

# Sistemas electrónicos básicos de alimentación

# 04

1. Etapa rectificadora de media onda.
2. Etapa rectificadora de doble onda con toma media.
3. Etapa rectificadora con puente de diodos.
4. Sistema de alimentación con un filtro formado por un condensador en paralelo con la carga.
5. Sistema de alimentación con un filtro en  $\pi$ .
6. Sistema de alimentación con estabilización por diodo zener.



### Introducción: rectificación, filtrado y estabilización

Muchos dispositivos o equipos móviles de naturaleza eléctrica o electrónica, como las linternas, los receptores de radio, etc., se alimentan con generadores químicos de corriente continua, desechables o recargables. Como sabemos, el gran inconveniente de este tipo de fuentes es su limitada vida, en el caso de los desechables, o el escaso tiempo que permanece la carga o la tensión nominal en los reversibles o recargables.

En consecuencia, siempre que sea posible, la alimentación de aquellos dispositivos que requieran una corriente continua se realiza con sistemas compuestos por elementos eléctricos y electrónicos. Dichos sistemas, de mayor o menor complejidad, pueden estar incorporados a los propios equipos o, por el contrario, ser independientes del aparato o elemento que necesita estar alimentado con una corriente de determinadas características. Estos últimos, a su vez, pueden tener una aplicación específica o pueden ser de carácter universal. Sin embargo, a todos ellos nos referimos con la denominación de *fuentes o sistemas de alimentación electrónicos*.

Como ejemplos de fuentes de alimentación podemos poner los siguientes:

- Los equipos que se utilizan en los talleres y en los laboratorios, tanto escolares como laborales, como prototipo de fuente universal; estos sistemas proporcionan tensiones y corrientes variables y ajustables.
- Los cargadores de pilas estándar o los cargadores de baterías de coches, etc., son ejemplos de fuentes de alimentación de uso específico.
- Los ordenadores o los vídeos son equipos que llevan una o varias fuentes incorporadas al propio circuito.

No todos los equipos, dispositivos o sistemas que se alimentan con energía eléctrica necesitan la misma precisión y estabilidad en la alimentación para funcionar correctamente. Por este motivo existen diferentes procedimientos para obtener una corriente continua.

Para lograr una mayor precisión y estabilidad, es decir, conseguir una fuente de alimentación que proporcione más y mejores prestaciones, es necesario incrementar el número de etapas respecto de otra más elemental. Una fuente de alimentación es, por tanto, una sucesión encadenada de etapas básicas, cada una de las cuales realiza una función específica.

Las etapas básicas, cuyo análisis abordaremos en esta Unidad, son las siguientes:

- rectificación
- filtrado
- estabilización

Cualquier sistema de alimentación que tenga como misión filtrar una señal requiere como etapa previa la rectificación. De la misma manera, una etapa estabilizadora necesita previamente aquéllas que se encargan de rectificar y filtrar. En general, una etapa previa a las mencionadas es un transformador de tensión. Más adelante, en la parte dedicada a las aplicaciones, abordaremos sistemas más complejos que permiten regular la tensión de salida de fuentes de alimentación para consumos elevados de corriente.

Por primera vez emplearemos elementos cuya naturaleza y comportamiento son muy distintos a los de los componentes pasivos estudiados en las Unidades anteriores. Nos estamos refiriendo a los diferentes tipos de diodos que forman parte de la arquitectura básica de los circuitos que vamos a analizar.

Estos componentes, junto con otros más complejos, se denominan *elementos activos*, porque su comportamiento depende de la polaridad de las tensiones que se les aplica, y tradicionalmente se encuadran en el campo específico de la electrónica.



## 4.1 Etapa rectificadora de media onda



### Actividades en el aula

- 1 Ensayo y experimentación con un rectificador de media onda.

Montar un rectificador de media onda como el de la figura 4.2 y, mediante el uso de aparatos de medida y exploración, analizar el circuito y comprobar su funcionamiento, midiendo los valores de tensión y corriente en la carga, en el diodo y en el secundario del transformador. Observar las

señales de tensión en los puntos más relevantes del circuito.

- 2 Estudio del diodo.

Obtener la característica directa de un diodo y comprobar sus propiedades como elemento rectificador.

### A Funcionamiento y composición del circuito

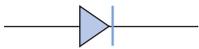


Figura 4.1 Símbolo del diodo

La figura 4.2 muestra un circuito rectificador elemental formado por un solo diodo. La función de este circuito es eliminar uno de los dos semiperiodos de una señal alterna senoidal (en este caso, el negativo), proveniente del secundario del transformador. En estas condiciones, la señal resultante, aplicada sobre la resistencia  $R$ , tiene una sola polaridad (en este caso, positiva).

se utilizaban para materializar la función rectificadora. La representación simbólica de un diodo rectificador es la que muestra la figura 4.1.

El diodo tiene la propiedad de conducir en un solo sentido. Cuando se aplica una tensión positiva al ánodo respecto del cátodo (*polarización directa*), el diodo deja pasar la corriente; mientras que si se polariza al contrario (*polarización inversa*), el dispositivo queda bloqueado y no conduce. Esta condición le permite ser utilizado como elemento fundamental de todo circuito rectificador (fig. 4.3).

### El diodo como elemento rectificador

El diodo es un componente electrónico de la familia de los semiconductores, constituido por dos terminales, denominados *ánodo* y *cátodo*. El origen de estos nombres se remonta a las antiguas válvulas de vacío, que



El diodo es un componente electrónico que conduce en un solo sentido: en polarización directa deja pasar la corriente y en polarización inversa no conduce.

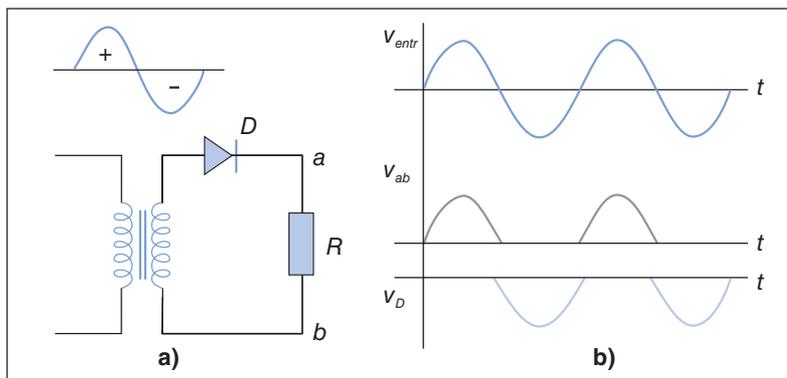


Figura 4.2 Rectificador de media onda. Formas de onda en los diferentes elementos.

### Características eléctricas de un diodo

Los diodos se caracterizan por un conjunto de parámetros. Los fabricantes suelen proporcionar los siguientes valores:

- **Tensión inversa ( $V_R$ ):** es el valor máximo que puede soportar un diodo cuando se polariza inversamente.
- **Corrientes directas media ( $I_{F(AV)}$ ) y eficaz ( $I_{F(RMS)}$ ):** son aquellos valores límites de intensidad eléctrica que admite el diodo sin deteriorarse, cuando está polarizado directamente.

## 4. Sistemas electrónicos básicos de alimentación

### 4.1 Etapa rectificadora de media onda



- **Caída de tensión directa ( $V_f$ ):** es la ddp que aparece entre los terminales del diodo en conducción, es decir, cuando está polarizado directamente. Este parámetro representa las pérdidas de tensión en el diodo en conducción y su valor depende de la corriente que circula por él y suele ser del orden de 1 V.

La figura 4.4 muestra la curva característica de corriente-tensión de un diodo, tanto si la polarización es directa como inversa.

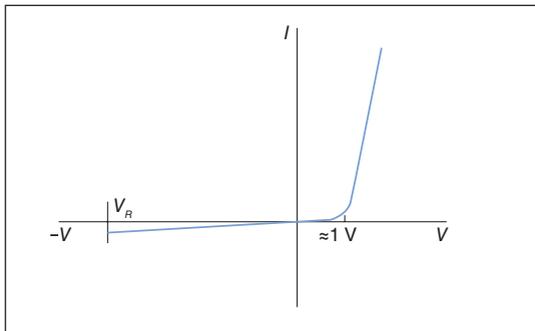


Figura 4.4. Característica directa e inversa de un diodo.

El tramo de curva del primer cuadrante corresponde al diodo polarizado directamente. Se puede observar que hasta que no se alcanza un voltio de tensión, la corriente que pasa por el circuito es prácticamente nula. Pero al alcanzar dicho valor la corriente crece muy rápidamente, permaneciendo casi constante la tensión entre ánodo y cátodo.

El tramo de curva correspondiente al tercer cuadrante responde a la polarización inversa, donde la característica se confunde con el eje de abscisas. Esto se interpreta como un paso de corriente nulo por el circuito, aunque la tensión crezca. Cuando se alcanza el valor de tensión máximo indicado por el fabricante, el diodo queda inutilizado.



#### Funcionamiento del rectificador. Tensión sobre la carga

Conocido el funcionamiento del diodo, volvamos al circuito de la figura 4.2 para describir el proceso de conversión de la CA en una tensión unidireccional de valor medio no nulo, y deducir la forma de onda de la señal sobre la carga.

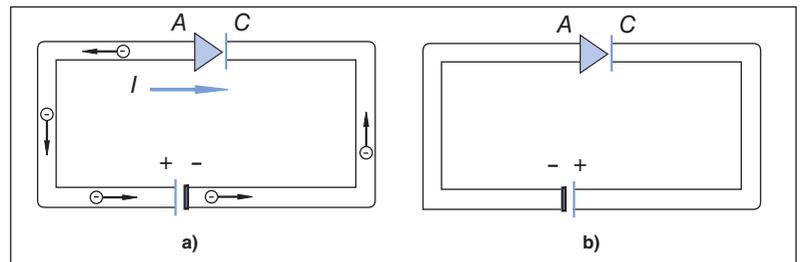


Figura 4.3 a) Polarización directa. b) Polarización inversa

Durante el semiperiodo positivo de la señal alterna del secundario del transformador (o del generador), el ánodo del diodo es positivo respecto del cátodo, es decir, el diodo queda polarizado directamente. En estas condiciones, el diodo conduce y en la carga aparece todo el semiperiodo positivo de la señal. La corriente que circula por el diodo es la misma que atraviesa la carga y el secundario del transformador (fig. 4.5a).

Durante el semiperiodo negativo, el diodo queda polarizado inversamente, y permanece en estado de no conducción o de corte durante todo este tiempo; en estas circunstancias la corriente no circula por el circuito. La caída de tensión en la resistencia de carga es nula y, por tanto, toda la tensión de secundario aparece entre los extremos del diodo (fig. 4.5b).

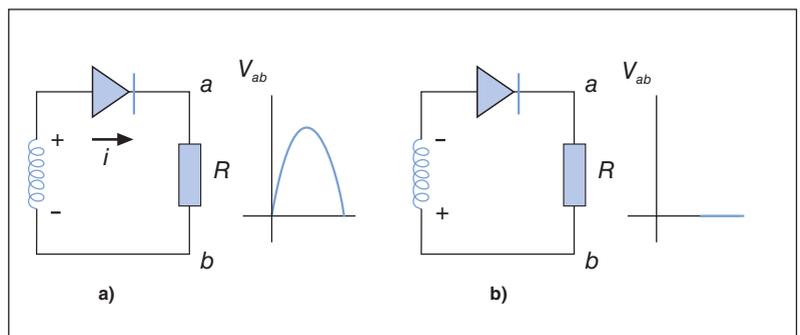


Figura 4.5. Corriente y tensión en la carga en un rectificador de media onda: a) semiperiodo positivo; b) semiperiodo negativo.

## B Magnitudes del circuito

Las magnitudes más relevantes de un rectificador de media onda, así como del resto de circuitos que analicemos en esta unidad, son los valores medios y efica-



## 4. Sistemas electrónicos básicos de alimentación

### 4.1 Etapa rectificadora de media onda

ces de tensión y corriente en la carga, el factor de forma y el grado de ondulación. Estos valores tienen cierta similitud (en algún caso son idénticos) con los correspondientes a una señal alterna senoidal.

#### Valores medios de tensión y corriente en la carga

El valor medio de la tensión en la carga  $E_{med}$  en un determinado intervalo, como en el caso de una señal alterna senoidal, es la media aritmética de todos los valores instantáneos comprendidos en dicho intervalo. Este valor se deduce mediante un proceso matemático de integración y su resultado es el siguiente:

$$\text{✱} \quad E_{med} = \frac{E_{m\acute{a}x}}{\pi} \quad [4.1]$$

donde  $E_{m\acute{a}x}$  es el valor de cresta o valor máximo de la señal.

