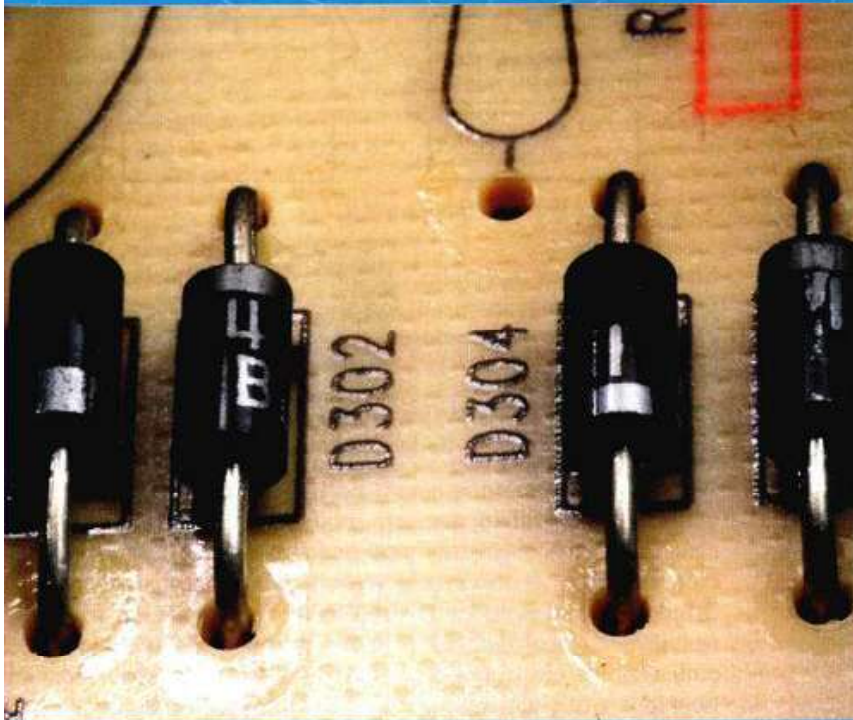


Semiconductores-

El diodo



El sector electrónico ha conseguido hoy en día unas cotas de importancia en el sector productivo y de bienes de consumo que parecían inimaginables hace unos años. La electrónica y los componentes electrónicos comienzan su andadura a finales del siglo XIX con el desarrollo del diodo y del triodo de vacío. Con estos elementos ya era posible la amplificación de señales y multitud de aplicaciones. Con la invención a finales de 1940 del transistor bipolar a base de componentes de estado sólido, se produjo una verdadera revolución en el sector electrónico. El siguiente paso fue la aparición en 1959 del primer circuito integrado. Desde ese momento, la miniaturización de los circuitos se dispara gracias al aumento en la densidad de integración, dando lugar a un nuevo concepto: la microelectrónica.

Se puede decir que con los semiconductores se comienza el estudio propio de la electrónica. Con el uso de los semiconductores es posible la elaboración de diodos, transistores, tiristores y circuitos integrados en general.

En esta unidad vamos a estudiar los diodos para posteriormente aplicarlos en circuitos de rectificación (circuitos que convierten la corriente alterna en continua).

7

Contenidos

- 7.1. Los semiconductores
- 7.2. El diodo como semiconductor
- 7.3. Características atómicas del silicio
- 7.4. El diodo de unión
- 7.5. Dispositivos optoelectrónicos

Objetivos

- Analizar la tipología y características funcionales de los diodos.
- Describir las curvas características más representativas de los diodos, explicando la relación existente entre las magnitudes fundamentales que los caracterizan.
- Interpretar los parámetros fundamentales que aparecen en las hojas técnicas de los fabricantes de diodos.
- Analizar la tipología y características funcionales de los dispositivos optoelectrónicos.

7.1. Los semiconductores

Los semiconductores han revolucionado el mundo de la electrónica. Con ellos han aparecido los diodos, los transistores, los tiristores y los demás componentes electrónicos contruidos gracias a los semiconductores que han sustituido a las válvulas electrónicas. Por otro lado, con la aparición de los circuitos integrados, que suplen la función de grandes cantidades de diodos, transistores, resistencias, condensadores y cualquier tipo de componente electrónico, se ha dado el gran paso hacia el futuro de la electrónica. La ventaja que poseen los semiconductores es que son de reducido tamaño, pequeño consumo y bajo precio. En la Figura 7.1 se muestran los símbolos eléctricos de los semiconductores más comunes y en la Figura 7.2 el aspecto de los mismos.

Diodo	Diodo zener	Diodo Led	Fotodiodo
Transistor NPN	Transistor PNP	Fototransistor	JFET N
JFET P	Mosfet N	Mosfet P	UJT N
UJT P	SCR	DIAC	TRIAC

Figura 7.1. Símbolos eléctricos de los semiconductores.



Figura 7.2. Aspecto de los semiconductores.

7.2. El diodo como semiconductor

El diodo es un elemento semiconductor que solo permite la circulación de la corriente en un sentido único (Figura 7.3).

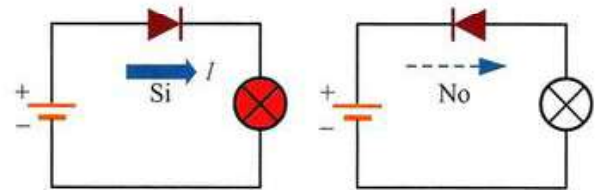


Figura 7.3.

Su aplicación es especialmente interesante en aquellos dispositivos en que sea necesaria esta cualidad, como, por ejemplo, en los rectificadores, que son capaces de convertir la C.A. en C.C.

Antes de pasar a estudiar los diodos de unión, conviene tener una idea muy clara de lo que es un semiconductor.

Existen ciertos cuerpos como, por ejemplo, el selenio, el germanio y el silicio que, en condiciones normales, son aislantes, pero con ciertas modificaciones de su organización molecular se pueden convertir en conductores. Esto es debido a que su estructura cristalina no dispone de electrones libres capaces de establecer una corriente eléctrica; sin embargo, los electrones de sus últimas órbitas pueden ser liberados artificialmente, por lo que se convierten en cuerpos conductores. El procedimiento más habitual para conseguirlo consiste en introducir, en el interior de estos materiales sustancias con una estructura atómica determinada.

Actividad experimental 7.1

Consigue un diodo y conéctalo intercalado en el circuito de una pila y una lamparita (Figura 7.4). Si conectas el cátodo del diodo (terminal negativo indicado por

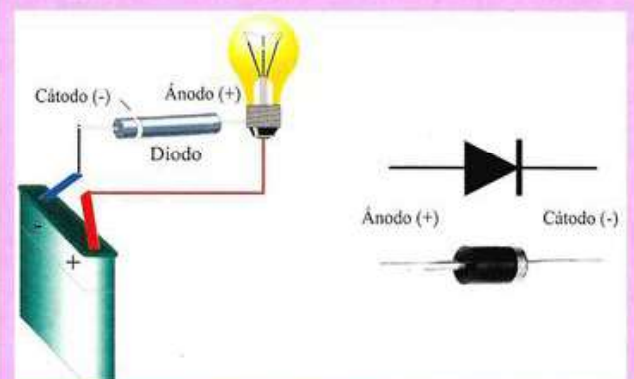


Figura 7.4.

una raya en el componente) en el polo negativo de la pila, observarás que dicha lamparita se enciende. Sin embargo, si inviertes las conexiones del diodo, la lamparita no se encenderá.

En definitiva, el diodo actúa como un interruptor que estará cerrado en caso de estar bien polarizado y abierto cuando la polarización esté invertida.

Esta propiedad es muy interesante y está motivada por la estructura interna del diodo. En efecto, este componente está constituido por la unión de dos cristales semiconductores, uno de tipo P y otro de tipo N (Figura 7.5).

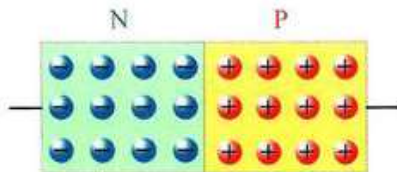


Figura 7.5. Unión de dos cristales de tipo P y N.

Estos cristales son de silicio o de germanio con la adición de algún otro elemento que les confiere una cierta polaridad, ya sea P (exceso de cargas positivas) o N (exceso de negativas).

¿Cómo se forman estos cristales?

Estudiemos el caso del silicio como cuerpo semiconductor, por ser el más utilizado.

7.3. Características atómicas del silicio

Es un cuerpo cristalino cuyas moléculas tienen formas geométricas regulares. Por otro lado, posee 4 electrones de valencia, es decir, que en su órbita exterior solo existen cuatro electrones (Figura 7.6). Como se sabe, todo cuerpo precisa de 8 electrones de valencia para que mantenga una estabilidad normal. El silicio es un cuerpo estable con solo 4 electrones de valencia, ya que se complementa con 4 electrones de los átomos vecinos (enlace covalente) y así suma los 8 electrones precisos para su estabilidad.

En estas condiciones, el átomo de silicio es completamente aislante, ya que no existen en su seno electrones libres capaces de establecer una corriente eléctrica.

Silicio tipo N: existen elementos, como el antimonio, el arsénico, etc., que poseen 5 electrones de valencia. Si unimos uno de estos elementos con el silicio, se producirán enlaces covalentes incompletos, ya que uno de los electrones de estos elementos quedará libre por estar las órbitas

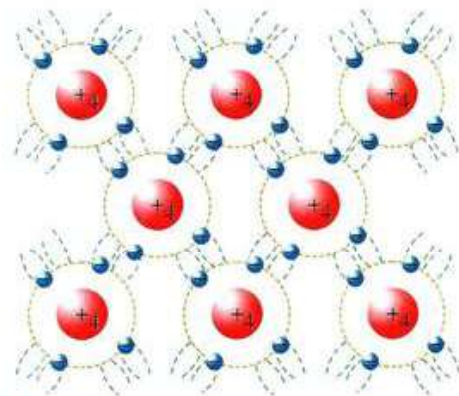


Figura 7.6. Enlaces covalentes en el silicio.

completas. El resultado de la combinación del silicio con la impureza de antimonio es un cristal denominado silicio tipo N, ya que existen cargas negativas libres (Figura 7.7).

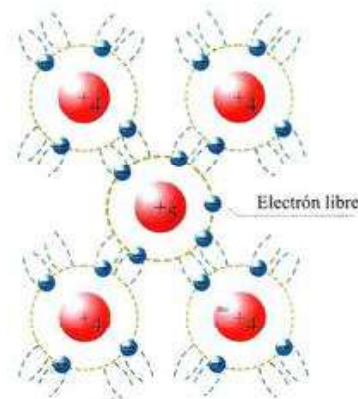


Figura 7.7. Enlaces covalentes incompletos de un cristal de silicio tipo N.

Silicio tipo P: de la misma forma que en el caso anterior, si al silicio en estado puro se le introducen impurezas que, en vez de tener 5 electrones de valencia, solo dispongan de 3, como el indio, el aluminio, el galio, el boro, etc., el enlace covalente será, otra vez, incompleto (Figura 7.8).

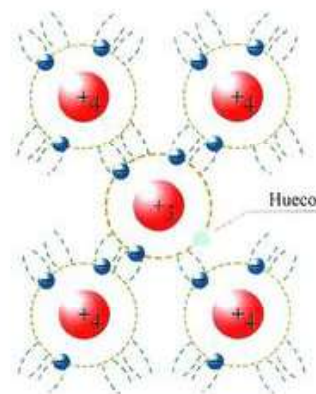


Figura 7.8. Enlaces covalentes incompletos en un cristal P.

El átomo de impureza, al tener sólo 3 electrones, no llega a rellenar todos los huecos, pues solo satisface las necesidades de 3 de los 4 átomos de silicio. Se necesita, pues, un electrón más para rellenar ese hueco.

Estos huecos representan una falta de electrones y producen una naturaleza positiva al cristal, que en este caso se denomina silicio tipo P.

7.4. El diodo de unión

El diodo de unión se forma al juntar un cristal tipo P con otro tipo N (Figura 7.9). Da la impresión de que, al juntar estos dos cristales de cargas opuestas, en la unión AB se producirá una neutralización de cargas, pero no es así, ya que en dicha unión aparece una pequeña barrera por efecto de la repulsión que evita este fenómeno.

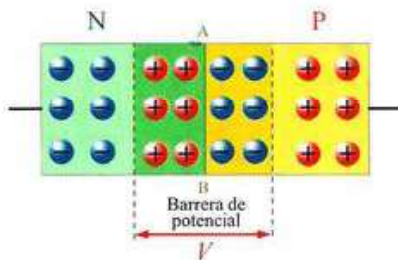


Figura 7.9. Barrera de potencial en una unión PN.

Ahora bien, si conectamos una batería al diodo (Figura 7.10), de tal forma que el polo positivo de este coincida con el cristal tipo P y el negativo con el cristal tipo N, las cargas negativas serán repelidas hacia la superficie de la unión con gran fuerza y vencerán de este modo la barrera AB. Por tanto, se producirá una corriente eléctrica I_F a través del diodo, neutralizándose los electrones con los huecos.

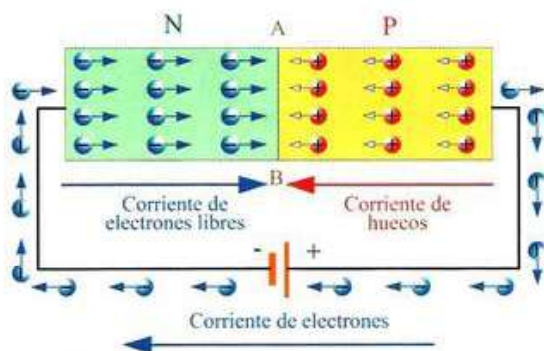


Figura 7.10. Polarización directa de un diodo de unión.

Veamos ahora qué pasaría si conectásemos la batería en sentido contrario (Figura 7.11).

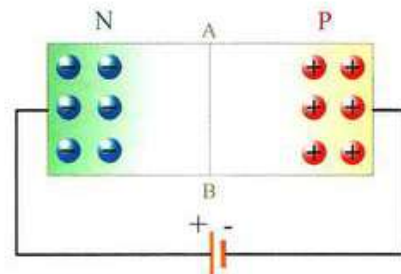


Figura 7.11. Polarización inversa del diodo de unión.

Los electrones libres del cristal N se sentirán atraídos por el polo positivo de la batería y los huecos por el polo negativo de esta, por lo que se crea en la unión AB una especie de vacío que evita la circulación de corriente a través del diodo. En este caso se ha conectado el diodo en sentido inverso. A pesar de ello, siempre existe una pequeña corriente de fuga que recibe el nombre de *corriente inversa del diodo* (I_R).

Para que el diodo conduzca polarizado en sentido directo, necesita ser sometido a una tensión mínima de polarización, que en el caso del germanio es de 0,2 V y de 0,6 V para el silicio.

Las características de los diodos semiconductores varían grandemente con la temperatura. De tal forma que, cuanto mayor sea la temperatura de la unión, mayor será el número de electrones libres y, por tanto, aumentará la corriente de conducción. En el germanio estas variaciones son excesivas, por encima de los 75 °C se hace difícil su utilización, mientras que el silicio puede emplearse hasta los 200 °C aproximadamente. En la actualidad, la gran mayoría de semiconductores es de silicio.

7.4.1. Características en polarización directa de un diodo

Obtener las características de polarización de un diodo significa determinar la relación existente entre los diferentes valores de la tensión de polarización (V_F) y la corriente directa (I_F).

Para obtener experimentalmente esta relación habría que realizar el ensayo que se muestra en la Figura 7.12. En ella, la lectura de V_F indica la tensión de polarización directa en voltios y la lectura de la corriente directa I_F .

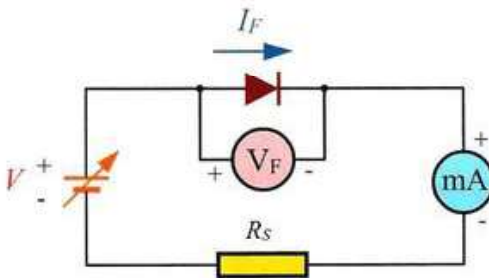


Figura 7.12. Circuito para obtener la curva de polarización directa de un diodo.

En la Figura 7.13 se puede apreciar la curva característica de polarización del diodo ensayado. La curva tiene forma exponencial en las proximidades del cero y se acerca al valor de la intensidad de corriente máxima admisible a medida que aumenta la tensión. Esto indica que la resistencia del diodo es de muy bajo valor y que disminuye rápidamente al aumentar la tensión.

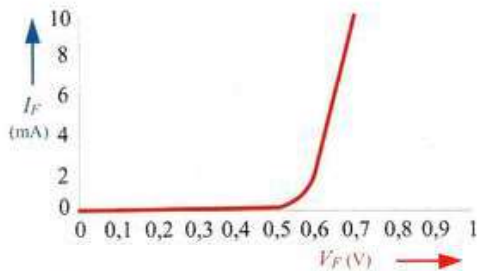


Figura 7.13. Curva de polarización directa de un diodo.

Cuando polarizamos directamente un diodo, este no comienza a conducir de una forma apreciable hasta que le aplicamos la mínima diferencia de potencial de barrera, conocida por el nombre de tensión umbral. En el caso del germanio esta tensión es de 0,2 V y en el del silicio 0,6 V. Por debajo de esta tensión, la corriente es muy pequeña y por encima aumenta considerablemente.

7.4.2. Características en polarización inversa de un diodo

Para obtener la curva característica inversa bastará con invertir la corriente del diodo, de tal forma que el cristal N esté conectado al positivo de la pila y el P al negativo (Figura 7.14).

Ya se dijo anteriormente que cuando el diodo queda sometido a una tensión inversa V_R , aparece una pequeña corriente de fuga I_R , a la cual denominábamos corriente in-

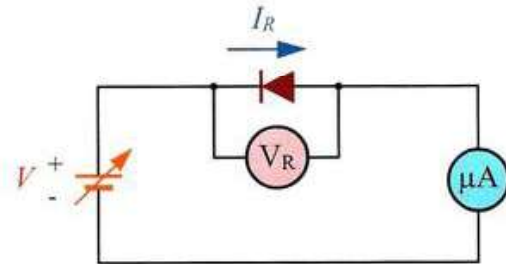


Figura 7.14. Circuito para obtener la característica inversa de un diodo.

versa. Esta corriente es del orden de unos μA o nA , tal como se puede apreciar en la curva de la Figura 7.15 correspondiente a la característica inversa del diodo.

