producidas por la voz humana y los instrumentos musicales, las cuales tienen frecuencias desde 20Hz hasta 20kHz. Los **amplificadores de RF** se utilizan para amplificar señales de alta frecuencia, como las captadas por las antenas de radio y televisión. Los **amplificadores de instrumentación** se utilizan para amplificar señales muy débiles, como las producidas por sensores o presentes en el cuerpo humano.

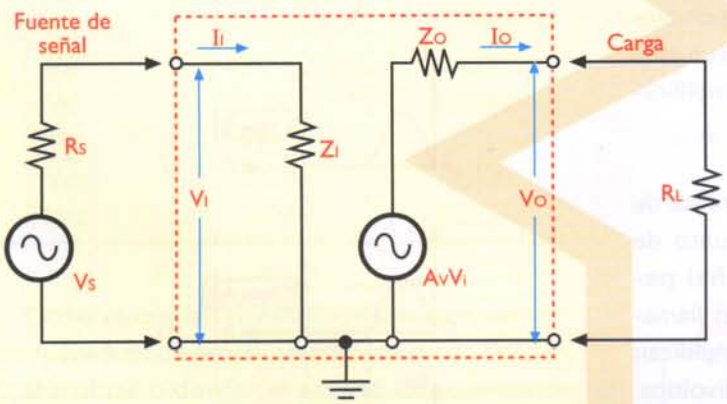


Figura 8.21. *Circuito equivalente de un amplificador.* ***Vs*** *y* ***Rs*** *representan el voltaje y la resistencia interna de la fuente de señal.* ***Vi, Ii, Zi*** *y* ***Pi*** *representan el voltaje, la corriente, la impedancia y la potencia asociadas con el circuito de entrada.* ***Vo, Io, Zo*** *y* ***Po*** *representan los mismos parámetros, pero asociados al circuito de salida.* ***Av*** *es la ganancia de voltaje.* ***RL*** *es la resistencia o impedancia de la carga*

Características de los amplificadores

Los amplificadores se caracterizan mediante varios parámetros o figuras de mérito, los cuales describen su comportamiento bajo diferentes condiciones de señal, frecuencia, carga, etc. Los más importantes son: la ganancia de voltaje, la ganancia de corriente, la ganancia de potencia, la resistencia de entrada, la resistencia de salida, el ancho de banda, la distorsión y la polarización. A continuación definiremos estos conceptos. Para comprender su significado, consideremos el diagrama de la **figura 8.21**, similar al de la **figura 8.19**, que representa el circuito equivalente de un amplificador genérico.

Ganancias de voltaje, corriente y potencia

La **ganancia**, en general, es una medida de la cantidad de amplificación que proporciona un amplificador. Dependiendo de su diseño, este último puede proporcionar ganancia de voltaje, de corriente o de potencia. La **ganancia de voltaje** se denota como **Av** y se define como la relación entre la señal de voltaje de salida (Eo) y la señal de voltaje de entrada (Ei). Esto es:

$$Av = \frac{Eo}{Ei}$$

La **ganancia de corriente** se denota como **Ai** y se define como la relación entre la señal de corriente de salida (Io) y la señal de corriente de entrada (Ii). Esto es:

$$Ai = \frac{Io}{Ii}$$

La **ganancia de potencia** se denota como **Ap** y se define como la relación entre la potencia de la señal de salida (Po) y la potencia de la señal de entrada (Pi). También es igual al producto de las ganancias de voltaje (Av) y de corriente (Ai). Esto es:

$$Ap = \frac{Po}{Pi} = AvAi$$

Usualmente, la ganancia se expresa en **decibelios (dB)**. El decibelio o decibel,

es originalmente una unidad de medida logarítmica utilizada para comparar la intensidad de un sonido con respecto a la de otro tomado como referencia. Sin embargo, por extensión, se utiliza también para comparar la magnitud relativa de una señal eléctrica con respecto a otra. Para expresar las ganancias de un amplificador en decibelios se utilizan las siguientes fórmulas de conversión:

$$Av(dB) = 20 \log Av$$

$$Ai(dB) = 20 \log Ai$$

$$Ap(dB) = 10 \log Ap$$

donde **logAv**, **logAi** y **logAp** corresponden al logaritmo decimal, o en base 10, de los valores numéricos de la ganancia de voltaje, corriente y potencia, respectivamente. El logaritmo de un número, que es proporcionado por cualquier calculadora científica, corresponde al exponente al cual hay que elevar la base (10, en este caso) para obtener ese número. Por ejemplo, el logaritmo decimal de 100 es 2, porque $10^2=100$. Así, un amplificador de voltaje donde Eo=2V y Ei=10mV tiene una ganancia de 2V/10mV=200, equivalente a 20log200 = 46dB. Por tanto, podemos decir que Eo está 46dB por encima de Ei, o, lo que es lo mismo, es 200 veces más grande.

Resistencias o impedancias de entrada y de salida

La **resistencia de entrada** se denota como **Ri** y se define como la relación entre el voltaje (Vi) y la corriente (Ii) de la señal de entrada. Esto es:

$$Ri = \frac{Vi}{Ii}$$

La **resistencia de salida** se denota como Ro y se define como la relación entre el voltaje (Vo) y la corriente (Io) de la señal de salida. Esto es:

$$Ro = \frac{Vo}{Io}$$

Las resistencias de entrada y de salida de un amplificador se definen en condiciones **dinámicas**, es decir en presencia de una señal. Las mismas son en realidad el efecto combinado de las características de entrada y de salida de los transistores utilizados por el mismo, así como de las resistencias, condensadores y bobinas presentes en el circuito. Por esta razón, en lugar de **resistencia** es más exacto hablar de **impedancia**, definida como la oposición que ofrecen, de manera combinada, estos elementos a la circulación de la corriente de señal (CA) a través del amplificador. La impedancia de entrada se denota como **Zi** y la de salida como **Zo**. Por tanto:

$$Zi = \frac{Vi}{Ii}$$

$$Zo = \frac{Vo}{Io}$$

Desde un punto de vista práctico, la impedancia de entrada (Zi) es la resistencia o impedancia vista por la fuente que genera la señal que se va amplificar. Del mismo modo, la impedancia de salida (Zo) es la resistencia o impedancia que observa la carga que recibe la señal. En el caso de un amplificador de voltaje, por ejemplo, es deseable que Zi sea muy alta, idealmente infinita, y Zo muy baja, idealmente cero. De este modo, la fuente de señal no necesita entregar casi corriente a la entrada y la carga aprovecha todo el voltaje de salida disponible. En la práctica, esto no siempre sucede: Zi es alta pero no infinita, por ejemplo 1 MΩ; y Zo es baja pero no nula, por ejemplo 47Ω.

Ancho de banda y respuesta de frecuencia

El **ancho de banda** de un amplificador se denota como **BW** (*bandwidth*) y se define como la banda, intervalo, o gama de frecuencias, que reciben amplificación dentro de unos límites de ganancia preestablecidos, usualmente menos de 3dB por debajo de la ganancia nominal. Idealmente, un amplificador debería tener un ancho de banda infinito, es decir amplificar todas las frecuencias de señal posibles con la misma ganancia. En la práctica esto no siempre sucede y algunas frecuencias reciben más

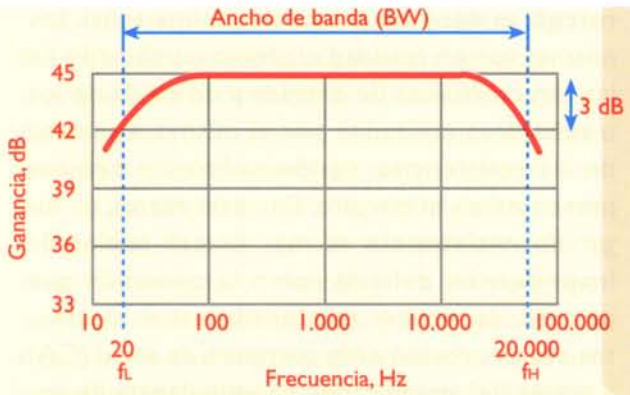


Figura 8.22. *Ejemplo de una curva de respuesta de frecuencia de un amplificador. Observe que la frecuencia (f, expresada en Hz) se gráfica sobre el eje x y la ganancia (Av, expresada en dB) sobre el eje y.*

amplificación que otras, La forma como varía la ganancia con la frecuencia se representa usualmente en una gráfica llamada **curva de respuesta de frecuencia**, como la mostrada en la **figura 8.22**.

En este caso, el ancho de banda (**BW**) corresponde al intervalo de frecuencias entre f_L (20Hz), llamada **frecuencia de corte inferior**, y f_H (20kHz), llamada **frecuencia de corte superior**. En este intervalo la ganancia disminuye, como máximo, 3 dB (aproximadamente un 30%) con respecto a su valor nominal (45dB), que es el valor promedio o predominante en el resto de la escala. Por esta razón, f_L y f_H se conocen también como **frecuencias superior e inferior de -3dB**. Estas frecuencias son las que determinan los límites del ancho de banda del amplificador. Por tanto:

$$BW = f_H - f_L$$

En nuestro caso, $BW = f_H - f_L = 20.000Hz - 20Hz = 19.980$ Hz. Este es el tipo de respuesta de frecuencia requerido, por ejemplo, para un amplificador de audio.

Distorsión

Idealmente, la señal de salida de un amplificador debería ser una réplica ampliada pero exacta de la señal de entrada. En la práctica esto no siempre sucede y la señal de salida presenta ciertas irregularidades que no están presentes en la señal de entrada. A este fenómeno se le denomina **distorsión** y se debe principalmente a que los transistores no son dispositivos estrictamente lineales. Como resultado, ellos introducen efectos y frecuencias adicionales que distorsionan la forma de onda original. Existen muchos tipos de distorsiones (armónica, por intermodulación, de cruce, etc.), las cuales no vamos a discutir por tratarse de fenómenos muy complejos. Sin embargo, veamos un ejemplo.

Suponga que aplicamos una onda seno perfecta de 1kHz y 10mV de amplitud, a la entrada de un amplificador de voltaje con una ganancia de 100 (40dB). Por tanto, a la salida del mismo esperaríamos encontrar una onda seno pura de 1kHz, pero con una amplitud de 1V. Sin embargo, es muy probable que, aunque esta última tenga la amplitud y la frecuencia esperada, la misma no sea una onda pura. Esto debe a que el amplificador, además de la

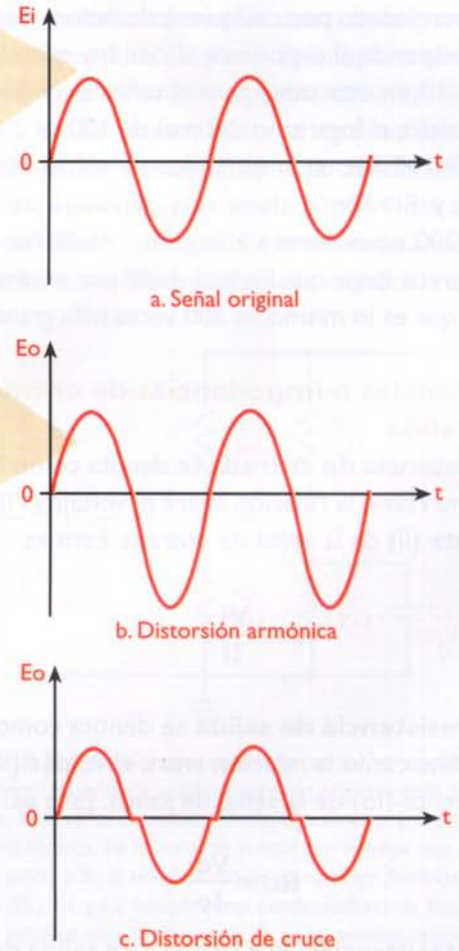


Figura 8.23. *Ejemplos de distorsión en amplificadores*

frecuencia de 1kHz, llamada **fundamental**, ha introducido también **armónicas**, es decir frecuencias múltiplos enteros de la fundamental (2kHz, 3kHz, 4kHz, etc.) no contenidas en la señal original. Éste es un caso típico de una **distorsión armónica**, que es muy común.

Polarización

Las condiciones de polarización son un requisito clave para que un transistor pueda operar correctamente como amplificador en condiciones de señal. No se puede pretender, por ejemplo, que un transistor amplifique una señal sin distorsión cuando su punto de trabajo está muy alejado del centro de la recta de carga, en los límites de la saturación o el corte. Por tanto, el primer punto que se debe tener en cuenta cuando se analiza o diseña un amplificador es investigar como está polarizado, o polarizarlo correctamente. La polarización también determina la clase de operación (A, B, AB o C) de un amplificador, así como su capacidad para manejar señales pequeñas o grandes.

Una vez examinadas las características generales de los amplificadores, es el momento de aplicar estos conceptos al estudio de los amplificadores con transistores. Inicialmente examinaremos las configuraciones básicas de los amplificadores de baja señal, comprobaremos experimentalmente el funcionamiento de un amplificador en emisor común y extenderemos estos conceptos a los amplificadores basados en transistores de efecto de campo (FET). Posteriormente aprenderemos cómo acoplar etapas amplificadoras en cascada para obtener altas ganancias. Por último, estudiaremos algunas configuraciones básicas de amplificadores de potencia.

Amplificadores de baja señal con transistores

Hasta el momento hemos aprendido a analizar amplificadores en condiciones **estáticas** o de **reposo** (sin señal de entrada aplicada) y a polarizarlos, es decir, a establecer el punto de trabajo (Q) de los mismos. Una vez que un transistor ha sido polarizado adecuadamente, con el punto Q preferiblemente cerca del centro de la recta de carga, podemos entonces aplicar una pequeña señal en la entrada para amplificarla y obtener una señal más grande en la salida. La presencia de la señal de entrada hace que las corrientes y voltajes del circuito varíen por encima y por debajo de sus valores nominales o de reposo. A estas nuevas condiciones se les denomina **dinámicas** o de **señal**.

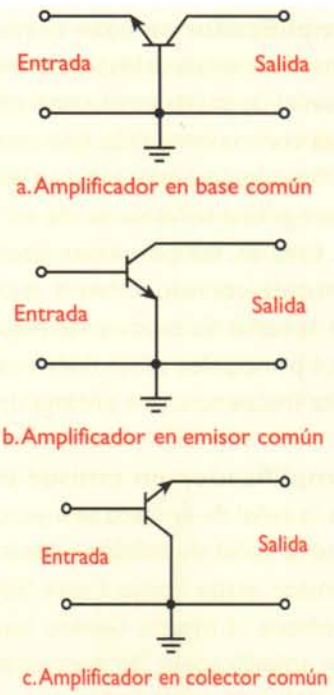


Figura 8.24. *Configuraciones básicas simplificadas de amplificadores con transistores. Para simplificar, no se muestran las fuentes de alimentación, ni las resistencias, condensadores y demás componentes necesarios para polarizar el transistor, acoplar las señales de entrada y de salida, mejorar el desempeño, etc. Por tanto, éstos son únicamente circuitos equivalentes de señal.*

Dependiendo de la forma como se conecte un transistor para llevar a cabo la función de amplificación, son posibles tres configuraciones importantes, llamadas **emisor común** (EC), **base común** (BC) y **colector común** (CC). En la **figura 8.24** se ilustra la idea básica de cada una. Individualmente, estas configuraciones reaccionan de manera diferente a la señal de entrada y tienen características específicas que las hacen aplicables a un uso especial. Su nombre se deriva del terminal del transistor (base, colector o emisor) que actúa como tierra o referencia común para las señales de entrada y de salida.

En un **amplificador en base común, figura 8.24a**, la señal de entrada se inyecta al emisor, mientras que la señal de salida se obtiene del colector. La base actúa como tierra. Este tipo de estructura ofrece amplificación de voltaje pero no de corriente. Además, entrega una señal de salida en fase con la de entrada. Esto es, las porciones positivas de la señal de entrada corresponden a las porciones positivas de la señal de salida y las negativas a las negativas. Sus principales aplicaciones están en circuitos de alta frecuencia, por encima de 100kHz.

En un **amplificador en emisor común, figura 8.24b**, la señal de entrada se inyecta a la base, mientras que la señal de salida se obtiene del colector. El emisor actúa como tierra. Este tipo de estructura ofrece al mismo tiempo amplificación de voltaje y amplificación de corriente. Además, entrega una señal de salida invertida u opuesta en fase con respecto a la de entrada. Esto es, las porciones positivas de la señal de entrada corresponden a las porciones negativas de la señal de salida y las negativas a las positivas. Sus principales aplicaciones están en circuitos de baja y mediana frecuencia (por debajo de 100kHz).

En un **amplificador en colector común, figura 8.24c**, la señal de entrada se inyecta a la base, mientras que la señal de salida se obtiene del emisor El colector actúa como tierra. Este tipo de estructura ofrece amplificación de corriente pero no de voltaje. Además, entrega una señal de salida en fase con la de entrada. Esto es, las porciones positivas de la señal de entrada corresponden a las porciones positivas de la señal de salida y las negativas a las negativas. Se utiliza tanto en circuitos de baja como de alta frecuencia. También se le conoce como **seguidor emisor** *(follower emitter)*.

Amplificador de baja señal en emisor común

En la **figura 8.25a** se muestra el circuito práctico de un amplificador de baja señal en emisor común. Observe el uso de un esquema de polarización con divisor de tensión, estructurado alrededor de R1, R2, RC y RE. Estas resistencias establecen la posición del punto de trabajo (Q) del amplificador y determinan su ganancia, su impedancia de entrada y su impedancia de salida.

Note también la adición de un condensador (**C1**) para transferir la señal desde la fuente (**Vs**) hasta la entrada del amplificador (**Vi**), y otro, (**C2**), para transferirla desde la salida de este último (**Vo**) hasta la carga (**VL**). También se incluye un tercer condensador (**CE**) en paralelo con la resistencia del emisor (RE).

Los condensadores C1 y C2 actúan como **condensadores de acople** o de **paso**, y CE como **condensador de desacople**. Los **condensadores de acople** se utilizan en los amplificadores para transferir o acoplar señales de un punto a otro. Por esta razón, se conectan siempre en serie.

Los **condensadores de desacople**, por su parte, se utilizan para desviar o desacoplar señales entre dos puntos. Por esta razón, se conectan siempre en paralelo. En ambos casos se aprovecha la característica de los condensadores de ofrecer una resistencia u oposición al paso de la corriente alterna, inversamente proporcional a la frecuencia. Esta oposición se denomina **reactancia capacitiva**.

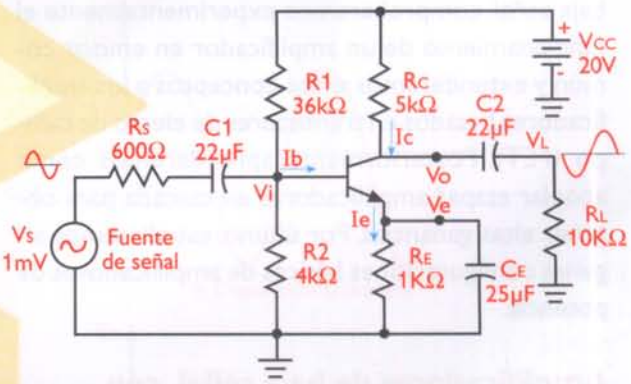


Figura 8.25a. *Amplificador en emisor común representativo.* ***Vs*** *representa la señal de voltaje entregada originalmente por la fuente,* ***Vi*** *la señal de voltaje que llega realmente a la entrada del amplificador,* ***Vo*** *la señal de voltaje que entrega este último en su salida y* ***VL*** *la señal de voltaje que le llega finalmente a la carga (RL). C1 y C2 actúan como condensadores de paso y CE como condensador de desacople. Rs es la resistencia interna de la fuente de señal. Las demás resistencias forman el circuito de polarización*

Acción de los condensadores de acople y desacople

La **reactancia capacitiva** de un condensador se denota como Xc, se expresa en ohmios (Ω) y se evalúa mediante la siguiente fórmula:

$$Xc = \frac{1}{2\pi fC}$$

siendo π una constante (3,1416), **f** la frecuencia (Hz) de la señal y **C** la capacidad del condensador (F). Observe que, si la señal no cambia o lo hace muy lentamente, como es el caso de un nivel de CC, la frecuencia es cero (0), o muy baja, y, por tanto, la reactancia Xc es muy alta, prácticamente infinita. Esta condición corresponde a un **circuito abierto**.

Del mismo modo, si la señal cambia muy rápidamente, la frecuencia es muy alta, y, por tanto, XC es muy baja, prácticamente cero. Esta condición corresponde a un **cortocircuito**. En general, XC es alta para frecuencias bajas y baja para frecuencias altas. Por tanto, estas últimas pasan con mayor facilidad que las primeras.

Para que un condensador de acople o de desacople funcione correctamente, es necesario que Xc sea muy baja, idealmente cero, para la frecuencia más baja contenida en la señal de entrada. Como regla práctica, el valor de Xc para esta frecuencia deber ser, como máximo, la décima parte (1/10) del valor de la resistencia total en serie con el condensador.

En el caso de C1 en la **figura 8.25**, por ejemplo, esta resistencia es la suma de la resistencia de la fuente de señal (Rs) y la resistencia de entrada del amplificador (Ri). Así, con f=20Hz, Rs=600Ω y Ri=1,2K (calculada más adelante), el valor máximo de Xc debe ser de 1.800Ω, lo cual implica que C1 debe ser, por lo menos, de 4,4μF. Por tanto, el valor de 22μF utilizado para C1 es más que adecuado.

Una vez comprendidas las funciones de los condensadores de acople y de desacople, es el momento en que comencemos a analizar cómo funciona nuestro amplificador.

Análisis sistemático

Intuitivamente es fácil comprender como amplifica el circuito de la **figura. 6.25a**. La existencia de una pequeña señal de CA acoplada a la base (Vi) provoca que la corriente de base (Ib) varíe ligeramente por encima y por debajo de su valor en reposo. Estas pequeñas variaciones, multiplicadas por la ganancia de corriente (β), producen grandes variaciones en la corriente de colector (Ic), y, por tanto, en el voltaje de colector (Vc) que es el mismo voltaje de salida (Vo).

Una forma más sistemática de analizar un amplificador como el de la **figura 8.25a,** es efectuando dos análisis por separado, uno en condiciones **estáticas** o de reposo, con la fuente de alimentación (Vcc) activa y la fuente de señal (Vs) anulada, y otro, en condiciones **dinámicas** o de señal, con la fuente de señal (Vs) activa y la fuente de alimentación (Vcc) anulada.

En el primer caso, llamado también **análisis para continua** (CC), la fuente de señal (Vs) se sustituye por un cortocircuto y los condensadores (C1, C2, C3) por circuitos abiertos, mientras que en el segundo, llamado también análisis para **señal o alterna** (CA), la fuente de alimentación (Vcc) se sustituye por un cortocircuito, lo mismo que los condensadores.

Note que **anular** una fuente (de señal o de alimentación) es simplemente sustituirla por un cortocircuito. Asimismo, abrir un condensador es lo mismo que retirarlo o desconectarlo, y ponerlo en cortocircuito, es lo mismo que reemplazarlo por un puente. Estos criterios son aplicables al análisis de cualquier amplificador.

Una vez hechas estas sustituciones se obtienen dos circuitos equivalentes, como los mostrados en las **figuras 8.25b y 8.25c**. El paso final es superponer o sumar los resultados de cada análisis para así visualizar cómo se comportan realmente las corrientes en cualquier rama y los voltajes entre cualquier par de puntos o nodos del circuito. A continuación profundizaremos en estos aspectos.

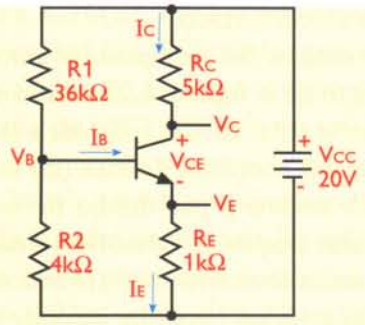


Figura 8.25b. *Circuito equivalente para CC del amplificador de la* ***figura 8.25a***

Análisis para corriente continua

En la **figura 8.25b** se muestra el circuito equivalente para CC de nuestro amplificador, obtenido después de aplicar los criterios anteriores. El circuito resultante muestra las condiciones de polarización, correspondientes al punto de trabajo (Q) del amplificador. Asumiendo un valor de β de 100 (mínimo) y siguiendo los métodos simplificado ($I_B = 0$) y exacto ($I_B \neq 0$) explicados en el **ejemplo 8.4**, llegamos a los siguientes resultados:

Parámetro	Método simplificado	Método exacto
I_{R1}	500µA	501,25µA
I_{R2}	500µA	488,75µA
I_B	0	12,55µA
I_E	1,3mA	1,255 mA
I_C	1,3mA	1,255 mA
V_B	2V	1,955V
V_E	1,3V	1,255V
V_C	13,5V	13,725V
V_{CE}	12,2V	12,47V
V_{RC}	6,5V	6,275V

Observe que los resultados obtenidos por ambos métodos son prácticamente idénticos. Por tanto, al analizar o diseñar el circuito de polarización de un amplificador de baja señal, podemos utilizar siempre el método simplificado, que es más rápido y menos engorroso, siempre y cuando el β real, o el β mínimo especificado por el fabricante, sea relativamente grande (mayor de 50).

Por ejemplo, para el transistor **2N3904** los valores mínimo y máximo de β son 60 y 300, respectivamente. Por tanto, haríamos nuestros cálculos con β=60, que es el peor caso. En la práctica, lo más probable es que el valor real de β del transistor que estamos utilizando sea mayor que este valor, digamos 200, con lo cual nuestras predicciones serán aún más exactas.

Análisis para señal

En la **figura 8.25c** se muestra el circuito equivalente para señal del amplificador de la **figura 8.25a**, obtenido después de aplicar los criterios antes esbozados. Este circuito es clave, puesto que, a partir del mismo, podemos evaluar cuantitativamente las características más importantes del amplificador, incluyendo las impedancias de entrada y de salida, y las ganancias de voltaje, corriente y potencia. También nos permite predecir la distorsión y otros datos de interés cuando se analiza o diseña un amplificador en forma sistemática.

Observe que la anulación de la fuente de alimentación (V_{CC}) provoca que la parte superior de R1 quede conectada a tierra y que R1 quede conectada en paralelo con R2. También ocasiona que la parte superior de R_C quede conectada a tierra. Asimismo, la sustitución de cada uno de los condensadores (C1, C2 y CE) por un cortocircuito, causa que la fuente de señal (Vs, Rs) quede conectada a la base, el emisor a tierra y la carga (R_L) al colector. Como resultado de esto último, R_C y R_L quedan en paralelo, obteniéndose una resistencia equivalente de colector, que designaremos como r_c, igual a:

$$r_c = \frac{(R_C \times R_L)}{(R_C + R_L)} = \frac{(5K \times 10K)}{(5K + 10K)} = 3{,}33K$$

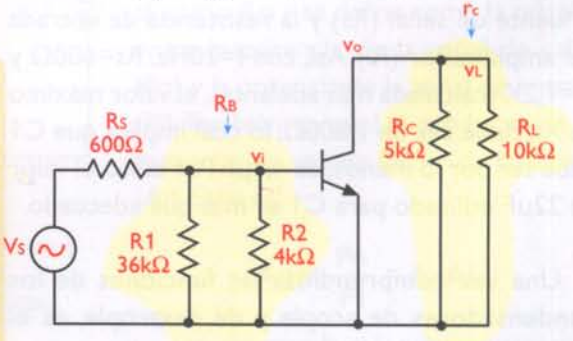


Figura 8.25c. *Circuito equivalente para la señal de CA del amplificador de la* ***figura 8.25a***

Esta resistencia se denomina **resistencia de colector para señal.** La misma juega un papel importante en la determinación de la **ganancia de voltaje** (A_V)del amplificador, debido a que limita las variaciones de la corriente de colector alrededor a su posición de reposo (I_{CQ}) en condiciones de señal.Asimismo, al quedar R1 y R2 en paralelo, se obtiene una resistencia equivalente de base, que designaremos como **R_B**, igual a:

$$R_B = \frac{R1xR2}{R1+R2} = \frac{36Kx4K}{36K+4K} = 3{,}6k\Omega$$

Esta resistencia juega un papel importante en la determinación de la **impedancia de entrada (Z_i)** del amplificador, como veremos enseguida.

Impedancia de entrada (Z_i)

Para calcular la impedancia de entrada de nuestro amplificador, es conveniente introducir el concepto de **resistencia dinámica de base**, definida como la oposición que ofrece la unión base emisor a las variaciones de la corriente de base producidas por la señal de entrada. La resistencia dinámica de base, también llamada **impedancia de entrada de base**, se denota como **r'_b** (léase «r prima b»), se mide en ohmios (Ω) y se evalúa mediante la siguiente fórmula:

$$r'_b = \frac{25mV}{I_B} = \beta \times \left(\frac{25mV}{I_E}\right)$$

siendo I_B e $I_E=\beta I_B$, en su orden, las corrientes de base y de emisor en condiciones de polarización, y β la ganancia de corriente del transistor. En nuestro caso, I_E=1,3mA y β=100. Por tanto:

$$r'_b = \beta \times \left(\frac{25mV}{I_E}\right) = 100 \times \left(\frac{25mV}{1{,}3mA}\right) = 1{,}92k\Omega$$

Esta resistencia, al quedar en paralelo con R_B, determina la **impedancia de entrada (Z_i)** del amplificador, **figura 8.25d**. Por tanto:

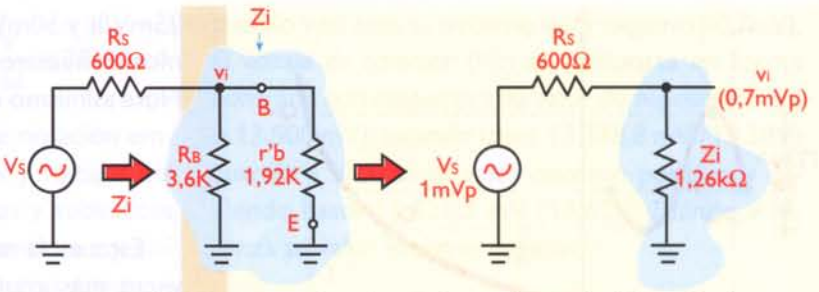


Figura 8.25d. Determinación de la impedancia de entrada del amplificador

$$Z_i = \frac{r'_b \times R_B}{r'_b + R_B}$$

En nuestro caso, r'_b=1,92kΩ y R_B=3,6kΩ. Por tanto,

$$Z_i = 1{,}26\ k\Omega$$

Esta es la impedancia de entrada de nuestro amplificador. Su efecto es limitar el voltaje de señal disponible a la entrada (v_i), causando que sea inferior al voltaje entregado por la fuente de señal (v_s). En nuestro caso, asumiendo que v_s tiene un valor pico de 1mV y la resistencia interna de la fuente de señal (Rs) es 600Ω ó 0,6K, los valores pico, y pico a pico de la señal de entrada (v_i), son:

$$v_{i(pico)} = v_s \times \left(\frac{Z_i}{Zi+Rs}\right) = 1mV \times \left(\frac{1{,}26K}{1{,}26K+0{,}6K}\right)$$

$$v_{i(pico)} = 0{,}68mV \approx 0{,}7mV$$

$$v_{i(pico\ a\ pico)} = 2 \times V_{i(pico)} = 1{,}4mV$$

Funcionamiento con señal pequeña

Cuando se acopla la señal de voltaje de entrada (Vi) a la base del transistor, las variaciones de la misma hacen que el punto trabajo (Q) de la unión base-emisor suba y baje alrededor de su posición estable, definida por V_{BEQ} e I_{EQ} (0,7V y 1,3mA, en nuestro caso). Esta situación se ilustra en **la figura 8.25(e)**. En otras palabras, el punto de trabajo cambia instantáneamente de posición de acuerdo a las variaciones de la señal de entrada. Cuando esta última alcanza su valor máximo positivo (+0,7mV), V_{be} sube hasta 707 mV (Q_H), mientras que cuando alcanza su valor máximo negativo (-0,7mV), V_{be} baja hasta 693mV (Q_L).

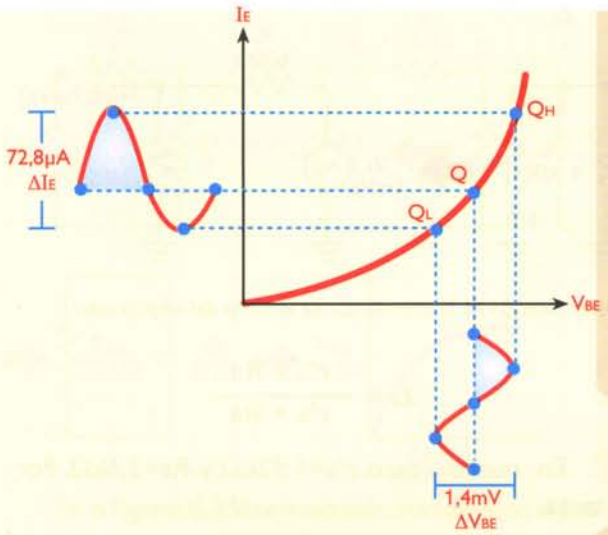


Figura 8.25e. *Variaciones en el voltaje base-emisor (Vbe) y la corriente de emisor (Ie) debidas a la señal de entrada. Deliberadamente se ha exagerado la curvatura de la característica para mostrar la distorsión que puede sufrir la corriente de emisor cuando la señal de entrada es muy grande.*

Las variaciones del voltaje base-emisor producen, a su vez, grandes variaciones en la corriente de emisor (Ie). Para conocer la magnitud de estas variaciones, es necesario introducir el concepto de **resistencia dinámica de emisor,** definida como la oposición o resistencia que ofrece la unión base-emisor al paso de la corriente de emisor en presencia de señal. La resistencia dinámica de emisor, que juega un papel muy importante en el análisis de circuitos con transistores, se denota como **r'e**, se mide en ohmios (Ω) y se define mediante la siguiente fórmula:

$$r'_e = \frac{25mV}{I_E} = \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_E} = \frac{v_{be}}{i_e}$$

siendo **IE** la corriente de polarización de emisor, **ΔVBE=vbe** el incremento o cambio neto del voltaje base-emisor y **ΔIE=ie** el incremento o cambio neto de la corriente de emisor. En nuestro caso, **IE**=1,3mA y **ΔVBE=vi**=1,4V (valor pico a pico). Por tanto,

$$r'_e = \frac{25mV}{1,3mA} = 19.23\Omega$$

En la práctica, debido a las tolerancias de fabricación de los transistores, **r'e** puede fluctuar entre 25mV/IE y 50mV/IE. Sin embargo, siempre asumiremos en nuestros cálculos que **r'e** es igual a 25mV/IE. Note asimismo que:

$$r'_b = \beta r'_e$$

Esto es, la resistencia dinámica de la base es β veces más grande que la del emisor o, dicho de otra forma, **r'e** se refleja a la entrada multiplicada por β. Puesto que r'b interviene en la determinación de la impedancia de entrada (Z_i) del amplificador, esta última depende necesariamente del β, que como sabemos es un valor impredecible. Tal dependencia afecta también la amplitud de la señal de entrada (v_i) disponible, y, por tanto, la de la señal de salida (v_o). Esta es la principal desventaja de la configuración emisor común.

Normalmente, tomaremos como **ΔVBE** el valor pico a pico del voltaje base-emisor y como **ΔIE** el valor pico a pico de la corriente de emisor. De este modo, teniendo en cuenta que en nuestro ejemplo, la señal de entrada (v_i) produce un incremento **ΔVBE** máximo de 1,4mV en la tensión Vbe (0,7mV por encima y 0,7mV por debajo) con respecto a su valor de reposo (0,7V), el incremento **ΔIE** máximo de la corriente de emisor es:

$$\Delta I_{E(pico\ a\ pico)} = \frac{\Delta V_{BE}}{r'_e} = \frac{1,4mV}{19,23\Omega} = 72,80\ \mu A$$

Lo anterior significa que cuando la señal de entrada (v_i) aplicada a la unión BE alcanza su valor máximo positivo (+0.7mV), la corriente de emisor (Ie) sube 36,40 μA (la mitad de 72,80μA) con respecto a su valor de reposo (1,3mA ó 1.300μA), alcanzando un valor máximo de 1.336,4μA. Asimismo, cuando la señal de entrada alcanza su valor máximo negativo (-0,7mV), la corriente de emisor baja 36,40μA con respecto su valor de reposo, alcanzando un valor mínimo de 1.263,6μA. Por tanto, la variación total ha sido de 72,80μA pico a pico. Esta misma variación es la que experimenta la corriente de colector. Por tanto:

$$\Delta I_E = \Delta I_C = i_c = \frac{\Delta V_{BE}}{r'_e} = \frac{1{,}4mV}{19{,}23\Omega} = 72{,}80\mu A$$

Observe las diferentes formas de notación empleadas para designar las corrientes y voltajes del circuito. Utilizamos letras mayúsculas y subíndices mayúsculos (I_E) para referirnos a tensiones y corrientes estáticas o de polarización; letras mínusculas y subíndices minúsculos (i_e) para referirnos a corrientes dinámicas o de señal; y letras mayúsculas con subíndices minúsculos ($I_e=I_E+i_e$) para referirnos a corrientes y tensiones totales, es decir, que varían por encima y por debajo de sus valores de reposo. Los incrementos o variaciones netas son asimilables para efectos de análisis, a valores instantáneos de corrientes y voltajes de señal ($\Delta I_E=i_e$).

Ganancia de voltaje (A_v)

Las variaciones en la corriente de colector (ΔI_C) producen a su vez, por la ley de Ohm, variaciones de voltaje sobre la resistencia equivalente de colector (r_c). Puesto que esta última representa la combinación en paralelo de la resistencia de colector (R_C) y la resistencia de carga (R_L), las variaciones de voltaje sobre r_c son las mismas que experimentan el voltaje de salida (V_o) y el voltaje sobre la carga (V_L). Por tanto:

$$v_o = v_L = \Delta I_C \times r_c = i_c \times r_c$$

En nuestro caso, ΔI_C=72,80 μA y r_c =3,33kΩ. Por tanto, los valores pico y pico a pico del voltaje de salida de señal (v_o) en nuestro amplificador son:

$$v_{o(pp)} = \Delta I_C \times r_c = 72{,}80\mu A \times 3{,}33k\Omega = 242{,}4\ mV$$

$$v_{o\ (pico)} = \frac{V_{o\ (pp)}}{2} = 121{,}2\ mV$$

Lo anterior significa que el voltaje real sobre la resistencia de colector (V_{rc}) varía, como máximo, 121,2 mV (la mitad de 242.4mV) por encima y por debajo de su valor de reposo (6,5V 0 6.500mV), subiendo hasta 6.621,2 mV (6,62V) cuando la señal de entrada (v_i) alcanza su valor máximo positivo (+0,7mV) y bajando hasta 6.378,8 mV (6,38V) cuando v_i alcanza su máximo valor negativo (-0,7mV). El voltaje de colector (V_C) se comporta en forma contraria con respecto a su valor de reposo (13,5V o 13.500 mV), bajando hasta 13.378,8 mV (13,38V) cuando v_i alcanza su valor máximo positivo, y subiendo hasta 13.621,2 mV (13,62V) cuando v_i alcanza su valor máximo negativo.

Lo anterior se debe a que $V_c=V_{CC}-V_{rc}$, tanto en condiciones estáticas como de señal. Por tanto, como V_{CC} es constante (20V, en nuestro caso), si aumenta V_{rc}, tiene necesariamente que disminuir V_c, y viceversa. Puesto que $v_c=v_o$, podemos entonces afirmar que las variaciones de voltaje de la señal de salida (v_o) están 180° fuera de fase con respecto a las variaciones de voltaje de la señal de entrada (v_i). En otras palabras, **la señal de salida aparece amplificada pero invertida con respecto a la señal de entrada**. De todos modos, la ganancia de voltaje (A_v) es la relación entre la amplitud de la señal de voltaje de salida y la amplitud de la señal de entrada. Esto es:

$$A_v = \frac{v_o}{v_i}$$

$$Av(dB) = 20 \log Av$$

En nuestro caso, v_o = 242,4 mV y v_i = 1,4 mV (valores pico a pico). Por tanto, la ganancia de voltaje (A_V) del amplificador es:

$$A_V = \frac{242{,}4mV}{1{,}4mV} = 173$$

$$A_{V(dB)} = 20 \log Av = 45\ dB$$

Este resultado significa que el voltaje de señal en la salida (v_o) es 173 veces más grande que en la entrada (v_i), o, lo que es lo mismo, está 45 dB por encima. Esta ganancia es la misma para todos los valores instantáneos de la señal de entrada, independientemente de su forma de onda y de la información que represente (voz, música, etc.). Por esta razón, mientras la señal de entrada se mantenga «pequeña» y el punto de trabajo del amplificador esté correctamente ubicado, la señal de salida será una réplica ampliada pero fiel de la señal de entrada. Esta es la esencia de los amplificadores clase A.

Como regla práctica, una señal se considera «pequeña» cuando el valor pico a pico de la variación de corriente que produce en el emisor (ΔI_E o i_e) es, como máximo, el 10% de la corriente de polarización de emisor (I_E). En nuestro caso, I_E=1,3mA. Por tanto, ΔI_E debe mantenerse por debajo de 130µA. Este límite se alcanzaría con un voltaje de entrada (v_i) de 2,5mVpp. Bajo esta condición, la variación máxima de V_o sería del orden de 432.5 mV.

Note que, desde el punto de vista de la fuente de la señal, la ganancia de voltaje real de la etapa, que designaremos como A'v, es menor que el valor antes obtenido (A_v=173) debido que el voltaje entregado por la misma (v_s=1mVp) es mayor que el que entra al amplificador (v_i=0,7mVp). El resto (0,3mVp) se pierde en la resistencia interna (R_s). Por tanto:

$$A'_v = \frac{v_o}{v_s} = \frac{121{,}2mV}{1mV} = 121$$

$$A'_{v(dB)} = 20\log(121) = 41{,}7\ dB$$

Impedancia de salida (Z_o)

Nuestro amplificador tiene también una **impedancia de salida (Zo),** la cual interactúa con la resistencia de carga (R_L) para determinar la cantidad de señal resultante sobre esta última (V_L). Esta impedancia, vista por la carga, es igual a la resistencia equivalente en paralelo de la resistencia de colector (R_C) y la resistencia dinámica entre colector y emisor, que se conoce como **roe**, **figura 8.25f**. Esto es:

$$Z_o = R_C || r_{oe}$$

donde el símbolo «||» significa «en paralelo con».

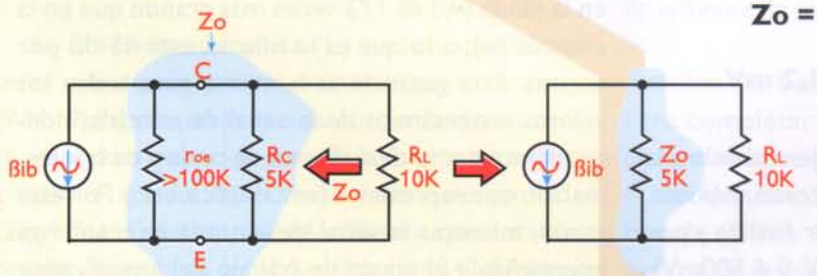


***Figura 8.25f**. Determinación de la impedancia de salida del amplificador. El transistor actúa como una fuente de corriente de valor ic=Bib con una resistencia interna igual a roe. Esta última equivale al inverso de la admitancia de salida (hoe).*

El valor de r_{oe} es normalmente muy alto comparado con el de R_C, por ejemplo 100kΩ contra 3,6kΩ, como en este caso. Por esta razón generalmente se ignora. De este modo, la impedancia de salida del amplificador (Z_o) es prácticamente igual al valor de la resistencia de colector (R_C). Esto es:

$$Z_o = R_C$$

En nuestro caso, R_C = 5kΩ. Por tanto:

$$Z_o = 5k\Omega$$

Esta es la impedancia de salida de nuestro amplificador. Para más exactitud, usted puede obtener indirectamente el valor de r_{oe} a partir de un parámetro conocido como **admitancia de salida**, que se denota como **hoe,** se mide en siemens (S) ó mhos (℧, Ω al inverida), y equivale al inverso o recíproco de r_{oe}. Esto es:

$$h_{oe} = \frac{1}{r_{oe}}$$

El valor de h_{oe}, que depende de la corriente de polarización de colector (I_C), es suministrado por los fabricantes de transistores en las hojas de datos de sus productos. En la **figura 8.21(i)** se muestra como ejemplo la curva característica de admitancia de salida típica del transistor **2N3904**. Por tanto, en nuestro caso, donde I_C=1,3mA, h_{oe} es aproximadamente igual a 10µmho. Así:

$$r_{oe} = \frac{1}{h_{oe}} = \frac{1}{10\mu℧} = 100k\Omega$$

$$Z_o = \frac{5K \times 100K}{5K + 100K} = 4{,}76k\Omega$$

Este último (4,76 kΩ) sería el valor exacto de la impedancia de salida de nuestro amplificador, el cual no difiere sustancialmente del valor aproximado calculado antes (5 kΩ). Por tanto, para efectos prácticos, podemos asumir que siempre, en un amplificador en

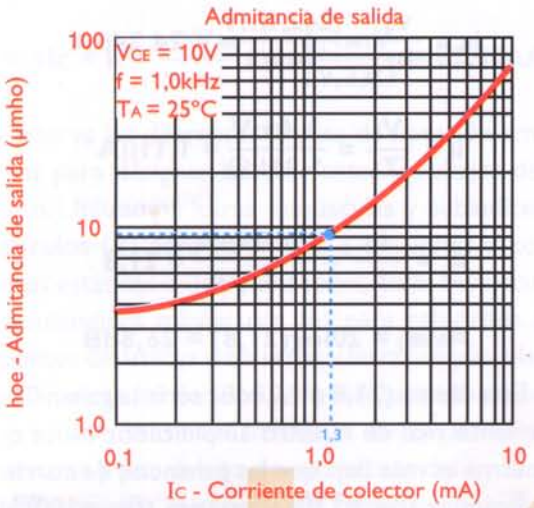


Figura 8.25g. *Curva característica típica de admitancia de salida (2N3904)*

emisor común, $Z_o=R_C$. Observe también que si se desconecta la carga ($R_L=\infty$), el voltaje de salida de señal (v_o) aumenta, porque aumenta la resistencia equivalente de colector (r_c). Bajo esta condición, la ganancia de voltaje (A_v) es la máxima posible. Usted puede demostrar fácilmente que esta última es igual a:

$$A_{vmax} = \frac{R_C}{r'_e}$$

$$A_{vmax(dB)} = 20\log(A_{vmax})$$

En nuestro caso, $R_C=5k\Omega$ y $r'_e=19{,}23\Omega$. Por tanto:

$$A_{vmax} = \frac{5.000\Omega}{19{,}23\Omega} = 260$$

$$A_{vmax(dB)} = 20\log(260) = 48{,}3dB$$

Así, para cualquier valor de la resistencia de carga (R_L), el valor correspondiente de la ganancia de voltaje (A_v) es, simplemente:

$$A_v = A_{vmax} \times \left(\frac{R_L}{R_C+R_L}\right)$$

Por ejemplo, si $R_L=20K$, entonces:

$$A_v = 260 \times \left(\frac{20K}{5K+20K}\right) = 208$$

En general, la ganancia de voltaje aumenta o disminuye a medida que aumenta o disminuye la resistencia de carga (R_L). Si esta última se pone en cortocircuito ($R_L=0$), entonces $A_v=0$. Por tanto, dependiendo del valor de R_L, la ganancia de voltaje de nuestro circuito puede variar, teóricamente, entre 0 (mínima) y 260 (máxima).

Ganancia de corriente

La aplicación de la señal de entrada (v_i) provoca pequeñas variaciones en la corriente de base (I_b) alrededor de su valor de reposo, las cuales, a su vez, producen grandes variaciones en la corriente de colector (I_c). Esta situación se ilustra en la **figura 8.25h**. La relación entre la variación de la corriente de colector (ΔI_C) y la correspondiente variación en la corriente de base que la produce (ΔI_B) define la ganancia de corriente **dinámica** o para señal del transistor, la cual se denota como β_{ac} o h_{fe} para distinguirla de la ganancia de corriente para continua (β, β_{cc} o h_{FE}). Por tanto:

$$\beta_{ac} = h_{fe} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{i_c}{i_b}$$

El valor de β_{ac} o h_{fe} depende del valor de la corriente de polarización de colector (I_C) y es suministrado por los fabricantes en las hojas de da-

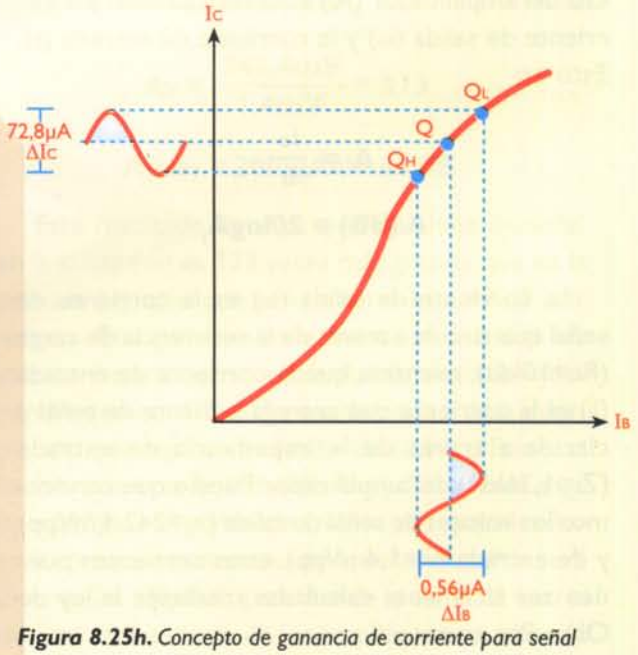


Figura 8.25h. *Concepto de ganancia de corriente para señal*

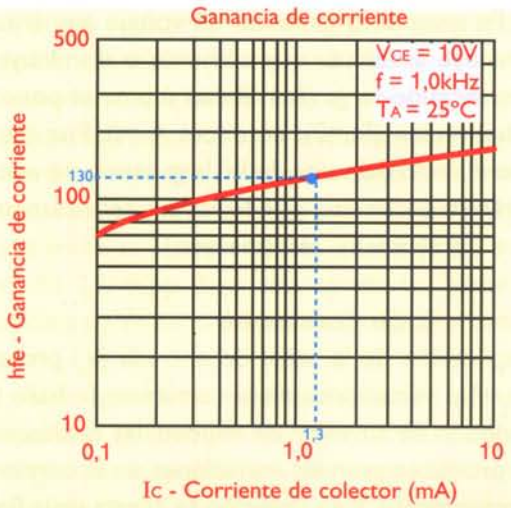


Figura 8.25i. *Variación de la ganancia de corriente de señal (h_{fe}) en función de la corriente de polarización de colector (I_C)*

tos de sus productos. En la **figura 8.25i** se muestra como ejemplo la curva característica típica de **h_{fe}** para un transistor **2N3904**. En nuestro caso, donde I_C=1,3mA, h_{fe} es del orden de **130** veces, es decir **+42dB**. Esto implica que una variación de 1µA en la corriente de señal de base produce una variación de 130µA en la corriente de señal de colector. Este valor, que no debe ser confundido con la ganancia de corriente estática (β_{cc} o h_{FE}), es el que debe utilizarse en los cálculos de señal.

La **ganancia de corriente** propiamente dicha del amplificador (A_i) es la relación entre la corriente de salida (i_o) y la corriente de entrada (i_i). Esto es:

$$A_i = \frac{i_o}{i_i}$$

$$A_{i(dB)} = 20\log A_i$$

La corriente de salida (i_o) es la corriente de señal que circula a través de la resistencia de carga (R_L=10kΩ), mientras que la corriente de entrada (i_i) es la corriente que entrega la fuente de señal y circula a través de la impedancia de entrada (Z_i=1,26kΩ) del amplificador. Puesto que conocemos los voltajes de señal de salida (v_o=242,4 mVpp) y de entrada (v_i=1,4mVpp), estas corrientes pueden ser fácilmente calculadas mediante la ley de Ohm. Por tanto:

$$i_o = \frac{v_o}{R_L} = \frac{242{,}4mV}{10k\Omega} = 24{,}24\mu A$$

$$i_i = \frac{V_i}{Z_i} = \frac{1{,}4mV}{1{,}26k\Omega} = 1{,}11\mu A$$

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{24{,}24\mu A}{1{,}11\mu A} = 21{,}8$$

$$A_{i(dB)} = 20\log(21{,}8) = 26{,}8dB$$

Esta última (21,8 ó 26,8dB) sería la ganancia de corriente real de nuestro amplificador. Note que la misma es más baja que las ganancias de corriente dinámica (β_{ac} =130) y estática (β_{cc} =100) del transistor. No confunda estos tres términos.