Cuando la carga es resistiva, como en el caso que nos ocupa, la corriente y la tensión se encuentran relacionadas por la ley de Ohm:

$$\text{✱} \quad I_{med} = \frac{E_{med}}{R} \quad [4.2]$$

La señal de corriente es exactamente igual que la de tensión y, por tanto, el valor medio es también en este caso la media aritmética de todos los valores instantáneos.

#### Valores eficaces de tensión y corriente en la carga

El valor eficaz de tensión sobre la carga es de la misma naturaleza que el de una señal alterna senoidal y también se calcula como la raíz del valor cuadrático medio. Se obtiene por un proceso matemático de integración y la expresión resultante es la siguiente:

$$\text{✱} \quad E_{ef} = \frac{E_{m\acute{a}x}}{2} \quad [4.3]$$

La relación entre tensión y corriente, cuando la carga es resistiva, viene dada por la expresión:

$$\text{✱} \quad I_{ef} = \frac{E_{ef}}{R} \quad [4.4]$$

Como en el caso del valor medio, la corriente eficaz también se puede obtener por un proceso de integración similar al de la tensión.

La figura 4.6 muestra los valores medio y eficaz de tensión o de corriente de una señal alterna rectificada en media onda.

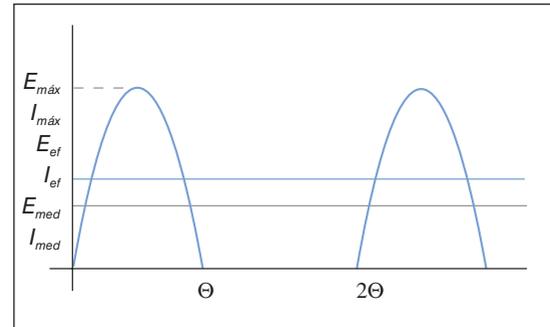


Figura 4.6. Valores medio y eficaz de tensión y corriente en un rectificador de media onda.

#### Factor de forma y grado de ondulación

El valor de factor de forma y el del grado de ondulación (denominado *factor de rizado*) de una señal ondulada como las que muestran las figuras 4.2 y 4.6 y otras que mostraremos en los siguientes apartados, nos dan idea de la continuidad de la señal o, dicho de otra manera, del parecido de la onda de tensión o corriente con una señal totalmente constante, es decir, continua.

Para determinar las expresiones de ambas magnitudes es necesario abordar en primer lugar la *composición* y *descomposición* de señales eléctricas.

La suma de varias funciones senoidales elementales dan como resultado una función periódica no senoidal. Un buen ejemplo de ello es la síntesis de sonidos procedentes de diferentes instrumentos musicales, captadas por un micrófono y transformadas por este dispositivo en señales eléctricas.

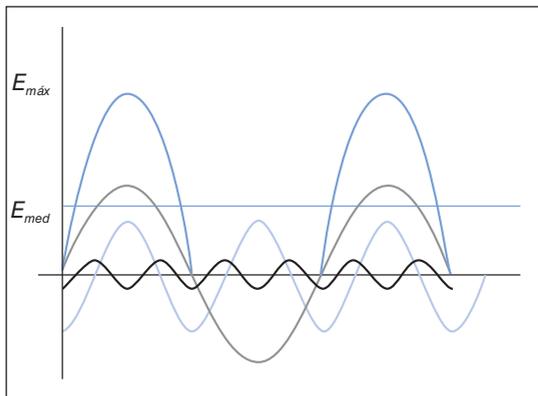
## 4. Sistemas electrónicos básicos de alimentación

### 4.1 Etapa rectificadora de media onda



De manera inversa, una señal ondulada como la que estamos analizando puede ser descompuesta en la suma de un valor medio constante y una serie de funciones senoidales de diferentes frecuencias y múltiplos de la frecuencia principal. En la práctica, la descomposición se puede llevar a cabo mediante filtros que seleccionan una frecuencia o un conjunto de ellas.

Las señales de tensión y de corriente a la salida del rectificador estarán constituidas por la superposición del valor medio de la magnitud y por una ondulación formada por un conjunto de señales senoidales, tal como muestra la figura 4.7, de las cuales una será la principal y el resto armónicos de la misma.



**Figura 4.7.** Componente de una señal rectificada en media onda.

En resumen, hemos hecho referencia a la señal *ondulada*, obtenida a la salida del rectificador, y a la *ondulación* u *ondulaciones*, formada por una serie de señales alternas senoidales, conocida como *señal de rizado*. El valor instantáneo de la señal ondulada es igual, en cada momento, a la suma del valor medio de dicha señal más las ondulaciones.

El **factor de forma** ( $F_f$ ) de una magnitud ondulada (como la de la figura 4.7) se define como la relación entre el valor eficaz y el valor medio de dicha magnitud:

$$F_f = \frac{E_{ef}}{E_{med}} \quad [4.5]$$

El valor ideal de  $F_f$  es la unidad. Esto quiere decir que la señal es constante y, por tanto, el rizado es cero.

El **grado de ondulación** o **factor de rizado** ( $F_R$ ) de una magnitud ondulada se define como la relación entre el valor eficaz de la ondulación y el valor medio de la magnitud ondulada:

$$F_R = \frac{E_{ef(ond)}}{E_{med}} \quad [4.6]$$

El valor ideal de  $F_R$  es cero. Como en el caso anterior, indica que la ondulación o señal de rizado es nula.

#### Relación entre el factor de forma y el factor de rizado

El calor desarrollado por una señal ondulada es exactamente igual que el desarrollado por una señal constante; y es equivalente al valor medio de dicha señal, más el desarrollado por las ondulaciones o señal de rizado. Aplicando las tensiones mencionadas a una misma resistencia y durante un mismo periodo de tiempo, es fácil deducir, por aplicación de la ley de Joule, la siguiente expresión:

$$E_{ef}^2 = E_{med}^2 + E_{ef(ond)}^2 \quad [4.7]$$

Si dividimos los dos miembros por  $E_{med}^2$  obtendremos:

$$F_f^2 = 1 + F_R^2 \quad [4.8]$$

Las expresiones expuestas del factor de forma y del factor de rizado, así como la relación entre ellas, son aplicables no sólo a las señales rectificadas, sino también a toda tensión o corriente ondulada, es decir unidireccional y periódica.

#### Factor de forma y factor de rizado para la señal rectificada en media onda

Los valores correspondientes para la señal que estamos analizando en este bloque son los siguientes:

$$F_f = \frac{E_{ef}}{E_{med}} = \frac{E_{máx}/2}{E_{máx}/\pi} = \frac{\pi}{2} = 1,57$$

$$F_R = \sqrt{F_f^2 - 1} = 1,21$$



## 4. Sistemas electrónicos básicos de alimentación

### 4.1 Etapa rectificadora de media onda



#### Características de los diodos y magnitudes en la carga

En el caso de un rectificador de media onda, la corriente que circula por la carga es la misma que la que circula por el diodo y el secundario del transformador, por tanto, los valores medio y eficaz que tendrá que soportar dicho componente serán:



$$I_{F(AV)} = I_{med}$$

[4.9]



$$I_{F(RMS)} = I_{ef}$$

[4.10]

Por otra parte, la tensión máxima que aparecerá entre los extremos del diodo cuando éste se encuentre bloqueado, y por tanto la tensión inversa máxima que tendrá que soportar, será:



$$V_R = E_{m\acute{a}x}$$

[4.11]



### Resolución del circuito

En el circuito de la figura 4.2a, el receptor o resistencia de carga vale  $100\ \Omega$  y se desea que el valor medio de la tensión de salida tenga un valor de  $14\ V$ .

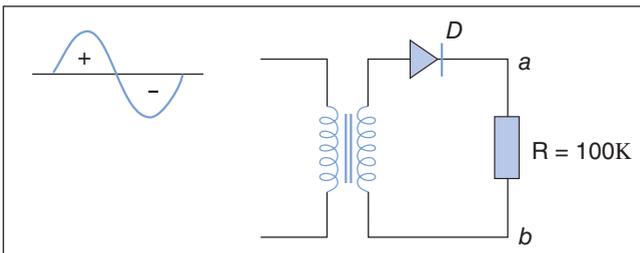


Figura 4.2a.

Calcular:

- El valor eficaz de la tensión en la carga, así como las corrientes media y eficaz.
- El valor eficaz de la tensión suministrada por el secundario del transformador y la potencia de secundario.
- Las características eléctricas del diodo.

#### Solución

a) El valor eficaz se puede obtener a partir de la expresión [4.5]:

$$E_{ef} = F_F E_{med} = 1,57 \Delta 14 = 22\ V$$

Conocidos los valores de tensión media y eficaz sobre la carga, podemos deducir los correspondientes valores mediante las expresiones [4.2] y [4.4]:

$$I_{med} = \frac{E_{med}}{R} = \frac{14}{100} = 0,14\ A = 140\ mA$$

$$I_{ef} = \frac{E_{ef}}{R} = \frac{22}{100} = 0,22\ A = 220\ mA$$

- En primer lugar es necesario obtener el valor máximo de la tensión sobre la carga, ya que éste (si se desprecia la caída de tensión del diodo) será el mismo que el que proporcione el secundario del transformador. Despejando  $E_{m\acute{a}x}$  de la expresión [4.3] tendremos:

$$E_{m\acute{a}x} = 2E_{ef} = 2 \cdot 22 = 44\ V$$

Recordemos que el valor eficaz de una señal alterna senoidal es:

$$E_{ef} = \frac{E_{m\acute{a}x}}{\sqrt{2}}$$

Si denominamos  $V_2$  al valor eficaz de la tensión a la salida del transformador tendremos que  $V_2 = E_{ef}$ , por tanto:

$$V_2 = \frac{E_{m\acute{a}x}}{\sqrt{2}} = \frac{44}{\sqrt{2}} = 31,11\ V$$

La corriente eficaz por el arrollamiento secundario será la misma que la corriente eficaz por la carga:

$$I_2 = I_{ef} = 0,22\ A$$

La potencia útil o potencia del secundario del transformador será:

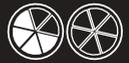
$$P_2 = V_2 I_2 = 31,11 \cdot 0,22 = 6,85\ W$$

- Según las expresiones [4.9], [4.10] y [4.11], las características eléctricas mínimas del diodo del circuito serán:

$$I_{F(AV)} = I_{med} = 140\ mA$$

$$I_{F(RMS)} = I_{ef} = 220\ mA$$

$$V_R = E_{m\acute{a}x} = 44\ V$$



## 4.2 Etapa rectificadora de doble onda con toma media

### Actividades en el aula



#### 3 Ensayo y experimentación con un rectificador de doble onda con toma media.

Montar un rectificador de doble onda con toma media como el de la figura 4.8, y mediante el uso de aparatos de medida y exploración, analizar el circuito y comprobar su funcionamiento, midiendo los valores de tensión y corriente en la carga en los diodos y en el secundario del transformador. Observar las señales de tensión en los puntos más relevantes del circuito.

### A Funcionamiento y composición del circuito

La figura 4.8 muestra un circuito rectificador de doble onda. Como se puede observar, utiliza dos diodos y un transformador con una toma intermedia en el circuito secundario. Su constitución es más compleja que la del circuito de la figura 4.2 pero, a cambio, tiene la propiedad de convertir en positivo el semiperiodo negativo de la señal alterna senoidal procedente del secundario del transformador. Esta operación es conocida como *rectificación en doble onda*, y la señal de tensión que aparece en la carga es la que muestra la figura 4.8.

#### ⊗ Diferencias respecto al rectificador de media onda

Con un rectificador de doble onda se obtiene, como en el caso de media onda, una señal unidireccional sobre la carga; sin embargo, con un circuito como el de la figura 4.8, la señal es más continua. Esto se traduce en que para una misma tensión de entrada al rectificador el valor medio sobre la carga es mayor que si se utiliza un rectificado de media onda. Con este sistema mejoran además los valores del factor de forma y del grado de ondulación o factor de rizado.

En resumen, a cambio de utilizar un circuito más complejo para realizar la operación, la señal rectificada en doble onda, analizada desde el punto de vista de su continuidad, ofrece una mayor calidad que la rectificada en media onda.

