

# LABORATORIO DE INSTRUMENTACIÓN I.

## PRÁCTICA 1. DIODOS.

### 1.1. INTRODUCCIÓN.

#### 1.1.1. El diodo de Si.

El modelo elemental del diodo, suficiente para las prácticas que se realizarán en el laboratorio, es el modelo de Shockley, cuya ecuación es:

$$I = IS \left( e^{\frac{V}{NV_t}} - 1 \right),$$

donde se han representado con negrilla los parámetros PSPICE del diodo.  $IS$  se conoce como corriente inversa de saturación y  $N$  es el índice de idealidad del diodo. Más detalles sobre el modelo PSPICE del diodo se pueden encontrar en los apuntes de teoría de la asignatura. En la ecuación anterior  $V_t$  es la tensión térmica, es decir  $kT/q$ , que a temperatura ambiente es 0.0258 V.

Tomaremos como ejemplo el diodo 1N4002, que está en la librería EVAL de PSPICE. Este diodo tiene una corriente inversa de saturación de 14.11 nA y un factor de idealidad de 1.984. Si se trazan las características I-V de este diodo, como casi todos los diodos de Si, se observará que para corrientes directas la caída en el diodo oscila entre 0.45 V para 0.1 mA y 0.8 V para 0.1 A, es decir varía en 0.35 V cuando la corriente aumenta en tres órdenes de magnitud.

Sin embargo, en inversa, para potenciales superiores a 0.2 V, la corriente queda limitada al valor de  $IS$ , normalmente despreciable. Por esta razón el diodo puede utilizarse como rectificador, puesto que para polarizaciones positivas deja pasar toda la corriente con una caída típica de 0.7 V, mientras que para polarización inversa la corriente es prácticamente nula.

#### 1.1.2. Rectificación de media onda.

La aplicación más inmediata de un diodo es la rectificación de una señal alterna. Esta rectificación puede hacerse con diversos propósitos, como es por ejemplo la demodulación de una señal de radiofrecuencia modulada en amplitud. Sin embargo la aplicación imprescindible es la rectificación de tensiones alternas para producir la necesaria alimentación de continua de los aparatos electrónicos.

Supondremos que tenemos que generar una alimentación continua a partir de una

alterna. Como primera medida se contará con un transformador que adecua las tensiones de la red a nuestras necesidades. Normalmente las tensiones de continua que requerimos son del orden de decenas de voltio y partimos de una red alterna de 220 V eficaces. El transformador nos permite bajar esta tensión a la necesaria con gran eficiencia. Por otra parte un transformador es imprescindible en cualquier sistema de alimentación puesto que produce un aislamiento galvánico entre la red de alterna y el sistema. Este aislamiento es una condición

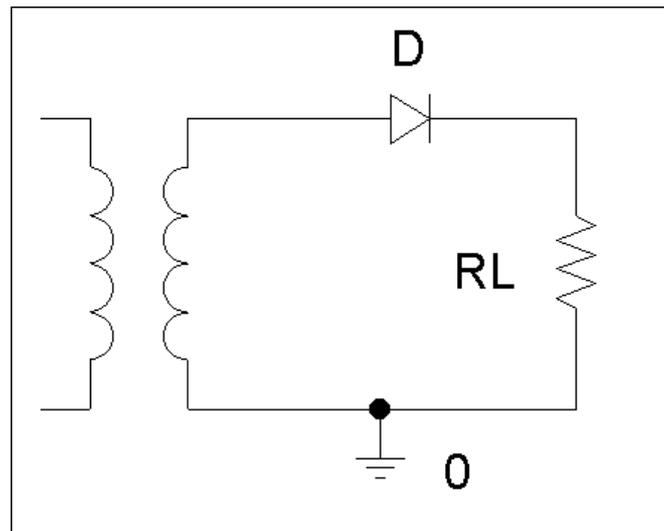


Figura 1. Rectificación de media onda

imprescindible para la seguridad del usuario.

El sistema más elemental de rectificación aparece en la figura 1. Se representa el transformador, el diodo y la carga sobre la que se desarrolla la potencia. En nuestro caso esta carga será ficticia, concretándose en una resistencia. Se supone que en un caso real esta resistencia corresponde al consumo. Si tenemos que la salida del transformador es de la forma

$$V(t) = V_p \text{ sen } \omega t ,$$

es evidente que la corriente puede ponerse como

$$I(t) = \frac{V_p \text{ sen } \omega t - V_D}{R_L} \quad \text{para } 0 < \omega t < \pi$$

$$I(t) = 0 \quad \text{para } \pi < \omega t < 2\pi,$$

donde  $V_D$  es la caída en el diodo y  $V_p$  es el valor de pico de la tensión de salida del transformador. Presuponiendo que los valores de la corriente están en el orden de los mA, no cometeremos mucho error si asumimos que la caída en el diodo es aproximadamente 0.6 V, sobre todo si  $V_p$  es relativamente grande comparada con este valor. Para simplificar las expresiones supondremos que  $V_D \ll V_p$ ; entonces el valor de continua de la tensión de salida

será el valor medio de la tensión, que corresponde al primer término de la expansión en serie de Fourier:

$$V_0 = \frac{V_P}{2\pi} \int_0^\pi \text{sen } \omega t \, d\omega t = \frac{V_P}{\pi}$$

La corriente de continua por el diodo, que es la misma que la corriente a través de la carga será:

$$I_0 = I_L = \frac{V_0}{R_L} = \frac{V_P}{\pi R_L}$$

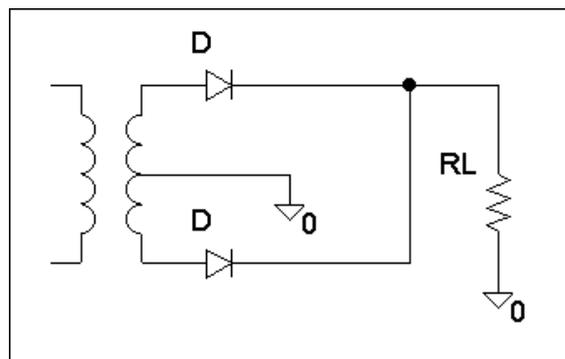


Figura 2. Rectificación de doble onda con dos diodos.