Ganancia de potencia

El producto de la ganancia de voltaje (A_v) por la ganancia de corriente (A_i), define la ganancia de potencia (A_p) del amplificador. Esto es:

$$A_p = A_v A_i$$

$$A_{p(dB)} = 10 \times \log(A_p)$$

En nuestro caso, A_v=173 y A_i=21,8. Por tanto:

$$A_p = 173 \times 21{,}8 = 3.771{,}4$$

$$A_{p(dB)} = 10 \times \log A_p = 35{,}8\ dB$$

Esta última (35,8 dB) sería la ganancia de potencia de nuestro amplificador desde el punto de vista de la señal de entrada. Por tanto, por cada microvatio (µW) aplicado a la entrada del amplificador, se producen 3,8mW sobre la resistencia de carga ¿Cuál sería la ganancia de potencia desde el punto de vista de la fuente de señal? **Respuesta**: 34,2 dB. ¿Por qué?

Ancho de banda

Para completar el análisis de nuestro amplificador solamente nos falta determinar su respuesta de frecuencia, particularmente el **ancho de banda (BW)**, es decir la escala de frecuencias dentro de la cual la ganancia de voltaje (A_v) disminuye hasta 3dB con respecto a su valor nominal (45dB). Para ello debemos encontrar las frecuencias de corte inferior (f_L) y superior (f_H) que

limitan el ancho de banda. El valor de **fL**, en particular, depende de las capacidades de los condensadores de acople y desacople (C_1, C_2, C_E). El valor de f_H, por su parte, depende de las capacidades internas del transistor y las capacidades parásitas presentes en el circuito, como resultado de los métodos de conexión y construcción utilizados en su ejecución física.

Para calcular la frecuencia de corte inferior (f_L) debemos calcular las frecuencias de corte inferiores debidas a cada uno de los condensadores y seleccionar la dominante, es decir la mayor de ellas. Llamaremos f_{L1} la frecuencia de corte inferior debida a C_1, f_{L2} la debida a C_2 y f_{LE} la debida a C_E. La frecuencia de corte es simplemente la frecuencia a la cual la reactancia (X_C) del condensador particular considerado, es igual a la resistencia equivalente (R_{eq}) en serie con el mismo con las fuentes de voltaje o de corriente anuladas. Recuerde que **anular** una fuente de voltaje es sustituirla por un **cortocircuito** y anular una fuente de **corriente** es sustituirla por un **circuito abierto**. Esto es:

$$f_L = \frac{1}{2\pi X_C C} = \frac{1}{2\pi R_{eq} C}$$

En la **figura 8.25j** se muestra como ejemplo el proceso de determinación de f_{L1}. En este caso, la resistencia equivalente en serie (R_{eq1}) es la suma de la resistencia de la fuente de señal (R_S=600Ω ó 0,6kΩ) y la resistencia o impedancia de entrada del amplificador (Z_i=1,26kΩ). Por tanto:

$$R_{eq1} = R_S + Z_i = 0{,}6k\Omega + 1{,}26k\Omega = 1{,}86k\Omega$$

$$f_{L1} = \frac{1}{(2\pi R_{eq1} C_1)} = \frac{1}{(6{,}28 \times 1{,}86k\Omega \times 22\mu F)} = 3{,}9\ Hz$$

En la **figura 8.25k** se muestra como ejemplo el proceso de determinación de f_{L2}. En este caso, la resistencia equivalente en serie (R_{eq2}) es la suma de la resistencia de la carga (R_L=10kΩ) y la resistencia o impedancia de salida del amplificador (Z_o=5kΩ). Por tanto:

$$R_{eq2} = Z_o + R_L = 5k\Omega + 10k\Omega = 15k\Omega$$

$$f_{L2} = \frac{1}{2\pi R_{eq2} C_2} = \frac{1}{6{,}28 \times 15k\Omega \times 22\mu F} = 0{,}5\ Hz$$

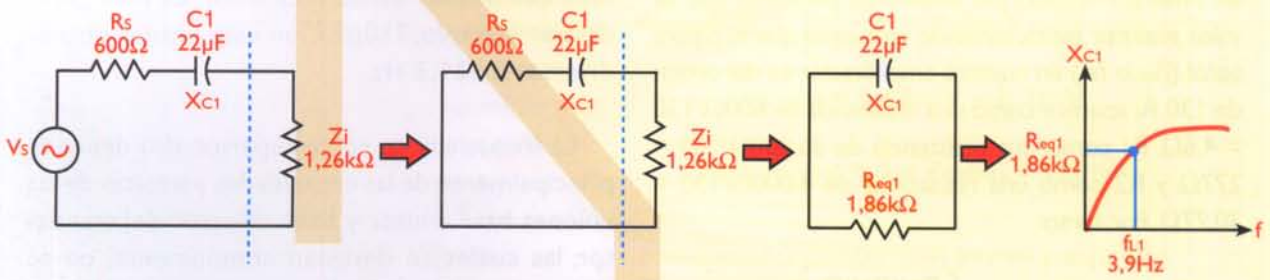


Figura 8.25j. *Frecuencia de corte inferior (fL1) debida a C1. Observe la anulación de la fuente de señal mediante su sustitución por un cortocircuito. Al hacer esto, Rs y Zi quedan en serie entre sí y con el condensador C1*

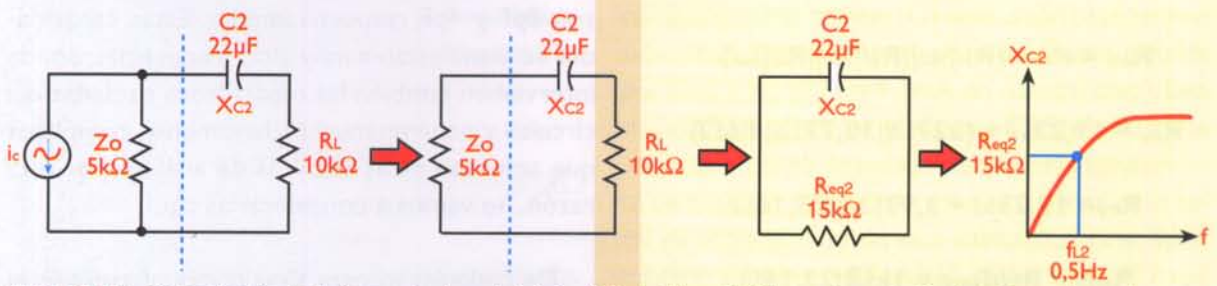


Figura 8.25k. *Determinación de la frecuencia de corte inferior (fL2) debida a C2. Observe la anulación de la fuente de corriente que representa la corriente de señal de colector (ic) mediante su sustitución por un circuito abierto. Al hacer esto, RL y Zo quedan en serie entre sí y con el condensador C2.*

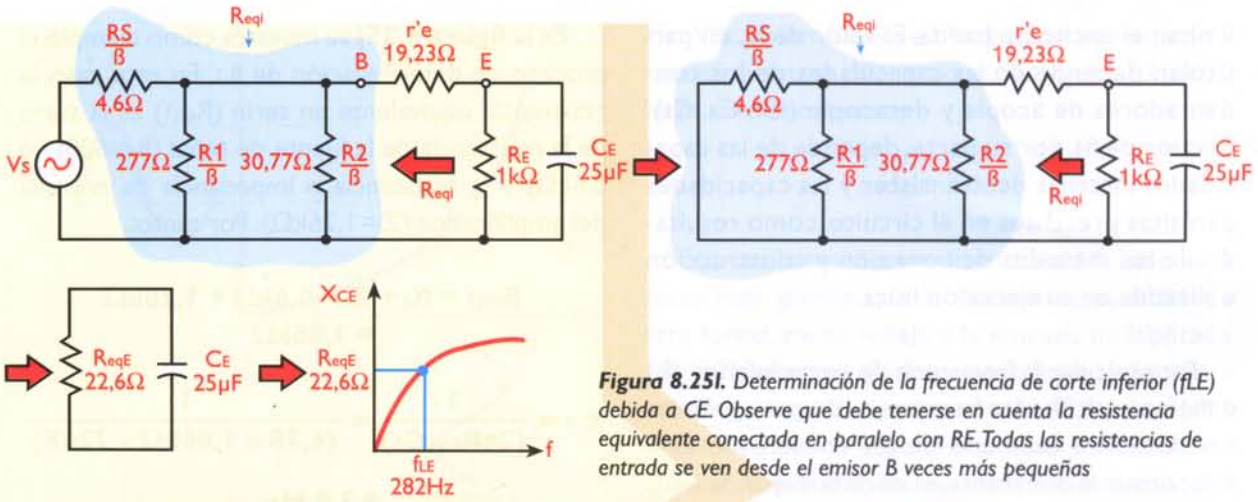


Figura 8.25I. Determinación de la frecuencia de corte inferior (fLE) debida a CE. Observe que debe tenerse en cuenta la resistencia equivalente conectada en paralelo con RE. Todas las resistencias de entrada se ven desde el emisor B veces más pequeñas

En la **figura 8.25I** se muestra como ejemplo el proceso de determinación de f_{LE}, que es más complejo. En este caso, la resistencia R_{eqE} es la resultante del paralelo entre R_E (1k Ω) y la resistencia equivalente a la suma de la resistencia dinámica de emisor (r'_e=19,23Ω) con la resistencia del circuito de entrada «vista» desde el emisor. Llamaremos a esta última R_{eqi}. Por tanto:

$$R_{eqE} = \frac{R_E \times R_{eqi}}{R_E + R_{eqi}}$$

El emisor «ve» todas las resistencias del circuito de entrada, incluyendo las resistencias de polarización de la base (R_1=36kΩ y R_2=4kΩ) y la resistencia de la fuente de señal (R_s=600Ω), β_{ac} veces más pequeñas que su valor real. Por tanto, teniendo en cuenta que el β para señal (β_{ac} o h_{fe}) en nuestro amplificador es del orden de 130, R_s aparece como una resistencia de 600Ω/130 = 4,6Ω, R_1 como una resistencia de 36.000Ω/130 = 277Ω y R2 como una resistencia de 4.000Ω/130 = 30,77Ω. Por tanto:

$$R_{eqi} = r'_e + \left(\frac{R_1 || R_2 || R_s}{\beta_{ac}}\right)$$

$$R_{eqi} = r'_e + (R_1/\beta_{ac} || R_2/\beta_{ac} || R_s/\beta_{ac})$$

$$R_{eqi} = 19{,}23\Omega + (227\Omega || 30{,}77\Omega || 4{,}6\Omega)$$

$$R_{eqi} = 19{,}23\Omega + 3{,}93\Omega = 23{,}16\Omega$$

$$R_{eqE} = R_E || R_{eqi} = 1k\Omega || 23{,}16\Omega$$

$$R_{eqE} = 22{,}6\ \Omega$$

Bajo estas condiciones, la frecuencia de corte inferior (f_{LE}) debida a C_E es:

$$f_{LE} = \frac{1}{(2\pi R_{eqE} C_E)} = \frac{1}{(6{,}28 \times 22{,}6\Omega \times 25\mu F)}$$

$$= 282\ Hz = f_L$$

Esta última (**282 Hz**) sería la frecuencia de corte inferior (f_L) práctica de nuestro amplificador, ya que es la dominante con respecto a f_{L1} (3,9Hz) y f_{L2} (0,5Hz). Si deseamos disminuir este valor, digamos a 28,2Hz o menos, tendríamos que utilizar un condensador C_E más grande, por ejemplo, 330μF. Con este último obtendríamos f_L=21,3 Hz.

La frecuencia de corte superior (f_H) depende principalmente de las capacidades parásitas de las uniones base emisor y base colector del transistor, las cuales se designan comúnmente, en su orden, como **C_{ib}** y **C_{ob}**. Para el transistor 2N3904, por ejemplo, los valores máximos de C_{ib} y C_{ob} son 8pF y 4pF, respectivamente. Estas capacidades se manifiestan a muy altas frecuencias, donde intervienen también las capacidades parásitas del circuito y ocurren muchos fenómenos complejos que ameritan otras técnicas de análisis. Por esta razón, no vamos a considerarlas aquí.

De cualquier manera, sírva como información el saber que la frecuencia de corte superior (f_H) de nuestro amplificador es alta, de varios cientos de kHz.

Resumiendo, los parámetros característicos de nuestro amplificador en emisor común, considerando una resistencia de carga (RL) de 10kΩ, una impedancia de fuente de señal (Rs) de 600Ω y una tensión de alimentación (VCC) de +20V, son los siguientes:

Ganancia de voltaje (Av): 173 (+45dB)
Ganancia de corriente (Ai): 21,8 (+26,8dB)
Ganancia de potencia (Ap): 3.771,4 (+35,8dB)
Impedancia de entrada (Zi): 1,26kΩ
Impedancia de salida (Zo): 5kΩ
Frecuencia de corte inferior de -3dB: 282Hz
Máximo nivel de señal de entrada (Vi): 2,5mVpp
Máximo nivel de señal de salida (Vo): 650mVpp
Punto de trabajo (Q): I_{CQ}=1,3mA, V_{CQ}=6,3V

De este modo hemos completado el análisis, paso a paso, de nuestro amplificador. Los procedimientos explicados son aplicables a cualquier amplificador de baja señal con transistores bipolares para tareas de baja y mediana frecuencia. Por esta razón, no los vamos a repetir en futuros análisis. No se deje intimidar por las fórmulas y manipulaciones matemáticas involucradas. Las mismas son muy sencillas, útiles y necesarias, porque nos permiten comprender y predecir cómo funciona y se comporta, cualitativa y cuantitativamente, un amplificador bajo determinadas condiciones. En el siguiente experimento comprobaremos todo lo aprendido hasta el momento, en forma práctica.

Experimento 8.1. Análisis de un amplificador de baja señal en emisor común

Objetivos

- Familiarizarse con las características y la operación de un amplificador de baja señal en la configuración emisor común (EC)
- Medir los voltajes y las corrientes de polarización de un amplificador EC
- Aprender a medir la ganancia de voltaje (Av), la impedancia de entrada (Zi) y la impedancia de salida (Zo) de un amplificador.
- Confirmar la validez y exactitud de los procedimientos de análisis, explicados en la lección, mediante la comparación de los resultados esperados teóricamente con los obtenidos en la práctica
- Comprobar que en un amplificador EC la señal de salida está desfasada 180° con respecto a la señal de entrada
- Medir la respuesta de frecuencia de un amplificador EC
- Evaluar como varía la ganancia de voltaje de un amplificador EC con los diferentes valores de la resistencia de carga
- Determinar los factores que causan distorsión en un amplificador EC
- Utilizar el amplificador EC como un preamplificador de micrófono para una etapa de potencia

Materiales necesarios

- 1 Transistor NPN de propósito general 2N3904 ó equivalente (Q1)
- 2 Resistencias de 10kΩ, 1/4W (R1, R_{L1})
- 1 Resistencia de 2,2kΩ, 1/4W (R2)
- 1 Resistencia de 3,9kΩ, 1/4W (R_C)
- 2 Resistencias de 1kΩ, 1/4W (R_E, R_{L2})
- 1 Resistencia de 100kΩ, 1/4W (R_{L3})
- 2 Condensadores electrolíticos de 4,7µF/25V (C1, C2)
- 1 Condensador electrolítico de 47µF/25V (C_E)
- 1 Micrófono electret (MIC1) (opcional)
- 1 Resistencia de 3,3kΩ, 1/4W (R_M) (opcional)
- Alambre telefónico #24AWG para conexiones

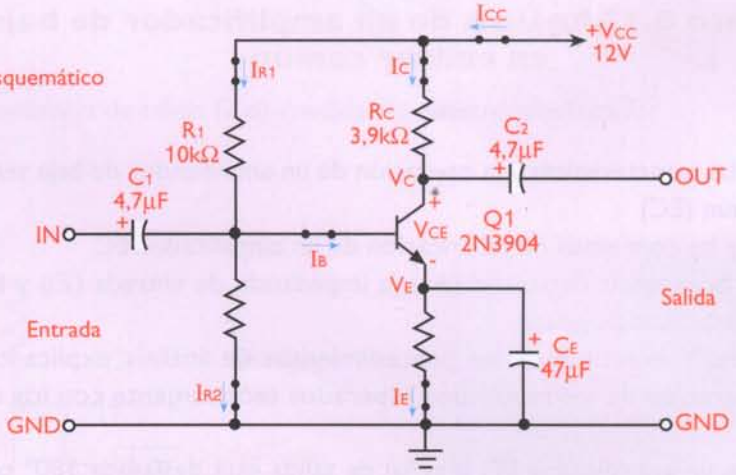
Equipos necesarios

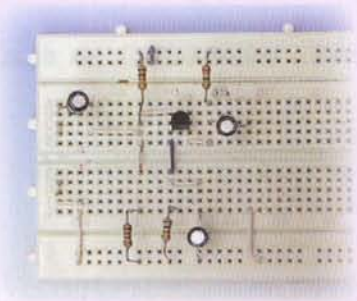
- 1 *Protoboard* o tablero de conexiones sin soldaduras
- 1 Fuente de alimentación regulada de 12V, 1A (V_{CC})
- 1 Multímetro digital (DMM)
- 1 Osciloscopio de dos canales
- 1 Generador de audio con una impedancia de salida de 600Ω (Hung Chang 920AC ó similar) (Vs, Rs)
- 1 Amplificador de potencia de audio (*kit* **CEKIT EF-17** o similar) (opcional)

Procedimiento

1. Análisis de corriente continua. Arme sobre el *protoboard* el circuito de la **figura 8.26a**, correspondiente a un amplificador de baja señal en emisor común desarrollado alrededor de un transistor bipolar (Q1). Asegúrese de utilizar puentes de alambre fácilmente removibles en las ramas indicadas para facilitar la medición de las corrientes del circuito (I_B, I_C, etc.). En la **figura 8.26b** se muestra la fotografía de nuestro montaje experimental. Si su multímetro posee la función de prueba de transistores, antes de instalar Q1 mida su ganancia de corriente estática (β, βcc o h_{FE}), **figura 8.26c**. Nosotros obtuvimos **h_{FE}=203**

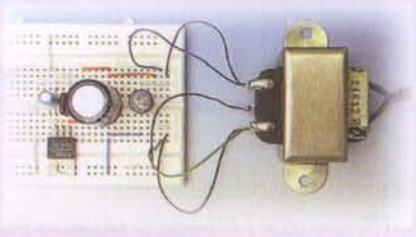
a. Diagrama esquemático





b. Fotografía del montaje

c. Midiendo el β estático (h_{FE}) del transistor

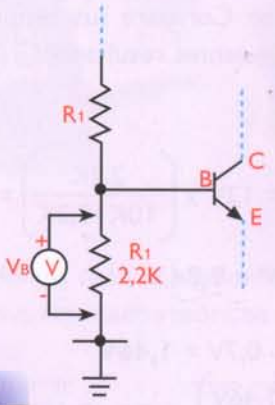


d. Detalle de la fuente de alimentación

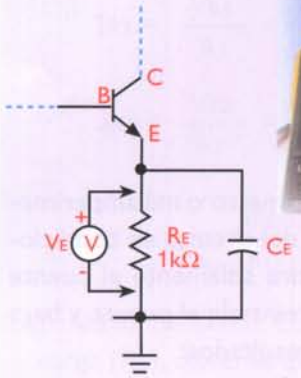
Figura 8.26. *Amplificador en emisor común polarizado, sin fuente de señal ni carga. Nosotros utilizamos como fuente de alimentación de 12V (VCC) una construida alrededor de un regulador LM340T12, tal como se explicó en la* ***lección 7****. Usted puede hacer lo mismo o utilizar una fuente de 12V ya ensamblada, tal como la fuente* ***EF-10*** *de* ***CEKIT,*** *construida en uno de los proyectos centrales de este curso.*

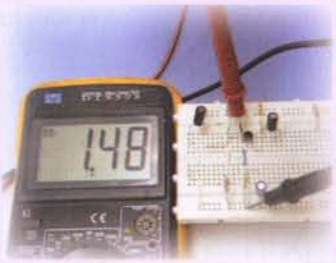
2. Voltajes de polarización. Configurando su DMM como voltímetro de CC, mida todos los voltajes de polarización del circuito en condiciones de reposo, como se indica en la **figura 8.27**. Nosotros obtuvimos los siguientes resultados:

V_{CC} = 11,99 V
V_B = V_{R1} = 2,14 V
V_C = 6,22 V
V_E = V_{RE} = 1,48 V
V_{CE} = 4,73 V
V_{BE} = 0,67 V
V_{R2} = 9,84 V
V_{RC} = 5,75 V

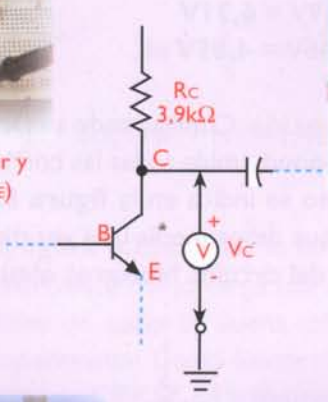


a. Voltaje de base y sobre R2 (V_B=V_{R2})

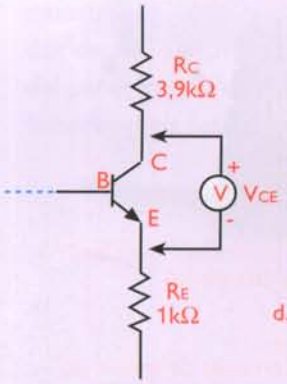




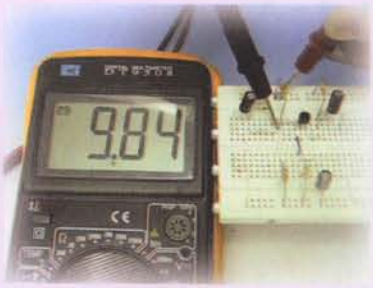
b. Voltaje de emisor y sobre R_E (V_E=V_{RE})



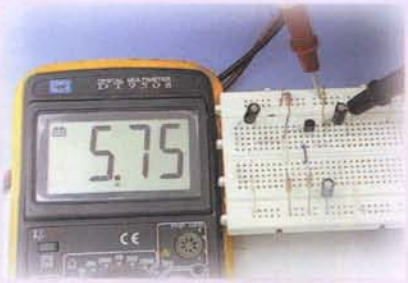
c. Voltaje de colector (V_C)



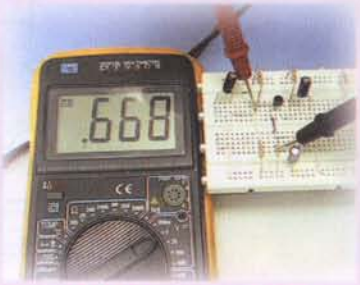
d. Voltaje colector-emisor (V_{CE})



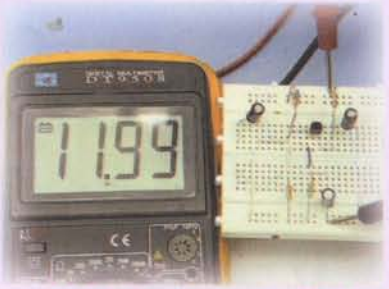
e. Voltaje sobre R1 (V_{R1})



f. Voltaje sobre R_C (V_{RC})



g. Voltaje base-emisor (V_{BE})



h. Voltaje de alimentación (V_{CC})

Figura 8.27 *Midiendo los voltajes de polarización*

3. Calcule los mismos voltajes anteriores en forma teórica, siguiendo el método de análisis en corriente continua simplificado, explicado en la lección. Asuma que: el valor de las resistencias corresponde al indicado por su código de colores; V_{CC}=12V; V_{BE}=0,7V; I_B es muy pequeña comparada con I_{R1} e I_{R2}; β = 203 (medido). Compare sus resultados teóricos con los medidos en la práctica. Nosotros obtuvimos los siguientes resultados:

V_{CC} = 12V

$$V_B = V_{R2} = V_{CC} \times \left(\frac{R2}{R1+R2}\right) = 12V \times \left(\frac{2,2K}{10K+2,2K}\right) = \mathbf{2,16V}$$

$V_{R1} = V_{CC} - V_{R2} = 12V - 2,16V = \mathbf{9,84V}$

$\mathbf{V_{BE} = 0,7V}$

$V_E = V_{RE} = V_B - V_{BE} = 2,16V - 0,7V = \mathbf{1,46V}$

$$V_{RC} = I_C \times R_C = \left(\frac{V_E}{R_E}\right) \times R_C = \left(\frac{1,46V}{1K}\right) \times 3,9K = \mathbf{5,69V}$$

$V_C = V_{CC} - V_{RC} = 12V - 5,69V = \mathbf{6,31V}$

$V_{CE} = V_C - V_E = 6,31V - 1,46V = \mathbf{4,85V}$

4. Corrientes de polarización. Configurando su DMM como microamperímetro o miliamperímetro de CC, según corresponda, mida todas las corrientes de polarización del circuito en condiciones de reposo (Q), como se indica en la **figura 8.28**. En cada caso, retire solamente el puente asociado a la corriente que desea medir. Una vez medida esta corriente, reinstale el puente y haga lo mismo en otra parte del circuito. Nosotros obtuvimos los siguientes resultados:

I_B = 8,4µA
I_C = 1,48mA
I_E = 1,48 mA
I_{R1} = 0,99 mA
I_{R2} = 0,98 mA
I_{CC} = 2,47mA

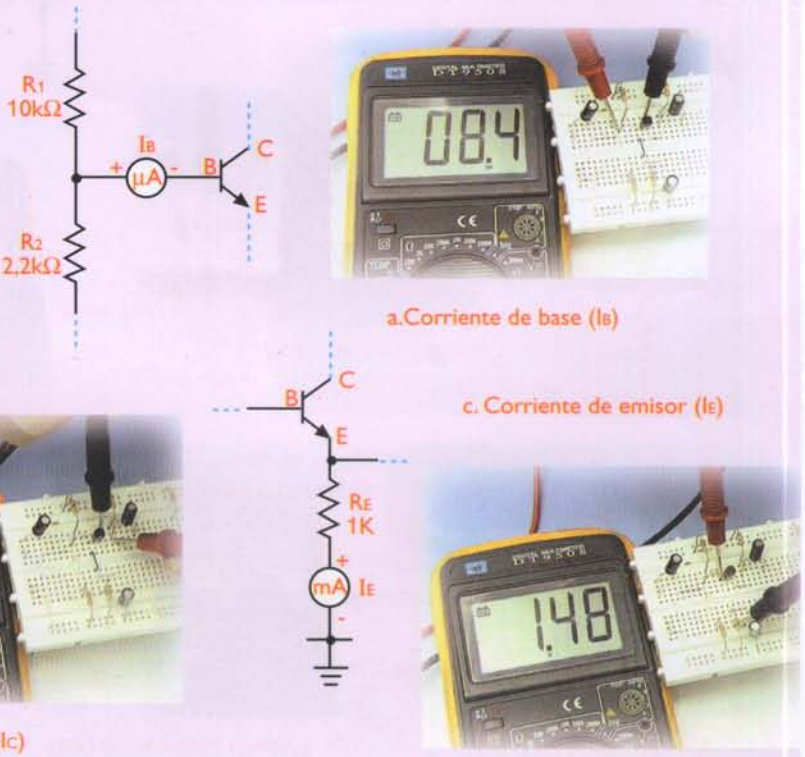
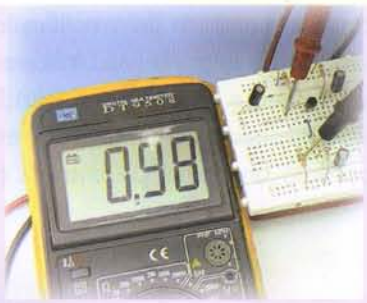
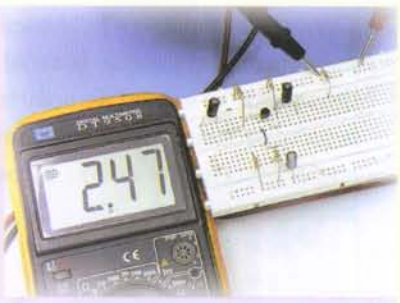


Figura 8.28. Midiendo las corrientes de polarización

d. Corriente a través de R1 (I_{R1})



e. Corriente a través de R2 (I_{R2})



f. Corriente de alimentación (I_{CC})

5. Calcule las mismas corrientes anteriores en forma teórica, siguiendo el mismo método anterior y haciendo las mismas presunciones. Compare sus resultados teóricos con los medidos en la práctica. Nosotros obtuvimos los siguientes resultados:

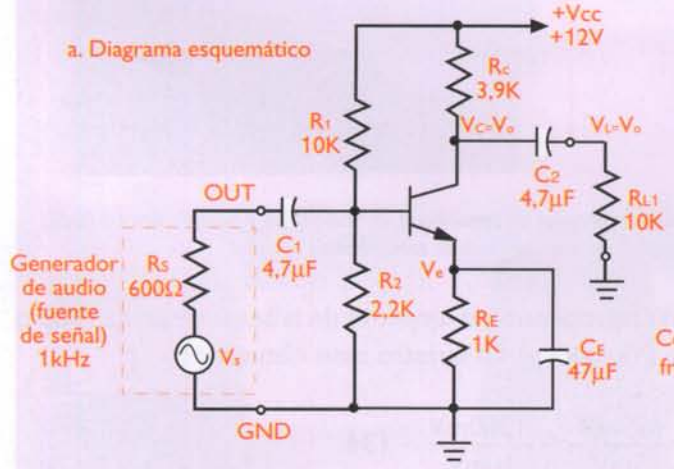
$$I_{R1} = \frac{V_{R1}}{R_1} = \frac{9{,}84V}{10K} = \mathbf{0{,}98\ mA} \qquad I_E = I_{RE} = \frac{V_{RE}}{R_E} = \frac{1{,}46V}{1K} = \mathbf{1{,}46mA}$$

$$I_{R2} = \frac{V_{R2}}{R_2} = \frac{2{,}16V}{2{,}2K} = \mathbf{0{,}98\ mA} \qquad I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{1{,}46mA}{203} = \mathbf{7{,}19\mu A}$$

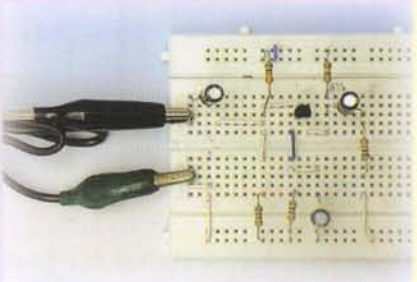
$$I_C = I_{RC} = \frac{V_{RC}}{R_C} = \frac{5{,}69V}{3{,}9K} = \mathbf{1{,}46mA} \qquad I_{CC} = I_C + I_{R1} = 1{,}46mA + 0{,}98mA = \mathbf{2{,}44mA}$$

6. Análisis de señal. Conecte al circuito de la **figura 8.26a** la fuente de señal (vs) y la resistencia de carga (RL), como se indica en la **figura 8.29a**. Utilice como carga una resistencia de 10kΩ (RL1) y como fuente de señal un generador de señales de audio de buena calidad. En la **figura 8.29b** se muestra una fotografía de nuestro montaje experimental. Como fuente de señal utilizamos un generador de audio **Hung Chang 9204C**, distribuido por **CEKIT**. En la **figura 8.29c** se muestra el aspecto del panel frontal de este instrumento, con la indicación de sus partes y controles relevantes para este experimento. Este tipo de equipos se enseñan a manejar en la sección de **Electrónica Práctica**.

a. Diagrama esquemático



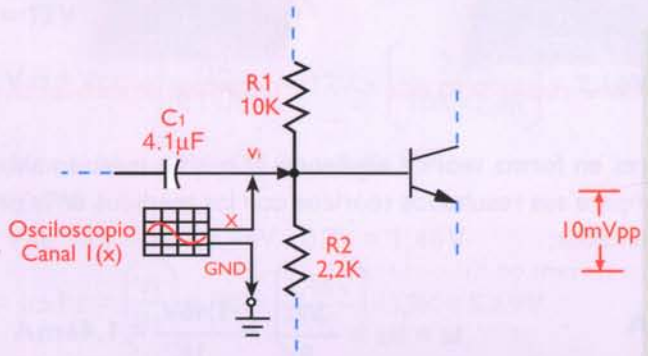
b. Fotografía del montaje



c. Panel frontal de la fuente de señal

Figura 8.29. *Amplificador en emisor común práctico, con fuente de señal y carga*

7. Conecte el canal 1(X) del osciloscopio a la entrada del amplificador, como se indica en la **figura 8.30,** para visualizar y medir la señal de voltaje de entrada (vi). Utilice el modo de acoplamiento «AC» para desacoplar el voltaje de polarización presente en ese punto (V_B). De este modo, solamente observará la señal propiamente dicha. Manipule entonces los controles de frecuencia y de voltaje del generador de audio hasta observar en el osciloscopio una señal de entrada (vi) de 1kHz y 5mVp (10mVpp) de amplitud (Vip o Vipp).



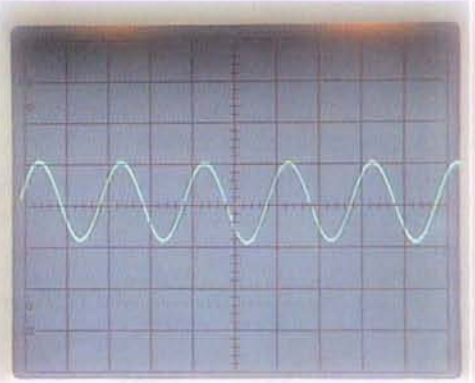
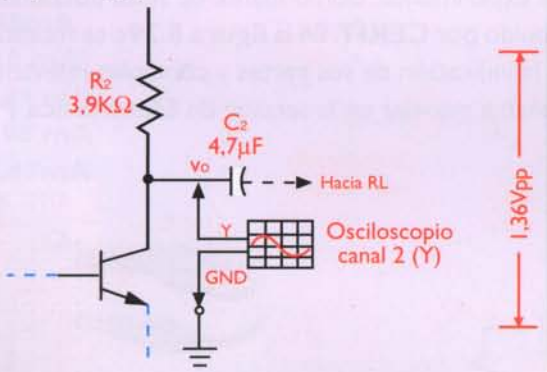


Figura 8.30. *Midiendo el voltaje de señal de entrada (vi). Sitúe los controles de sensibilidad vertical (V/div) y base de tiempo (s/div) del osciloscopio en las posiciones «5mV/div» y «0.5s/div,», para observar unos cinco ciclos completos de la señal.*

8. Conecte el canal 2(Y) del osciloscopio a la salida del amplificador como se indica en la **figura 8.31** para visualizar y medir la señal de voltaje de salida (Vo). Nuevamente, utilice el modo de acoplamiento «AC» para desacoplar el voltaje de polarización presente en ese punto (VC). De este modo, solamente observará la señal de salida propiamente dicha. Mida entonces la frecuencia (f) y la amplitud (Vop o Vopp) de la señal obtenida. En nuestro caso obtuvimos una onda seno perfecta de 1kHz y 680mVp (1,36Vpp).



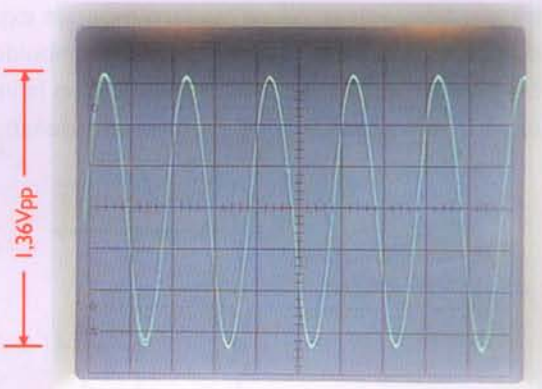


Figura 8.31. *Midiendo el voltaje de señal de entrada (vo). Sitúe los controles de sensibilidad vertical (V/div) y base de tiempo (s/div) del osciloscopio en las posiciones «0.2V/div» y «0.5s/div», para observar unos cinco ciclos completos de la señal.*

9. Calcule la ganancia de voltaje de la etapa (Av) relacionando la amplitud de la señal de salida (Vop o Vopp) con la amplitud de la señal de entrada (Vip o Vipp). En nuestro caso obtuvimos:

$$\frac{Vop}{Vip} = \frac{Vopp}{Vipp} = \frac{680mV}{5mV} = \frac{1360mV}{10mV} = \mathbf{136}$$

$$\mathbf{Av(dB)} = 20\log(Av) = 20\log(136) = \mathbf{42,7\ dB}$$

10. Siguiendo el método de análisis en condiciones de señal explicado en la lección, calcule teóricamente el valor esperado de la ganancia de voltaje (Av) para este circuito. Compárelo con el obtenido en la práctica. Asuma inicialmente que r'e=25mV/IE, aunque en la práctica puede ser hasta el doble de este valor (50mV/IE). En nuestro caso obtuvimos:

$$\mathbf{r'e} = \frac{25mV}{I_E} = \frac{25mV}{1,46mA} = \mathbf{17,12\ \Omega}$$

$$\mathbf{Av} = \left(\frac{R_C}{r'e}\right) \times \left(\frac{R_L}{R_C+R_L}\right) = \left(\frac{3,9K}{17,12\Omega}\right) \times \left(\frac{10K}{3,9K+10K}\right) = \mathbf{163 = 44,3\ dB}$$

Esta ganancia (163), basada en la presunción de que r'e=25mV/IE, es 1,2 veces mayor que la obtenida en la práctica (136), lo cual implica que el valor real de r'e debe ser:

$$\mathbf{r'e\ (real)} = \frac{1,2 \times 25mV}{I_E} = \frac{30mV}{I_E} = \mathbf{20,55\Omega}$$

Calculando nuevamente la ganancia de voltaje (Av) bajo esta condición, obtenemos:

$$\mathbf{Av} = \left(\frac{R_C}{r'e}\right) \times \left(\frac{R_L}{R_C+R_L}\right) = \left(\frac{3,9K}{20,55\Omega}\right) \times \left(\frac{10K}{3,9K+10K}\right) = \mathbf{136,5 = 42,7\ dB}$$

11. Repita los pasos 8, 9 y 10 utilizando las resistencias de carga de 1kΩ (RL2) y de 100kΩ (RL3). Notará que, en el primer caso, la ganancia de voltaje (Av) disminuye, mientras que en el segundo aumenta con respecto a su valor para RL=10kΩ. Hecho esto, instale nuevamente esta última (RL1) y continúe con el siguiente paso.

12. Observe al mismo tiempo las dos señales en el osciloscopio, como se indica en la **figura 8.32**. Notará que la señal de salida (vo) aparece amplificada pero invertida con respecto a la señal de entrada (vi). Por tanto, el circuito introduce un desplazamiento de fase de 180°. Ésta es una característica muy importante de los amplificadores en emisor común.

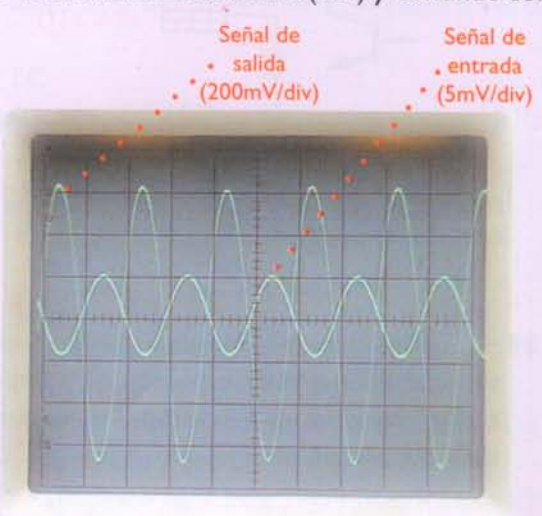


Figura 8.32. *Comparando la fase de la señal de salida (vo) con respecto a la de entrada (vi)*

13. Impedancia de salida. Retire la resistencia de carga (R_L). Mida entonces la amplitud del voltaje de señal de salida bajo esta condición, como se indica en la **figura 8.33.** Llame a este voltaje **Vo'p** para distinguirlo del voltaje de salida con carga (**Vop**). En nuestro caso obtuvimos **Vo'p= 950mVp (1,9Vpp)**. Hecho esto, reinstale RL. Calcule entonces la impedancia de salida del amplificador (Zo) a partir de la siguiente fórmula, basada en el hecho de que Zo y la resistencia de carga (RL) forman un divisor de voltaje excitado por Vo'p:

$$Vop = Vo'p \times \left(\frac{R_L}{Zo + R_L} \right) \qquad \mathbf{Zo = R_L \times \left(\frac{Vo'p}{Vop} - 1 \right)}$$

En nuestro caso, Vo'p= 950mV y Vop=680mV. Por tanto:

$$\mathbf{Zo} = 10K \times \left(\frac{950mV}{680mV} - 1 \right) = \mathbf{3,97\ k\Omega}$$

Esta es la impedancia de salida (**Zo**), medida, de nuestro amplificador

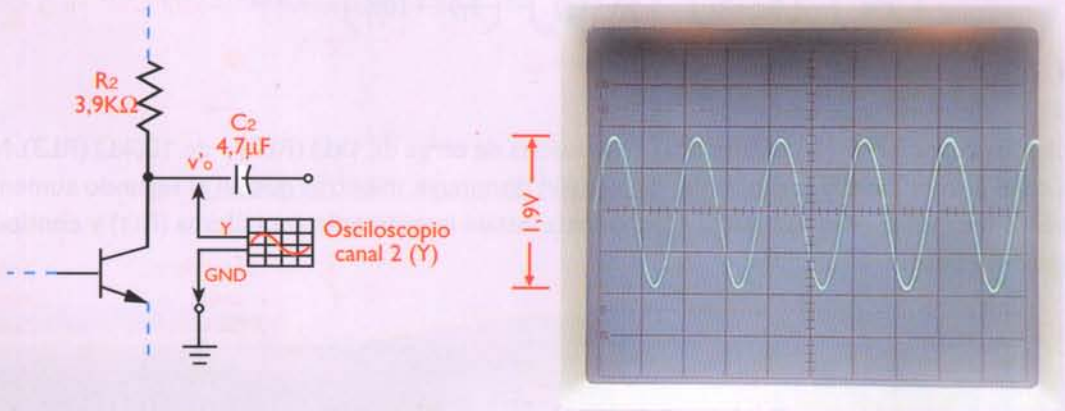


Figura 8.33. *Midiendo el voltaje de salida de señal sin carga (vo') como paso previo para el cálculo de la impedancia de salida (Zo) del amplificador*

14. Siguiendo el método de análisis en condiciones de señal explicado en la lección, calcule teóricamente el valor esperado de la impedancia de salida (**Zo**) para este circuito. Compárelo con el obtenido en la práctica. Asuma que roe es muy grande comparada con RC. En nuestro caso obtuvimos:

$$\mathbf{Zo} = RC = \mathbf{3,9k\Omega}$$

15. Impedancia de entrada (Zi). Retire de la entrada del amplificador la fuente de señal (Vs). Mida entonces la amplitud del voltaje de señal que entrega esta última en condiciones de circuito abierto, como se indica en la **figura 8.34.** Llame a este voltaje **Vi'p=Vs** para distinguirlo del voltaje de entrada con carga (**Vip**). En nuestro caso obtuvimos **Vi'p = Vs = 7mVp (14mVpp)**. Hecho esto, vuelva a conectar la fuente de señal. Calcule entonces la impedancia de entrada del amplificador (**Zi**) a partir de la siguiente fórmula, basada en el hecho de que Zi y la resistencia de la fuente de señal (Rs) forman un divisor de voltaje excitado por Vs o Vi'p:

$$Vip = Vi'p \times \left(\frac{Zi}{Zi + Rs} \right) \quad \Rightarrow \quad \mathbf{Zi = Rs \times \left(\frac{Vip}{Vi'p - Vip} \right)}$$

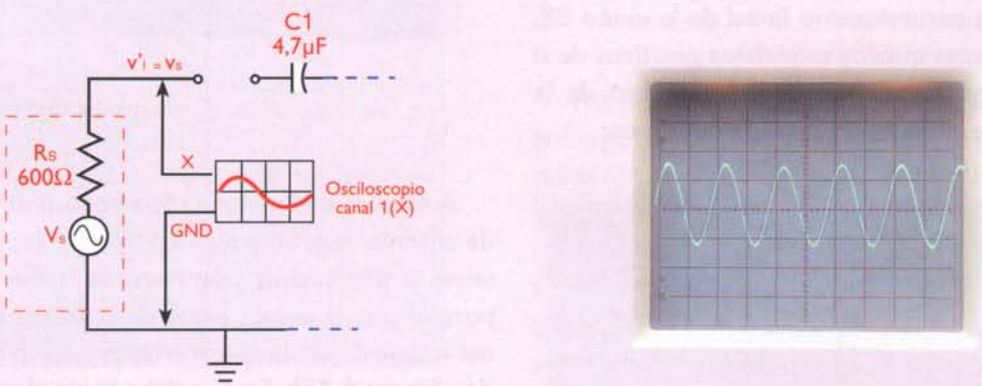


Figura 8.34. *Midiendo el voltaje de la fuente de señal de entrada sin carga (vi' o vs) como paso previo para el cálculo de la impedancia de entrada (Zi) del amplificador.*

En nuestro caso, Vi'p= 7mV, Vip= 5 mV y Rs=600Ω (nominal del generador). Por tanto:

$$\mathbf{Zi = 600\Omega \times \left(\frac{5mV}{7mV - 5mV} \right) = 1.500\ \Omega = 1{,}5k\Omega}$$

Esta última (1,5kΩ) es la impedancia de entrada (Zi), medida, de nuestro amplificador.

1. Siguiendo el método de análisis en condiciones de señal explicado en la lección, calcule teóricamente el valor esperado de la impedancia de entrada (Zi) para este circuito. Compárelo con el obtenido en la práctica. Asuma que r'_e=30mV/I_E=20,55Ω, como se explicó anteriormente. En nuestro caso obtuvimos:

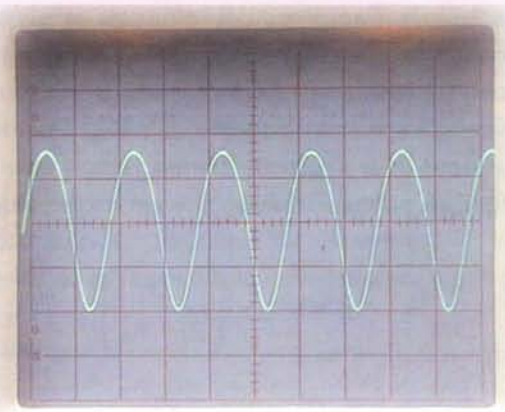
$$Zi = r'_b || R_B$$

$$r'_b = \beta r'_e = 193 \times 20{,}55\Omega = 3.966\ \Omega = 4k\Omega$$

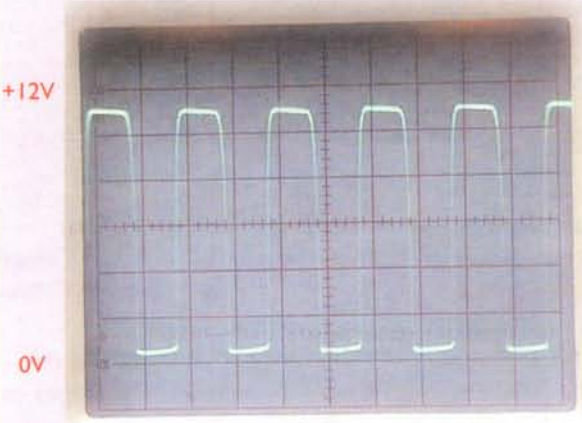
$$R_B = R1||R2 = \left(\frac{2{,}2K \times 10K}{2{,}2K + 10K} \right) = 1{,}8k\Omega$$

$$\mathbf{Zi} = \left(\frac{4K \times 1{,}8K}{4K + 1{,}8K} \right) = \mathbf{1{,}24\ k\Omega}$$

2. **Distorsión.** Aumente lentamente la amplitud de la señal de entrada (*vi*) hasta que la señal de salida (*vo*) comience a mostrar signos visibles de distorsión. En nuestro caso, este fenómeno comienza aproximadamente cuando la amplitud de la señal de entrada es superior a **10mVp**. Continúe aumentando vi. El primer síntoma que observará es la **distorsión armónica**, caracterizada porque los semiciclos negativos de *vo* aparecen alargados con respecto a los positivos, **figura 8.35a**. Esto se debe a la naturaleza no lineal de la unión BE, lo cual causa que los semiciclos positivos de *vi* produzcan un mayor ΔI_E (incremento de la corriente de emisor) que los negativos.



a. Distorsión armómica (*vi*=20mVp)

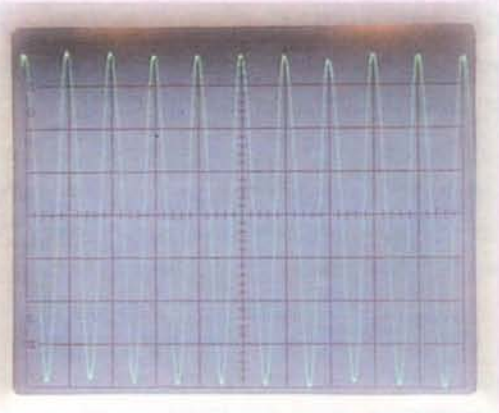


b. Distorsión por recorte (*vi*=100mVp)

Figura 8.35. *Observando la distorsión debida a una señal de entrada excesiva*

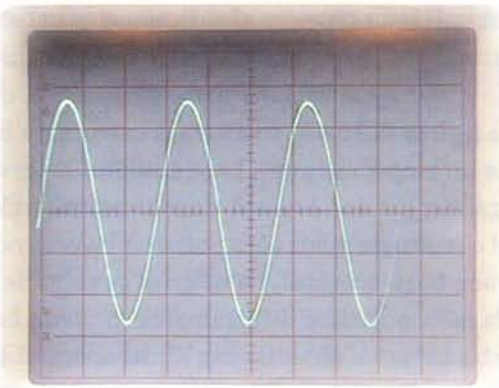
A medida que aumenta la amplitud de la señal de entrada, llega un punto a partir del cual se presenta la **distorsión por recorte**, caracterizada porque uno o ambos picos de la forma de onda del voltaje de salida aparecen aplanados o recortados, **figura 8.35b**. Esto se debe a que el voltaje de entrada (*vi*) provoca el desplazamiento del punto de trabajo instantáneo de la salida (Ic, Vce) hasta más allá de los puntos de corte y saturación. Como resultado, el voltaje neto de salida (Vo) no puede aumentar ni disminuir más allá de V_{CC} (12V) o GND (0V), que son los límites impuestos por la fuente de alimentación.

3. **Respuesta de frecuencia.** Una vez comprobado el fenómeno de la distorsión, manipule nuevamente los controles de frecuencia y voltaje de la fuente de señal de entrada (*vi*), hasta obtener como señal de salida una onda seno pura de 1kHz y 400mVp sobre la resistencia de carga (R_L), **figura 8.36a**. Esta señal representa la ganancia nominal del amplificador (Avnom) en la parte plana de la curva de respuesta de frecuencia. En nuestro caso, **Avnom=136 (42,7 dB)**.