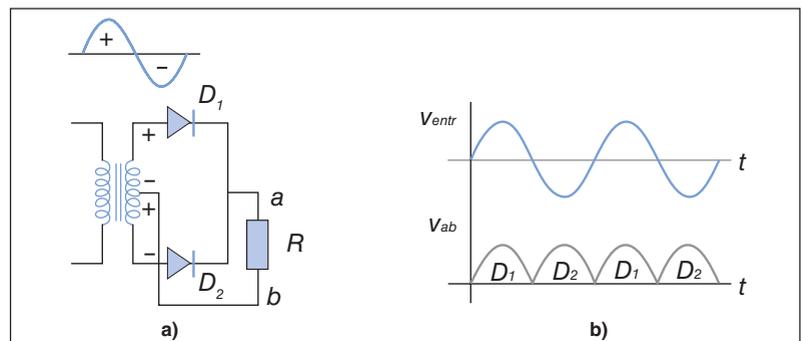


Figura 4.8. Rectificador de doble onda con toma media.

#### ⊗ Funcionamiento del rectificador

La polarización indicada en el secundario del transformador de la figura 4.8 corresponde al semiperiodo positivo de la señal de primario. Cuando cambia el semiperiodo negativo, los signos son contrarios. Supondremos que las tensiones de primario y secundario están en fase, es decir, cuando el extremo superior del primario es positivo, lo es también el extremo superior del secundario.

Si observamos con detenimiento el circuito, comprobaremos que su constitución es la yuxtaposición de dos rectificadores de media onda. En cada semiperiodo funciona un diodo y una parte del transformador, y permanece inactiva la otra sección. Por esta razón el secundario del transformador debe ser doble.

Durante el semiperiodo positivo de la señal de entrada, el diodo  $D_1$  queda polarizado directamente, y por tanto conduce. En estas circunstancias, la carga se encuen-



## 4. Sistemas electrónicos básicos de alimentación

### 4.2 Etapa rectificadora de doble onda con toma media

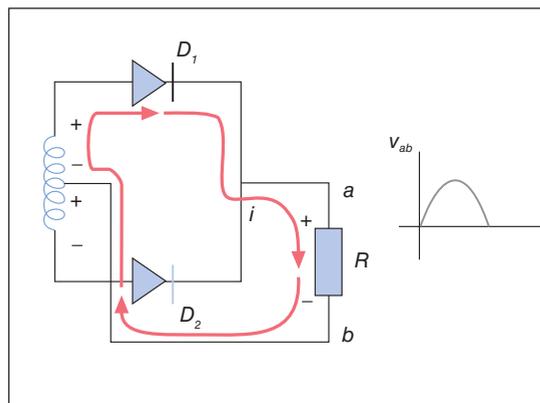
tra en paralelo con la parte superior del secundario y la ddp entre sus extremos es exactamente la misma (se supone que la caída de tensión en los diodos es despreciable), siendo positivo el punto  $a$  respecto del punto  $b$ . La corriente circula por la parte superior del secundario, por el diodo  $D_1$  y por la carga. Durante todo este tiempo, la parte inferior del secundario permanece inactiva.

El diodo  $D_2$  no conduce, ya que su cátodo es positivo respecto del ánodo. Si observamos con detenimiento, comprobaremos que la ddp inversa máxima que ha de soportar  $D_2$  es la suma de las  $E_{m\acute{a}x}$  de cada una de las partes del secundario, ya que el diodo  $D_1$  conduce y para los efectos es como si no existiera.

En el tramo correspondiente al semiperiodo negativo,  $D_2$  queda polarizado directamente y conduce; sin embargo, ahora  $D_1$  se bloquea. La carga se encuentra en paralelo con la parte inferior del secundario. La arquitectura del circuito es tal que durante este semiperiodo negativo el punto  $a$  es también positivo respecto del punto  $b$ . La corriente circula por la parte inferior del secundario, por  $D_2$  y por la carga. La parte superior del secundario del transformador permanece ahora inactiva.

El diodo  $D_1$  debe soportar una tensión inversa idéntica a la que soportaba  $D_2$  en el otro semiperiodo.

El resultado de la operación de este dispositivo se traduce en una tensión unidireccional positiva en la carga de valor medio doble de la obtenida con un rectificador de media onda.



**Figura 4.9.** Camino de la corriente en el primer semiperiodo en un rectificador de doble onda con toma media.

## B Magnitudes del circuito

Las definiciones de los valores medio y eficaz, del factor de forma y del grado de ondulación o factor de rizado, así como su obtención, son en este caso exactamente las mismas que las expuestas en el apartado B, correspondiente al rectificador de media onda. Por tanto, en este punto nos limitaremos a indicar las expresiones de las tensiones y corrientes medias y eficaces en la carga, así como los valores concretos de los factores de forma y rizado.

### Valores medios de tensión y corriente en la carga

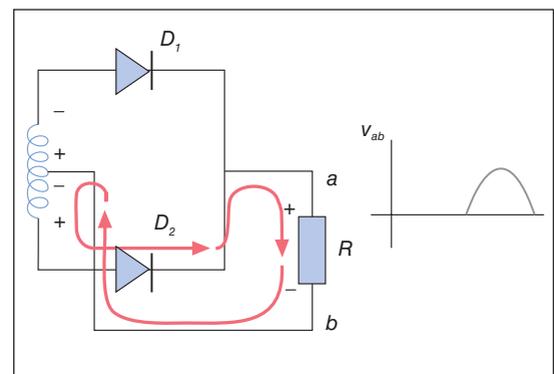
Como ya hemos señalado, el valor medio de tensión sobre la carga en un rectificador de doble onda es dos veces superior al de un dispositivo que rectifica en media onda. Por tanto, dicho valor vendrá dado por la siguiente expresión:

$$E_{med} = \frac{2E_{m\acute{a}x}}{\pi} \quad [4.12]$$

donde  $E_{m\acute{a}x}$  es el valor máximo de la tensión sobre la carga y, por consiguiente, en cada sección del arrollamiento primario del transformador.

Los valores medios de corriente y tensión se relacionan mediante la ley de Ohm:

$$I_{med} = \frac{E_{med}}{R}$$



**Figura 4.10.** Camino de la corriente durante el segundo semiperiodo en un rectificador de doble onda con toma media.

## 4. Sistemas electrónicos básicos de alimentación

### 4.2 Etapa rectificadora de doble onda con toma media



#### Valores eficaces de tensión y corriente en la carga

Los valores eficaces en un rectificador de doble onda u onda completa, en función del valor máximo, son exactamente iguales que en los de una señal alterna senoidal, ya que el valor generado por una resistencia a la que se le aplican dichos valores durante un mismo periodo es idéntico. En general, la eficacia de la tensión (o de la corriente) es igual, bien se trate de una señal unidireccional o de una alterna, siempre y cuando la superficie total delimitada por la onda sea la misma. En consecuencia, la expresión de la tensión será:

$$E_{ef} = \frac{E_{m\acute{a}x}}{\sqrt{2}} \quad [4.13]$$

Según la ley de Ohm:

$$I_{ef} = \frac{E_{ef}}{R}$$

La figura 4.11 muestra los valores medio y eficaz de tensión y de corriente de una señal alterna rectificada en doble onda.

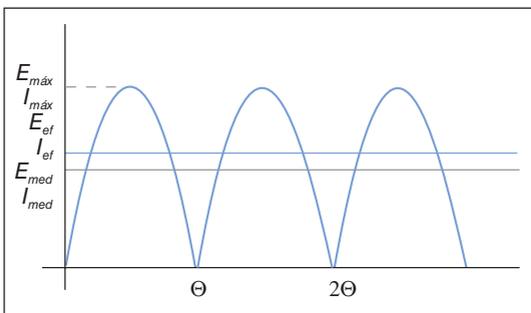


Figura 4.11. Valores medio y eficaz de tensión y corriente en un rectificador de doble onda.

#### Factor de forma y factor de rizado

Las expresiones [4.5] y [4.6] son válidas también para el caso que nos ocupa. Por tanto, sustituyendo los valores eficaz y medio, tendremos:

$$F_F = \frac{E_{ef}}{E_{med}} = \frac{E_{m\acute{a}x}/\sqrt{2}}{2E_{m\acute{a}x}/\pi} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11$$

En este caso, el factor de rizado será:

$$F_R = \sqrt{F_F^2 - 1} = 0,48$$

#### Características de los diodos y magnitudes en la carga

Como ya hemos señalado, cada diodo conduce exclusivamente durante un semiperiodo, por lo que la corriente media que debe soportar es la mitad de la que circula por la carga, es decir:

$$I_{F(AV)} = 0,5 I_{med} \quad [4.14]$$

Por el contrario, el valor de la corriente eficaz que debe soportar no es la mitad de la corriente eficaz por la carga, sino que será superior a esta relación.

Cada diodo se comporta como un rectificador de media onda (MO). En este caso, la relación entre los valores máximo y eficaz será:

$$I_{m\acute{a}x(MO)} = 2I_{ef(MO)}$$

Por otra parte, la  $I_{m\acute{a}x}$  en la carga en un rectificador de doble onda (DO) tendrá el valor dado por la expresión:

$$I_{m\acute{a}x(DO)} = \sqrt{2} I_{ef(DO)}$$

Los valores máximos son iguales, tanto si se trata de rectificación en media onda como en onda completa:

$$I_{m\acute{a}x(MO)} = I_{m\acute{a}x(DO)}$$

Sustituyendo las corrientes máximas por su valor, tendremos:

$$2I_{ef(MO)} = \sqrt{2}I_{ef(DO)}$$

Simplificando:

$$I_{ef(MO)} = 0,7 I_{ef(DO)}$$

Como  $I_{F(RMS)} = I_{ef(MO)}$  y la corriente eficaz en la carga  $I_{ef} = I_{ef(DO)}$  definitivamente tendremos:

$$I_{F(RMS)} = 0,7 I_{ef} \quad [4.15]$$

Por último, la tensión inversa máxima que deberán soportar los diodos será la generada por el secundario completo del transformador, y como ésta es el doble de la  $E_{m\acute{a}x}$  en la carga, tendremos:

$$V_R = 2E_{m\acute{a}x} \quad [4.16]$$



## 4. Sistemas electrónicos básicos de alimentación

### 4.2 Etapa rectificadora de doble onda con toma media



### Resolución del circuito

Con el fin de comparar los resultados obtenidos en la resolución del rectificador de media onda y los que obtengamos en este apartado, hemos decidido partir de los mismos datos, es decir, de una carga cuyo valor es de  $100 \Omega$  que requiere una tensión de alimentación con un valor medio de  $14 \text{ V}$ .

Calcularemos las mismas magnitudes y parámetros que en el problema del apartado anterior, es decir: los valores eficaces de la tensión y la corriente y la corriente media en la carga, la tensión eficaz y la potencia en el arrollamiento secundario del transformador y las características eléctricas de los diodos.

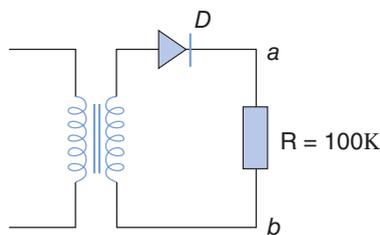


Figura 4.2 b.

#### Solución

Conocido el valor del factor de forma, que en este caso vale  $1,11$ , y el valor medio de la tensión, podemos conocer el valor eficaz en la carga con el auxilio de la expresión [4.5]:

$$E_{ef} = F_f E_{med} = 1,11 \cdot 14 = 15,54 \text{ V}$$

Según las expresiones [4.2] y [4.4], las corrientes media y eficaz tendrán los siguientes valores:

$$I_{med} = \frac{E_{med}}{R} = \frac{14}{100} = 0,14 \text{ A} = 140 \text{ mA}$$

Despejando  $E_{m\acute{a}x}$  de la expresión [4.13], tendremos:

$$E_{m\acute{a}x} = \sqrt{2} E_{ef} = \sqrt{2} \cdot 15,54 = 22 \text{ V}$$

Recordemos que el valor eficaz de una señal alterna senoidal es:

$$E_{ef} = \frac{E_{m\acute{a}x}}{\sqrt{2}}$$

que, como podemos comprobar, es el mismo que el valor eficaz en la carga para el caso de rectificación en doble onda.

Si denominamos  $V_2$  al valor eficaz de la tensión a la salida del transformador, tendremos que  $V_2 = E_{ef}$ ; por tanto:

$$V_2 = \frac{E_{m\acute{a}x}}{\sqrt{2}} = \frac{22}{\sqrt{2}} = 15,54 \text{ V}$$

es decir, el mismo valor que en la carga.

