

EL DIODO

1 INTRODUCCION

El diodo ideal es un componente discreto que permite la circulación de corriente entre sus terminales en un determinado sentido, mientras que la bloquea en el sentido contrario.

En la Figura 1 se muestran el símbolo y la curva característica *tensión-intensidad* del funcionamiento del diodo ideal. El sentido permitido para la corriente es de A a K.

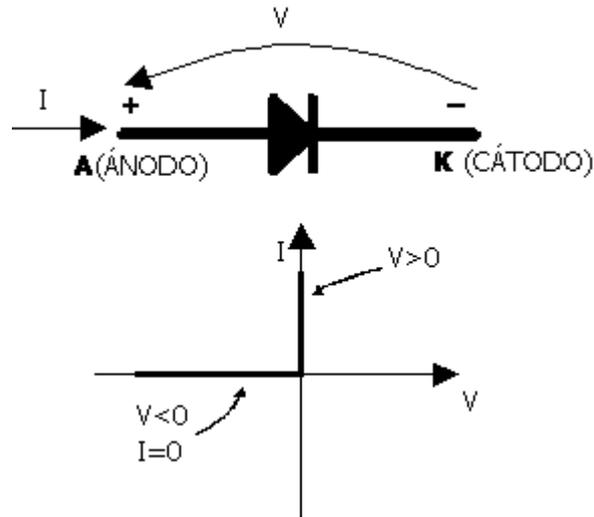


Figura 1: Símbolo y curva característica tensión-corriente del diodo ideal.

El funcionamiento del diodo ideal es el de un componente que presenta resistencia nula al paso de la corriente en un determinado sentido, y resistencia infinita en el sentido opuesto. La punta de la flecha del símbolo circuital, representada en la figura 1, indica el sentido permitido de la corriente.

- $\left. \begin{array}{l} V = 0 \\ I > 0 \end{array} \right\} \Rightarrow R = \frac{V}{I} = 0$ presenta resistencia nula.
- $\left. \begin{array}{l} V < 0 \\ I = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow R = \frac{V}{I} = \infty$ presenta resistencia infinita.

Mediante el siguiente ejemplo se pretende mostrar el funcionamiento ideal de un diodo en circuito sencillo.

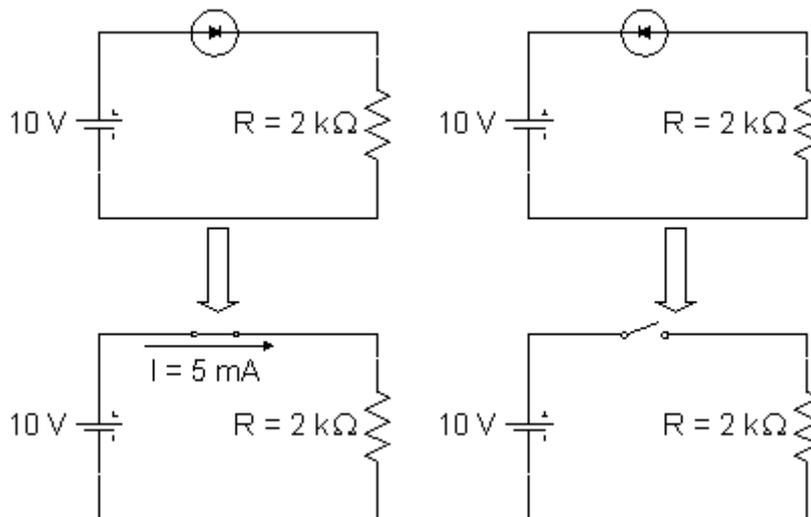


Figura 2: Ejemplo de funcionamiento del diodo ideal.

Según está colocada la fuente, la corriente debe circular en sentido horario.

En el circuito de la izquierda, el diodo permite dicha circulación, ya que la corriente entra por el ánodo, y éste se comporta como un interruptor cerrado. Debido a esto, se produce una caída de tensión de 10V en la resistencia, y se obtiene una corriente de 5mA.

En el circuito de la derecha, el diodo impide el paso de corriente, comportándose como un interruptor abierto, y la caída de tensión en la resistencia es nula: los 10V se aplican al diodo.

2 DIODO DE UNION PN

Actualmente los diodos se fabrican a partir de la unión de dos materiales semiconductores de características opuestas, es decir, uno de tipo N y otro de tipo P. A esta estructura se le añaden dos terminales metálicos para la conexión con el resto del circuito. En la Figura 3: se presenta el esquema de los dos tipos de diodos que se fabrican actualmente, el diodo *vertical* y el *plano*.

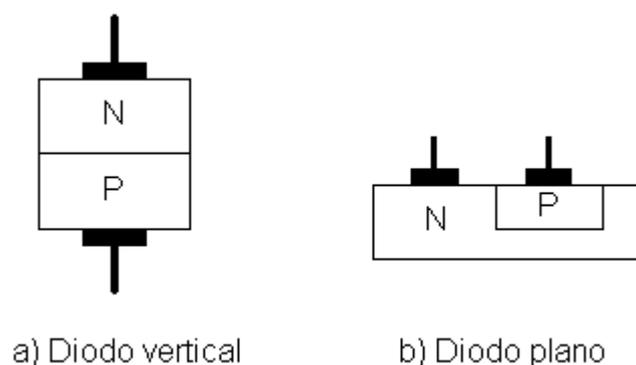


Figura 3: Esquemas de diodos de unión PN

El hecho de que los diodos se fabriquen con estos materiales conlleva algunas desviaciones de comportamiento con respecto al diodo ideal.

En este apartado se presenta en primer lugar el proceso de formación de los diodos de semiconductores para pasar después a exponer el comportamiento eléctrico y las desviaciones con respecto al comportamiento ideal.