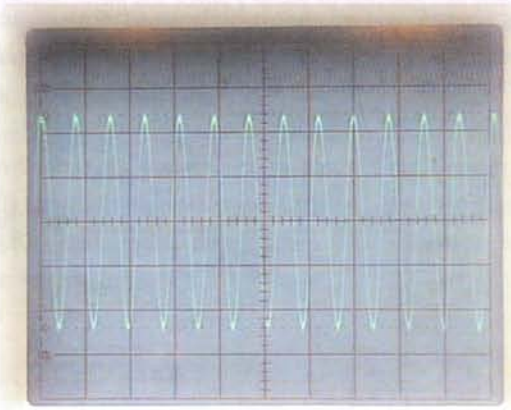


a. Ganancia de voltaje nominal (Av=136, f=1kHz)

A continuación, disminuya lentamente la frecuencia de la fuente de señal hasta que la amplitud del voltaje de salida (*vo*), en bajas frecuencias, descienda hasta el 70,7% de 400mVpp, es decir 283mVp, **figura 8.36b.** Este punto representa la frecuencia de corte inferior (f_L) del amplificador. En nuestro caso, obtuvimos **f_L=186Hz**. A esta frecuencia, la ganancia de voltaje se reduce a 39,7dB, es decir 3dB por debajo de su valor nominal (42,7dB o 96 veces).



b. Ganancia de voltaje en el punto inferior de -3dB (Av=96, f=186Hz)

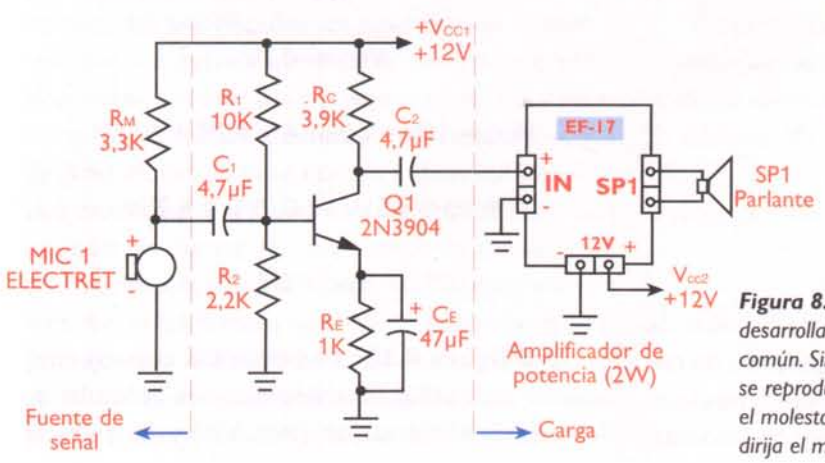


c. Ganancia de voltaje en altas frecuencias (Av=102, f=270kHz)

Figura 8.36. *Midiendo la ganancia en frecuencias medias, bajas y altas*

Por último, aumente lentamente la frecuencia de la fuente de señal hasta que la amplitud del voltaje de salida (*vo*), en altas frecuencias, descienda nuevamente al 70,7% de 400mVpp, es decir 283mV. Este punto representa la frecuencia de corte superior (f_H) del amplificador. A esta frecuencia, la ganancia de voltaje se reduce a 39,7dB, es decir 3dB por debajo de su valor nominal (42,7dB). En nuestro caso, no fue posible medir esta frecuencia debido que la misma es superior a la máxima proporcionada por el generador utilizado (270 kHz). A esta frecuencia, la ganancia obtenida fue de 102 veces (40,17dB). Por tanto, f_H debe estar alrededor de los 300kHz o 350kHz.

4. Aplicación práctica. Para finalizar, desconecte el generador de audio (Vs) y la resistencia de carga (R_L), y sustitúyalos, respectivamente, por un micrófono *electret* (MIC1) y un amplificador de potencia de 2W (*kit* **CEKIT EF-17**), como se muestra en la **figura 8.37**. En este caso, el micrófono actúa como fuente de señal y el amplificador de potencia como carga. La etapa EC (emisor común) actúa como preamplificador. Para evitar que se produzcan fenómenos de realimentación (*feedback*) de sonido, mantenga alejado el parlante del micrófono.



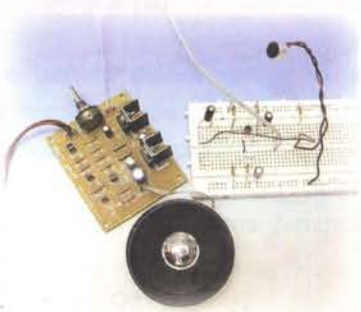


Figura 8.37. *Preamplificador para micrófono electret desarrollado alrededor de una etapa en emisor común. Simplemente hable ante el micrófono y su voz se reproducirá amplificada en el parlante. Para evitar el molesto feedback (un sonido agudo intenso), no dirija el micrófono hacia el parlante.*

Amplificadores de baja señal en base común

En la **figura 8.38a** se muestra la estructura básica de un amplificador en base común. Observe la utilización de dos fuentes de alimentación: **Vcc** en el circuito de salida para polarizar inversamente la unión base-colector y **VEE** en el circuito de entrada para polarizar directamente la unión base-emisor. La señal de entrada (Vi) se aplica al emisor, procedente de la fuente de señal (Vs), mientras que la señal de salida (Vo) se recibe sobre la carga (R_L), procedente del colector (Vc). La base actúa como tierra, masa o terminal común de referencia para ambos circuitos. R_E y R_C fijan el punto de trabajo (Q), mientras que C1 y C2 actúan como condensadores de acople de entrada y salida, respectivamente. No se utilizan resistencias de polarización de base.

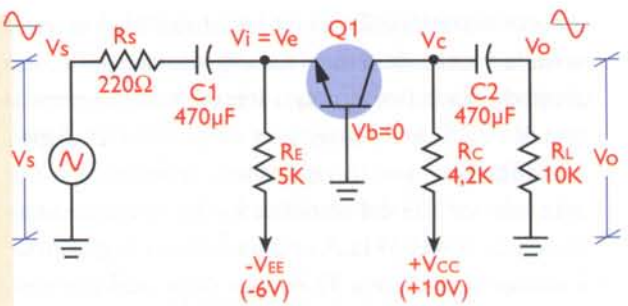


Figura 8.38a. Amplificador en base común. *Circuito general. Esta configuración no produce inversión de fase, tiene una muy alta ganancia de voltaje y ofrece una mejor respuesta de frecuencia que un amplificador en emisor común. Sin embargo, presenta una muy baja impedancia de entrada y no ofrece ganancia de corriente. Se utiliza principalmente en aplicaciones de alta frecuencia*

En la **figura 8.38b** se muestra el circuito equivalente para CC, obtenido después de anular la fuente de señal (Vs) y sustituir los condensadores (C1, C2) por circuitos abiertos. El análisis de este circuito permite deducir las siguientes relaciones, útiles para calcular las corrientes y voltajes del mismo en condiciones de reposo (Q):

$$I_{EQ} = \frac{V_{EE}-V_{BE}}{R_E}$$

$$I_{CQ} = I_{EQ}$$

$$I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{h_{FE}}$$

$$V_{EQ} = -V_{BE}$$

$$V_{CQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_C$$

$$V_{CEQ} = V_{CQ} - V_{EQ}$$

$$V_{BQ} = 0$$

Note que el punto de trabajo de la señal de salida (I_{CQ},V_{CQ}) no depende de la ganancia de corriente (ß o h_{FE}) del transistor, lo cual hace que este circuito sea muy estable. En nuestro caso, asu-

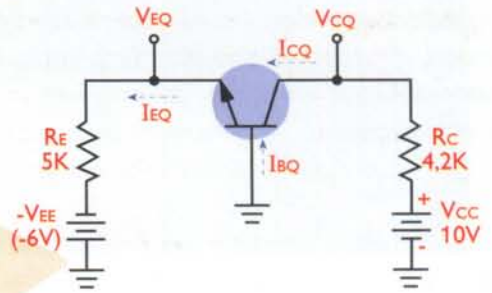


Figura 8.38b. *Circuito equivalente para CC del amplificador en base común*

miendo que h_{FE}=100 y V_{BE}=0,7V, obtendríamos los siguientes valores en condiciones de reposo:

$$I_{EQ} = \frac{6V-0,7V}{5K} = 1,06\ mA$$

$$I_{CQ} = 1,06\ mA$$

$$I_{BQ} = \frac{1,06mA}{100} = 10,6\ \mu A$$

$$V_{EQ} = -0,7V$$

$$V_{CQ} = 10V - 1,06mA \times 4,2K = 5,55V$$

$$V_{CEQ} = 5,55V - (-0,7V) = 6,25V$$

$$V_{BQ} = 0V$$

En la **figura 8.38c** se muestra el circuito equivalente para señal, obtenido después de anular las fuentes de alimentación (V_{CC}, V_{EE}) y de sustituir

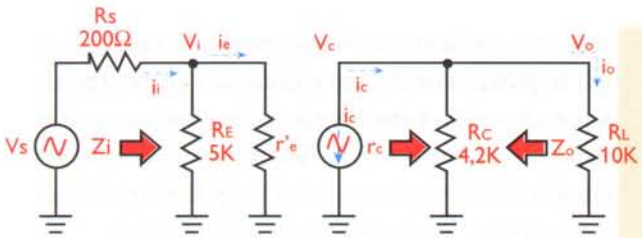


Figura 8.38c. *Circuito equivalente para señal del amplificador en base común*

los condensadores (C1, C2) por cortorcuitos. El análisis de este modelo revela las siguientes características dinámicas importantes de un amplificador en base común:

Impedancia de entrada baja. Esta impedancia (Zi) es igual a la resistencia equivalente en paralelo de R_E (resistencia de emisor) y r'_e (resistencia dinámica de emisor). Esto es:

$$Zi = R_E||r'_e = \frac{R_E \times r'_e}{R_E + r'_e}$$

En nuestro caso, asumiendo,

$$r'_e = \frac{30mV}{I_E} = \frac{30mV}{1,06mA} = 28,3\Omega$$

obtendríamos:

$$Zi = \frac{5k\Omega \times 28,3\Omega}{5k\Omega + 28,3\Omega} = 28,14\Omega$$

Por tanto, la impedancia de entrada es muy baja, prácticamente igual a r'_e. Ésta es la principal desventaja del amplificador en base común debido a que reduce sustancialmente la cantidad de señal disponible a la entrada y puede provocar la sobrecarga de la fuente de señal. Por esta razón, los amplificadores en base común deben ser impulsados desde transformadores y otras fuentes de baja impedancia. Su uso es muy común en circuitos de alta frecuencia, por encima de 10 MHz, donde son frecuentes las fuentes de señal de baja impedancia, por ejemplo 50Ω. De este modo, la mayor parte de la señal se transfiere al amplificador y no se pierde en la resistencia interna de la fuente.

Impedancia de salida moderada. Esta impedancia (Zo) es prácticamente igual al valor de la resistencia de colector (R_C). Esto es:

$$Zo = R_C$$

En nuestro caso,

$$Zo = 4,2k\Omega$$

Esta impedancia puede ser fácilmente reducida a cualquier valor deseado seleccionando adecuadamente la resistencia de colector (R_C). Sin embargo, esta reducción puede desplazar el punto de trabajo (Q) hasta los límites de la saturación, afectando la ganancia de voltaje (Av), causando una demanda de corriente excesiva por parte de la fuente de alimentación (V_{CC}) y provocando fenómenos de distorsión.

Produce amplificación de voltaje. La ganancia de voltaje (Av) es alta y está dada por la relación entre la resistencia equivalente de colector ($r_c = R_C||R_L$) y la impedancia de entrada ($Zi = R_E||r'_e$). Esto es:

$$Av = \frac{vo}{vi} = \frac{r_c}{Zi} = \frac{R_C||R_L}{R_E||r'_e}$$

En nuestro caso, $r_c = 4,2k\Omega\ ||10k\Omega = 2,96k\Omega$ y $Zi=28,14\Omega$. Por tanto:

$$Av = \frac{2,96k\Omega}{28,14\Omega} = 105\ (40,4dB)$$

Observe que la ganancia de voltaje varía dependiendo de la resistencia de la carga (R_L), siendo máxima en condiciones de circuito abierto ($R_L=\infty$) y mínima (0) en condiciones de cortocircuito ($R_L=0$). En nuestro caso, la máxima ganancia de voltaje posible (Avmax) sería:

$$Avmax = \frac{R_C}{Zi} = \frac{4,2k\Omega}{28,14\Omega} = 149\ (43,5\ dB)$$

Esta ganancia puede ser incrementada aumentando el valor de R_C, pero esto implicaría el aumen-

to de la impedancia de salida (Zo) del amplificador y el desplazamiento del punto de trabajo (Q) hacia los límites del corte. Note también que, debido a la presencia de la resistencia Rs, la ganancia de voltaje real, desde el punto de vista de la fuente de señal (Vs), que llámaremos A'v, está dada por:

$$A'v = \frac{vo}{vs} = \frac{Av}{\left(1 + \frac{Rs}{Zi}\right)}$$

siendo Rs la resistencia de la fuente de señal, Zi la impedancia de entrada del amplificador y Av la ganancia de voltaje propiamente dicha de la etapa. En nuestro caso:

$$A'v = \frac{105}{\left(1 + \frac{200\Omega}{28{,}14\Omega}\right)} = 13\ (22{,}2\ dB)$$

Por tanto, una señal de 1 mVpp entregada por la fuente (Vs) produce una señal de entrada (*vi*) de 123,3 µVpp y una señal de salida (*vo*) de 13 mVpp. Así, desde el punto de vista de *vi*, la ganancia de voltaje es 13mV/123,3µV=105, mientras que desde el punto de vista de *vs* la ganancia de voltaje es 13mV/1mV=13.

No produce amplificación de corriente. La ganancia de corriente (Ai) es inferior a la unidad y se puede evaluar a partir de la siguiente relación:

$$Ai = \frac{io}{ii} = Av \times \left(\frac{Zi}{RL}\right)$$

En nuestro caso, Av=105, Zi=28,14Ω y RL=10KΩ. Por tanto:

$$Ai = 105 \times \left(\frac{28{,}14\Omega}{10k\Omega}\right) = 0{,}29\ (-10{,}6dB)$$

Este resultado implica que la fuente de señal debe ser capaz de suministrar una corriente de señal superior a la demandada por la resistencia de carga (RL). Esta es otra desventaja importante del amplificador en base común. La ganancia de corriente de la etapa (Ai) no debe ser confundida con la **ganancia de corriente** del transistor en la configuración base común, la cual se representa como α (alfa) ó h_{fb} y se define como la relación entre la corriente de colector (i_c) y la corriente de emisor (i_e) en condiciones de señal. Esto es:

$$\alpha = h_{fb} = \frac{i_c}{i_e} = \frac{\beta}{\beta+1}$$

siendo $\beta = i_c/i_b$ la ganancia de corriente en la configuración emisor común. En general, α es siempre inferior a la unidad, lo cual implica que la corriente de colector (i_c) es siempre menor que la corriente de emisor (i_e). Sin embargo, para efectos prácticos, generalmente se considera $\alpha=1$. Ésta sería la máxima ganancia de corriente teóricamente posible para una etapa en base común, asumiendo una resistencia de colector infinita.

Ancho de banda extenso. La respuesta de frecuencia se extiende desde 0 Hz hasta varios MHz, y está limitada principalmente por las capacidades parásitas del circuito, así como por las características intrínsecas del transistor. La máxima frecuencia que puede amplificar un transistor en la configuración base común se especifica en términos de la **frecuencia de corte alfa** ($f\alpha$), definida como la frecuencia a la cual la ganancia de corriente a disminuye al 70,7% de su valor nominal. En algunos casos, en lugar de $f\alpha$ se especifica la **frecuencia de corte beta** ($f\beta$), que proporciona la misma información pero para la configuración emisor común. Estos dos parámetros están relacionados así:

$$f\alpha = \beta f\beta$$

Por ejemplo, si $f\beta$ = 1MHz y β = 100, entonces fa = 100MHz. Tenga en cuenta que ésta es la frecuencia máxima útil de operación del transistor y no la frecuencia máxima de operación del circuito, la cual es, en la práctica, muy inferior a este valor, digamos 15 MHz. De todas formas, la respuesta de frecuencia de un amplificador en base común es muy superior a la de un amplificador en emisor común. Por esta razón, es una configuración favorita para amplificadores de alta frecuencia.

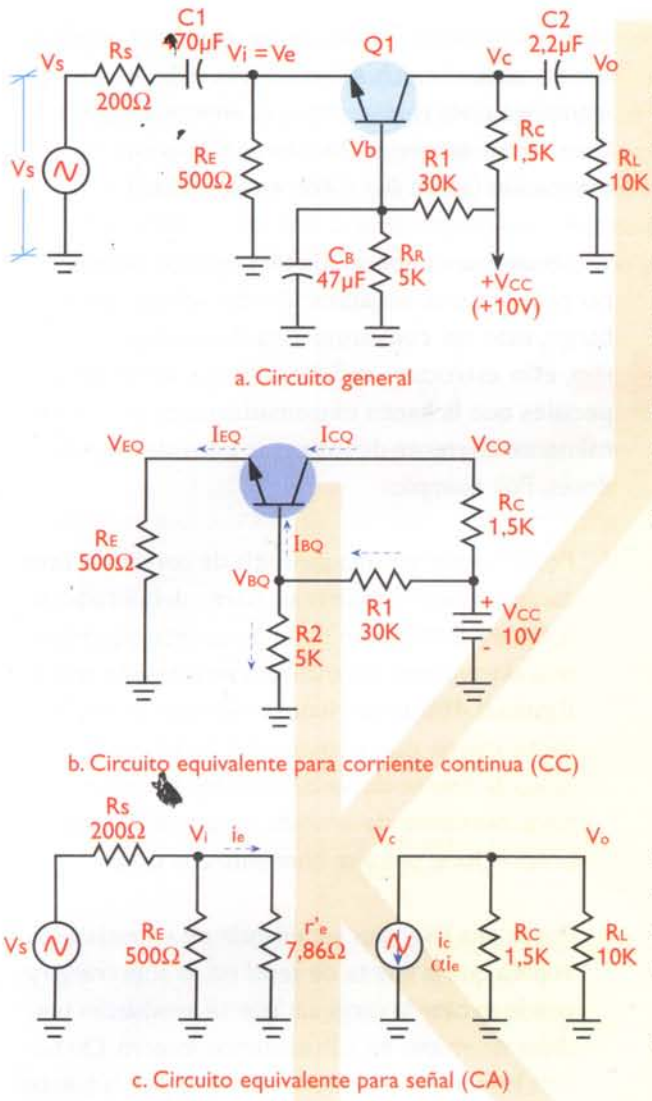


Figura 8.39. *Amplificador en base común con polarización por divisor de tensión*

Aunque normalmente se utilizan dos fuentes de alimentación (V_{CC} y V_{EE}) para polarizar un amplificador en base común, es posible conseguir el mismo efecto con una sola fuente utilizando un esquema de polarización por divisor de tensión, como se ilustra en la **figura 8.39a**. Los circuitos equivalentes para CC y para señal correspondientes se muestran en las figuras **8.39b** y **8.39c**, respectivamente. Observe que la estructura de este último es idéntica a la del circuito de la **figura 8.39b**, mientras que la del primero corresponde a la de un esquema de polarización universal o por divisor de tensión típico.

El condensador C_B actúa como un cortocircuito para la señal, conectando dinámicamente la base a tierra. Sin embargo, desde el punto de vista de la polarización se comporta como un circuito abierto. Su valor se escoge de modo que, para la frecuencia más baja de la señal de entrada (Vs), ofrezca una reactancia (X_C), como máximo, igual a R2/10, es decir, la décima parte del valor de R2. Se deja como ejercicio para el lector demostrar, a partir del análisis de estos circuitos, los siguientes resultados generales (asuma $h_{FE} = h_{fe} = 100$, $V_{BE} = 0{,}7V$ y $r'e = 25mV/I_E$):

- **Condiciones de polarización**
  $V_{BQ} = 2{,}29V$
  $V_{EQ} = 1{,}59V$
  $V_{CQ} = 11{,}23V$
  $I_{CQ} = 3{,}18$ mA
  $I_{EQ} = 3{,}18$ mA
  $I_{BQ} = 31{,}8$ µA
  $I_{R1} = IR2 = 0{,}46$ mA

- Impedancia de entrada (Zi): 7,74Ω
- Impedancia de salida (Zo): 1,5kΩ
- Ganancia de voltaje con carga (Av): 168,5 (44,5 dB)
- Ganancia de voltaje sin carga (Avmax): 193,8 (45,75 dB)
- Ganancia de corriente (Ai): 0,13 (-17,7dB)

Amplificadores de baja señal en colector común. Seguidores de emisor

Una de las principales desventajas del amplificador en base común es su baja impedancia de entrada. Esta baja impedancia causa que la mayor parte del voltaje entregado por la fuente de señal se pierda en la resistencia interna de esta última y solamente una pequeña fracción quede aplicada a la entrada del amplificador. Además, puede causar la sobrecarga de la fuente de señal, obligándola a entregar más corriente de la que físicamente puede dar. Estos problemas suceden siempre que se acopla una fuente de alta impedancia a una carga de baja impedancia. Una forma de solucionarlos es acoplando la fuente de señal a la carga mediante un **amplificador en colector común** (CC), mejor conocido como un **seguidor de emisor**.

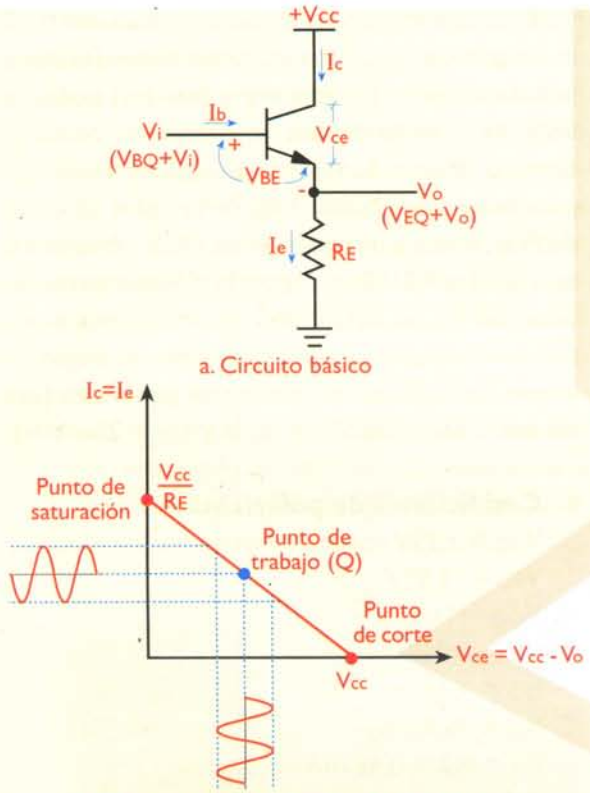


Figura 8.40. *Operación básica de un amplificador en colector común o seguidor de emisor*

En la **figura 8.40a** se ilustra la idea básica de un seguidor de emisor. En este caso, la señal de entrada (*Vi*) se aplica en la base, mientras que la señal de salida (*Vo*) se obtiene del emisor. Debido a esta disposición, el voltaje de salida es prácticamente igual al de entrada, excepto por la pequeña caída de tensión en la unión base-emisor. Esto es:

$$Vo = Vi - V_{BE}$$

Siendo Vo=Vb el voltaje aplicado a la base y Vo=Ve el voltaje resultante en el emisor. Por ejemplo, si Vi=5V en condiciones de reposo, entonces, bajo la misma condición, Vo=4,3V (asumiendo V_{BE}=0,7V). Si ahora, por efecto de la señal de entrada, Vi experimenta un cambio de 250mV, es decir sube hasta 5,25V o baja hasta 4,75V, entonces Vo experimenta también un cambio de 250mV en la misma dirección, o sea, sube hasta 4,55V o baja hasta 4,05V. En otras palabras, el voltaje de emisor (Ve=Vo) imita o **sigue** las variaciones del voltaje de base (Vb=Vi), de donde se deriva el nombre dado a este circuito. Así, mientras el transistor se mantenga en la región activa, el emisor seguirá a la base sobre el rango completo del voltaje de alimentación (entre 0 y +Vcc, en este caso).

Lo anterior implica que un seguidor de emisor no proporciona amplificación de voltaje. Sin embargo, esto no constituye una desventaja. De hecho, esta estructura exhibe muchos atributos especiales que la hacen extremadamente útil y radicalmente diferente de los otros tipos de amplificadores. Por ejemplo:

- Proporciona una alta ganancia de corriente. Esta característica es evidente a partir del circuito de la **figura 8.40a** si se tiene en cuenta que, mientras el transistor permanezca en la región activa, **figura 8.40b**, la corriente de emisor (Ie) es ß+1 veces mayor que la corriente de base (Ib). Por tanto, la fuente de señal necesita entregar muy poca corriente de entrada para que el circuito proporcione una alta corriente a la carga.

- Posee una muy alta impedancia de entrada. Esto implica que la fuente de señal no se sobrecarga y puede excitar la carga sin que se produzcan pérdidas de voltaje en su resistencia interna. De hecho, la impedancia de entrada vista por la fuente es prácticamente b veces mayor que el valor de la resistencia de emisor. De este modo, si, por ejemplo, ß=100 y R_E=10kΩ, entonces la impedancia de entrada es del orden de 100x10kΩ = 1MΩ

- No produce inversión de fase, como sí sucede en un amplificador en emisor común. Esto significa que los cambios en el voltaje de entrada (*vi*) se reflejan exactamente en el voltaje de salida (*vo*): si vi aumenta, *vo* también aumenta en la misma cantidad, de la misma forma y en el mismo tiempo.

- Tiene una respuesta de frecuencia amplia, similar a la de un amplificador en emisor común, pero inferior a la de un amplificador en base común.

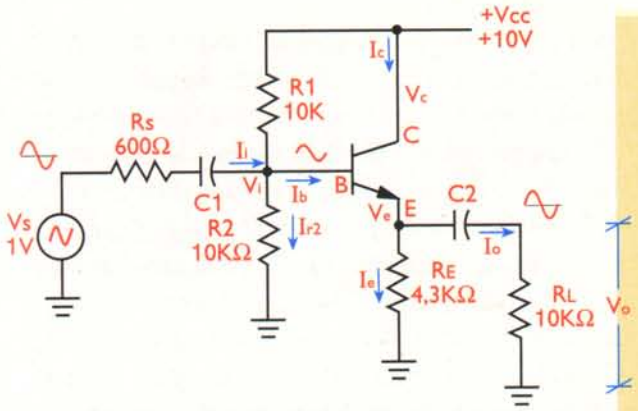


Figura 8.41a. *Amplificador práctico en colector común (seguidor de emisor). Esta configuración no produce inversión de fase, posee una muy alta impedancia de entrada, ofrece una alta ganancia de corriente y tiene una respuesta de frecuencia similar a la de un amplificador en emisor común. Sin embargo, no ofrece ganancia de voltaje. Se utiliza principalmente como buffer o adaptador de impedancias*

En la **figura 8.41a** se muestra el esquema de un amplificador práctico en colector común, polarizado mediante un divisor de tensión en la base. El acoplamiento de la señal de la fuente (vs) a la base (entrada, vi) se efectúa a través de C1, mientras que el acoplamiento de la señal del emisor (salida, ve) a la carga (vo) se efectúa a través de C2. Rs representa la resistencia interna de la fuente de señal. Las demás resistencias (R1, R2, R_E), como veremos a continuación, establecen el punto de trabajo, y, junto con las características intrínsecas del transistor, determinan las impedancias de entrada y de salida del amplificador, así como sus ganancias de corriente y de voltaje, y su respuesta de frecuencia. Observe que no se requiere resistencia de colector y que este último está conectado directamente a la fuente de alimentación (V_{CC}).

En la **figura 8.41b** se muestra el circuito equivalente para CC, obtenido después de anular la fuente de señal (Vs) y sustituir los condensadores (C1, C2) por circuitos abiertos. El análisis de este circuito permite deducir las siguientes relaciones, útiles para calcular las corrientes y voltajes de polarización del mismo en condiciones de reposo (Q), es decir sin señal de entrada:

$$V_{BQ} = V_{CC} \times \frac{R2}{R1+R2}$$

$$V_{EQ} = V_{BQ} - V_{BE}$$

$$I_{EQ} = \frac{V_{EQ}}{R_E}$$

$$I_{CQ} = I_{EQ}$$

$$V_{CQ} = V_{CC}$$

$$V_{CE} = V_{CQ} - V_{EQ}$$

$$I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{h_{FE}}$$

Nuevamente, note que el punto de trabajo de la señal de salida (I_{EQ}, V_{EQ}) no depende de la ganancia de corriente (β o h_{FE}) del transistor, lo cual hace que este circuito sea muy estable. En nuestro caso, asumiendo que h_{FE}=100 y V_{BE}=0,7V, obtendríamos los siguientes valores en condiciones de reposo:

$$V_{BQ} = 10V \times \frac{10K}{10K+10K} = 5V$$

$$V_{EQ} = 5V - 0,7V = 4,3V$$

$$I_{EQ} = \frac{4,3V}{4,3K} = 1mA$$

$$I_{CQ} = 1mA$$

$$V_{CQ} = 10V$$

$$V_{CE} = 10V - 4,3V = 5,7V$$

$$I_{BQ} = \frac{1mA}{100} = 10\mu A$$

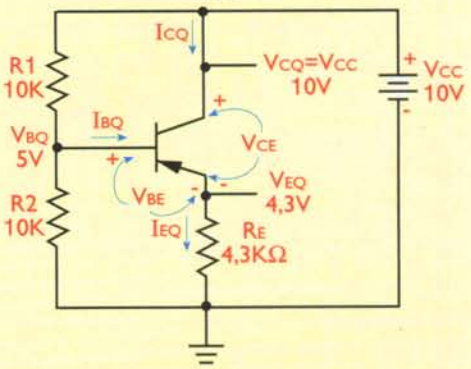


Figura 8.41b *Circuito equivalente para CC del amplificador en colector común (seguidor de emisor)*

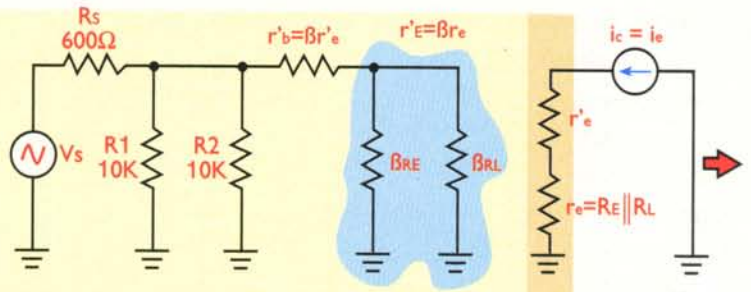


Figura 8.41c *Circuito equivalente para señal (CA)*

En la **figura 8.41c** se muestra el circuito equivalente para señal, obtenido después de anular las fuentes de alimentación (V_{CC}, V_{EE}) y de sustituir los condensadores (C1, C2) por cortocircuitos. A partir de este modelo podemos evaluar fácilmente las impedancias de entrada y de salida del circuito, así como las ganancias de voltaje, corriente y potencia. La respuesta de frecuencia es la misma de un amplificador en emisor común. Por esta razón no la consideraremos en nuestro análisis.

La **impedancia de entrada** (Zi), vista por la fuente de señal (Vs, Rs), se puede evaluar a partir de siguiente fórmula:

$$Zi = R1 \,||\, R2 \,||\, (r'_b + r'_E)$$

siendo R1 y R2 las resistencias de polarización de la base, r'_b la resistencia dinámica de la unión base-emisor vista desde la base y r'_E la resistencia equivalente de emisor vista desde la base. Recuerde que cualquier resistencia o impedancia conectada al emisor se observa en la base reflejada β veces más grande. En nuestro caso, r'_b es igual a β veces r'_e y r'_E es igual a β veces el equivalente en paralelo de R_E (resistencia de emisor) y R_L (resistencia de carga). Por tanto, asumiendo para nuestro transistor $\beta = h_{fe} = 100$, $r'_e = 25mV/I_E$ y $V_{BE} = 0{,}7V$, tenemos:

$$re = R_E||R_L = 4{,}3K \,||\, 10K = 3K$$

$$r'_E = \beta_{re} = 100 \times 3K = 300K$$

$$r'e = \frac{25mV}{I_E} = \frac{25mV}{1mA} = 25\Omega$$

$$r'_b = \beta r'_e = 100 \times 25\Omega = 2{,}5k\Omega$$

$$r'_b + r'_E = 2{,}5k\Omega + 300\ k\Omega = 302{,}5k\Omega$$

De este modo:

$$Zi = R1 \,||\, R2 \,||\, (r'_b + r'_E)$$
$$= 10k\Omega \,||\, 10k\Omega \,||\, 302{,}5k$$

$$Zi = 4{,}92\ k\Omega$$

Por tanto, la impedancia de entrada de un seguidor de emisor es relativamente alta y depende principalmente de los valores de las resistencias de polarización de la base, ya que r'_E es generalmente muy grande comparada con r'_b y R1||R2. Para efectos prácticos, puede considerarse Zi=R1||R2. Los valores específicos de R1 y R2, y por tanto de Zi, dependen de los requisitos de carga de la fuente de señal. Si esta última tiene, por ejemplo, una impedancia de 600Ω, R1 y R2 pueden ser ambas de 1,2kΩ para configurar una Zi de 600Ω y permitir así una máxima transferencia de potencia.

La alta impedancia de entrada es una de las principales ventajas de esta configuración, lo que la hace muy útil para transferir señales débiles, con muy baja capacidad de corriente, de una etapa a otra de un circuito. Esta característica es muy empleada, por ejemplo, en preamplificadores que operan desde fuentes de alta impedancia, tales como ciertos tipos de micrófonos y sensores. En la **figura 8.42** se muestra un ejemplo de aplicación típico.

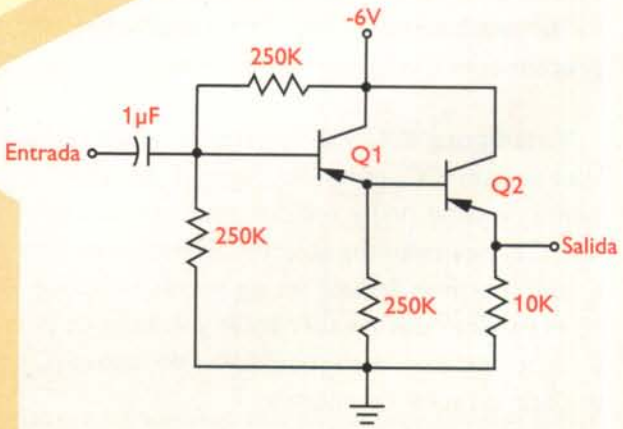


Figura 8.42. *Seguidores de emisor en cascada formando un preamplificador con una muy alta impedancia de entrada y una muy baja impedancia de salida. Esta configuración se conoce comúnmente como un seguidor de emisor escalonado*

En este caso, el seguidor de entrada (Q1) recibe la señal de la fuente, ofreciéndole una muy alta impedancia de entrada. Por tanto, casi no se pierde señal en la resistencia interna de la fuente y prácticamente toda la señal disponible aparece en la base. Hecho esto, la señal se transfiere al emisor de Q1 y desde este último a un segundo seguidor (Q2), el cual la entrega reforzada a la carga o circuito de utilización con una muy baja impedancia de salida. No hay ganancia de voltaje, pero la amplificación de corriente es considerable.

Retornando al circuito equivalente de la **figura 8.41**, la **impedancia de salida** (Zo), vista por la carga (R_L), se puede evaluar a partir de la siguiente fórmula:

$$Z_o = R_E \,||\, \left[r'_e + \frac{R_s||R1||R2}{\beta} \right]$$

siendo R_E la resistencia de emisor, r'_e la resistencia dinámica de la unión base-emisor, Rs la resistencia interna de la fuente de señal, R1 y R2 las resistencias de polarización de la base y β la ganancia dinámica de corriente. En nuestro caso, R_E= 4,3K, r'_e=25Ω, Rs=600Ω, R1=10kΩ, R2=10kΩ y β=100. De este modo:

$$\frac{Rs||R1||R2}{\beta} = \frac{600\,\Omega||10k\Omega||10k\Omega}{100} = 5{,}36\Omega$$

$$r'_e + \frac{Rs||R1||R2}{\beta} = 25\Omega + 5{,}36\Omega = 30{,}36\Omega$$

$$Zo = 4{,}3k\Omega||30{,}36\Omega = 30{,}15\Omega$$

Por tanto, la impedancia de salida de un seguidor de emisor es muy baja, lo cual constituye otra de sus grandes ventajas. Esta característica lo hace muy útil como **adaptador de impedancias**, es decir, para transferir una señal o un nivel de voltaje desde una fuente de alta impedancia hasta una carga de baja impedancia. En este sentido se comporta en forma parecida a un transformador, excepto que este último no produce ganancia de potencia, como sí lo hace un seguidor. Un ejemplo típico de aplicación de este concepto es un regulador de tensión, como el mostrado en la **figura 8.43**, el cual combina un regulador Zener con un seguidor de emisor.

En este caso, el voltaje de entrada, aplicado a la base, es la tensión nominal del diodo Zener (V_z). Por tanto, la tensión de salida (V_o) es igual a V_z menos la caída en la unión base-emisor (V_{BE}). Esto es:

$$V_o = V_z - V_{BE}$$

Independientemente de los cambios en la tensión de la fuente (Vcc), la tensión Zener (V_z) del diodo mantiene constante el voltaje de base. Puesto que V_{BE} es también constante, la tensión de salida (Vo) no cambia. Por tanto, la regulación de voltaje es automática. Con respecto a un regulador Zener convencional, esta configuración ofrece dos ventajas importantes. En primer lugar, debido a que la corriente de base (I_b) es muy pequeña, el diodo Zener no está obligado a entregar una corriente (I_z) muy alta para alimentar la carga, ya que la corriente de esta última (I_L=I_e) es proporcionada por el emisor. Por tanto, se puede utilizar un diodo Zener de baja potencia para controlar corrientes grandes.

Como ejemplo, suponga que en el circuito anterior se utiliza un diodo Zener con un voltaje nominal (V_z) de 10V. Esto implica que el voltaje de

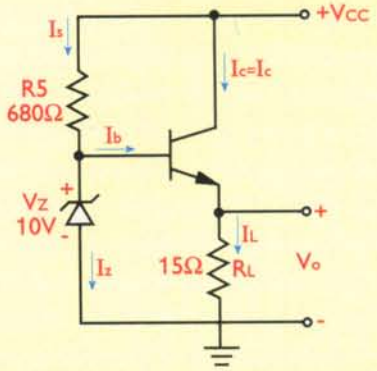


Figura 8.43. *Regulador de voltaje Zener mejorado. El transistor aumenta la capacidad de manejo de corriente del Zener por un factor de ß y reduce su resistencia interna casi por el mismo factor. Como resultado, el voltaje de salida permanece prácticamente constante para una gama muy amplia de valores de la resistencia de carga (R_L)*

salida (V_o) es de 9,3V (=10V-0,7V), lo cual equivale a una corriente de carga (I_L) del orden de 620mA. Si se utilizara solamente el diodo Zener, el mismo debería tener una potencia nominal superior a 6W para poder manejar esta corriente. Sin embargo, con la adición del seguidor, la situación cambia radicalmente. Ahora, la corriente Zener (I_z) es apenas una fracción de la corriente de base (I_B). Bajo esta condición, asumiendo β=100, tendríamos:

$$I_b = \frac{I_L}{\beta} = \frac{620mA}{100} = 6,2mA$$

$$I_s = \frac{V_{CC}-V_z}{R_s} = \frac{20V-10V}{680\Omega} = 14,7mA$$

$$I_z = I_s - I_b = 14,7mA - 6,2mA = 8,5mA$$

Por tanto, en el peor de los casos, con la base desconectada, el diodo Zener tendría que manejar, como máximo, una corriente de 14,7mA ($I_{zmax}=I_s$), lo cual equivale a una potencia nominal (P_z) de 0,147W. Por tanto, puede utilizarse, con toda confianza, un diodo Zener de 10V, 1/4W, en lugar de uno de 6W o más, que es más costoso, voluminoso y escaso. Si se desea tener la opción de variar el voltaje de salida, puede utilizarse un potenciómetro en paralelo con el Zener para controlar el nivel de tensión aplicado a la base.

Además de la sustantiva reducción en la capacidad de potencia requerida para el diodo Zener, la otra ventaja del circuito es la baja impedancia de salida (Zo), la cual es prácticamente β veces inferior a la resistencia interna nominal del Zener (R_z). Esta última puede ser de varios ohmios y afectar las características de regulación del diodo Zener cuando se alimentan cargas de bajo impedancia. Con un seguidor se evita que esto suceda, ya que, por ejemplo, una R_z de 50Ω sería vista por la carga como una resistencia interna de fuente de 0,5Ω, que es muy baja y adecuada para un regulador de voltaje. Como resultado, las variaciones en la corriente de carga (I_L) afectan muy poco el valor de la tensión de salida.

Finalmente, las ganancias de voltaje (A_v), corriente (A_i) y potencia (A_p) del circuito de la **figura 8.41**, se pueden evaluar a partir de las siguientes fórmulas, cuya demostración se deja como ejercicio para el lector:

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{R_E||R_L}{r'_e + R_E||R_L}$$

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = Av \times \frac{Z_i}{R_L}$$

$$A_p = A_v A_i$$

En nuestro caso, R_E=4,3kΩ, R_L=10K, r'_e=25Ω, Z_i=4,92kΩ y $R_E||R_L$=3kΩ. De este modo:

$$A_v = \frac{3k\Omega}{25\Omega+3k\Omega} = 0,99\ (0,07dB)$$

$$A_i = 0,99 \times \frac{4,92K}{10k\Omega} = 0,49\ (-6,25dB)$$

$$A_p = 0,99 \times 0,49 = 0,48\ (-3,1dB)$$

En general, la ganancia de voltaje de un seguidor de emisor es prácticamente igual a la unidad (0dB), mientras que las ganancias de corriente y de potencia pueden ser iguales, inferiores o superiores a este valor, dependiendo principalmente de los valores de las resistencias de polarización (R1, R2, R_E) y de la resistencia de carga (R_L). En nuestro caso, por ejemplo, con una R_L de 1kΩ, obtendríamos una ganancia de voltaje de 0,97, una ganancia de corriente de 4,8 y una ganancia de potencia de 4,6. Adicionalmente, un seguidor de emisor amplifica con muy baja distorsión, lo cual lo hace ideal para manejar señales pequeñas.

Circuitos prácticos con transistores (I)

Una vez examinadas cualitativa y cuantitativamente las características estáticas y dinámicas de las tres configuraciones básicas de circuitos amplificadores con transistores (emisor común, base común y colector común o seguidor de emisor), es el momento de examinar algunos circuitos, prácticos y sencillos, donde se aplican las mismas. A continuación se

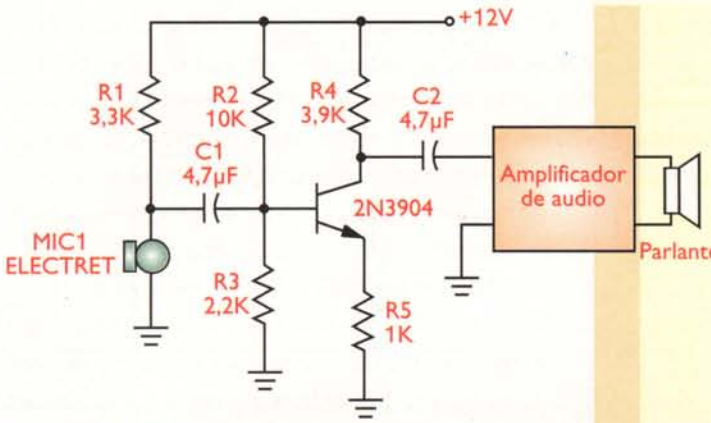


Figura 8.44. *Preamplificador para micrófono electret. Este circuito, examinado en el experimento 8.1, ofrece una impedancia de entrada del orden de 1,5kΩ y una ganancia de voltaje máxima de 136. Esta última puede ser aumentada o disminuida variando el valor de la resistencia de colector (R4).*

presentan, sin ningún orden especial, varios ejemplos de circuitos útiles que hacen uso de estas propiedades. Lo invitamos a que los arme o los monte en un *protoboard* y experimente con ellos para aprender más acerca del fascinante mundo de los transistores y sus posibilidades ilimitadas.

Preamplificador para micrófono electret. En la **figura 8.44** se muestra un preamplificador para micrófono *electret* desarrollado alrededor de una etapa en emisor común que excita un amplificador de potencia. Debido a que un micrófono *electret* es esencialmente un condensador variable de baja capacidad (unos pocos pF), su impedancia en el rango de frecuencias de audio (20Hz a 20kHz) es extremadamente alta. Por la misma razón, debe ser acoplado a una etapa amplificadora de muy alta impedancia. Esta función la efectúa generalmente un seguidor con transistor de efecto de campo (FET), el homólogo del seguidor de emisor, incorporado en la propia cápsula, el cual actúa como *buffer* o adaptador de impedancias, proporcionando una impedancia de salida de unos pocos cientos de ohmios.

Para operar correctamente, el amplificador interno debe ser alimentado o polarizado mediante una tensión de CC externa. En nuestro caso, este voltaje se obtiene de la fuente (12V) a través de una resistencia (R1). La señal de salida del micrófono, que es del orden de unos pocos milivoltios, se acopla mediante C1 (4,7µF) a la entrada del preamplificador (Q1), el cual la amplifica sin distorsión hasta un nivel suficiente para excitar el amplificador de potencia. Este último se encarga de reproducirla en el parlante. Las resistencias R2 hasta R5 fijan el punto de trabajo del preamplificador y determinan, entre otras características, la ganancia de voltaje y la impedancia de entrada.

Resistencia de potencia variable. Una de las principales dificultades que se presentan cuando se prueban fuentes de alimentación, es la disponibilidad de una carga apropiada. Aunque este problema se resuelve comúnmente utilizando un conjunto de resistencias de potencia, muchas veces costosas y difíciles de conseguir. Una alternativa más simple, elegante y económica es utilizando un circuito como el de la **figura 8.45**. En este caso, el transistor 2N3055, conectado como seguidor y con su ganancia de corriente controlada por una fuente independiente (Uv), actúa como una resistencia variable. Con los valores de componentes indicados, la capacidad de disipación de potencia es superior a 50W, asumiendo que el transistor está dotado de un disipador de calor adecuado.

El voltaje de control de la base, que determina el valor de la resistencia entre colector y emisor, puede ser obtenido mediante un divisor de voltaje conectado a través de la fuente externa, como se muestra en la **figura 8.45c**. En este caso, la fuente externa es una batería de 9V. Note la utilización de un *driver* o transistor previo (Q2) para controlar el transistor principal (Q1). Este transistor, conectado también como seguidor, aumenta considerablemente la impedancia de entrada del circuito, minimizando la demanda de corriente por parte de la batería y prolongando su vida útil. La estructura formada por Q1 y Q2 se denomina un ***darlington*** y actúa esencialmente como un transistor de muy alta ganancia de corriente. El circuito puede ser también utilizado como cargador de baterías.

Diodo Zener variable. Un problema muy común cuando se experimenta con circuitos electrónicos, es encontrar los valores correctos de ciertos componentes. Aunque esta selección puede

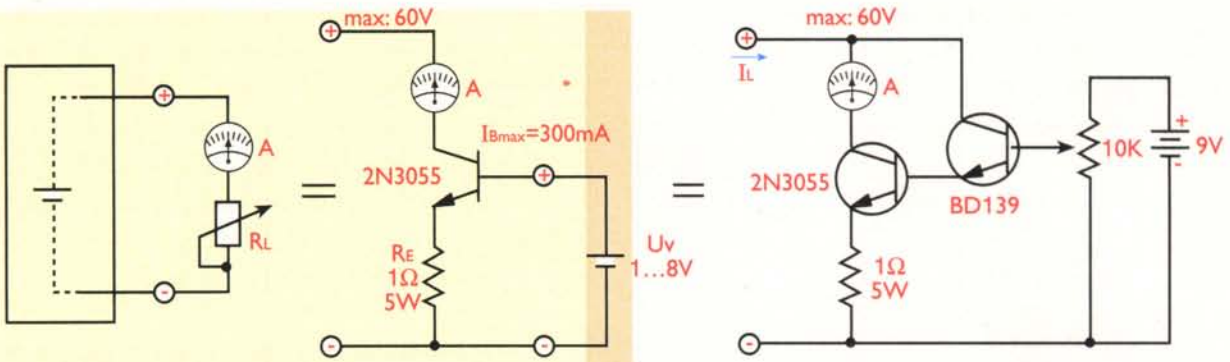


Figura 8.45. *Resistencia de potencia variable con transistor. Con un disipador de potencia adecuado, este circuito puede manejar potencias superiores a 50W y proporcionar una gama ilimitada de valores de resistencia. El control se efectúa variando el voltaje aplicado a la base. Puede ser también utilizado para cargar baterías mediante una corriente constante. La batería se conecta en serie con el amperímetro.*

hacerse mediante pruebas de ensayo y error, no siempre se dispone de una cantidad suficiente de componentes para cubrir todas las posibilidades. Un ejemplo son los diodos Zener, los cuales vienen en una gama muy amplia de valores. En este caso, lo deseable sería disponer de un diodo Zener de voltaje variable. El circuito de la **figura 8.46** hace exactamente esto, se comporta como un diodo Zener con voltaje variable desde 3V hasta 25V, una capacidad de potencia de 500mW y una resistencia interna del orden de 20Ω a 50Ω.

El funcionamiento del circuito es relativamente simple. Tan pronto el voltaje en la base de T1 supera los 0,6V, este transistor conduce, permitiendo que T2 conduzca y se mantenga constante el voltaje entre los puntos «+» y «-», tal como sucede con un diodo Zener. Para fijar el voltaje Zener, el circuito debe ser conectado a la fuente a través de una resistencia de 10K. A continuación, se ajusta el *trimmer* P1 hasta que se obtenga el voltaje deseado. Si el circuito se utiliza para reemplazar un diodo Zener en un montaje ya existente, esta resistencia no es necesaria. Con los valores de componentes indicados, la corriente a través del circuito no debe exceder de 10mA.

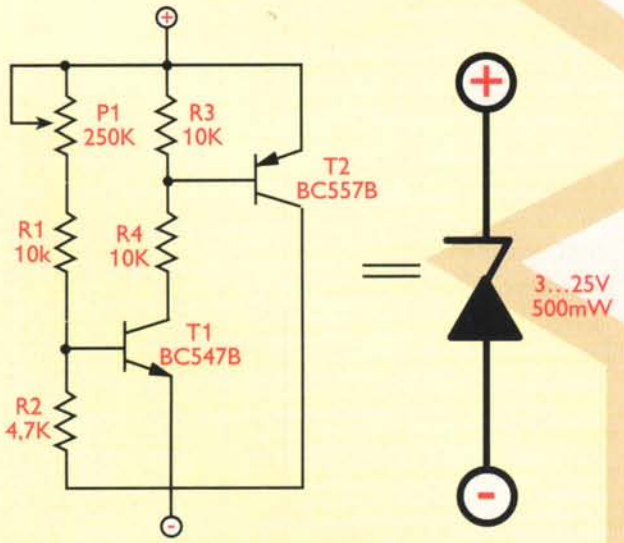


Figura 8.46. *Diodo Zener variable. El circuito se utiliza como un diodo Zener normal, proporciona cualquier voltaje de referencia entre 3V y 25V, ajustable mediante P1, y tiene una capacidad de potencia nominal de 500mW. La corriente a través del mismo no debe exceder de 100 mA.*

Mezclador de audio en base común. La mezcla de señales de audio se efectúa normalmente utilizando un **amplificador operacional**, un tipo de circuito electrónico muy versátil al cual nos referiremos más adelante. Un efecto similar puede conseguirse utilizando un amplificador en base común, como se muestra en la **figura 8.47**. En este caso, los voltajes de señal de entrada, aplicados al emisor de T1, se transforman por efecto de la baja impedancia de entrada del circuito en corrientes de señal equivalentes, las cuales, cuando se suman entre sí, constituyen la componente de señal (CA) de la corriente de emisor, que es la misma corriente de colector. La señal de salida se obtiene del colector de T1.