La corriente eficaz por el secundario  $I_2$  será la misma que la corriente que circula por cada diodo, que, como hemos demostrado, es  $0,7$  veces la corriente por la carga. Por consiguiente, utilizando una expresión análoga a la [4.15] obtendremos:

$$I_2 = 0,7 I_{ef} = 0,7 \cdot 0,155 = 0,11 \text{ A}$$

La potencia útil o potencia de cada una de las partes del secundario del transformador será:

$$P_2 = V_2 I_2 = 15,54 \cdot 0,11 = 1,71 \text{ W}$$

La potencia útil total será el doble:

$$P_{2(total)} = 2P_2 = 2 \cdot 1,71 = 3,4 \text{ W}$$

Las características eléctricas de los diodos, obtenidas con el auxilio de las expresiones [4.14], [4.15] y [4.16], serán:

$$I_{F(AV)} = 0,5 I_{med} = 0,5 \cdot 0,14 = 0,07 \text{ A} = 70 \text{ mA}$$

$$I_{F(RMS)} = 0,7 I_{ef} = 0,7 \cdot 0,155 = 0,11 \text{ A} = 110 \text{ mA}$$

$$V_R = 2E_{m\acute{a}x} = 2 \cdot 22 = 44 \text{ V}$$

Los componentes se elegirán aplicando un factor de seguridad sobre los datos obtenidos.

El lector podrá comprobar que para unos mismos valores medios de tensión y corriente en la carga, la potencia es la mitad cuando se utiliza un rectificador de doble onda, aunque la tensión total de secundario es la misma en ambos casos.

En el caso de rectificación en doble onda con transformador con toma media, el número de diodos es el doble que en rectificación en media onda, pero en este último caso los diodos han de soportar una corriente que es justamente el doble que en el primero.

Por otra parte, es indiscutible que la calidad de la señal en doble onda es muy superior; buena muestra de ello son los valores del factor de forma y del factor de rizado frente a los equivalentes de una señal rectificadora en media onda.



## 4.3 Etapa rectificadora con puente de diodos

### Actividades en el aula



#### 4 Ensayo y experimentación con un rectificador de doble onda formado por cuatro diodos.

Montar un rectificador de doble onda de cuatro diodos como el de la figura 4.12 y, mediante el uso de aparatos de medida y exploración, analizar el circuito y comprobar su funcionamiento, midiendo los valores de tensión y corriente en la carga en los diodos y en el secundario del transformador. Observar las señales de tensión en los puntos más relevantes del circuito.

### A Funcionamiento y composición del circuito

Vamos a estudiar la arquitectura y el funcionamiento de un dispositivo rectificador cuyos efectos son idénticos a los del circuito anterior, es decir, proporciona a la carga una señal rectificada en doble onda, a partir de una señal alterna senoidal. Una vez terminado su estudio cualitativo y cuantitativo, realizaremos un breve análisis comparativo entre ambos sistemas de rectificación.

### Arquitectura del rectificado en puente

La figura 4.12 muestra un circuito rectificador constituido por cuatro diodos. Por su estructura, es el circuito más complejo de los estudiados hasta este momento.

La necesidad de cuatro diodos en el circuito queda compensada con la reducción del arrollamiento secun-

dario del transformador. En este caso, para un mismo valor de la ddp (media o eficaz) en la carga, la tensión necesaria de secundario es la mitad que la de un rectificador doble onda con toma media.

### Funcionamiento del rectificador

En la figura 4.13 se ha representado la polaridad en el arrollamiento secundario, correspondiente al semiperiodo positivo de la señal alterna senoidal.

En este primer semiperiodo, la corriente encuentra un camino que comienza en el diodo  $D_1$ , atraviesa la carga y retorna al punto más negativo del secundario a través del diodo  $D_2$ . Durante este tiempo, los diodos  $D_3$  y  $D_4$  están bloqueados, y si se observa detenidamente el circuito se comprobará que la tensión inversa que han de soportar en cada momento es la correspondiente a la generada por el arrollamiento secundario, cuyos valores instantáneos y máximo coinciden con los aplicados a la carga  $R$  si despreciamos la caída de tensión de los diodos.

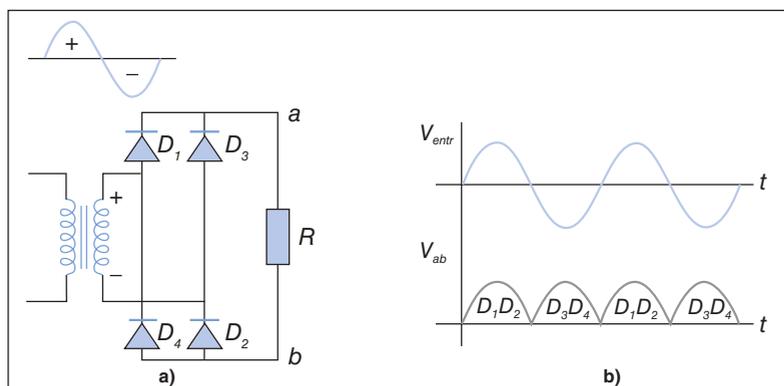


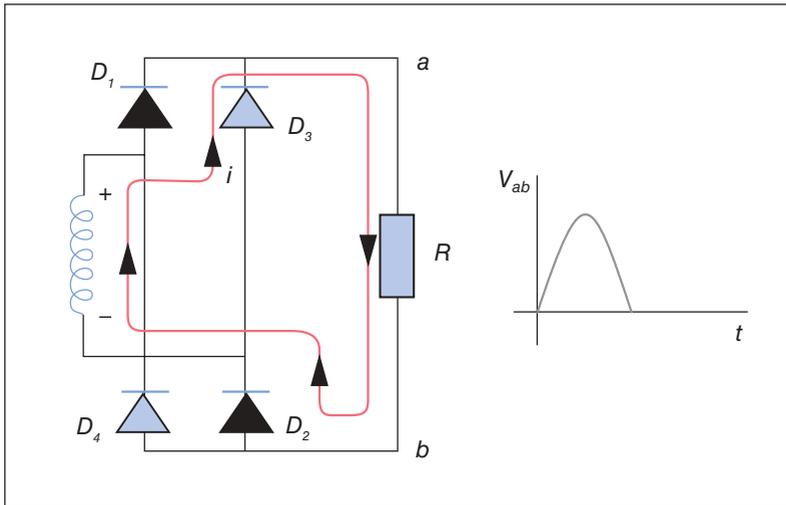
Figura 4.12. Rectificador de doble onda con puente de diodos.



## 4. Sistemas electrónicos básicos de alimentación

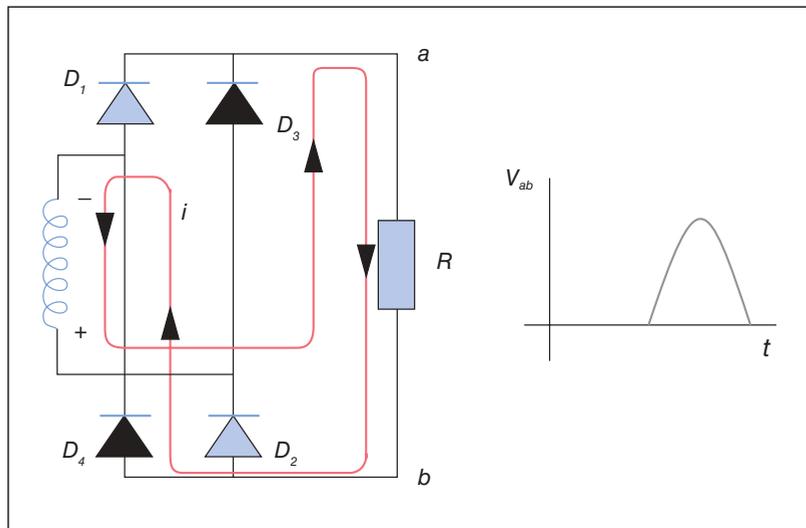
### 4.3 Etapa rectificadora con puente de diodos

Cuando cambia la polaridad de la señal alterna, la corriente encuentra el camino a través del diodo  $D_3$ , cruza la resistencia de carga y retorna por el diodo  $D_4$ . Se observará, como muestra la figura 4.14, que la polaridad en la carga es la misma que en el otro semiperiodo, es decir,  $a$  es siempre positivo respecto de  $b$ .



**Figura 4.13.** Camino de la corriente durante el primer semiperiodo.

En este caso, los diodos  $D_1$  y  $D_2$  pasan al estado de bloqueo, y la tensión que deben soportar es la misma que  $D_3$  y  $D_4$  en el caso anterior.



**Figura 4.14.** Camino de la corriente durante el segundo semiperiodo.

## B Magnitudes del circuito

Al ser la señal sobre la carga exactamente igual, las expresiones de los valores medios y eficaces de tensión y corriente son los mismos que en el caso del rectificador con toma media.

Si existe una total identidad entre dichos valores, el factor de forma y el de rizado, que depende de ellos, serán también los mismos en un caso y en otro.

En cuanto a las características eléctricas de los diodos, se produce una coincidencia en los valores de las corrientes. Sin embargo, en el caso que nos ocupa, la tensión inversa que deben soportar los diodos es exactamente la mitad que en un rectificador con toma media, por tanto:

$$V_R = E_{m\acute{a}x} \quad [4.17]$$

donde  $E_{m\acute{a}x}$  es el valor máximo de la señal en la carga.

## 4. Sistemas electrónicos básicos de alimentación

### 4.3 Etapa rectificadora con puente de diodos



## Resolución del circuito



Vamos a resolver, por tercera vez en este apartado, el caso que planteamos en el circuito rectificador de media onda y en el de toma media. Con ello se pretende llevar a cabo un análisis comparativo de los tres casos y observar las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos.

Recordemos que el valor de la carga es de  $100 \Omega$ , que el valor medio de la tensión en la misma es de  $14 \text{ V}$  y se desprecia la caída de tensión de los diodos.

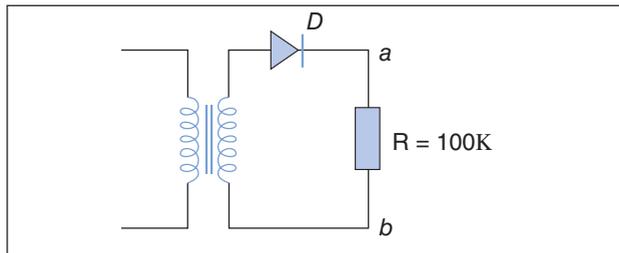


Figura 4.2c.

### Solución

a) Despejando el valor eficaz de la expresión [4.5]:

$$E_{ef} = F_f E_{med} = 1,11 \cdot 14 = 15,54 \text{ V}$$

Los valores de las corrientes por la carga son exactamente los mismos que en el caso de un rectificador con toma media:

$$I_{med} = \frac{E_{med}}{R} = \frac{14}{100} = 0,14 \text{ A} = 140 \text{ mA}$$

$$I_{ef} = \frac{E_{med}}{R} = \frac{15,54}{100} = 0,155 \text{ A} = 155 \text{ mA}$$

b) Despejando  $E_{m\acute{a}x}$  de la expresión [4.13] tendremos:

$$E_{m\acute{a}x} = \sqrt{2} E_{ef} = \sqrt{2} \cdot 15,54 = 22 \text{ V}$$

Recordemos que el valor eficaz de una señal alterna senoidal es:

$$E_{ef} = \frac{E_{m\acute{a}x}}{\sqrt{2}}$$

que, como podemos comprobar, es el mismo que el valor eficaz en la carga para el caso de rectificación en doble onda.

Si denominamos  $V_2$  al valor eficaz de la tensión a la salida del transformador, tendremos que  $V_2 = V_{ef}$ , por tanto:

$$V_2 = \frac{E_{m\acute{a}x}}{\sqrt{2}} = \frac{22}{\sqrt{2}} = 15,54 \text{ V}$$

es decir, el mismo valor que en la carga.

La corriente eficaz por el arrollamiento secundario  $I_2$  será la misma que la corriente que circula por cada grupo de diodos, que, como hemos demostrado, es 0,7 veces la corriente por la carga. Por tanto, utilizando una expresión análoga a la [4.15] tendremos:

$$I_2 = 0,7 I_{ef} = 0,7 \cdot 0,155 = 0,11 \text{ A}$$

La potencia útil o potencia total del secundario será ahora:

$$P_2 = V_2 I_2 = 15,54 \cdot 0,11 = 1,71 \text{ W}$$

c) Las características eléctricas de los diodos, obtenidas con el auxilio de las expresiones [4,14], [4,15] y [4,17], serán:

$$I_{F(AV)} = 0,5 I_{med} = 0,5 \cdot 0,14 = 0,07 \text{ A} = 70 \text{ mA}$$

$$I_{F(RMS)} = 0,7 I_{ef} = 0,7 \cdot 0,155 = 0,11 \text{ A} = 110 \text{ mA}$$

$$V_R = E_{m\acute{a}x} = 22 \text{ V}$$

A la vista de estos datos, las diferencias entre los dos sistemas que posibilitan la rectificación en doble onda se pueden concretar en los siguientes puntos:

- Un rectificador de doble onda con toma media sólo opera con dos diodos, pero en cambio necesita un transformador con doble secundario.
- Un puente rectificador necesita un transformador con un secundario la mitad de pequeño, tanto en tensión como en potencia; sin embargo precisa cuatro diodos. En este caso, la tensión inversa que deben soportar es la mitad que en el rectificador con toma media.