### 1.1.3. Rectificación de doble onda.

Es evidente que el rectificador de media onda hace que el valor de la corriente por la carga tenga un valor medio distinto de cero; sin embargo la componente alterna de la corriente es todavía muy grande. Una solución habitualmente usada es realizar la rectificación de doble onda, tal como se representa en la figura 2. Se usa un transformador de doble devanado, de tal forma que durante un semiciclo la corriente la genera un devanado y en el siguiente semiciclo la genera el otro. De la misma forma, cada diodo conduce solamente durante un semiciclo. Si cada uno de los devanados genera una tensión de pico  $V_P$  (es decir una tensión eficaz  $V_P/\sqrt{2}$ ), el valor de tensión de continua en la carga será, suponiendo la caída en el diodo despreciable:

$$V_0 = \frac{V_P}{2\pi} \int_0^{2\pi} |\text{sen } \omega t| \, d\omega t = \frac{2V_P}{\pi},$$

que es, evidentemente, el doble que para el caso de un rectificador de media onda. La corriente media por la carga es también doble que en el caso de media onda, pero la corriente media soportada por los diodos es igual.

La rectificación de doble onda puede conseguirse también con un transformador de

devanado simple usando 4 diodos en configuración de puente, tal como se refleja en la figura 3. Si se sigue el camino de la corriente, se ve que en cada ciclo conducen 2 diodos. Cuando la tensión es positiva en A y negativa en B, conducen los diodos 1 y 4, y cuando la tensión es positiva en B y negativa en A (siguiente semiciclo) conducen los diodos 2 y 3. En ambos casos, la corriente en  $R_L$  tiene el mismo sentido. La expresión de la tensión media es la misma que para el caso de transformador de doble devanado. Este montaje tiene la ventaja de usar un

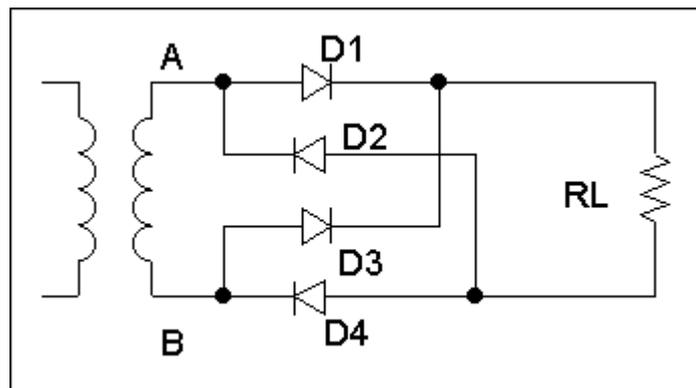


Figura 3. Rectificación con puente de diodos.

transformador más sencillo, pero a cambio éste tiene que ser flotante, es decir no puede tomarse ninguno de sus terminales como referencia del circuito.

Con un transformador doble y con un puente de diodos puede conseguirse una rectificación de doble onda simétrica, tal como se refleja en la figura 4. En este caso

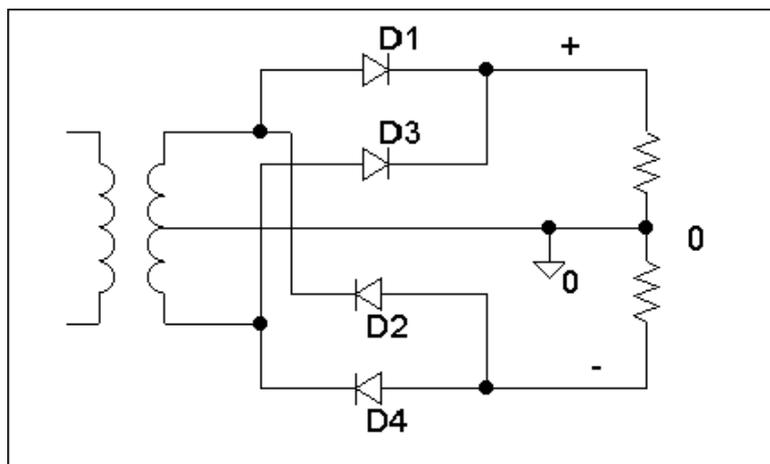


Figura 4. Rectificación de doble polaridad.

obtenemos valores de continua simétricos respecto al potencial de referencia, que es asimismo referencia para el transformador.

#### 1.1.4. Filtrado.

Con los rectificadores anteriores se pueden conseguir valores de la corriente y de la

tensión cuyos valores medios son distintos de cero, pero en realidad no obtenemos tensiones constantes. Si bien el término constante no deja de ser una entelequia, sí que tenemos que

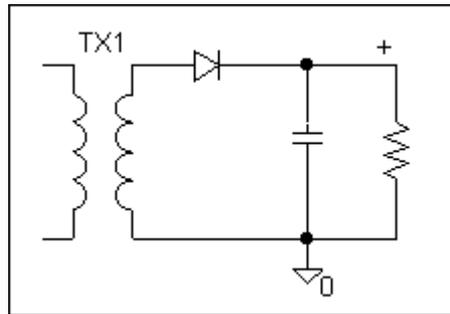


Figura 5. Filtrado para rectificación en media onda.

conseguir una apreciable disminución de las componentes de alterna que quedan en la señal rectificada.

La forma más sencilla de disminuir la componente alterna, aumentando la de continua, es la incorporación de un condensador en paralelo con al carga. Esto se representa en la figura 5 para un rectificador de media onda. Si suponemos que ni el diodo ni el transformador tienen resistencia interna, nos encontraremos con que el condensador se carga instantáneamente (en realidad existiría un retraso en la carga, cuyo tiempo característico sería el producto de la resistencia serie del diodo más la resistencia del devanado del transformador por el valor del condensador). Cuando el potencial del diodo, de forma senoidal, caiga por debajo del potencial mantenido por el condensador nos encontraremos con que el diodo está en