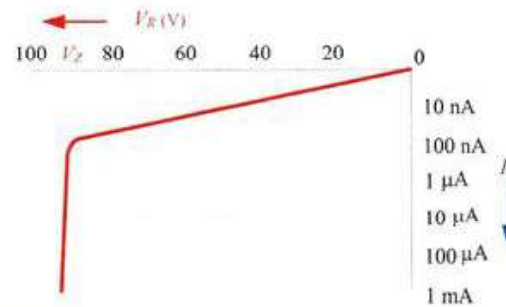


Figura 7.15. Característica inversa de un diodo.

Los fabricantes de diodos expresan el valor de la corriente inversa en sus hojas de especificaciones técnicas. Así, por ejemplo, la serie de diodos con la referencia 1N4001 a 1N4007 establece una corriente inversa de $10 \mu\text{A}$ cuando son polarizados inversamente.

Observa que, según se aumenta la tensión inversa, también lo hace la corriente, hasta que se llega a un valor V_Z , llamado tensión de ruptura del diodo. En este momento aparece un efecto de avalancha y aumenta bruscamente la intensidad de corriente inversa, lo que provoca la destrucción del diodo por la excesiva disipación de calor.

Para que esto no ocurra, es necesario diseñar las condiciones de trabajo del diodo con una tensión inversa siempre menor a su tensión de ruptura.

Los fabricantes de diodos especifican los valores de la **tensión inversa pico** en sus hojas de especificaciones técnicas. Así, por ejemplo, mientras el diodo con la referencia 1N4001 soporta una tensión máxima inversa de 50 V, el 1N4007 llega a soportar 1.000 V.



**En el MATERIAL WEB elaborado para este texto se incluyen las hojas de características de la familia de diodos 1N4001-1N4007.

En la Figura 7.16, se muestra la curva característica completa de un diodo de unión.

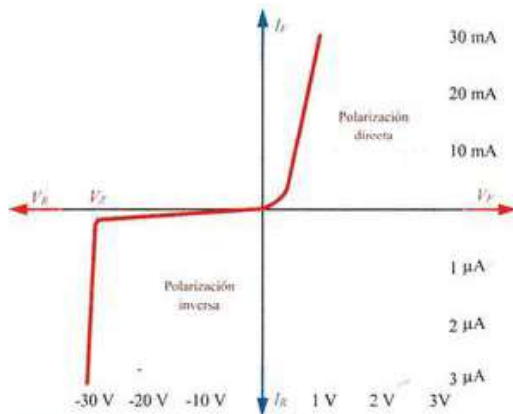


Figura 7.16. Curva característica de un diodo de unión.

7.4.3. Potencia y corriente nominal

Un diodo se diseña para trabajar óptimamente en unas condiciones nominales determinadas. Existen dos formas de provocar la destrucción de un diodo:

- Exceder la tensión inversa de ruptura.
- Exceder la potencia máxima nominal.

Como ocurría con las resistencias, los diodos poseen una cierta capacidad de disipar el calor que se produce en su unión. Este calor depende de la potencia a la que trabaja el diodo, que depende, a su vez, del producto de la corriente por la tensión de este.

Si la potencia que se produce en el diodo es superior a su capacidad de disipación, este aumentará excesivamente su temperatura y acabará deteriorándose.

Existen algunos fabricantes que especifican la potencia nominal de sus diodos en las hojas de información técnica. No obstante, lo normal es que en estas informaciones únicamente aparezca la corriente máxima de polarización directa. Bastará con no sobrepasar este valor para que en ningún caso se supere la potencia máxima nominal.

Así, por ejemplo, la gama de diodos con la referencia 1N4001 a 1N4007 permite una corriente directa nominal de 1 A, mientras que el diodo 1N418 permite una corriente directa de 150 mA y una disipación de potencia a $T_{amb} = 25^\circ\text{C}$ de 500 mW.

7.4.4. Línea de carga de un diodo

Mediante el conocimiento de la línea de carga, podremos encontrar el valor exacto de la corriente y la tensión del diodo para una carga determinada.

En el circuito de la Figura 7.17 se puede apreciar una fuente de tensión V que suministra energía a una resistencia R_S en serie con un diodo. La tensión que aparecerá en él es V_F . La tensión que aparece en los bornes de R_S será igual a la tensión total V menos la caída de tensión V_F que provoca el diodo.

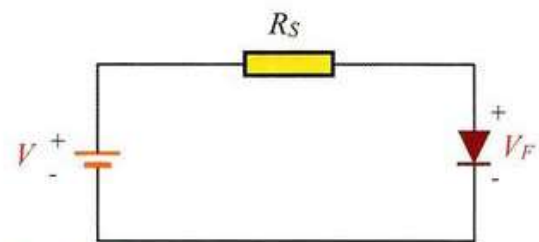


Figura 7.17. Circuito para trazar la línea de carga de un diodo.

Aplicando la ley de Ohm, obtenemos la corriente del circuito:

$$I_F = \frac{V - V_F}{R_S}$$

Esta corriente se puede representar mediante una recta que nos ayudará a determinar el punto de trabajo del diodo para unos valores determinados de tensión V y resistencia R_S .

Actividad resuelta 7.1

El valor de la corriente en el circuito de la Figura 7.18 es:

$$I_F = \frac{1,2 - V_F}{175}$$

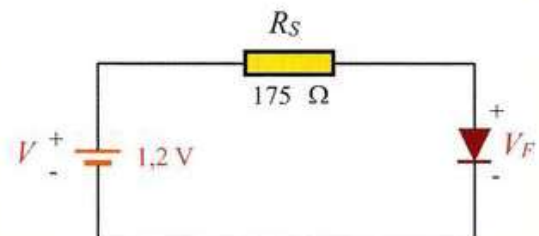


Figura 7.18.

Observa cómo aparece una relación lineal entre la corriente y la tensión.

Para realizar una representación gráfica de esta ecuación, basta con dar valores a V_F y obtener diferentes puntos de la línea.

En el caso de que

$$V_F = 0 \text{ V}, I_F = \frac{1,2 - 0}{175} = 0,007 \text{ A} = 7 \text{ mA}$$

En el caso de que

$$V_F = 1,2 \text{ V}, I_F = \frac{1,2 - 1,2}{175} = 0$$

En el caso de que la curva característica del diodo sea la que se representa en la Figura 7.19, la línea de carga será una recta que corte los puntos de 1,2 V y 7 mA. El punto de intersección de estas dos curvas nos indica los valores de la tensión y corriente del diodo para una tensión de 1,2 V y una resistencia limitadora de 175 Ω .

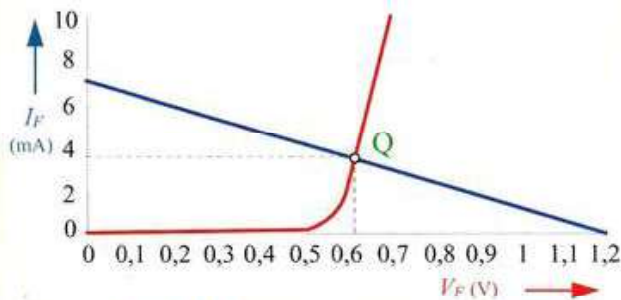


Figura 7.19. Recta de carga del diodo.

En nuestro ejemplo se obtiene una corriente de 3,6 mA y una tensión de polarización directa en el diodo de 0,62 V. A este punto se lo denomina punto de funcionamiento del diodo.

7.4.5. Característica aproximada de un diodo

Al estudiar las resistencias y condensadores, hemos tenido oportunidad de comprobar que los valores de la resistencia y la capacidad de estos dispositivos poseen un cierto margen de tolerancia. Lo mismo ocurre con los valores característicos de un diodo, de los cuales no se puede afirmar que sean exactos. Por esta razón, se puede encontrar una curva característica aproximada de trabajo de un diodo sin cometer, por nuestra parte, grandes errores. Además, este hecho simplifica notablemente la resolución de los circuitos con diodos.

En la Figura 7.20, se muestra dicha curva aproximada. Se supone que cuando el diodo está polarizado con una ten-

sión inversa, este se comporta como un interruptor abierto y no deja pasar ninguna corriente eléctrica.

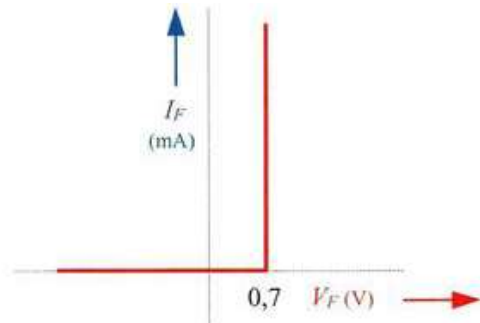


Figura 7.20. Característica aproximada de un diodo.

Por otro lado, se considera que se necesitan aproximadamente unos 0,7 V para que un diodo de silicio conduzca como un interruptor cerrado. Se supone que, hasta que no se alcance esa tensión, la corriente directa es nula.

De esta explicación se podrían sacar los esquemas equivalentes de las Figuras 7.21(a) y (b).

Cuando el diodo es polarizado directamente se comporta como un interruptor cerrado en serie con una fuente de tensión de 0,7 V. De tal forma que, si la tensión de polarización es superior a 0,7 V, el interruptor se cierra [Figura 7.21(a)].

Si se invierte la tensión de polarización del diodo, este se comporta como un interruptor abierto [Figura 7.21(b)].

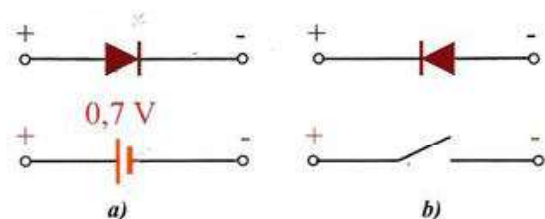


Figura 7.21. (a) Diodo polarizado directamente. (b) Diodo polarizado inversamente.

Actividad resuelta 7.2

¿Cuál será la corriente directa del diodo del circuito de la Figura 7.22?

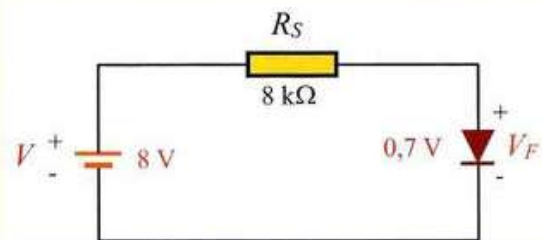


Figura 7.22.

Solución: Para resolver este ejercicio, basta con tener en cuenta la curva característica aproximada, aplicando la ley de Ohm:

$$I = \frac{8 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{8.000 \ \Omega} = 0,00091 = 0,91 \text{ mA}$$

Actividad propuesta 7.1

¿Qué valor debería poseer R_5 en el circuito de la Actividad resuelta 7.2 para conseguir una corriente directa por el diodo de 7,3 mA?

Resultado: 1 k Ω

7.4.6. Hoja de características de un diodo

Partiendo de la hoja de características del diodo 1N4004 vamos a analizar los principales parámetros que figuran en las mismas.

En la Figura 7.23 se muestra el encapsulado y las medidas del diodo.

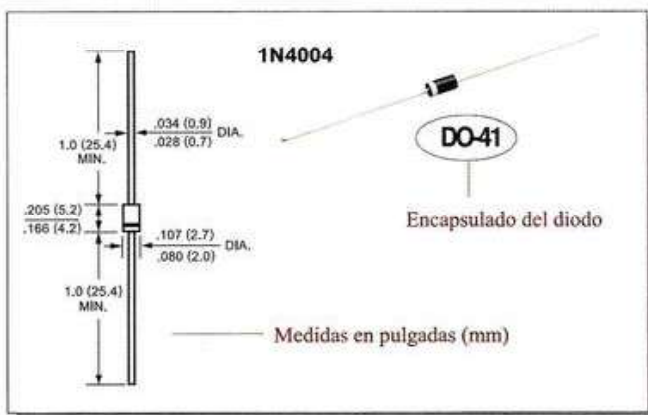


Figura 7.23. Encapsulado y medidas del diodo 1N4004.

Como se puede observar, del recorte extraído de las hojas de características, la tensión pico máxima que soporta este diodo en corriente alterna es de 400 V, y la corriente directa máxima es de 1 A.

MAXIMUM RATINGS (At TA = 25°C unless otherwise noted)

RATINGS	SYMBOL	1N4004	UNITS
Maximum Recurrent Peak Reverse Voltage	V _{RRM}	400	Volts
Maximum RMS Voltage	V _{RMS}	280	Volts
Maximum DC Blocking Voltage	V _{DC}	400	Volts
Maximum Average Forward Rectified Current at TA = 75°C	I _O	1.0	Amps

Tensión inversa pico máxima (CA)
 Tensión inversa eficaz máxima (CA)
 Tensión inversa continua máxima (CC)
 Corriente máxima directa

Figura 7.24. Valores máximos.

Del recorte de la Figura 7.25 se deduce que la tensión de polarización directa máxima a una corriente de 1 A, es de 1,1 V. Además, la corriente inversa es de 5 μ A a 25°C.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (At TA = 25°C unless otherwise noted)

CHARACTERISTICS	SYMBOL	1N4004	UNITS
Maximum Instantaneous Forward Voltage at 1.0A DC	V _F	1.1	Volts
Maximum DC Reverse Current at Rated DC Blocking Voltage @TA = 25°C	I _R	5.0	μ Amps
@TA = 100°C		50	

Tensión directa máxima a 1 A en CC
 Corriente inversa máxima a 25°C en CC
 Corriente inversa máxima a 100°C en CC)

Figura 7.25. Características eléctricas.

En la Figura 7.26 se muestra la curva de polarización directa de este diodo.

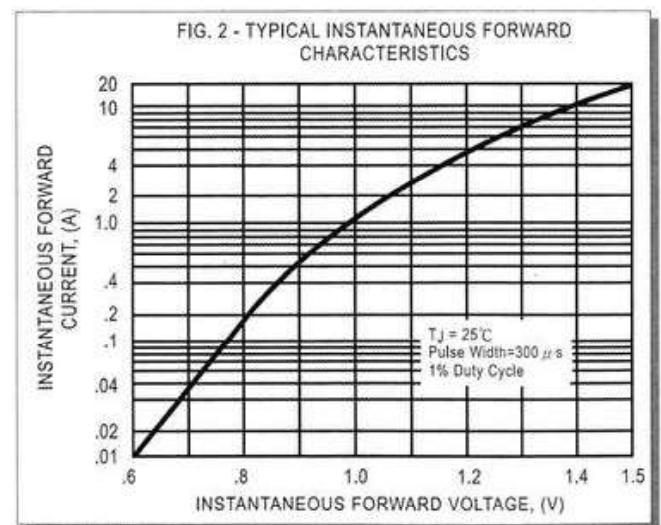


Figura 7.26. Curva de polarización directa.

7.5. Dispositivos optoelectrónicos

Dentro de la denominación de dispositivos optoelectrónicos se incluyen todos aquellos elementos semiconductores capaces de producir una radiación luminosa comprendida dentro del espectro visible o fuera de él (infrarrojos), como lo son los diodos LED. También se incluyen los componentes sensibles a la luz, como, por ejemplo, los fotodiodos.

7.5.1. Diodos luminiscentes (LED)

Seguro que ya conoces este tipo de dispositivo electrónico, ya que poseen una gran aplicación como elementos señalizadores del encendido de cualquier equipo electrónico, como puede ser: un equipo de sonido, un ordenador, etc. Haciendo combinaciones con ellos, también pueden ser empleados para visualizar números y letras en pequeños indicadores luminosos (*displays*), con los cuales se pueden presentar los resultados en equipos de medida, calculadoras, etc.

En la Figura 7.27(a) se muestra el aspecto de un diodo LED y en la Figura 7.27(b) su representación esquemática.

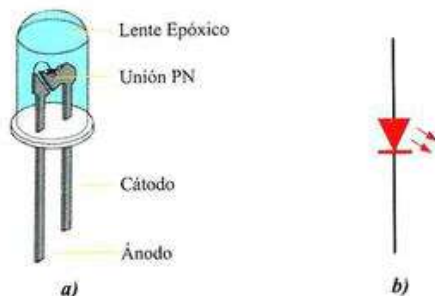


Figura 7.27. Diodo LED. (a) Aspecto físico. (b) Símbolo.

Actividad experimental 7.2

Consigue un diodo LED, estudia su aspecto y conéctalo a través de una resistencia serie de unos 430Ω a una fuente de alimentación de 10 V, tal como se muestra en la Figura 7.28.

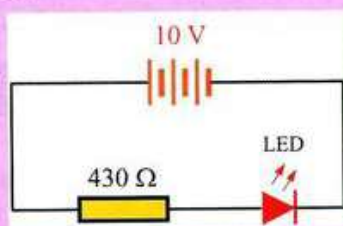


Figura 7.28.

Habrás podido comprobar que para que el diodo LED se ilumine, hay que conectarlo de tal forma que quede polarizado directamente. El terminal que representa al ánodo suele aparecer en el componente indicado con una marca (este terminal suele tener una longitud mayor que la del cátodo.) (Por si fuera poco, se añade un pequeño aplanamiento en la cápsula en las inmediaciones del terminal del cátodo.) En el caso de no estar seguro de cuál es cada uno de los terminales, se puede verificar el estado de conducción con un polímetro, tal como se hacía con los diodos de unión PN.

¿Se enciende el diodo LED, al polarizarlo directamente?

Los diodos LED se fabrican mediante la unión de dos cristales semiconductores PN, a los que se les ha contaminado de una forma especial. Cuando una unión de este tipo se polariza con una tensión directa, al igual que ocurría con los diodos convencionales, los electrones de valencia del cristal tipo N atraviesan la unión y se recombinan con los huecos del cristal tipo P. Dado que dichos electrones se trasladan de un nivel de energía más alto a uno más bajo, se produce una liberación de energía, que en este tipo de diodos se manifiesta en forma de radiaciones electromagnéticas dentro del espectro luminoso.

Los diodos LED se fabrican con elementos especiales, como arseniuro de galio (GaAs) y fósforo. Para conseguir modificar la longitud de onda de la radiación de la onda luminosa y así conseguir diodos con emisiones de diferentes colores (roja, naranja, verde, amarilla, azul, o infrarroja), se contaminan los cristales de una forma adecuada. Así por ejemplo, los diodos luminiscentes fabricados con galio y fósforo (GaP) emiten luz roja cuando se les añade óxido de cinc y emiten luz verde con la adición de nitrógeno.