En estos momentos en que los semiconductores están tan perfeccionados y su precio es tan asequible, son indiscutibles las ventajas del puente rectificador frente al circuito con toma media.



## 4.4 Sistema de alimentación con un filtro formado por un condensador en paralelo con la carga



### Actividades en el aula

- 5 Ensayo y experimentación con un sistema de alimentación formado por un rectificador y un filtro sencillo.

Montar un circuito como el de la figura 4.15 y, mediante el uso de aparatos de medida y exploración, analizar el circuito y comprobar su funcionamiento, midiendo los valores de tensión y corriente en la carga, en el diodo y en el secundario del transformador. Observar las señales de tensión en los puntos más relevantes del circuito.

### A Funcionamiento y composición del circuito

La figura 4.15 muestra un sistema de alimentación algo más complejo que los analizados hasta este momento, así como las señales de tensión en la carga y corriente por el diodo. A la salida del rectificador de media onda se ha conectado un condensador en paralelo con la resistencia de carga. Esta etapa es conocida con el nombre de *filtro* y su principal función es la de reducir el valor de la tensión de rizado.

Como podremos comprobar más adelante, el filtro aumenta el valor medio respecto a la señal rectificada aplicada a su entrada y reduce el factor de forma y el factor de rizado.

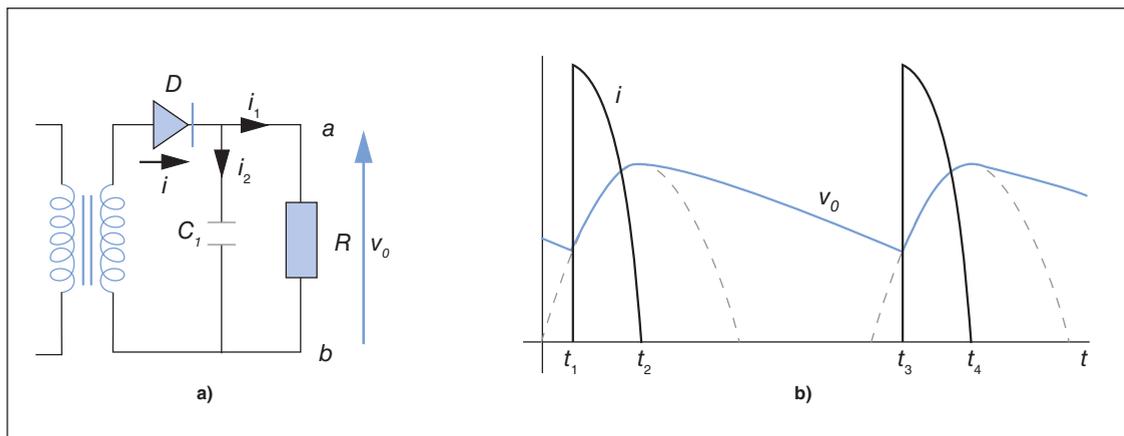
### Tensión en la carga

Para analizar el funcionamiento del circuito de la figura 4.15 nos ayudaremos de las señales de tensión en la carga y de la corriente por el diodo.

En el tramo de tiempo comprendido entre  $t_1$  y  $t_2$ , el diodo está polarizado directamente, conduce y, por tanto, pone en comunicación la carga con el secundario del transformador. Durante este tiempo la tensión en la resistencia es prácticamente la misma que la que proporciona el secundario del transformador, en él se carga el condensador con el valor máximo de la tensión *pulsatoria*.

Por el diodo sólo circula corriente durante este intervalo, y el valor medio de la misma es igual al valor medio de la corriente por la carga. El valor del pico de la corriente depende básicamente de la capacidad del condensador.

Figura 4.15. Rectificador con filtro elemental.





En el intervalo  $t_2 - t_3$ , el condensador se descarga a través de la resistencia de carga. La velocidad de la descarga depende sobre todo de los valores de la resistencia y de la capacidad.

## B Magnitudes del circuito

Las magnitudes propias en este caso son: el valor medio de la señal filtrada, los valores (máximo, eficaz, etc.) de la señal de rizado, el factor de forma y el factor de rizado. Estos dos últimos, como ya se sabe, dependen de los valores de tensión mencionados.

El valor máximo de la señal filtrada  $E_{m\acute{a}x}$  es el mismo que el valor máximo a la entrada del filtro, es decir, a la salida del rectificador.

### Valor medio de la señal filtrada

La figura 4.16 muestra la tensión a la salida del filtro del circuito de la figura 4.15. El valor medio, al que representamos como  $V_o$  para distinguirlo del valor medio a la salida de un rectificador, es la media aritmética de todos los valores instantáneos, igual que en casos anteriores. Este valor no se puede expresar sólo en función del valor máximo de la señal, como hemos hecho en apartados anteriores.

El valor medio de la corriente que circula por la carga lo representaremos, en este caso, como  $I_o$ .

### Valores de la señal de rizado

Para simplificar el estudio y los cálculos, el rizado u ondulación superior de la señal ondulada completa se puede equiparar, tal como muestra la figura 4.16, a una señal alterna senoidal cuyo valor de pico a pico es el mismo que el existente entre el punto más bajo y el más alto de dicho rizado.

Este valor lo representaremos como  $2V_r$ , y por tanto el valor de pico o valor máximo será  $V_r$ . Al valor eficaz de la señal lo representaremos como  $V_{r(ef)}$  y la relación entre ambos, igual que en toda tensión alterna senoidal, es:

$$V_{r(ef)} = V_r / \sqrt{2}$$

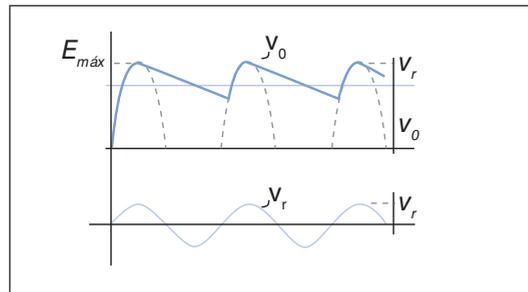


Figura 4.16. Señal de tensión a la salida del filtro.

### Factor de forma y factor de rizado

Los factores de forma y de rizado se definen de la misma manera que en los casos de señales rectificadas. Cuando están referidas a una señal filtrada, las expresiones [4.5] y [4.6] adquieren la siguiente forma:

$$F_F = \frac{V_{o(ef)}}{V_o} \quad [4.18]$$

$$F_R = \frac{V_{r(ef)}}{V_o} \quad [4.19]$$

## C Leyes, reglas y normas aplicables al circuito

### Relación entre la capacidad y el rizado de la señal

En el análisis y cálculo del filtro de un sistema de alimentación como el de la figura 4.15, el problema se reduce bien a hallar el valor de la señal de rizado para una determinada capacidad, bien a definir un condensador para obtener un cierto valor de rizado.

Para facilitar el proceso que nos conduzca a las expresiones que relacionan la capacidad con el valor de la señal de rizado realizaremos las siguientes simplificaciones:

- La ondulación de la señal de tensión sobre la carga, como ya hemos señalado, es una señal alterna senoidal de frecuencia  $f$  cuando la rectificación es de media onda y  $2f$  cuando la rectificación es de doble onda.



## 4. Sistemas electrónicos básicos de alimentación

### 4.4 Sistema de alimentación con un filtro

- El tiempo de descarga del condensador es igual al periodo  $T$  cuando se trata de rectificación en MO y a  $T/2$  cuando se trata de DO.
- El valor medio de la corriente por la carga  $I_o$  es constante.

En el proceso de descarga, el condensador pierde una cantidad de carga  $\Delta q$  durante un tiempo  $\Delta t$ . La relación entre carga e intensidad, tal como indicamos en la primera Unidad, es la siguiente:

$$Qq = iOt$$

Por otra parte, la expresión [2.2] puede escribirse en términos variables como sigue:

$$Qv = \frac{Qq}{C}$$

y despejando  $\Delta q$ :

$$Qq = CQv$$

Estas expresiones nos anuncian que cuando un condensador pierde una cierta cantidad de carga  $\Delta q$  también pierde una cantidad de tensión  $\Delta v$ .

Sustituyendo en las expresiones anteriores  $i$  por  $I_o$ ,  $t$  por  $T$  (periodo completo de una señal alterna senoidal) y el  $\Delta v$  por  $2V_r$ , e igualando posteriormente los términos  $\Delta q$ , tendremos:

$$I_o T = C2V_r$$

El valor eficaz de la ondulación o rizado, para una capacidad  $C$ , teniendo en cuenta que  $T = 1/F$ , será:

$$V_{r(ef)} = \frac{I_o}{2\sqrt{2}CF} \quad [4.20]$$

El valor de  $F$  es igual a  $f$  (50 Hz) para media onda y de  $2f$  (100 Hz) para rectificación en onda completa.

De la expresión anterior es fácil deducir el valor de la capacidad necesaria para obtener un determinado rizado, representado por el valor eficaz  $V_{r(ef)}$ :

$$C = \frac{I_o}{2\sqrt{2}V_{r(ef)}F} \quad [4.21]$$

#### Relación entre el valor medio de la señal y el valor de pico del rizado

Si observamos la figura 4.16 deduciremos fácilmente la relación entre el valor medio de la señal ondulada  $V_o$  y la componente alterna correspondiente al rizado:

$$V_o = E_{m\acute{a}x} - V_r \quad [4.22]$$

Esta expresión, como se puede comprobar en el apartado de resolución del circuito, resulta muy útil.



### Resolución del circuito

Se desea construir una fuente de alimentación con filtro, como la de la figura 4.15, para alimentar una carga que consume 100 mA cuando se aplica una tensión cuyo valor medio es de 24 V. El valor de pico a pico de la tensión de rizado no debe ser superior a 8 V. Calcular:

- El valor eficaz de la tensión de rizado.
- El factor de rizado y el factor de forma de la señal filtrada.
- La capacidad del condensador de filtro.
- Las características eléctricas de los diodos.
- La tensión del secundario del transformador y la potencia útil.

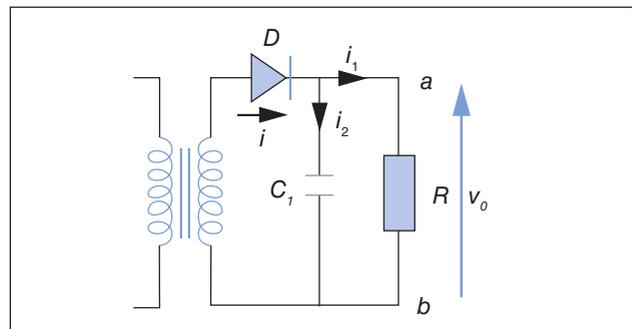


Figura 4.15a

## 4. Sistemas electrónicos básicos de alimentación

### 4.4 Sistema de alimentación con un filtro



#### Solución

a) El valor de pico o valor máximo de la tensión de rizado será:

$$V_r = 4 \text{ V}$$

y el valor eficaz de la misma:

$$V_{r(ef)} = \frac{V_r}{\sqrt{2}} = 2,82 \text{ V}$$

b) Con la ayuda de la expresión [4.19] calculamos el factor de rizado:

$$F_R = \frac{V_{r(ef)}}{V_o} = \frac{2,82}{24} = 0,1175$$

De la expresión [4.8] podemos despejar el factor de forma:

$$F_F = \sqrt{1 + F_R^2} = \sqrt{1 + 0,1175^2} < 1$$

Del resultado anterior deducimos que el valor eficaz de la señal en la carga  $V_{o(ef)}$  es aproximadamente igual al valor medio  $V_o$ .

c) El valor de la capacidad necesaria en el filtro se puede obtener mediante la expresión [4.21]:

$$C = \frac{I_o}{2\sqrt{2} V_{r(ef)} F}$$

donde  $F = f$  por tratarse de un rectificador de media onda. Por otra parte,  $2\sqrt{2} V_{r(ef)}$  es el valor pico a pico del rizado y es igual a 8 V. En consecuencia:

$$C = \frac{0,1}{8 \cdot 50} = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ F} = 250 \text{ } \mu\text{F}$$

d) Las características eléctricas de los diodos deberán superar los siguientes valores, deducidos de las expresiones [4.9] y [4.11]:

$$I_{F(AV)} = I_o = 100 \text{ mA}$$

En este caso, el valor medio de la corriente por la carga, indicado en la expresión [4.9], es  $I_o$  en lugar de  $I_{med}$ ; esta última representación queda reservada para el caso de una señal rectificada y no filtrada.