2.1 Formación de la unión PN

Supongamos que se dispone de un monocristal de silicio puro, dividido en dos zonas con una frontera nítida, definida por un plano. Una zona se dopa con impurezas de tipo P y la otra de tipo N (Figura 4). La zona P tiene un exceso de huecos, y se obtiene introduciendo átomos del grupo III en la red cristalina (por ejemplo, boro). La zona N dispone de electrones en exceso, procedentes de átomos del grupo V (fósforo). En ambos casos se tienen también portadores de signo contrario, aunque en una concentración varios órdenes de magnitud inferior (portadores minoritarios).

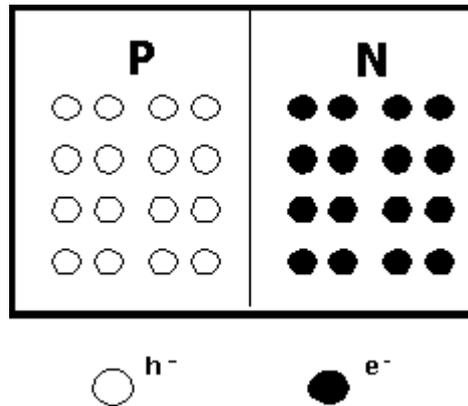


Figura 4: Impurificación del silicio para la obtención de diodos PN

En cada zona la carga total es neutra: por cada electrón hay un ion positivo, y por cada hueco un ion negativo, es decir, no existen distribuciones de carga neta, ni campos eléctricos internos. En el momento mismo de crear dos zonas de diferente concentración de portadores, entra en juego el mecanismo de la difusión. Como se recordará, este fenómeno tiende a llevar partículas *de donde hay más a donde hay menos*. El efecto es que los electrones y los huecos cercanos a la unión de las dos zonas la cruzan y se instalan en la zona contraria, es decir:

- Electrones de la zona N pasan a la zona P.
- Huecos de la zona P pasan a la zona N.

Este movimiento de portadores de carga tiene un doble efecto. Centrémonos en la región de la zona P cercana a la unión:

1. El electrón que pasa la unión se recombina con un hueco. Aparece una carga negativa, ya que antes de que llegara el electrón la carga total era nula.
2. Al pasar el hueco de la zona P a la zona N, provoca un defecto de carga positiva en la zona P, con lo que también aparece una carga negativa.

El mismo razonamiento, aunque con signos opuestos puede realizarse para la zona N. En consecuencia, a ambos lados de la unión se va creando una zona de carga, que es positiva en la zona N y negativa en la zona P (Figura 5).

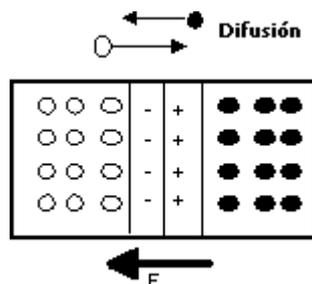


Figura 5: Formación de la unión PN

En el ejemplo del capítulo 5, los gases difunden completamente hasta llenar las dos estancias de la caja y formar una mezcla uniforme. Sin embargo, a diferencia de lo que ocurre con los gases de aquel ejemplo, en este caso están difundiendo partículas cargadas. La distribución de cargas formada en la región de la unión provoca un campo eléctrico desde la zona N a la zona P. Este campo eléctrico se opone al movimiento de portadores según la difusión, y va creciendo conforme pasan más cargas a la zona opuesta. Al final la fuerza de la difusión y la del campo eléctrico se equilibran y cesa el trasiego de portadores. En ese momento está ya formado el diodo de unión PN, y como resultado del proceso se ha obtenido:

- **Zona P**, semiconductor, con una resistencia R_P .
- **Zona N**, semiconductor, con una resistencia R_N .
- **Zona de agotamiento (depleción)**: No es conductora, puesto que no posee portadores de carga libres. En ella actúa un campo eléctrico, o bien entre los extremos actúa una *barrera de potencial*.

Hay que tener en cuenta que este proceso sucede instantáneamente en el momento en el que se ponen en contacto las zonas N y P, y no necesita de ningún aporte de energía, excepto el de la agitación térmica.

2.2 Polarización directa

El bloque PN descrito en el apartado anterior (Figura 6) en principio no permite el establecimiento de una corriente eléctrica entre sus terminales puesto que la zona de depleción no es conductora.

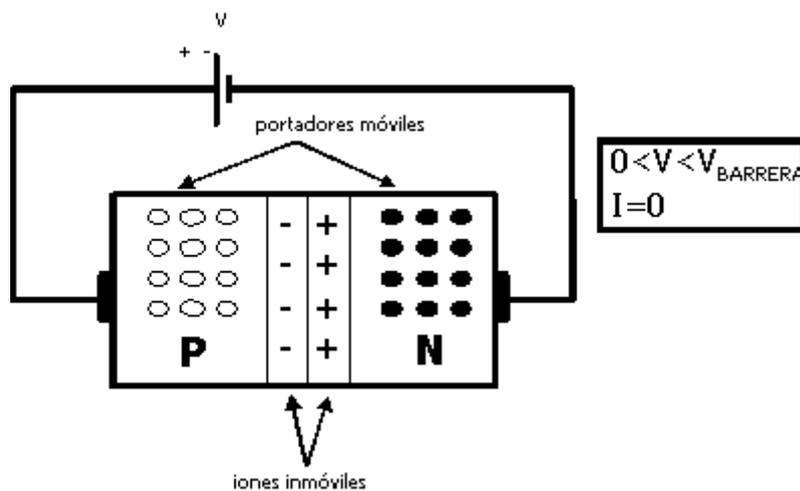


Figura 6: Diodo PN durante la aplicación de una tensión inferior a la de barrera

Sin embargo, si se aplica una tensión positiva en el ánodo, se generará un campo eléctrico que "empujará" los huecos hacia la unión, provocando un estrechamiento de la zona de depleción (Figura 7). Sin embargo, mientras ésta exista no será posible la conducción.