Características de los LED

Aparte del color de los diodos luminiscentes, sus características más relevantes son similares a las de los diodos convencionales:

La **tensión directa** (V_F) es la caída de tensión que se produce entre los extremos del diodo LED cuando por él fluye la corriente directa. Esta tensión suele ser del orden de 1,5 a 2,2 V para la mayor parte de los modelos. Cuando se desconoce la tensión directa exacta, bastará con tomar como valor aproximado 2 V.

La **corriente de excitación directa** (I_F) es la corriente que debe circular por el diodo LED para alcanzar la intensidad luminosa esperada. Para la mayoría de los modelos, esta corriente está comprendida entre 10 y 50 mA.

La **corriente inversa** (I_R) es la máxima corriente que puede fluir por el diodo luminiscente cuando a este se le aplica una tensión de polarización inversa. Este valor suele estar en torno a los 10 μ A.

La **disipación de potencia** es aquella parte de la potencia que el diodo luminiscente no convierte en luz y que acaba degradándose en calor, por lo que tiene que evacuarla al exterior. Por esta razón, los diodos LED se conectan en serie con una resistencia, con el fin de limitar la corriente que fluye por ellos. Para calcular dicha resistencia, se aplica la ley de Ohm al circuito de la Figura 7.29:

$$I_F = \frac{V - V_F}{R_s} \quad R_s = \frac{V - V_F}{I_F}$$

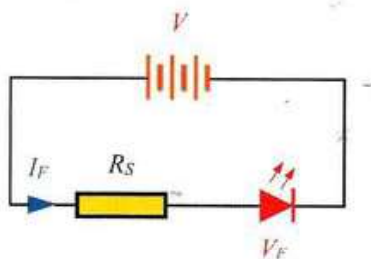


Figura 7.29. Conexión de un diodo LED.

En la Tabla 7.1 se muestran las características de algunos tipos de diodos LED.

Tabla 7.1. Características de diodos LED.

Tipo de LED		V_F	I_F
Tipo indicador	Rojo 	1,2 V	5 mA
Alta luminosidad	Rojo 	1,2 V	20 mA
Tipo indicador	Verde 	1,6 V	5 mA
	Amarillo 		
Alta luminosidad	Azul 	3,7 V	20 mA
	Blanco 		

Actividad resuelta 7.3

Se quiere determinar la resistencia que hay que conectar en serie con un diodo LED para una tensión de fuente de 12 V. Para ello, tendremos en cuenta que su

tensión directa es de 2 V y que con 20 mA de corriente directa se consigue una emisión luminosa aceptable.

Solución: Aplicando la ley de Ohm al circuito, tendremos que:

$$R_s = \frac{V - V_F}{I_F} = \frac{12 - 2}{0,020} = 500 \Omega$$

Actividad propuesta 7.2

¿Cuál tendría que ser el valor de la resistencia de la Actividad resuelta 7.3, si la tensión de la fuente fuese 9 V?

Resultado: 350 Ω

Las ventajas que poseen los diodos LED, para aplicaciones de señalización, frente a las pequeñas lámparas incandescentes son innumerables, tales como pueden ser: gran duración, elevada resistencia mecánica frente a los impactos y las vibraciones, tamaño reducido y pequeño consumo, que los hacen ideales para aplicaciones en combinación con otros semiconductores.

Una de las aplicaciones que se puede hacer de los diodos LED, es la fabricación de indicadores numéricos de siete segmentos (*displays*). Mediante siete diodos luminiscentes dispuestos como se indica en la Figura 7.30, se pueden representar dígitos del 0 al 9. Para ello, se excitan simultáneamente las combinaciones de diodos que se correspondan en cada caso.

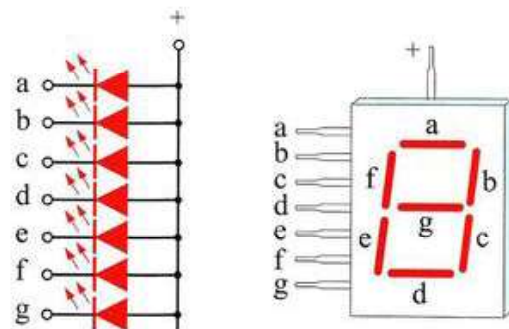


Figura 7.30. Indicador de siete segmentos con diodos LED.

Actividad propuesta 7.3

¿Qué diodos habrá que excitar simultáneamente en el indicador de siete segmentos de la Figura 7.30 para que se ilumine el número 5?

Resultado: a, f, g, c, d

En la actualidad, los indicadores de cristal líquido (LCD) están desplazando a los indicadores con diodos luminiscentes a campos de aplicación más reducidos.

7.5.2. Fotodiodos

Este dispositivo es un diodo especialmente diseñado para que sea sensible a las radiaciones luminosas que en él incidan, de tal forma que al aumentar estas, también lo haga la corriente inversa que fluya por el fotodiodo. Una de las aplicaciones fundamentales de este dispositivo es como fotodetector, elemento capaz de transformar una magnitud luminosa en eléctrica.

Veamos cómo funciona este dispositivo: recuerda cómo cuando a un diodo unión PN se le aplicaba energía térmica se rompía un número determinado de enlaces covalentes y, por tanto, aparecía en ambos cristales un número determinado de portadores de carga minoritarios. Pues bien, en este tipo de diodos además aparece un aumento de portadores minoritarios cuando se aplica energía en forma de radiaciones luminosas. De esta forma, si conectamos un fotodiodo con una tensión de polarización inversa, fluirá una pequeña corriente inversa por él. Los fotodiodos se fabrican de tal forma que la luz pueda incidir en ellos, de tal manera que cuando la intensidad de la radiación luminosa se hace más grande, aumentan los portadores minoritarios y con ellos la corriente inversa. Así se consigue que exista una relación determinada entre la luz y la corriente.

En la Figura 7.31, se muestra el circuito de un fotodiodo polarizado inversamente. Las flechas, que apuntan hacia el componente, indican que el diodo aprovecha la incidencia de la luz en él para funcionar.

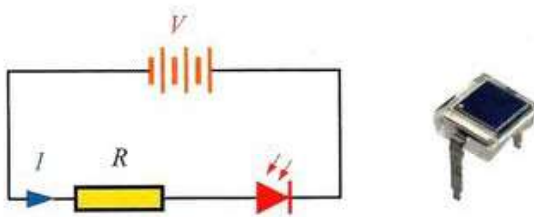


Figura 7.31. Circuito con fotodiodo.

En la Figura 7.32 se muestra la curva de polarización inversa de un fotodiodo.

Observa cómo, al aumentar la intensidad de la radiación luminosa (su unidad de medida es el lux), también lo hace la corriente inversa.

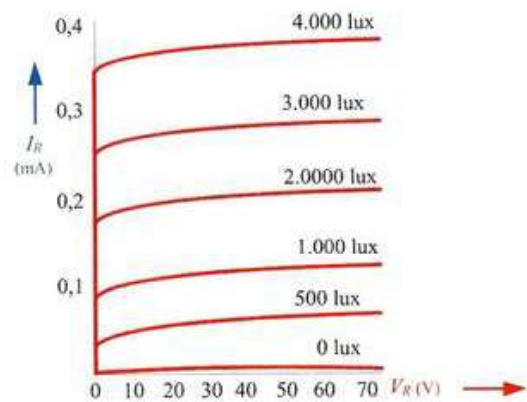


Figura 7.32. Curvas características de un fotodiodo.

Una de las aplicaciones que se puede hacer del fotodiodo, en combinación con el diodo luminiscente, es la fabricación de un *optoacoplador*, tal como se muestra en la Figura 7.33. Estos dos elementos se integran en un solo elemento.

Con un optoacoplador se pueden aislar eléctricamente dos circuitos entre los que hay que intercambiar una determinada señal. La señal de entrada se aplica al diodo LED, con lo que este genera una intensidad luminosa que estará en función de la corriente entregada por la señal. Esta radiación luminosa incide en el fotodiodo, el cual generará una corriente en la salida proporcional a la entregada a la entrada del optoacoplador. Con el uso de optoacopladores se eliminan todos los riesgos que pueden surgir al conectar circuitos que trabajan con señales de muy pequeñas tensiones, con otros circuitos que lo hacen con tensiones elevadas. Por ejemplo, se utilizan para aislar la salida de un ordenador con circuitos exteriores que estén alimentados con tensiones peligrosas. También se utilizan en electromedicina para aislar los circuitos de los electrodos que se han de aplicar al cuerpo humano y en otras muchas aplicaciones.

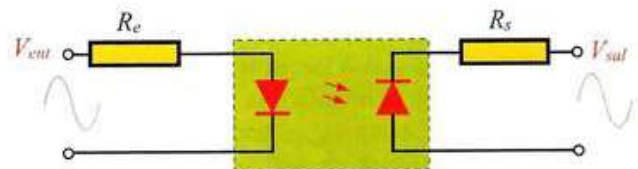


Figura 7.33. Optoacoplador.

Prácticas de laboratorio

7.1. Comprobación de un diodo con polímetro analógico.

Consigue un diodo y un polímetro. Para comprobar si el estado de la unión del diodo es perfecto, basta con conectar el polímetro utilizado como óhmetro entre sus terminales, de tal forma que la punta de prueba negra (-) esté unida al ánodo del diodo y la roja (+) al cátodo (Figura 7.34).

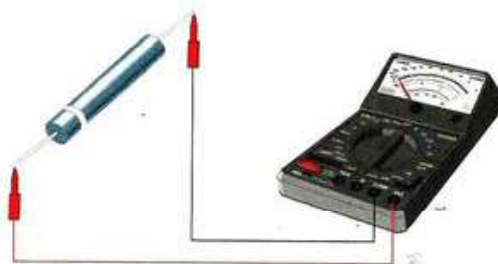


Figura 7.34. Comprobación de un diodo mediante polímetro analógico.

Si el resultado de la medida es 0 ohmios será señal de que el diodo está en buen estado (la fuente de alimentación del óhmetro ha polarizado directamente al diodo). Una vez que hayas comprobado esto último, invierte las conexiones. Si el polímetro indica infinito (en este caso la fuente de alimentación polariza inversamente al diodo), el diodo está en perfecto estado.

Si al realizar estas comprobaciones se mide una resistencia alta con ambas polarizaciones, nos indicará que el diodo está abierto. En el caso de que se mida una resistencia baja con ambas polarizaciones estaremos ante un diodo en cortocircuito. En el caso de que se mida una resistencia relativamente baja con la polarización inversa estaremos ante un diodo con fugas.

Conviene tomar ciertas precauciones cuando se trata de comprobar diodos de pequeña potencia, ya que se puede dar el caso de que la corriente que proporciona el óhmetro para tomar la medida sea suficiente para destruir el diodo. En estos casos, es aconsejable el uso de las escalas más altas del óhmetro, ya que estas reducen la corriente de medida a valores aceptables.

7.2. Comprobación de un diodo con polímetro digital.

Estos aparatos de medida poseen un campo de medida específico para medir diodos, y que aparece representado con el símbolo del diodo. Si conectamos la punta de prueba negra (-) al cátodo del diodo y la roja (+) al

ánodo, el polímetro muestra en la pantalla digital la tensión de polarización directa, por ejemplo **0,476 V**.

En el caso de invertir los cables de conexión (polarización inversa), en la pantalla se lee 1, lo que nos indica que el diodo no conduce y que está en buen estado. Si en ambas comprobaciones, aparece 1 en la pantalla, estamos ante un diodo defectuoso que se encuentra abierto. En el caso de que apareciese 0 en ambas comprobaciones, el diodo estaría en cortocircuito.



Figura 7.35. Comprobación de un diodo mediante el polímetro digital.

7.3. Identificación de las características de los diodos semiconductores.

Toma un conjunto de diferentes diodos semiconductores, determina su polaridad y comprueba con el polímetro su estado. A continuación, identifica su referencia y consigue las hojas de especificaciones técnicas que facilita su fabricante. Con ellas determina sus características más relevantes. Una vez hecho esto, observa las diferencias existentes entre las siguientes características de dichos diodos: corriente y potencia nominal, tensión de ruptura y corriente inversa. Para facilitar la tarea de identificación de los diodos, consigue los códigos y normas internacionales más usuales para identi-

car dispositivos semiconductores y comprueba las referencias dadas por los fabricantes de los diodos.



En las siguientes direcciones de Internet podrás encontrar las características que necesites de cualquier componente electrónico (diodos, transistores, CI, etc.):

- <http://www.datasheetlocator.com/es/>
- <http://www.datasheetcatalog.net/es/>

7.4. Obtención de curva de polarización directa de un diodo. Mediante el circuito de la Figura 7.36 vamos a determinar la curva característica del diodo 1N4001. Para hacerlo correctamente, ten en cuenta las siguientes consideraciones:

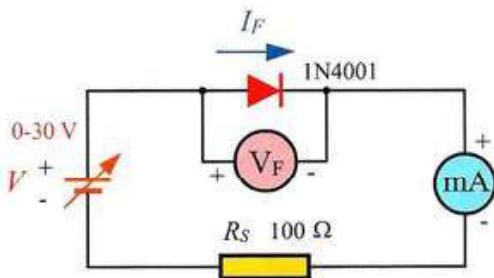


Figura 7.36. Circuito para obtener la curva característica de un diodo.

1) Consultar las características del diodo por ensayar que facilitan los fabricantes en las hojas de especificaciones técnicas y tener en cuenta los valores máximos de tensión inversa y corriente directa del mismo.

- 2) Para realizar el ensayo necesitaremos una fuente de alimentación variable de 0 a 30 V, dos polímetros (uno, utilizado como voltímetro, para medir la tensión directa y otro, utilizado como miliamperímetro, para la medida de la corriente directa), y una resistencia de 100 Ω. En la Figura 7.37 se muestra el esquema de montaje práctico sobre placa *protoboard*.
- 3) Comenzar el ensayo con una tensión de 0 voltios; ir aumentando los valores de tensión de la fuente hasta conseguir una tensión directa en el diodo de 0,1 V. Tomar la lectura del miliamperímetro y anotar los resultados en la siguiente tabla de datos.

Tabla de datos

Tensión fuente (V)	Tensión resistencia (V)	Tensión diodo (V)	Corriente (mA)
		0,1	
		0,2	
		0,3	
		0,4	
		0,5	
		0,6	
		0,7	
		0,8	

4) Seguir aumentando la tensión de la fuente para conseguir incrementos en la tensión del diodo de 0,1 V hasta llegar a los 0,8 V e ir anotando las lecturas de los diferentes aparatos de medida:

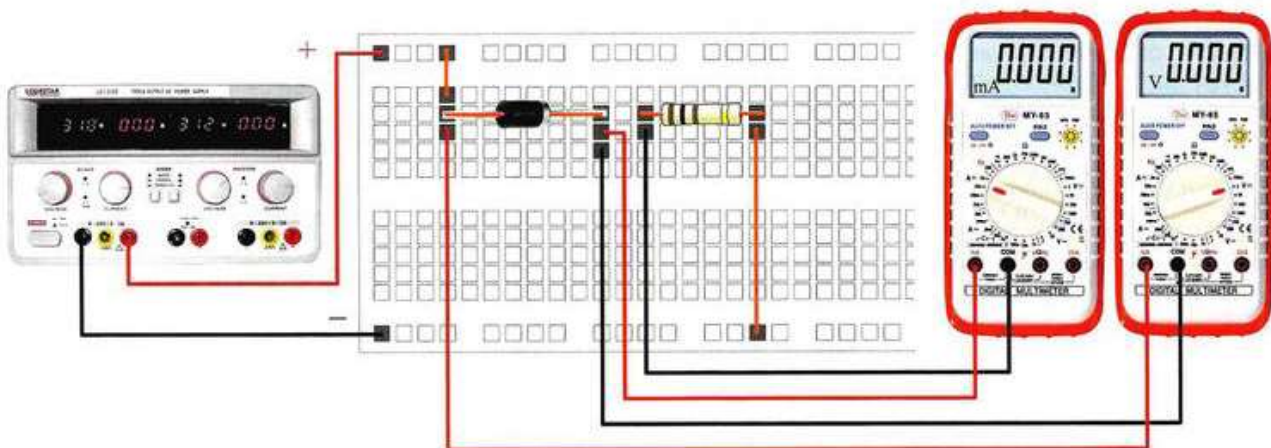


Figura 7.37. Montaje práctico sobre placa *protoboard*.

- 5) Invertir la polaridad de la fuente de alimentación y tomar varios puntos de medida, procurando no sobrepasar el valor máximo de la tensión máxima de ruptura del diodo.
- 4) Con los puntos obtenidos, trazar la curva característica del diodo. Comparar la curva obtenida con la facilitada por el fabricante.

7.5. Circuito para dos niveles de iluminación. Se trata de aprovechar la propiedad que posee el diodo semiconductor de conducir en un solo sentido. El circuito consiste, básicamente, en conectar en serie un diodo a una lámpara sometida a corriente alterna, tal como se indica en la Figura 7.38. Dado que el diodo solo permite el paso de la corriente en un solo sentido, los semiciclos negativos de la red de C.A. quedan anulados para la lámpara. De esta forma, la tensión que aparece en ella será igual al valor medio de los semiciclos positivos. Esta tensión viene a ser un poco menor de la mitad del valor eficaz de la tensión alterna original. Con este circuito, podemos conseguir reducir aproximadamente a la mitad la tensión a que sometemos a la lámpara y con ello reducir la potencia y la luminosidad que esta produce.

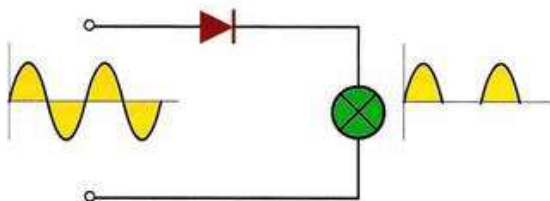


Figura 7.38. El diodo hace que la lámpara solo funcione durante la mitad del ciclo.

Para conseguir que la lámpara trabaje a dos niveles diferentes de iluminación se propone el circuito de la Figura 7.39.