La ganancia o cantidad de amplificación (Av) proporcionada por este circuito para cada señal de entrada, es igual a R6/Ri, siendo Ri = R5, R6, etc., la resistencia de entrada en la rama correspondiente. Por ejemplo, si R6=3,3K y se desea una ganancia de 4 (12dB) para la señal aplicada a la segunda

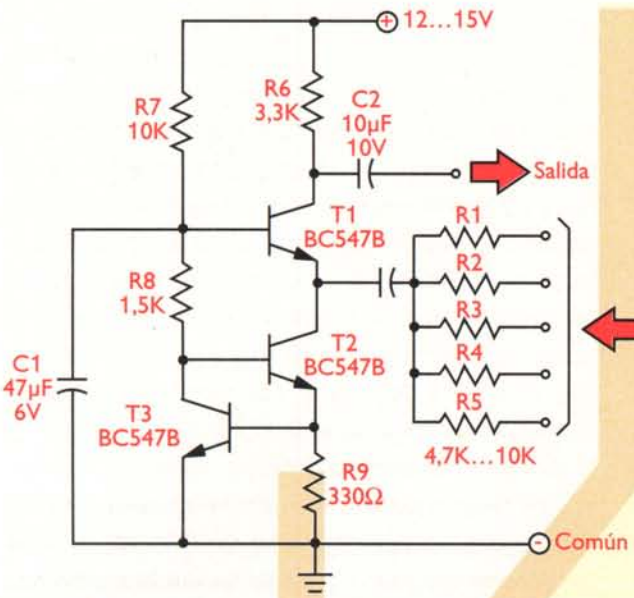


Figura 8.47. *Mezclador de audio en base común. El circuito suma las señales de entrada aplicadas en el emisor de T1 en las proporciones deseadas y produce en el colector una señal que las contiene a todas. La ganancia para cada señal de entrada es R6/Ri, siendo Ri=R5, R5, etc. T2 y T3 forman una fuente de corriente.*

entrada, entonces R2 debe ser del orden de 13kΩ. El circuito formado por T2 y T3 opera como una **fuente de corriente**, proporcionando una alta impedancia para las señales de entrada. El voltaje de polarización de la base de T1 lo fijan las resistencias R7 y R8. El condensador C1 garantiza el desacoplamiento efectivo de la base en condiciones de señal. El número de entradas se puede extender o recortar según las necesidades.

Fuente de voltaje programable. El circuito de la figura **8.48,** basado en el uso de un regulador de tensión ajustable LM317 (IC1) y un transistor (T1), permite conmutar automáticamente el voltaje de salida de 5V a 21V, o viceversa. Esta característica es muy útil, por ejemplo, para programar ciertos tipos de memorias utilizadas en los sistemas digitales para almacenar información. El transistor, conectado en emisor común, está polarizado de tal modo que opere como un **interruptor**, es decir con su punto de trabajo siempre muy cerca del punto de saturación o del punto de corte. En el primer caso (saturación), actúa como un interruptor cerrado, conectando automáticamente R3 en paralelo con R2. Bajo esta condición, el voltaje de salida (Vo) es:

$$Vo = 1{,}25V \left(1 + \frac{R2||R3}{R1}\right) = 5V$$

En el segundo caso (corte), el transistor T1 actúa como un interruptor abierto, desconectando automáticamente la resistencia R3. Bajo esta condición, el voltaje de salida (Vo) es simplemente:

$$Vo = 1{,}25V \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) = 21V$$

El punto de trabajo del transistor se controla mediante un voltaje aplicado en el circuito de base (VA). Si este último es del orden de 0V, el transistor no conduce y permanece en el punto de corte. Sin embargo, si este voltaje es, por ejemplo, 5V, el transistor conduce plenamente, más allá de la zona activa, y pasa al punto de saturación. Este modo de funcionamiento de los transistores es la esencia de los sistemas digitales, como veremos más adelante.

Convertidor de voltaje a frecuencia. El circuito mostrado en la **figura 8.49** produce un voltaje de CC de salida (V_o) proporcional a la frecuencia de una señal de entrada (V_i). Esta última debe ser una onda cuadrada, tener una amplitud constante y ser proporcionada por una fuente de baja impedancia. El corazón del circuito es el transistor T1, conectado en la configuración base común. Cuando la señal de entrada está en su nivel inferior, di-

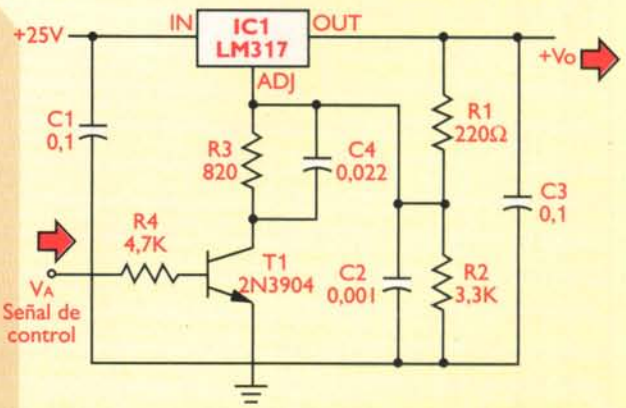


Figura 8.48. *Fuente de voltaje programable. El circuito produce un voltaje de salida (Vo) de 21V o de 5V, dependiendo, respectivamente, de si en la entrada (A) se aplica 0V o un voltaje suficiente para saturar el transistor, por ejemplo 5V.*

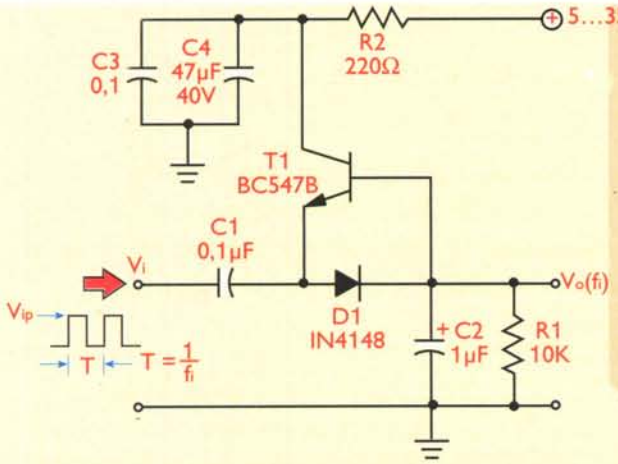


Figura 8.49. *Convertidor de frecuencia a voltaje*

gamos 0V, el condensador C1 se carga rápidamente hasta alcanzar un voltaje igual a VC2-V_{BE}; siendo VC2 el voltaje sobre C2 (igual al voltaje de salida) y V_{BE} la caída de voltaje directa sobre el diodo D1.

Cuando V_i pasa a su nivel superior, digamos 5V, la carga almacenada en C1 se transfiere al condensador C2, el cual, a su vez, se descarga a través de R1. Cuando C1 pasa nuevamente a su nivel inferior, C2 vuelve a cargarse, y así sucesivamente. El proceso, denominado por lo mismo **bombeo de carga**, se repite indefinidamente. Como resultado, sobre R1 se produce un voltaje de CC de salida (V_o) cuyo valor promedio esta dado por la siguiente fórmula:

$$Vo = (V_{ip} - 0.7V)\ R1C1f_i$$

siendo f_i la frecuencia y Vip el valor pico de la señal de entrada. Con los valores de componentes indicados en el circuito, el voltaje de salida (V_o) crece a una velocidad de aproximadamente 4,3mV/Hz cuando se utiliza una señal de entrada que oscila entre 0V y 5V. Esto significa que si, por ejemplo, la frecuencia de la señal de entrada es de 1kHz, el voltaje de salida es del orden de 4,3V. La amplitud del rizado o *ripple* presente en el voltaje de salida es del orden de 400mV. El voltaje de alimentación (V_{CC}) debe ser, por lo menos, 2V mayor que el máximo voltaje de salida esperado. Para no alterar el funcionamiento del circuito, Vo debe ser siempre transferido a una carga de alta impedancia, tal como un seguidor de emisor o un multímetro digital.

Interruptor electrónico de toque. En la **figura 8.50** se muestra un circuito que ilumina un LED cuando se toca con los dedos un par de contactos metálicos muy próximos entre sí. El circuito está construido alrededor de un par de transistores: un NPN (Q1) con una muy alta ganancia de corriente (superior a 400), el cual actúa como dispositivo sensor, y un PNP (Q2) de ganancia moderada (100), el cual actúa como interruptor. En condiciones normales, con los contactos de toque libres, Q1 no recibe corriente de base y por tanto no conduce. Como resultado, la base de Q2 queda conectada a la alimentación positiva (+9V) a través de R3+R4. Por lo mismo, este transistor tampoco conduce. Puesto que no hay corriente de colector, el LED permanece apagado y en la salida se obtienen 0V.

De otro lado, cuando se tocan los contactos, la resistencia propia de la piel cierra el circuito de polarización de base de Q1, permitiendo la circulación de una corriente de base relativamente pequeña a través de Q1, suficiente para que este transistor conduzca y conecte el circuito de base de Q2 a tierra. Bajo esta condición, Q2 queda correctamente polarizado y conduce, permitiendo la circulación de una corriente de colector importante a través del LED. Como resultado, este último se ilumina y en la salida se obtienen aproximadamente 9V. Este voltaje, convenientemente amplificado en potencia, puede ser utilizado posteriormente para otros fines, por ejemplo conectar o desconectar un motor.

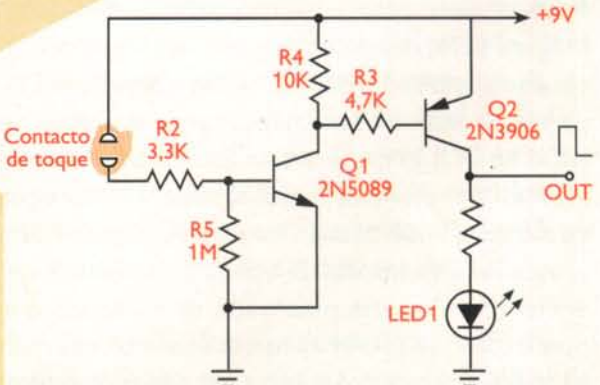


Figura 8.50. *Interruptor electrónico de toque. El LED se ilumina cuando se tocan los contactos con la piel y se apaga cuando estos contactos se liberan. La señal disponible en la salida puede ser amplificada posteriormente para efectuar acciones especiales, por ejemplo, prender una lámpara de cierta potencia.*

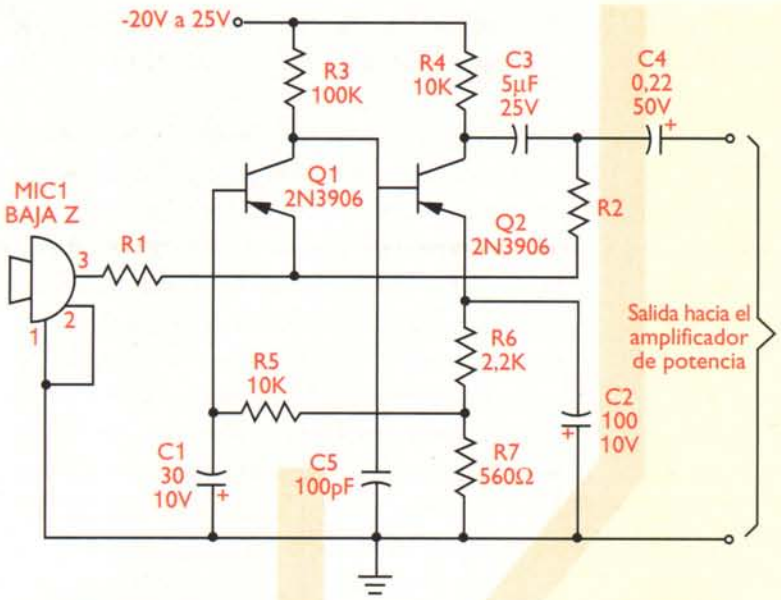


Figura 8.51. *Amplificador para micrófono de baja impedancia. El valor de R1 se escoge de acuerdo a la impedancia nominal del micrófono (por ejemplo 50Ω) y el de R2 según la ganancia requerida hasta obtener una salida de señal de 1Vrms para atacar el amplificador de audio.*

El circuito de la **figura 8.51** amplifica la señal de salida de un micrófono dinámico o de baja impedancia hasta un nivel suficiente para impulsar la entrada de un amplificador de potencia de audio estándar. El transistor Q1, conectado en la configuración base común, actúa como adaptador de impedancias. R1 se escoge igual a la impedancia nominal del micrófono. La resistencia R2 determina la ganancia de voltaje de la etapa. Observe que la corriente de base de Q1 se deriva de un divisor de voltaje (R6, R7) conectado al emisor de Q2. Esto se hace con el fin de garantizar una alta estabilidad del punto de trabajo frente a las variaciones de temperatura y las tolerancias en los valores de los componentes.

Amplificadores de baja señal con transistores de efecto de campo

Todos los amplificadores examinados hasta el momento están basados en el uso de **transistores bipolares** o **BJT** (*bipolar junction transistors*), que son dispositivos de tres terminales controlados por corriente. En ellos, una pequeña variación en la corriente aplicada a la base (electrodo de control) produce una gran variación en la corriente que circula entre el colector y el emisor (electrodos de salida). Esta acción básica se aprovecha para producir amplificación de corriente, voltaje o potencia. Los transistores bipolares son la espina dorsal de la electrónica moderna. Sin embargo, no son siempre la mejor elección en algunas situaciones específicas, por ejemplo, cuando se requiere de una impedancia de entrada extremadamente alta o un bajo consumo de potencia. Por fortuna, existe una alternativa: los transistores de efecto de campo o **FET** (*field effect transistors*), **figura 8.52**.

Los FET, cuya teoría de funcionamiento se examina en la sección de componentes de este curso, son dispositivos de tres terminales controlados por voltaje. Esto significa que, en ellos, una pequeña variación en el voltaje aplicado al electrodo de control, llamado **compuerta** o ***gate*** (G), produce una gran variación en la corriente a través de los electrodos de salida, llamados **fuente** o *source* (S) y **drenador** o *drain* (D). Existen **FET**

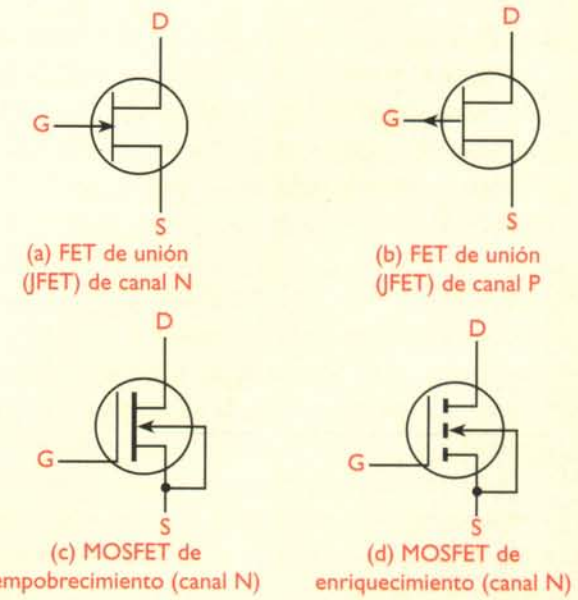


Figura 8.52. *Símbolos de transistores de efecto de campo o FET. La compuerta (G), el drenador (D) y el surtidor o fuente (S) son equivalentes, en su orden, a la base (B), el colector (C) y el emisor (E) de un BJT. La barra vertical representa el canal.*

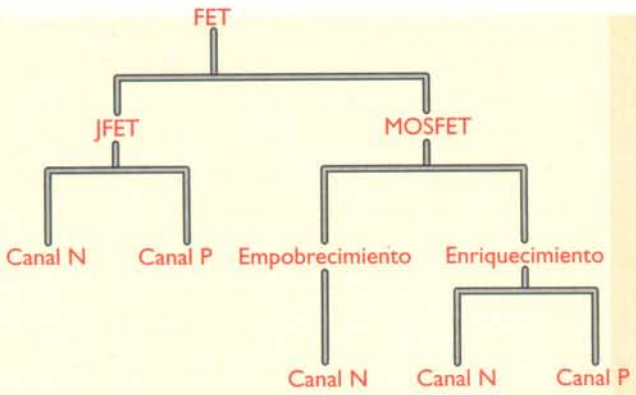


***Figura 8.53**. Clasificación de los transistores de efecto de campo*

de unión o **JFET** (*junction field effect transistors*) y **FET de compuerta aislada** o **IGFET** (*insulated gate field effect transistors*), **figura 8.53**. Estos últimos son mejor conocidos como **MOSFET** (*metal-oxide-semiconductor field effect transistors*), o simplemente transistores MOS, por sus características constructivas, **figura 8.53**. Inicialmente centraremos nuestra atención en los amplificadores con JFET.

Los transistores de efecto de campo comparten al mismo tiempo varias semejanzas y diferencias con los transistores bipolares. Por ejemplo:

- Ambos son dispositivos de tres terminales en los cuales la conducción entre los electrodos de salida depende de la disponibilidad de portadores de carga. Esta última se gobierna mediante un voltaje aplicado, directa o indirectamente, al electrodo de control.

- En un BJT, la unión colector-base debe estar polarizada inversamente, mientras que la unión base-emisor debe estarlo directamente. En un FET, por su parte, tanto la unión drenador-compuerta como la unión compuerta-fuente, siempre se polarizan inversamente. No hay uniones polarizadas en directo. Esto significa que a través de la compuerta sólo circula una corriente muy débil, prácticamente nula (0), lo cual implica una impedancia de entrada muy alta, casi infinita. Esta alta impedancia, en muchos casos superior a $10^{14}\Omega$, es la principal ventaja de los JFET sobre los transistores bipolares, lo que posibilita muchas aplicaciones inusuales.

- Los BJT son dispositivos bipolares, lo que implica que dependen para su operación de los dos tipos de portadores de carga (electrones y huecos). Los FET son dispositivos unipolares, es decir, funcionan con un solo tipo de portadores de carga (electrones o huecos). En un transistor NPN, por ejemplo, los electrones actúan como portadores mayoritarios y los huecos como portadores minoritarios. En un FET de canal N, por su parte, la conducción se debe únicamente a los electrones, que son los portadores mayoritarios.

Características de entrada y de salida de los FET de unión

Todos los FET de unión (JFET), sin excepción, operan en el modo de empobrecimiento (*depletion*). Esto significa que a través del canal fuente-drenador circula la máxima corriente (I_{Dmax}) cuando la polarización de la compuerta (V_{GS}) es cero. Para reducir esta corriente o cortarla completamente (llevarla a cero), la compuerta debe ser polarizada inversamente. En el caso de un JFET de canal N, por ejemplo, debe aplicarse una polarización negativa, mientras que en el de un JFET de canal P debe aplicarse una polarización positiva. Esta situación se ilustra gráficamente mediante una **curva característica de transferencia**, como la mostrada en la **figura 8.54**. En este caso particular, la I_D máxima, correspondiente a V_{GS}=0, es de 10mA, mientras que la tensión V_{GS} de corte, correspondiente a I_D=0, es de -4V.

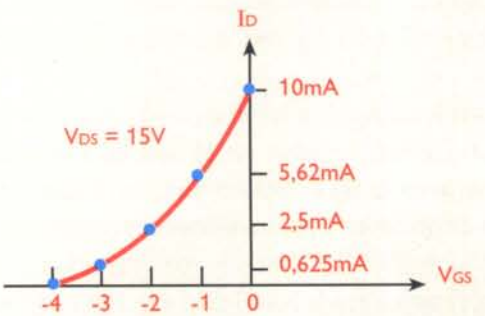
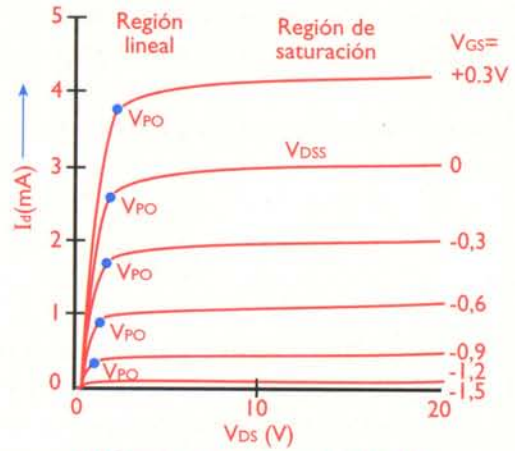
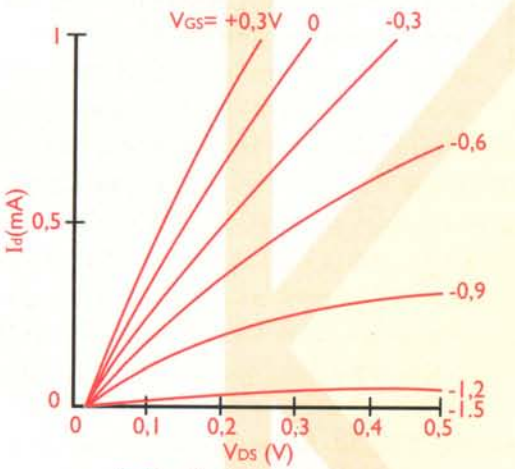


***Figura 8.54**. Curva característica de transferencia típica de un JFET*



(a) Características generales de salida



(b) Detalle de la región lineal.

Figura 8.55. *Curvas características de salida de un JFET representativo*

De igual forma, el comportamiento de la corriente de drenador (I_D) en función del voltaje drenador-fuente (V_{DS}) para distintos valores de la tensión de compuerta (V_{GS}) se representa gráficamente mediante un conjunto de **curvas características de salida**, como las mostradas en la **figura 8.55a**, muy similares a las de un BJT. Observe que en cada caso la corriente I_D se incrementa rápidamente al principio para luego estabilizarse y permanecer prácticamente constante. Si la tensión de drenador (V_{DS}) es muy alta, por encima de su valor máximo, el JFET entra en la zona de ruptura y se destruye físicamente. En nuestro caso, esta tensión (V_{DSmax}) es del orden de 25V.

La parte plana de cada curva característica de salida, donde la corriente I_D es prácticamente constante, se denomina **región de saturación** y se localiza entre la tensión de ruptura (V_{DSmax}) y una tensión mínima, llamada **tensión de estrangulamiento** (V_P o V_{PO}). Asimismo, la parte de la curva comprendida entre V_{DS}=0 y V_{DS}=V_P se denomina **región lineal** u **óhmica.** En esta zona, mostrada en detalle en la **figura 8.55b**, el dispositivo se comporta básicamente como una resistencia.

El valor de I_D obtenido con V_{GS}=0 (compuerta en cortocircuito con la fuente) se designa en las hojas de datos de los JFET como I_{DSS} y corresponde prácticamente a la máxima corriente que es capaz de transportar el dispositivo. Éste es uno de los principales parámetros de los JFET. Para el **2N5484** de Motorola, por ejemplo, el valor de I_{DSS} fluctúa entre 1mA y 5mA. Otra especificación importante de los JFET es la tensión puerta-fuente de corte ($V_{GS(off)}$), correspondiente al mínimo voltaje de compuerta necesario para llevar el dispositvo al corte, es decir reducir la I_D a cero. Por regla general, esta tensión es siempre igual a la de estrangulamiento (V_{PO}) y de polaridad opuesta. Esto es:

$$V_{GS(off)} = -V_{PO}$$

Por ejemplo, si $V_{GS(off)}$=-4V, entonces automáticamente V_{PO}=+4V. Por esta razón, el valor de V_{PO} normalmente no se proporciona en las hojas de datos. De todas formas, el valor de V_{GS} no debe ser superior a un valor máximo o de ruptura, especificado como V_{GSR}. Para el 2N5484, por ejemplo, V_{GSR}=-25V. Igualmente importante es la **transconductancia**, que es el parámetro natural de ganancia de los FET, como lo es el *beta* (ß) en los BJT. La transconductancia se designa como **gm** o **yfs** y se define como la relación de cambio entre la corriente de drenador (I_D) y la tensión de compuerta (V_{GS}). Esto es:

$$gm = yfs = \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}} = \frac{id}{vgs}$$

siendo ΔI_D la variación en la corriente de drenador debida a una variación ΔV_{GS} en la tensión

Parámetro	Valor	Descripción
V_{DS}	+25V (max)	Máxima tensión drenador- fuente
V_{DG}	+25V (max)	Máxima tensión drenador- compuerta
V_{GS}	-25V (max)	Máxima tensión compuerta- fuente
V_{GS} (off)	-6V (max)	Máxima tensión compuerta fuente para el corte de Id
c_{DSS}	2 - 20 mA	Corriente drenador- fuente con Vgr=0
I_{GSS}	-1nA max	Máxima corriente de fuga a 25°C
I_G	10mA	Máxima corriente de compuerta
g_m	3 - 6 mmho	Transconductancia con señal débil y montaje de fuente común
C_{iss}	5pf max	Máxima capacidad de entrada en configuración fuente común
P_T	350 mWmax	Máxima disipación de potencia al aire
f_r	100 MHz	Producto ganancia- banda de paso
I_D	30 mA	Máxima corriente de drenador

Figura 8.56. *Especificaciones de un JFET representativo (2N5484)*

de compuerta, e **id** y **vgs** los valores instantáneos de señal correspondientes. La tabla de la **figura 8.56** relaciona los valores máximos de éstos y otros parámetros para el 2N5484, un JFET representativo muy utilizado en amplificadores de baja y alta frecuencia.

Esquemas de polarización de los JFET. Polarización de compuerta

Los JFET, al igual que los BJT, pueden ser utilizados básicamente de dos formas: como interruptores en circuitos digitales o como amplificadores en circuitos análogos. En el primer caso, su punto de trabajo oscila entre la saturación y el corte, mientras que en el segundo debe mantenerse dentro de la región activa. Para que esto último sea posible, el dispositivo debe ser polarizado adecuadamente, teniendo en cuenta que la unión compuerta-fuente se polariza siempre en inverso. En las **figuras 8.57** hasta **8.63** se muestran varios esquemas de polarización posibles, aunque no todos ellos son los más adecuados, especialmente porque la ubicación del punto Q depende de la corriente I_{DSS} y la tensión $V_{GS(off)}$, que son dos parámetros muy variables de un JFET a otro.

La forma más sencilla y también la más ineficiente, de polarizar un JFET, es aplicar una tensión fija a la compuerta, como se muestra en la **figura 8.57**. En este caso, la corriente de drenador (I_D) puede ser evaluada gráficamente a partir de la curva de transferencia del JFET o matemáticamente a partir de la siguiente ecuación:

$$I_D = I_{DSS}\left[1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}}\right]^2$$

siendo **V_{GS}** y **$V_{GS(off)}$** las magnitudes tensiones de polarización y de corte de la compuerta, e **I_{DSS}** la máxima corriente de colector. Esta ecuación es válida para cualquier JFET, tanto de canal N como de canal P, operando en la zona activa. Debido a que los valores de I_{DSS} y $V_{GS(off)}$ no son constantes, sino que varían de un JFET a otro incluso de la misma referencia, el valor real de I_D puede fluctuar dentro de una gama muy amplia de valores. Esto implica que el punto de trabajo obtenido mediante este esquema de polarización es muy inestable. Por esta razón, la polarización de compuerta no es adecuada para amplificadores de baja señal. El siguiente ejemplo aclarará estos conceptos.

Ejemplo. Un amplificador de baja señal utiliza un esquema de polarización como el de la **figura 8.57** con V_{DD}=12V y R_D=4,7kΩ. El JFET seleccionado como elemento activo se especifica con una corriente I_{DSS} variable entre 1mA y 5mA, y una tensión $V_{GS(off)}$ variable entre -0,3V y -3V. Si se aplica una tensión de polarización de compuerta (V_{GS}=V_{GG}) de –2V, ¿cuáles serán los posibles puntos de trabajo (I_{DQ},V_{DQ}) posibles para este amplificador?

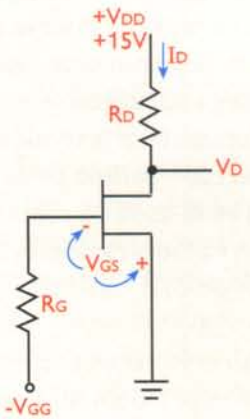


Figura 8.57. *Polarización de compuerta*

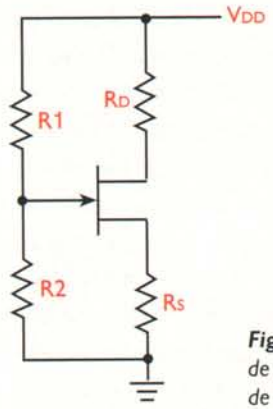


Figura 8.58. *Polarización de un JFET mediante divisor de tensión*

Solución. Con $V_{GS(off)}$=-0,3V, I_D sería 0, debido a que el valor de $V_{GS(off)}$ es inferior a V_{GS} (-2V). Bajo esta condición, no habría una caída de voltaje sobre R_D y la tensión de drenador (V_D) sería igual a la tensión de alimentación (V_{DD}), es decir –12V, independientemente del valor real de I_{DSS}. Por tanto, el punto de trabajo coincidiría con el punto de corte. Resumiendo:

$$I_{D(min)} = 0$$
$$V_{D(max)} = V_{DD} = 12V$$

Con $V_{GS(off)}$=-3V, la corriente de drenador (I_D) sería mayor de cero, ya que este valor es superior a V_{GS} (-2V). Puesto que I_D es proporcional a I_{DSS}, la máxima corriente de drenador se obtendría con I_{DSS}=5mA. Bajo esta condición, asumiendo que el JFET opera en la zona activa, los valores correspondientes de I_D y V_D en condiciones de reposo serían:

$$I_{D(máx)} = 5mA \times \left[1 - \frac{2V}{3V}\right]^2 = 0{,}555mA$$

$$V_{D(mín)} = V_{DD} - I_{D(máx)} \times R_D$$
$$= 12V - 0{,}555mA \times 4{,}7k\Omega = 9{,}39V$$

Por tanto, como consecuencia de la dispersión en los valores de I_{DSS} y $V_{GS(off)}$, el punto real de trabajo de nuestro amplificador podría estar ubicado como mínimo en V_D=9,39V e I_D=0,555mA, y como máximo en V_D=12V e I_D=0, que es el mismo punto de corte del JFET. Estos resultados demuestran la incapacidad del esquema de polarización de compuerta para mantener un punto de trabajo estable.

Polarización mediante divisor de tensión

Una opción a la polarización de compuerta es utilizar un divisor de tensión, como se muestra en la **figura 8.58**. Nuevamente, aunque con una selección adecuada de los valores de estos componentes es posible conseguir un punto de trabajo estable, este esquema de polarización no es adecuado para JFET, aunque sí para transistores bipolares. Por esta razón no lo examinaremos en detalle.

Polarización mediante dos fuentes de alimentación

Una tercera alternativa es utilizar dos fuentes de alimentación, como se muestra en la **figura 8.59**. Este esquema de polarización produce un punto de trabajo más estable que los dos anteriores. En este caso, la resistencia de compuerta (R_G) está conectada a tierra y se aprovecha la tensión desarrollada sobre la resistencia de la fuente (R_S) para polarizar inversamente la compuerta. Puesto que la corriente de compuerta es cero, no hay caída de voltaje a través de R_G. La tensión de polarización V_{GS} está dada por:

$$V_{GS} = I_D R_S - V_{SS}$$

siendo I_D la corriente de drenador (numéricamente igual a la tensión de fuente, I_S) y V_{SS} la magni-

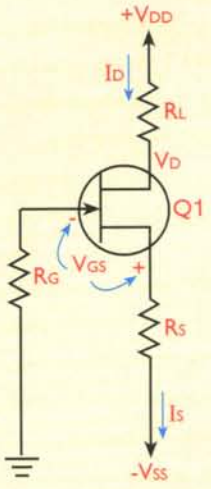


Figura 8.59. *Polarización mediante fuente dual*

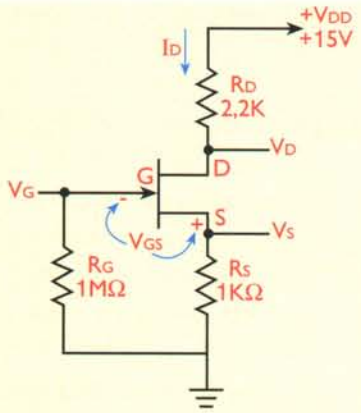


***Figura 8.60**. Polarización automática (autopolarización) de un JFET*

tud de la tensión de polarización de fuente. Si, por ejemplo, IDSS aumenta, entonces ID tiende también a aumentar. Esto provoca que la tensión VGS también aumente, disminuyendo así la corriente ID y neutralizando su tendencia a aumentar. Por tanto, ID permanece esencialmente constante, o al menos bastante estable, lo mismo el punto de trabajo. Un análisis similar puede hacerse cuando VGS(*off*) cambia.

Autopolarización

El mismo resultado anterior se obtiene utilizando una sola fuente de alimentación bajo un esquema como el mostrado en la **figura 8.60**, llamado **polarización automática** o **autopolarización**. Esta es la configuración favorita de los diseñadores de amplificadores con JFET debido a que produce un punto de trabajo muy estable sin necesidad de recurrir a una fuente de alimentación adicional. Nuevamente, la idea básica es aprovechar la caída de tensión sobre la resistencia de fuente (RS) y la alta impedancia de entrada del JFET para obtener la tensión de polarización inversa de la compuerta (VGS). Esta última está dada simplemente por:

$$V_{GS} = -I_D R_S$$

El mecanismo de estabilización del punto de trabajo, frente a las variaciones de IDSS y VGS(*off*), es el mismo que se mencionó anteriormente para el circuito de polarización con fuente dual. Si, por ejemplo, el voltaje VGS(*off*) aumenta, entonces ID tiende a disminuir. Esto provoca que la tensión VGS también disminuya, aumentando así la corriente ID y neutralizando su tendencia a aumentar. De este modo, la corriente ID, y por tanto el punto de trabajo del amplificador, permanecen estables. Un análisis similar puede hacerse cuando la corriente IDSS cambia, ya sea porque se utiliza otro transistor de la misma referencia o porque varía la temperatura. Los valores de RS y RD necesarios para obtener un punto de trabajo dado (ID, VD) pueden calcularse en forma aproximada mediante las siguientes fórmulas:

$$R_S = \frac{V_{GS(off)}}{I_{DSS}}$$

$$V_D = V_{DD} - I_D R_D$$

$$R_D = \frac{V_{DD} - V_D}{I_D}$$

$$R_G >> 100K$$

Ejemplo. Considere que en el circuito de la **figura 8.60** la tensión VDD es de 10V y se desea polarizar el amplificador en el punto de trabajo Q correspondiente a ID=2mA y VD=5V. Para ello se utiliza un JFET con valores nominales de VGS(*off*) e IDSS de -4V y 10mA, respectivamente. Determinar los valores de RD, RS y RG, así como el de la tensión de polarización de la compuerta (VGS).

Solución. El valor de RG lo establecemos arbitrariamente en 1MΩ o más alto, Para el cálculo de RS, RD y VGS procedemos así:

$$R_S = \frac{V_{GS(off)}}{I_{DSS}} = \frac{4V}{10mA} = 400\Omega$$

$$R_D = \frac{V_{DD} - V_D}{I_D} = \frac{10V-5V}{2mA} = 2{,}5k\Omega$$

$$V_{GS} = I_D R_S = 2mA \times 400\Omega = -0{,}8V$$

Observe que este último valor (-0,8V) es inferior al de corte (-4V) y superior a 0V. Por tanto, el JFET trabaja en la zona activa. Note también que, como VGS(*off*)=VPO (tensión de estrangulamiento), el valor de RS es numéricamente igual al de la resistencia drenador-fuente (RDS) en la zona óhmica de la curva característica de salida. En la práctica,

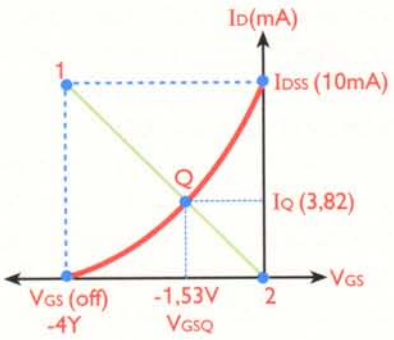


Figura 8.61. *Cálculo gráfico de la resistencia de fuente (RS) y el punto de trabajo (Q) de un JFET autopolarizado*

los valores exactos de ID y VD dependen del valor real de la tensión VGS necesario para satisfacer la ecuación del FET, es decir:

$$I_D = I_{DSS}\left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}}\right)^2$$

En nuestro caso, se puede demostrar que con RS=400Ω, el valor real de la corriente ID obtenido es del orden de 3,82 mA, lo cual produce un voltaje de polarización de compuerta (VGS) de –1,53V. En la práctica, estos valores se pueden determinar en forma gráfica utilizando la característica de transferencia del JFET, como se ilustra en la **figura 8.61**. En este caso, el punto de trabajo Q (VGSQ, IDQ) corresponde a la intersección de la curva de transferencia del JFET con la recta trazada desde el punto **1** (VGS=VGS(off), ID=IDSS) hasta el punto **2** (VGS=0, ID=0). El punto Q así obtenido no siempre coincide exactamente con el punto medio de la curva característica, pero es aceptable para la mayoría de aplicaciones prácticas.

En la práctica, el valor real de la resistencia RS necesario para conseguir una corriente ID específica en un JFET autopolarizado puede variar ampliamente, incluso entre transistores idénticos. Por esta razón, el valor de RS determinado, matemática o gráficamente, mediante los procedimientos antes descritos debe ser considerado sólo como una aproximación. El valor definitivo se encuentra por pruebas de ensayo y error, ya sea utilizando un potenciómetro, un *trimmer,* o un juego de resistencias fijas de diferentes valores.

Nota. En éste, como en los demás esquemas de polarización que examinaremos a continuación, la resistencia RG puede tener cualquier valor, hasta 10MΩ máximo. Este límite lo determina la corriente inversa de fuga de la compuerta, designada como **IGSS** en las hojas de datos, la cual puede llegar a imponer sobre esta resistencia una caída de voltaje suficiente para alterar las condiciones de polarización. Para el 2N5484, por ejemplo, la corriente IGSS puede llegar a ser hasta de -2μA en el peor de los casos. Esta corriente, al circular a través de una resistencia RG de 10MΩ produciría una caída de voltaje positiva de ¡20V!. De este modo, para conseguir una tensión de polarización de compuerta, por ejemplo, de -2V, la caída de tensión sobre la resistencia de fuente (RS) debería ser de ¡22V!.

Polarización de compuerta con referencia (*offset*)

El esquema de autopolarización, discutido anteriormente, proporciona resultados satisfactorios para la mayoría de las aplicaciones prácticas, pero no es muy exacto debido a la dificultad para fijar la corriente ID en un valor específico. La polarización por voltaje de referencia u *offset*, ilustrada en la **figura 8.62**, ofrece mejores resultados, a expensas de una mayor complejidad. En este caso, el divisor de tensión formado por las resistencias R1 y R2 proporciona, a través de la resistencia RG, una tensión de polarización positiva fija (VB), la cual se resta de la tensión sobre RS (VRS) para establecer el voltaje de polarización compuerta-fuente (VGS). Esto es:

$$V_{GS} = V_{RS} - V_B$$

Naturalmente, VRS debe ser mayor que VB para que el valor resultante de VGS sea negativo. De este modo, si VB es grande comparada con VGS, la corriente ID depende principalmente del valor de RS y VB. Por tanto, no está muy influenciada por las variaciones de la tensión VGS entre transistores individuales. Todo esto permite que la corriente ID pueda ser fijada exactamente, evitando la tediosa tarea de tener que seleccionar, por ensayo y error, la resistencia RS óptima.

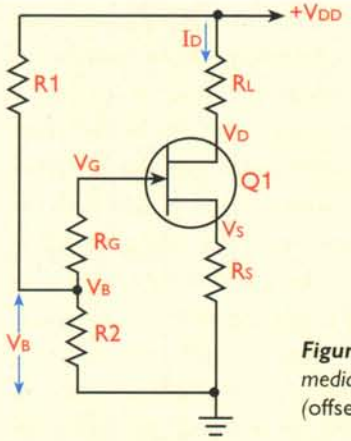


Figura 8.62. *Polarización mediante tensión comparativa (offset)*

Polarización mediante fuente de corriente constante

Otro método muy eficiente de polarizar un amplificador con JFET es utilizando una fuente de corriente constante, como se ilustra en la **figura 8.63**. En este caso, la resistencia de fuente (R_S) es reemplazada por el transistor bipolar Q2 y sus componentes asociados (R1-R3), los cuales se encargan de establecer la corriente I_D e independizarla de la tensión V_{GS}. Esta corriente es igual a la corriente de colector (I_C) de Q2 y se puede evaluar así:

$$I_D = I_C = \frac{V_B - V_{BE}}{R_E}$$

siendo

$$V_B = V_{DD}\left(\frac{R2}{R1+R2}\right)$$

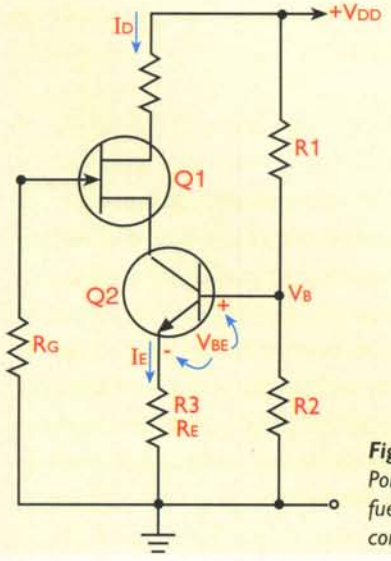


Figura 8.63. *Polarización mediante fuente de corriente constante*

Por ejemplo, si R1=8,2kΩ, R2=1,6 kΩ, R3=1 kΩ y V_{DD}=10V, entonces, asumiendo V_{BE}=0,.63V, la corriente I_D es exactamente igual a 1mA y no depende de las características del JFET, particularmente de la tensión de corte ($V_{GS(off)}$) y de la corriente de saturación (I_{DSS}), que son, como ya sabemos, dos parámetros muy variables de un transistor a otro. Esto garantiza una alta estabilidad del punto de polarización o trabajo, a expensas de algunos componentes adicionales. Para mayor exactitud, la resistencia R2 puede ser reemplazada por un diodo Zener o un voltaje de referencia fijo.

Circuito equivalente de baja señal de un amplificador con JFET

Para efectos prácticos, desde el punto de vista de su función como amplificador, un JFET puede ser representado mediante un circuito equivalente como el de la **figura 8.64**, válido para señales **pequeñas**, es decir, aquellas que producen variaciones en la corriente de drenador (i_d) inferiores al 10% de su valor en reposo. En este caso, R_{GS} representa la resistencia de la unión compuerta-fuente que, como sabemos, es muy alta, del orden de varios cientos de megaohmios. El drenador se comporta como una fuente que proporciona una corriente (i_d) proporcional al voltaje de señal aplicado en la compuerta (v_{gs}). La constante de proporcionalidad es precisamente la **transconductancia** (gm) del dispositivo, la cual se expresa en mhos (℧, al revés), o siemens (S). Esto es:

$$id = (gm) \times (v_{gs})$$

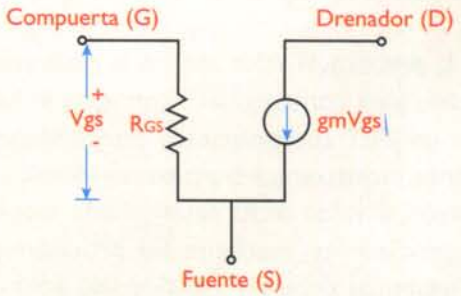


Figura 8.64. *Circuito equivalente de señal para un JFET. **RGS** representa la resistencia de la unión compuerta-fuente, que es muy alta, **vgs** el voltaje de señal de la compuerta, **id** la corriente de señal de drenador y **gm=id/vgs** la trasconductancia para la tensión de polarización de compuerta (V_{GS}) del dispositivo.*

De este modo, si gm=3.000µmho, entonces una variación de 0,15V en el voltaje de compuerta (vgs o ΔV_{GS}) produce una variación de 3.000µmho x 0,15V = 450µA en la corriente de drenador (i_d o ΔI_D), con respecto a su valor de polarización. La transconductancia (gm) varía con la tensión de polarización de compuerta (V_{GS}), alcanzando su valor máximo cuando V_{GS}=0. Este valor máximo se designa en las hojas de datos como **gm0**, **gfs0** o **yfs0**. El JFET **2N5484** de ON Semiconductor, por citar un caso, se especifica con una gm0 mínima de 2.500µmho. En general, la transconductancia (gm) de un JFET, para cualquier valor de V_{GS}, se puede evaluar a partir de la siguiente fórmula:

$$gm = gm0\left[1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}}\right]$$

Por ejemplo, si gm0=3.000µmho, $V_{GS(off)}$=-3V y V_{GS}=-1V, entonces:

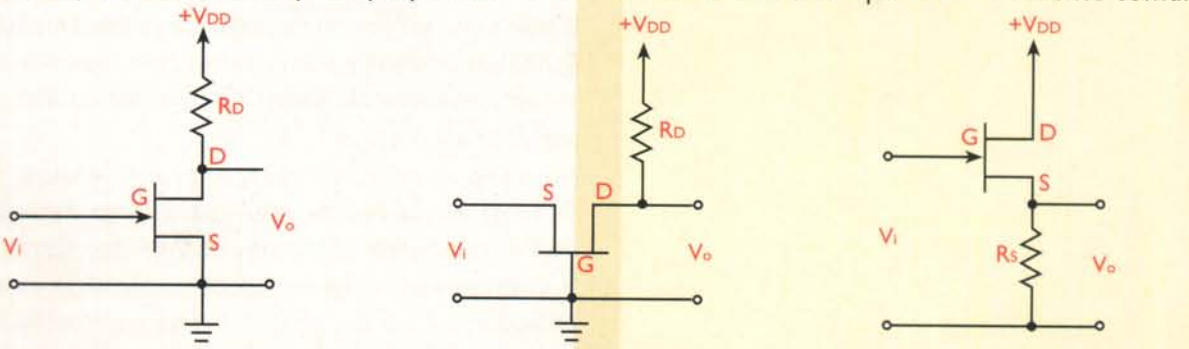
$$gm = 3.000\mu mho\left[1 - \frac{(-1V)}{(-3V)}\right] = 2.000\mu mho$$

Configuraciones básicas de amplificadores con JFET

Al igual que con los transistores bipolares, son posibles tres configuraciones básicas de amplificadores con transistores JFET, representadas en la **figura 8.65**, llamadas fuente común (CS: *common source*), compuerta común (CG: *common gate*) y drenador común (CD: *common drain*), análogas, en su orden, a las estructuras emisor común, base común y colector común, y con propiedades similares. La configuración drenador común se denomina también **seguidora de fuente** (*follower source*) y es una de las más empleadas. Los amplificadores de compuerta común son poco empleados, excepto en tareas de muy alta frecuencia, debido a que presentan una muy baja impedancia de entrada. Por esta razón, en esta lección no los examinaremos en detalle.

En un **amplificador de fuente común, figura 8.65a**, la señal de entrada (Vi) se aplica en la compuerta (G), mientras que la señal de salida (Vo) se obtiene en el drenador (D). El surtidor o fuente (S) está conectado dinámicamente a tierra. Esta configuración produce inversión de fase, así como una moderada ganancia de voltaje, inferior a la de un amplificador en emisor común. También posee una alta impedancia de entrada y produce una distorsión baja para señales pequeñas, pero alta para señales grandes. Este último fenómeno se denomina **distorsión de ley cuadrática** y, aunque es indeseable en un amplificador, se aprovecha con ventaja en unos circuitos llamados **mezcladores de frecuencia**, muy utilizados en equipos de comunicaciones.

En un **amplificador de compuerta común, figura 8.65b**, la señal de entrada (Vi) se aplica en el surtidor (S), mientras que la señal de salida (Vo) se obtiene en el drenador (D). La compuerta (G) está conectada dinámicamente a tierra. Esta configuración no produce inversión de fase y proporciona una ganancia de voltaje similar a la de un amplificador en fuente común.



(a) Amplificador de fuente común

(b) Amplificador de compuerta común

(c) Amplificador de drenador común (seguidor de fuente)

Figura 8.65. *Configuraciones básicas de amplificadores con JFET*

No obstante, su impedancia de entrada es muy baja, aunque mayor que la de un amplificador en base común. Debido a esta última característica, los amplificadores en compuerta común son raramente utilizados.

Finalmente, en un **amplificador de drenador común, figura 8.65c**, la señal de entrada (Vi) se aplica en la compuerta (G), mientras que la señal de salida (Vo) se obtiene en el surtidor. El drenador (D) está conectado dinámicamente a tierra. Esta configuración no produce inversión de fase ni ganancia de voltaje. Sin embargo, proporciona una muy alta impedancia de entrada, superior a la de un amplificador de fuente común, y una baja impedancia de salida.

Debido a que el voltaje de salida es prácticamente el mismo voltaje de entrada, pero con una mayor capacidad de corriente, este circuito se denomina también un **seguidor de fuente**. Se utiliza principalmente como adaptador de impedancias y como etapa de entrada en osciloscopios y otro tipo de instrumentos.

La estructura completa de un **amplificador de fuente común** básico, incluyendo el circuito de polarización, se muestra en la **figura 8.66**. En este caso, al aplicar una señal pequeña en la compuerta (v_i), se producen variaciones en el voltaje compuerta-surtidor (v_{gs}), las cuales, a su vez, provocan variaciones en la corriente de drenador (i_d). Puesto que esta última corriente circula a través de R_D, en la salida (v_o) se produce un voltaje de señal amplificado, opuesto en fase con respecto al voltaje de señal de entrada, como sucedía en un amplificador de emisor común. La ganancia de voltaje (A_V), sin carga, de esta configuración está dada por la siguiente fórmula, la cual se demuestra más adelante:

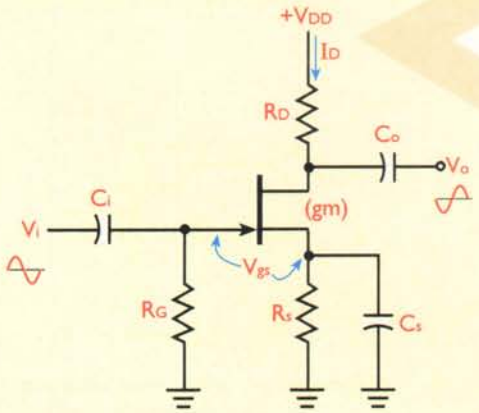


Figura 8.66. *Amplificador fuente común completo*

$$A_V = (-gm)(R_D)$$

siendo **gm** (en mhos o siemens, S) la transconductancia del JFET y **R_D** (en ohmios, Ω) el valor de la resistencia de drenador. El signo menos (-) indica simplemente inversión de fase. Por ejemplo, si gm=2.500µmho y R_D=4,7kΩ, entonces el valor neto de la ganancia de voltaje (sin signo) es:

$$A_V = 2.500\mu mho \times 4{,}7k\Omega = 11{,}75\ (21dB).$$

Recuerde que la transconductancia varía dependiendo de la tensión de polarización de compuerta (V_{GS}), y, por tanto, de la corriente de polarización del drenador.

La estructura completa de un **amplificador de drenador común (seguidor de fuente)** básico, incluyendo el circuito de polarización, se muestra en la **figura 8.67**. Nuevamente, al aplicar una señal pequeña en la compuerta (v_i), se producen variaciones en el voltaje compuerta-surtidor (v_{gs}), las cuales, a su vez, provocan variaciones en la corriente de drenador (i_d). Esta corriente, al circular a través de R_S, produce en la salida (v_o) un voltaje de señal aproximadamente igual al de entrada y con la misma fase, igual como sucedía en un amplificador de colector común o seguidor de emisor.