La tensión máxima de la señal filtrada se puede obtener mediante la expresión [4.22], de la cual se despeja dicha magnitud:

$$E_{m\acute{a}x} = V_o + V_r = 24 + 4 = 28 \text{ V}$$

El valor de la tensión inversa que debe soportar el diodo será, como mínimo:

$$V_R = E_{m\acute{a}x} = 28 \text{ V}$$

e) Conocido el valor máximo de la señal filtrada, que coincide con el valor máximo de la señal rectificada y con el valor máximo de la señal alterna senoidal del secundario, podemos calcular fácilmente el valor eficaz que debe proporcionar dicho arrollamiento:

$$V_2 = \frac{E_{m\acute{a}x}}{\sqrt{2}} = \frac{28}{\sqrt{2}} = 19,8 \text{ V}$$

La potencia útil o potencia del secundario se puede obtener de forma aproximada realizando un balance de las potencias consumidas por los elementos conectados al transformador. En este caso, el último componente que disipa potencia es la resistencia de carga, ya que por una parte suponemos despreciable la pérdida en el diodo y, por otra, el condensador consume una cierta cantidad de energía en el proceso de carga (tramo  $t_1 - t_2$ ); aunque después, en el proceso de descarga, la cede a la resistencia, de manera que el consumo neto de energía es nulo.

En resumen, la potencia media disipada por la resistencia será el producto de los valores eficaces de tensión y de corriente:

$$P_R = V_{o(ef)} I_{o(ef)}$$

Como los valores eficaces son aproximadamente iguales a los medios, tendremos:

$$P_R = V_o I_o = 24 \cdot 0,1 = 2,4 \text{ W}$$

Cuando las potencias son tan pequeñas, no importa sobredimensionar el transformador, aumentando un poco la potencia para compensar las posibles pérdidas en los diferentes elementos.



## 4.5 Sistema de alimentación con un filtro en $\pi$



### Actividades en el aula

- 6 Ensayo y experimentación con un sistema de alimentación formado por un rectificador de doble onda y un filtro en  $\pi$ .

Montar un circuito como el de la figura 4.17 y, mediante el uso de aparatos de medida y exploración, analizar el circuito y comprobar su funcionamiento, midiendo los valores de tensión y corriente en la carga antes del filtro y en el secundario del transformador. Observar las señales de tensión en los puntos más relevantes del circuito.

#### A Funcionamiento y composición del circuito

La figura 4.17 muestra un circuito más complejo que el de la figura 4.15. En este caso se ha añadido un filtro más, formado por una autoinducción y un condensador (denominado comúnmente *filtro LC*) que, asociado a la etapa anterior, adquiere una forma semejante a la letra griega pi ( $\pi$ ).

Esta etapa, que se intercala entre el condensador  $C$  y la resistencia de carga, reduce considerablemente la ondulación o señal de rizado. En consecuencia, la señal ondulada sobre la resistencia es más continua que si colocáramos exclusivamente el filtro elemental formado por un condensador.

Si se desea reducir aún más el rizado, pueden añadirse otras etapas LC, con lo cual se consigue un efecto multiplicador.

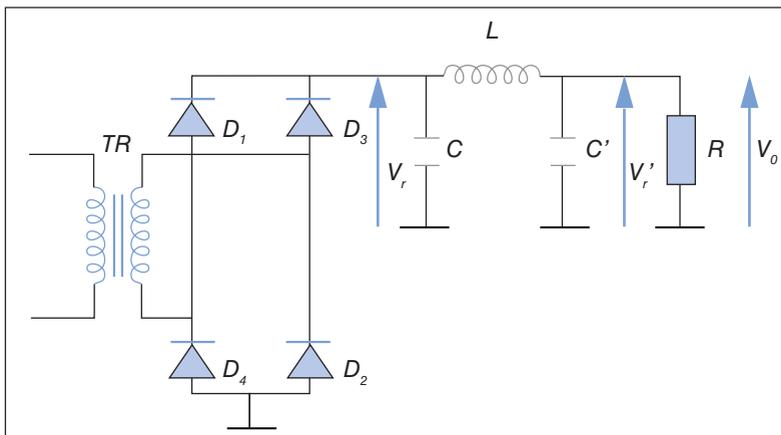


Figura 4.17. Sistema de alimentación completo en  $\pi$ .

#### B Leyes, reglas y normas aplicables al circuito

##### Señales de rizado a la entrada y a la salida de la etapa LC

En este apartado se trata de encontrar la relación entre los valores eficaces de la ondulación o señal de rizado antes y después de la etapa LC.

Suponemos que la autoinducción tiene una resistencia nula, la corriente  $I_o$  pasa libremente a la carga  $R$  y, por tanto, la única tensión aplicada a la entrada de la segunda etapa del filtro es la ondulación, cuyo valor máximo es  $V_r$ .

Por otra parte, si suponemos que la reactancia capacitiva del condensador  $C'$  a la frecuencia  $F$  es muy pequeña frente a la resistencia de carga ( $1/(2FC') \ll R$ ), la corriente alterna que circula por la  $L$  y por la capacidad  $C'$  es la misma.

Si denominamos  $V'_{r(ef)}$  al valor eficaz de la nueva señal de rizado sobre la carga, tendremos:

$$V'_{r(ef)} = \frac{V_{r(ef)}}{L\Omega - \frac{1}{C'\Omega}} = \frac{V_{r(ef)}}{LC'\Omega^2 - 1}$$

donde  $\Omega = 2\pi F$ .

El término  $LC'K^2$  suele ser mucho mayor que la unidad, por lo que la expresión anterior queda simplificada:

## 4. Sistemas electrónicos básicos de alimentación

### 4.5 Sistema de alimentación con un filtro en $\pi$



$$V'_{r(ef)} = \frac{V_{r(ef)}}{LC'K^2} \quad [4.23]$$

Esta expresión nos demuestra que la etapa LC reduce el rizado en proporción al producto de  $LC'K^2$ . Para el

cálculo de los componentes del filtro debemos partir de la relación deseada entre los valores  $V_{r(ef)}$  y  $V'_{r(ef)}$  y posteriormente ajustar los valores de  $L$  y  $C'$  de manera que hagan posible el producto situado en el denominador de la expresión [4.23].

## Resolución del circuito



En este caso vamos a determinar la señal ondulada sobre la carga (cálculo de  $V_o$  y de  $V_r$ ) a partir de un circuito cuyos elementos están definidos. En la práctica, tal como hemos hecho en los casos anteriores, se definen los componentes del circuito a partir de los valores de tensión y corriente deseados en la carga. Sin embargo, en este caso preferimos abordar el problema desde el punto de vista del análisis cuantitativo, con el fin de ofrecer, mediante el conjunto de ejemplos de la Unidad, una panorámica completa. El problema que resolveremos en este último bloque, además de ser el más completo y por tanto el más complejo, lo plantearemos desde el punto real del diseño.

Supongamos que los valores de los componentes que constituyen el filtro del circuito de la figura 4.17 son los siguientes:  $C = C' = 470 \mu\text{F}$  y  $L = 45 \text{ mH}$ . El valor eficaz de la tensión del secundario  $V_2 = 30 \text{ V}$ . Calcular el valor medio de la tensión en la carga  $V_o$ , para que por ella circule una corriente  $I_o = 0,75 \text{ A}$ . Definir las características de los diodos del rectificador.

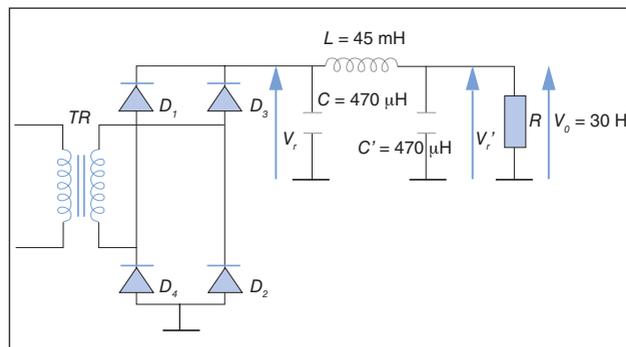


Figura 4.17a.

### Solución

En primer lugar calcularemos, mediante la expresión [4.20], el valor eficaz de la señal de rizado a la salida del condensador  $C$ :

$$V_{r(ef)} = \frac{I_o}{2\sqrt{2}CF} = \frac{0,75}{(2\sqrt{2} \Delta 470 \Delta 10^{46} \Delta \Delta 50)} = 5,6 \text{ V}$$

El valor eficaz del rizado a la salida de la segunda etapa del filtro, es decir, sobre la carga, según la expresión [4.23], será:

$$V'_{r(ef)} = \frac{V_{r(ef)}}{LC'\Omega^2}$$

El valor máximo de la ondulación será:

$$V'_{r(ef)} = \frac{V_{r(ef)}}{LC'\Omega^2} = \frac{5,6}{45 \cdot 10^{-3} \cdot 470 \cdot 10^{-6} \cdot (2\pi 100)^2} = 0,67 \text{ V}$$

El valor máximo de la señal alterna senoidal a la salida del transformador será:

$$V_r = \sqrt{2}V'_{r(ef)} = \sqrt{2} \cdot 0,67 = 0,95 \text{ V}$$

En definitiva, según la expresión [4.22], el valor medio de tensión sobre la carga será:

$$E_{m\acute{a}x} = 2\sqrt{V_2} = \sqrt{2} \cdot 30 = 42,4 \text{ V}$$

Los valores característicos de corriente y tensión de los diodos pueden conocerse con la ayuda de las expresiones [4.14] y [4.17]:

$$I_{F(AV)} = 0,5I_o = \frac{0,75}{2} = 0,375 \text{ A}$$

En este caso, el valor medio de la corriente por la carga, indicado en la ecuación [4.14], es  $I_o$  en lugar de  $I_{med}$ ; esta última representación queda reservada para el caso de una señal rectificada y no filtrada:

$$V_R = E_{m\acute{a}x} = 42,4 \text{ V}$$



## 4.6 Sistema de alimentación con estabilización por diodo zener



### Actividades en el aula

- 7** Ensayo y experimentación con un sistema de alimentación con estabilizador constituido por componentes discretos.

Montar un circuito como el de la figura 4.18 y, mediante el uso de aparatos de medida y exploración, analizar el circuito y comprobar su funcionamiento, midiendo los valores de tensión y corriente en la carga, en el filtro y en el

secundario del transformador. Observar las señales de tensión en los puntos más relevantes del circuito.

- 8** Estudio del diodo zener.

Obtener las características de un diodo zener y deducir las propiedades que tiene este componente electrónico para estabilizar la tensión eléctrica.

### A Funcionamiento y composición del circuito

La figura 4.18 muestra el circuito más complejo de los construidos con dispositivos discretos analizados hasta ahora. La complejidad viene dada por el número de etapas que lo constituyen y por la diferente naturaleza de cada una de ellas.

El circuito, que por su complejidad puede ser denominado *sistema*, está formado por un transformador, un rectificador con puente de cuatro diodos, un filtro C en paralelo con la carga y un estabilizador sencillo que utiliza un *diodo zener*.

Con el empleo de una etapa estabilizadora, el rizado queda prácticamente eliminado, pero además existen otras grandes ventajas, como son un valor de tensión sobre la carga constante aunque se produzcan variaciones en la tensión de la red de la que se alimenta el sistema y/o variaciones en el consumo de la resistencia de carga.



### El diodo zener como elemento estabilizador

El diodo zener es, como el diodo rectificador, un componente electrónico de la familia de los semiconductores, cuya estructura y aspecto externo es análogo a la de este último. Tiene dos terminales, que también se denominan *ánodo* (positivo) y *cátodo* (negativo).