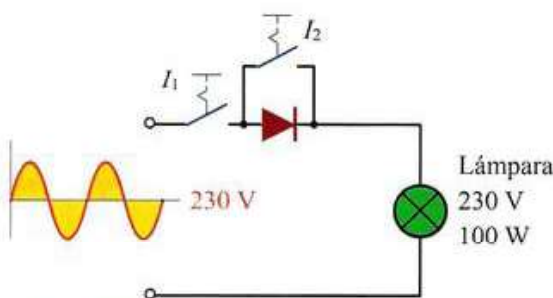


Figura 7.39. Circuito para conseguir dos niveles de iluminación.

Su funcionamiento es como sigue: estando el interruptor I_1 cerrado y el I_2 abierto, toda la corriente debe fluir por el diodo, por lo que, teniendo en cuenta que el valor eficaz de la C.A. es de 230 V, la tensión que aparece en la lámpara es igual a:

$$V_{\text{medio}} = \frac{V_{\text{máx}}}{\pi} = \frac{V_{\text{eficaz}} \cdot \sqrt{2}}{\pi} = \frac{230 \cdot \sqrt{2}}{\pi} = \frac{325}{\pi} = 104 \text{ V}$$

por lo que esta se enciende a media luz. Si ahora cerramos el interruptor I_2 , el diodo queda puentado y anulado, con lo que en la lámpara aparece toda la tensión y funciona a plena potencia.

Monta el circuito propuesto en la Figura 7.39 y comprueba su funcionamiento, midiendo las diferentes tensiones que aparecen en él para las dos posibilidades de iluminación.

El diodo que se utilizará para este montaje deberá ser capaz de soportar la corriente nominal del circuito, así como tener una tensión inversa de ruptura superior a la tensión máxima que bloquea (en este caso tendrá que ser mayor a 325 V). De los diodos que se exponen en la Tabla 7.2, ¿cuál se podría utilizar para esta aplicación?

Tabla 7.2.

Diodo	$V_{\text{inversa pico}}$	$I_{\text{máx}}$
1N4003	200 V	1 A
1N4004	400 V	1 A
1N5406	600 V	3 A

El diodo conectado en serie como reductor de la tensión en circuitos de C.A. para cargas resistivas también se puede utilizar para adaptar receptores de 110 V a redes de 230 V. También se suele usar para conseguir dos niveles de potencia en un calefactor eléctrico.

7.6. Identificación de componentes optoelectrónicos.

Consigue los esquemas de algún circuito electrónico donde aparezcan diodos LED, fotodiodos y optoacopladores. Reconoce su ubicación en el circuito, comprueba su polarización y examina su función en dicho circuito.

Al finalizar cada una de estas actividades, deberás elaborar un informe-memoria sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para su adecuada documentación (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados, cálculos, medidas, etc.).

Actividades de comprobación

- 7.1. ¿A qué tensión de polarización comienzan a conducir los diodos de silicio?
- 0,3 V.
 - 1 V.
 - 0,6 V.
- 7.2. ¿A qué se debe una corriente inversa elevada por el diodo?
- A la aplicación de una tensión directa también elevada.
 - A la aplicación de una tensión inversa también elevada.
 - A la elevación de la corriente por el diodo.
- 7.3. ¿Cuál es la disipación de potencia en un diodo de silicio polarizado directamente, si la tensión del diodo es de 0,7 V y la corriente es 500 mA?
- 7.4. Determina la corriente que se establece por un diodo de silicio que se conecta en serie con una resistencia de 1 k Ω al ser polarizado directamente por una fuente de tensión de 10 V.
- 7.5. En la Figura 7.40 está representada la curva característica del diodo comercial 1N4007. En el caso de que alimentemos a este diodo con una fuente de tensión de 5 V y a través de una resistencia limitadora de 5 Ω , determina la línea de carga, los valores de V y de I , en el punto de trabajo del diodo, para una temperatura de 25°C y la disipación de potencia de este.

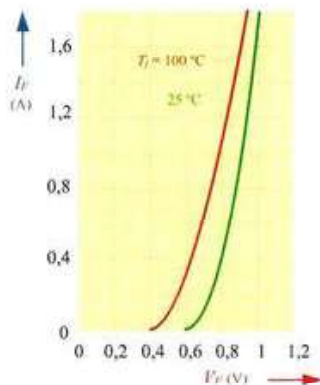


Figura 7.40. Curva característica del diodo 1N4007.

- 7.6. En la Tabla 7.3 se muestran algunas de las especificaciones de una serie de diodos. ¿Cuál de estos diodos trabajaría en óptimas condiciones en el circuito de la Figura 7.41?

Tabla 7.3.

Diodo	$V_{\text{inversa pico}}$	I_{max}
1N914	75 V	200 mA
1N5404	400 V	3 A
1N4003	200 V	1 A

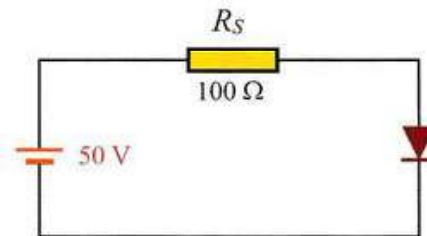


Figura 7.41.

- 7.7. ¿Qué valor deberá tener la resistencia R_S en el circuito de la Figura 7.41 para poder utilizar el diodo 1N914.
- 7.8. En el circuito de la Figura 7.41 se mide con un voltímetro una tensión de 0 V entre los terminales del diodo y 50 V entré los terminales de la fuente de alimentación, ¿cuál es la posible causa de esta anomalía?
- La unión del diodo está en cortocircuito.
 - La unión del diodo ha quedado abierta.
 - Ninguna anomalía. El funcionamiento es el adecuado.
- 7.9. En el circuito de la Figura 7.41 se mide con un voltímetro una tensión de 50 V entre los terminales del diodo, ¿cuál es la razón de esta anomalía?
- La unión del diodo está en cortocircuito.
 - La unión del diodo ha quedado abierta.
 - Ninguna anomalía. El funcionamiento es el adecuado.
- 7.10. ¿Qué resistencia comercial habrá que conectar a un diodo LED para que este trabaje con una corriente directa de unos 18 mA y una tensión directa de 2 V, si se le conecta a una tensión de 50 V?

■ Actividades de ampliación

7.1. Busca en Internet una relación completa de los diferentes encapsulados en los que se fabrican los diodos. Describe sus características, tamaño y el uso que se les da para las diferentes aplicaciones.

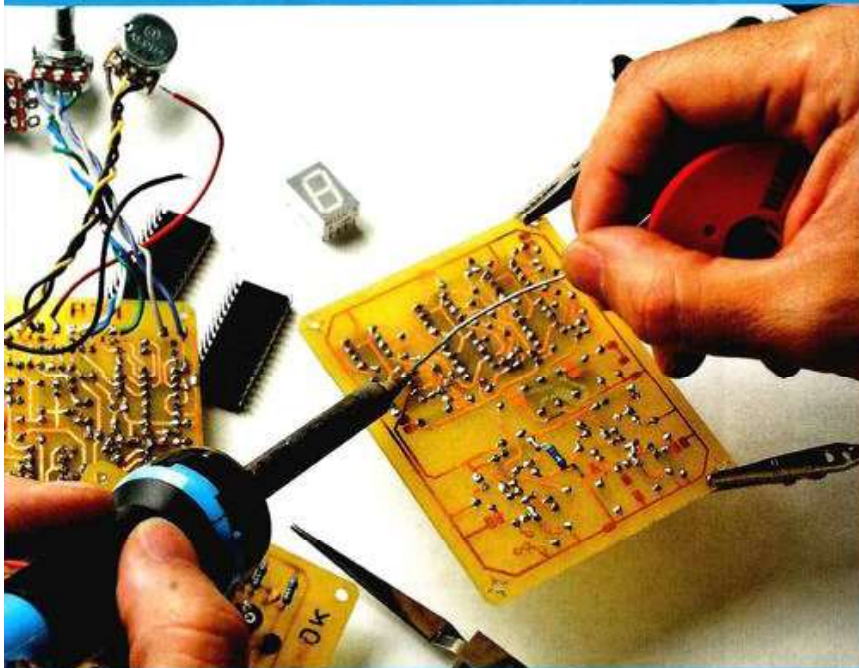
A modo de ejemplo, en la Figura 7.42 se muestra una tabla resumen de los encapsulados para los diodos más comunes.

			
DO-41	DO-35	TO-220AC	SOT-223
			
PWRTAB	SOD-27	SOD-57	SOD-80
			
SMA	Dpak	SOD-123	D618sl
			
DO-5	TO-3	TO-200AB	TO-48

Figura 7.42. Encapsulados para los diodos.

Aplicación de los diodos a circuitos de rectificación

8



La energía eléctrica se produce en grandes cantidades en las centrales eléctricas en forma de corriente alterna y de esta forma es como se suministra a los usuarios. Para aquellas aplicaciones donde sea necesaria una alimentación con corriente continua (alimentación de equipos electrónicos, motores de C.C., equipos de carga de baterías, etc.) se necesita disponer de dispositivos que sean capaces de convertir la C.A. en C.C. Nos referimos a las fuentes de alimentación.

Como complemento práctico, aprenderemos las técnicas en el proceso de la elaboración de una placa de circuito impreso, así como las de soldadura y montaje de componentes electrónicos. Para ello, propondremos la elaboración de una pequeña fuente de alimentación básica.

Contenidos

- 8.1. Circuitos de rectificación
- 8.2. Circuito rectificador de media onda
- 8.3. Circuito rectificador de onda completa
- 8.4. Rectificadores trifásicos
- 8.5. El filtrado
- 8.6. Construcción del circuito impreso y montaje de sus componentes

Objetivos

- Analizar la tipología y características funcionales de los circuitos de rectificación.
- Operar diestramente las herramientas utilizadas en las operaciones de sustitución, soldadura y desoldadura de componentes en circuitos electrónicos, asegurando la calidad final de las intervenciones.
- Diagnosticar averías en circuitos electrónicos analógicos de aplicación general, empleando procedimientos sistemáticos y normalizados en función de distintas consideraciones.

8.1. Circuitos de rectificación

Como circuito rectificador se conoce aquel que tiene la función de convertir o rectificar la C.A. en C.C. Dependiendo del número de diodos que utilizemos y cómo los conectemos, se pueden construir rectificadores de media onda y de onda completa.

Por lo general, los circuitos de rectificación suelen ser una parte importante de las fuentes de alimentación. Estas fuentes suelen disponer de un transformador con el objeto de reducir la tensión de la red eléctrica a valores más adecuados para los equipos que se van a alimentar.

Además de estos elementos, las fuentes de alimentación suelen incorporar en su etapa final un circuito de filtrado, con el fin de conseguir una corriente lo más continua posible.

En la Figura 8.1 se muestran, de una forma esquemática, las diferentes etapas de las fuentes de alimentación que vamos a estudiar en esta unidad.

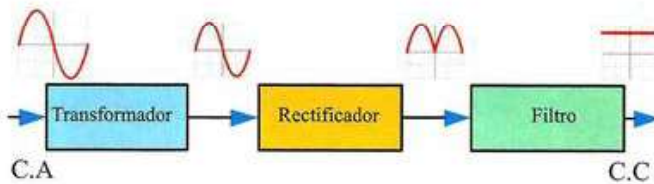


Figura 8.1. Etapas de una fuente de alimentación simple.

8.2. Circuito rectificador de media onda

Cuando se introduce una tensión de C.A. a la entrada del circuito, mostrado en la Figura 8.2, en la salida aparece una tensión de C.C. pulsante. La resistencia R_L representa al receptor al que se le suministra C.C.

Este circuito funciona de la siguiente forma: en el momento en que los valores de la tensión instantánea son positivos

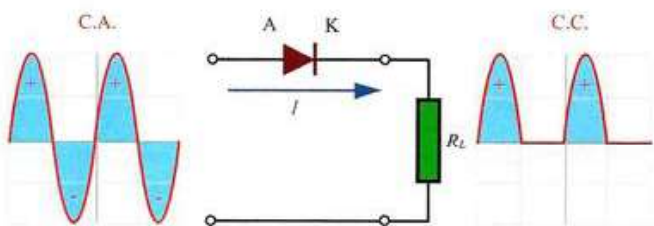


Figura 8.2. Circuito rectificador de media onda.

y superiores a la tensión umbral del diodo (recuerda: 0,7 V para el silicio y 0,3 V para el germanio), este se polariza directamente y, por tanto, aparece una corriente eléctrica por R_L . En el instante en que la tensión de C.A. cambia de positiva a negativa (siguiente semiciclo), el diodo queda polarizado inversamente y, no teniendo en cuenta la corriente de fuga, la corriente por R_L se interrumpe. Por esta razón, este semiciclo no aparece en la curva de la tensión continua de la salida.

En el caso de que se invirtiese la polaridad del diodo, el resultado obtenido sería el que se muestra en la Figura 8.3.

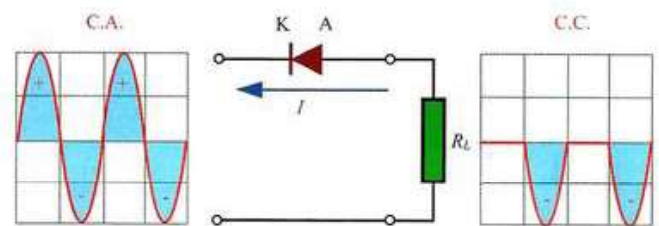


Figura 8.3. Al invertir el diodo aparece en la salida el semiciclo negativo.

Valor medio de tensión rectificadora de media onda

Actividad experimental 8.1

Con ayuda del entrenador didáctico vamos a obtener, de una forma experimental, la relación existente entre el valor pico máximo de la tensión de C.A. aplicada a la entrada y el valor medio de C.C. de la tensión de salida correspondiente a un circuito rectificador de media onda. Para ello, monta el circuito de la Figura 8.4. A continuación, mide con un voltímetro de C.A. el valor eficaz de la tensión de entrada (V_1) y con un voltímetro de C.C. el valor medio de la tensión de salida del rectificador (V_2).

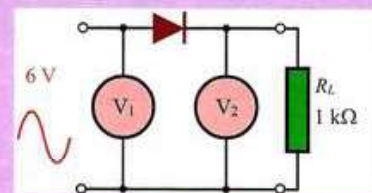


Figura 8.4.

Teniendo en cuenta que la relación existente entre el valor pico máximo de la C.A. y su correspondiente valor eficaz es: $V_{\text{máx}} = \sqrt{2} V_{\text{eficaz}}$ determina la relación aproximada entre el valor medio de la onda rectificadora (V_2) y el valor pico máximo.

En el caso de que se desprece la caída de tensión producida por el diodo y considerando que el valor máximo de la tensión no varía, se puede demostrar matemáticamente que el valor medio de la señal de media onda es igual a:

$$V_{med} = \frac{V_{m\acute{a}x}}{\pi}$$

A este valor también se lo denomina de C.C., ya que va a ser el que aparezca en la lectura de un voltímetro de C.C. ($V_{med} = V_{CC}$).

Si tenemos en cuenta que en el diodo aparece una caída de tensión de unos 0,7 V, tendremos una tensión para la carga de:

$$V_{CC} = \frac{V_{m\acute{a}x} - 0,7}{\pi}$$

Actividad resuelta 8.1

¿Cuál será la lectura de un voltímetro de C.C. conectado a la salida de un rectificador de media onda si a su entrada se le aplica una tensión alterna senoidal de 230 V de valor eficaz?

Solución: Primero calculamos el valor máximo de la tensión:

$$V_{m\acute{a}x} = V_{efi} \sqrt{2} = 230 \cdot \sqrt{2} = 325,27 \text{ V}$$

$$V_{CC} = \frac{325,27 - 0,7}{\pi} = 103,31 \text{ V}$$

Intensidad de corriente por el diodo

Para determinar esta corriente, lo único que hay que hacer es tener en cuenta la tensión de C.C., la resistencia de carga R_L :

$$I_{CC} = \frac{V_{CC}}{R_L}$$

Hay que tener en cuenta que, en este tipo de rectificadores, la corriente que atraviesa al diodo rectificador es la misma que fluye por la carga.

Es muy importante conocer el valor de la corriente de C.C. por el diodo, ya que esta no debe ser mayor, en ningún caso, a la corriente nominal que aparece en las hojas de especificaciones técnicas que proporciona el fabricante de diodos. En caso contrario, pondríamos en peligro al diodo, por no poder disipar el calor generado por efecto Joule en el mismo (véase la Práctica de laboratorio 8.3, dentro de las Actividades finales, propuesta al final de esta unidad).

Tensión inversa máxima del diodo

En el semiciclo en el que el diodo no conduce, este se polariza inversamente y se comporta como un interruptor abierto. Si ahora analizamos la malla cerrada que se forma en el circuito de la Figura 8.5, observaremos que toda la tensión que ha sido bloqueada aparece en los terminales de dicho diodo. Como es lógico, deberemos evitar a toda costa que el diodo trabaje con tensiones inversas mayores que su tensión inversa pico, de lo contrario se alcanzaría la ruptura de este. Este aspecto será de vital importancia a la hora de dimensionar los diodos necesarios para un circuito de rectificación (véase la Práctica de laboratorio 8.2, dentro de las Actividades finales, propuesta al final de esta unidad).

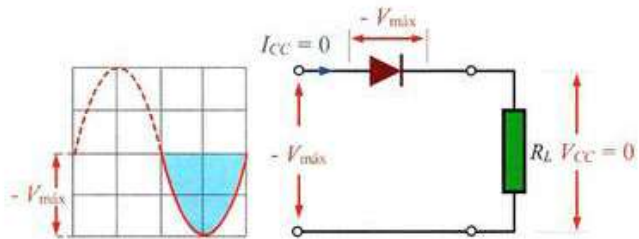


Figura 8.5. En polarización inversa el diodo soporta la tensión máxima de la C.A.

8.3. Circuito rectificador de onda completa

El circuito rectificador de media onda no proporciona una corriente continua demasiado perfecta. Esto es debido a que solo es rectificada la mitad de un ciclo de la corriente alterna.

Para mejorar la rectificación, de tal forma que queden rectificadas tanto los semiciclos positivos como los negativos, se hace necesario utilizar otro tipo de circuitos, como el rectificador de onda completa mediante el transformador con toma intermedia o el puente rectificador de onda completa.

8.3.1. Rectificador de onda completa mediante transformador con toma intermedia

Para realizar este circuito, es necesario disponer de un transformador especial que posea una toma intermedia en su bobinado secundario y un par de diodos semiconductores. El circuito quedaría tal como se muestra en la Figura 8.6.