La ganancia de voltaje (A_V), sin carga, de esta configuración está dada por la siguiente fórmula, cuya demostración se deja como ejercicio para el lector:

$$A_V = \frac{R_S}{R_S + 1/gm}$$

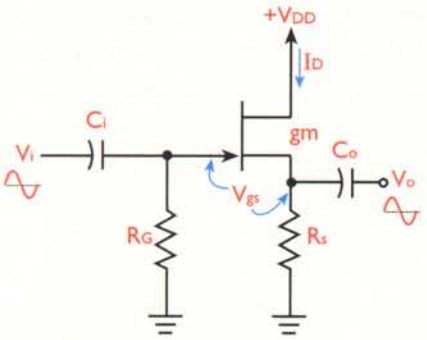


Figura 8.67. *Amplificador seguidor de fuente completa*

siendo **gm** (en mhos o siemens, S) la transconductancia del JFET y **Rs** (en ohmios, Ω) el valor de la resistencia de surtidor o fuente. Por ejemplo, si gm=2.500µmho (2,5mS) y RD=1kΩ, entonces el valor neto de la ganancia de voltaje es:

$$A_V = \frac{1k\Omega}{1k\Omega + \frac{1}{2,5}mS} = 0,71\ (-2,9dB)$$

Por tanto, la ganancia de voltaje es inferior a 1 (0dB), como era de esperar. La impedancia de salida (Zo), vista por la carga externa conectada al surtidor, está dada por:

$$Zo = Rs \parallel (1/gm)$$

siendo **Rs** (Ω) la resistencia de surtidor y **gm** (mho o S) la transconductancia. Recuerde que el símbolo || significa "en paralelo con". En nuestro caso, con gm=2,5mS y Rs=1kΩ, tendríamos:

$$\frac{1}{gm} = \frac{1}{2,5mS} = 400\Omega$$

$$Zo = 1K\Omega \parallel 400\Omega = 286\Omega$$

Por tanto, la impedancia de salida de un seguidor de fuente es relativamente baja, aunque no tan baja como la de un seguidor de emisor.

Análisis de amplificadores de baja señal con JFET

Los amplificadores de baja señal con transistores JFET se analizan con los mismos métodos generales empleados para los amplificadores con transistores bipolares. Para ilustrar esta semejanza, y derivar algunas conclusiones generales relativas al comportamiento de los JFET como amplificadores, consideremos un JFET y un BJT operando con una corriente de polarización (ID o IC) de 1 mA, como se muestra en la **figura 8.68**. En ambos casos se utiliza una resistencia de carga (RD o RC) de 5kΩ, una tensión de alimentación (VDD o VCC) de +10V y una tensión de polarización de salida (VCQ o VDQ) de +5V. El JFET está conectado en el modo fuente común y el BJT en el modo emisor común. Centraremos nuestra atención en la estimación de la ganancia de voltaje (AV) y la impedancia de salida (Zo), ignorando los detalles de la polarización.

La ganancia de voltaje (AV) del amplificador con BJT, como sabemos, es igual a la relación entre la

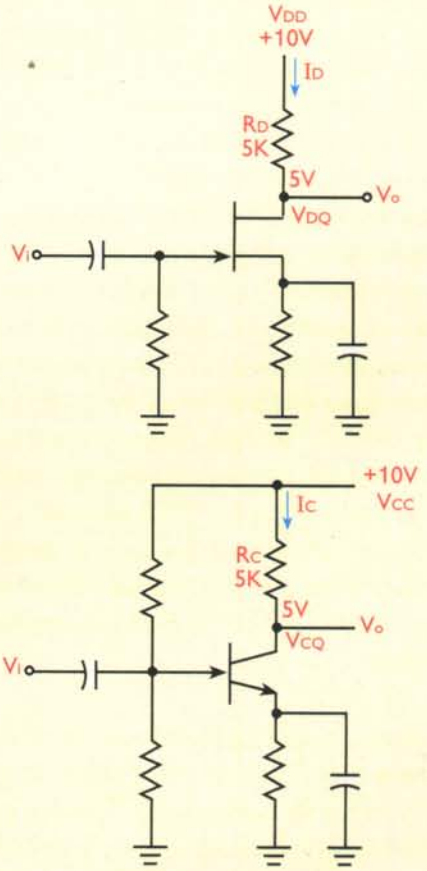


Figura 8.68. *Análisis comparativo de un amplificador con JFET y un amplificador con BJT*

resistencia de colector (R_C) y la resistencia dinámica de emisor (r'_e). Esto es:

$$A_{V(BJT)} = \frac{v_o}{v_i} = \frac{v_o}{v_{be}} = \frac{R_C}{r'_e}$$

$$r'_e = \frac{25mV}{I_C} = \frac{25mV}{1mA} = 25\Omega$$

$$A_{V(BJT)} = \frac{5k\Omega}{25\Omega} = 200\ (46dB)$$

siendo $v_i = v_{be}$ el voltaje de señal de entrada. En el caso del FET, la ganancia depende de la transconductancia (gm). Típicamente, esta última es del orden de 2.000µmho (o 2mS) para una I_D de 1mA. Por tanto:

$$A_{V(FET)} = \frac{v_o}{v_i} = \frac{v_o}{v_{gs}}$$

$$v_o = (i_d)(R_D)$$

$$i_d = (v_{gs})(gm)$$

$$A_{V(FET)} = \frac{(i_d)(R_D)}{v_{gs}} = \frac{(v_{gs})(gm)(R_D)}{v_{gs}}$$

$$A_{V(FET)} = (gm)(R_D) = 2mS \times 5k\Omega = 10\ (20dB)$$

Por tanto, un amplificador con JFET proporciona inherentemente una ganancia de voltaje mucho más baja que un amplificador con BJT. Aunque esta baja ganancia puede ser mejorada utilizando un esquema de polarización con fuente de corriente, de todas formas siempre será inferior a la de un transistor bipolar. Por esta razón, para tareas generales de amplificación, los transistores bipolares son más utilizados que los JFET, excepto cuando es importante sacrificar la ganancia a cambio de una muy alta impedancia y una baja demanda de corriente de señal, donde los JFET son ampliamente superiores.

Con respecto a la impedancia de salida (Zo), en ambos casos esta última es prácticamente igual al valor de R_C o R_D, en nuestro caso 5kΩ. Sin embargo, en una configuración seguidora, la impedancia de salida proporcionada por un JFET con una fuente de señal de alta impedancia (por encima de 50kΩ) es muy inferior a la proporcionada por un BJT. Este último se comporta mejor con fuentes de señal de baja impedancia (por debajo de 5kΩ).

Circuitos prácticos de amplificadores de baja señal con JFET

A continuación se presentan algunos ejemplos de circuitos amplificadores prácticos de baja señal con transistores JFET. Todos ellos están basados en las configuraciones drenador común o fuente común examinadas anteriormente, y, algunos de ellos ilustran el uso de técnicas de diseño especiales para aumentar la impedancia de entrada, mejorar la estabilidad del punto de trabajo, y otros propósitos.

Todos los circuitos mostrados utilizan el clásico JFET **2N3819**, de canal N, como elemento activo. Se pueden utilizar transistores JFET de otras referencias, como el **2N5484**, siempre y cuando sus características eléctricas sean similares a las del **2N3819**. Las siguientes son algunas de las especificaciones máximas más importantes de este último dispositivo:

Voltaje de ruptura compuerta fuente ($V_{(BR)GSS}$): -40V
Corriente máxima de drenador (I_{DSS}): 20mA
Transconductancia (g_{fs}): 7.000µmho (7mS)
Corriente inversa de fuga de la compuerta (I_{GSS}): -100pA
Voltaje de corte de compuerta ($V_{GS(OFF)}$): -6V

En la **figura 8.69** se muestra un sencillo amplificador seguidor de fuente que utiliza un esquema de autopolarización. La resistencia de fuente (R_S) está representada por la combinación en serie de R1, R2 y R4 (variable). Esta última se utiliza para establecer el voltaje de polarización de la compuerta (V_{GS}), y, por tanto, para fijar la corriente de polarización del drenador (I_D) en 1 mA. Para ello, R4 debe ser ajustada de modo que, en condiciones de reposo, la caída de voltaje sobre R2 sea de 5,6V. Bajo estas condiciones la ganancia de voltaje esperada es aproximadamente 0,95. Con los valores de componentes indicados, la impedancia de entrada

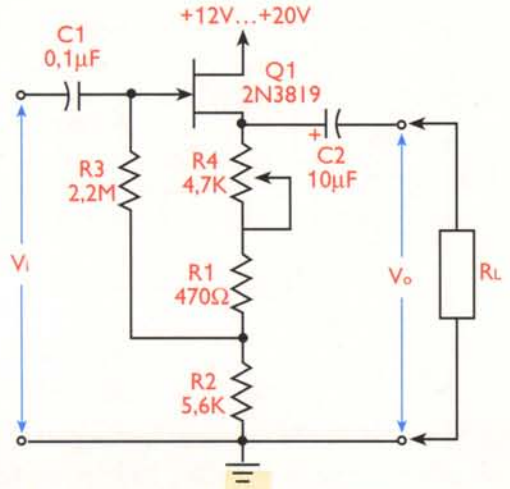


Figura 8.69. *Amplificador seguidor de fuente práctico y autopolarizado*

(Zi) en bajas frecuencias es del orden de 10MΩ, pero cae a 1MΩ alrededor de los 15kHz, y a 100kΩ por los lados de 160kHz.

La resistencia R2 introduce un efecto de realimentación negativa que incrementa efectivamente la impedancia de entrada vista por la fuente de señal. Este efecto se conoce en la terminología de circuitos electrónicos como *bootstraping* (literalmente "levantar por los pies", sin equivalente en español). Debido al *bootstraping* introducido por R2, la resistencia R3, que determina la impedancia de entrada de la etapa, aparece ante la fuente de señal como si fuera unas cinco veces más grande. Por esta razón, la impedancia de entrada efectiva no es 2,2MΩ, sino más de 10MΩ.

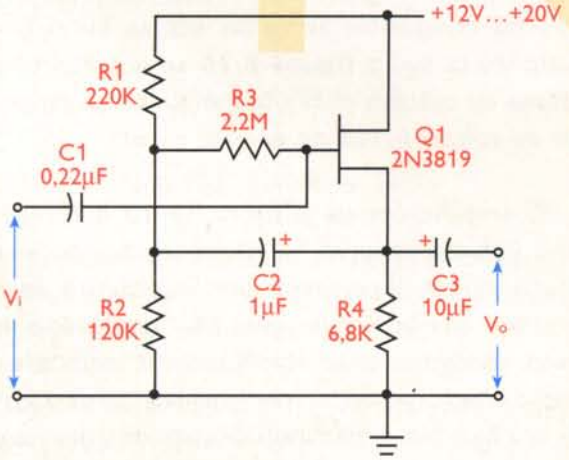


Figura 8.70. *Amplificador seguidor de fuente práctico con polarización de offset*

En la **figura 8.70** se muestra otra versión de un amplificador seguidor de fuente, pero utilizando un esquema de polarización por voltaje de referencia (*offset*). En este caso no se necesita resistencia de ajuste para fijar la corriente de drenador (ID). La ganancia de voltaje es aproximadamente de 0,95. El condensador C2 introduce un efecto de *bootstrapping*, multiplicando el valor efectivo de la resistencia de compuerta (R3) por un factor de 20. De este modo, la fuente de señal observa una impedancia de entrada (Zi) del orden de 44MΩ. Sin C2, esta impedancia es igual al valor nominal de R3 (2,2MΩ). Se pueden obtener valores mayores de Zi incrementando el valor de R3 hasta un máximo de 10MΩ, e incluso, utilizando una fuente de corriente para polarizar el JFET.

En la **figura 8.71** se muestra el esquema de un sencillo amplificador de fuente común con autopolarización, el cual proporciona una ganancia de voltaje del orden de 21dB, equivalente a una factor de amplificación de 12; y una respuesta de frecuencia plana entre 15Hz y 250kHz. Para operación con baja señal, el potenciómetro R4 debe ser ajustado de modo que

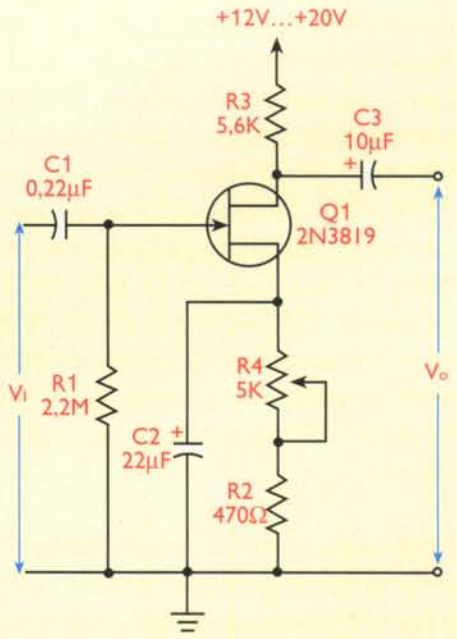


Figura 8.71. *Amplificador de fuente común práctico con autopolarización*

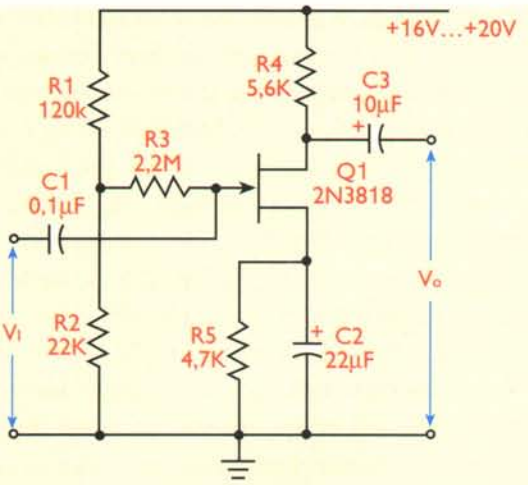


Figura 8.72. *Amplificador práctico de fuente común, con polarización por voltaje de referencia (offset)*

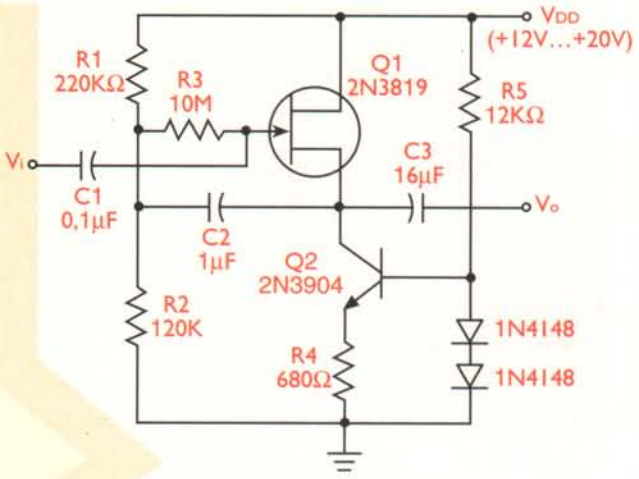


Figura 8.73. *Amplificador práctico de fuente común, con polarización por fuente de corriente*

sobre R3 se produzca una caída de voltaje de 5,6V. De este modo, la corriente de polarización de drenador es del orden de 1mA. R4 puede ser ajustado también para que el circuito procese, con mínima distorsión, señales fuertes, capaces de provocar grandes excursiones o variaciones en el voltaje de salida.

Si se requiere de una alta exactitud en las condiciones de polarización, la mejor alternativa es utilizar un amplificador con polarización de referencia (*offset*) o por fuente de corriente. En las **figuras 8.72**, por ejemplo, se muestra un amplificador de fuente común con polarización de referencia (*offset*) para la compuerta. El circuito debe ser alimentado con una tensión positiva de 16V a 20V. El mismo ofrece una ganancia de voltaje de 21dB, una impedancia de entrada de 2,2MΩ y un ancho de banda útil (-3dB) desde 15 Hz hasta 250kHz. En la **figura 8.73** se muestra un amplificador de fuente común con características similares, excepto que utiliza un esquema de polarización basado en una fuente de corriente.

Amplificadores multietapa

En muchos casos, la ganancia de voltaje proporcionada por una sola etapa amplificadora es insuficiente. Esta circunstancia obliga a utilizar dos o más etapas **en cascada**, es decir, conectadas una a continuación de otra. Este tipo de configuraciones se denominan **amplificadores multietapa** o de múltiples etapas. La idea básica de un amplificador multietapa es utilizar la señal de salida amplificada de una etapa como la señal de entrada de la etapa siguiente, y así sucesivamente. De esta forma, la señal final de salida es mucho mayor que la señal original de entrada y tiene una ganancia muy alta que sería difícil o imposible de conseguir con una sola etapa.

En las **figuras 8.74** hasta la **8.76** se presentan algunos ejemplos de amplificadores multietapa sencillos con transistores bipolares. El montaje de la **figura 8.74**, en particular, combina transistores NPN y PNP para proporcionar una interfaz compatible entre las etapas. En el circuito de la figura **figura 8.75** se acoplan tres etapas en cascada para obtener una alta ganancia de voltaje (≈100 dB, en este caso).

El amplificador de la figura **figura 8.76** emplea dos transistores NPN conectados en una configuración denominada ***par Darlington***. Este montaje, que se examina más adelante junto con otras configuraciones amplificadoras especiales, proporciona una excelente ganancia de corriente, una muy alta impedancia de entrada y una muy baja impedancia de salida. La ganancia de voltaje, sin embargo, es inferior a la unidad. La ganancia

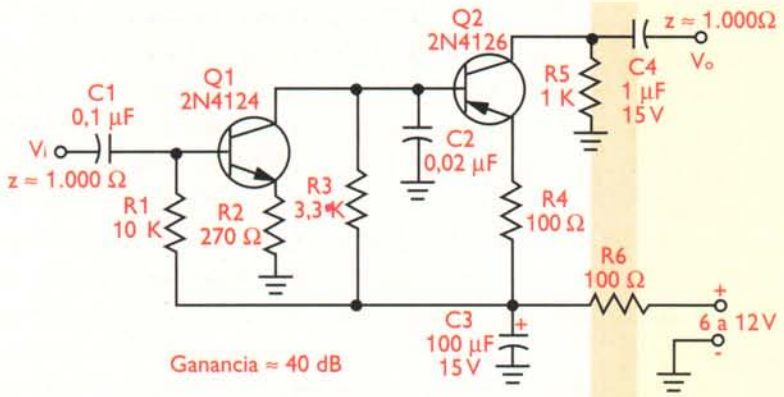


Figura 8.74. *Amplificador de dos etapas con una ganancia de 40dB*

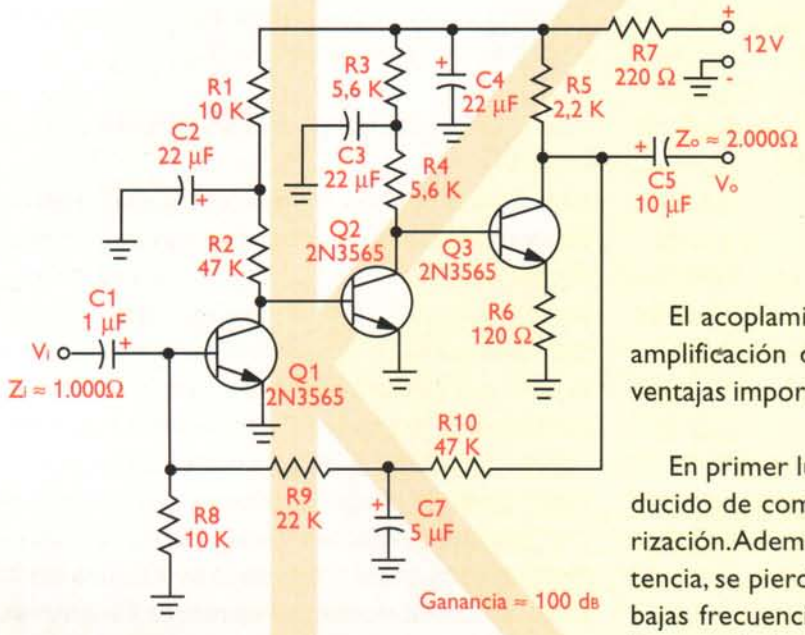


Figura 8.75. *Amplificador de tres etapas con una ganancia de 100dB*

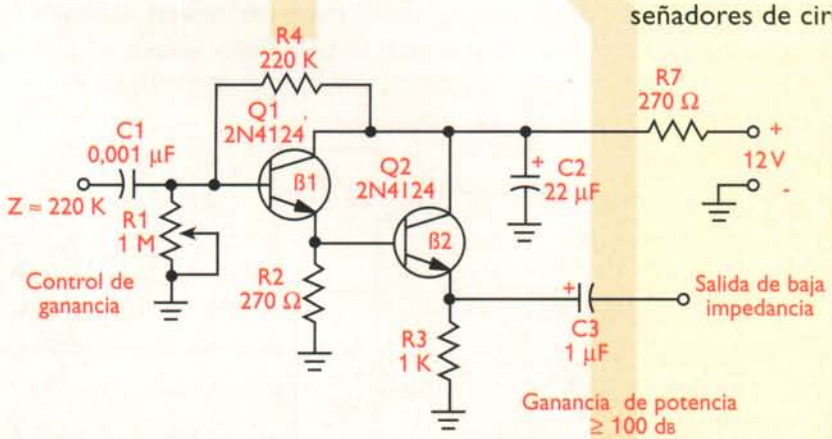


Figura 8.76. *Amplificador de dos etapas tipo darlington con una ganancia mayor de 100 dB.*

de corriente total es aproximadamente el producto de las ganancias de corriente individuales de los transistores. Esto es:

$$ß = ß1 \times ß2$$

Los tres circuitos anteriores tienen en común el hecho que las etapas individuales están acopladas entre sí directamente, compartiendo sus niveles de polarización. Esto es típico en amplificadores de baja frecuencia como los utilizados en sistemas de audio. Por ejemplo, en la mayor parte de los circuitos integrados amplificadores de audio, las etapas internas están siempre acopladas directamente.

El acoplamiento directo entre etapas para la amplificación de señales de audio ofrece varias ventajas importantes.

En primer lugar, se requiere de un número reducido de componentes para estabilizar la polarización. Además, se disminuye el consumo de potencia, se pierde menos señal y no se atenúan las bajas frecuencias. Tampoco hay cambios de fase. Por otro lado, la existencia de transistores complementarios (NPN y PNP) proporciona a los diseñadores de circuitos una gran flexibilidad.

Por éstas y otras razones, los circuitos integrados utilizan acoplamiento directo entre etapas debido a que los altos valores requeridos para los condensadores de acoplamiento exigen una gran área de pastilla, lo cual es impráctico.

El acoplamiento entre etapas puede también efectuarse mediante circuitos RC (resistencia-condensador), o a través de trans-

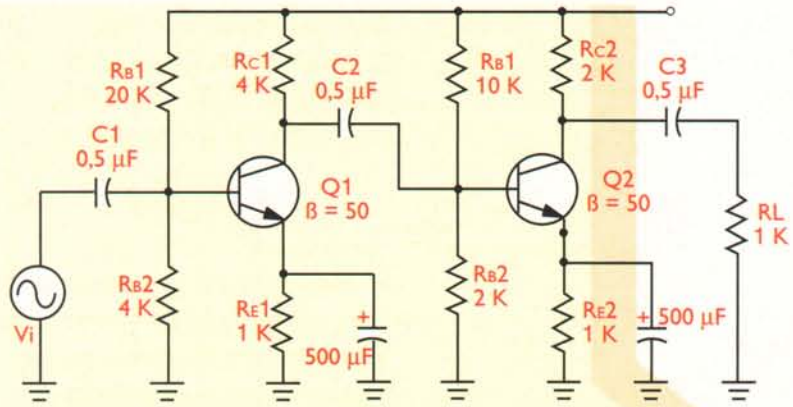


Figura 8.77 Amplificador multietapa práctico con acoplamiento por redes RC

formadores, como se ilustra en las **figuras 8.77** y **8.78**. Estos métodos se utilizan, principalmente, en altas frecuencias. En el primer caso, las dos etapas están conectadas entre sí a través de C2 que actúa como condensador de acoplamiento.

Utilizando este método, los niveles de polarización de la primera etapa (Q1) quedan aislados de los de la segunda (Q2). La polarización de base de esta última la proporcionan RB1 y RB2. Estas resistencias, junto con C2 y la impedancia de entrada vista en la base de Q2, forman un filtro pasaaltos, permitiendo el paso de la señal de CA proporcionada por la primera etapa, pero bloqueando el nivel de polarización (CC) de la misma.

En el segundo caso, **figura 8.78**, las dos etapas están aisladas mediante un transformador (T1). La polarización de la segunda etapa se hace a través de las resistencias RB1 y RB2. La ventaja de este método es que la relación de transformación de T1 (5 a 1, en este caso) puede ser utilizada para controlar la ganancia de voltaje. También permite obtener una respuesta de frecuencia selectiva, es decir, proveer amplificación solamente para frecuencias de señal comprendidas dentro de una determinada banda. Esta técnica de amplificación selectiva de frecuencias, mediante transformadores sintonizados, es ampliamente utilizada en tareas de radiofrecuencia (RF).

Análisis de un amplificador de dos etapas

En la **figura 8.79** se muestra el circuito práctico de un amplificador de dos etapas con acoplamiento por condensador (C2). Ambas etapas utilizan polarización por divisor de tensión y están conectadas en la configuración emisor común. La corriente de la señal de salida de la primera etapa, disponible en el colector de Q1, se divide entre las resistencias RC1, R3 y R4, las cuales están conectadas en paralelo desde el punto de vista dinámico. Esto permite reducir la segunda etapa a un circuito equivalente, como el mostrado en la **figura 8.80**. Bajo estas condiciones, la impedancia de entrada de la segunda etapa es simplemente:

$$Zi2 = R3 \parallel R4 \parallel r'b$$

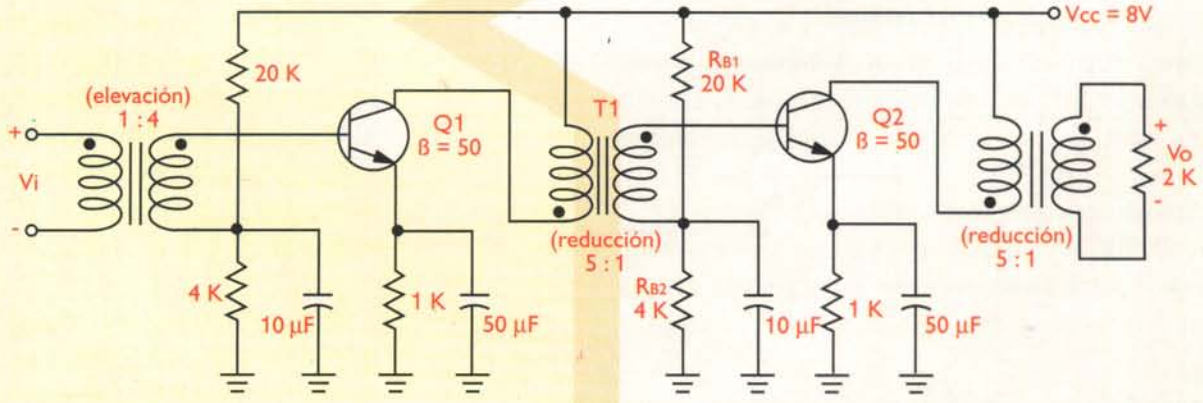


Figura 8.78. Amplificador multietapa práctico con acoplamiento por transformador

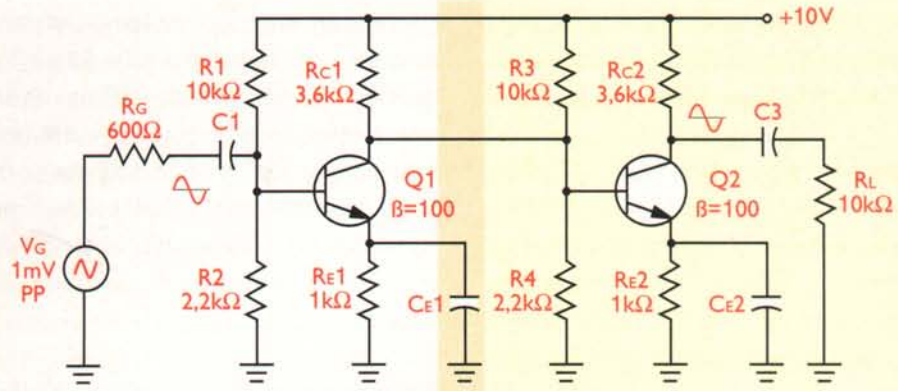


Figura 7.79. *Amplificador de dos etapas práctico*

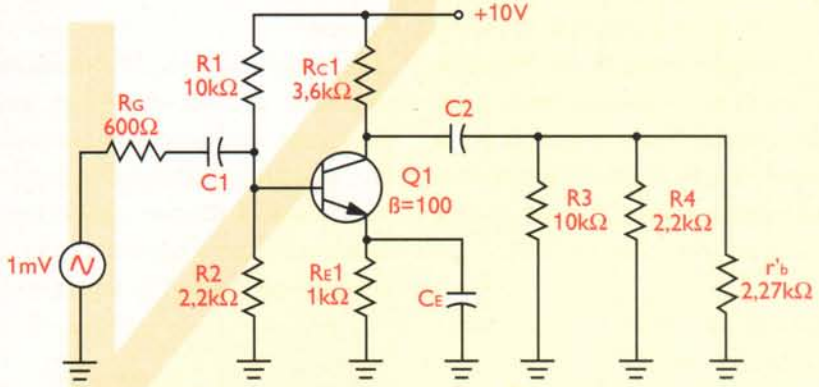


Figura 7.80. *Circuito equivalente del amplificador de dos etapas*

siendo r'b la resistencia dinámica de la unión base-emisor (BE) de Q2 vista desde la base. Esta resistencia, como sabemos, es igual a ß veces r'e. Por tanto, asumiendo ß=100 y r'e=22,7Ω (calculada), tenemos:

$$r'_b = \beta r'_e = 100 \times 22{,}7\Omega = 2{,}27k\Omega$$

$$Z_{i2} = 10k\Omega \,||\, 2{,}2k\Omega \,||\, 2{,}27k\Omega = 1k\Omega$$

Ésta sería la impedancia de entrada de la segunda etapa, numéricamente igual a la impedancia de entrada de la primera etapa, ya que ambas utilizan los mismos valores de componentes. La primera etapa se analiza en la forma usual, considerando que tiene una resistencia de carga (R_{L1}) igual a la impedancia de entrada de la segunda etapa (Z_{i2}=1kΩ). Bajo estas condiciones, la ganancia de voltaje de la primera etapa (A_{v1}) es:

$$A_{v1} = \frac{r_{c1}}{r'_e}$$

siendo r_{c1} la resistencia equivalente de colector de la primera etapa, igual al paralelo de R_{C1} (3,6kΩ) y Z_{i2} (1kΩ). Por tanto:

$$r_{c1} = R_{C1} \,||\, Z_{in2} = 3{,}6k\Omega \,||1k\Omega = 783\Omega$$

$$A_{v1} = \frac{783\Omega}{22{,}7\Omega} = 34{,}5 \ (21{,}5dB)$$

La ganancia de voltaje de la segunda etapa (A_{v2}) es, simplemente:

$$A_{v2} = \frac{r_{c2}}{r'_e}$$

siendo r_{c2} la resistencia equivalente de colector de la segunda etapa, igual al paralelo de R_{C2} (3,6kΩ) y la resistencia de carga R_L (10kΩ). Por tanto:

$$r_{c2} = R_{C2} \,||\, R_L = 3{,}6k\Omega \,||\, 10k\Omega = 2{,}65k\Omega$$

$$A_{v2} = \frac{2{,}65k\Omega}{22{,}7\Omega} = 117$$

La ganancia de voltaje total del amplificador (A_{VT}), es simplemente el producto de las ganancias de voltaje individuales de cada etapa. Por tanto:

$$A_{VT} = Av1 \times Av2 = 34,5 \times 117 = 4.037\ (72dB)$$

De este modo, si la señal entregada por el generador tiene una amplitud de 1mVpp, en la base de Q1 se obtiene una señal de 0,625mVpp, en el colector de Q1 una señal amplificada de 21,6 mV y en el colector de Q2 una señal amplificada de 2,53mV, ¿por qué?. El mismo análisis se aplica a cualquier amplificador multietapa. La clave está en determinar la impedancia de entrada de cada etapa y considerarla como la resistencia de carga de la etapa precedente. Hecho esto, se calcula la ganancia de cada etapa y luego la ganancia total del amplificador, que es simplemente el producto de las ganancias individuales. ¿Sencillo, verdad?.

Amplificadores de potencia con transistores

Todos los amplificadores que hemos estudiado hasta el momento son básicamente **amplificadores de voltaje** que trabajan en clase A, reciben señales de entrada pequeñas y producen señales de salida, libres de distorsión, que son réplicas ampliadas de las señales de entrada. Adicionalmente, este tipo de amplificadores necesitan una corriente de reposo, la cual debe ser, por lo menos, tan grande como la máxima corriente de salida esperada durante los picos de la forma de onda. Esto causa pérdidas de potencia que pueden llegar a ser varias veces mayores que la potencia consumida por la carga. Por tanto, este tipo de circuitos son ineficientes desde el punto de vista de conversión de potencia.

Los **amplificadores de potencia,** por su parte, son circuitos que combinan las características de un amplificador de voltaje con la capacidad de suministrar grandes cantidades de potencia eléctrica. Los mismos operan con señales grandes y se caracterizan por presentar diversos grados de distorsión en la foma de onda de la señal de salida. Esto es, en un amplificador de potencia la forma de onda de la señal de salida no es una réplica fiel de la forma de onda de la señal de entrada. Además, debido a que trabajan generalmente en clase B, requieren muy poca o ninguna corriente de reposo, lo cual implica que prácticamente no hay consumo de potencia en ausencia de señal. Por tanto, son más eficientes que los amplificadores en clase A.

Características y especificaciones de los amplificadores de potencia

Los amplificadores de potencia se caracterizan mediante varios parámetros, siendo los más importantes: la ganancia de potencia, el rendimiento, la impedancia de entrada y la impedancia de salida. La **ganancia de potencia** (**Ap**) es simplemente la relación entre la potencia de salida (Po) y la potencia de entrada (Pi). Esto es:

$$Ap = \frac{Po}{Pi}$$

Por ejemplo, si Pi =50µW y Po =40mW, entonces:

$$Ap = \frac{40mW}{50\mu W} = 800$$

El **rendimiento**, que se designa generalmente como η (léase «eta»), es una medida de la forma como un amplificador utiliza la potencia proveniente de la fuente de alimentación para producir potencia útil en la carga. Se expresa como un porcentaje así:

$$\eta(\%) = \frac{P_L}{P_S} \times 100$$

siendo P_L la potencia aprovechada por la carga y P_S la potencia entregada por la fuente. Idealmente, un amplificador debería tener un rendimiento del 100%, es decir, toda la potencia entregada por la fuente debería ser aprovechada por la carga. En la práctica esto nunca sucede debido a que se presentan pérdidas de potencia en los transistores,

las resistencias, los conductores, y en otros elementos. Los amplificadores de potencia clase A ofrecen un bajo rendimiento, típicamente del orden del 5% (25% en el mejor de los casos). Los amplificadores clase B, por su parte, que son los más utilizados, proporcionan rendimientos superiores al 75%.

Las impedancias de entrada y de salida son importantes para conseguir la máxima transferencia de potencia desde la fuente de señal hasta carga. Para lograr este objetivo, un amplificador de potencia debe tener, idealmente, una impedancia de entrada (Zi) igual a la de la fuente de señal (Rs); así como una impedancia de salida (Zo) igual a la de la carga (R_L). Por ejemplo, un amplificador de potencia destinado a impulsar un parlante de 8Ω desde una fuente de señal de 50Ω, debe tener una impedancia de salida de 8Ω y una impedancia de entrada de 50Ω. De lo contrario, se producen pérdidas de potencia y se reduce el rendimiento, del sistema.

Operación de amplificadores de potencia en clase A

Un amplificador trabaja en clase A cuando la señal de entrada recibe una amplificación del 100%. En el caso de un amplificador con transistor, esto significa que por el colector circula corriente durante los 360° de cada ciclo de señal. En la **figura 8.81a** se muestra, como ejemplo, un amplificador clase A conectado en la configuración emisor común. Para comprender el funcionamiento del circuito con señales grandes deben considerarse dos rectas de carga, como se indica en la **figura 8.81b**: una para corriente continua y otra para señal. La diferencia entre ambas rectas la establece la resistencia de colector, la cual tiene un valor **Rc** (3,6kΩ) para CC (polarización) y un valor r_c=**Rc** || **RL** (2,04kΩ) para CA (señal).

Observe que ambas rectas incluyen el punto Q. En nuestro caso, este último está ubicado en I_{CQ}=1,1mA y V_{CEQ}=4,94V. Bajo esta condición, las excursiones o variaciones máximas que puede experimentar la señal de salida, alrededor del punto de reposo, son 4,94V (=V_{CQ}) hacia la izquierda, y 2,24V (=$I_{CQ}r_c$) hacia la derecha. Tratándose de una onda seno simétrica, esto significa que la máxima amplitud que puede alcanzar la misma, sin sufrir distorsión, es del orden de 2,24Vp (4,48Vpp), como se observa en la **figura 8.81c**. Si la señal se incrementa con respecto a este valor, se produce un efecto de recorte, como se muestra en la **figura 8.81d**.

Es posible obtener una mayor excursión de la señal de salida aumentando la corriente de polarización de colector (I_{CQ}). Esto equivale a desplazar el punto de trabajo (Q) hacia la izquierda hasta que coincida con el punto medio de la recta de carga para señal, como se muestra en la **figura 8.81e**. Bajo esta condición, V_{CEQ}=$I_{CQ}r_c$, lo cual implica que la señal puede oscilar libremente, en ambas direcciones, alrededor del punto de trabajo, hasta alcan-

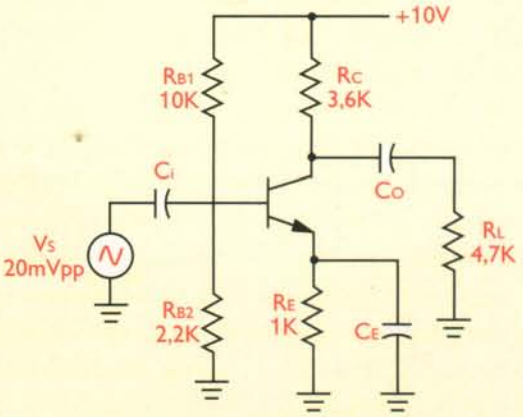


Figura 8.81a. *Funcionamiento en clase A de un amplificador de potencia*

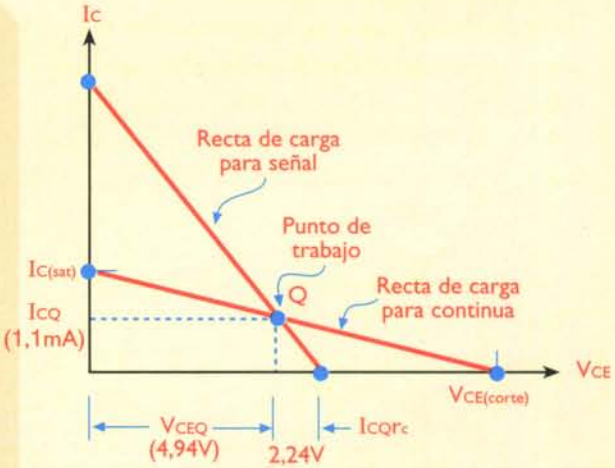


Figura 8.81b. *Rectas de carga para señal y para corriente continua*

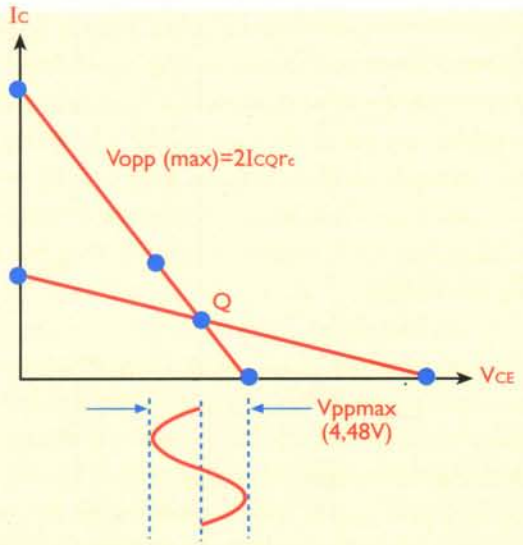


Figura 8.81c. *Máxima señal pico a pico*

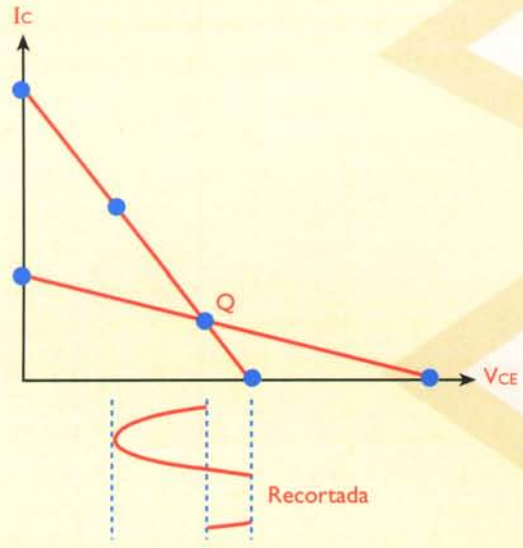


Figura 8.81d. *Producción de recorte*

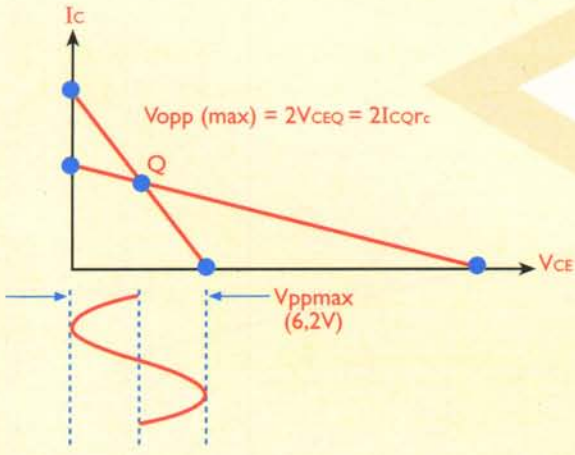


Figura 8.81e. *Punto Q óptimo, para máxima excursión de señal*

zar una amplitud máxima igual a V_{ECQ} (pico) ó $2V_{CEQ}$ (pico a pico). En la práctica, el punto Q óptimo se consigue variando la resistencia de emisor (R_E). El valor de R_E necesario para lograr este objetivo está dado por la siguiente fórmula:

$$R_E = \frac{R_C + r_c}{\frac{V_{CC}}{V_E} - 1}$$

En nuestro caso, R_E(óptima)=697Ω, pudiéndose utilizar una resistencia estándar de 680Ω. Bajo esta condición, el máximo valor pico a pico posible de la señal de salida (Voppmax), antes de que se produzca distorsión por recorte, es del orden de 6,2V. Un análisis de las nuevas condiciones de polarización para este circuito revela los siguientes resultados:

$$V_{BQ} = 1{,}8V$$
$$V_{EQ} = 1{,}1V$$
$$I_{CQ} = 1{,}61\ mA$$
$$V_{CQ} = 4{,}2V$$
$$V_{CEQ} = 3{,}1V$$

De este modo, la potencia disipada en el transistor sin señal de entrada (P_D) es simplemente:

$$P_D = V_{CEQ}I_{CQ} = 3{,}1V \times 1{,}61mA = 4{,}99mW$$

Esta potencia representa un valor máximo, ya que la misma disminuye en presencia de señal. Asimismo, la potencia total entregada por la fuente de alimentación (Ps) es:

$$P_S = V_{CC}I_S$$

siendo Is la corriente total consumida por el circuito. En nuestro caso, esta última es igual a la suma de la corriente de colector (I_{CQ}) con la corriente a través de las resistencias de polarización de base (RB1, RB2), que llamaremos I1. Esto es:

$$I_S = I_{CQ} + I1$$

$$I1 = \frac{V_{CC}}{RB1+RB2}$$

$$I1 = \frac{10V}{12{,}2k\Omega} = 0{,}82mA$$

$$Is = 1{,}61mA + 0{,}82mA = 2{,}43mA$$

$$PS = 10V \times 2{,}43mA = 24{,}3mW$$

Por tanto, la potencia máxima entregada por la fuente de alimentación es del orden de 24,3mW. Esta potencia (P_S) debe ser comparada con la potencia que realmente aprovecha la carga (P_L) para evaluar el **rendimiento** del amplificador, mediante la fórmula

$$\eta(\%) = \frac{P_L}{P_S} \times 100$$

siendo P_S la potencia entregada por la fuente y P_L la potencia en la carga. Esta última está dada por

$$P_L = \frac{(Vorms)^2}{R_L}$$

siendo Vorms el valor rms o efectivo de la señal de salida. En nuestro caso, para una señal de 6,2Vpp (3,1Vp), Vorms = Vop/$\sqrt{2}$ = 2,19V. Por tanto:

$$P_L = \frac{(2{,}19V)^2}{4{,}7k\Omega}$$

$$P_L = 1{,}02mW$$

$$\eta = \frac{1{,}02mW}{24{,}3mW} \times 100$$

$$\eta = 4{,}2\%$$

Este resultado indica que nuestro amplificador tiene un rendimiento de apenas el 4,2%, lo cual significa que más del 95% de la potencia entregada por la fuente se pierde y no es aprovechada por la carga. Esta característica es típica de los amplificadores de potencia clase A, donde el rendimiento siempre es inferior al 25%. Su uso se justifica solamente cuando se requiere una alta fidelidad en la forma de onda de la señal de salida y el consumo de potencia no es un factor importante. En equipos operados por baterías esta situación puede llegar a ser inaceptable. En las siguientes secciones examinaremos el funcionamiento en clase B, que emplea los transistores de manera más eficiente y permite obtener rendimientos superiores al 75%.

Operación de amplificadores de potencia en clase B

La mayor parte de los amplificadores de potencia con transistores operan en clase B. Como se recordará, un amplificador trabaja en clase B cuando solo recibe amplificación el 50% de la señal de entrada. Por tanto, la señal de salida está presente únicamente durante los semiciclos positivos o negativos de la señal de entrada. Además, no debe existir ningún tipo de corriente estática o de reposo a través del circuito si no está presente la señal de entrada.

En el caso de un amplificador con transistor bipolar, por ejemplo, lo anterior significa que la corriente de colector fluye solo durante 180° de cada ciclo de señal y no hay corriente de colector en ausencia de señal. Para que esto sea posible, el transistor debe ser polarizado de modo que su punto de trabajo (Q) coincida con el punto de corte. Esta situación se ilustra en la **figura 8.82**. De este modo se evita que el transistor esté disipando potencia en forma permanente, incluso si no está amplificando.

Idealmente, un amplificador de potencia en clase B debería tener una eficiencia del 100% y entregar una forma de onda de salida sin distorsión. En la práctica, la máxima eficiencia que puede pro-

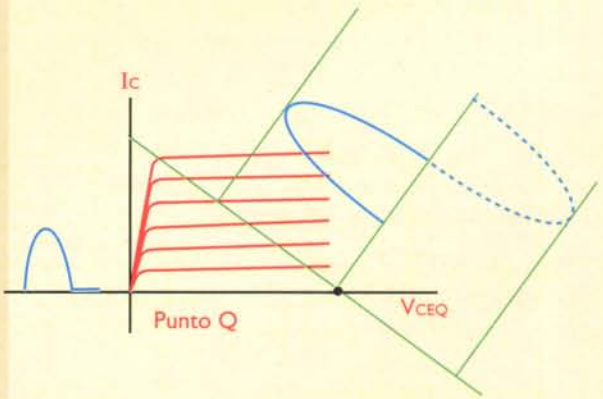


Figura 8.82. *Operación en clase B de un transistor*

porcionar un circuito de clase B es del orden del 78.5%. Asimismo, debido a que el transistor solo amplifica los semiciclos de la señal de entrada que lo polarizan directamente, se presenta necesariamente una distorsión en la forma de onda de salida. Afortunadamente, existen varias formas de conseguir al mismo tiempo una baja distorsión y una alta eficiencia. La más común es el uso de circuitos **en contrafase** o ***push-pull***, también llamados **de simetría complementaria** o **cuasi-complementaria** debido a que están basados en el uso de transistores complementarios (NPN y PNP). A continuación los examinaremos en detalle.

Circuitos en contrafase o push-pull

Una buena aproximación a la alta eficiencia de conversión esperada en un amplificador clase B y la baja distorsión propia en un amplificador clase A, se consigue mediante el funcionamiento en contrafase o *push-pull*, en el cual se utilizan dos transistores, o grupos de transistores complementarios operando en clase B, cada uno encargado de manejar una mitad de la señal suministrada a la carga. En la **figura 8.83** se ilustra este concepto. En este caso, el transistor Q1 (NPN) conduce durante los semiciclos positivos, mientras que el transistor Q2 (PNP) lo hace durante los semiciclos negativos. Si no hay señal de entrada, ninguno de los transistores conduce, y, por tanto, no hay corriente de colector ni disipación de potencia en ellos.

Note que se aplica la misma señal de entrada a las bases de ambos transistores. Sin embargo,

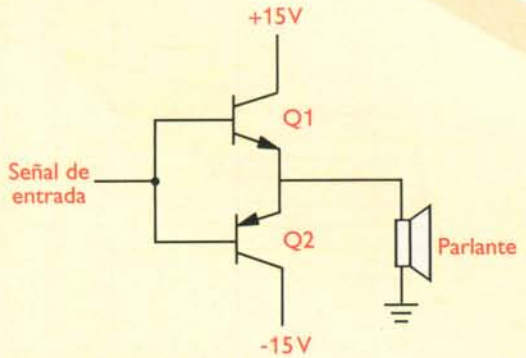


Figura 8.83. *Circuito divisor de fase para amplificador push-pull*

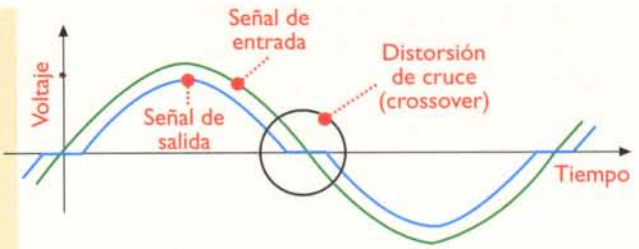


Figura 8.84. *Distorsión de cruce típica de los circuitos de simetría complementaria*

por ser complementarios, sólo uno está conduciendo en un momento dado. Observe además que se utiliza una fuente de alimentación simétrica o de doble polaridad. Aunque el circuito puede ser también alimentado con una fuente sencilla, el uso de una fuente doble permite obtener una mayor excursión del voltaje de salida y facilita el acople directo con la carga, representada en este caso por un parlante.

El circuito anterior, sin embargo, presenta un problema: produce en la señal de salida un tipo de distorsión, como la mostrada en la **figura 8.84**, denominada **distorsión de cruce** o *crossover*. Esta distorsión se debe a que, una vez la señal de entrada pasa por cero, es decir, se hace negativa o positiva, ninguno de los transistores conduce, y solo lo hacen cuando el nivel de la señal de entrada supera el potencia de barrera de la unión base emisor (V_{BE}), que es del orden de 0,6V. Por esta razón, para valores de señal de entrada entre +0,6V y -0,6V, la señal de salida vale esencialmente cero.

La distorsión de cruce es típica de los amplificadores clase B, pero puede ser minimizada, e incluso eliminada, proporcionando a ambos transistores una ligera polarización directa. Así, la señal de entrada oscilará realmente en torno a un nivel de polarización distinto de cero. Esto implica que los amplificadores clase B prácticos operan realmente en clase AB. Este modo de funcionamiento sacrifica ligeramente la eficiencia, lo cual se compensa con una mayor fidelidad. A continuación examinaremos algunas métodos comunes de proveer esta polarización.

Amplificadores de simetría complementaria con polarización por diodos

La forma más sencilla y efectiva de polarizar adecuadamente los transistores de salida de un circuito complementario es utilizando la **polarización por diodos**, representada en la **figura 8.85**. En este caso, las resistencias (R) polarizan directamente los diodos, manteniendo las base de Q1 a un nivel de 0,6V por encima de la señal de entrada y la base de Q2 a un nivel de 0,6V por debajo de la misma. De este modo, a medida que la señal de entrada cruza por cero, la conducción se transfiere de Q2 a Q1, y viceversa. Por tanto, en todo momento, siempre está un transistor conduciendo.