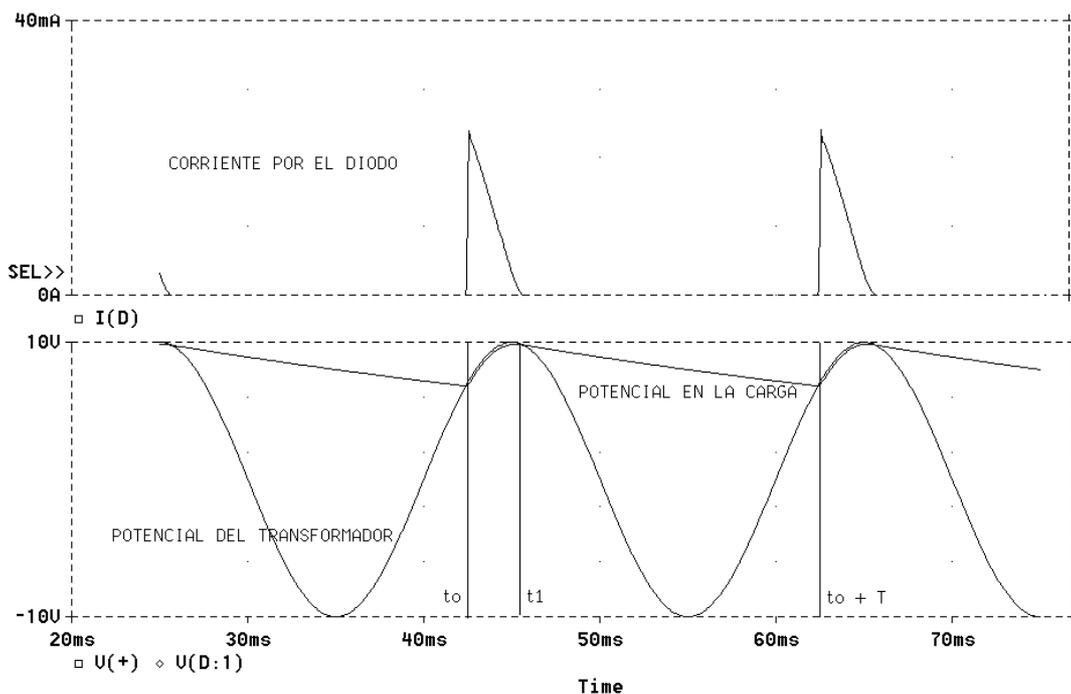


Figura 6. Formas de onda en el circuito de la figura 5.

polarización inversa y debe dejar de conducir. Ahora el condensador se descargará a través de la resistencia de carga intentando mantener el potencial constante en ella. En la figura 6 se representa la forma de onda típica del potencial en la carga y el potencial en el transformador. También se representa la corriente que fluye por el diodo.

En la representación del potencial en la carga tenemos que distinguir dos intervalos de tiempo: el que va desde  $t_0$  a  $t_1$ , en el que el diodo conduce y por lo tanto la salida responde a la entrada (excepto el pequeño error de la caída directa del diodo, que despreciaremos), y el intervalo entre  $t_1$  y  $t_0+T$ , en que el responsable de que exista potencial de salida es el condensador. Es obvio que con este montaje, y si el valor del condensador es suficientemente grande, conseguiremos mayores valores de la tensión y de la corriente promedios.

Cuanto mayor es el condensador, tanto más tenderá la salida a mantenerse constante y aproximarse su valor medio al valor de pico de la tensión del transformador. También, el tiempo de conducción del diodo  $t_0 - t_1$  se acorta. Este intervalo, expresado en radianes, se conoce como ángulo de conducción del diodo. Para calcular la componente de alterna residual después del filtrado, supondremos un ángulo de conducción muy pequeño y que, por lo tanto, el tiempo de descarga del condensador es prácticamente un ciclo completo (medio en el caso del rectificador de onda completa). Por tanto en este tiempo el condensador tendrá una tensión:

$$V_{0_{t=t_0}} = V_{0_{t=t_0+T}} = V_p e^{\frac{-T}{R_L C}} \approx V_p \left( 1 - \frac{T}{R_L C} \right),$$

donde se ha usado el desarrollo habitual de la exponencial suponiendo  $T \ll R_L C$ .  $V_p$  es el valor de pico de la tensión alterna. Es evidente que la suposición de un ángulo pequeño y el anterior desarrollo de la exponencial están presuponiendo una forma triangular de la tensión de salida, lo cual no deja de ser una idealización. El valor medio de la tensión de salida se obtiene de forma inmediata como la media entre  $V_p$  y la tensión de salida para  $t=t_0$  expresada en la fórmula anterior y es:

$$V_0 = V_p \left( 1 - \frac{T}{2R_L C} \right) = V_p \left( 1 - \frac{\pi}{\omega R_L C} \right).$$

Se entiende por rizado de una fuente la componente alterna pico a pico de la tensión de salida, cuyo valor se obtiene de forma inmediata de las expresiones anteriores como:

$$\Delta V_0 = V_p \frac{2\pi}{\omega R_L C} = \frac{I_p}{fC}.$$

La expresión de la corriente que circula por la carga es simplemente la tensión de

salida dividida por la resistencia; sin embargo la corriente por el diodo, en directa solamente entre los tiempos  $t_0$  y  $t_1$ , es mucho más alta y tanto mayor cuanto mayor es el condensador y consecuentemente menor el ángulo de conducción. Dado que el condensador es cargado por el diodo y descargado a través de la resistencia, la carga total involucrada en el proceso será:

$$Q = \int_{t_0}^{t_1} I_D dt = \int_{t_1}^{t_0+2\pi/\omega} I_0 dt,$$

donde se ha llamado  $I_0$  a la corriente a través de la resistencia. La idea de una fuente de tensión de este tipo es conseguir una tensión y una corriente constantes. Si suponemos que tanto  $I_0$  como  $I_D$  son constantes es inmediato que un valor estimado de  $I_D$  sería:

$$I_D = I_0 \frac{(t_0 + 2\pi/\omega) - t_1}{t_1 - t_0} \approx I_0 \frac{2\pi}{\omega\Delta t}$$

Los cálculos presentados se refieren al rectificador de media onda. En el caso del rectificador de onda completa hay que tener en cuenta un factor 2 en el período.

### 1.1.5. Multiplicadores de tensión.

Usando hábilmente las propiedades de los diodos puede hacerse que la tensión de salida sea un múltiplo entero de la tensión de pico del transformador. En el esquema representado en la figura 7, la salida dobla la tensión de pico del transformador. El funcionamiento es como sigue: en el semiciclo negativo, el condensador  $C_1$  se carga mediante  $D_1$  al valor  $V_p$  (idealmente), con el positivo hacia el punto de unión de los diodos. En el

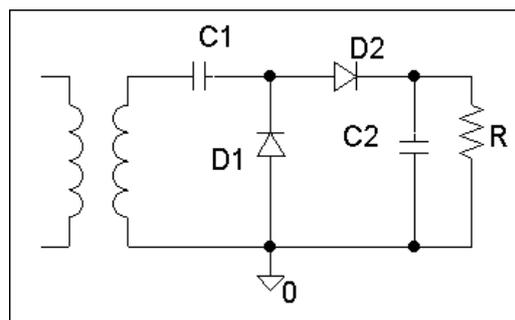


Figura 7. Doblador de tensión.

semiciclo positivo, el condensador  $C_2$  “ve” no solamente la tensión del transformador, sino también el potencial de  $C_1$ , de forma que tenderá hacia una tensión máxima  $2V_p$ .