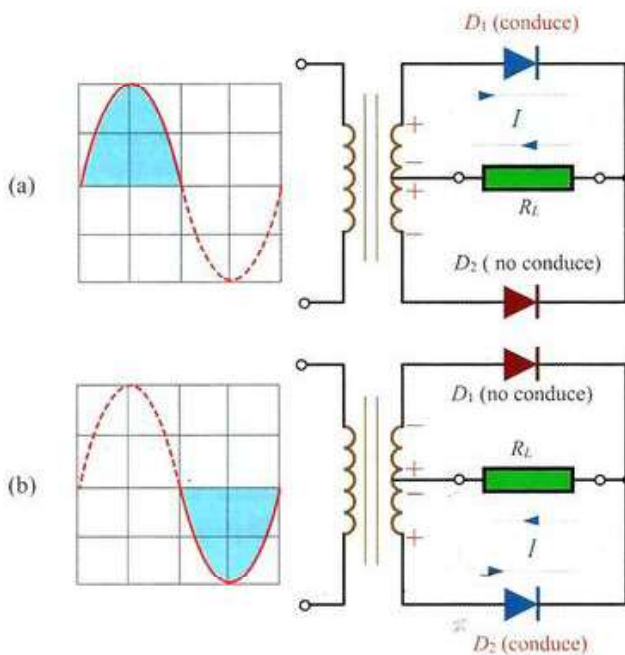


Figura 8.6. Circuito rectificador de onda completa.

En la Figura 8.6 se puede apreciar la forma de la tensión rectificada en la salida.

Al realizar la conexión en el punto intermedio del bobinado del secundario, se consigue dividir a la mitad la tensión que aparece en cada una de las dos partes de dicho bobinado.

En el circuito rectificador de la Figura 8.6(a), se puede apreciar cómo en el primer semiciclo la tensión de salida de la parte superior del bobinado del secundario del transformador polariza directamente al diodo D_1 y hace que circule una intensidad I por la resistencia R_L (R_L hace las veces de receptor o carga). Durante este semiciclo, el diodo D_2 permanece polarizado inversamente y, por consiguiente, no conduce ninguna corriente.

En el siguiente semiciclo la tensión cambia de polaridad y la tensión de salida de la parte inferior del bobinado polariza ahora directamente al diodo D_2 , mientras que el diodo D_1 queda polarizado inversamente. Por tanto, ahora circula la corriente por D_2 y por la resistencia de carga R_L según se indica en la Figura 8.6(b).

A la vista de los resultados, se puede observar que la corriente que atraviesa a la resistencia de carga fluye siempre en el mismo sentido, tanto si conduce D_1 como si lo hace D_2 , por lo que la tensión que aparecerá en la resistencia de carga (tensión de salida del rectificador) es de onda completa, tal como se muestra en la Figura 8.7.

La tensión que aparece en cada una de las dos mitades del secundario corresponde a la mitad de la tensión que surge en el conjunto de los terminales de salida del transformador.

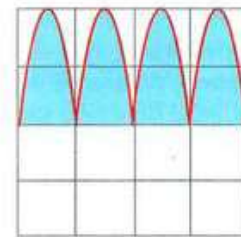


Figura 8.7. Tensión rectificada en R_L .

Hay que hacer notar que, mediante este sistema, el transformador deberá disponer de un bobinado secundario con el doble de espiras. Esto encarece sensiblemente el sistema.

Valor medio de tensión rectificada de onda completa

Si comparamos las curvas correspondientes a los dos tipos de rectificadores, estudiados hasta ahora, enseguida podemos comprobar que el valor medio de la tensión de salida de un rectificador de onda completa es el doble que el de media onda.

$$V_{CC} = 2 \frac{(V_{\text{máx}} - 0,7)}{\pi}$$

Corriente nominal por los diodos

Para calcular la corriente de C.C. que atraviesa la resistencia de carga se opera como en el caso de la media onda, tomando como tensión de C.C. la proporcionada entre la toma media y uno de los extremos del bobinado secundario del transformador.

Sin embargo, si observamos detenidamente el proceso de conducción de los diodos (Figura 8.6), podremos comprobar cómo cada uno de los diodos solo conduce durante la mitad de un ciclo de la C.A., por lo que la corriente media que fluye por cada uno de ellos será la mitad.

En la carga:

$$I_{CC} = \frac{V_{CC}}{R_L}$$

y en los diodos:

$$I_{D1} = I_{D2} = \frac{I_{CC}}{2}$$

Tensión inversa pico de los diodos

Cuando el diodo D_1 conduce, según se puede apreciar en la Figura 8.8, cortocircuita sus bornes, por lo que la caída de tensión que aparece en él es despreciable. Mientras, el otro diodo no conduce y bloquea la tensión en sus bornes. Si aplicamos la segunda ley de Kirchhoff a la malla que se

forma, podremos comprobar cómo ahora toda la tensión (V_T), correspondiente al secundario, aparece en sentido de bloqueo en los bornes del diodo D_2 .

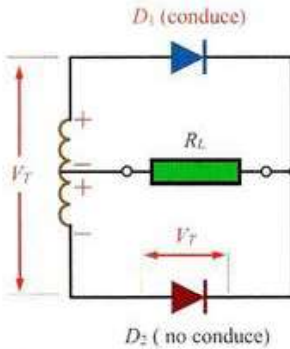


Figura 8.8. Tensión inversa por los diodos.

Por esta razón, los diodos de un rectificador de onda completa con transformador de toma intermedia deben ser capaces de soportar, como mínimo, una tensión inversa pico mayor que V_T . Observa que esta tensión es el doble que la que corresponde a la mitad de cada uno de los bobinados del secundario del transformador.

Actividad resuelta 8.2

En el circuito rectificador de onda completa de la Figura 8.8 el transformador proporciona una tensión en el secundario de 20 V. Teniendo en cuenta la caída de tensión producida en los diodos, determina la tensión de C.C. a que quedará sometida la resistencia de carga de 50 Ω , así como la corriente que recorrerá a la misma. Averigua también la corriente nominal de los diodos, así como su tensión inversa pico.

Solución: La tensión pico máxima que aparece en el secundario es:

$$V_{\text{máx}} = V \cdot \sqrt{2} = 20 \cdot \sqrt{2} = 28,28 \text{ V}$$

La tensión que hay que tener en cuenta para determinar la tensión rectificadora será la que corresponda a la mitad del bobinado, es decir:

$$\frac{28,28 \text{ V}}{2} = 14,14 \text{ V}$$

Teniendo en cuenta que cada vez que conduce uno de los diodos se produce una caída de tensión en el mismo de 0,7 V, el valor medio de la tensión de C.C. rectificadora será entonces:

$$V_{CC} = 2 \frac{V_{\text{máx}} - 0,7}{\pi} = 2 \frac{14,14 - 0,7}{\pi} = 8,56 \text{ V}$$

La intensidad de corriente de C.C. que fluye por la resistencia de carga se calcula aplicando la ley de Ohm:

$$I_{CC} = \frac{V_{CC}}{R_L} = \frac{8,56}{50} = 0,171 \text{ A} = 171 \text{ mA}$$

La corriente que atraviesa a cada uno de los diodos corresponderá a la mitad de la corriente por la carga:

$$I_{D1} = I_{D2} = \frac{171 \text{ mA}}{2} = 85,5 \text{ mA}$$

En el caso de tener que seleccionar un diodo entre los que figuran en las especificaciones técnicas que proporcionan los fabricantes, bastará con uno que tenga una corriente nominal de 100 mA o superior.

Por último, la tensión inversa pico de los diodos deberá ser superior al valor máximo de la tensión del secundario, es decir:

$$V_{\text{inversa pico}} = 28,28 \text{ V}$$

Actividad propuesta 8.1

¿Qué valor debería poseer la resistencia de carga de la Actividad resuelta 8.2 para que la corriente por los diodos quedase limitada a 50 mA?

Resultado: 85,6 Ω

8.3.2. El puente rectificador

Esta otra forma de obtener una tensión rectificadora de onda completa es mucho más empleada que la anterior, ya que resulta más económica, posee un gran rendimiento y no necesita un transformador de toma intermedia.

El puente rectificador consta de cuatro diodos (Figura 8.9), que en muchos casos se encierran en un componente compacto, tal como se muestra en la Figura 8.10.

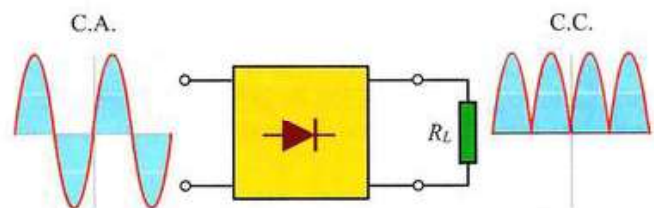


Figura 8.9. Puente rectificador.



Figura 8.10. Puente rectificador integrado.

Veamos a continuación en qué consiste su funcionamiento.

En el semiciclo positivo los diodos D_2 y D_3 se polarizan directamente, lo que provoca la circulación de una corriente por la carga R_L en la dirección que se muestra en la Figura 8.11(a). Por otro lado, los diodos D_1 y D_4 quedan polarizados inversamente y no conducen.

En el semiciclo negativo los diodos D_1 y D_4 comienzan a conducir por estar polarizados directamente y dejan de hacerlo D_2 y D_3 . La dirección de la corriente que se establece por R_L es la misma que en el caso anterior [Figura 8.11(b)].

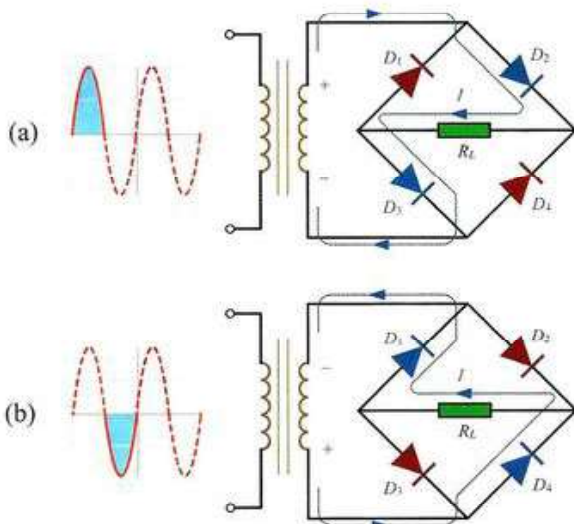


Figura 8.11. Funcionamiento del puente rectificador. (a) Conducen los diodos D_2 y D_3 mientras que D_1 y D_4 permanecen bloqueados. (b) Conducen D_1 y D_4 mientras que D_2 y D_3 bloquean la corriente.

En conclusión, la tensión que aparece en la carga posee siempre la misma polaridad, igual que ocurría en el otro rectificador de onda completa. En la Figura 8.12 se puede apreciar la forma de la tensión de salida del puente rectificador, así como los tiempos de conducción para cada uno de los cuatro diodos.

El valor medio de la tensión rectificada de onda completa se calcula de la misma forma que en el caso anterior, pero

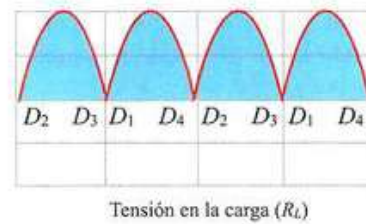


Figura 8.12. Tensión de salida de un puente rectificador.

teniendo en cuenta que el circuito siempre se conduce por dos de los diodos en serie y, por tanto, se ha tomado una caída de tensión doble en ellos ($2 \cdot 0,7 = 1,4$ V).

$$V_{CC} = 2 \frac{V_{\text{máx}} - 1,4}{\pi}$$

Dado que las corrientes que circulan por cada pareja de diodos solo lo hacen en la mitad de un periodo de la C.A., la corriente de C.C. será la mitad que la calculada para la resistencia de carga. Hay que tener en cuenta que estamos hablando de valores medios (véase la Práctica de laboratorio 8.3, dentro de las Actividades finales, propuesta al final de esta unidad).

Para calcular la tensión inversa pico a que quedan sometidos los diodos bastará con tener en cuenta la tensión del secundario de alimentación (en el caso de que exista transformador).

Actividad resuelta 8.3

En el circuito rectificador de onda completa de la Figura 8.11, el transformador proporciona una tensión en el secundario de 12 V. Teniendo en cuenta la caída de tensión producida en los diodos, calcula la tensión y corriente de C.C. de la resistencia de carga de 24 Ω . Averigua también la corriente nominal de los diodos, así como su tensión inversa pico.

Solución: La tensión pico máxima que aparece en el secundario de transformador es:

$$V_{\text{máx}} = V \cdot \sqrt{2} = 12 \cdot \sqrt{2} = 16,97 \text{ V}$$

Teniendo en cuenta que los diodos conducen de dos en dos en conexión serie, y que se produce una caída de tensión en cada uno de 0,7 V ($2 \cdot 0,7 \text{ V} = 1,4 \text{ V}$), el valor medio de la tensión de C.C. rectificada y de la corriente por la carga será entonces:

$$V_{CC} = 2 \frac{V_{\text{máx}} - 1,4}{\pi} = 2 \frac{16,97 - 1,4}{\pi} = 9,91 \text{ V}$$

$$I_{CC} = \frac{V_{CC}}{R_L} = \frac{9,91}{10} = 0,991 \text{ A} = 991 \text{ mA}$$

Los diodos conducen durante un semiciclo, para dejar de hacerlo al siguiente, por lo que el valor medio de su corriente será la mitad que en la carga.

$$I_D = \frac{I_{CC}}{2} = \frac{991}{2} = 496 \text{ mA}$$

La tensión inversa pico que soporta cada diodo será igual a la máxima suministrada por el secundario del transformador.

$$V_{\text{inversa pico}} = 16,97 \text{ V}$$

8.4. Rectificadores trifásicos

Cuando se quieren obtener grandes potencias de salida de C.C. resulta más conveniente la utilización de circuitos rectificadores trifásicos. Mediante estos circuitos se consigue mejorar sensiblemente la uniformidad de la tensión continua de salida.

8.4.1. Circuito rectificador trifásico de media onda

En la Figura 8.13 se muestra el circuito correspondiente a un rectificador trifásico de media onda. En él se conectan tres diodos a la salida de un transformador trifásico con el secundario conectado en estrella. De esta forma, los diodos se conectan a cada una de las tensiones de fase del transformador, constituyendo tres circuitos monofásicos de media onda.

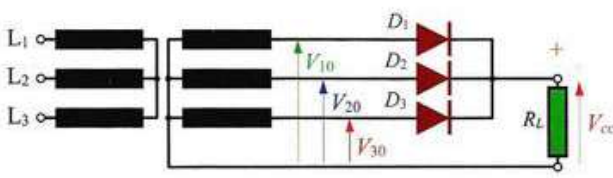


Figura 8.13. Circuito de un rectificador trifásico de media onda.

Como se aprecia en la Figura 8.14, correspondiente a la tensión de salida del rectificador, cada uno de los diodos conduce durante el tiempo que la tensión de fase correspondiente posee un valor más alto que las otras dos. La corriente fluye por cada uno de los diodos alternativamente, de tal forma que cada uno de los mismos solo con-

duce durante un tercio de la corriente de salida. Para calcular la corriente por cada uno de los diodos habrá que dividir por tres la corriente por la carga.

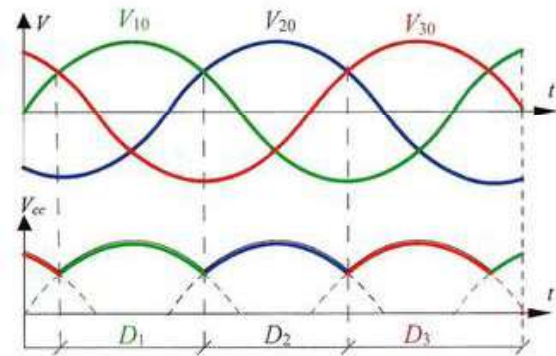


Figura 8.14. Tensión de entrada y salida de un rectificador trifásico de media onda.

8.4.2. Circuito rectificador trifásico de onda completa

Al igual que ocurría con los monofásicos, con este circuito rectificador se consigue una tensión continua de salida mucho más uniforme que con el de media onda. Además no requiere del neutro para su conexión. Por estas razones, el rectificador de onda completa es el que se emplea en aplicaciones industriales.

En la Figura 8.15 se muestra el circuito correspondiente a un rectificador trifásico de onda completa, donde se conectan tres pares de diodos rectificadores en paralelo con la carga a alimentar, conectándose los puntos de interconexión de los mismos a cada uno de los terminales de salida del transformador trifásico.

Como se puede comprobar en la Figura 8.16 cada pareja de diodos se va sucediendo en la conducción, apareciendo en la salida una tensión continua con seis pulsos por periodo.

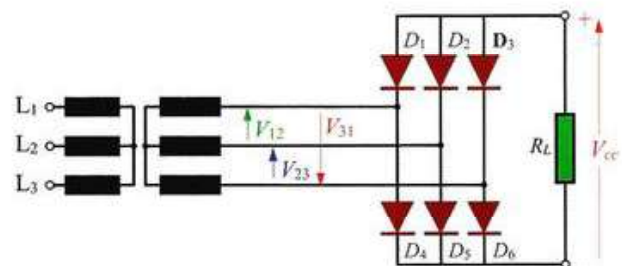


Figura 8.15. Circuito de un rectificador trifásico de onda completa.

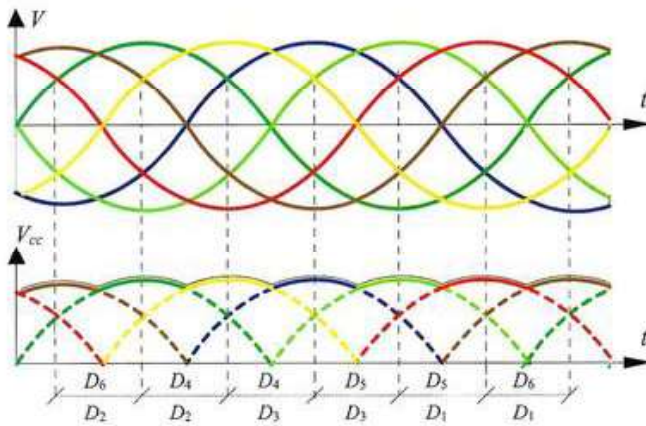


Figura 8.16. Tensión de entrada y salida de un rectificador trifásico de onda completa.