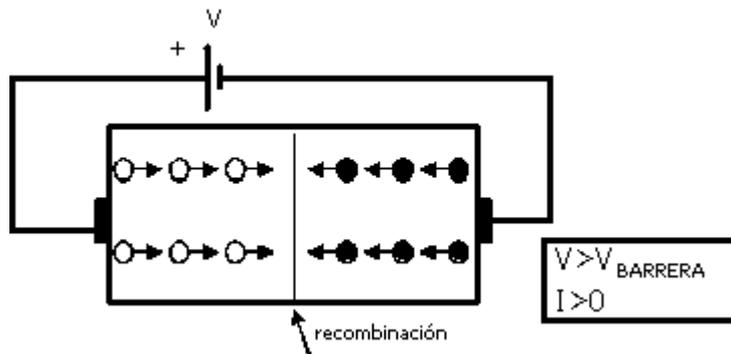


Figura 7: Diodo PN bajo la acción de una tensión mayor que la de barrera

Si la tensión aplicada supera a la de barrera, desaparece la zona de deplección y el dispositivo conduce. De forma simplificada e ideal, lo que sucede es lo siguiente (Figura 7):

1. Electrones y huecos se dirigen a la unión.
2. En la unión se recombinan.

En resumen, polarizar un diodo PN en *directa* es aplicar tensión positiva a la zona P y negativa a la zona N. Un diodo PN conduce en directa porque se inunda de cargas móviles la zona de deplección.

La tensión aplicada se emplea en:

- Vencer la barrera de potencial.
- Mover los portadores de carga.

2.3 Polarización inversa

Al contrario que en el apartado anterior, al aplicar una tensión positiva a la zona N y negativa a la zona P, se retiran portadores mayoritarios próximos a la unión. Estos portadores son atraídos hacia los contactos aumentando la anchura de la zona de deplección. Esto hace que la corriente debido a los portadores mayoritarios sea nula (Figura 8).

Ahora bien, en ambas zonas hay portadores minoritarios. Un diodo polarizado en inversa lo está en directa para los minoritarios, que son atraídos hacia la unión. El movimiento de estos portadores minoritarios crea una corriente, aunque muy inferior que la obtenida en polarización directa para los mismos niveles de tensión.

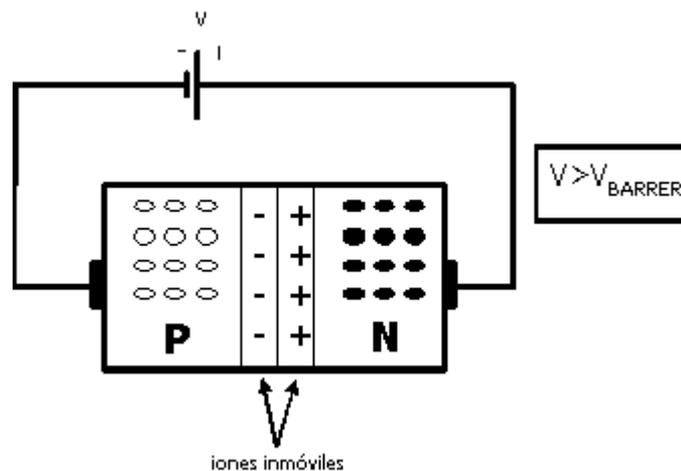


Figura 8: Diodo PN polarizado en inversa

Al aumentar la tensión inversa, llega un momento en que se produce la ruptura de la zona de deplección, al igual que sucede en un material aislante: el campo eléctrico puede ser tan elevado que arranque electrones que forman los enlaces covalentes entre los átomos de silicio, originando un proceso de **rotura por avalancha**. (Nota: Sin embargo, ello no conlleva necesariamente la destrucción del diodo, mientras la potencia consumida por el diodo se mantenga en niveles admisibles).

2.4 Característica tensión-corriente

La Figura 9 muestra la característica V-I (tensión-corriente) típica de un diodo real.

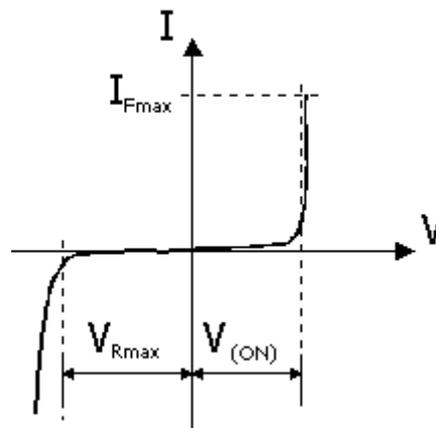


Figura 9: Característica V-I de un diodo de unión PN.

En la gráfica se aprecian claramente diferenciadas las diversas regiones de funcionamiento explicadas en el apartado anterior:

- Región de conducción en polarización directa (PD).
 - Región de corte en polarización inversa (PI).
 - Región de conducción en polarización inversa.

Por encima de 0 Voltios, la corriente que circula es muy pequeña, hasta que no se alcanza la tensión de barrera (V_{ON}). El paso de conducción a corte no es instantáneo: a partir de V_{ON} la resistencia que ofrece el componente al paso de la corriente disminuye progresivamente, hasta quedar limitada sólo por las resistencias internas de las zonas P y N. La intensidad que circula por la unión aumenta rápidamente. En el caso de los diodos de silicio, V_{ON} se sitúa en torno a 0,7 V.

Cuando se polariza con tensiones menores de 0 Voltios, la corriente es mucho menor que la que se obtiene para los mismos niveles de tensión que en directa, hasta llegar a la ruptura, en la que de nuevo aumenta.

2.5 Diferencias entre el diodo de unión PN y el diodo ideal

Las principales diferencias entre el comportamiento real y ideal son:

1. La resistencia del diodo en polarización directa no es nula.
2. La tensión para la que comienza la conducción es V_{ON} .
3. En polarización inversa aparece una pequeña corriente.
4. A partir de una tensión en inversa el dispositivo entra en conducción por avalancha.

En la Figura 10 vemos representadas más claramente estas diferencias entre los comportamientos del diodo de unión PN e ideal.