La misma idea repetida puede usarse para multiplicar por 3 o por cualquier otro número natural.

### 1.1.6. Diodo Zener.

Es bien sabido que, en polarización inversa, la corriente se mantiene despreciable hasta la ruptura. Se conoce como ruptura el punto donde la corriente inversa pasa de ser, idealmente,  $IS$ , a aumentar de forma aparentemente descontrolada. Los mecanismos físicos que explican este comportamiento no pueden ser tratados aquí, pero responden bien a un mecanismo de túnel o bien a una ruptura de los enlaces de la red por impacto con un portador.

Se conoce como diodo Zener a aquel diodo específicamente diseñado para que su

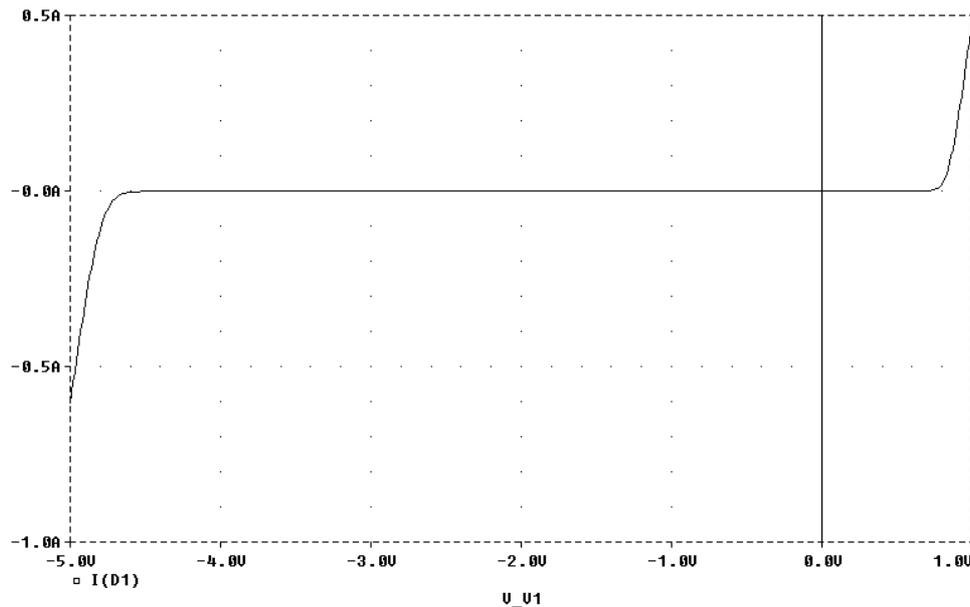


Figura 8. Característica de un diodo Zener simulada con PSPICE.

ruptura se produzca reproduciblemente a una tensión predeterminada. La característica del diodo Zener 1N750 se representan en la figura 8. El potencial de ruptura  $BV$  es de 4.7 V.

El programa PSPICE simula la ruptura de un diodo restando a la corriente ideal dos exponenciales de la forma:

$$I_{rev} = I_{rev,high} + I_{rev,low}; \text{ donde}$$

$$I_{rev,high} = IBV \exp \left( -(V_d + BV) / (NBV \cdot V_t) \right)$$

$$I_{rev,low} = IBVL \exp \left( -(V_d + BV) / (NBVL \cdot V_t) \right),$$

siendo los parámetros para este diodo:  $BV=4.7$ ,  $IBV=20.245m$ ,  $NBV=1.6989$ ,  $IBVL=1.9556m$ ,  $NBVL=14.976$ .

La pendiente de las características en la ruptura es muy alta, lo que implica una resistencia equivalente muy pequeña. La verticalidad de esta característica puede usarse para estabilizar las fuentes de tensión. Una fuente de tensión realizada con diodos y condensadores, además de tener el problema de rizado, es directamente dependiente de la tensión de la red. El uso del diodo Zener reduce esta dependencia y también el rizado.

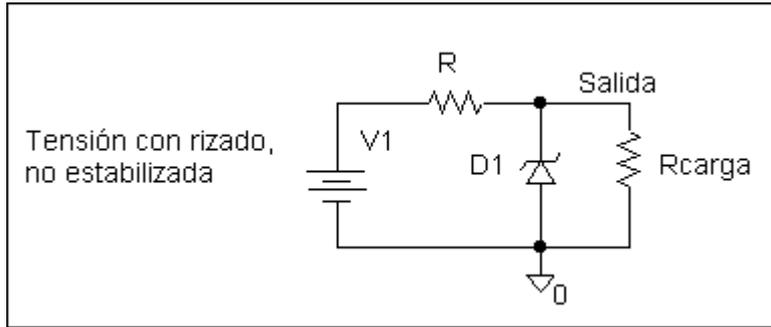


Figura 9. Estabilización con Zener.

Obviamente deberá buscarse un diodo con la tensión de ruptura adecuada.

El circuito básico para estabilizar con Zener se representa en la figura 9. Para comprender adecuadamente el comportamiento de este circuito se puede realizar el equivalente Thevenin de  $V_1$ ,  $R$  y  $R_{carga}$  obteniéndose una tensión  $V_{TH} = V_1 \times R_{carga} / (R_{carga} + R)$  en serie con una resistencia igual al paralelo de las dos resistencias. Si ahora trazamos la recta de carga correspondiente a esta ecuación nos encontraremos con una representación como la de la figura 10. El punto de operación será el de cruce entre la recta de carga y las características del dispositivo. Obviamente para estar en un punto de tensión estable este cruce debe darse en la zona vertical de las características, por lo que  $V_{TH}$  tiene que ser mayor que  $BV$ .