Para que la polarización por diodos sea eficiente, el valor de las resistencias de polarización (R) debe ser escogido de modo que proporcionen suficiente corriente de base para los transistores de salida durante las excursiones máximas de la señal de salida. Además, los diodos deben escogerse de forma tal que sus curvas características se acoplen perfectamente al comportamiento de la unión BE de los transistores en un amplio rango de temperaturas. Esto último es muy difícil de conseguir en la práctica, excepto en diseños integrados, por lo que el circuito de la **figura 8.85** es térmicamente inestable.

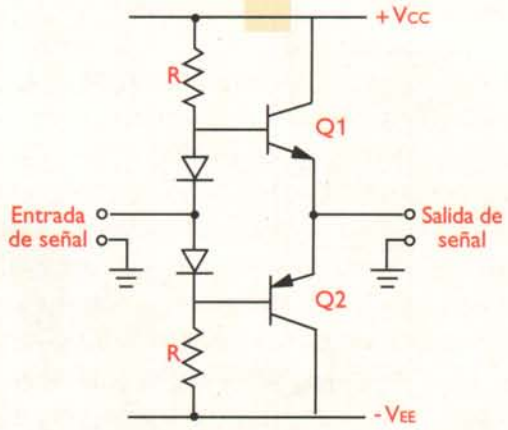


Figura 8.85. *Amplificador de simetría complementaria con polarización por diodos*

Incluso puede llegar a presentarse un fenómeno conocido como **avalancha térmica** (*thermal runaway*), caracterizado por el aumento progresivo de la temperatura en los transistores de salida hasta llegar a su destrucción. La avalancha térmica se debe a que el calentamiento inicial de los transistores causa la disminución de su voltaje V_{BE}, con lo cual comienza a fluir una mayor corriente de polarización de colector. Esta corriente, a su vez, calienta más el transistor, con lo cual sigue disminuyendo el voltaje V_{BE}, empeorándose paulatinamente la situación hasta culminar con la destrucción de los transistores. A continuación examinaremos algunos métodos para estabilizar la polarización de un circuito de simetría complementaria y para prevenir la avalancha térmica.

Amplificadores de simetría complementaria con estabilización térmica

Los circuitos de simetría complementaria, examinados hasta el momento, reciben su señal alterna de entrada a través de un condensador de acoplamiento. Una forma más conveniente de presentar esta señal es utilizando un excitador o *driver*, que es simplemente un transistor conectado en emisor común y acoplado directamente a la entrada del *push-pull*. Esta situación se ilustra en la **figura 8.86.** En este caso,

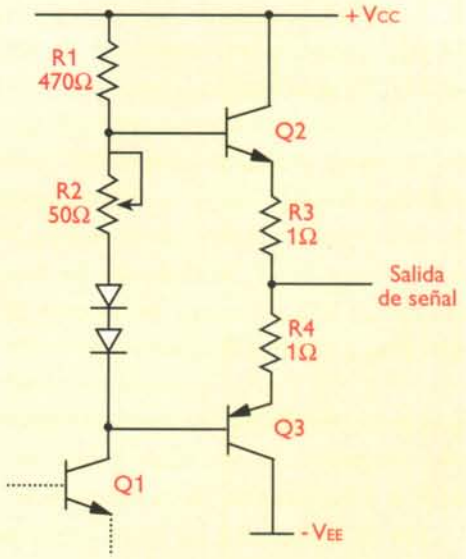


Figura 8.86. *Seguidor push-pull con resistencias de emisor para mejorar la estabilidad térmica*

el transistor Q1 actúa como *driver*, excitando las bases de Q2 y Q3, al mismo tiempo que fija la corriente continua de polarización de los diodos de compensación. Esta última corriente la regula R1, que opera también como resistencia de colector de Q1.

Las resistencias R3 y R4, que son típicamente del orden de los ohmios, o más pequeñas, mejoran la estabilidad térmica del circuito, actuando como «colchones» que amortiguan los efectos de la temperatura sobre la corriente de polarización de colector (I_C), y, por tanto, sobre la tensión base-emisor (V_{BE}). Observe que el voltaje entre las bases de los dos transistores de salida (Q2, Q3) es igual a $2V_{BE}$ más la caída en la resistencia ajustable R2. Por tanto, con unas pocas décimas de voltio a través de R3 y R4, cualquier variación del voltaje V_{BE} debida a la temperatura no causa que la corriente de colector aumente rápidamente, con lo cual se minimiza el riesgo de una avalancha térmica. La estabilidad se mejora aún más montando los diodos de compensación en contacto físico con los transistores de salida, o con sus respectivos disipadores de calor. La resistencia R2 puede ser reemplazada por un tercer diodo.

Podemos estimar la estabilidad térmica del circuito anterior recordando: **(a)** que el voltaje V_{BE} de los transistores de salida disminuye unos 2,1mV por cada 1°C de aumento de la temperatura, y, **(b)** que la corriente de colector se incrementa por un factor de 10 con cada incremento de 60mV del voltaje V_{BE}. De este modo, si reemplazamos R2 por un diodo (una práctica muy usual), tendríamos tres caídas V_{BE} entre las bases de Q2 y Q3, quedando disponible una caída V_{BE} (y no 0V, como antes) a través de la combinación en serie de R3 y R4. Estas últimas pueden ser seleccionadas de modo que proporcionen una corriente de reposo de colector apropiada, digamos 50mA.

Bajo estas condiciones, asumiendo que los diodos de compensación no están acoplados térmicamente a los transistores de salida, que sería el peor caso de estabilidad, un incremento de 30°C en la temperatura de los transistores causaría una disminución de 63mV en los voltajes VBE de Q2 y Q3, con lo cual, la caída de voltaje a través de R3 y R4, y por tanto, la corriente de reposo de salida, se incrementaría en un 20%. Sin resistencias de emisor, este incremento sería del orden del 1.000% (¡mil por ciento!). Basados en los resultados de este análisis, la mejora en la estabilidad térmica introducida por la presencia de las resistencias de emisor es evidente.

Una ventaja adicional de este esquema de polarización es que permite ajustar, mediante R2, la corriente de reposo a un valor adecuado, con lo cual se tiene algún control sobre la cantidad de distorsión de cruce (*crossover*) admisible, sin que se sacrifiquen excesivamente la fidelidad y el rendimiento del amplificador. Un amplificador *push-pull* polarizado de esta forma opera realmente como un amplificador en clase **AB**, lo cual implica que ambos transistores conducen simultáneamente durante una misma porción de cada ciclo de la señal de entrada.

En la **figura 8.87** se muestra un método alternativo para polarizar una etapa de potencia *push-pull* con el fin de conseguir al mismo tiempo una baja distorsión de cruce y una buena estabilidad térmica.

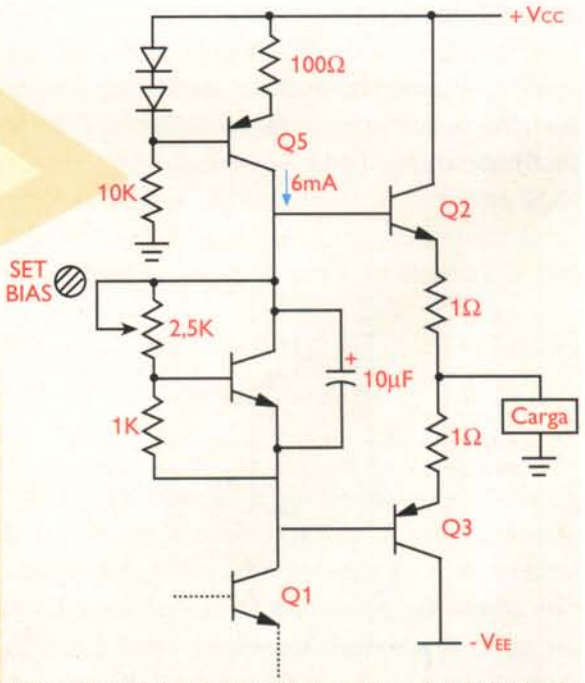


Figura 8.87 *Etapa push-pull polarizada para baja distorsión de crossover y buena estabilidad térmica*

En este caso, el transistor Q4 actúa como un diodo ajustable, manteniendo un voltaje constante entre colector y emisor, e imponiendo un voltaje V_{BE} entre base y emisor (V_{BE}). El voltaje V_{CE} requerido para que esto suceda se ajusta mediante el *trimmer* de 2,5K. El condensador de 10µF asegura que las bases de los transistores de salida vean la misma señal. Note que la resistencia de colector del transistor Q1 (*driver*) ha sido sistituida por una fuente de corriente, desarrollada alrededor de Q5 y sus componentes asociados, específicamente los diodos de polarización y las resistencias de 10K y 100Ω.

El uso de una fuente de corriente en lugar de una resistencia para polarizar una etapa *push-pull* es una variante útil, debido a que con una resistencia puede ser difícil conseguir una corriente de base suficiente para impulsar los transistores de salida, particularmente Q2, hacia los puntos de excursión máximos. Además, una resistencia suficientemente pequeña para impulsar el transistor Q2 provoca una alta corriente de colector en reposo, con las consiguientes pérdidas de potencia, así como una reducción substancial de la ganancia. Otra solución alternativa al problema de impulsar la base de Q2, es utilizar técnicas de *bootstrapping* o de elevación de impedancias, como veremos más adelante.

Amplificadores de simetría complementaria con transistores Darlington

Las etapas de salida de los amplificadores *push-pull* clases B y AB que hemos examinado hasta el momento, están basados en el uso de dos transistores complementarios, uno del tipo NPN para proporcionar amplificación de potencia durante los semiciclos positivos de la señal de entrada, y otro, del tipo PNP para proporcionar amplificación durante los semiciclos negativos de la misma. En muchas ocasiones, sin embargo, es deseble tener la opción de utilizar transistores de salida del mismo tipo, es decir ambos NPN o ambos PNP. Este modo de funcionamiento puede conseguirse muy fácilmente utilizando **transistores Darlington**, como se muestra en la **figura 8.88**.

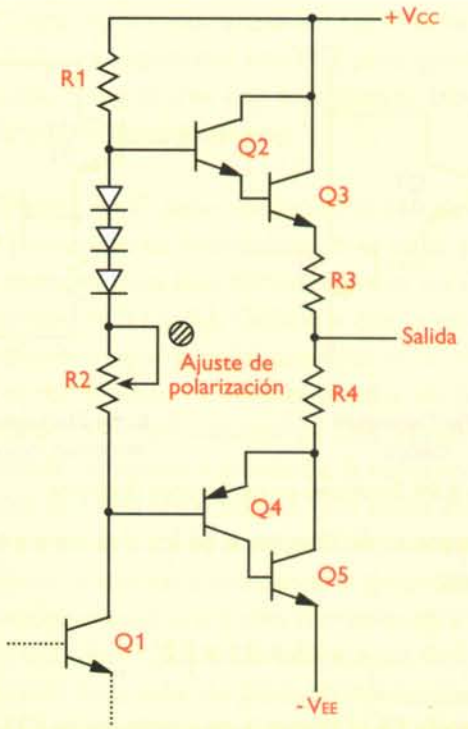
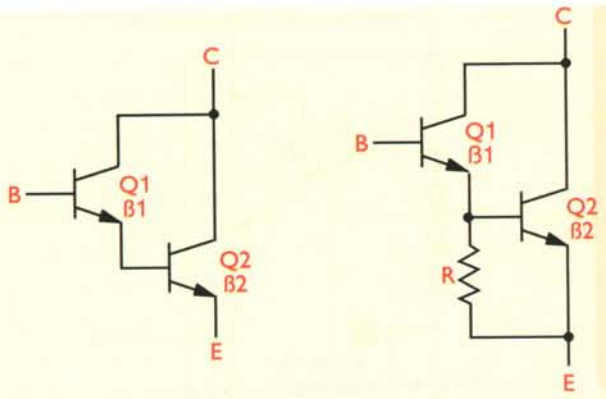


Figura 8.88. *Etapa de potencia push-pull utilizando transistores de salida NPN en configuración Darlington*

En este caso, Q2 (NPN) y Q3 (NPN) forman una estructura conocida como **Darlington**, la cual se comporta como un transistor NPN, mientras que Q4 (PNP) y Q5 (NPN) forman una estructura conocida como **Sziklai** o **Darlington complementaria**, la cual se comporta como un transistor PNP. Nuevamente, Q1 actúa como *driver* y R1, como la resistencia de colector de este último. Asimismo, R3 y R4, son las resistencias de emisor, encargadas de estabilizar térmicamente el sistema en la forma antes explicada. Este circuito se conoce también como **amplificador *push-pull* seudo-complementario**, debido a que utiliza un Darlington NPN formado con dos transistores NPN, y un Darlington PNP formado con un transistor PNP y uno NPN. Un amplificador *push-pull* verdaderamente complementario utilizaría para este último propósito dos transistores PNP, pero los transistores de salida ya no serían del mismo tipo.

En la **figura 8.89** se muestra en detalle la estructura de una conexión Darlington. El conjunto se comporta como un solo transistor (NPN) con una ganancia de corriente (β) igual al producto de



a. Par Darlington clásico

b. Par Darlington de velocidad mejorada

Figura 8.89. *Transistores en configuración Darlington*

las ganancias de corriente de los dos transistores. Esto es:

$$\beta = \beta 1 \times \beta 2$$

siendo **β1** la ganancia de corriente de Q1 y **β2** la ganancia de corriente de Q2. Por ejemplo, si **β1**=100 y **β2**=35, el transistor resultante tiene una ganancia de corriente total de 3.500. Esta característica es muy atractiva en situaciones donde se manejan altas corrientes, por ejemplo, reguladores de voltaje y etapas de salida de amplificadores de potencia, como en nuestro caso. Además, proporciona una muy alta impedancia de entrada. Sin embargo, su caída base-emisor (V_{BE}) es el doble de la normal y tiende a comportarse como un transistor lento. La forma más común de mejorar su velocidad es incluyendo una resistencia (R) entre la base y el emisor del transistor de salida (Q2), como se indica en la **figura 8.89b**

Típicamente, el valor de la resistencia R es del orden de unos pocos cientos de ohmios para transistores Darlington de potencia, y de algunos miles de ohmios para transistores Darlington de baja señal. Lo importante al seleccionar el valor de R, es que las corrientes de fuga de Q1 no produzcan sobre la misma una caída superior al V_{BE} de condución de Q2, ni que esta resistencia absorba una porción apreciable de la corriente de base de Q2. Los transistores Darlington pueden venir también integrados en una misma cápsula, como los transistores comunes. Dos ejemplos representativos son el **2N6286**, un Darlington NPN de potencia con un β típico de 2.400 para una I_C de 10A, y el popular **MPSA14**, un Darlington NPN de baja señal con un β de 20.000 para una I_C de 100mA.

En la **figura 8.90** se muestra en detalle la estructura de una conexión **Sziklai** o **Darlington complementaria**. Nuevamente el conjunto se comporta como un solo transistor (NPN), con una ganancia de corriente igual al producto de las ganancias individuales, una tensión base-emisor (V_{BE}) igual a una sola caída de diodo, una muy baja impedancia de salida y una muy alta impedancia de entrada. Este tipo de conexión, como se mencionó anteriormente, es muy común en el diseño de etapas de potencia *push-pull*, ya que facilita el uso de transistores de salida del mismo tipo (NPN o PNP), en lugar de transistores complementarios, los cuales son algunas veces dificiles de conseguir, especialmente para niveles elevados de potencia.

Las transistores Darlington y Sziklai no deben ser confundidos con los llamados **transistores superbeta**, unos dispositivos que poseen inherentemente una muy alta ganancia de corriente, conseguida a través de procesos de manufactura específicos y no mediante el acoplamiento de pares del mismo tipo o complementarios. Un ejemplo de transistor superbeta es el **2N5962**, el cual tiene un beta mínimo garantizado de 450 para corrientes de colector desde 10 μA hasta 10mA. También se dispone de transistores superbeta acoplados, como los de las series **LM394** y **MAT-01**, los cuales proporcio-

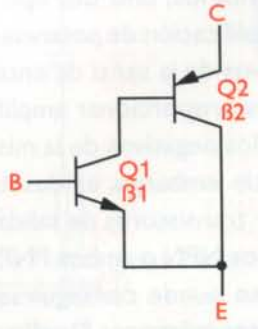


Figura 8.90. *Transistores en configuración Sziklai o Darlington complementaria*

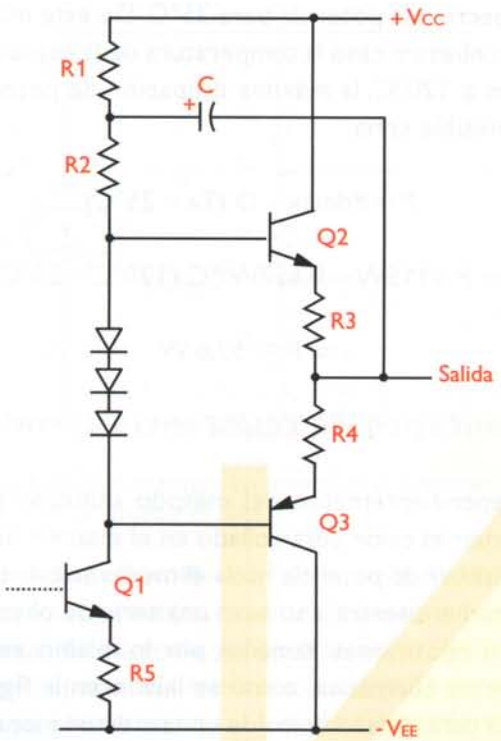


Figura 8.91. *Etapa de potencia push-pull con bootstrapping*

nan pares de transistores NPN de alta ganancia idénticos, con diferencias de apenas unas pocas décimas de milivoltio en sus voltajes V_{BE} (50µV, en el mejor de los casos) y de menos del 1% en sus ganancias de corriente.

Amplificadores de simetría complementaria con bootstrapping

La impedancia de entrada de un seguidor *push-pull* es teóricamente muy alta, pero, en la práctica, la dominan las impedancias de los diodos y las resistencias utilizadas para polarizar el circuito de base. Por esta razón la fuente de señal observa una impedancia mucho más baja de la que realmente presenta el transistor, vista desde la base. Lo ideal sería que la fuente de señal observará siempre un alta impedancia de entrada y no se sintiera afectada por el efecto de carga impuesto por el circuito de polarización. En la **figura 8.91** se muestra una foma de superar este problema. En este caso, el efecto del condensador C es aumentar efectivamente la impedancia de entrada vista por el *driver* (Q1). Esta técnica, examinada en una anterior oportunidad para seguidores con FET, pero igualmente aplicable a seguidores con transistores bipolares, se denomina ***bootstrapping***.

El valor de C debe ser seleccionado de modo que, para todas las frecuencias de la señal, ofrezca una rectancia muy baja comparada con los valores nominales de R1 y R2. Debido a que la salida del amplificador sigue la señal presente en la base de Q2, el condensador C levanta el valor de la resistencia de carga del colector de Q1, manteniendo un voltaje constante a través de la resisencia R2 a medida que esta señal cambia. Esto causa que, desde al punto de vista de la señal, R2 actúe como una fuente de corriente, aumentando la ganancia de Q1 y proporcionando una buena corriente para impulsar el transistor Q2, incluso en los picos de máxima excursión de la señal de salida. De hecho, cuando la señal de salida llega cerca de VCC, el voltaje en la unión de R1 y R2 crece realmente por encima de este valor debido a la carga almacenada en el condensador. Por ejemplo, si se escoge R1=R2 (que es una buena opción), el voltaje en la unión de R1 y R2, bajo esta condición, sube hasta 1,5xVCC.

Cálculo de disipadores de calor para amplificadores de potencia

Todos los dipositivos de potencia, incluyendo los transistores utilizados en la etapa de salida de los amplificadores *push-pull*, vienen empacados en cápsulas que permiten el contacto entre una superficie metálica y un **disipador de calor** externo. La función del disipador es mantener la temperatura del semiconductor por debajo de un valor máximo, designado en las hojas de datos como **Tj(max).** Esta última, que es típicamente del orden de 200°C para transistores de cápsula metálica y 150°C para transistores de cápsula plástica, impone un límite a la máxima disipación de potencia por parte del dispositivo. La teoría general de los disipadores de calor se estudia en la sección de **Componentes** de este curso. En esta lección nos limitaremos únicamente a los aspectos básicos de cálculo y diseño de los mismos.

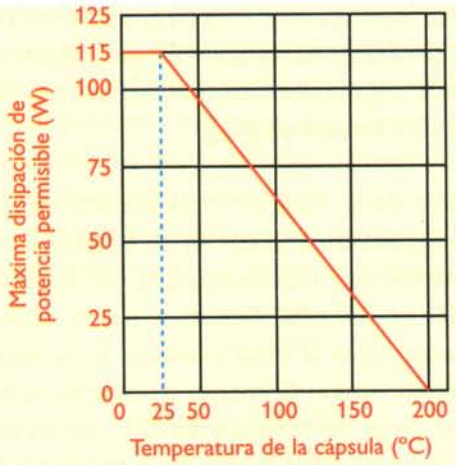


Figura 8.92. *Curva de la máxima disipación de potencia permisible para un transistor de potencia representativo*

La cantidad de potencia que un transistor puede disipar está relacionada directamente con la temperatura de su cápsula. Esta relación se representa gráficamente mediante una curva como la de la **figura 8.92**, conocida algunas veces como **característica de desvataje**, correspondiente en este caso a un transistor 2N3055 en cápsula TO-3. Observe que para temperaturas hasta de 25°C, la disipación de potencia está limitada a 115W. Sin embargo, ésta disminuye a medida que aumenta la temperatura por encima de 25°C, hasta llegar a cero, cuando se alcanza el límite térmico de 200°C. De este modo, si un diseño particular requiere que se disipen 55W en el transistor, entonces la temperatura de la cápsula no debe exceder de 115°C.

La máxima disipación de potencia permisible para una temperatura dada puede ser también evaluada mediante el conocimiento del **factor de desvataje** (**D**) del transistor, un parámetro usualmente incluido en las hojas de datos que especifica la rata de reducción de la potencia con la temperatura a partir de 25°C. Por ejemplo, el 2N3055 tiene un factor de desvataje del orden de 657mW/°C. Esto significa que deben restarse 657mW por cada grado de aumento de la temperatura con respecto a la potencia para 25°C. De este modo, si en nuestro caso la temperatura de la cápsula se eleva a 120°C, la máxima disipación de potencia permisible sería:

$$P = Pdmax - D\,(T_A - 25°C)$$

$$\Rightarrow P = 115W - 0{,}657W/°C\,(120°C - 25°C)$$

$$\Rightarrow P = 52{,}6\,W$$

Concepto de resistencia térmica

Independientemente del método utilizado para evacuar el calor desarrollado en el interior de un transistor de potencia hacia el medio ambiente, el mismo encuentra a su paso una serie de obstáculos u oposiciones llamadas, por lo mismo, **resistencias térmicas**, como se ilustra en la **figura 8.93** para el caso típico de un transistor montado en un disipador de calor. La **resistencia térmica**, que se designa como **Rth** o θ (lease "theta") y se expresa en grados centígrados por vatio (°C /W), es una medida cuantitativa del grado de dificultad que existe para eliminar el calor de un dispositivo. Este concepto es muy útil para calcular disipadores de calor, como veremos enseguida.

La cantidad de calor que puede evacuar un transistor depende básicamente de la resistencia térmica total existente entre la pastilla o unión semiconductora y el medio ambiente, así como de la diferencia de temperatura entre ellos. Para una di-

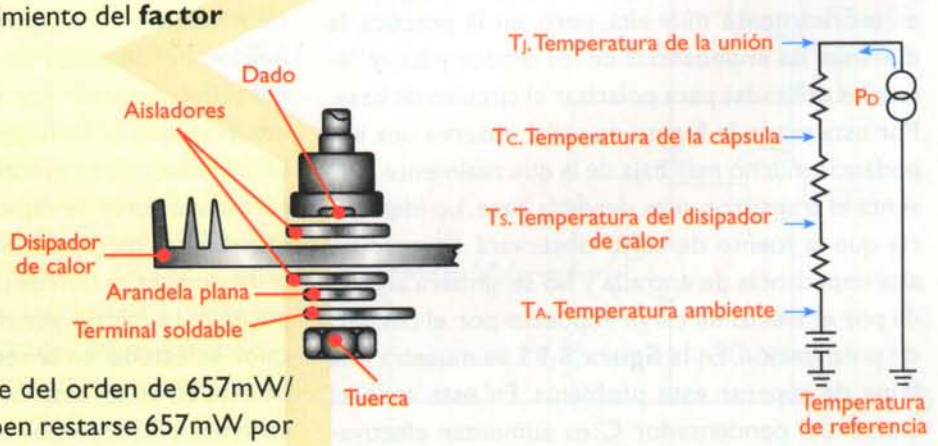


Figura 8.93. *Concepto de resistencia térmica*

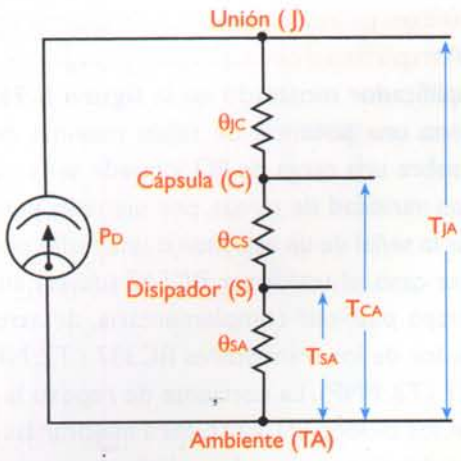


Figura 8.94. *Circuito térmico equivalente, de un transistor montado en un disipador de calor*

ferencia de temperatura ΔT dada, entre menor sea la resistencia térmica, mayor es la capacidad de disipación de potencia, y viceversa. Esta relación se puede representar mediante la siguiente fórmula, llamada con frecuencia la **Ley de Ohm térmica**:

$$\Delta T = Tj - Ta = Pd \times Rth$$
$$Rth = Rthj\text{-}c + Rthc\text{-}s + Rths\text{-}a$$

En estas expresiones, **ΔT** es la diferencia entre la máxima temperatura interna admisible para el semiconductor (Tj) y la temperatura ambiente (Ta); **Pd** es la potencia que disipa el dispositivo, y **Rth** la resistencia térmica entre el semiconductor y el medio ambiente. Esta última incluye: la resistencia térmica entre el cristal o dado y la cápsula (**Rthj-c**), la resistencia térmica entre la cápsula y el disipador (**Rthc-s**) y la resistencia térmica entre el disipador y el medio ambiente (**Rths-**a). Los valores de Tj, Rthj-c y Pd son proporcionados generalmente por los fabricantes en las hojas de datos de sus productos.La resistencia térmica Rthc-s, en particular, incluye el efecto de arandelas de mica, grasa de silicona, y demás elementos interpuestos entre la cápsula y el disipador para mejorar la transferencia de calor.

Para efecto de análisis, la resistencia térmica puede ser representada en un circuito equivalente como el de la **figura 8.94** y analizada como una resistencia convencional en un circuto eléctrico simple. Desde este punto de vista, la potencia disipada (PD) es equivalente a la corriente, la diferencia de temperaratura (Tj-Ta) es equivalente al voltaje aplicado, y las resistencias térmicas (θjc, θcs, θsa) a las cargas del circuito. Las caídas de voltaje en estas últimas son equivalentes a las temperaturas de cada elemento respecto al ambiente (Tsa, Tca, Tja). Esta correspondencia simplifica el diseño de disipadores de calor, puesto que, para unas condiciones de operación dadas (Ta, Tj, PD), esta tarea se limita a calcular la resistencia térmica total (Rthj-a); y, a partir de este resultado, la resistencia térmica del disipador (Rths-a). Con este último dato, usted busca en un catálogo especializado el disipador que mejor se adapte a sus necesidades.

Usted puede también construir sus propios disipadores de calor disponiendo de gráficas similares a la mostrada en la **figura 8.95**, la cual indica la resistencia térmica de un disipador hecho de lámina de aluminio de 1/8" de espesor. Esta resistencia se especifica asumiendo que el disipador se monta en forma vertical y sin ninguna obstrucción para el

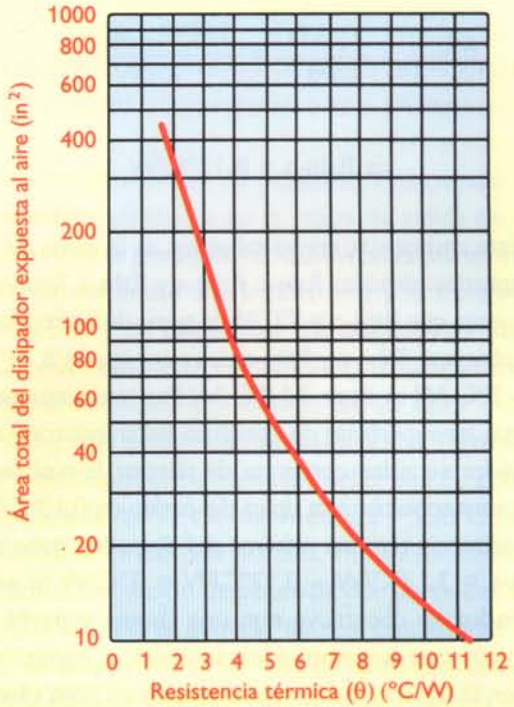


Figura 8.95. *Resistencia térmica aproximada de un disipador de lámina de aluminio brillante de 1/8"*

flujo de aire. Si el disipador se monta de otra manera, o si el flujo de aire presenta obstrucciones, la eficiencia se reduce, lo cual implica que debe utilizarse un disipador de mayor área. Como ejemplo, suponga que se desea calcular la resistencia térmica del disipador requerido para evacuar el calor de un transistor de potencia con cápsula TO-220 bajo las siguientes condiciones de trabajo:

$$Ta(max) = 60°C$$

$$Tj(max) = 125°C$$

$$P_D(max) = 8W$$

$$Rthj\text{-}c = 5°C/W$$

Típicamente, una cápsula TO-220 puede soportar por sí misma, sin sobrecalentarse, cerca de 1,8W. Por tanto, en nuestro caso, la potencia efectiva que debe evacuar el disipador es P_D = 8W – 1,8W = 6,2W. De acuerdo a la ley de Ohm térmica, la resistencia térmica total máxima requerida es:

$$Rthj\text{-}a = \frac{Tj - Ta}{Pd} = \frac{125°C - 60°C}{6,2W}$$

$$\Rightarrow Rthj\text{-}a = 8,13°C/W$$

Esta resistencia, como sabemos, es la suma de las resistencias térmicas Rthj-c, Rthc-s y Rths-a. Teniendo en cuenta que Rthj-c = 5°C/W, la suma de las resistencias térmicas Rthc-s y Rths-a debe ser igual a 8,13°C/W – 5°C /W, es decir 3,13°C /W. Por tanto, asumiendo que las superficies de contacto del transistor y del disipador se aislan con grasa de silicona, la cual tiene una resistencia térmica típica del orden de 0,13°C/W, la resistencia térmica máxima del disipador debe ser Rths-a = 3,13°C/W – 0,13°C/W = 3°C/W. Si este disipador se construye con una lámina o perfil de aluminio con las mismas características especificadas en la **figura 8.95**, se necesitaria un área efectiva de disipación del orden de 180 pulgadas cuadradas, equivalente a 1.160 cm2.

Circuitos prácticos con transistores (II). Amplificadores de potencia

El amplificador mostrado en la **figura 8.96** proporciona una potencia de salida máxima de 250 mW sobre una carga de 8Ω y puede ser utilizado en gran variedad de tareas, por ejemplo, para amplificar la señal de un *walkman* o una radio portátil. En este caso, el transistor BC547 (*driver*) impulsa una etapa *push-pull* complementaria, desarrollada alrededor de los transistores BC337 (T2, NPN) y BC327 (T3, PNP). La corriente de reposo la establecen los diodos D1 y D2. Para mejorar las estabilidad del circuito, pueden adicionarse un par de resistencias de 0,47Ω en los circuitos de emisor de los transistores de salida. Con los valores de componentes indicados, la ganancia de voltaje es del orden de 23,5 dB (15 veces). Esta última puede ser modificada cambiando el valor de R1. El consumo de corriente es del orden de 180 mA.

El circuito mostrado en la **figura 8.97** opera verdaderamente en clase B, no consume corriente en condiciones de reposo y es capaz de proporcionar hasta 2W sobre una de carga de 4Ω utilizando una fuente de alimentación de 12V. El divisor formado por las resistencias R1-R3 fija el nivel de voltaje en la base de T1 ligeramente por

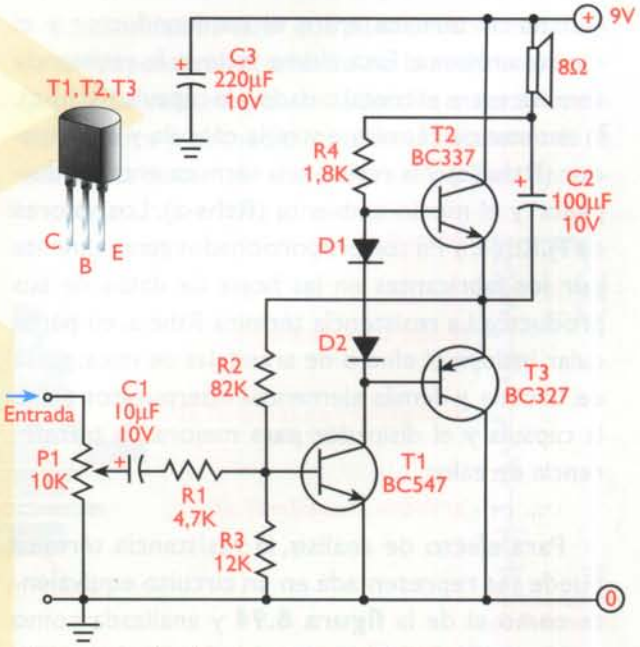


Figura 8.96. *Amplificador miniatura de 250mW*

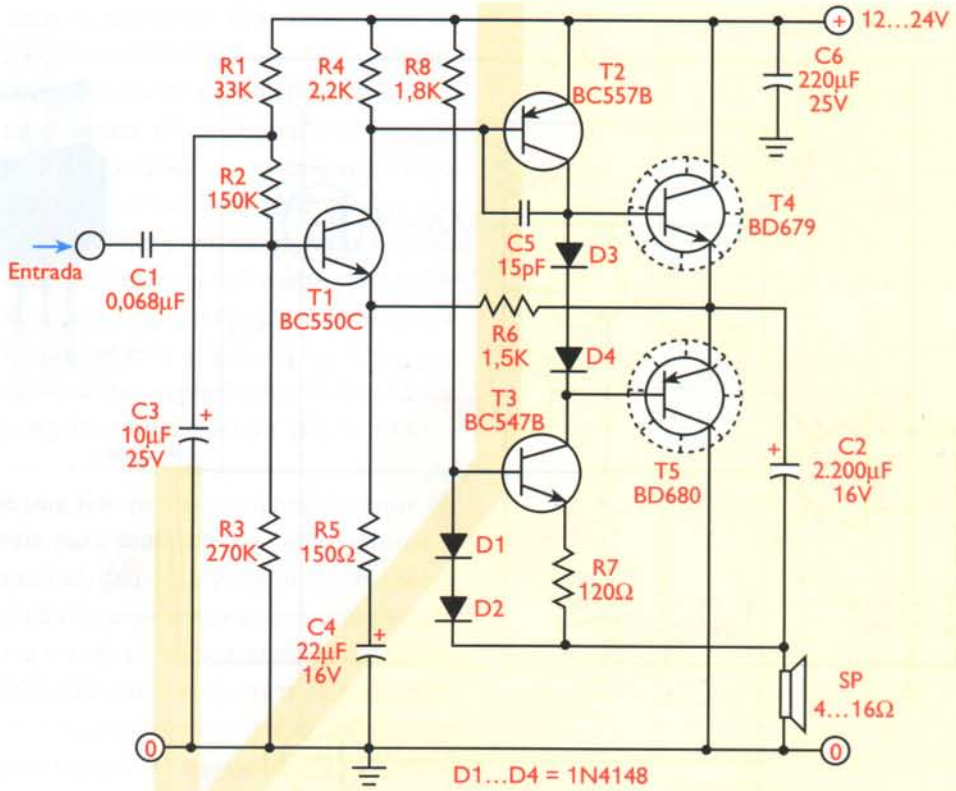


Figura 8.97. *Amplificador clase B verdadero de 2W*

encima de la mitad del voltaje de alimentación. También incluye una fuente de corriente en el colector de T2, constituida por T3, R7, D1 y D2, la cual permite que el circuito desarrolle una alta ganancia de voltaje. Note el uso de transistores Darlington en la etapa de salida para conservar baja la corriente entregada por el *driver* (T1). La ganancia de voltaje la determinan las resistencias R5 y R6, conectadas al emisor de T1.

En la **figura 8.98** se presenta una versión de amplificador de simetría complementaria de alta potencia construido con dos transistores MOSFET, uno de canal N (T3) y otro de canal P (T4). La señal de entrada la proporciona en este caso un amplificador operacional TL071 (IC1). Los transistores bipolares T1 y T2, que forman una fuente de corrriente, establecen la corriente de reposo de drenador de los MOSFET de salida, la cual es del orden de 50mA. Esta corriente se ajusta mediante P1. Por tanto, el amplificador trabaja realmente en clase AB. La salida de potencia máxima de este circuito es del orden de 20W sobre una carga de 8Ω. La teoría general de los amplificadores operacionales se examina en la próxima lección.

Para finalizar, en la **figura 8.99** se muestra un amplificador de potencia de 40W, desarrollado alrededor de un amplificador operacional de potencia **TDA2030** y una etapa de salida *push-pull*. Esta última la constituyen los transistores T1 (PNP) y T2 (NPN). El uso de circuitos integrados combinados con transistores de salida complementarios es una práctica muy común en el diseño de amplificadores de alta potencia. En este caso, la señal de audio se aplica a la entrada no inversora (+) de IC1 a través del condensador C1. Para potencias de salida por debajo de 2W no interviene el *push-pull*, sino que las mismas son suministradas completamente por IC1. Una vez se supera este umbral, comienzan a conducir gradualmente los transistores de salida, contribuyendo con la potencia excedente. Note que no se requieren diodos de polarización, ya que la compensación térmica y el control de la distorsión de cruce son proporcionados por el TDA2030.

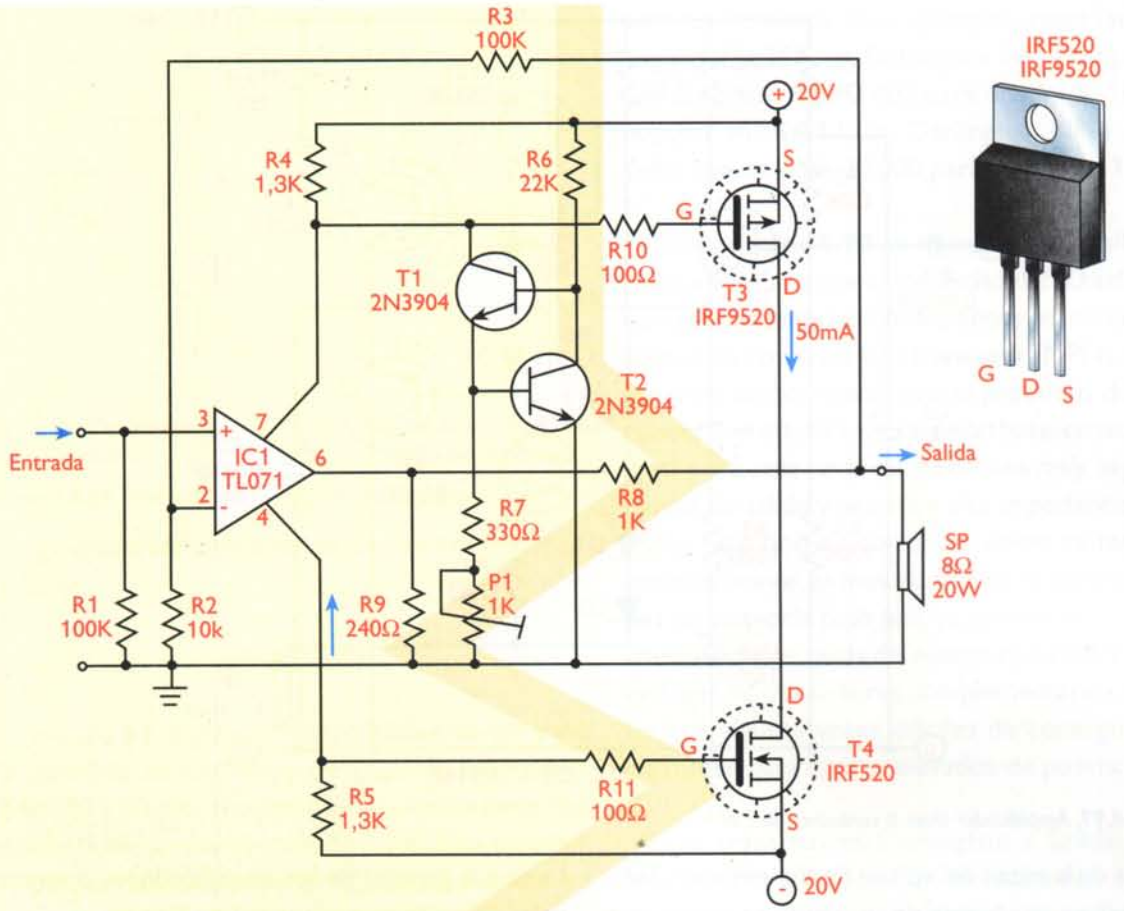


Figura 8.98. *Amplificador de 20W con MOSFET de potencia*

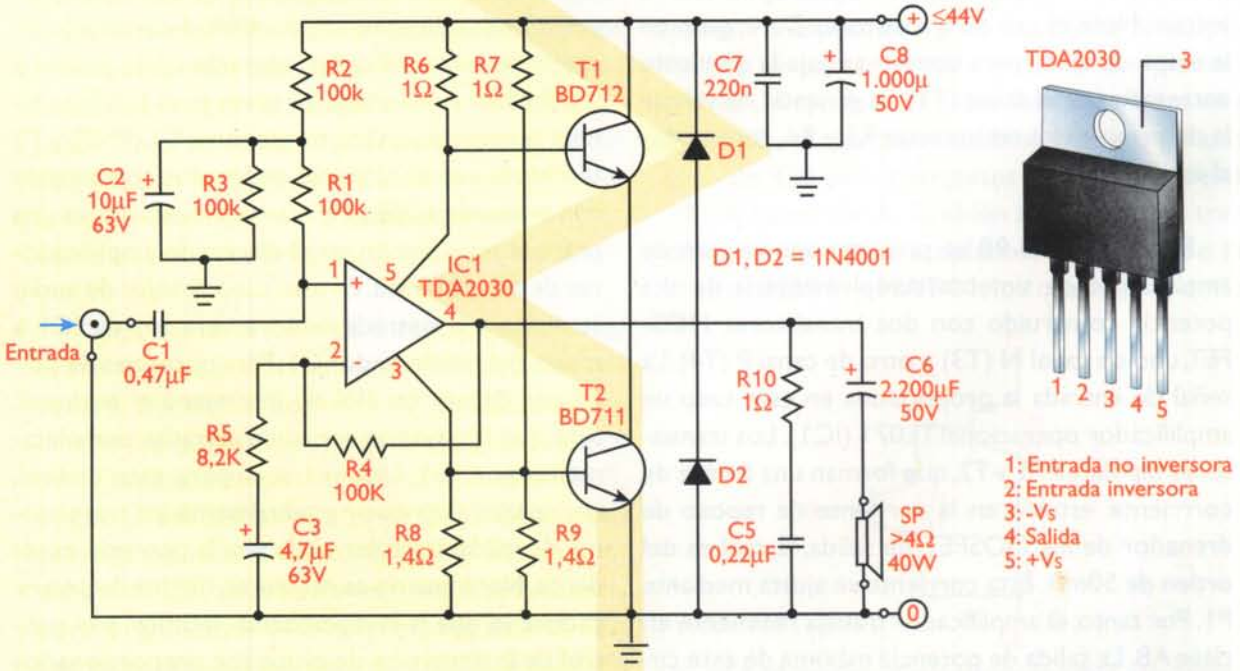
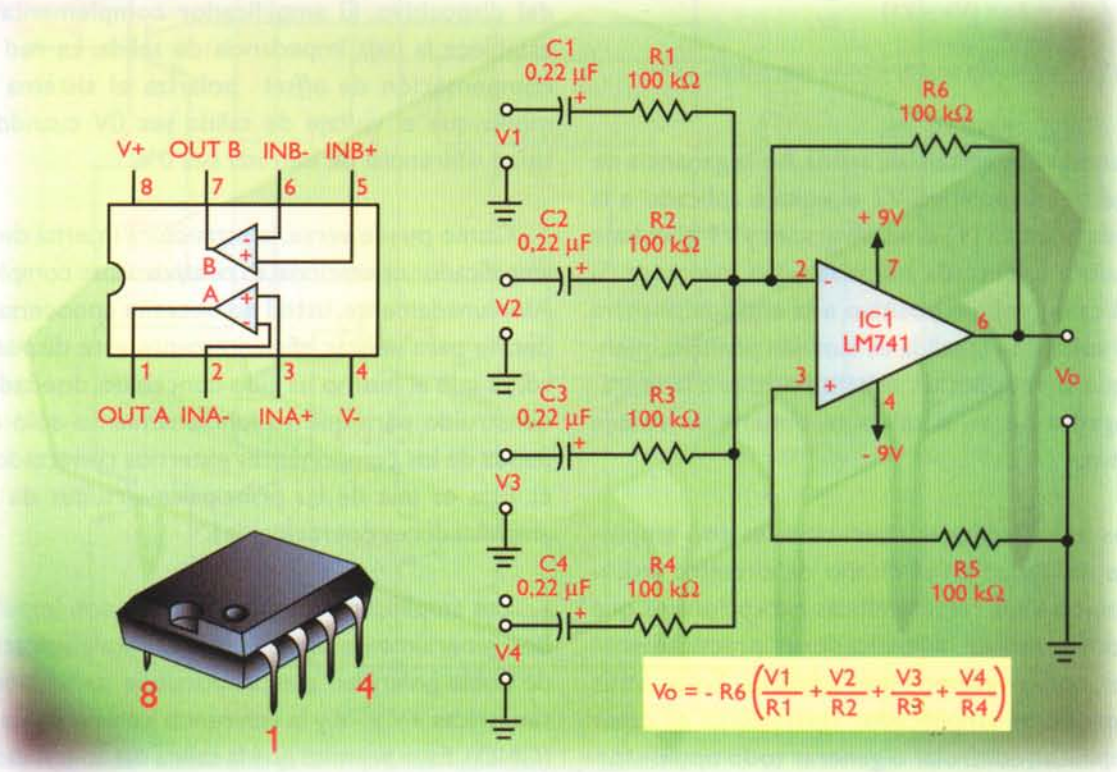


Figura 8.99. *Amplificador de 40W con circuito integrado*

Lección 9

Amplificadores operacionales

Los amplificadores operacionales, introducidos oficialmente al mercado a mediados de la década de 1960, son dispositivos de estado sólido extremadamente versátiles y fáciles de usar que se emplean como bloques constructivos básicos de en gran variedad de circuitos electrónicos, tanto análogos como digitales. En esta lección se examina la teoría general del amplificador operacional y se describen los circuitos básicos de utilización del mismo. También se explican los principales parámetros utilizados para caracterizar su funcionamiento y se presentan algunos circuitos prácticos de aplicación de los mismos.



Qué es un amplificador operacional

Un amplificador operacional (*op amp*) es, básicamente, un amplificador de voltaje de muy alta ganancia, que utiliza técnicas de realimentación para controlar sus características de desempeño (ganancia, impedancia de entrada, respuesta de frecuencia, etc.). En la **figura 9.1** se muestra el símbolo utilizado en los circuitos electrónicos para representar un amplificador operacional. El dispositivo posee dos líneas de entrada (+, -), una línea de salida, dos líneas de alimentación (+V, -V) y amplifica la *diferencia* entre los voltajes de entrada. Esto es:

$$Vo = Ao\ (V2 - V1)$$

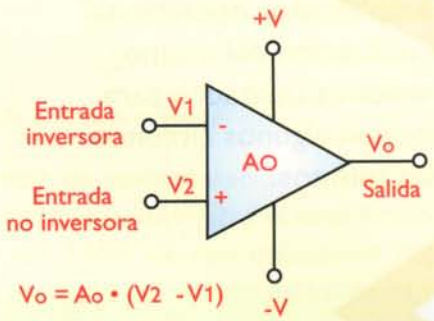


Figura 9.1. *Símbolo de un amplificador operacional.*

siendo Vo el voltaje de salida, Ao la ganancia de voltaje del dispositivo, V2 el voltaje aplicado a la entrada positiva (+) o no inversora y V1 el voltaje aplicado a la entrada negativa (-) o inversora. Si se aplica un voltaje positivo a la entrada positiva (+), el voltaje en la salida es también positivo, mientras que si se aplica un voltaje positivo a la entrada negativa (-), en la salida se obtiene un voltaje negativo.

Los amplificadores operacionales son ampliamente utilizados en el diseño de circuitos análogos debido a sus características excepcionales, que los convierten en amplificadores prácticamente ideales, como veremos más adelante. Entre otras habilidades, un amplificador operacional es capaz de amplificar, controlar o generar todo tipo de formas de onda, sinusoidales y no sinusoidales, sobre un amplio rango de frecuencias, desde 0 Hz (CC) hasta varios megahertzios. Además, pueden efectuar todo tipo de operaciones matemáticas con cantidades representadas por señales, incluyendo la suma, la resta, la multiplicación, la división, la integración y la diferenciación. Son también muy útiles en sistemas de control, sistemas de regulación, procesamiento de señales, instrumentación, computación análoga, etc.

Estructura interna

En la **figura 9.2** se muestra la estructura interna típica simplificada de un amplificador operacional. Consta básicamente de un amplificador diferencial, una etapa de compensación de *offset* y un seguidor de emisor complementario de salida. Todos estos bloques constructivos, acoplados directamente, se integran sobre una pastilla semiconductora y se albergan dentro de una cápsula DIP, o de otro tipo, para su presentación final. El amplificador diferencial, que puede estar construido con transistores bipolares o FET, determina la alta impedancia de entrada y la excelente ganancia de voltaje del dispositivo. El amplificador complementario establece la baja impedancia de salida. La red de compensación de *offset* polariza el sistema de modo que el voltaje de salida sea 0V cuando la señal diferencial de entrada sea 0 V.

Como puede verse, la estructura interna de un amplificador operacional es relativamente compleja. Afortunadamente, usted no necesita conocerla en detalle para utilizar eficientemente este dispositivo, ya que el mismo ha sido concebido, diseñado y construido para que su funcionamiento sólo dependa de los componentes externos conectados a él. Esta es una de las principales virtudes de los amplificadores operacionales.

Los amplificadores operacionales son impulsados generalmente por una fuente de alimentación de doble polaridad que proporciona las tensiones simétricas +V y -V y la referencia común de tierra (GND). Esto permite que la salida del amplificador

pueda realizar excursiones positivas y negativas con respecto a tierra y adoptar cualquier valor entre +V y -V, inclusive cero. Algunos operan con una fuente sencilla.

Circuito equivalente. Características generales

En la **figura 9.3** se muestra el circuito eléctrico equivalente de un amplificador operacional. En este modelo, **Vin** representa el voltaje diferencial (V2-V1) aplicado a las entradas, **Rin** la impedancia de entrada, **Ao** la ganancia de voltaje, **Ro** la impedancia de salida y **Vo=AoVin** el voltaje de salida resultante. Idealmente, un amplificador operacional posee las siguientes propiedades:

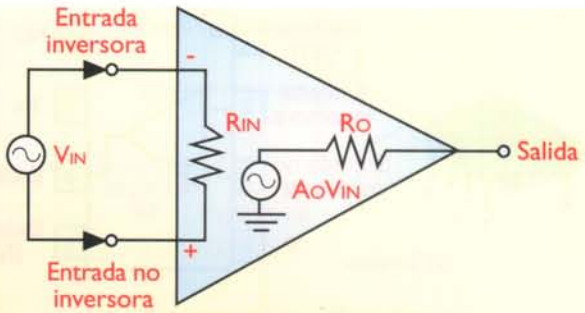


Figura 9.3. *Circuito equivalente de un amplificador operacional*

1. La ganancia de voltaje es infinita (Ao=∞).
2. La impedancia de entrada es infinita (Rin=∞).
3. La impedancia de salida es cero (Ro=0).
4. El ancho de banda es infinito (BW=∞).
5. El voltaje de salida (Vo) es cero cuando el voltaje diferencial de entrada (V2-V1) es cero.