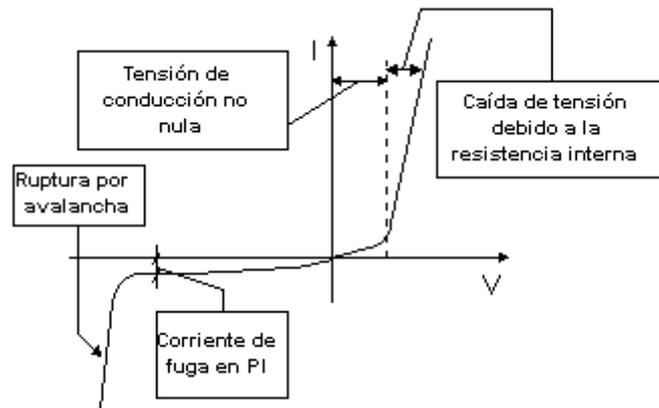


Figura 10: Diferencias entre el comportamiento del diodo de unión PN y del diodo ideal

2.6 Principales características comerciales

A la hora de elegir un diodo para una aplicación concreta se debe cuidar que presente unas características apropiadas para dicha aplicación. Para ello, se debe examinar cuidadosamente la hoja de especificaciones que el fabricante provee. Las características comerciales más importantes de los diodos que aparecen en cualquier hoja de especificaciones son:

1. **Corriente máxima en directa**, I_{Fmax} o I_{FM} (*DC forward current*): Es la corriente continua máxima que puede atravesar el diodo en directa sin que este sufra ningún daño, puesto que una alta corriente puede provocar un calentamiento por efecto Joule excesivo. Los fabricantes suelen distinguir tres límites:
 - Corriente máxima continua (I_{FM})
 - Corriente de pico transitoria (*Peak forward surge current*), en la que se especifica también el tiempo que dura el pico
 - Corriente de pico repetitivo (*Recurrent peak forward current*), en la que se especifica la frecuencia máxima del pico
1. **Tensión de ruptura en polarización inversa** (*Breakdown Voltage, BV; Peak Inverse Voltage, PIV*): Es la tensión a la que se produce el fenómeno de ruptura por avalancha.
2. **Tensión máxima de trabajo en inversa** (*Maximun Working Inverse Voltage*): Es la tensión que el fabricante recomienda no sobrepasar para una operación en inversa segura.
3. **Corriente en inversa**, I_R (*Reverse current*): Es habitual que se exprese para diferentes valores de la tensión inversa
4. **Caída de tensión en PD**, V_F (*Forward Voltage*): Pese a que se ha señalado anteriormente los 0.7V como valor típico, en muchas ocasiones los fabricantes aportan datos detallados de esta caída de tensión, mediante la gráfica I-V del dispositivo.

Además, es frecuente que los fabricantes suministren datos adicionales a cerca del comportamiento del dispositivo para otras temperaturas diferentes a la nominal. En el Anejo A.1 de este documento se incluyen unas hojas de datos de diodos a modo de ejemplo.

3 MODELOS DEL DIODO DE UNION PN

A continuación se van a explicar los diferentes tipos de modelos propuestos para el funcionamiento de un diodo de unión PN.

3.1 Modelos para señales continuas

Bajo el término *señales continuas* se engloban en este apartado tanto las señales constantes en el tiempo como aquellas que varían con una frecuencia muy baja.

3.1.1 Modelo DC del diodo real

El comportamiento del diodo real se corresponde con el indicado por la siguiente expresión:

$$I = I_s \left(e^{\frac{V-IR}{nV_T}} - 1 \right)$$

en donde:

- **n**, es el **factor de idealidad**. El valor *n* se ubica dentro del rango entre 1 y 2. Depende de las dimensiones del diodo, del material semiconductor, de la magnitud de la corriente directa y del valor de I_s .
- **V_T** , es el **potencial térmico** del diodo y es función de la constante de Boltzmann (K), la carga del electrón (q) y la temperatura absoluta del diodo T(K). La siguiente expresión permite el cálculo de V_T :

$$V_T = \frac{K}{q} \cdot T \quad \text{con} \quad K = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K} \quad \text{y} \quad q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

El potencial térmico a temperatura ambiente, $T=25^\circ\text{C}$, es $V_T=271\text{mV}$.

- **R** es la resistencia combinada de las zonas P y N, de manera que **$V-IR$** es la tensión que se está aplicando en la unión PN, siendo *I* la intensidad que circula por el componente y *V* la tensión entre terminales externos.
- **I_s** , es la **corriente inversa de saturación** del diodo. Depende de la estructura, del material, del dopado y fuertemente de la temperatura.

La representación gráfica de este modelo se muestra en la Figura 11:

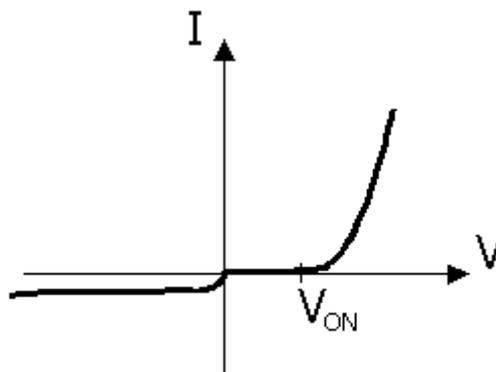


Figura 11: Representación gráfica del modelo del diodo real.

Como puede apreciarse, este modelo no da cuenta de la tensión de ruptura en inversa.

El modelo puede completarse mediante la adición de nuevos parámetros que incluyan efectos no contemplados en la teoría básica. Por ejemplo, algunos modelos empleados en los programas simulación por ordenador constan de hasta quince parámetros. Sin embargo, a la hora de realizar cálculos sobre el papel resulta poco práctico. Por ello es habitual realizar simplificaciones del modelo para obtener soluciones de modo más simple.