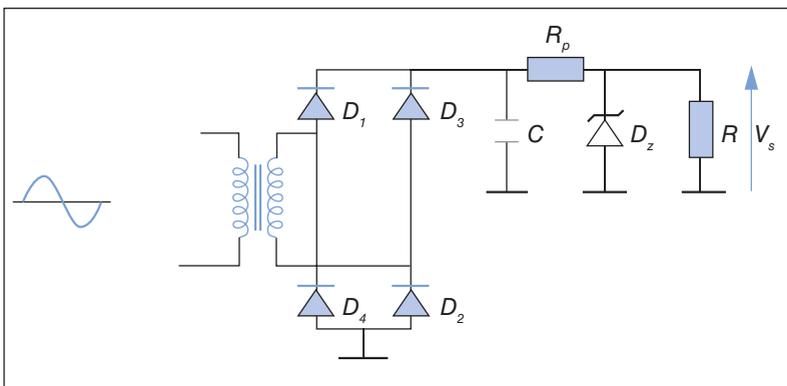


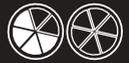
Figura 4.18. Sistema de alimentación con estabilizador.



Figura 4.19. Diodos de diferentes tipos.

## 4. Sistemas electrónicos básicos de alimentación

### 4.6 Sistema de alimentación con estabilización por diodo zener



Cuando un diodo zener se polariza directamente (el ánodo es positivo respecto del cátodo), se comporta exactamente igual que un diodo normal, es decir, conduce, y el paso de corriente provoca entre sus extremos una caída de tensión de 1 V aproximadamente.

La diferencia fundamental entre ambos componentes es que un diodo zener siempre trabaja con polarización inversa. En estas circunstancias el diodo conduce y además la ddp que aparece entre sus extremos es prácticamente constante aunque se produzcan variaciones significativas en la corriente. Ésta es la principal propiedad del diodo zener y la que le hace útil como elemento estabilizador. Existe una amplia gama de diodos zener, con lo cual es posible conseguir tensiones estables de muy diferente valor.



**El diodo zener es un componente electrónico que conduce en polarización inversa y la tensión entre sus terminales es prácticamente constante aunque se produzcan variaciones de la intensidad de corriente.**

La figura 4.20 muestra la representación simbólica del diodo zener, que, como se puede apreciar, es parecida a la de un diodo rectificador sencillo.

La figura 4.21 muestra la característica inversa del componente y se puede observar que la tensión apenas cambia al variar la corriente.



#### Características eléctricas de un diodo zener

Las características de un diodo zener que proporciona el fabricante pueden clasificarse en dos grupos, atendiendo a la importancia de las mismas.

A la hora de elegir un diodo zener se debe tener en cuenta la tensión de zener  $V_z$  requerida y la potencia máxima  $P_z$  que el componente tendrá que disipar.

- **Tensión de zener ( $V_z$ ):** es la que aparece entre sus extremos cuando por el elemento circula corriente en sentido inverso, es decir, cuando el cátodo es positivo respecto del ánodo. Los valores de  $V_z$  no suelen ser números enteros; así, nos encontramos tensiones de 4,7 V, 5,1 V, 6,2 V, etc. Los valores de tensión estable que se pueden conseguir con el uso de diodos zener se

encuentran en el margen comprendido entre 2 V y 200 V.

La tensión de zener, como la mayoría de los parámetros de los componentes eléctricos y electrónicos, tiene una tolerancia que se expresa en tanto por ciento sobre el valor nominal. Así, un diodo zener cuya  $V_z$  sea de 6,2 V y la tolerancia del 5 % puede tener una tensión que oscile entre 5,89 V y 6,51 V. Además, el valor nominal de tensión va asociado siempre a un valor de corriente, ya que, aunque pequeñas, se producen variaciones en  $V_z$  al variar dicha magnitud (véase fig. 4.21).

- **Potencia zener ( $P_z$ ):** se refiere al valor máximo que el elemento puede disipar cuando se polariza en inversa. Este dato suele estar asociado a un valor de temperatura, que por lo general son 25 °C. Los valores más usuales de potencia son 0,5 W y 1 W.
- **Corriente inversa máxima del zener ( $I_{ZM}$ ):** se obtiene dividiendo la potencia máxima por la tensión de zener. Este valor de corriente no puede sobrepasarse nunca, ya que en ese caso el diodo queda inutilizado.

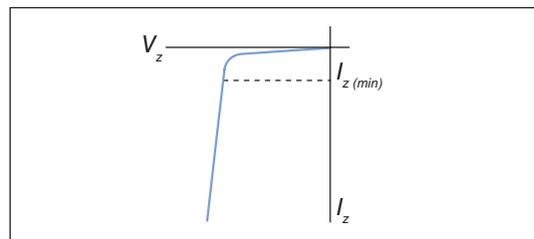


Figura 4.21. Característica inversa de un diodo zener.

El segundo grupo de características está formado por la corriente mínima de zener  $I_{Z(min)}$ , la resistencia de zener  $R_z$  y el coeficiente de temperatura.

- **Corriente mínima de zener ( $I_{Z(min)}$ ):** es aquella a partir de la cual el diodo comienza a estabilizar la tensión aplicada entre sus extremos. Los valores de la  $I_{Z(min)}$  son muy pequeños (del orden de  $\mu\text{A}$ ).
- **Resistencia de zener ( $R_z$ ):** es una relación incremental entre valores de tensión y de corriente. Estos incrementos se sitúan en la parte recta de la característica y suelen estar

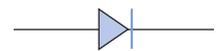


Figura 4.20. Símbolo del diodo zener.



## 4. Sistemas electrónicos básicos de alimentación

### 4.6 Sistema de alimentación con estabilización por diodo zener

referidos a un determinado valor de corriente. Un valor típico de  $R_z$  puede ser  $7 \Omega$  para un diodo de  $6,2 \text{ V}$  y medida en torno a una corriente inversa de  $20 \text{ mA}$ .

Los cambios de temperatura también alteran los valores de la tensión de zener. Dicha variación viene expresada por el coeficiente de temperatura que representa, en porcentaje, la variación de la tensión nominal de zener para cada grado centígrado. Para valores pequeños de  $V_z$ , el coeficiente es negativo, y para valores altos, positivo.

En resumen, la tensión nominal de un diodo zener puede verse perturbada por la tolerancia, por su resistencia interna y por las variaciones de temperatura.

#### **Funcionamiento del estabilizador. Tensión sobre la carga**

La etapa estabilizadora del circuito completo de la figura 4.18 la constituye el diodo zener, conectado en paralelo con la carga, y la resistencia de polarización  $R_p$ , conectada en serie con el conjunto de ambos.

El valor medio de la tensión  $V_o$  a la salida del filtro debe ser, al menos, una vez y media superior al valor de tensión estabilizada. Ésta se reparte entre el diodo zener y la resistencia de polarización. La primera, a la que denominaremos *tensión de salida* y representaremos con  $V_s$ , es prácticamente constante y estable, siendo las variaciones que en ella se produzcan consecuencia de los cambios de  $V_z$  a causa de los cambios que tengan lugar en las magnitudes que alteran la tensión de zener.

El resto de la tensión  $V_o$  provoca una ddp en la resistencia de polarización, y las modificaciones que se produzcan en la tensión de red, y que son transmitidas por cada una de las etapas del circuito, son absorbidas por este elemento.

Por otra parte, la corriente que circula por  $R_p$  se reparte entre el diodo y la carga. Como ya hemos señalado, un buen estabilizador debe mantener la tensión constante aunque varíe la corriente por la carga. En este caso, las variaciones de corriente por la carga son absorbidas también por el zener, y como cambios significativos de corriente no provocan apenas modificaciones en la  $V_z$ ,

la tensión a la salida permanece prácticamente constante.

#### **B** **Leyes, reglas y normas aplicables al circuito**

El contenido de este apartado se centra en la exposición de normas, expresadas en forma de ecuaciones, que nos permiten calcular el valor de las principales características de los dos componentes que constituyen la etapa estabilizadora, es decir, la resistencia de polarización y el diodo zener.

Se puede deducir fácilmente que la tensión de zener  $V_z$  se corresponde con la tensión de salida  $V_s$  deseada.

#### **Resistencia de polarización**

Para comprender la deducción de la expresión que nos proporciona el valor de la resistencia de polarización es necesario contemplar la etapa estabilizadora del circuito de la figura 4.18.

Por aplicación de la ley de Ohm, el valor de la resistencia de polarización vendrá dado por la relación entre la ddp aplicada entre sus extremos y la corriente que por ella circula.

Ahora bien, debemos garantizar que la tensión de salida sea estable para cualquier valor de la tensión de entrada al estabilizador y sea cual sea el valor de la corriente por la carga.

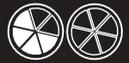
Para lograr este objetivo hemos de considerar el valor de tensión más bajo posible a la salida del filtro. Para obtener ese valor habrá que restar al mínimo valor medio  $V_{o(min)}$  el valor de pico o valor máximo de rizado  $V_r$ .

Además, deberemos tener en cuenta que para ese valor de tensión, obtenido como diferencia de  $V_{o(min)}$  y  $V_r$ , es necesario que por el diodo zener circule una corriente mínima  $I_{z(min)}$  para situarnos por debajo del codo de la curva de la figura 4.21. En consecuencia, la resistencia de polarización vendrá dada por la siguiente expresión:

$$R_p = \frac{V_{o(min)} - V_r - V_s}{I_s + I_{z(min)}} \quad [4.24]$$

## 4. Sistemas electrónicos básicos de alimentación

### 4.6 Sistema de alimentación con estabilización por diodo zener



#### Valor de las potencias del diodo y de la resistencia de polarización

Para dimensionar el diodo zener y la resistencia de polarización es necesario calcular las potencias que deben disipar ambos componentes.

Para calcular dichas potencias hay que partir de las condiciones más desfavorables, es decir, aquellas en las que el valor de tensión de entrada al estabilizador sea mayor.

En primer lugar deberemos calcular la corriente (media) máxima  $I_{o(máx)}$  que circulará por la resistencia de polarización:

$$I_{o(máx)} = \frac{V_{o(máx)} - V_Z}{R_p} \quad [4.25]$$

Esta corriente será la misma que circule por el diodo zener en las peores condiciones, es decir, cuando la carga esté desconectada del circuito.

En consecuencia, las potencias disipadas por ambos componentes serán:

$$P_{RP} = I_{o(máx)}^2 R_p \quad [4.26]$$

$$P_{DZ} = I_{o(máx)} V_Z \quad [4.27]$$

## Resolución del circuito



Vamos a resolver el caso más complejo de todos los estudiados en esta Unidad, calculando los parámetros y características más relevantes de los componentes de cada una de las etapas que constituyen el sistema. El problema, pues, lo abordaremos desde el punto de vista del diseño.

Supongamos que el circuito de la figura 4.18 se alimenta de una red de 220 V cuyo valor puede oscilar en  $\pm 5\%$ . A la salida deseamos obtener una tensión constante de 12 V para alimentar un dispositivo externo que consume 50 mA. Además, pondremos tres condiciones: el valor máximo del rizado a la salida del filtro  $V_r$  será de 2 V, el valor medio  $V_o$  será el doble que la tensión de salida ( $V_o = 2V_s$ ) y, además, la corriente mínima por el diodo zener  $I_{Z(min)}$  será 1 mA.

Calcular:

- La tensión de zener, el valor de la resistencia de polarización y las potencias disipadas por ésta y por el diodo zener.
- La capacidad de filtro.
- Los valores de tensión y corriente en los diodos.
- La tensión eficaz del secundario y la potencia útil del transformador.

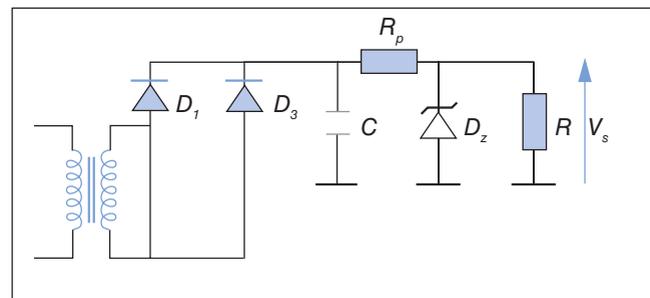


Figura 4.18a.

### Solución

- La tensión de zener debe ser de 12 V, ya que  $V_Z = V_s$ .