Frecuentemente y para facilitar el cálculo del rizado a la salida se calcula la resistencia incremental del Zener en la zona de ruptura como la inversa de su pendiente en el punto de

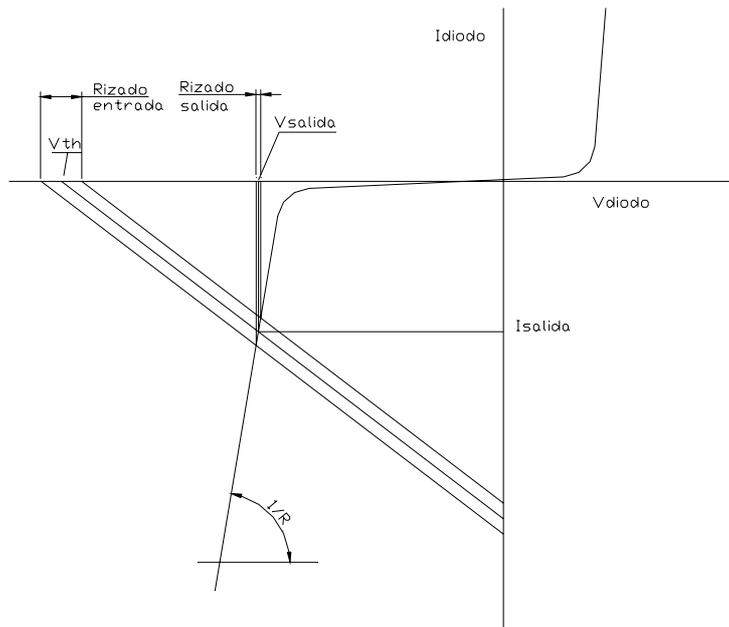


Figura 10. Rectas de carga en el circuito de la figura 9.

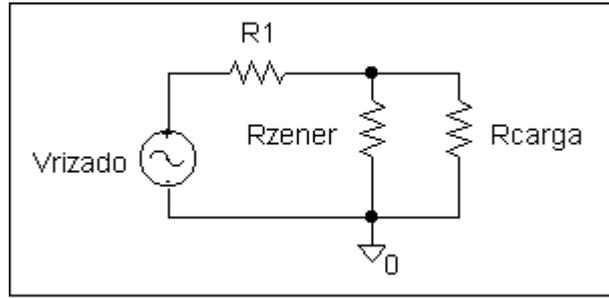


Figura 11. Equivalente en alterna del circuito de las figuras 9 y 10.

operación. Con este valor es inmediato ver la reducción del rizado usando el modelo equivalente de alterna de la figura 11.

Una consideración importante en la estabilización con Zener es la disipación en potencia. En vacío, es decir sin la resistencia de carga, tendremos una disipación:

$$W = V_{diodo} I_{diodo} = V_{diodo} \frac{V_1 - V_{diodo}}{R} \approx BV \frac{V_1 - BV}{R},$$

si suponemos la resistencia del Zener despreciable. Si añadimos una resistencia de carga, ésta le sustrae corriente al diodo, con lo que la potencia disipada puede ahora ponerse:

$$W = V_{diodo} I_{diodo} \approx BV \left( \frac{V_1 - BV}{R} - \frac{BV}{R_{carga}} \right)$$

con lo que es evidente que el diodo se calienta más en vacío que con la carga. Este dato debe tenerse en cuenta a la hora del diseño.

## 1.2. ASPECTOS PRÁCTICOS.

### 1.2.1. Consideraciones generales.

En el laboratorio dispone de unos transformadores con toma central que se encuentran protegidos por una carcasa para evitar cortocircuitos accidentales. En el bobinado primario del transformador se aplica la tensión alterna de la red, cuyo valor es de 220 V eficaces. Usualmente las tensiones *a.c.* se dan en valor eficaz en vez de con el valor de la amplitud de la senoide, dado que el primero es el que determinan los voltímetros de alterna. El valor eficaz también se denomina *r.m.s (root mean square)* o valor cuadrático medio, en alusión a la forma en como se obtiene: es la raíz cuadrada del valor medio de la señal al cuadrado. Los voltímetros miden el valor eficaz porque su funcionamiento se basa en medir el valor medio de la señal multiplicada por sí misma.

EJERCICIO: Calcule el valor medio de una senoide al cuadrado de amplitud  $A$  (integrando  $A^2 \sin^2 \omega t$  en un periodo y dividiendo por el valor de éste) y compruebe que la relación entre la

amplitud y el valor eficaz es:  $A = V_{rms} \sqrt{2}$ .

Los transformadores del laboratorio tienen una toma central en el bobinado secundario, por lo que la salida puede tomarse en cualquiera de las dos mitades o entre los dos extremos del secundario completo. Por esta razón verá que la carcasa tiene tres salidas, correspondiendo el conector de en medio a la toma central. Cuando a la entrada se aplican los 220 V de la red cada mitad del secundario produce 12 V de valor eficaz, por lo que la tensión en todo el secundario es de 24 V. Salvo que sea necesario emplear los tres terminales, en las prácticas que siguen procure usar sólo una de las dos mitades del secundario para trabajar así con las tensiones más bajas posibles. Tenga también cuidado de no cortocircuitar los terminales de salida, pues aunque el transformador está protegido por un fusible de 0.2 A en el bobinado primario, que saltaría como consecuencia de la elevada corriente que en caso de un cortocircuito en el secundario se induciría en el primario, podría también ocurrir que el transformador se quemara antes de que saltara el fusible.

Siempre que emplee condensadores tenga mucha precaución de comprobar antes si estos tienen polaridad: los condensadores electrolíticos sólo funcionan si se conectan con la polaridad adecuada y se rompen de manera irreversible si se conectan al revés. Cuando un condensador tiene polaridad ésta se encuentra señalada en sus terminales. Además, entre las especificaciones de un condensador se encuentra la tensión máxima que puede soportar, por lo que antes de situar un condensador en un circuito es importante estimar a qué tensión se va a cargar y en consecuencia utilizar el condensador adecuado. Análogamente, en el caso de las resistencias es conveniente tener en cuenta la potencia máxima que pueden disipar, por lo que si cree que en un circuito algunas resistencias van a disipar una potencia anormalmente alta téngalo en cuenta para usar el tipo de resistencia adecuado (en el laboratorio las más comunes son de  $\frac{1}{4}$  W o  $\frac{1}{2}$  W).

### **1.2.2. Rectificadores de onda completa.**

En este apartado analizaremos brevemente los tres circuitos rectificadores de doble onda que se presentaron en la sección 1.1.3, para comparar las ventajas e inconvenientes de cada uno. De estos tres circuitos, sólo el de la figura 3 (rectificación con puente de diodos) no requiere transformador con toma central, pero tiene el inconveniente de que no es posible observar simultáneamente la señal de salida en la carga junto a la señal en el secundario del transformador con el mismo osciloscopio, debido a que las sondas correspondientes a los dos canales comparten la misma tierra en el interior del osciloscopio y por tanto estaríamos cortocircuitando el diodo  $D_4$ . Esto pone de manifiesto la limitación de este circuito de no

poder poner a tierra uno de los dos terminales del secundario, lo cual sería siempre deseable por motivos de seguridad.