3.1.2 Modelo ideal del diodo de unión PN.

El modelo ideal del diodo de unión PN se obtiene asumiendo las siguientes simplificaciones:

- Se toma el factor de idealidad como la unidad, $n=1$.
- Se supone que la resistencia interna del diodo es muy pequeña y que, por lo tanto, la caída de tensión en las zonas P y N es muy pequeña, frente a la caída de tensión en la unión PN.

$$I = I_s \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right)$$

Para $V < 0$, el término exponencial es muy pequeño, despreciable frente a la unidad. Entonces la intensidad tiende al valor I_s , que como ya se había indicado anteriormente, es la corriente inversa del diodo. Para $V > 0$, la exponencial crece rápidamente por encima de la unidad.

3.1.3 Modelo lineal por tramos

Al igual que el modelo real, el modelo ideal sigue siendo poco práctico, dado su carácter no lineal. El modelo lineal por tramos se obtiene como una aproximación del modelo ideal del diodo de unión PN, considerando las siguientes simplificaciones:

- En inversa, la corriente a través de la unión es nula.
- En directa, la caída de tensión en la unión PN (V_{ON}) es constante e independiente de la intensidad que circule por el diodo.

Para calcular el valor de V_{ON} se considera un diodo de unión PN de silicio con una $I_s = 85 \text{ fA}$ a una temperatura ambiente de $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$. El potencial térmico a esa temperatura es $V_T = 27 \text{ mV}$. Tomando como variable independiente la intensidad I , la ecuación ideal del diodo queda:

$$V = V_T \cdot \ln\left(\frac{I}{I_s} + 1\right)$$

A partir de esta expresión, se puede calcular la caída de tensión en el diodo para las magnitudes de corriente habituales en los circuitos electrónicos. Por ejemplo, para un intervalo de corrientes $1 \text{ mA} < I < 1 \text{ A}$ se tienen tensiones $0.6 \text{ V} < V_{\text{DIODO}} < 0.77 \text{ V}$. Como se puede apreciar, mientras que la corriente ha variado 3 órdenes de magnitud, la tensión apenas ha experimentado un cambio de 200 mV, por lo que es posible aproximar la caída de tensión en la unión PN a un valor constante de 0.7 V.

Con estas simplificaciones se consigue evitar las expresiones exponenciales que complican los cálculos en la resolución del circuito. Sin embargo, se divide el modelo en dos tramos lineales denominados inversa y directa (o corte y conducción), cada uno de los cuales obedece a ecuaciones diferentes: el diodo queda convertido en un componente *biestado*.

El modelo lineal por tramos queda sintetizado en la siguiente tabla:

Estado	Modelo	Condición
Conducción	$V = V_{ON}$	$I > 0$
Corte	$I = 0$	$V < V_{ON}$

La Figura 12 muestra la curva característica V-I del modelo lineal

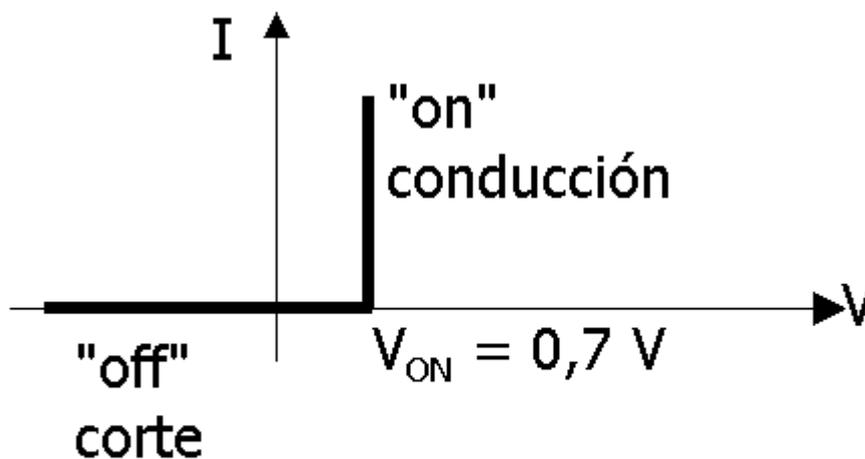


Figura 12: Modelo lineal por tramos del diodo.

En la Figura 12, quedan reflejados los dos posibles estados del diodo el diodo:

- Conducción o Polarización Directa "On", donde la tensión es V_{ON} para cualquier valor de la corriente.
- Corte o Polarización Inversa "Off", donde la corriente es nula para cualquier valor de tensión menor que V_{ON} .

El uso de este modelo sólo está justificado en aquellas ocasiones en las que no se requiere una gran exactitud en los cálculos.

3.2 Modelo para pequeñas señales de alterna

Hay aplicaciones en las que el diodo se polariza en un punto de tensión positiva, y sobre ese punto se superpone una señal alterna de pequeña amplitud.

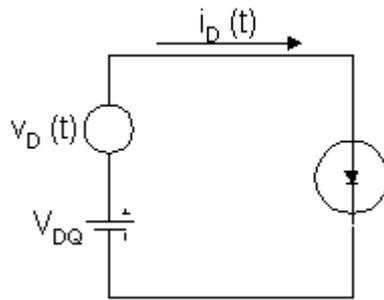


Figura 13: Diodo polarizado con una señal alterna superpuesta a una continua

El funcionamiento del diodo en esta situación queda representada gráficamente en la Figura 14:

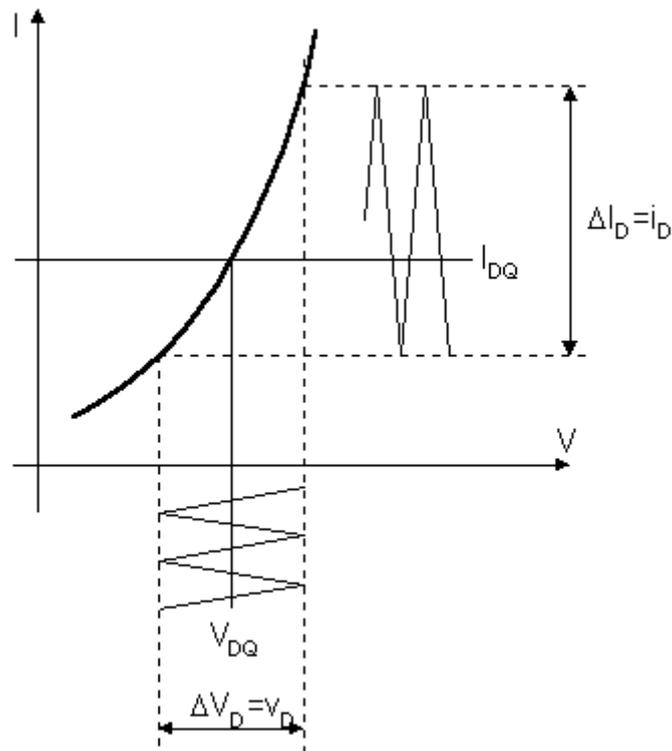


Figura 14: Tensión y corriente en un diodo polarizado con una señal alterna superpuesta a una continua