Para calcular la  $R_p$  es necesario saber primero cuál es el valor medio (mínimo) a la salida del filtro. Si la tensión de la red varía en  $\pm 5\%$ , supondremos que esta variación se transmite por igual a todos los puntos de tensión del circuito. Por tanto, los valores  $V_{o(máx)}$  y  $V_{o(min)}$  serán:

$$V_{o(máx)} = 24 + \frac{24 \cdot 5}{100} = 25,2 \text{ V}$$

$$V_{o(min)} = 24 - \frac{24 \cdot 5}{100} = 22,8 \text{ V}$$



## 4. Sistemas electrónicos básicos de alimentación

### 4.6 Sistema de alimentación con estabilización por diodo zener



### Resolución del circuito

El valor de la resistencia de polarización se puede obtener mediante la expresión [4.24]:

$$R_p = \frac{V_{o(\min)} - V_r - V_s}{I_s + I_{Z(\min)}} = \frac{22,8 - 2 - 12}{0,050 + 0,001} = 172,5 \Omega$$

Evidentemente, buscaremos el valor de resistencia comercial más próximo.

La corriente máxima por el diodo y la resistencia, según la expresión [4.25], será:

$$I_{o(\max)} = \frac{V_{o(\max)} - V_s}{R_p} = \frac{25,2 - 12}{172,5} = 0,076 \text{ A}$$

Mediante las expresiones [4.26] y [4.27] podemos calcular las potencias de la resistencia y del diodo respectivamente:

$$P_{RP} = I_{o(\max)}^2 R_p = 0,076^2 \cdot 172,5 = 1 \text{ W}$$

$$P_z = V_z I_{o(\max)} = 12 \cdot 0,076 = 0,91 \text{ W}$$

b) Para calcular la capacidad del filtro es necesario, en primer lugar, saber cuál es el valor de la corriente media a la salida de dicha etapa para el valor nominal de la tensión de red:

$$I_o = \frac{V_o \Phi V_s}{R_p} = \frac{24 \Phi 12}{172,5} = 0,069 \text{ mA}$$

Según la expresión [4.21], la capacidad necesaria para obtener el rizado deseado será:

$$C = \frac{I_o}{2\sqrt{2} V_{r(\text{ef})} F} = \frac{0,069}{2 \cdot 2 \cdot 100} = 1,72 \cdot 10^{-4} \text{ F} = 172 \mu\text{F}$$

Como en el caso de la  $R_p$ , habrá que buscar el valor comercial de capacidad más próximo a  $172 \mu\text{F}$ .

c) La corriente media por cada diodo será la mitad de la corriente media más alta a la salida del filtro,  $I_{o(\max)}$ :

$$I_f = 0,5 I_{o(\max)} = 0,5 \cdot 76 = 38 \text{ mA}$$

La tensión inversa máxima que deben soportar los diodos será la  $E'_{\max}$  cuando la tensión de red se encuentre en su valor más alto:

$$V_R = E'_{\max} = V_{o(\max)} + V_r = 25,2 + 2 = 27,2 \text{ V}$$

d) El valor máximo de la tensión de secundario, para el valor nominal de red, será:

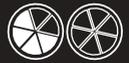
$$E_{\max} = V_o + V_r = 24 + 2 = 26 \text{ V}$$

El valor eficaz de la tensión de secundario será:

$$V_2 = \frac{E_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{26}{\sqrt{2}} = 18,4 \text{ V}$$

La potencia de secundario se puede obtener por aproximación, sumando las potencias disipadas por la resistencia de polarización  $P_{RP}$  y por el diodo zener  $P_z$ , calculada para que este elemento pueda absorber toda la corriente de la carga cuando esta última esté desconectada:

$$P_2 = P_{RP} + P_z = 1 + 0,91 = 1,91 \text{ W}$$



## Ejercicios propuestos



- 1** El valor medio de una señal como la de la figura 4.22 es de 36 V, calcular los valores eficaces de la señal ondulada y de la ondulación si el factor de forma vale 1,016.

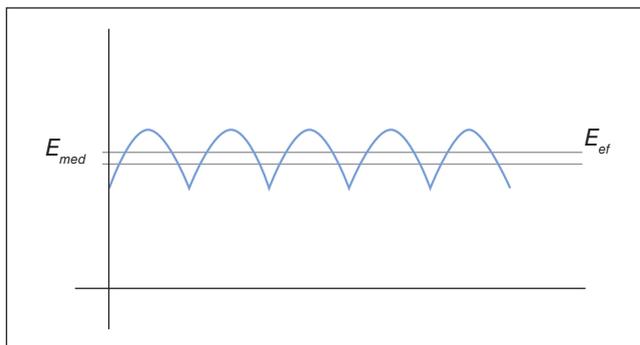


Figura 4.22.

- 2** El valor medio de la señal de la figura 4.23 es de 20 V. Calcular el valor eficaz y el factor de rizado.

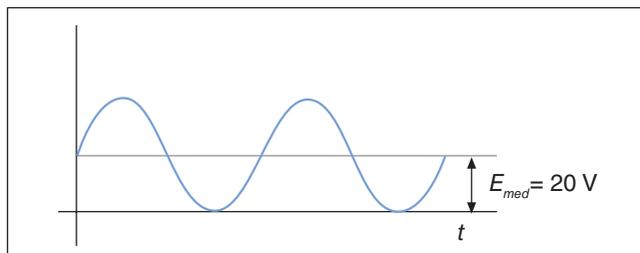


Figura 4.23.

- 3** El valor máximo del secundario del transformador de un circuito rectificador en media onda como el de la figura 4.2 es de 40 V. Calcular los valores medio y eficaz de corriente por la carga si el valor de su resistencia es de 100  $\Omega$ .
- 4** El valor medio de la tensión sobre una carga que consume 2 A, acoplada a un rectificador de media onda, es de 24 V. Calcular las características eléctricas de los diodos.
- 5** El valor eficaz de la tensión a la entrada de un rectificador de doble onda con toma media en el trans-

formador es de 10 V. Calcular los valores medios de tensión y corriente por una carga de 12  $\Omega$  acoplada a la salida.

- 6** La resistencia de carga de un rectificador de doble onda con toma media es de 50  $\Omega$  y por ella circula

una corriente de 1,5 A. Calcular el valor eficaz de la tensión en el secundario del transformador y la potencia útil del mismo. Determinar las características eléctricas de los diodos.

- 7** El valor máximo de la tensión de secundario del transformador previo a un rectificador formado por cuatro diodos, como el de la figura 4.12, es de 18,83 V. Calcular los valores medios de tensión y de corriente por una carga de 6  $\Omega$  conectada a la salida.

- 8** Repetir el problema número 6, cambiando el rectificador con toma media por un puente rectificador de cuatro diodos.

- 9** ¿Cuál será el valor máximo del rizado de una señal ondulada a la salida de un filtro con condensador cuya capacidad vale 1000  $\mu\text{F}$  acoplado a un puente rectificador, si el valor de la corriente media por la carga es de 0,2 A y el valor medio de la señal rectificadora,  $E_{medr}$ , es de 20 V? Calcular, además, el valor medio en la carga y los factores de forma y rizado.

- 10** Definir un sistema de alimentación formado por un rectificador de media onda y un filtro con condensador, suponiendo que el valor medio de tensión sobre la carga de 1500  $\Omega$  es de 100 V y el valor de pico a pico de la señal de rizado es de 20 V.

- 11** En un circuito como el de la figura 4.17, la capacidad de los condensadores vale 680  $\mu\text{F}$  y la autoinducción  $L = 50$  mH. Calcular el valor máximo del rizado de la señal sobre la carga, si el valor medio  $V_o$  es de 40 V y la resistencia de carga vale 80  $\Omega$ .



## 4. Sistemas electrónicos básicos de alimentación

Ejercicios propuestos

A

- 12** En un circuito como el de la figura 4.17, los valores medios de tensión y corriente a la salida son 48 V y 0,75 A, respectivamente. Calcular los valores de  $C$ ,  $C'$  y  $L$ , suponiendo que la etapa LC reduce 20 veces el rizado de 0,5 V (valor de pico) aplicado a la entrada de dicha etapa. Determinar las características eléctricas de los diodos y la potencia útil del transformador.
- 13** A partir de las expresiones [4.20] y [4.23], deducir cuál será el valor mínimo de  $L$ , en un filtro como el de la figura 4.17, para que la reducción del rizado sea la misma que colocando los dos condensadores en paralelo exclusivamente. Suponer que  $C = C'$ . Calcular el valor de la  $L$  mínima para un valor de 500  $\mu\text{F}$  si el rectificador es de doble onda.
- 14** El valor medio de una señal rectificadora en media onda y filtrada es de 60 V y el valor máximo del rizado de 6 V. Calcular el valor de la resistencia de polarización de un estabilizador acoplado a la salida de filtro si se desea un valor de tensión sobre la carga de 24 V. Calcular las potencias de la resistencia de polarización y de zener si la corriente por la carga, cuando la tensión sea de 24 V, es de 100 mA. Suponer un valor mínimo de corriente por el diodo zener de 5 ma.
- 15** Diseñar un sistema de alimentación formado por un rectificador de doble onda, un filtro en  $\pi$  y un estabilizador con diodo zener, cuya tensión a la salida, que alimenta a una carga de 1  $\Omega$ , sea de 24 V con un rizado máximo de 0,2 V (valor de pico). La tensión de la red es de 220 V y no presenta variaciones.
- 16** Definir una fuente de alimentación estabilizada que cumpla las siguientes especificaciones:  
-Tensión de red 220 V y 5 % de variación.  
-Tensión y corriente de salida:  $V_S = 5 \text{ V}$ ,  $I_S = 80 \text{ mA}$ .  
-Tensión máxima de rizado en la carga:  $V_r = 0,5 \text{ V}$ .  
Calcular todos los componentes, incluso la potencia del transformador.



### Conceptos básicos



#### Valores de la tensión y la corriente a la salida de cada etapa

$E_{m\acute{a}x}, I_{m\acute{a}x}$	Valores máximos de una señal alterna senoidal. Se mantienen invariables en las señales rectificadas y filtradas. Pueden alternarse como consecuencia de las variaciones que se produzcan en la red a la que se conecta el sistema de alimentación.
$E_{medr}, I_{med}$	Valores medios de la señal rectificada en media onda ( $E_{med(MO)}$ ) o en onda completa ( $E_{med(OC)}$ ). Representan también los valores medios de una señal alterna senoidal.
$E_{efr}, I_{ef}$	Valores eficaces de una señal rectificada en media onda ( $E_{ef(MO)}$ ) o en onda completa ( $E_{ef(OC)}$ ). Representan también una señal alterna senoidal.
$V_{2r}, I_{2r}, P_2$	Valores eficaces de tensión y corriente y la potencia aparente del secundario de un transformador.
$V_{Or}, I_O$	Valores medios de una señal rectificada y filtrada. Los subíndices (máx) y (mín) indican los valores extremos (no máximos) del valor medio cuando se producen variaciones en la red a la que se conecta el sistema. Los valores eficaces de estas señales prácticamente coinciden con los valores medios.
$V_{rr}, V_{r(ef)}$	Valores máximo y eficaz de la ondulación o rizado de la señal filtrada mediante un condensador en paralelo con la carga.
$V'_{rr}, V'_{r(ef)}$	Valores máximo y eficaz de la ondulación o rizado de la señal filtrada mediante un filtro en $\pi$ , formado por una etapa C y una LC.
$V_s, I_s$	Valores prácticamente continuos de la señal estabilizada. Los valores máximo, medio y eficaz son iguales.

#### Magnitudes de los diodos

$I_{F(AV)}$	valor medio de la corriente
$I_{F(RMS)}$	valor eficaz de la corriente
$V_R$	valor inverso máximo de la tensión

#### Magnitudes de los diodos zener

$V_Z$	tensión zener
$P_Z$	potencia zener
$I_{Z(min)}$	corriente mínima zener
$R_Z$	resistencia zener
—	coeficiente de temperatura

#### Valores de las características de los diodos en circuitos rectificadores

tipo de rectificador	$I_{F(AV)}$	$I_{F(RMS)}$	$V_R$
alterna senoidal	$I_{med}$	$I_{ef}$	$E_{m\acute{a}x}$
doble onda con toma media	$0,5 I_{med}$	$0,7 I_{ef}$	$2 E_{m\acute{a}x}$
doble onda con puente	$0,5 I_{med}$	$0,7 I_{ef}$	$E_{m\acute{a}x}$

#### Valores eficaces y medios sobre la carga a la salida del rectificador y factores de forma y rizado

tipo de onda	valor eficaz	valor medio	factor de forma	factor de rizado
alterna senoidal	$\frac{E_{m\acute{a}x}}{\sqrt{2}}$	—	—	—
rectificada doble onda	$\frac{E_{m\acute{a}x}}{\sqrt{2}}$	$\frac{2E_{m\acute{a}x}}{\pi}$	1,11	0,48
rectificada media	$\frac{E_{m\acute{a}x}}{2}$	$\frac{E_{m\acute{a}x}}{\pi}$	1,57	1,21