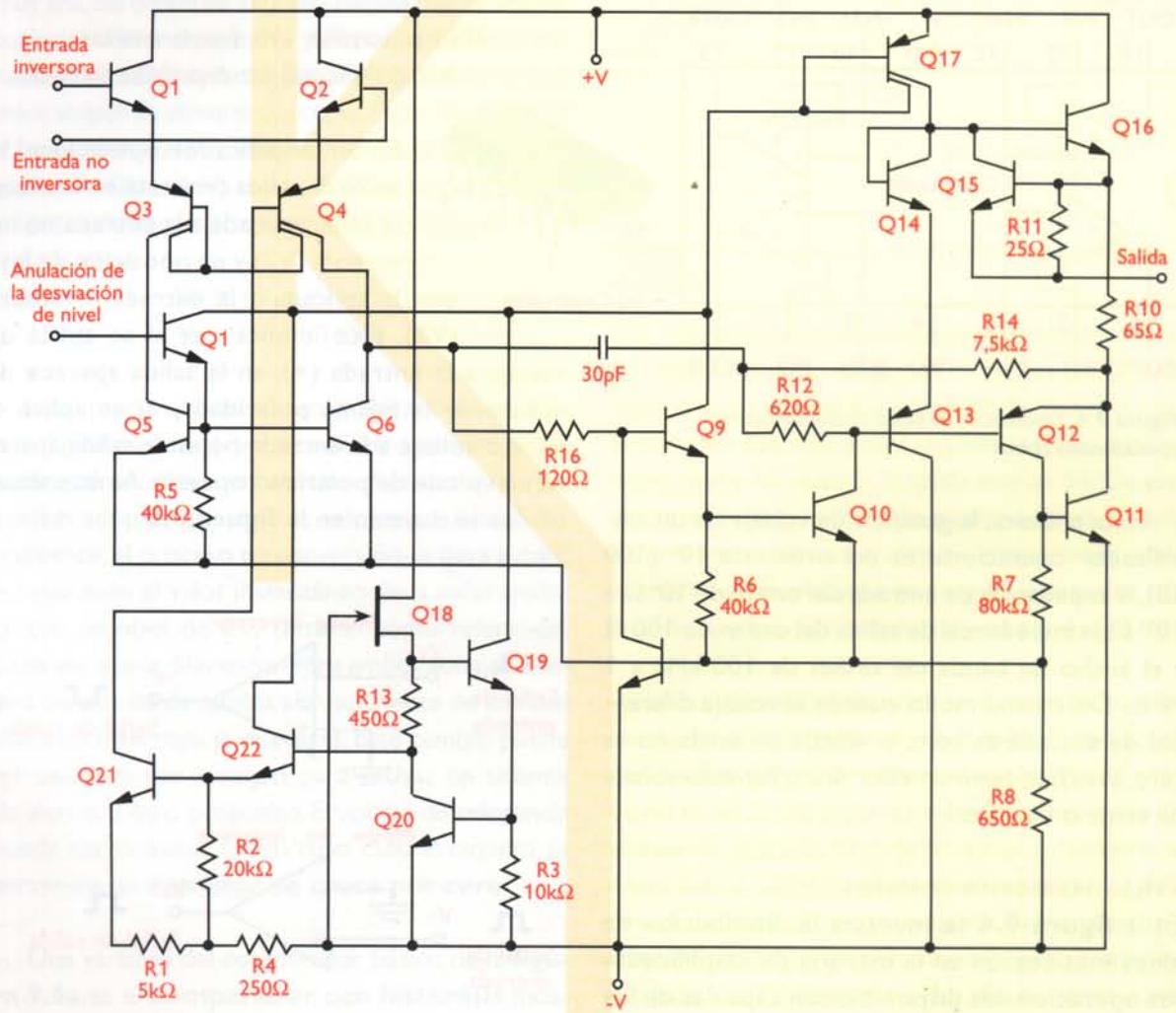


Figura 9.2. *Circuito interno típico de un amplificador operacional representativo.*

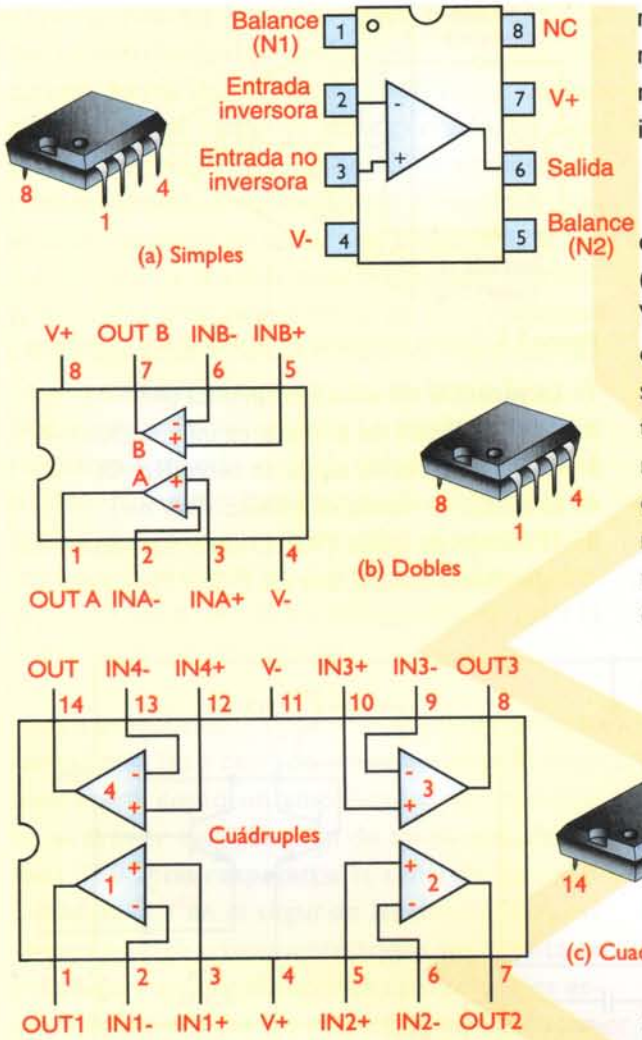


Figura 9.4. *Distribución de pines de amplificadores operacionales típicos*

En la práctica, la ganancia de voltaje de un amplificador operacional es del orden de 10^5 (100 dB), la impedancia de entrada del orden de $10^6\ \Omega$ a $10^{12}\ \Omega$, la impedancia de salida del orden de 100 Ω y el ancho de banda del orden de 100 kHz a 1 MHz. Del mismo modo, cuando el voltaje diferencial de entrada es cero, el voltaje de salida no es cero, sino que tiene un valor finito llamado voltaje de error o de *offset*.

Presentaciones usuales

En la **figura 9.4** se muestra la distribución de pines más común en la mayoría de amplificadores operacionales disponibles en cápsulas de 8 y 14 pines. Las cápsulas de 8 pines pueden contener uno o dos amplificadores operacionales, mientras que las cápsulas de 14 pines generalmente contienen cuatro unidades completamente independientes.

La mayor parte de los amplificadores operacionales simples, además de las líneas de entrada (IN-, IN+), de salida (OUT) y de alimentación (V+, V-), poseen dos terminales adicionales de anulación de *offset* (N1, N2) que permiten fijar precisamente la salida en cero cuando la señal de entrada es cero. En la mayoría de los casos esta operación se efectúa conectando un potenciómetro entre los pines 1 y 5 y enviando el cursor al terminal negativo de la fuente de alimentación, directamente o través de una resistencia, como se explica más adelante.

Relaciones de fase en un amplificador operacional

En un amplificador operacional la señal de salida (Vo) está en fase con la señal aplicada a la entrada no inversora (V2) y en oposición de fase con la aplicada a la entrada inversora (V1). Esto implica que si se aplica un voltaje a la entrada (+), en la salida aparece un voltaje de la misma polaridad y si se aplica el mismo voltaje a la entrada (-), en la salida aparece un voltaje de polaridad opuesta. Ambas situaciones se ilustran en la **figura 9.5**

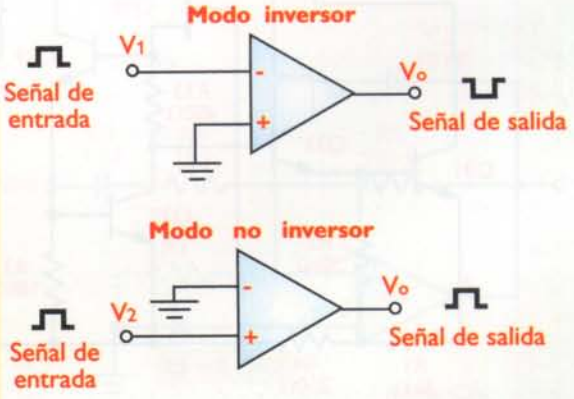


Figura 9.5. *Relaciones de fase en un amplificador operacional*

Operación en lazo abierto. Comparadores

Un amplificador operacional puede ser utilizado básicamente en dos formas: en **lazo abierto** o en **lazo cerrado**. Los circuitos de la **figura 9.5** son ejemplos de operación en lazo abierto. En estos casos no hay **realimentación** (conexión externa) entre la salida y las entradas, y el dispositivo trabaja con su máxima ganancia posible (Ao, llamada *ganancia de lazo abierto*). La operación en lazo abierto se utiliza principalmente para comparar voltajes. En la **figura 9.6a** se muestra un comparador de voltaje básico con amplificador operacional. En este circuito, un voltaje de referencia fijo (V2) se aplica a la entrada inversora (-) y un voltaje de muestra variable (V1) a la entrada no inversora (+).

Debido a que la ganancia de lazo abierto (Ao) es muy alta, del orden de 100 dB (100.000 veces) o más, cualquier diferencia entre V1 y V2, por mínima que sea, causa que la salida se sature y Vo alcance un valor próximo al voltaje de alimentación. (±V). Específicamente, si V1 es mayor que V2, entonces Vo es prácticamente igual a +V. Del mismo modo, si V1 es menor que V2, entonces Vo es prácticamente igual a -V. Esto es:

$$Vo = +V \text{ si } V1 > V2$$
$$Vo = -V \text{ si } V1 < V2$$

Los comparadores son muy utilizados en sistemas digitales para convertir señales análogas, continuamente variables, en señales digitales, que sólo pueden adoptar uno de dos valores posibles. Normalmente, el proceso de conversión se lleva a cabo comparando el valor instantáneo de la señal análoga con un nivel de CC tomado como referencia. Cada vez que la diferencia entre ambos voltajes tiende a cero, la salida cambia abruptamente de un nivel alto a un nivel bajo, o viceversa. Este cambio puede ser utilizado, por ejemplo, para activar un sistema de alarma u otro propósito. El voltaje de referencia puede ser, inclusive, 0V, en cuyo caso el circuito se denomina un **detector de cruce por cero**.

Una variante del comparador básico de la **figura 9.6a** es el **comparador con histerésis** mostrado en la **figura 9.6b**. En este caso, R3 introduce

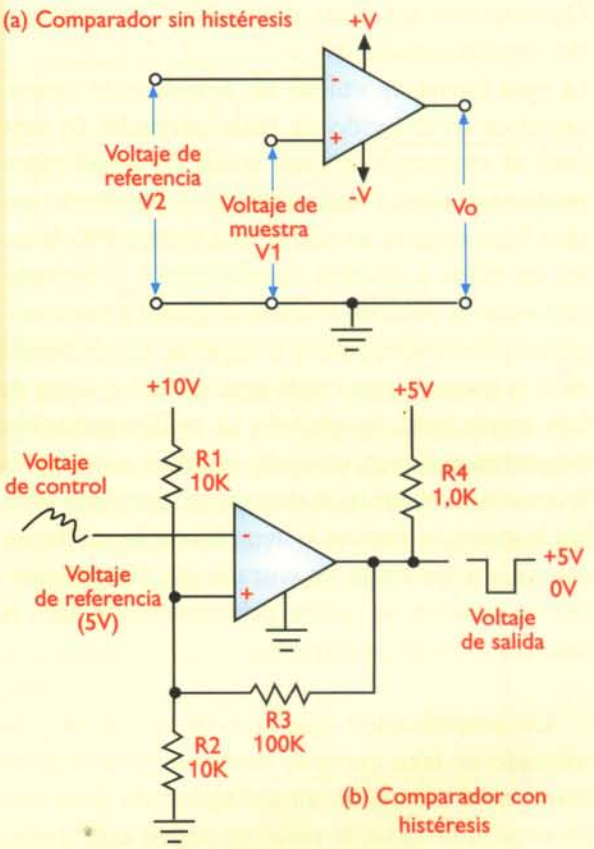


Figura 9.6. *Comparadores de voltaje básicos con amplificador operacional*

una realimentación positiva cuyo efecto es conseguir que el circuito tenga dos umbrales de disparo, dependiendo del estado de la salida. En nuestro caso, estos umbrales son 4,76V cuando la salida está en tierra (0V) y 5V cuando la salida está en 5V. De este modo se evita que el ruido superpuesto a la señal de entrada produzca múltiples transiciones en el voltaje de salida. Además, se asegura una rápida respuesta en el caso de señales de entrada muy lentas.

La configuración anterior se denomina comúnmente un **disparador de Schmitt** (*Schmitt trigger*). La **histéresis** se refiere al hecho que el estado de la salida depende no solamente del valor del voltaje de entrada, sino de su historia reciente, es decir, si está aumentando o disminuyendo. La diferencia de tensión entre los umbrales superior e inferior de disparo se denomina, precisamente, **voltaje de histéresis** (V_H). En nuestro caso, $V_H = 5{,}00V - 4{,}76V = 0{,}24V$.

Operación en lazo cerrado. Concepto de realimentación

La otra forma de utilizar un amplificador operacional es en el modo de **lazo cerrado**. En este caso, el dispositivo trabaja como un amplificador **realimentado**.La realimentación o *feeedback* consiste básicamente en tomar una muestra de la señal de salida y enviarla nuevamente a la entrada, junto con la señal de entrada original. La realimentación puede ser positiva o negativa, dependiendo de si la muestra retornada está en fase o fuera de fase con la señal de entrada. La **realimentación negativa** es la más utilizada debido a que mejora la linealidad, minimiza la distorsión, mantiene estable la ganancia, reduce la impedancia de salida, aumenta la impedancia de entrada, etc. La realimentación positiva se utiliza principalmente para la construcción de osciladores.

Un amplificador operacional puede ser conectado en lazo cerrado como un amplificador inversor o como un amplificador no inversor. En el primer caso, la señal de salida está desfasada 180° con respecto a la señal de entrada, mientras que en el segundo las dos señales están en fase. Prácticamente todos los montajes prácticos con amplificadores operacionales están fundamentados en estas dos configuraciones. A continuación examinaremos los siguientes circuitos básicos:

- Amplificadores inversores
- Amplificadores no inversores
- Seguidores de voltaje
- Sumadores o mezcladores
- Restadores o amplificadores diferenciales
- Integradores
- Diferenciadores

Por comodidad, la mayoría de los circuitos prácticos mostrados están desarrollados alrededor de un circuito integrado **LM741**, que es un amplificador operacional representativo y de fácil consecución. Sin embargo, todos ellos pueden ser construidos con cualquier otro amplificador operacional de propósito general.

Amplificadores inversores. Concepto de tierra virtual

En la **figura 9.7a** se muestra la estructura básica de un amplificador inversor destinado a la amplificación de señales de voltaje de CC. La ganancia de voltaje del circuito la determinan R1 y R2, y se evalúa mediante la siguiente expresión:

$$Av = \frac{Vo}{Vin} = \frac{R2}{R1}$$

El signo menos ("-") simplemente indica que se produce inversión de fase, es decir, la señal de salida siempre está desafasada 180° con respecto a la señal de entrada. Por ejemplo, si R2=100kΩ y R1=10kΩ, entonces la ganancia de voltaje es de 10 (=100kΩ/10kΩ). Sustituyendo R2 por un potenciómetro de 100 kΩ, esta ganancia sería continuamente variable entre 0 y 10. De todas formas, es importante tener en cuenta que, aunque R1 y R2 controlan la ganancia total del circuito, no tienen efecto alguno en las características intrínsecas del amplificador operacional.

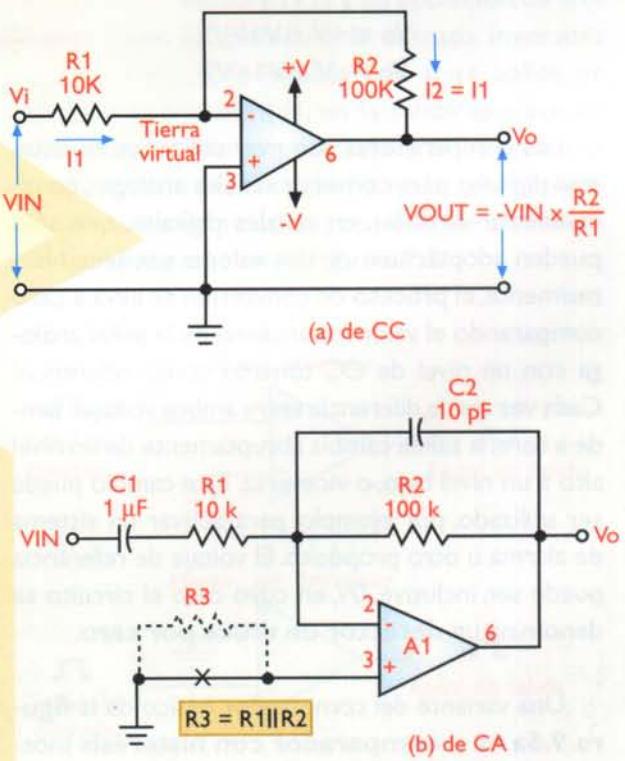


Figura 9.7. *Amplificadores inversores*

Lo anterior implica que el terminal inversor sigue teniendo una muy alta impedancia de entrada y por tanto no absorbe corriente. Como resultado, toda la corriente que fluye a través de R1 también lo hace a través de R2. La impedancia de entrada del circuito es prácticamente igual al valor de R1. Por tanto, la ganancia y la impedancia de entrada son fácilmente controlables desde el exterior. La impedancia de salida es muy baja.

El punto común de unión de R1 y R2 se denomina ***tierra virtual,*** debido a que tiene siempre el mismo potencial de la entrada no inversora, sin estar físicamente conectado a esta última. En otras palabras, las entradas "+" y "-"de un amplificador operacional se comportan como un **circuito abierto** porque no absorben corriente, pero también como un **corto-circuito** porque el voltaje o diferencia de potencial entre ellas es cero. El concepto de tierra virtual es básico para analizar y diseñar circuitos con amplificadores operacionales.

En la **figura 9.7b** se muestra la estructura básica de un amplificador inversor destinado a la amplificación de señales de CA de baja frecuencia. La señal que se va a amplificar se aplica a la entrada inversora a través de la red R1C1. La realimentación negativa la proporciona la red R2C2. En este caso, debido a la adición de C1 y C2, la ganancia de voltaje depende de la frecuencia. El ancho de banda (BW) es igual a la frecuencia de corte de lazo abierto (FT) dividida por la ganancia de voltaje (Av). Por ejemplo, si FT=1 MHz y Av=10, entonces BW=100 kHz. R3 se utiliza para conseguir que Vo sea 0 cuando Vi es 0.

Amplificadores no inversores

En la **figura 9.8a** se muestra la estructura de un circuito no inversor básico de CC. En esta configuración, la señal de entrada se aplica directamente a la entrada no inversora (+), mientras que una fracción de la señal de salida se realimenta a la entrada inversora (-). La realimentación negativa la

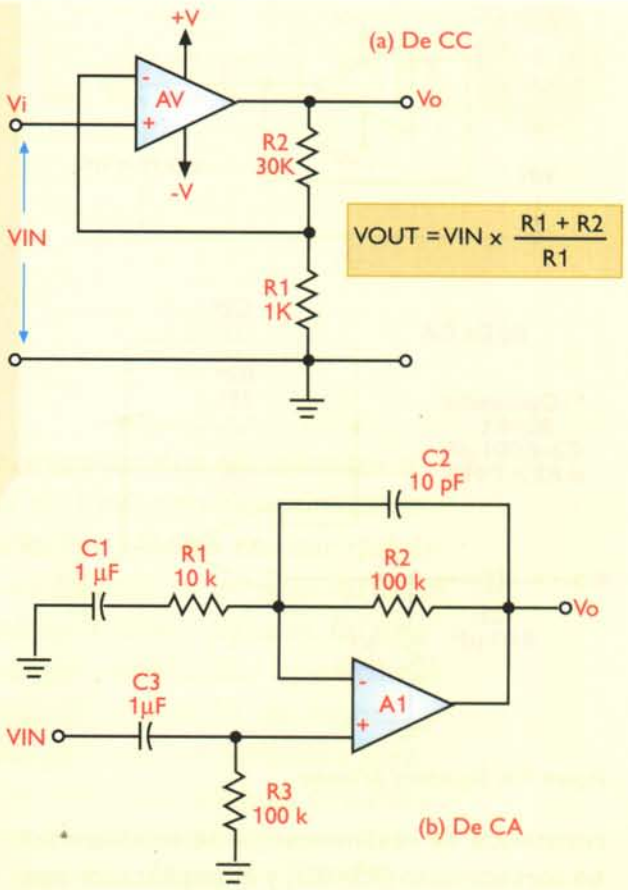


Figura 9.8. *Amplificadores no inversores*

proveen R1 y R2. La ganancia de voltaje (Av) siempre es mayor de 1 y está dada por la siguiente expresión:

$$Av = 1 + \frac{R2}{R1}$$

Por ejemplo, si R2=30K y R1=1K, entonces la ganancia de voltaje es de 31 (1+30). Esta configuración no produce inversión de fase, lo cual implica que la señal de salida está en fase con la señal de entrada. El circuito de la **figura 9.8a** puede convertirse fácilmente en un amplificador de voltajes de CA incorporando algunos condensadores, como se indica en la **figura 9.8b**. La impedancia de entrada de este montaje es prácticamente igual al valor de R3.

Seguidores de voltaje

Una variante importante del amplificador no inversor es el *seguidor de voltaje*. En este caso, la

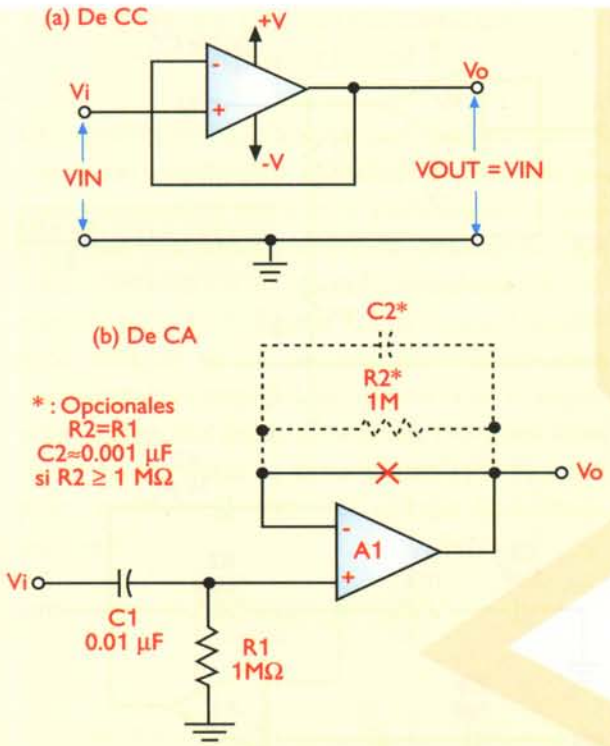


Figura 9.9. *Seguidores de voltaje*

resistencia de realimentación se sustituye por un cortocircuito (R2=0Ω) y el amplificador opera con un 100% de realimentación negativa. Como resultado, el voltaje de salida es el mismo voltaje de entrada y la ganancia de lazo cerrado es igual a 1. En las **figuras 9.9 (a) y (b)** se muestran, en su orden, los circuitos básicos de un seguidor de voltaje de CC y de un seguidor de voltaje de CA.

Los seguidores de voltaje se utilizan, básicamente, para acoplar impedancias. En el caso del seguidor de CC de la **figura 9.9a**, la impedancia de entrada es muy alta y aproximadamente igual a AoZin, siendo Ao la ganancia de lazo abierto y Zin la impedancia de entrada del amplificador operacional.

En contraste, la impedancia de salida es muy baja, dependiendo del amplificador operacional utilizado. Para el seguidor de CA de la **figura 9.9(b)**, la impedancia de entrada depende de la frecuencia, siendo alta en bajas frecuencias y baja en altas frecuencias.

Técnicas de anulación de offset

Como se mencionó anteriormente, un amplificador operacional debería entregar un voltaje de salida de 0V para un voltaje diferencial de entrada de 0V. En la práctica, esto no siempre sucede. Como resultado, sin señal de entrada aplicada, el voltaje de salida tiene un valor distinto de cero. Este último es causado por la existencia de un voltaje de error (*offset*) en la entrada, propio del amplificador operacional, el cual debe ser anulado en la mayoría de los casos para conseguir un funcionamiento satisfactorio.

Algunos amplificadores operacionales, especialmente los destinados para tareas de precisión, poseen entradas de control especiales que permiten anular externamente los efectos de este voltaje de *offset*. En la **figura 9.10a** se muestra un ejemplo, aplicado a un amplificador CC inversor con una ganancia de voltaje de 10.

En este caso, la anulación del *offset* se consigue ajustando R4 hasta que el voltaje de salida sea cero cuando el voltaje de entrada sea cero. Si se retira la red anuladora de *offset*, el voltaje de salida estará desbalanceado en una cantidad igual al producto del voltaje *offset* de entrada (típicamente ±1 mV) por la ganancia de lazo cerrado (Av). Por ejemplo, si Av=100, la salida sería de ±100 mV con las dos entradas puestas a tierra.

Cuando no se dispone de entradas de anulación de *offset* dedicadas, debe recurrirse a estrategias externas para su eliminación, como se ilustra en la **figura 9.10b** y **9.10c**. En el primer caso, la idea es generar un voltaje variable de compensación en la entrada inversora del amplificador. El valor máximo de este voltaje, que se obtiene de la fuente de polarización (±Vcc) mediante el potenciómetro R4 y el divisor formado por R3 y la resistencia equivalente en paralelo de R2 y R1, está dado por:

$$Vio = \frac{\pm Vcc\ (R1||R2)}{R3}$$

Con los valores de componentes indicados en la figura, este voltaje sería variable entre +15mV y -15mV, aproximadamente. Para el circuito de la **figura 9.10b** se aplica una idea similar, excepto que se trata de un amplificador no inversor. En este caso, el rango de ajuste del voltaje de compensación viene dado por:

$$Vios = \frac{\pm Vcc\ (R1||R2)}{(R3+(R1||R2))}$$

Con los valores de componentes indicados en la figura, este rango de ajuste sería de ±18mV.

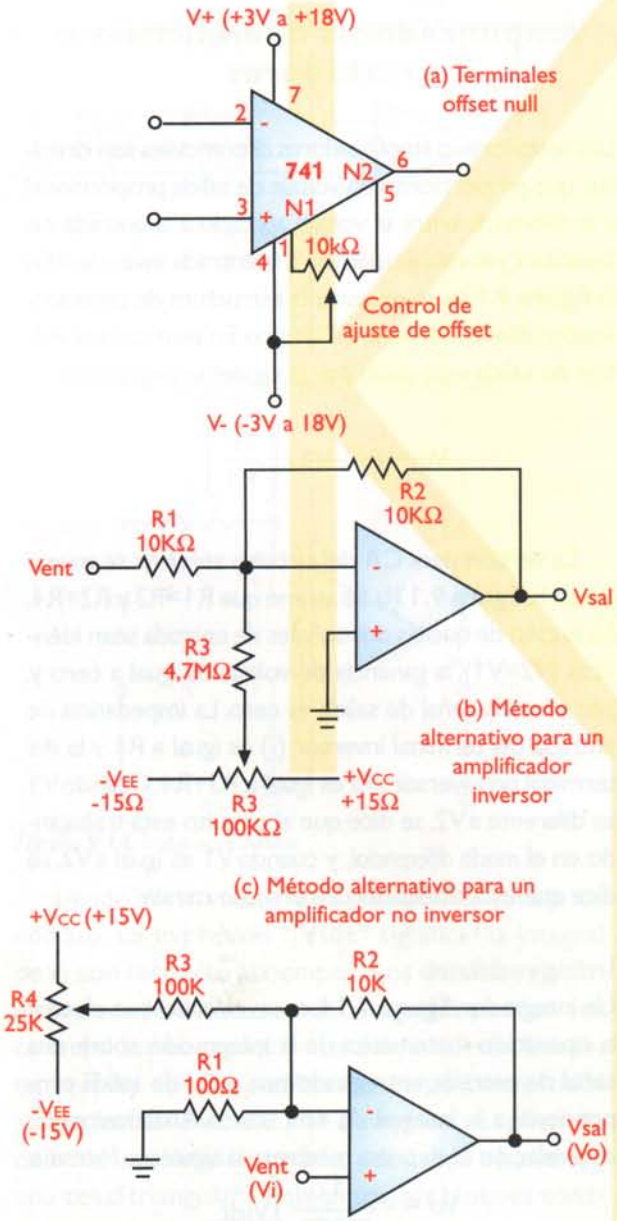


***Figura 9.10** .Técnicas de anulación de offset*

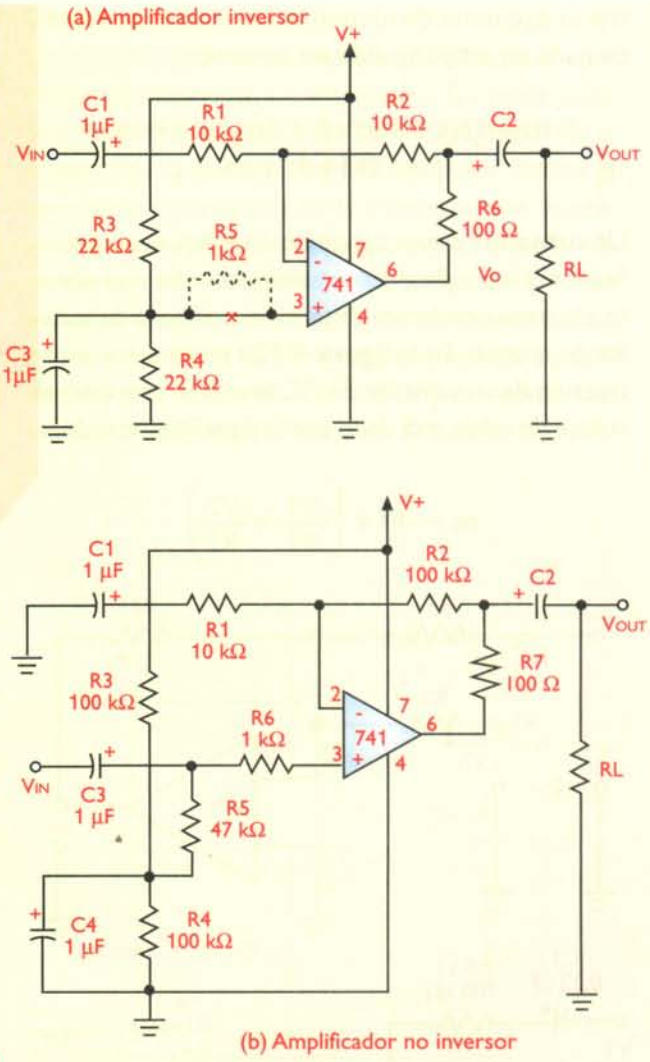


***Figura 9.11.** Amplificadores de CA con fuente sencilla*

Alimentación mediante fuente sencilla

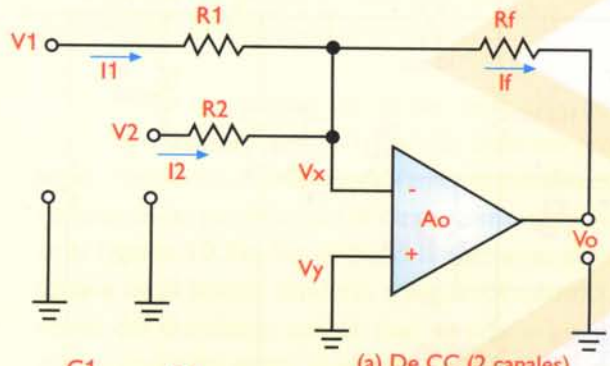
En la **figura 9.11a** se indica la forma de alimentar un amplificador inversor mediante una fuente de alimentación sencilla. El divisor formado por R3 y R4 polariza la entrada no inversora del amplificador operacional a la mitad del voltaje de alimentación. Debido a la presencia de C1, la ganancia de voltaje en CC del circuito es igual a 1. Esto garantiza que la salida quede automáticamente polarizada a la mitad del voltaje de alimentación. Los demás componentes cumplen funciones auxiliares. En particular, C3 actúa como eliminador de ruido y C2 como condensador de paso de señal hacia la resistencia de carga (RL) o la etapa siguiente. En la **figura 9.11b** se mues-

tra el esquema de alimentación correspondiente para un amplificador no inversor.

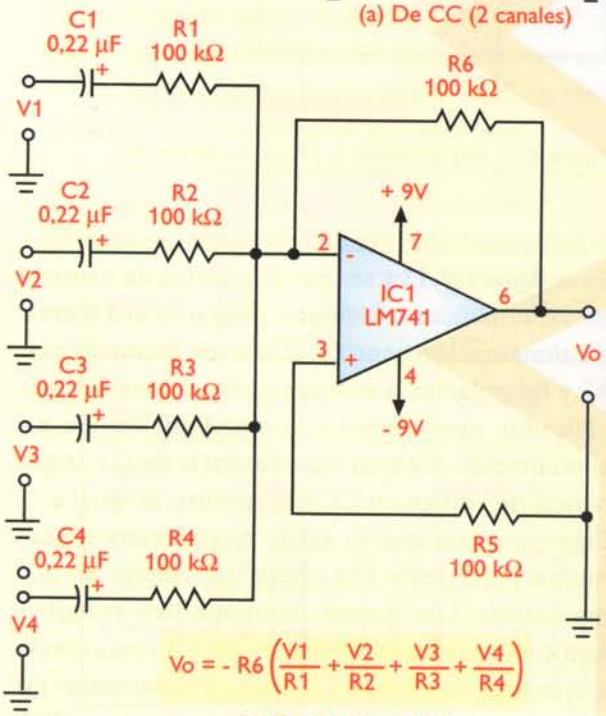
Amplificadores sumadores o mezcladores

Un **sumador**, como su nombre lo indica, es un amplificador que produce como salida una señal equivalente a la suma ponderada de un cierto número de señales de entrada. En la **figura 9.12a** se muestra la estructura de un sumador de CC básico. En este caso, el voltaje de salida está dado por la siguiente expresión:

$$Vo = -Rf \times \left(\frac{V1}{R1} + \frac{V2}{R2} \right)$$



(a) De CC (2 canales)



$$Vo = -R6 \left(\frac{V1}{R1} + \frac{V2}{R2} + \frac{V3}{R3} + \frac{V4}{R4} \right)$$

(b) De CA (4 canales)

Figura 9.12. *Amplificadores sumadores (mezcladores)*

Por tanto, la ganancia total de voltaje de un amplificador sumador depende del valor de la resistencia de realimentación, mientras que la ganancia de cada señal es autónoma y depende de los valores de la resistencia de entrada correspondiente. El circuito se puede expandir fácilmente para aceptar más de dos señales de entrada conectando estas últimas al punto de suma a través de resistencias adicionales. Si se hace R1=R2=Rf, el circuito se convierte en un sumador de ganancia unitaria. El montaje práctico de un amplificador sumador para CA de cuatro canales se muestra en la **figura 9.12b.**

Amplificadores diferenciales o restadores

Los restadores o amplificadores diferenciales son circuitos que proporcionan un voltaje de salida proporcional a la diferencia entre el voltaje aplicado a la entrada no inversora y el voltaje aplicado a la entrada inversora. En la **figura 9.13a** se muestra la estructura de un amplificador diferencial para CC básico. En este caso, el voltaje de salida está dado por la siguiente expresión:

$$Vo = (V2-V1) \left(\frac{Rf}{R1} \right)$$

La versión para CA del circuito anterior se muestra en la **figura 9.13b**. Se asume que R1=R3 y R2=R4. En el caso de que las dos señales de entrada sean idénticas (V2=V1), la ganancia de voltaje es igual a cero y, por tanto, la señal de salida es cero. La impedancia de entrada del terminal inversor (-) es igual a R1 y la del terminal no inversor (+) es igual a R3+R4. Cuando V1 es diferente a V2, se dice que el circuito está trabajando en el *modo diferencial*, y cuando V1 es igual a V2, se dice que está trabajando en el *modo común*.

Integradores

Un integrador, **figura 9.14**, es un circuito que efectúa la operación matemática de la integración sobre una señal de entrada, entregando una señal de salida proporcional a la integral de esta última. Analíticamente, esta relación se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$Vo = -\frac{1}{(R1C)} \int Vidt$$

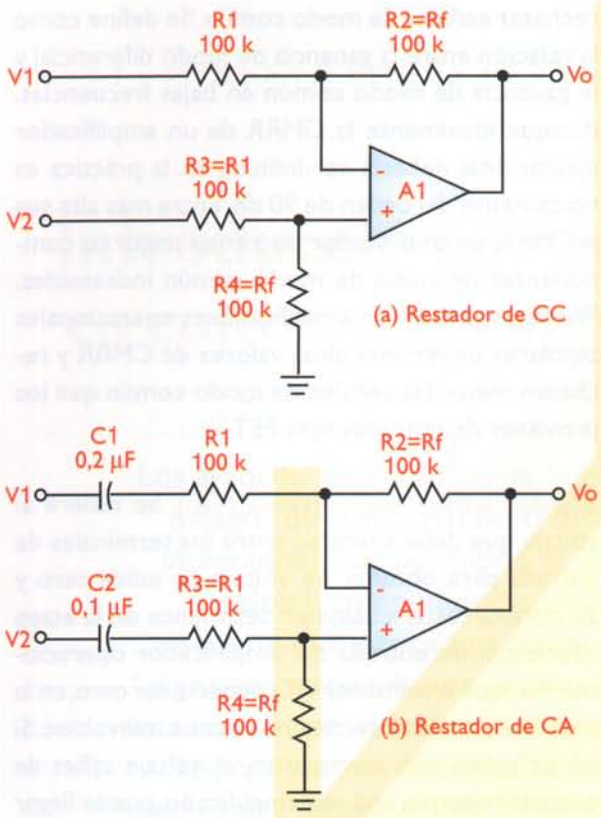


Figura 9.13. *Amplificadores restadores (diferenciales)*

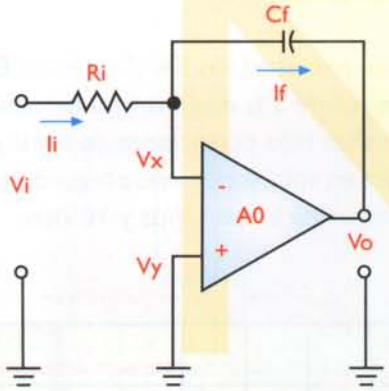


Figura 9.14. *Integrador básico*

siendo Vo el voltaje de salida y Vi el voltaje de entrada. La expresión "$\int$**Vidt**" significa "la integral de Vi con respecto al tiempo". Los detalles relacionados con la evaluación de integrales pueden ser consultados en cualquier texto de cálculo. Los integradores son muy utilizados como convertidores de formas de onda. Por ejemplo, si se aplica a la entrada una señal cuadrada, a la salida se obtiene una señal triangular. También son los bloques constructivos básicos de los filtros pasabajos.

Diferenciadores

Un diferenciador es un circuito que efectúa la operación contraria de un integrador. En otras palabras, mientras que la salida de un integrador es la integral de la entrada, un diferenciador realiza la operación matemática de la diferenciación, entregando una señal de salida proporcional a la derivada de la señal de entrada. En la **figura 9.15** se muestra la estructura básica de un diferenciador. Analíticamente, la relación entre el voltaje de salida (Vo) y el voltaje de entrada (Vi), se representa mediante la siguiente fórmula:

$$Vo = - RfCi \frac{dVi}{dt}$$

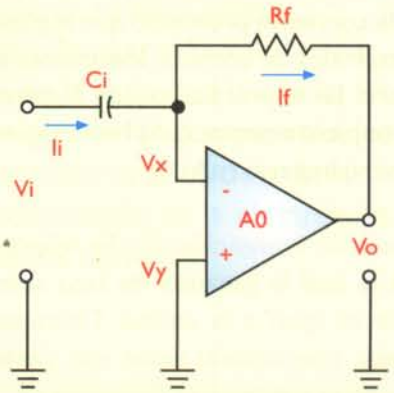


Figura 9.15. *Diferenciador básico*

siendo Vo el voltaje de salida y Vi el voltaje de entrada. La expresión «**dVi/dt**» significa «la derivada de Vi con respecto al tiempo». Los detalles relacionados con la evaluación de derivadas pueden ser consultados en cualquier texto de cálculo. Los diferenciadores son también muy utilizados como convertidores de formas de onda. Por ejemplo, si se aplica a la entrada una señal triangular, a la salida se obtiene una onda cuadrada. También son los bloques constructivos básicos de los filtros pasaaltos.

Parámetros de los amplificadores operacionales reales

Idealmente, un amplificador operacional debería tener una ganancia de lazo abierto (Ao) infinita, una impedancia de entrada (Zi) también infinita y

una impedancia de salida (Zo) cero. Sin embargo, los amplificadores operacionales reales no se ciñen estrictamente a estas características. En la práctica: Ao es del orden de 100 dB, Zi es del orden de 1 MΩ a 10^6 MΩ y Zo es del orden de varios cientos de ohmios.

Además de los valores reales de Ao, Zi y Zo, los fabricantes de amplificadores operacionales incluyen en las hojas de datos de sus productos otros parámetros y figuras de mérito que permiten evaluar el comportamiento de tales dispositivos en la práctica y compararlo con el comportamiento ideal esperado. Los siguientes son algunos ejemplos.

Corriente de polarización de entrada (I_B). Se refiere a la corriente promedio que ingresa o sale de los terminales de entrada. Idealmente I_B debería ser cero. En la práctica, puede fluctuar desde unos pocos picoamperios (pA) hasta algunas décimas de microamperio (μA).

Frecuencia de transición (f_T). Se refiere a la frecuencia a la cual la ganancia de lazo abierto del dispositivo es igual a la unidad. Típicamente, un amplificador operacional tiene una ganancia de voltaje en bajas frecuencias del orden de 100 dB. Con el fin de evitar que oscile, su respuesta de frecuencia se compensa internamente de modo que la ganancia disminuya a medida que aumenta la frecuencia y sea 0 dB a la frecuencia f_T.

Típicamente, f_T es del orden de 1 MHz en amplificadores operacionales de propósito general, pero puede llegar a ser del orden de 10 MHz a 15 MHz o más en dispositivos de alta velocidad. Conociendo el valor de f_T es muy sencillo determinar la curva de respuesta de frecuencia, **figura 9.16**. En nuestro caso, por ejemplo, la ganancia de lazo abierto para 100Hz es de 80dB y para 1000 Hz es de 60dB. Se dice, entonces, que la ganancia disminuye a una rata de 20dB por década.

Relación de rechazo de modo común (CMRR: *Common-Mode Rejection Ratio*). Este parámetro mide la habilidad de un amplificador operacional para rechazar señales de modo común. Se define como la relación entre la ganancia de modo diferencial y la ganancia de modo común en bajas frecuencias. Aunque idealmente la CMRR de un amplificador operacional debería ser infinita, en la práctica es típicamente del orden de 90 dB. Entre más alta sea la CMRR, un amplificador discrimina mejor las componentes de ruido de modo común indeseables. Por regla general, los amplificadores operacionales bipolares tienen más altos valores de CMRR y rechazan mejor las señales de modo común que los provistos de entradas tipo FET.

Voltaje offset de entrada (V_{IO}). Se refiere al voltaje que debe aplicarse entre los terminales de entrada para obtener un voltaje de salida cero y así contrarrestar cualquier desbalance en la etapa diferencial de entrada del amplificador operacional. Aunque idealmente VIO debería ser cero, en la práctica es del orden de unos pocos milivoltios. Si no se aplica esta corrección, el voltaje *offset* de entrada interno, una vez amplificado, puede llegar a ser suficiente para saturar la salida e impedir la amplificación eficaz.

Rapidez de respuesta o SR (*Slew Rate*). Este parámetro se refiere a la máxima rata de cambio del voltaje de salida bajo condiciones de señal grande. Se especifica en voltios por microsegundo (V/μs) y fluctúa típicamente entre 1 V/μs y 10 V/μs.

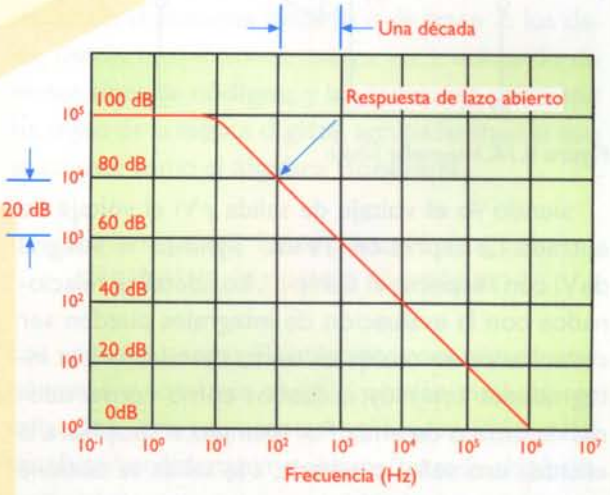
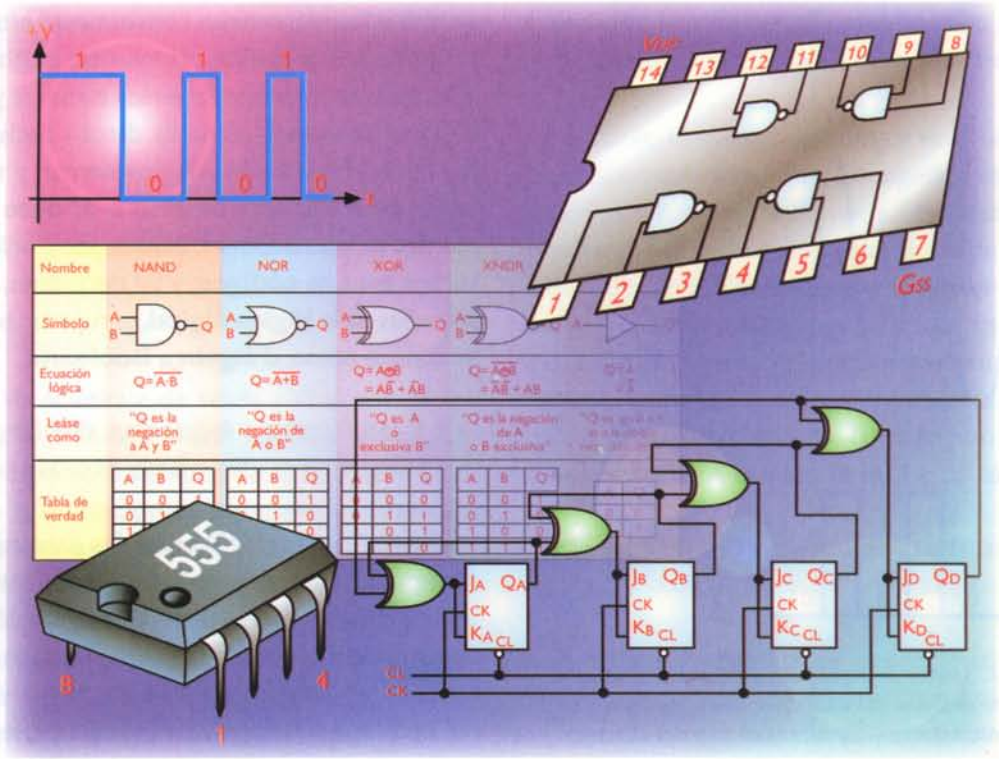


Figura 9.16. *Curva de respuesta de frecuencia típica de un amplificador operacional*

Lección 10

Introducción a los circuitos digitales

Los avances en el campo de la **electrónica digital**, apoyados por el milagro de la **microelectrónica** (la ciencia de fabricar circuitos integrados), han permitido el desarrollo y la fabricación masiva de relojes, computadoras, teléfonos celulares, robots, juegos, instrumentos y toda una nueva generación de aparatos y sistemas "digitales" empleados en todos los campos de la actividad humana. En esta lección estudiaremos los principios básicos de las compuertas, los *flip-flops* y otros circuitos básicos que constituyen el núcleo de la electrónica digital, una de las áreas de especialización de la electrónica de mayor progreso en los últimos tiempos.



¿Qué son los circuitos digitales?

Prácticamente todos los circuitos examinados hasta el momento son **análogos**, lo cual implica que trabajan con señales que varían en forma gradual o continua sobre un amplio rango de valores de voltaje y/o corriente, **figura 10.1a**. También existen situaciones en las cuales es necesario operar con señales de voltaje o de corriente que sólo adoptan un número **discreto** o finito de valores, **figura 10.1b**. Este tipo de señales se denominan **señales digitales** o **lógicas** y los circuitos que trabajan las mismas, **circuitos digitales** o **lógicos**. El estudio de los circuitos digitales es el marco de acción de la **electrónica digital**.

La electrónica digital es conceptualmente más sencilla que la electrónica análoga porque trabaja con componentes y señales de naturaleza **binaria**, es decir, que sólo pueden adoptar uno de dos valores, niveles o estados posibles. En la electrónica digital, estos parámetros se designan, respectivamente, como **1** (uno) o **alto** y **0** (cero) o **bajo**. En la **figura 10.2** se comparan estos conceptos. En la **figura 10.2a** se muestra un ejemplo sencillo de circuito eléctrico de naturaleza digital. En este caso, el interruptor S1 actúa como un componente **digital** porque sólo puede estar abierto (**0**) o cerrado (**1**). Asimismo, el voltaje

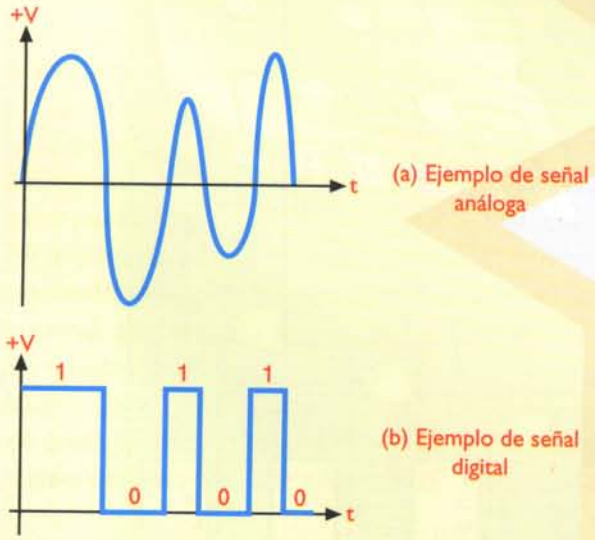


Figura 10.1. *Señales análogas y señales digitales. Una señal análoga varía en forma continua sobre una gama infinita de valores, mientras que una digital lo hace en pasos discretos*

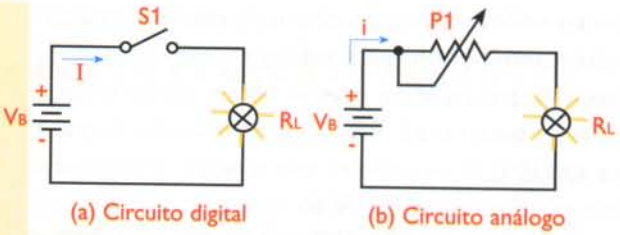


Figura 10.2. *Comparación entre un circuito análogo y un circuito digital*

aplicado a la lámpara (RL) es una señal digital porque sólo puede ser 0V (**0**) cuando S1 está abierto, ó +9V (**1**) cuando S1 está cerrado. Una asignación similar de valores lógicos puede ser hecha a la corriente I a través del circuito (presente, ausente) o al estado de la lámpara (encendida o apagada).