8.5. El filtrado

La corriente de salida de un rectificador no se corresponde a una corriente continua ideal, como por ejemplo la que proporcionan las pilas y acumuladores. Normalmente esta corriente es de tipo pulsatorio, lo cual implica que existen variaciones de amplitud en ella. Este tipo de corriente no es muy recomendable en la mayoría de las aplicaciones, sobre todo para la alimentación de equipos electrónicos. Así, por ejemplo, si alimentásemos un amplificador de sonido, o un receptor de radio, con un circuito rectificador sin filtrado podríamos comprobar cómo aparece un zumbido de baja frecuencia en la salida del altavoz.

En la Figura 8.17(a) se muestra el aspecto de una C.C. pura, tal como la proporciona una pila. En contraste, en la Figura 8.17(b) aparece una C.C. pulsatoria procedente de un rectificador de onda completa.

La misión de los circuitos de filtrado es la de reducir las variaciones de amplitud de la corriente y conseguir que la corriente sea lo más constante posible en la carga a alimentar. Cuando se consigue esto se dice que se ha reducido la componente de corriente alterna de la corriente de salida del rectificador o que se ha reducido el rizado.

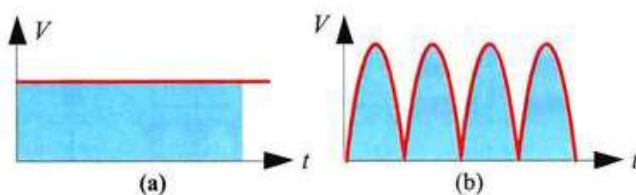


Figura 8.17. Aspecto de una corriente continua. (a) Pura. (b) Pulsatoria.

Los circuitos de filtrado se pueden realizar con: a) un condensador, b) redes formadas por inductancias y condensadores.

8.5.1. Filtro con condensador

Para conseguir los efectos de filtrado con este sistema se conecta un condensador de gran capacidad (normalmente electrolítico) en paralelo con la salida del rectificador. Evidentemente, el rizado que aparece en la tensión de salida será mucho más acentuado en el caso del rectificador de media onda que en el de onda completa. Por esta razón, nos concentraremos en el estudio de los filtros para estos últimos rectificadores, ya que son los que tienen más aplicaciones prácticas.

Actividad experimental 8.2

Consigue un puente rectificador encapsulado, aliméntalo con C.A. y conecta la salida de C.C. del mismo a una resistencia de carga.

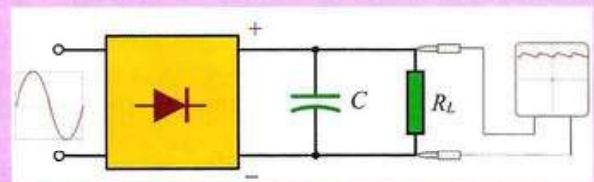


Figura 8.18. Verificación del efecto de filtrado de un condensador.

Seguidamente, mide con un osciloscopio la tensión en la resistencia de carga, visualizando la onda. A continuación, conecta un condensador de $1.000 \mu\text{F}$ en paralelo con la carga y repite la medida con el osciloscopio. Compara los resultados obtenidos en ambos casos (Figura 8.18).

Habrás podido comprobar que la tensión que aparece ahora en la pantalla del osciloscopio ya no posee tantas ondulaciones y que el valor medio de la tensión de salida ha aumentado.

Repita esta misma experiencia sustituyendo el puente rectificador de onda completa por uno de media onda. ¿Qué diferencias aprecias en la forma de la tensión de salida con respecto al anterior?

El aspecto que tiene la tensión de salida en un circuito rectificador de onda completa con condensador de filtrado es como el que se muestra en la Figura 8.19.

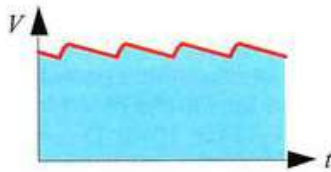


Figura 8.19. Tensión de salida de un rectificador con condensador de filtro.

Para poder explicar cómo actúa el condensador en el filtrado, en la Figura 8.20 se muestra la tensión de salida del filtro en superposición con la tensión de rectificación de onda completa aplicada a la entrada de dicho filtro.

- 0 a t_1 → el rectificador conduce y se carga el condensador.
- t_1 a t_2 → el condensador se descarga y deja de conducir el rectificador.
- t_2 a t_3 → el rectificador conduce y se carga el condensador.
- t_3 a t_4 → el condensador se descarga y deja de conducir el rectificador.
- t_4 a t_5 → etc.



Figura 8.20. Tiempos de carga y descarga del condensador de filtro.

El funcionamiento de este filtro es como sigue:

En el primer instante (0 a t_1), los diodos del rectificador se polarizan directamente y el condensador se carga de energía mientras la tensión aplicada a sus bornes vaya en aumento. Una vez superada la tensión máxima (t_1) y mientras la tensión descende de valor, los diodos del rectificador se polarizan inversamente, ya que la tensión con que ha quedado cargado el condensador es algo superior a la aplicada a estos. En consecuencia, los diodos dejan de conducir (t_1 a t_2) y el condensador descarga la energía acumulada por la resistencia de carga R_L .

Este fenómeno se repite continuamente en cada uno de los ciclos de tensión pulsatoria de salida del rectificador, manteniendo así la tensión en la carga a un valor más constante.

Cuanto más constante sea la tensión de salida, más calidad de C.C. poseerá la tensión rectificadora. Se dice, entonces, que se reduce su rizado.

El rizado que todavía perdura en la tensión de salida del filtro es debido a la carga y descarga del condensador. Un modo de aminorar el rizado consiste en aumentar el tiempo de descarga del condensador, lo cual se consigue con condensadores de gran capacidad o lo que es lo mismo, aumentando la constante de tiempo de descarga, la cual está en función del producto de $R_L C$.

El rizado

A las variaciones de tensión que aparecen en la salida del filtro se las denomina **tensión de rizado**. La tensión de rizado se debe a las sucesivas cargas y descargas del condensador. Según la Figura 8.21 la tensión de rizado será igual a la diferencia de las tensiones $V_1 - V_2$ y es V_1 el valor más alto de la tensión de salida y además corresponde con el valor instantáneo de la tensión a la que comienza a descargarse el condensador (t_1) y V_2 el valor más bajo de dicha tensión y se corresponde con el valor instantáneo de la tensión a la que termina la descarga del condensador (t_2).

$$V_{riz} = V_1 - V_2$$

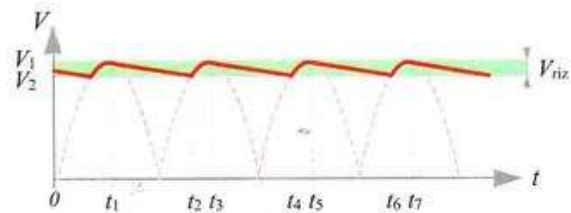


Figura 8.21. Tensión de rizado.

Es posible establecer una relación matemática entre la tensión de rizado y la capacidad del condensador mediante la siguiente expresión:

$$V_{riz} = \frac{I}{fC}$$

V_{riz} = Tensión de rizado en voltios.

I = Corriente de C.C. por la carga en amperios.

f = Frecuencia del rizado en hertzios.

C = Capacidad del condensador en faradios.

Esta expresión nos indica que es posible reducir la tensión de rizado con condensadores de gran capacidad. Por otro lado, también nos indica que, según aumenta la corriente por la carga, al ser más rápidas las descargas del condensador, la tensión de rizado aumenta, disminuyendo, por tanto, el valor medio de la tensión de salida de la fuente de alimentación.

Esta última apreciación es muy importante a la hora de diseñar una fuente de alimentación que tenga que alimentar a cargas de potencia variable, ya que la tensión de salida se hará más pequeña para corrientes de carga elevadas. En posteriores unidades estudiaremos los circuitos estabilizadores (reguladores de tensión) que consiguieran mantener la tensión dentro de un margen razonablemente estable.

Actividad resuelta 8.4

Determina la tensión de rizado de un puente rectificador al que se le alimenta con C.A. de la red a 50 Hz, si al conectar un condensador electrolítico de 600 μF circula por la carga una corriente de 100 mA.

Solución: Dado que se trata de un rectificador de onda completa, la frecuencia de rizado será el doble que la de la alimentación de C.A., es decir, 100 Hz.

$$V_{\text{riz}} = \frac{I}{fC} = \frac{0,1}{100 \cdot 600 \cdot 10^{-6}} = 1,67 \text{ V}$$

Para un rectificador de media onda la frecuencia de rizado coincide con la de la red. En este caso serían 50 Hz.

Por lo general, se diseña el condensador para conseguir una tensión de rizado correspondiente al 10 % de la tensión pico máxima.

Por último indicar que, cuando se utilizan condensadores de alta capacidad, el valor medio de la tensión de C.C. en la carga se aproxima bastante a la tensión pico máxima. En la práctica, para determinar este valor bastará con restar a esta cantidad la mitad de la tensión de rizado, es decir:

$$V_{\text{CC}} = V_{\text{máx}} - \frac{V_{\text{riz}}}{2}$$

Actividad resuelta 8.5

Determina la tensión de C.C. en la carga de un rectificador con filtro por condensador, si la tensión máxima en la salida es de 12 V.

Solución: Aplicando la regla de diseño del 10 %, la tensión de rizado será el 10 % de la tensión máxima:

$$V_{\text{riz}} = 12 \cdot \frac{10}{100} = 1,2 \text{ V}$$

$$V_{\text{CC}} = V_{\text{máx}} - \frac{V_{\text{riz}}}{2} = 12 - \frac{1,2}{2} = 11,4 \text{ V}$$

Actividad resuelta 8.6

En la Figura 8.22 se muestra un puente rectificador con filtro por condensador. Diseña el condensador de filtro siguiendo la regla del 10 %. Determina también la tensión de C.C. en la carga, la tensión de rizado, así como la corriente por la carga.

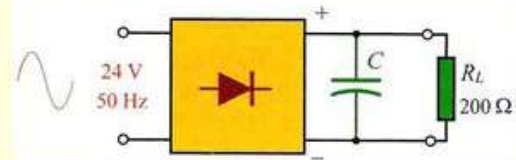


Figura 8.22.

Solución: La tensión pico máxima de la C.A. aplicada al puente es:

$$V_{\text{máx}} = V \cdot \sqrt{2} = 24 \cdot \sqrt{2} = 33,94 \text{ V}$$

La tensión de rizado será el 10 % de esta cantidad:

$$V_{\text{riz}} = V_{\text{máx}} \frac{10}{100} = 33,94 \frac{10}{100} = 3,39 \text{ V}$$

Para determinar la tensión de C.C. en la carga sustraeremos a la tensión pico máxima el valor correspondiente a la mitad de la tensión de rizado. Para ser más exactos también podemos sustraer la caída de tensión de los diodos, que en este caso será de 1,4 V.

$$V_{\text{CC}} = V_{\text{máx}} - \frac{V_{\text{riz}}}{2} - 1,4 \text{ V} = 33,94 - \frac{3,39}{2} - 1,4 = 30,85 \text{ V}$$

Para esta tensión, la corriente por la carga será:

$$I_{\text{CC}} = \frac{V_{\text{CC}}}{R_L} = \frac{30,85}{200} = 0,15 \text{ A}$$

Para determinar la capacidad del condensador, aplicamos la expresión conocida y despejamos C:

$$V_{\text{riz}} = \frac{I}{fC} \rightarrow C = \frac{I}{fV_{\text{riz}}} = \frac{0,15}{100 \cdot 3,39} = 442 \cdot 10^{-6} \text{ F} = 442 \mu\text{F}$$

8.5.2. Filtros con inductancias y condensadores

Dado que el filtro por condensador todavía presenta en su salida una pequeña tensión de rizado, se han desarrollado otros tipos de filtros más complejos para conseguir que el rizado quede prácticamente eliminado. Uno de estos filtros

consiste en conectar a la salida del rectificador una inductancia en serie y un condensador en paralelo con la carga, tal como se muestra en la Figura 8.23.

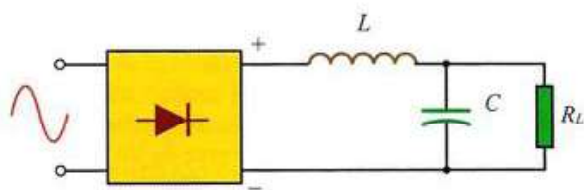


Figura 8.23. Filtro con bobina y condensador.

El efecto que produce la bobina, al estar en serie con la carga, es el de reducir la tensión de rizado a valores prácticamente despreciables, por lo que se obtiene una tensión de C.C. en la salida muy similar a la que producen las pilas y baterías. La explicación de este fenómeno es la siguiente: al pasar la corriente por la bobina, esta se opone a las variaciones de corriente debido al efecto de la autoinducción, lo que provoca una caída de tensión en la componente de C.A., que corresponde a la tensión de rizado. El efecto combinado de la inductancia y el condensador dan como resultado una tensión sin apenas rizado.

Un filtro con inductancias muy conocido es el *filtro pi*, como el que se muestra en la Figura 8.24. El nombre proviene de la forma que adquiere el esquema del circuito, ya que recuerda a la letra griega pi (π). Este tipo de filtros consigue mejorar sensiblemente la calidad de la tensión de C.C.

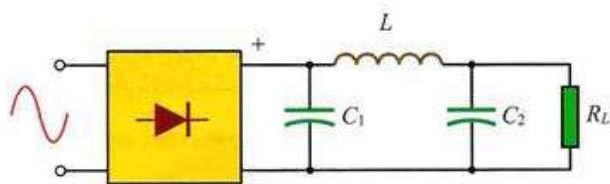


Figura 8.24. Filtro en pi con bobina y condensadores.

Este tipo de filtros fue empleado hace unos años por su gran efectividad en la reducción del rizado. Sin embargo, presentan algunos inconvenientes, como un gran tamaño, un considerable peso y ser poco económicos, lo que los hace útiles solo en aquellas aplicaciones donde se necesite suministrar grandes potencias.

En la actualidad, para fuentes de alimentación de pequeñas tensiones, los filtros con inductancias se han sustituido por reguladores de tensión integrados, los cuales consiguen reducir el rizado y proporcionan en su salida una tensión de C.C. prácticamente constante. En posteriores unidades estudiaremos este tipo de circuitos.

Con el conjunto de contenidos estudiados en esta unidad, ya nos podemos hacer a la idea de lo que es capaz de conseguir una fuente de alimentación. No obstante, ampliaremos algunas ideas más sobre estos equipos en la Unidad 13, donde se estudiará el concepto de regulación de una fuente de alimentación con el diodo Zener. Además, se estudiarán otros tipos de fuentes de alimentación más comerciales, como pueden ser: fuentes estabilizadas construidas con diodos Zener y transistores, fuentes estabilizadas con reguladores de tensión integrados que incluyen la posibilidad de ajustar la tensión en la salida y las fuentes conmutadas.

8.6. Construcción del circuito impreso y montaje de sus componentes

Antes de pasar a las actividades, donde vamos a proponer el diseño y montaje en una placa de circuito impreso de un circuito rectificador de onda completa con filtro por condensador, vamos a estudiar los procedimientos para su construcción y montaje.

Hasta ahora hemos realizado el montaje de nuestras actividades en el entrenador didáctico. En la práctica, se utilizan circuitos impresos como el de la Figura 8.25.

El circuito impreso está formado por una placa base de material aislante (donde se sitúan los componentes electrónicos) en la que se adhiere una fina lámina de cobre (donde se conectan los componentes una vez que se hayan formado las pistas de conexión) (Figura 8.26).

Existen diversas técnicas para conseguir un circuito impreso como el de la Figura 8.25, donde se ha disgregado la lámina de cobre en pistas de conexión y se han realizado



Figura 8.25. Circuito impreso visto por la cara de las pistas de cobre.

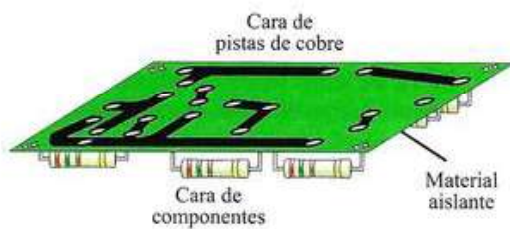


Figura 8.26. Partes de un circuito impreso.

taladros para la conexión de los terminales de los componentes. Ahora bien, todas tienen algo en común:

- Hay que hacer un diseño previo de la ubicación y forma de las pistas de cobre y los taladros.
- Hay que conseguir eliminar de la lámina de cobre el material que no va a formar parte de las pistas de cobre de conexión.

8.6.1. Diseño de los circuitos impresos

En cuanto al diseño del circuito impreso, hoy en día existen multitud de programas de diseño asistido por ordenador, como el «OrCAD» o el «Workbench Mutisim», en los cuales basta con realizar el esquema eléctrico para conseguir obtener un diseño del circuito impreso como el de la Figura 8.25.

Para realizar este diseño de forma manual nos podemos valer de una hoja de papel cuadriculado en décimas de pulgada como el que se muestra en la Figura 8.27.

Hay que tener en cuenta que los componentes electrónicos se fabrican con una separación de 1/10 de pulgada o en múltiplos de esta medida (1/10 de pulgada = 2,54 mm).

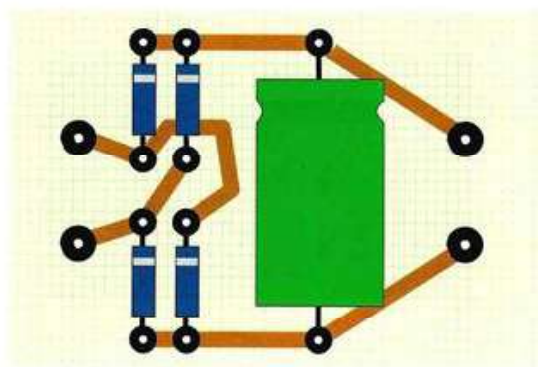


Figura 8.27. Diseño de circuito impreso con hoja de papel cuadriculado.

En la práctica se fabrican las láminas de cobre de diferentes espesores. Las que más se utilizan son de 35 μm y 70 μm . La selección del espesor dependerá de la intensidad de corriente que vaya a fluir por las pistas de cobre.