Cuando al diodo se le aplica una tensión dada por la expresión:

$$v = V_{DQ} + v_D(t)$$

la corriente que lo atraviesa puede calcularse aplicando cualquiera de los modelos explicados anteriormente. Si se opta por el modelo exponencial ideal:

$$i = I_S e^{\frac{V_{DQ} + v_D(t)}{V_T}}$$

Supongamos que conocemos la amplitud de las oscilaciones de la tensión aplicada (V_D) y queremos conocer la amplitud de las oscilaciones de la corriente (I_D). El método de cálculo sería:

$$\Delta I_D = i_{max}(t) - i_{min}(t) = I_S \left(e^{\frac{V_{DQ} + \Delta v_D / 2}{V_T}} - e^{\frac{V_{DQ} - \Delta v_D / 2}{V_T}} \right)$$

Como puede apreciarse, el cálculo se complica. Si se considera además que el diodo está dentro de un circuito es posible que ni siquiera pueda obtenerse una solución analítica.

Para obtener la solución al problema citado de una forma más simple se *linealiza* la curva del diodo en el entorno del punto de operación, es decir, se sustituye dicha curva por la recta que tiene la misma pendiente en el punto de operación, según se aprecia en la Figura 15

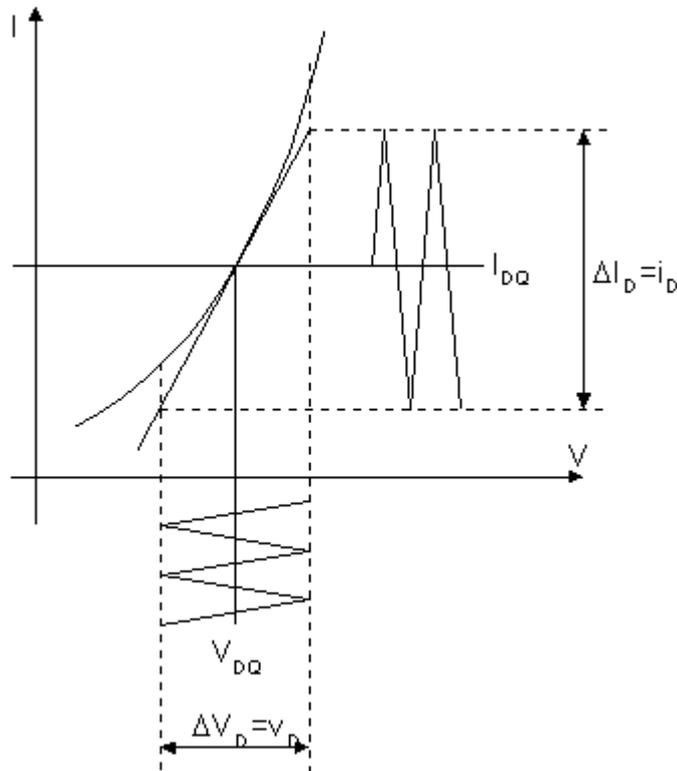


Figura 15: Aproximación de la característica exponencial del diodo por la tangente en el punto de operación

Teniendo en cuenta esta aproximación, la relación entre los incrementos de tensión y de corriente pueden relacionarse tal y como se indica:

$$\Delta V_D = \left[\frac{dV}{dI} \right]_{Q} \Delta I_D$$

Obviamente, esta aproximación será tanto más cierta cuanto menores sean los valores de V_D e I_D . A la derivada de la tensión con respecto a la corriente en el punto de operación se le llama resistencia dinámica del diodo r_D , y su expresión puede determinarse a partir del modelo exponencial del diodo, teniendo en cuenta que si V_{DQ} es mayor que V_T puede desprejiciarse la unidad frente al término exponencial:

$$I_D = I_s \left(e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right) \cong I_s e^{\frac{V_D}{V_T}}$$

$$r_{DQ} = \left[\frac{dV}{dI} \right]_Q = \frac{1}{\left[\frac{dI}{dV} \right]_Q} = \frac{V_T}{I_s e^{\frac{V_{DQ}}{V_T}}} = \frac{V_T}{I_{DQ}}$$

Como $V_T = 25 \text{ mV}$, la expresión válida para el cálculo de la resistencia dinámica de un diodo en función de la corriente de polarización continua puede escribirse de la siguiente forma, llamada *aproximación de Shockley*:

$$r(\Omega) \cong \frac{0,025 \text{ V}}{I(\text{A})}$$

Esta aproximación sólo es válida en la región de conducción en polarización directa del diodo.

4 APLICACION DE LOS MODELOS AL ANALISIS DE CIRCUITOS

En este apartado se detallan algunos métodos válidos para el análisis de circuitos con diodos, basándose en los modelos expuestos en el apartado anterior.