El circuito de la figura 2 consigue la rectificación de onda completa con sólo dos diodos, pero la tensión de salida es la mitad de la que se tendría con un rectificador de puente de diodos que utilizara todo el secundario del mismo transformador. Además la eficiencia con la que trabaja aquí el transformador con toma central no es buena, ya que cada mitad del bobinado se aprovecha sólo la mitad de cada ciclo, mientras que están funcionando durante el ciclo completo.

EJERCICIO: demuestre que para unas especificaciones dadas, el transformador empleado en un rectificador con toma central (figura 2) tiene un calentamiento dos veces mayor y debe tener una capacidad de suministrar corriente  $\sqrt{2}$  veces superior al de un rectificador equivalente con puente de diodos (figura 3).

Por último, la fuente de doble polaridad de la figura 4 es en realidad una variación del rectificador con toma central de la figura 3, y emplea de forma eficiente el transformador porque ambas mitades del bobinado actúan durante todo el ciclo de señal.

### 1.2.3. Multiplicadores de tensión.

Como se explicó en el apartado de introducción 1.1.5, el objetivo de los multiplicadores de tensión es aprovechar las propiedades de diodos y condensadores para construir circuitos que dan una salida de continua múltiplo de la tensión *a.c.* en el secundario del transformador. En este apartado se proponen algunos ejercicios sobre este tema.

En primer lugar compare el circuito de la figura 12 con el de la figura 7. Ambos son duplicadores de tensión; sin embargo uno actúa como rectificador de media onda y otro como rectificador de onda completa. Indique cuál es de cada tipo y por qué. El hecho de ser un

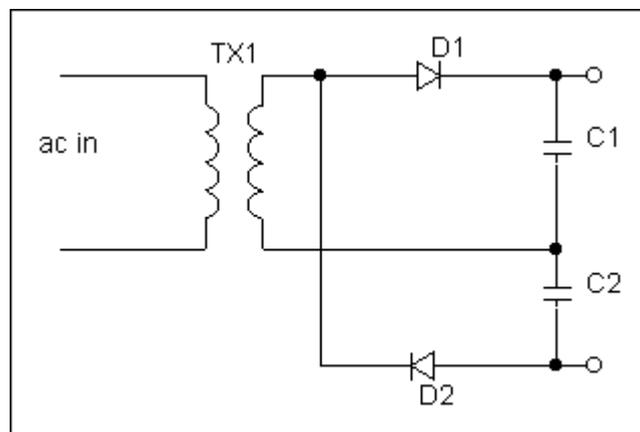


Figura 12. Doblador de tensión

rectificador de media onda o de onda completa repercute en la estimación del rizado, pues dado un valor de la carga y de la capacidad, el rizado en el primer caso será el doble que en el segundo. Observe también la ventaja del circuito de la figura 7 en cuanto que permite poner a tierra uno de los dos terminales del transformador, lo cual es importante como norma de seguridad y no es posible en el circuito de la figura 12.

Los circuitos que vienen a continuación proporcionan una tensión de salida que es tres y cuatro veces la que da el transformador. Estudie el funcionamiento de los circuitos, explíquelos y averigüe cuáles van a ser las tensiones que tienen que soportar los condensadores y su polaridad. Determine si actúan como rectificador de media onda o de

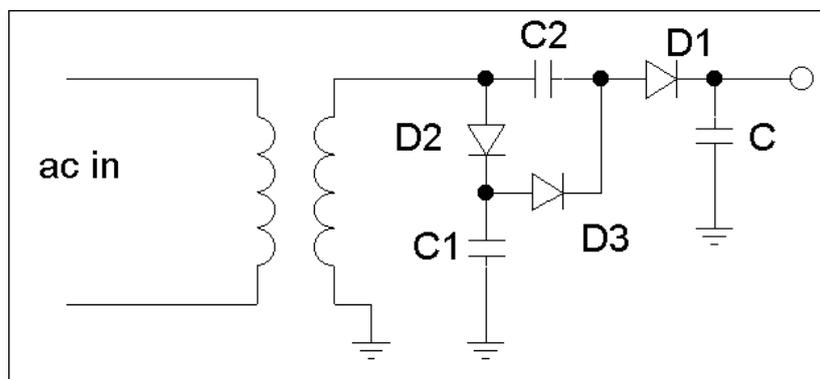


Figura 13. Triplicador de tensión.

onda completa, y por tanto cuál es la fórmula que debe aplicarse para estimar el rizado.

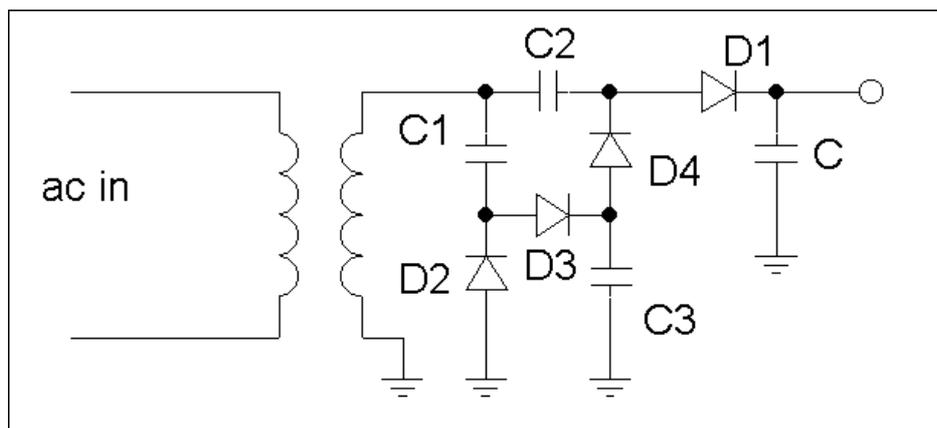


Figura 14. Cuadruplicador de tensión.

#### 1.2.4. Reguladores de tensión.

Hasta ahora ha visto cómo escogiendo condensadores suficientemente grandes se

puede reducir el rizado del voltaje al nivel deseado. Este procedimiento tiene desventajas que impiden su realización práctica: los condensadores requeridos pueden ser demasiado caros y voluminosos, y aunque el rizado se reduzca a niveles insignificantes aún se tendrán variaciones de la tensión de salida debidas a otras causas. Así por ejemplo, el voltaje será aproximadamente proporcional a la amplitud de la tensión *a.c.* de entrada, siendo por tanto sensible a fluctuaciones causadas por variaciones en la tensión de la línea. Además, cambios en la corriente de carga provocarán alteraciones en el voltaje debido a la resistencia interna finita (no nula) de los componentes (transformador, diodos,...), es decir, que la resistencia Thévenin equivalente del circuito de una fuente *d.c.* no es exactamente 0.