En el diseño también es importante la selección del ancho de pista más adecuado. Este dependerá también de la intensidad de corriente que fluya por ellas. El gráfico mostrado en la Figura 8.28 nos ayudará a la selección del ancho de pista más adecuado para una temperatura ambiente de 20°C.

Así, por ejemplo, para una corriente de 3 A en un circuito impreso de 35 μm de espesor la anchura mínima a utilizar será de 1 mm.

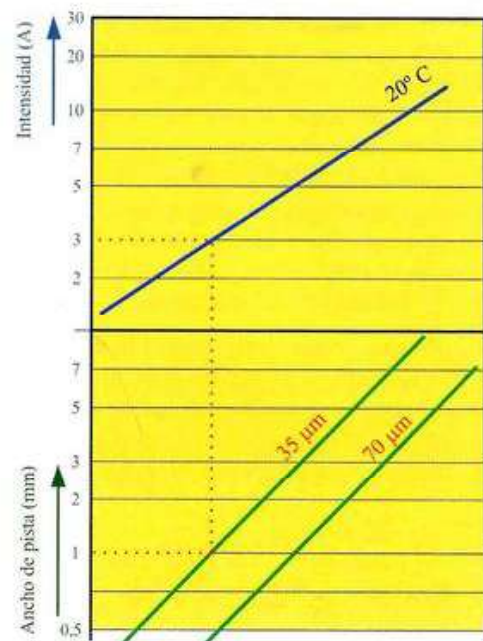


Figura 8.28. Anchura de las pistas de cobre en función de la intensidad del circuito.

La distancia a la que habrán de separarse las pistas de cobre en el diseño va a depender de la tensión entre ellas, y es suficiente una separación de 1 mm por cada 100 V de tensión.

8.6.2. Transferencia del diseño a placa

Una vez realizado el diseño en el papel, hay que trasladarlo a la placa de cobre del circuito impreso. Para lo cual existen diversas técnicas:

Manual: consiste en dibujar, con un rotulador de tinta resistente al ácido, el circuito diseñado en la lámina de cobre. Para eliminar el cobre sobrante y que no está protegido con el rotulador, se sumerge la placa en una solución corrosiva, como por ejemplo cloruro férrico disuelto en

agua (unos 500 gramos por cada litro de agua). En unos minutos tendremos el resultado perseguido.

Fotográfico: con este procedimiento podemos realizar circuitos mucho más complejos, sobre todo los que se diseñan con programas informáticos. Las placas que se utilizan con este procedimiento deben ser sensibles a la luz (placas para positivos o placas para negativos). El sistema sigue un proceso muy similar al de la fotografía:

- Primero se obtiene nuestro diseño dibujado en un papel vegetal o directamente desde el ordenador se imprime en una hoja de papel de plástico transparente (acetato).
- Para trasladar nuestro diseño a nuestra placa de positivos, se desprende la protección plástica que lleva incorporada nuestra placa virgen y se sujeta nuestro diseño en papel transparente a esta (Figura 8.29).

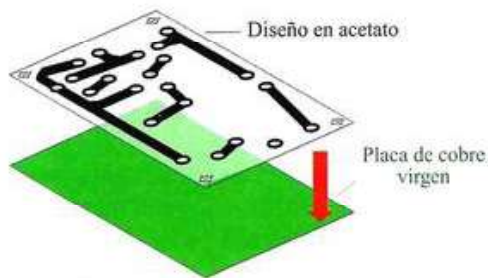


Figura 8.29. Positivo sobre placa.

- Posteriormente se introduce la placa en una insoladora (caja hermética con un conjunto de fluorescentes de luz ultravioleta), procurando que la placa sensible de cobre quede sobre la luz. El tiempo de exposición a la luz viene a estar en torno a los dos minutos y depende del modelo de insoladora (Figura 8.30).

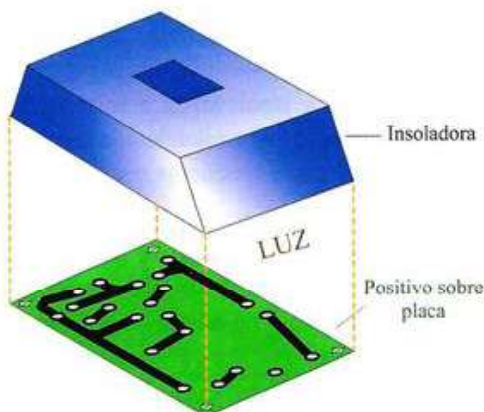


Figura 8.30. Insolado de la placa.

- Por último, se procede al revelado de la placa. Para ello, se introduce la placa en una solución de sosa cáustica cuya concentración nos indica el fabricante (unas cuatro

cucharadas de café por cada litro de agua). En unos minutos la solución ataca la placa de cobre y disuelve únicamente aquellas zonas de la placa donde incidió la luz de la insoladora, lo que da como resultado el circuito diseñado (Figura 8.31).

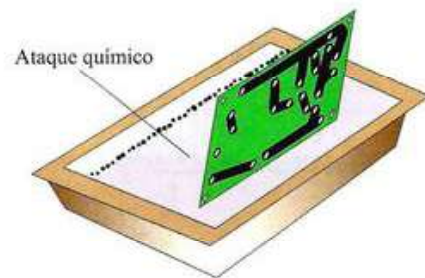


Figura 8.31. Revelado de la placa.

8.6.3. Soldadura y montaje de componentes

Para unir eléctricamente los terminales de los componentes a los puntos de soldadura del circuito impreso se utiliza la soldadura blanda a partir del estaño. Esta soldadura se realiza a temperaturas relativamente bajas (por debajo de 200 °C) con el fin de no dañar los componentes o las pistas de cobre del circuito impreso.

El material que se aporta en la soldadura está formado por un hilo compuesto de una aleación de estaño-plomo. El interior del hilo está relleno de un núcleo de una sustancia resinosa que, al fundirse, consigue limpiar la zona a soldar y facilita que el estaño penetre y se difunda con facilidad entre las dos partes a soldar.

Para elevar la temperatura de la conexión a soldar, se utiliza el soldador. El que más se utiliza para soldaduras en circuitos impresos es el recto tipo lápiz (Figura 8.32) con una punta de 2 a 3 mm de diámetro y potencia de 30 a 40 W. Lo ideal es utilizar soldadores de temperatura controlada para evitar sobrecalentamientos en los componentes.

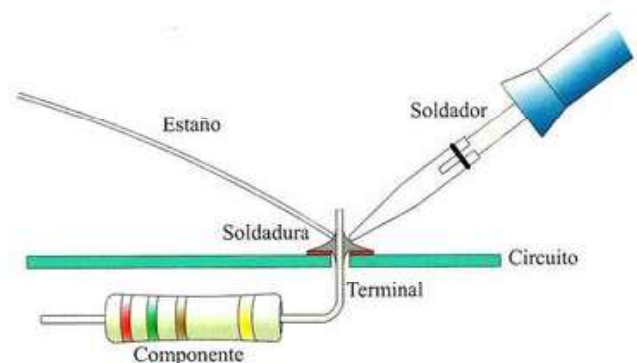


Figura 8.32. Proceso de soldadura.

Prácticas de laboratorio

8.1. Diseño y montaje de un rectificador de onda completa en circuito impreso. Vamos a montar el circuito rectificador de media onda con filtro por condensador que se propone en el esquema de la Figura 8.33.

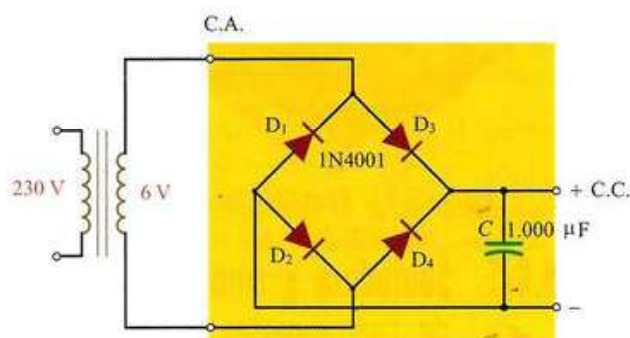


Figura 8.33.

1. Se toman las medidas de los componentes correspondientes al circuito a montar, para lo cual se puede consultar en las especificaciones técnicas que los fabricantes nos facilitan.
2. Se dibujan los componentes a escala real en un papel cuadrículado, teniendo en cuenta que su posición relativa sea la adecuada para posteriormente facilitar las conexiones. Los puntos de soldadura se dimensionan según la sección de los terminales de conexión de los componentes (Figura 8.34).

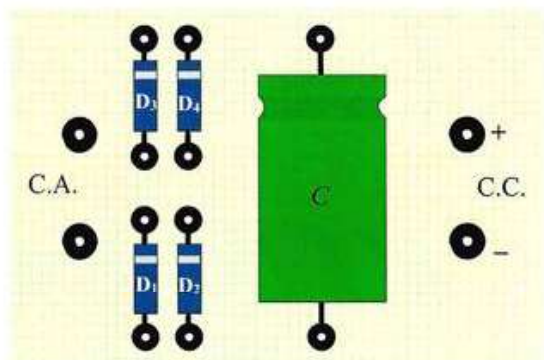


Figura 8.34.

3. A continuación se dibujan las pistas de cobre, de tal forma que conecten adecuadamente los componentes según el esquema de conexiones (Figura 8.35). Dado que no hay problemas de espacio, se ha optado

por trazar pistas de algo más de 1 mm. A la hora de trazar pistas con cambios de dirección, conviene suavizar los ángulos muy agudos.

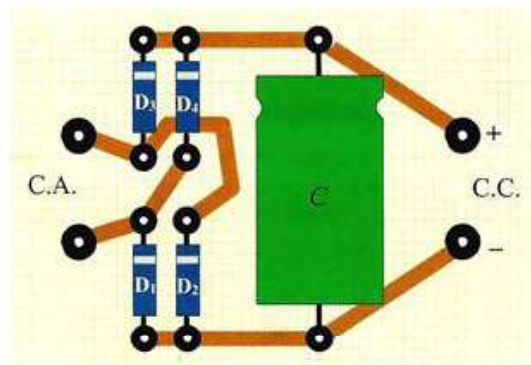


Figura 8.35.

4. Se corta la placa en las dimensiones previstas (para ello se puede utilizar una sierra metálica o una cizalla) y se limpia bien con un estropajo, agua y jabón.
5. Se fija el diseño de nuestro circuito sobre la placa de cobre y con un punzón y un martillo perforamos el papel y marcamos los puntos de soldadura.
6. Se taladran los puntos de soldadura según las dimensiones previstas.
7. Se dibujan las pistas con un rotulador de tinta indeleble siguiendo nuestro diseño. Conviene manipular con cuidado la placa de cobre, evitando tocarla con los dedos. De esta forma prevenimos que se manche de grasa.
8. Se sumerge la placa en la solución corrosiva, siguiendo las recomendaciones que facilitan los fabricantes de placas y productos químicos.
9. Una vez acabado este proceso, se toma el circuito con unas pinzas de plástico y se aclara con abundante agua. Después se limpia con agua y jabón (o alcohol) hasta que no quede ningún resto del trazo del rotulador.
10. Se insertan los componentes por el lado aislante, según el diseño del circuito impreso. Previamente se habrán preparado los terminales de los componentes. Esta operación se realiza con un alicate pequeño de puntas planas, haciendo presión con él sobre el punto de doblado y desplazando con la mano el

extremo del terminal. Así evitamos realizar una presión excesiva sobre el cuerpo del componente, que podría dañarse. Además, conviene practicar el doblado del terminal a una distancia suficiente entre él y el cuerpo del componente para que no se desprenda.

11. Se sueldan los terminales a los puntos de soldadura. Para ello ten en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Comprobar el estado de limpieza del soldador. De no ser suficiente, limpiarlo con una esponja humedecida en agua. De la misma forma, también conviene comprobar que las partes a soldar estén libres de óxidos o grasas.
- Una vez caliente el soldador, aplicar la punta del mismo a las dos partes a soldar simultáneamente durante un instante. Seguidamente, apoyar el extremo del hilo de estaño al punto de unión hasta conseguir que el estaño fluya por la unión de una forma uniforme y suficiente.
- La soldadura obtenida debe presentar un aspecto limpio y brillante. Si se observa algún tipo de cristalización o granulado, habrá sido por no haber aplicado el soldador durante el tiempo suficiente, o bien por haber movido el terminal soldado antes de su total enfriamiento. En el caso de obtenerse un color gris mate, habrá sido por haber sobrecalentado la unión, lo que tampoco es recomendable.

8.2. **Estudio de un rectificador de media onda.** Vamos a montar con ayuda de un entrenador didáctico el circuito de la Figura 8.36. La resistencia de carga de $100\ \Omega$ actuará como receptor de la C.C. obtenida en la etapa final por la fuente de alimentación. El diodo a utilizar podría ser el 1N4001, que, según las características facilitadas por el fabricante, posee una intensidad nominal de 1 A.

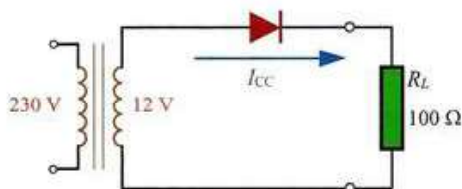


Figura 8.36.

Calcularemos la corriente por el diodo para comprobar que es inferior a la nominal:

$$V_{\text{máx}} = 12 \cdot \sqrt{2} = 16,97\ \text{V}$$

$$V_{CC} = \frac{16,97 - 0,7}{\pi} = 5,18\ \text{V}$$

$$I_{CC} = \frac{V_{CC}}{R_L} = \frac{5,18}{100} = 0,052 = 52\ \text{mA}$$

Consigue las especificaciones técnicas del diodo y comprueba que posee una tensión inversa pico superior a 16,97 V.

Monta el circuito y realiza las siguientes medidas de comprobación:

- a) Con el polímetro, mide la corriente por el diodo (A), la tensión alterna de entrada al circuito de rectificación (V_1), así como la tensión continua en el diodo (V_2) y en la resistencia de carga (V_3) (Figura 8.37).

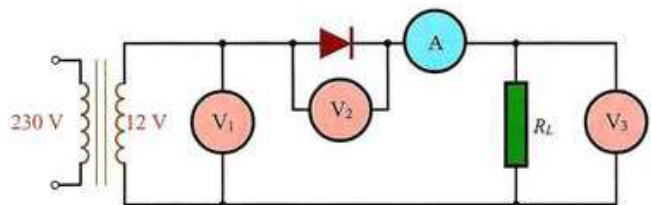


Figura 8.37.

Con los resultados obtenidos, comprueba las relaciones calculadas con anterioridad.

- b) Mide con un osciloscopio la tensión en la resistencia de carga, visualizando la onda y sacando consecuencias de los tiempos de conducción del diodo (Figura 8.38).

Si seleccionamos el atenuador vertical en 5 V/div y la base de tiempos en 5 ms/div, los valores obtenidos de valor máximo y frecuencia serán (Figura 8.39):

$$V_{\text{máx}} = 3,4\ \text{div} \cdot 5\ \text{V/div} = 17\ \text{V}$$

$$T = 4\ \text{div} \cdot 5\ \text{ms/div} = 20\ \text{ms} = 0,02\ \text{s}$$

$$f = \frac{1}{0,02} = 50\ \text{Hz}$$

- c) Conecta un condensador electrolítico de $100\ \mu\text{F}$, cuidando de realizar las conexiones con su correspondiente polaridad y vuelve a repetir las medidas.

Habrás podido comprobar que la tensión que aparece ahora en la pantalla del osciloscopio ya no posee tantas ondulaciones y que el valor medio de la tensión de salida ha aumentado.

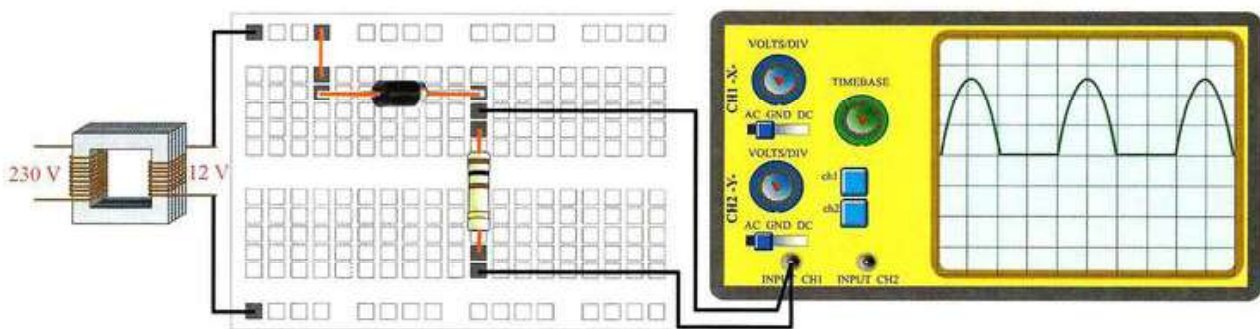


Figura 8.38. Montaje en placa protoboard y medida con osciloscopio.

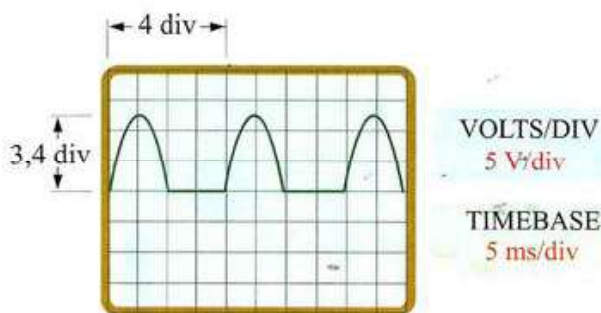


Figura 8.39.

Después conecta un condensador de 1.000 μF y compara los resultados de las medidas en los diferentes casos.

8.3. Estudio de un puente rectificador. Vamos a montar con ayuda del entrenador didáctico el circuito de rectificación en puente de la Figura 8.40. La resistencia de carga de 100 Ω actuará como receptor del C.C. cedida en la etapa final por la fuente de alimentación. El diodo a utilizar podría ser, también en este caso, el 1N4001.