4.1 Modelo exponencial

Suponiendo que se dispone de un circuito en el que se desconoce la polarización del diodo, los pasos para resolver el problema serían:

1. Sustituir el diodo por una fuente de tensión V_D con el signo positivo en el ánodo, y nombrar como I_D a la corriente que va de ánodo a cátodo del diodo
2. Resolver el circuito empleando las variables V_D e I_D como si fueran conocidas
 1. Obtener la expresión que relaciona V_D con I_D
 2. La ecuación del modelo del diodo proporciona otra relación entre V_D e I_D
 3. Se resuelve el sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas resultante

4.2 Modelo lineal por tramos

Los pasos para calcular las tensiones y corrientes en un circuito con un diodos empleando el modelo lineal por tramos son:

1. Se asume la hipótesis de que el diodo está en uno de los dos estados posibles: corte o conducción
2. Se sustituye el diodo por el modelo correspondiente y se calculan las tensiones y corrientes del circuito
3. Una vez calculado el punto de polarización del diodo se comprueba la validez de la hipótesis: los resultados obtenidos han de ser coherentes con la condición de existencia. En el caso de que no lo sean, la hipótesis de partida no es correcta y es necesario rehacer todos los cálculos desde el punto 1 con el modelo para el estado contrario.

4.3 Método gráfico

El procedimiento para el cálculo sería ahora:

1. Eliminar el diodo del circuito
2. Calcular el circuito equivalente Thevenin entre los puntos en los que se encontraba conectado el diodo
3. Dibujar la recta de carga correspondiente al circuito Thevenin calculado
4. Dibujar en el mismo gráfico la curva característica del diodo
5. Hallar el punto de intersección de ambas curvas

4.4 Pequeñas señales de alterna

Los circuitos en los cuales las excitaciones son suma de una componente continua y otra alterna de pequeña amplitud se resuelven aplicando el principio de superposición (Figura 16)

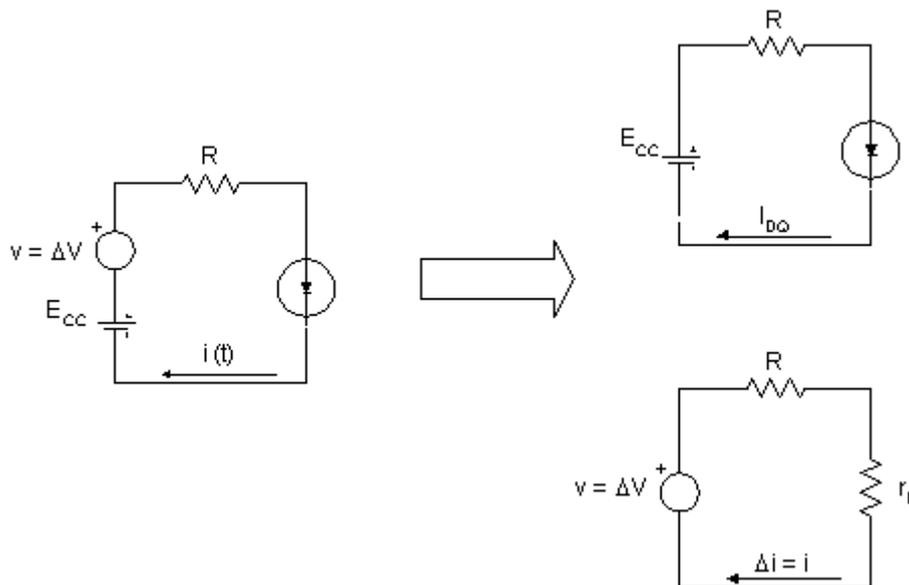


Figura 16: Análisis de circuitos con componentes continuas y pequeñas señales de alterna

El método se resume en los siguientes puntos:

1. Análisis DC del circuito: Se cortocircuita la fuente de AC y se calcula por cualquiera de los métodos anteriores el punto de operación del diodo.
2. Cálculo de la resistencia dinámica del diodo, basándose en los resultados del punto anterior
3. Análisis AC del circuito: Se cortocircuitan las fuentes DC y se sustituye el diodo por su resistencia dinámica. De ese modo se obtiene el circuito equivalente AC, válido para el cálculo de las amplitudes de las oscilaciones de las señales.

5 DIODOS ZENER

Algunos diodos se diseñan para aprovechar la tensión inversa de ruptura, con una curva característica brusca o afilada. Esto se consigue básicamente a través del control de los dopados. Con ello se logran tensiones de ruptura de 2V a 200V, y potencias máximas desde 0.5W a 50W.

La característica de un diodo zener se muestra en la Figura 17. Teóricamente no se diferencia mucho del diodo ideal, aunque la filosofía de empleo es distinta: el diodo zener se utiliza para trabajar en la zona de ruptura, ya que mantiene constante la tensión entre sus terminales (tensión zener, V_z). Una aplicación muy usual es la estabilización de tensiones.

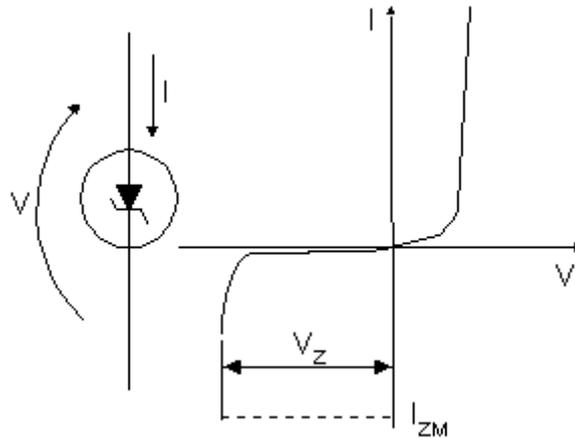


Figura 17: Característica V-I de un diodo Zener.

Los parámetros comerciales del diodo zener son los mismos que los de un diodo normal, junto con los siguientes:

- V_z : Tensión de zener
- I_{zM} : Corriente máxima en inversa.

NOTA: Hay que tener en cuenta que el fabricante nos da los valores de V_z y I_{zM} en valor absoluto. Al resolver un problema, no hay que olvidar que los valores son negativos con el criterio de signos establecido por el símbolo del componente (Figura 17).

El zener es un dispositivo de tres estados operativos:

- **Conducción en polarización directa:** Como en un diodo normal
- **Corte en polarización inversa:** Como en un diodo normal
- **Conducción en polarización inversa:** Mantiene constante la $V=V_z$, con una corriente entre 0 y I_{zM} .