Por esta razón el método usual que se sigue es filtrar la señal con un condensador para reducir el rizado hasta un nivel pequeño y entonces usar un circuito activo realimentado para eliminar el rizado restante. Este circuito es lo que se llama un regulador serie y su misión es estabilizar la señal de salida en un nivel constante. La realimentación de los reguladores realiza cambios en una resistencia variable en serie (que suele ser un transistor) para mantener la salida constante. Los reguladores de tensión se usan en prácticamente todas las fuentes de tensión y están disponibles en forma de una gran variedad de circuitos integrados.

La forma más simple de regular o estabilizar una fuente de tensión es haciendo uso de un diodo Zener, como se mostró en la figura 9. A diferencia de los reguladores realimentados mencionados en el párrafo anterior, el Zener actúa como regulador paralelo, pues se sitúa en paralelo con la salida.

El circuito de la figura 9 se usa a veces para regular fuentes de tensión en circuitos poco críticos o que requieran poca corriente. Su utilidad está limitada por varios factores tales como los siguientes: la tensión de salida no es ajustable, el rechazo al rizado o la regulación frente a cambios en la entrada o en la carga es sólo moderadamente buena debido a la impedancia dinámica del Zener no es infinita; y por último, en el caso de corrientes de carga que tengan que variar en un amplio margen es necesario que el Zener pueda disipar una potencia alta cuando la corriente de salida sea baja

A continuación vamos a ver que usando un transistor en configuración de seguidor de emisor podemos aislar el Zener, es decir, hacer que la corriente que pasa a través de él sea prácticamente independiente de la corriente en la carga. El circuito se encuentra en la figura 15. Esta configuración del transistor se denomina seguidor de emisor porque en ella la tensión en el emisor sigue a la de la base (salvo la caída de potencial de la unión base-emisor polarizada en directa, que es aproximadamente 0.6 V). El Zener fija la tensión de base en el valor  $V_z$  y por tanto también la tensión de emisor que es el voltaje de salida. La resistencia  $R$

se usa para fijar la corriente que pasa por el Zener tomando como criterio que la potencia que se disipe en él no sobrepase el valor máximo para el que está calculado. La resistencia  $R_C$  es opcional y puede añadirse para proteger al transistor de un cortocircuito en la salida, limitando el valor máximo de la corriente que pasaría por él en ese caso. Si se pone esta resistencia entonces su valor debe escogerse para que el transistor pueda suministrar la

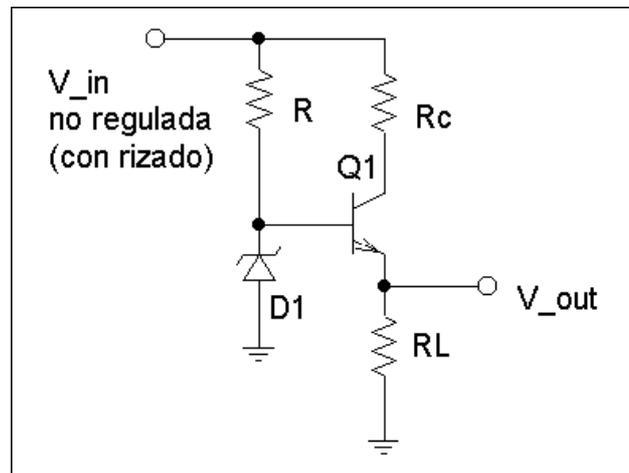


Figura 15. Estabilización con Zener y seguidor de emisor.

máxima corriente especificada sin que la caída de potencial en  $R_C$  sobrepase a la de  $R$  (es decir, para que la unión base-colector siempre esté en inversa).

En esta práctica hemos visto el esquema básico de una fuente de tensión: transformador – rectificador – filtrado – regulador. En las aplicaciones para sistemas digitales (como por ejemplo los ordenadores), que usualmente requieren una alimentación de +5 V a menudo con una corriente elevada (más de 10 A), y en aplicaciones de alta potencia, se emplea un tipo de regulador llamado conmutado que proporciona la importante ventaja de reducir el tamaño del transformador y el calor disipado en él. La impedancia del bobinado del transformador es  $L\omega$ ; por consiguiente a mayor frecuencia mayor es la impedancia y menores serán tanto la corriente que pase por las bobinas como la disipación de calor, posibilitando la reducción de tamaño del transformador. La señal de la línea de alimentación tiene una frecuencia muy baja (50 o 60 Hz), por lo que requiere un transformador voluminoso. Cuando se usa un regulador conmutado lo que se hace es rectificar y filtrar la señal de la línea de alimentación de 220/125V directamente. Luego esta señal rectificada y filtrada, que prácticamente es una señal *d.c.* con rizado, se hace pasar por el conmutador, que la convierte en una señal conmutada a una frecuencia muy alta. Ahora se puede reducir el nivel de tensión de la señal haciéndola pasar por un transformador mucho más pequeño, pues la frecuencia es mucho más alta que la de la línea. Por último se vuelve a rectificar, filtrar y estabilizar. Esta

es la idea básica de una fuente conmutada, que actualmente se usa en los ordenadores y muchos instrumentos electrónicos debido a su pequeño tamaño, poco peso y gran eficiencia. Si dispone de tiempo puede consultar bibliografía al respecto, como por ejemplo el capítulo 6 (especialmente la sección 6.19) del libro “The art of electronics”, de P. Horowitz y W. Hill (Cambridge University Press).

### **1.3. REALIZACIÓN.**

#### **1.3.1. Rectificación de media onda con un diodo y filtrado de la señal rectificada.**

##### *Objetivos.*

Rectificar la tensión de la red con un rectificador de media onda, aplicando para ello la característica no lineal del diodo, por la que en polarización directa permite pasar la corriente con una caída de potencial pequeña y prácticamente fija ( $\sim 0.7$  V) mientras que en polarización inversa la corriente que deja pasar puede despreciarse en la mayoría de las aplicaciones. Filtrar la señal de salida mediante un condensador y observar el ángulo de conducción del diodo.