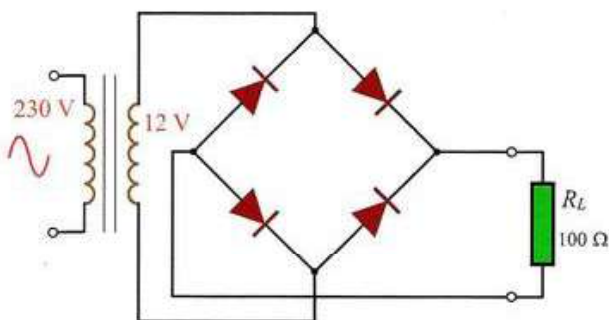


Figura 8.40.

Calcularemos la corriente por el diodo para comprobar que es inferior a la nominal (1 A):

$$V_{\text{máx}} = 12 \cdot \sqrt{2} = 16,97 \text{ V}$$

$$V_{CC} = 2 \frac{V_{\text{máx}} - 1,4}{\pi} = 2 \frac{16,97 - 1,4}{\pi} = 9,91 \text{ V}$$

$$I_{CC} = \frac{V_{CC}}{R_L} = \frac{9,91}{100} = 0,099 = 99 \text{ mA}$$

La corriente que circula por los diodos será la mitad que la que circula por la carga, es decir:

$I_D = 99/2 = 49,5 \text{ mA}$, corriente más baja que la nominal de los diodos.

Comprueba que el diodo posee una tensión inversa pico superior a la tensión máxima de 16,97 V.

Monta el circuito de la Figura 8.40 y realiza las siguientes medidas de comprobación:

- Con el polímetro: mide la corriente por un diodo, la corriente por la resistencia de carga, la tensión alterna de entrada al circuito de rectificación, así como la tensión continua en la resistencia de carga. Con los resultados obtenidos, comprueba las relaciones calculadas con anterioridad.
- Mide con un osciloscopio la tensión en la resistencia de carga, visualizando la onda y comparando los resultados obtenidos con el rectificador de media onda (Figura 8.41).

Al igual que se hizo para el rectificador de media onda, si seleccionamos el atenuador vertical en 5 V/div y la base de tiempos en 5 ms/div, los valores obtenidos de valor máximo y frecuencia serán (Figura 8.42):

$$V_{\text{máx}} = 3,4 \text{ div} \cdot 5 \text{ V/div} = 17 \text{ V}$$

$$T = 4 \text{ div} \cdot 5 \text{ ms/div} = 20 \text{ ms} = 0,02 \text{ s}$$

$$f = \frac{1}{0,02} = 50 \text{ Hz}$$

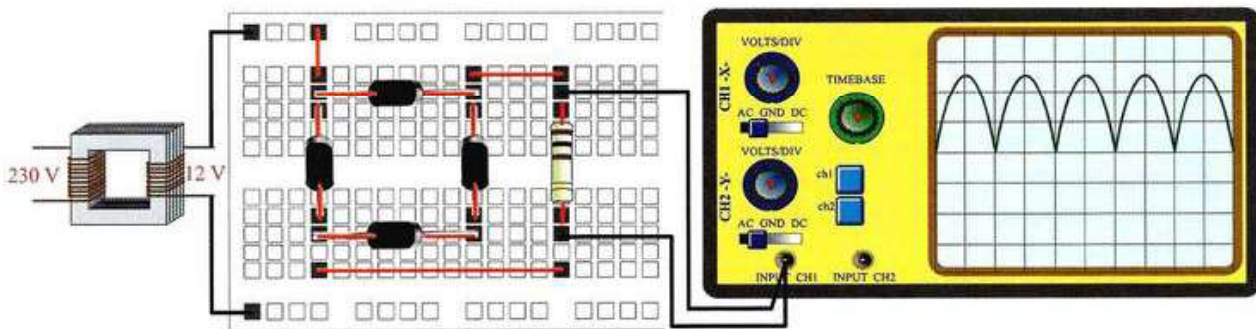


Figura 8.41. Montaje en placa protoboard y medida con osciloscopio.

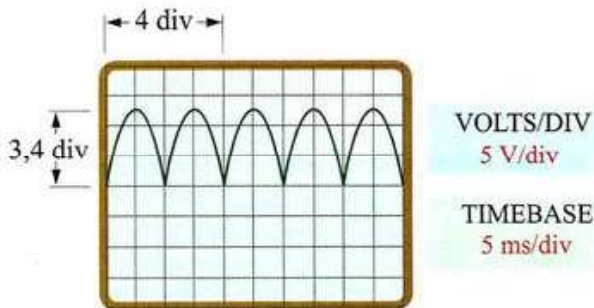


Figura 8.42.

- c) Conecta un condensador de $1.000 \mu\text{F}$ en paralelo con la carga, repite todas las medidas y compara los resultados.
- d) Retira la resistencia de carga de 100Ω y conecta ahora una carga de 10Ω . Repite las medidas y comprueba cómo aumenta la tensión de rizado y disminuye el valor medio de la tensión de C.C. en la carga.

8.4. Identificación de las características de puentes rectificadores encapsulados. Consigue unos cuantos puentes rectificadores encapsulados de diferentes tipos, identifica su referencia y, con ayuda de las especificaciones técnicas que facilitan los fabricantes de los mismos, obtén sus características más relevantes.

De los puentes identificados, ¿cuál sería el más adecuado para la realización de la actividad anterior?

Con los circuitos aquí montados, podemos alimentar con C.C. a cualquier aparato electrónico que funcione a la tensión V_{CC} obtenida en la salida de dichos circuitos. Por supuesto, la resistencia de carga habrá que eliminarla previamente, ya que su función es solo simular el aparato que realmente deseamos alimentar.

El aparato a que nos estamos refiriendo podría ser un receptor de radio, un cargador de baterías, un equipo de so-

nido, etc. Todo es cuestión de calcular y dimensionar las características que deben poseer los componentes integrantes del circuito rectificador en función de la tensión y potencia del aparato a alimentar.

8.5. Localización de las averías en una fuente de alimentación. Se trata de que detectes y repares alguna de las averías que hayan podido surgir en las fuentes de alimentación montadas en las actividades anteriores.

La localización de las averías y su posterior reparación es un ejercicio muy importante que hay que ir desarrollando y dominando paulatinamente. Seguidamente exponemos algunos consejos que serán de gran utilidad para conseguir el objetivo marcado.

El proceso de localización de las averías de cualquier equipo podría ordenarse en las siguientes fases:

- a) Observación de los síntomas que aparecen por un mal funcionamiento del equipo.
- b) Estudio de las causas que producen tales síntomas.
- c) Reducción de las posibles causas, mediante pruebas y medidas, hasta encontrar la verdadera causa de la avería.
- d) Reparación o sustitución de los componentes o partes defectuosas.

Siguiendo este proceso ordenado es más fácil detectar la posible avería.

A modo de ejemplo, vamos a estudiar cuál sería el procedimiento a seguir para localizar las averías en una fuente de alimentación.

Las fuentes de alimentación, como cualquier sistema defectuoso, suelen presentar síntomas muy concretos. Para definirlos, hay que conocer previamente cómo se comportan normalmente.

Los síntomas que se pueden apreciar en una fuente de alimentación como la de la Figura 8.43 son:

- Ausencia de tensión en la salida.
- Tensión de salida baja.
- Rizado excesivo.

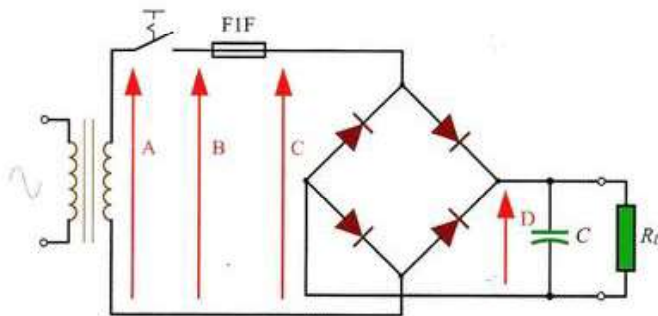


Figura 8.43.

Una vez que se han determinado los síntomas, habrá que estudiar las posibles causas de la avería.

a) **Ausencia de tensión en la salida.** Las causas pueden ser:

- Un fusible fundido.
- Un interruptor defectuoso.
- Conductores de alimentación o toma de corriente defectuosos.
- Un transformador defectuoso.
- Diodos abiertos.
- Condensador del filtro perforado.

Una vez hecho esto, el siguiente paso es reducir las posibilidades a una de las causas. Para ello, hay que realizar unas cuantas medidas de comprobación. En el caso del circuito mostrado en la Figura 8.43 estas medidas pueden consistir en medir la tensión que aparece en los puntos A, B, C, D y E. Pudiendo sacar de los datos obtenidos en las mediciones, las siguientes conclusiones:

1. *Tensión en A igual a cero* → Conductores de alimentación, toma de corriente o transformador defectuoso.
2. *Si hay tensión en A pero no en B* → Interruptor defectuoso.
3. *Si hay tensión en B pero no en C* → Fusible fundido.
4. *Si hay tensión en C y no en D* → Puente rectificador defectuoso.

En el caso de que el fusible esté fundido, no es conveniente sustituirlo de inmediato, ya que la causa puede deberse a otro componente defectuoso. En estos casos es recomendable verificar el estado de los diodos y del condensador, ya que algunos de estos podrían estar cortocircuitados.

Para comprobar los diodos, lo mejor es separar uno por uno los terminales del circuito impreso y verificar su resistencia interna con el óhmetro.

Conviene tomar unas pequeñas medidas de seguridad antes de realizar esta operación, como desconectar la alimentación de la red y comprobar que el condensador de filtrado está descargado. También se puede comprobar el estado de un diodo sin separarlo del circuito, para lo cual tendremos que utilizar el osciloscopio.

b) **Baja tensión en la salida.** Las causas pueden ser:

- Corriente de carga excesiva.
- Baja tensión en la red.
- Condensador de filtro defectuoso.
- Rectificadores defectuosos.

Las dos últimas causas pueden consistir en la pérdida de capacidad del condensador o diodos defectuosos.

c) **Rizado excesivo.** Puede estar motivado por los condensadores de filtros defectuosos.

Recambio de los componentes defectuosos

Una vez que se han localizado los componentes defectuosos, hay que sustituirlos por otros. Lo más recomendable es sustituirlos por recambios exactos, aunque si no se dispone de ellos se puede recurrir a los equivalentes.

Estos equivalentes deben poseer, al menos, las mismas características nominales que los originales. No se podrá sustituir, por ejemplo, una resistencia de 1 W por una de 1/2 W, ya que con el tiempo acabaría por destruirse.

También es muy importante que los recambios equivalentes posean las mismas dimensiones, ya que en caso contrario no podrían encajar correctamente en el circuito impreso.

Las guías de equivalentes de semiconductores son muy útiles para encontrar los recambios adecuados. Se puede decir que el repuesto más seguro es aquel que posee los mismos valores nominales y dimensiones que el componente al que sustituye.

Actividades de comprobación

- 8.1. Para la construcción de un rectificador trifásico de onda completa se necesitan:
- 4 diodos.
 - 3 diodos.
 - 6 diodos.
- 8.2. ¿Qué rectificador consigue una menor tensión de rizado a iguales condiciones de filtrado?
- El rectificador de onda completa.
 - El rectificador de media onda.
 - El puente rectificador.
- 8.3. Si el valor eficaz de la tensión alterna aplicada a la entrada de un rectificador en puente es de 200 V, averigua cuál será la tensión máxima que deberán soportar los diodos.
- 8.4. El valor eficaz de la tensión alterna a la entrada a un rectificador de media onda es de 17 V. ¿Cuál será la lectura de un voltímetro de continua conectado a la salida?
- 8.5. El valor máximo de la tensión alterna de entrada a un puente de rectificadores es de 100 V. ¿Cuál será la lectura de un voltímetro de continua conectado a la salida?
- 8.6. Encuentra la corriente nominal de los diodos de silicio, así como su tensión inversa pico máxima, para los diferentes tipos de circuitos rectificadores: a) rectificador de media onda, b) rectificador de onda completa con transformador de toma intermedia, c) puente rectificador. Las características a las que se someten dichos circuitos rectificadores son en todos los casos: tensión eficaz en el secundario del transformador = 24 V, resistencia de la carga = 100 Ω . Determina también la tensión y la

corriente por la carga en cada uno de los casos. Por último, dibuja los esquemas eléctricos correspondientes a cada uno de los circuitos indicados.

- 8.7. Se quiere determinar cuál de los diodos que se exponen en la Tabla 8.1 será el más adecuado para utilizarlo en un rectificador de media onda de las siguientes características: tensión eficaz alterna de entrada igual a 50 V, resistencia de la carga igual a 500 Ω .

Tabla 8.1.

Diodo	V de ruptura	I_{\max}
1N914	75 V	200 mA
1N1185	120 V	35 A
1N4001	50 V	1 A

- 8.8. ¿Y para un puente rectificador al que se le aplican 30 V de tensión alterna de entrada y se le conecta una resistencia de carga de 25 Ω ?
- 8.9. A un puente rectificador, con filtro por condensador, se le aplica una tensión senoidal de 50 Hz y 12 V. Diseña el condensador de filtrado siguiendo la regla del 10 % para una carga de 100 Ω . Determina también la tensión de C.C. en la carga, la tensión de rizado, así como la corriente por la carga.
- 8.10. A un puente rectificador, con filtro por condensador, se le aplica una tensión alterna senoidal de 50 Hz y 24 V. Se trata de averiguar la tensión de rizado, así como su porcentaje respecto a la tensión de C.C. (*factor de rizado*) si la resistencia de carga es de 240 Ω y la capacidad del condensador 500 μF .

Actividades de ampliación

- 8.1. Consulta en Internet sobre los temas relacionados con esta unidad e intenta contrastar y ampliar la información obtenida. Además, busca un fabricante de puentes de diodos para circuitos electrónicos y analiza las características de los diferentes tipos fabricados.
- 8.2. Busca en Internet *software* para el diseño y la simulación de circuitos electrónicos, instala alguno de los programas en tu ordenador y aprende a realizar tus propios diseños y simulaciones.

A modo de ejemplo, a continuación presentamos una relación de programas de diseño y simulación:

Tabla 8.2. Programas de diseño electrónico y simulación.

Altium designer	B2 Spice
Bartels AutoEngineer	BSch3V
Cadstar	CIRCAD
CircSchema	Circuit Shop
Crocodile clips	Designworks
Diptrace	Eagle
Edison	EDWinXP
ExpressPCB	FreePCB
GEDA	KTechLab
Livewire	Micro-Cap
MultiSim (Electronics Workbench)	ORCAD
Oregano	Pad2pad
PCB 123	PCB artist
PCB elegance	PCB Wizard
ProSchematic	Proteus
Qucs	Rimu PCB
Rimu Schematic	Simetrix
Simulador de Circuitos Digitales	Splan
Sprint-Layout	Super spice
Tina	TinyCad
TopSPICE	VirtualBreadboard
VisualSpice	WinCircuit
WinQcad	WinSchema
XCircuit	Yenka Electronics

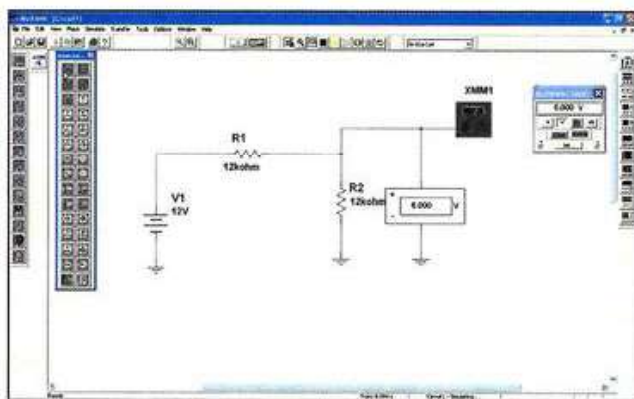


Figura 8.44. MultiSim.

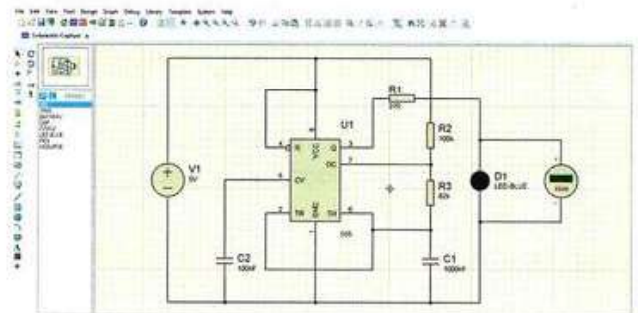


Figura 8.45. Proteus.

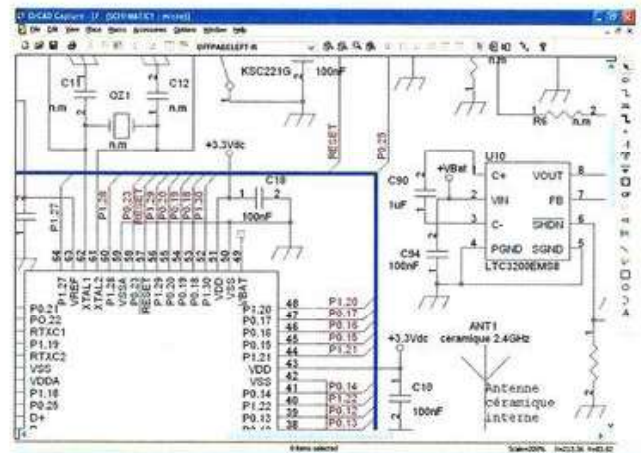


Figura 8.46. OrCAD.

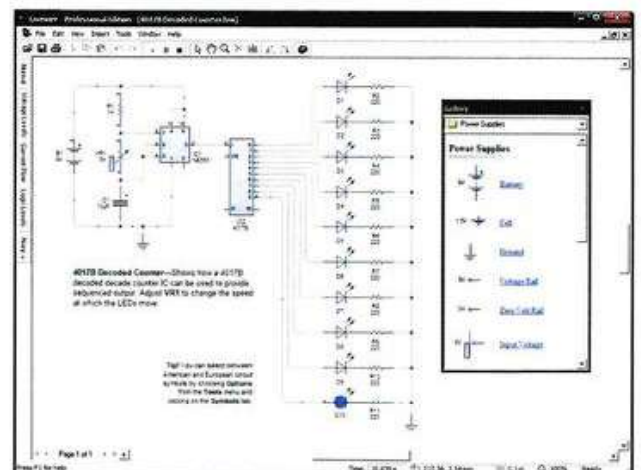


Figura 8.47. Livewire.