En la **figura 10.2b** se muestra un ejemplo sencillo de circuito análogo. En este caso, el interruptor ha sido sustituido por un potenciómetro (P1), el cual actúa como un componente **análogo** cuya resistencia puede adoptar un número infinito de valores entre un mínimo y un máximo. Del mismo modo, el voltaje, la corriente y el nivel de brillo de la lámpara son cantidades análogas.

En la terminología digital, los niveles o estados lógicos **0** y **1** se denominan comúnmente ***bits***. Un *bit* o un grupo de *bits* pueden representar muchos niveles diferentes de información en los circuitos y sistemas digitales, incluyendo números, datos y decisiones. Los números, en particular, se representan y manipulan utilizando el **sistema binario** o de **base 2**; los datos (letras, instrucciones, música, etc.), utilizando diversos tipos de **códigos;** y las decisiones, utilizando las reglas de la **lógica digital,** agrupadas bajo lo que se conoce como el **álgebra Booleana**.

Conceptos básicos de lógica digital y álgebra Booleana

Los unos (1) y ceros (0) utilizados para representar números y construir códigos pueden también ser utilizados para representar conceptos lógicos del tipo falso/verdadero, si/no, abierto/cerrado, alto/bajo, arriba/abajo, etc., así como para tomar decisiones del tipo "**si, entonces**", es decir, **si** una serie de cir-

cunstancias particulares ocurre, **entonces** una acción particular resulta. En el caso del circuito de la **figura 10.2a**, por ejemplo, **si** el interruptor S1 está cerrado, **entonces** la lámpara RL ilumina. En otras palabras, si S1 es **1**, entonces RL es **1**.

El estudio de estos procesos de razonamiento constituye el núcleo de una disciplina filosófica conocida como **lógica**, una de cuyas ramas más importantes es el **álgebra Booleana**, la cual utiliza únicamente conceptos del tipo falso/verdadero. La aplicación de este método de razonamiento matemático al análisis y diseño de circuitos digitales, recibe el nombre de **lógica digital**. El álgebra Booleana se denomina así en honor de su creador, el matemático inglés **Georg Simon Boole** (1815-1846).

La expresión verbal de un juicio acerca de algo que puede ser falso o verdadero, por ejemplo, "está lloviendo", se denomina en lógica pura una **proposición** y corresponde en el marco del álgebra Booleana a una **variable lógica**. Las variables lógicas se identifican generalmente mediante caracteres alfabéticos o alfanuméricos (A, D3, CLR, etc.). En electrónica digital, las variables lógicas se utilizan para representar señales o condiciones que sólo pueden adoptar uno de dos estados posibles (**0**=falso, **1**=verdadero). Las variables lógicas y sus relaciones se representan, manipulan y expresan mediante tablas de la verdad, ecuaciones lógicas, símbolos lógicos y operaciones lógicas.

Una **tabla de la verdad** es una representación gráfica que contiene todas las posibles combinaciones de estados de las variables de entrada y los estados de la variable de salida resultantes de cada una. Una **ecuación lógica** es una expresión matemática que describe analíticamente la relación de cada variable de salida con las variables de entrada. Las ecuaciones lógicas se representan gráficamente mediante la combinación de uno o más **símbolos lógicos**, cada uno de los cuales describe una **operación lógica** entre un cierto número de variables de entrada.

Las operaciones lógicas básicas del álgebra Booleana son: el **producto**, la **suma** y el **complemento o inversión**, denominadas respectivamente operaciones **AND**, **OR** y **NOT**. En la **figura 10.3** se muestran los símbolos, las ecuaciones y las tablas de la verdad que describen estas operaciones fundamentales. En adición a estas operaciones básicas existen otras auxiliares, derivadas de las primeras, que se utilizan con frecuencia en el diseño de circuitos digitales. Las más importantes son la AND negada (**NAND**), la OR negada (**NOR**), la OR exclusiva (**XOR**), la OR exclusiva negada (**XNOR**) y la NOT negada (**YES**). En la **figura 10.4** se describen estas operaciones auxiliares.

Tanto las operaciones fundamentales como las derivadas son ejecutadas en la práctica por circuitos electrónicos especializados llamados **compuertas**. Las compuertas son los bloques constructivos básicos de todos los circuitos y sistemas digitales. Las compuertas, así como muchas funciones especializadas construidas a base de las mismas (*flip-flops*, decodificadores, contadores, memorias, microprocesadores, etc.), están corrientemente disponibles como circuitos integrados digitales. Dependiendo del número de compuertas utilizadas en su construcción, estos últimos pueden ser de pequeña, mediada, alta, o muy alta escala de integración.

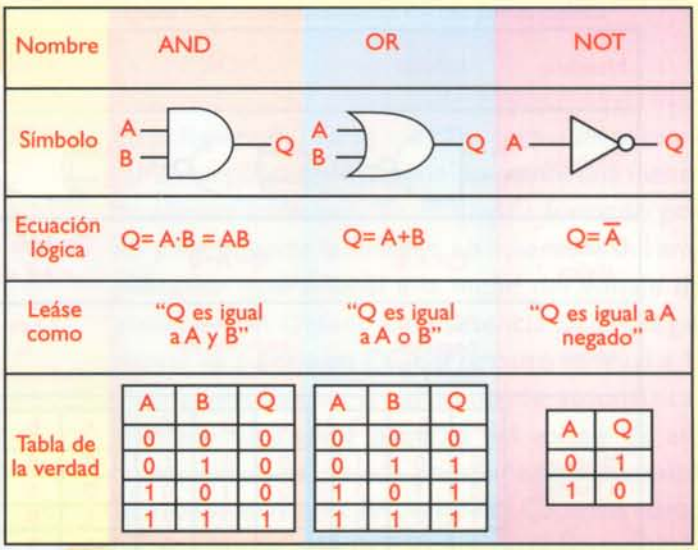


Figura 10.3. *Operaciones lógicas básicas. Las operaciones AND y OR son aplicables a dos o más variables de entrada. La operación NOT solamente está definida para una variable de entrada.*

El transistor como interruptor

Los circuitos digitales están basados en el uso de transistores, bipolares o de efecto de campo, operando como interruptores, es decir, entre el corte y la saturación. En la **figura 10.5a** se muestra como ejemplo la estructura de un interruptor básico con transistor NPN. En este caso, cuando se abre el interruptor S1, no hay corriente de base y por tanto no hay corriente de colector. Como resultado, el transistor está cortado (*off*) y la lámpara permanece apagada. Asimismo, cuando el interruptor se cierra, circulan una corriente de base (9,4mA) y una corriente de colector (100mA) y la lámpara se ilumina. En el primer caso, el punto de trabajo coincide con el de corte, mientras que en el segundo coincide con el de saturación.

Para la conmutación de cargas inductivas, por ejemplo, relés y motores, el transistor debe ser protegido mediante un diodo inversamente polarizado, conectado en paralelo con la carga, como se indica en la **figura 10.5b.** Sin el diodo, la corriente almacenada en la bobina tendería a seguir circulando a través del transistor, con lo cual se produciría un voltaje muy alto entre el colector y el emisor del mismo, capaz de destruirlo. El diodo evita que esto suceda, proporcionando un camino de baja resistencia para la circulación de esta corriente.

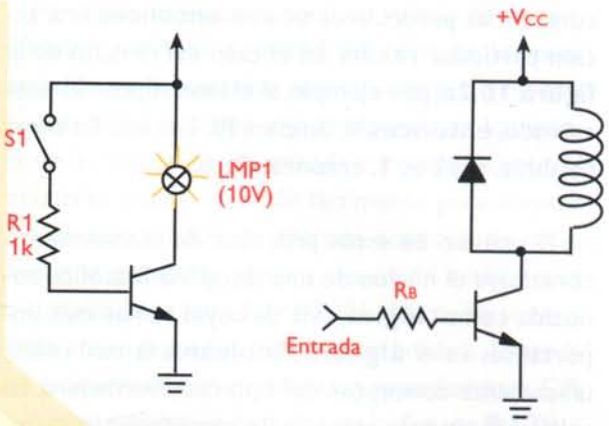


Figura 10.5. *Interruptores con transistores bipolares*

En la **figura 10.6a** se muestra el circuito básico de un interruptor con MOSFET. En este caso, con el interruptor en la posición superior, la compuerta recibe un voltaje alto (10V) y el MOSFET conduce, energizando la carga. Asimismo, con el interruptor en la posicion inferior, la compuerta recibe un voltaje bajo (0V) y el MOSFET deja de conducir, desenergizando la carga. En el primer caso, el transisor está en el estado de saturación, mientras que en el segundo está en el estado de corte.

Los MOSFET posibilitan tambien la conmutación de señales análogas, lo cual no es posible con transistores BJT. Esta situación se ilustra en la **figura 10.6b**.

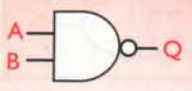
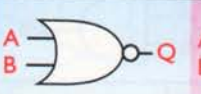
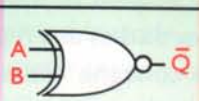
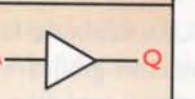
Nombre	NAND	NOR	XOR	XNOR	YES
Símbolo					
Ecuación lógica	$Q=\overline{A \cdot B}$	$Q=\overline{A+B}$	$Q=A\oplus B$ $=A\bar{B}+\bar{A}B$	$Q=\overline{A\oplus B}$ $=\bar{A}\bar{B}+AB$	$Q=A$ $=\bar{\bar{A}}$
Léase como	"Q es la negación de A y B"	"Q es la negación de A o B"	"Q es A o exclusiva B"	"Q es la negación de A o B exclusiva"	"Q es igual a A o a la doble negación de A"
Tabla de la verdad	A B Q 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0	A B Q 0 0 1 0 1 0 1 0 0 1 1 0	A B Q 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 0	A B Q 0 0 1 0 1 0 1 0 0 1 1 1	A Q 0 0 1 1

Figura 10.4. *Operaciones lógicas derivadas. Las operaciones NAND, NOR, XOR y XNOR se aplican a dos o más variables, y la YES a una sola variable.*

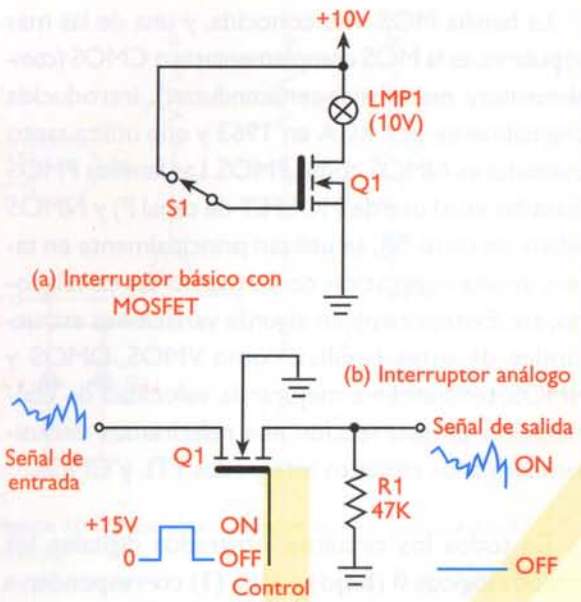


Figura 10.6. *Interruptores con transistores de efecto de campo*

La idea básica es conmutar el MOSFET del estado de circuito abierto al de cortocircuito, y viceversa, mediante la aplicación de un voltaje de nivel bajo (0V) o alto (+15V) en la compuerta. Así se consigue bloquear o dejar pasar la señal análoga desde la entrada hasta la salida. En el primer caso (V_G=0V), el MOSFET no conduce y el voltaje sobre la carga es 0V, mientras que en el segundo, el MOSFET conduce y sobre la carga aparece el voltaje de entrada.

Operaciones lógicas con transistores y diodos

Los transistores, junto con los diodos, pueden ser utilizados para efectuar fácilmente las operaciones lógicas, básicas y derivadas, descritas anteriormente. En la **figura 10.7** se muestra, como ejemplo, la forma de llevar a cabo las operaciones NOT, AND, NAND y NOR utilizando exclusivamente diodos, transistores y resistencias. En todos los casos, las variables de entrada (A y B) y de salida (Q) representan niveles de voltaje, correspondiendo un nivel **bajo** (0) a 0V y un nivel **alto** (1) a 5V.

En el caso del inversor, **figura 10.7a**, por ejemplo, la aplicación de un nivel **alto** en la entrada A causa que circule una corriente de base y el transistor se sature, con lo cual el voltaje en la salida Q es prácticamente 0V, correspondiente a un nivel **bajo**. Asimismo, la aplicación de un nivel **bajo** en la entrada no produce corriente de base, con lo cual el transistor se bloquea, produciendose en la salida Q un voltaje de +5V, correspondiente a un nivel **alto**. Del mismo modo se analizan los otros circuitos.

Tenga en cuenta que un diodo conduce cuando está directamente polarizado, es decir el ánodo es positivo con respecto al cátodo, y no conduce cuando está inversamente polarizado. En el primer caso, la caída de voltaje entre sus terminales es muy baja, del orden de 0,6V, asimilable a un nivel lógico bajo (0).

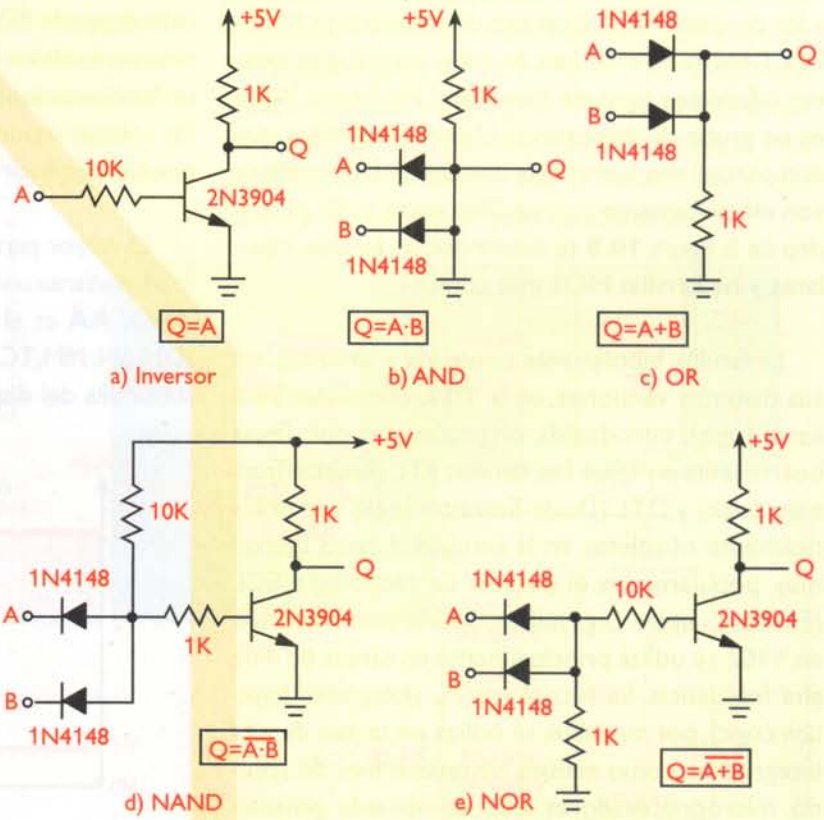


Figura 10.7. *Ejemplos de compuertas lógicas discretas*

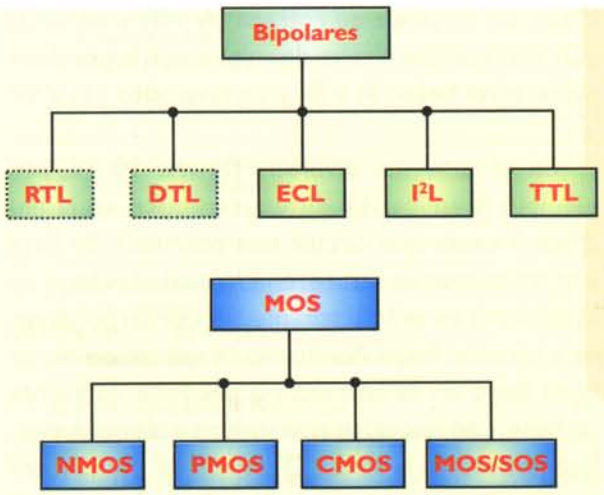


Figura 10.8. *Familias lógicas de circuitos integrados digitales*

Familias lógicas de circuitos integrados digitales

Los circuitos integrados digitales modernos pueden ser bipolares o MOS, dependiendo del tipo de transistores utilizados como interruptores en su manufactura. Específicamente, los circuitos bipolares están basados en el uso de transistores bipolares (BJT) y los circuitos MOS en el uso de transistores MOSFET. Dentro de cada una de estas tecnologías existen diferentes tipos de **familias**. Una familia lógica es un grupo de dispositivos lógicos integrados que comparten una tecnología común de fabricación y son eléctricamente compatibles entre sí. En el cuadro de la figura **10.8** se relacionan las familias bipolares y las familias MOS más comunes.

La familia bipolar más conocida y utilizada, en sus distintas versiones, es la **TTL** (*Transistor-Transistor Logic*), introducida originalmente por Texas Instruments en 1964. Las familias RTL (*Resistor-Transistor Logic*) y DTL (*Diode-Transistor Logic*) son prácticamente obsoletas en la actualidad, pero fueron muy populares en el pasado. La tecnología ECL (*Emitter-Coupled Logic*), introducida por Motorola en 1962, se utiliza principalmente en tareas de muy alta frecuencia. La tecnología I^2L (*Integrated Injection Logic*), por su parte, se utiliza en tareas de alta integración, como relojes, sintetizadores de sonido, microprocesadores, etc., combinada generalmente con circuitos análogos.

La familia MOS más conocida, y una de las más populares, es la MOS complementaria o CMOS (*complementary metal-oxide-semiconductor*), introducida originalmente por RCA en 1963 y que utiliza tanto transistores NMOS como PMOS. Las familias PMOS (basadas en el uso de MOSFET de canal P) y NMOS (idem. de canal N), se utilizan principalmente en tareas de alta integración, como memorias, calculadoras, etc. Existen también algunas variaciones estructurales de estas familias, como VMOS, DMOS y HMOS, tendientes a mejorar la velocidad de conmutación. En esta lección nos referiremos exclusivamente a los circuitos integrados TTL y CMOS.

En todos los circuitos integrados digitales, los estados lógicos **0** (**bajo**) y **alto** (**1**) corresponden a valores de voltaje, los cuales tienen rangos de validez definidos, separados por una zona de valores inválidos. Esta situación se ilustra en la **figura 10.9**. En este caso, el nivel **bajo** (**0**) válido corresponde a cualquier voltaje entre Vo y V1, y el nivel **alto** (**1**) válido, a cualquier voltaje entre V2 y V3. Típicamente, Vo corresponde a 0V y V3 al voltaje de alimentación, digamos +5V. Los voltajes entre V1 y V2 se consideran inválidos y deben evitarse porque provocan un funcionamiento errático. También deben evitarse los voltajes superiores a V3 o inferiores a Vo, porque pueden producir daños irreversibles.

La mayor parte de los dispositivos TTL se identifican mediante una referencia de la forma **AA74xxyy**, donde **AA** es el código que identifica al fabricante (DM, SN, MM, TC, etc), **xx** un código que identifica la subfamilia del dispositivo y **yy** un número de dos o

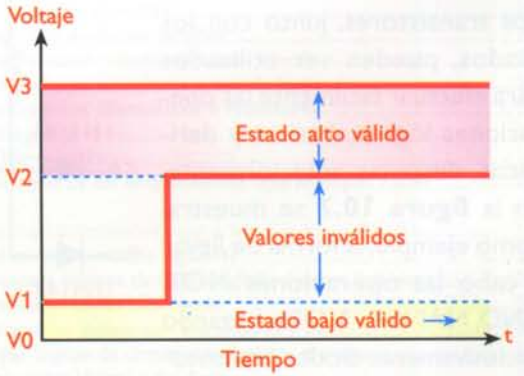


Figura 10.9. *Concepto de nivel lógico*

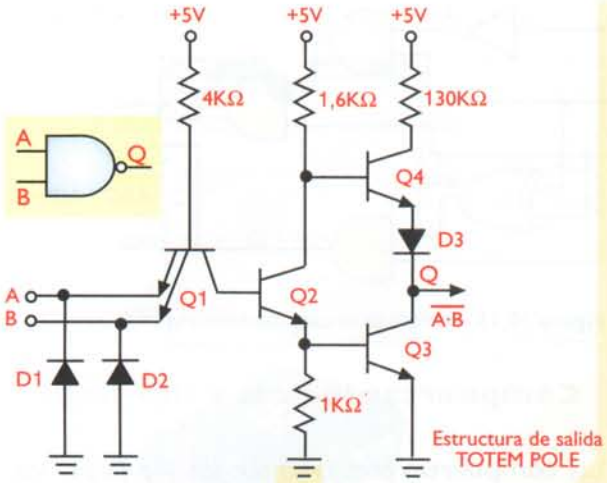


Figura 10.10. *Estructura típica de una compuerta NAND TTL estándar*

tres cifras que identifica la función del mismo. Ejemplos: 74LS00, 7493, 74S279, etc. Los dispositivos CMOS, por su parte, se identifican principalmente mediante referencias de las formas **AA4xxxB**, **AA74Cxx**, **AA74HCxx** y **AA74HCTxx**. Ejemplos: CD4011B, DM74C925, SN74HCT134, etc.

Tanto la familia TTL como la CMOS comprenden varias **subfamilias** que representan distintos grados de compromiso entre la velocidad de operación y el

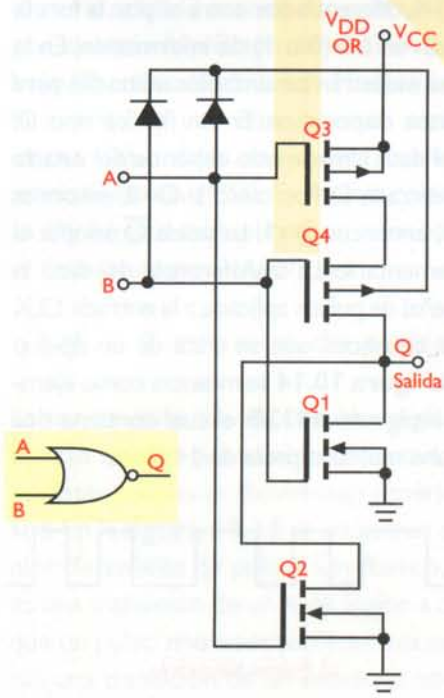


Figura 10.11. *Estructura de una compuerta CMOS*

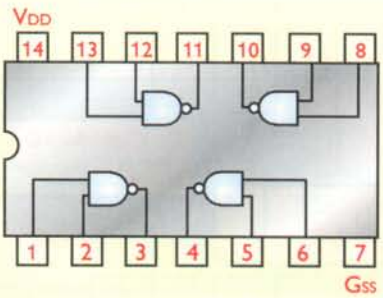


Figura 10.12. *Distribución funcional del circuito integrado* ***4011B****, el cual contiene cuatro compuertas NAND de dos entradas*

consumo de potencia. En general, los circuitos integrados TTL se caracterizan por su alta velocidad y los CMOS por su bajo consumo de potencia

Las subfamilias TTL más importantes son la estándar (74), la de baja potencia (74L), la de alta velocidad (74H), la Schottky (74S), la Schottky de bajo consumo (74LS) y las Schottky avanzadas (74AS y 74ALS). En la figura **10.10** se muestra, como ejemplo, la estructura interna de una compuerta NAND TTL estándar.

Las subfamilias CMOS más importantes son la 40 (estándar), la 74C (equivalente TTL), la 74HC (alta velocidad) y la 74HCT (alta velocidad con entradas TTL). En la **figura 10.11** se muestra como ejemplo la estructura de una compuerta NOR CMOS estándar. Actualmente, las subfamilias TTL y CMOS más utilizadas son la **74LS,** la **40** y la **74HC**, siendo esta última la que ofrece el mejor desempeño.

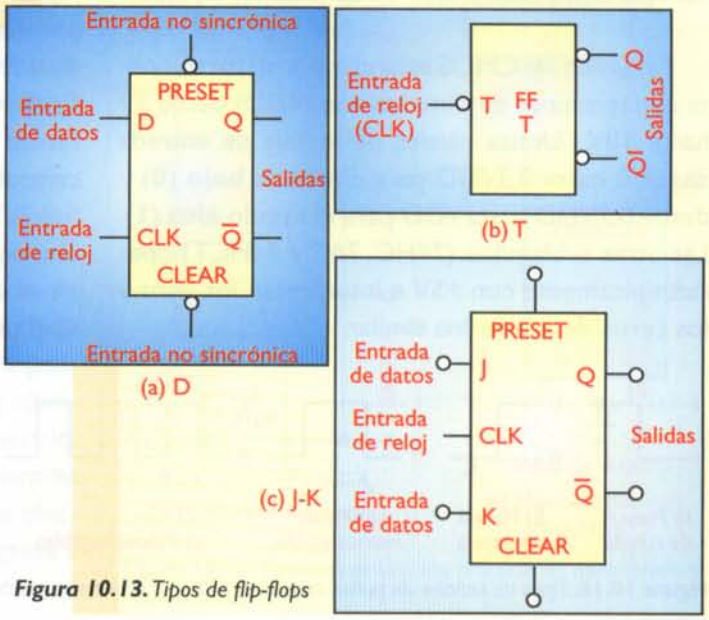


Figura 10.13. *Tipos de flip-flops*

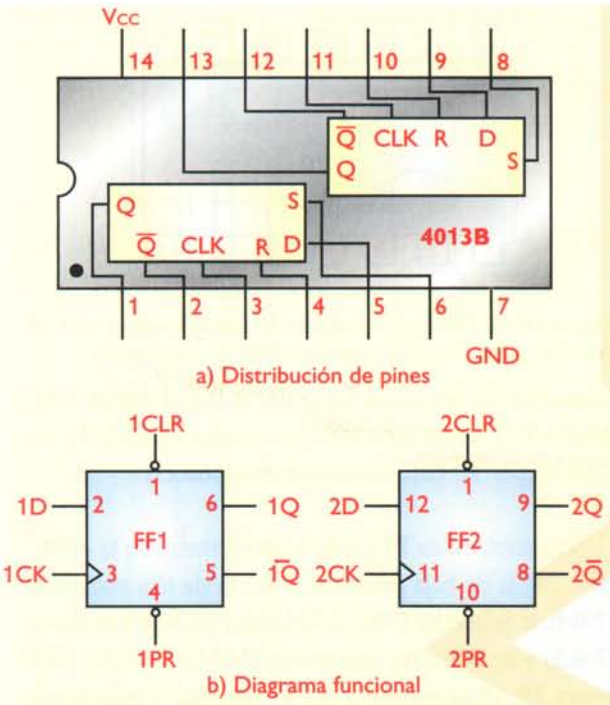


Figura 10.14. *Distribución de pines* ***(a)*** *y diagramas funcionales* ***(b)*** *del circuito integrado* ***4013B****, el cual contiene dos flip-flops tipo D en una misma cápsula*

Todas las subfamilias TTL trabajan con una tensión de alimentación de +5V e interpretan los unos y los ceros de la misma forma. Específicamente, cualquier voltaje entre 0V y 0,8V corresponde a un nivel o estado **bajo** (**0**) y cualquier voltaje entre 2,0V y 5,0V a un nivel o estado **alto** (**1**). Los voltajes entre 0,8V y 2,0V se consideran inválidos.

La subfamilia CMOS estándar, por su parte, opera con tensiones de alimentación (VDD) desde 3V hasta 18V. Utiliza niveles de voltaje de entrada desde 0 hasta 0,3VDD para el estado **bajo** (**0**) y desde 0,7VDD hasta VDD para el estado **alto** (**1**). Las otras subfamilias (74HC, 74C y 74HCT) operan típicamente con +5V e interpretan los unos y los ceros de una forma similar.

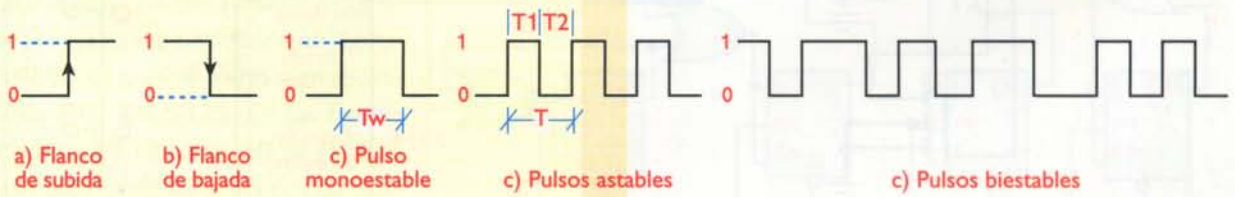


Figura 10.16. *Tipos de señales de pulsos comunes utilizadas en los sistemas digitales*

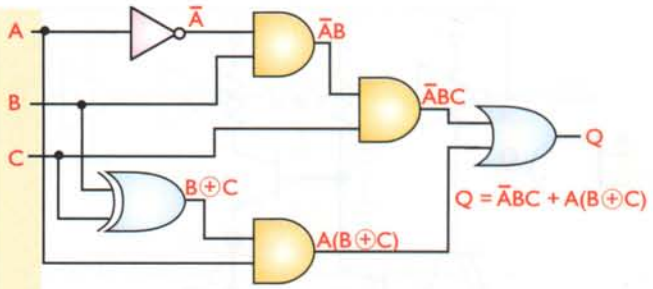


Figura 10.15. *Ejemplo de circuito combinatorio*

Compuertas lógicas y flip-flops

Las **compuertas** son, junto con los ***flip-flops***, los bloques constructivos básicos de todos los circuitos y sistemas digitales. Las primeras efectúan decisiones u operaciones lógicas simples, mientras que los segundos almacenan *bits* o estados lógicos. Los principales tipos de compuertas lógicas disponibles como circuitos integrados TTL o CMOS, son la AND, la OR, la NAND, la NOR, la XOR y la XNOR, denominadas así de acuerdo a la operación lógica que efectúan. Un ejemplo representativo es el **4011B**, **figura 10.12**, el cual incluye 4 compuertas NAND convencionales de dos entradas (NAND-2) en una cápsula de 14 pines.

Los principales tipos de *flip-flops* son el D (*data*), el T (*toggle*) y el J-K, diferenciados entre sí por la forma como almacenan un ***bit*** (0 o 1) de información. En la **figura 10.13** se muestran los símbolos utilizados para representar estos dispositivos. En un *flip-flop* tipo D, por ejemplo, el dato almacenado depende del estado de la línea de entrada D. Por tanto, si D=**0**, entonces Q=**0** y si D=**1**, entonces Q=**1**. La salida $\overline{Q}$ adopta el estado complementario. La transferencia del dato la controla una señal de pulsos aplicada a la entrada CLK (reloj). Se dice, entonces, que se trata de un *flip-flop* sincrónico. En la **figura 10.14** se muestra como ejemplo el circuito integrado **4013B**, el cual contiene dos *flip-flops* D en una misma cápsula de 14 pines.

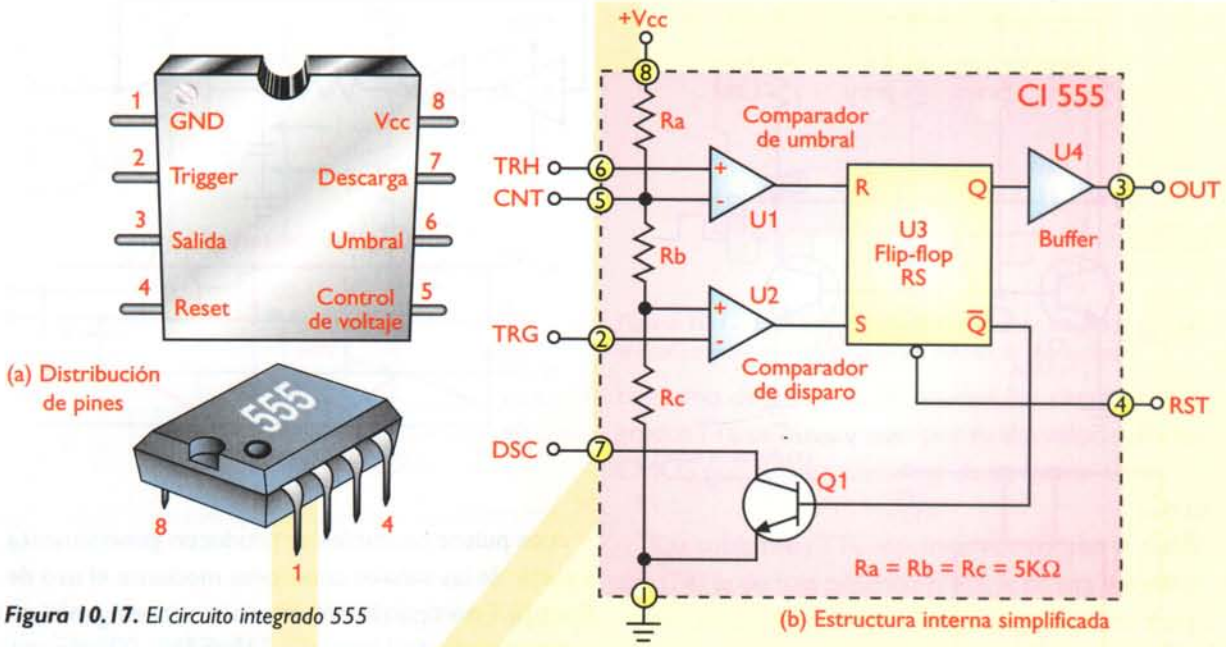


Figura 10.17. *El circuito integrado 555*

Los circuitos desarrollados exclusivamente a base de compuertas, sin elementos de memoria (*flip-flops*) en su interior, se denominan genéricamente **circuitos combinatorios** o de **lógica combinatoria.** En ellos, el estado de cada salida depende exclusivamente de la combinación de estados de las entradas. En la **figura 10.15** se muestra un ejemplo de circuito combinatorio, el cual entrega un nivel **alto** (**1**) en la salida Q cuando dos entradas cualesquiera, por ejemplo A y C son de nivel alto (1), y un nivel **bajo** (**0**) en los demás casos. Muchas funciones combinatorias de uso común están están corrientemente disponibles como circuitos integrados de mediana escala (MSI). Ejemplos: codificadores, decodificadores, multiplexores, sumadores, unidades aritmético-lógicas (ALU), etc.

Circuitos de pulsos

La mayor parte de los circuitos digitales prácticos utilizan señales que cambian de estado con el tiempo. Estas señales se denominan genéricamente **pulsos**. En la **figura 10.16** se muestran algunos ejemplos de señales de pulsos. Un **flanco**, por ejemplo, es una transición de un nivel lógico a otro, mientras que un pulso **monoestable** es una señal que efectúa una transición de un estado al otro y regresa a su estado inicial después de un cierto tiempo.

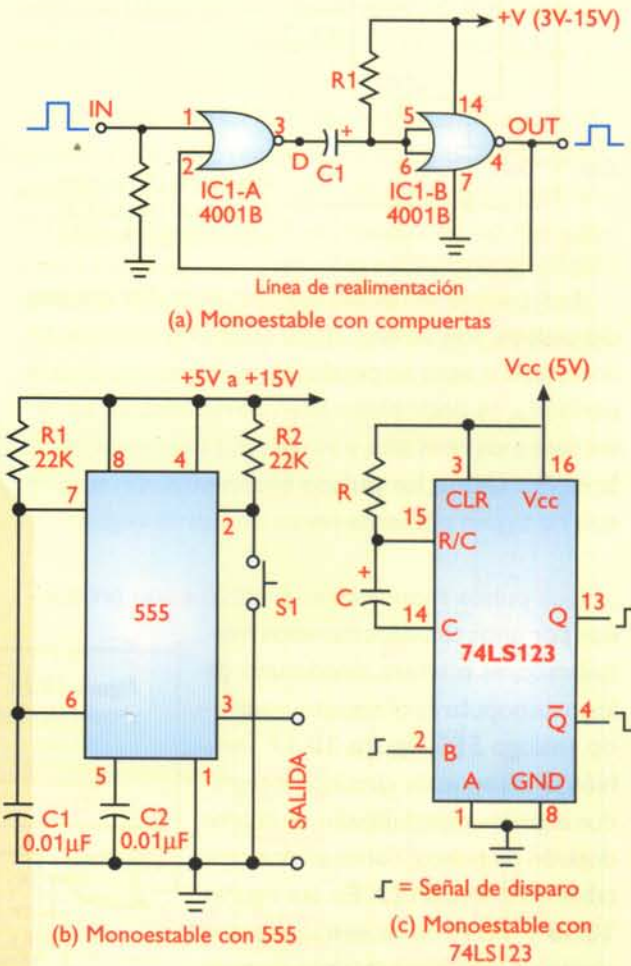
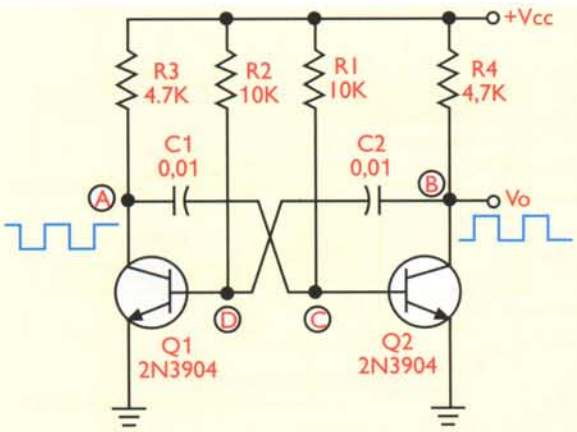
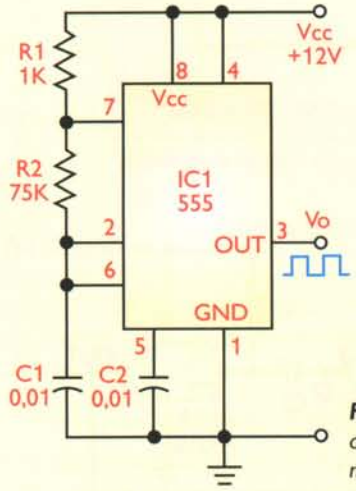


Figura 10.18. *Ejemplos de circuitos prácticos de multivibradores monoestables*



(a) Astable con transistores

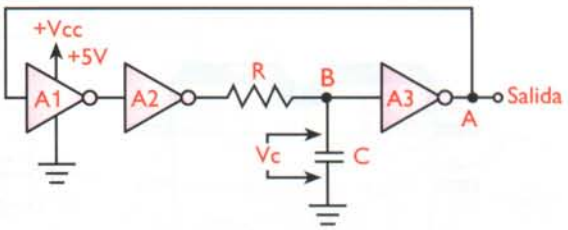


(c) Astable con 555

Figura 10.19. *Ejemplos de circuitos prácticos de multivibradores astables*

Los **pulsos *astables***, también llamados **trenes de pulsos**, son señales en las cuales los cambios de un estado a otro se producen en forma continua y periódica, es decir, pasan alternativamente de un nivel bajo a un nivel alto, y viceversa, a intervalos regulares. Por último, los **pulsos biestables** son señales que no siguen necesariamente un patrón regular.

Los pulsos monostables y *astables* son producidos por unos circuitos llamados multivibradores o *timers*, siendo uno de los más populares el circuito integrado análogo **555**, **figura 10.17**. También se dispone de circuitos integrados digitales especializados en la producción de pulsos, como el monoestable TTL **74LS123**. En las figuras **10.18** y **10.19** se muestran algunos ejemplos circuitos prácticos de multivibradores monoestables y *astables*.



(b) Astable con inversores

Los pulsos biestables se producen generalmente a partir de las señales anteriores mediante el uso de *flip-flops*. Este tipo de circuitos se conocen genéricamente como **circuitos secuenciales** y se caracterizan porque el estado de la salida depende no solamente de las combinaciones de estados de las entradas, sino de la secuencia (orden en el tiempo) en la cual ocurren estas combinaciones. En la **figura 10.20** se muestra un ejemplo de circuito secuencial. Muchas funciones secuenciales de uso común y especializado están corrientemente disponibles como circuitos integrados de mediana y alta escala. Ejemplos: contadores, registros de desplazamiento, codificadores de teclados, memorias, microcontroladores, etc.

Concluimos así la sección de **teoría** del **Curso Fácil de Electrónica Básica** de **CEKIT**. Pero no todo está dicho: aún falta mucho por recorrer. Afortunadamente, usted es quién decide hasta donde quiere llegar. Cualquiera que sea su elección, cuente siempre con nosotros. Consúltenos.

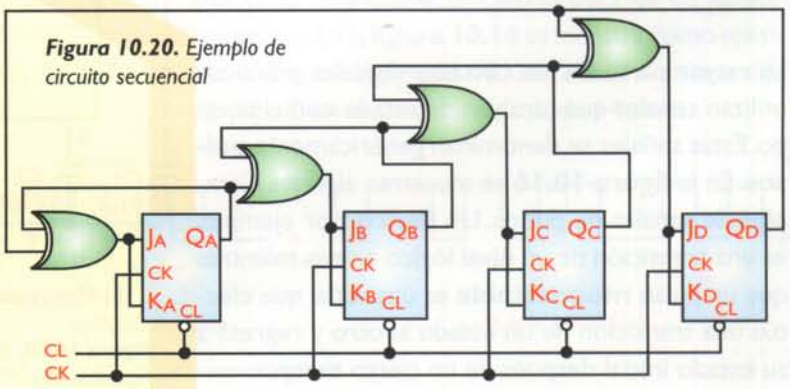


Figura 10.20. *Ejemplo de circuito secuencial*

Índice Teoría

Introducción general al curso 1

Lección 1. Teoría atómica y electricidad 3
Introducción 4
La materia 4
- Composición de la materia 5
- Estructura atómica 6
- Carga eléctrica del átomo 7
- Número atómico 8
- Niveles de energía y distribución de los eléctrones en el átomo 8
- Electrones de valencia 9
- Electrones libres 10

Electricidad estática y dinámica 10
- ¿Qué es la electricidad estática? 11
- Cómo crear electricidad estática 11
- ¿Podemos emplear la electricidad estática? 12

Experimento N°1. Manos a la obra 13
- Electricidad dinámica 14
- Campo eléctrico 14
- Diferencia de potencial 15

Formas de producir energía eléctrica en pequeñas cantidades 17
- Por frotamiento o fricción 17
- Por reacciones químicas 17
- Por presión o vibración 18
- Por el calor y por la luz 18

Formas de producir grandes cantidades de energía eléctrica 18
- Por medios magnéticos 18
- Centrales eléctricas 19
- Centrales hidroeléctricas 19
- Centrales termoeléctricas 19
- Centrales nucleares 22
- Centrales solares 22

Lección 2. Conceptos básicos acerca de los circuitos eléctricos y electrónicos 25
¿Qué es un circuito eléctrico? 26
La fuente de voltaje 26
- El voltaje 26
- Unidad de medida 27
- Conversión de unidades 27
- ¿Con qué se mide? 28

La carga o receptor de energía 28
Los conductores 28
- Conductores más usados 29
- ¿Con qué se prueban? 29

Resistencia 29
- Unidad de medida 30
- Conversión de unidades 30
- ¿Con qué se miden? 31
- Circuito abierto (*open circuit*) 31
- Corto circuito (*Short circuit*) 31
- ¿Qué puede suceder si se ocasiona un cortocircuito? 32

La corriente eléctrica 32
- Intensidad de la corriente 33
- Conversión de unidades 33
- Cómo se mide la corriente 33

Experimento N° 2. Circuito eléctrico simple 35

Lección 3. El magnetismo y el electromagnetismo 37
El magnetismo 38
- Breve historia 38
- Cómo se produce el amgnetismo 39
- Naturaleza del magnetismo 40
- Características de las fuerzas magnéticas 40
- ¿Qué es un campo? 41
- ¿Qué es el campo magnético? 41
- Líneas de fuerza 41
- Permeabilidad magnética 41
- Reluctancia magnética 41
- El circuito magnético 41
- Clasificación de los imanes 42
- Procesos de imantación 42
- Como desmagnetizar un imán 43

Experimento N°3. Campo magnético 44
El electromagnetismo 45
- Historia 45
- Importancia del magnetismo y el electromagnetismo 46

Las bobinas 47
- Tipos de bobinas 47
- Polos de un electroimán 47

Experimento N°4. El electromagnetismo 48

Lección 4. Leyes básicas de los circuitos eléctricos 49
La ley de Ohm 50
- Enunciado de la ley de Ohm 50
- Otras formas de representar la ley de Ohm 52
- El triángulo de la ley de Ohm 53
- Análisis de un circuito eléctrico mediante la ley de Ohm 54
- Problemas de aplicación de la ley de Ohm 55

Experimento N°5. La ley de Ohm 56
Concepto de potencia eléctrica 58
Concepto de fuerza 58
Concepto de trabajo 58
Concepto de energía 58
- Energía potencial 58
- Energía cinética 58
- Energía calórica 58
- Energía radiante 59
- Energía química 59
- Energía eléctrica 59

Concepto de potencia 59
La ley de Watt 59
- Ejemplos de aplicaciones de la ley de Watt 60
- Triángulo de la ley de Watt 61
- Combinación de las leyes de Ohm y Watt 62
- Problemas de aplicación de la ley de Watt 62

Lección 5. Circuitos en serie, paralelo y mixtos 65
Introducción 66
Circuitos en serie con resistencias 66
Corriente en un circuito en serie 67
Voltajes en un circuito en serie 67
Resistencia total o equivalente de un circuito en serie 68
Circuitos en paralelo con resistencias 70
Resistencia total o equivalente de un circuito en paralelo 71
Circuitos mixtos con resitencias 73
Resistencia total o equivalente en circuitos mixtos 73
Voltajes y corrientes en un circuito mixto 75
Potencia en circuitos en serie, en paralelo y mixtos 76
Experimento 5.1. Análisis de circuitos con resistencias en serie, en paralelo y en configuraciones mixtas 77
Conexión de pilas en serie y en paralelo 83
Conexión de condensadores en serie y en paralelo 83
Conexión de bobinas en serie y en paralelo 84

Lección 6. Conceptos básicos de corriente alterna (CA) y corriente continua (CC) 85
Introducción 86
Corriente alterna 87
- Concepto de ciclo. Valores angulares 87
- Concepto de período 89
- Concepto de frecuencia 89
- Relación entre frecuencia y período 90

Valores de una onda seno 90
- Concepto de valor intantáneo 90
- Concepto de valor pico y de valor pico a pico 91
- Concepto de valor promedio 91
- Concepto de valor efectivo o rms. Definición de factor de forma 91
- Concepto de ángulo de fase. Relaciones de tiempo de ondas seno 92

Generadores de corriente alterna 94
Segunda parte. Corriente continua 98
Formas de producir una CC 98

Lección 7. Las fuentes de alimentación 101
Introducción 102
Estructura de una fuente de alimentación 102
Tipos de fuentes de alimentación 103
Fuentes de alimentación no reguladas 104
El circuito de entrada 105
El transformador 109
El circuito rectificador 111
Tipos de rectificadores 111
El rectificador de media onda 112
Experimento 7.1. Rectificador de media onda 114
El rectificador de onda completa con transformador de toma intermedia 117
Experimento 7.2. Rectificador de onda completa con transformador de toma intermedia 118
Rectificador de onda completa tipo puente 120
Puentes rectificadores integrados 121
Filtros para rectificadores 122
Rectificador de onda completa con filtro 124
Experimento 7.3. Rectificador de onda completa tipo puente con filtro de condensador 125
Otros tipos de filtros 129
Fuentes de alimentación reguladas 129
Reguladores de voltaje con diodo Zener 130
Reguladores de voltaje con diodo Zener y transistor 131
Fuentes de alimentación con reguladores de tres terminales .. 132
Fuentes reguladas fijas 133
Fuentes de alimentación reguladas variables 135
Experimento 7.4. Experimentando con reguladores de voltaje (*voltage regulators*) de tres terminales 137

Lección 8. Amplificadores y otros circuitos con transistores 141
¿Qué son los transistores? 142
Tipos de transistores 142
Transistores bipolares 143
Cómo funciona un transistor bipolar. Polarización (*polarization*) 143
Curvas características de un transistor 145
Experimento 8.1. Obtención de las curvas características de un transistor 146
Concepto de recta de carga 151
Concepto de punto de trabajo 152
Esquemas mejorados de polarización 153
Polarización de emisor 154
Polarización por divisor de tensión 155
Otros tipos de polarización 158
Amplificadores de señales 160
Tipos de amplificadores 161
Características de los amplificadores 162
Ganancias de voltaje, corriente y potencia 162
Resistencias o impedancias de entrada y de salida 163
Ancho de banda y respuesta de frecuencia 163
Distorsión 164
Polarización 165
Amplificadores de baja señal con transistores 165
Amplificador de baja señal en emisor común 166
Acción de los condensadores de acople y desacople 167
Análisis sistemático 167
Análisis para corriente continua 168
Análisis para señal 168
Impedancia de entrada (Zi) 169
Funcionamiento con señal pequeña 169
Ganancia de voltaje (Av) 171
Impedancia de salida (Zo) 172
Ganancia de corriente 173
Ganancia de potencia 174
Ancho de banda 174
Experimento 8.1. Análisis de un amplificador de baja señal en emisor común 177
Amplificadores de baja señal en base común 188
Amplificadores de baja señal en colector común. Seguidores de emisor 191
Circuitos prácticos con transistores (I) 196
Amplificadores de baja señal con transitores de efecto de campo 201
Características de entrada y salida de los FET de unión 202
Características de polarización de los JFET.
Polarización compuerta 204
Polarización mediante divisor de tensión 205
Polarización mediante dos fuentes de alimentación 205
Autopolarización 206
Polarización de compuerta con referencia (*offset*) 207
Polarización mediante fuente de corriente constante 208
Circuito equivalente de baja señal de un amplificador con JFET 208
Configuraciones básicas de amplificadores con JFET 209
Análisis de amplificadores de baja señal con JFET 211
Circuitos prácticos de amplificadores de baja señal con JFET 212
Amplificadores multietapa 214
Análisis de un amplificadpr de dos etapas 216
Amplificadores de potencia con transistores 218
Características y especificaciones de los amplificadores de potencia 218
Operación de amplificadores de potencia en clase A 219
Operación de amplificadores de potencia en clase B 221
Circuitos en contrafase o *push-pull* 222
Amplificadores de simetría complementaria con polarización por diodos 223
Amplificadores de simetría complementaria con estabilización térmica 223
Amplificadores de simetría complementaria con transistores Darlington 225
Amplificadores de simetría complementaria con *bootstrapping* 227
Cálculo de disipadores de calor para amplificadores de potencia 227
Concepto de resistencia térmica 228
Circuitos prácticos con transistores (II). Amplificadores de potencia 230

Lección 9. Amplificadores operacionales 233
¿Qué es un amplificador operacional? 234
Estructura interna 234
Circuito equivalente. Características generales 235
Presentaciones usuales 236
Relaciones de fase en un amplificador operacional 236
Operación en lazo abierto. Comparadores 236
Operación en lazo cerrado. Concepto de realimentación 238
Amplificadores inversores. Concepto de tierra virtual 238
Amplificadores no inversores 239
Seguidores de voltaje 240
Técnicas de anulación de *offset* 240
Alimentación mediante fuente sencilla 241
Amplificadores sumadores o mezcladores 242
Amplificadores diferenciales o restadores 242
Integradores 242
Diferenciadores 243
Parámetros de los amplificadores operacionales reales 243

Lección 10. Introducción a los circuitos digitales 245
¿Qué son los circuitos digitales? 246
Conceptos básicos de lógica digital y álgebra Booleana 246
El transistor como interruptor 248
Operaciones lógicas con transistores y diodos 249
Familias lógicas de circuitos integrados digitales 250
Compuertas lógicas y flip-flops 252
Circuitos de pulsos 253