##### *Realización.*

.- Comience por realizar el rectificador más sencillo posible, consistente en un diodo y una resistencia como se muestra en la figura 1. El diodo deja pasar la parte positiva de la señal de alterna, mientras que bloquea la parte negativa. Por tanto, en la señal de salida, que se toma en la resistencia de carga, sólo se observa la mitad de la senoide, y por esta razón el rectificador se denomina de media onda. Visualice la señal de salida y la del secundario con el osciloscopio para comprobar la afirmación anterior.

.- A continuación realice un filtrado de la señal de salida situando un condensador en paralelo con la resistencia de carga. Compruebe que si elimina la resistencia de carga obtiene una rectificación prácticamente perfecta. Si por el contrario incluye la resistencia de carga entonces la señal de salida presentará un cierto grado de rizado que depende de los valores relativos de la capacidad del condensador y la resistencia. En el apartado 1.1 se demostró que si se supone que la descarga del condensador es aproximadamente lineal se puede llegar a la siguiente fórmula estimativa del valor del rizado:  $\Delta V = I_{load}/fC$ . Compruebe la validez de esta fórmula eligiendo la resistencia y el condensador para que  $\Delta V$  sea aproximadamente el 20 % de  $V_{out}$ , de modo que pueda medirse con facilidad en el osciloscopio. Observe que debido a que el condensador se descarga lentamente en comparación con el periodo de la señal, la fuente sólo actúa aportando corriente para recargar el condensador durante una fracción

relativamente pequeña de cada ciclo, que es el único tramo en que el diodo se encuentra polarizado en directa y se denomina ángulo del diodo. Durante este tramo la fuente tiene que aportar una corriente  $I=CdV/dt$  para recargar el condensador y obligarle a seguir a la señal de entrada. Utilice el osciloscopio para visualizar la señal de salida y la del secundario. Trate de encontrar alguna forma para ver en el osciloscopio el efecto del ángulo de conducción del diodo (para ello puede por ejemplo situar una resistencia en serie con el diodo, y de valor despreciable frente a la resistencia de carga, y observar con el osciloscopio la caída de tensión en ella al mismo tiempo que por el otro canal visualiza la señal de salida).

### 1.3.2. Rectificación de onda completa usando los tres terminales del transformador.

#### *Objetivos.*

Hacer uso del tercer terminal del secundario del transformador para obtener rectificadores de onda completa.

#### *Realización.*

Los circuitos de las figuras 2 y 4 hacen uso de la toma central del transformador para producir una rectificación de onda completa. La toma central conectada a tierra proporciona el camino de regreso para la corriente, que en el puente de diodos proporcionaban los diodos de una de las ramas. Realice uno de los dos circuitos calculando la capacidad del condensador de salida y el valor de la resistencia de carga para que el rectificador dé entre 15 y 20 V de continua sobre una carga máxima de 0.1 mA con un rizado menor de 0.1 V.

### 1.3.3. Estabilización con Zener.

#### *Objetivos.*

Comprender la utilidad del diodo Zener como regulador paralelo.

#### *Realización.*

.- La configuración básica para estabilización con Zener se estudió en el apartado 1.1.6

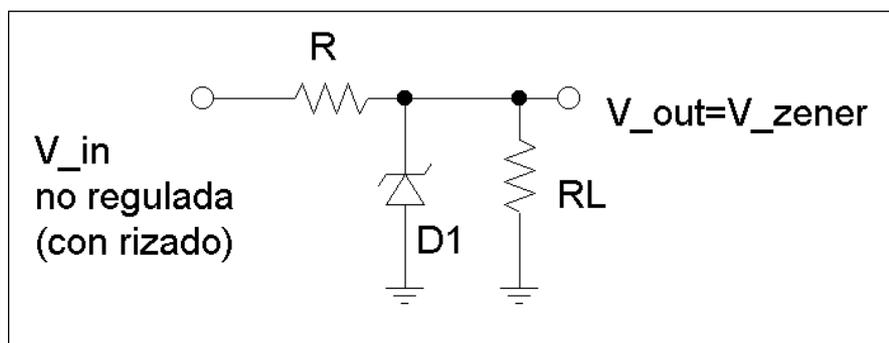


Figura 16. Estabilización con Zener como regulador paralelo.

y se representa en la figura 16. Este circuito proporciona una salida regulada que es igual a la tensión Zener del diodo. Calcule el equivalente Thévenin visto a la salida para deducir cuál será la mínima resistencia de carga que se podrá utilizar. Tenga en cuenta que para que el diodo Zener esté a un voltaje constante ( $V_z$ ) debe circular a través de él una corriente inversa, lo cual limita la corriente máxima que puede obtenerse a la salida, o lo que es igual, el valor mínimo de la resistencia de carga que se puede poner. Usando el equivalente Thévenin demuestre que la condición es:  $R_L \geq V_z R / (V_{in} - V_z)$ .

.- Además debe de tener en cuenta la potencia que deberá disipar el Zener y realizar el diseño basándose en el caso más desfavorable. Como ejemplo suponga que la tensión de entrada no regulada puede variar entre 15 y 20 voltios y diseñe una estabilización con Zener de 5 V que pueda proporcionar corrientes de carga de 0 a 5 mA. Deje un margen de 10 mA de corriente mínima por el Zener en cualquier condición y encuentre cuál debe ser el valor máximo de  $R$  y utilícelo para obtener la potencia que debe ser capaz de disipar el Zener en el caso más desfavorable.

.- Teniendo en cuenta los resultados obtenidos realice el circuito y varíe la resistencia de carga para verificar el límite a partir del cual el Zener deja de regular.

#### *Sección opcional: estabilización con Zener y seguidor de emisor.*

Siguiendo los criterios expuestos en el apartado 1.2.4 realice el circuito de la figura 15 para que cumpla las mismas especificaciones que en el apartado anterior, es decir, 5 V de salida con corrientes de carga entre 0 y 5 mA y tensión de entrada de 15 a 20 V. Calcule cuál sería el porcentaje de variación de la corriente que pasa por el Zener entre las condiciones de plena carga y sin carga y compare con el caso anterior (las variaciones de corriente en el Zener se traducirán en variaciones de tensión porque la impedancia dinámica no es infinita, es decir, la pendiente de la característica  $I$  frente a  $V$  en la zona de ruptura inversa no es infinita).

Compruebe la estabilidad del circuito y sus limitaciones, haciendo variar la resistencia de carga y el grado de rizado de la señal de entrada. Anote sus medidas y coméntelas.