El modelo lineal por tramos para el diodo zener es el siguiente:

Estado	Modelo	Condición
Conducción P.D.	$V=V_{ON}$	$I > 0$
Corte	$I=0$	$V_z < V < V_{ON}$
Conducción P.I.	$V=V_z$	$I < 0$

6 EJEMPLO DE APLICACION DEL DIODO: RECTIFICACION

La energía eléctrica generada en las centrales de potencia es de tipo **alterna sinusoidal**. Esta energía se transmite hasta los centros de consumo mediante las redes de distribución. Sin embargo, en muchas ocasiones, se requiere una tensión de alimentación **continua**. Un rectificador es, básicamente, un dispositivo que transforma la tensión alterna en continua.

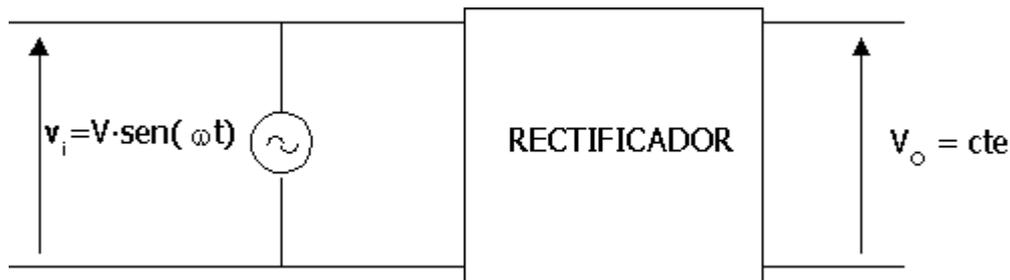


Figura 18: Esquema general de la rectificación.

El rectificador es un aparato muy empleado en la vida diaria. Una gran parte de los electrodomésticos utilizados en el hogar llevan incorporado un dispositivo de este tipo. En general, estos aparatos necesitan menos tensión de alimentación que la suministrada por la red, por ello llevan incorporado en primer lugar un **transformador** de tensión. El transformador reduce la tensión de la red (220V eficaces es una tensión generalmente demasiado alta para pequeños electrodomésticos) a la tensión deseada. Una vez reducida la tensión, el rectificador convierte la tensión alterna en continua.

En este apartado se van a presentar los esquemas rectificadores más comúnmente empleados, partiendo para ello de un circuito básico, e introduciendo en él los componentes necesarios para mejorar su comportamiento.

6.1 Notaciones

Las notaciones empleadas en este apartado se detallan en la Figura 19.

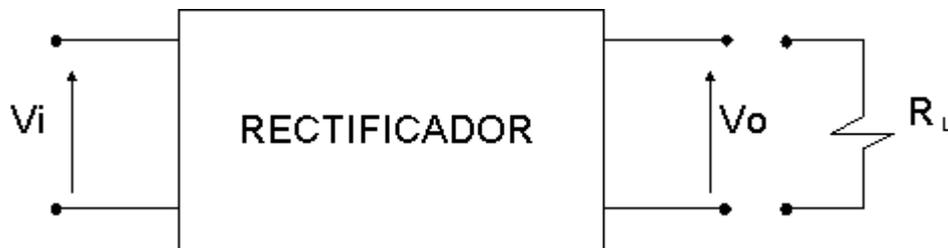


Figura 19: Notaciones.

- v_i : tensión de entrada, $v_i = V_M \cdot \text{sen}(\omega t)$.
- V_o : tensión de salida.
- R_L : resistencia asociada al aparato o "carga" que se conecta al rectificador.

En el caso más general, según la notación de la figura, la tensión v_i sería la tensión de la red, la V_o sería la tensión deseada en continua y la R_L simbolizaría al aparato musical, video, ... que por ser un elemento pasivo, puede reducirse a una simple resistencia de carga mediante su circuito equivalente Thevenin.

Un rectificador funciona en **vacío** cuando no se le conecta ningún aparato, es decir, cuando la R_L no está unida al circuito. En caso de que sí esté conectada se dice que funciona en **carga**.

6.2 Esquema básico. Rizado de la onda de salida

El esquema de la Figura 20 es el más sencillo de los rectificadores: el diodo. A continuación se estudia este circuito, para después discutir la validez del mismo.

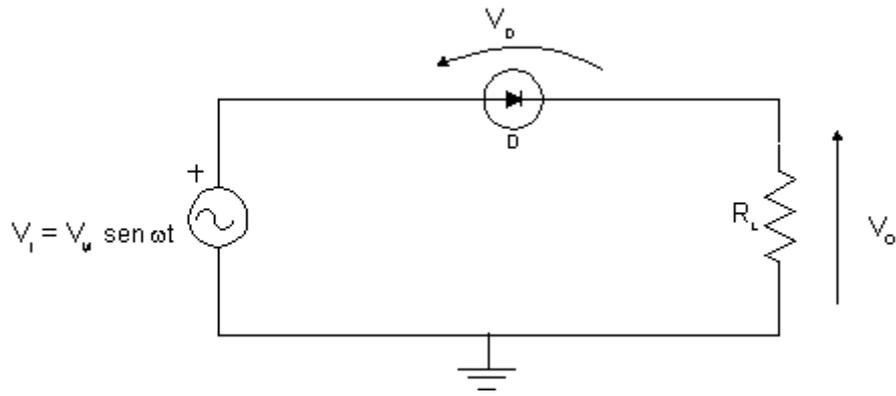


Figura 20: Esquema de un sencillo rectificador.

Cuando el valor de la tensión de entrada es superior a la de conducción del diodo se crea una corriente, y se cumple que: $V_o = v_i - V_{ON}$.

Como se puede apreciar, la tensión de salida V_o se parece muy poco a lo que se entiende por tensión continua, es decir, un valor constante en el tiempo. Sin embargo, esta onda no es tan mala como parece. Aunque no es constante, siempre es mayor que cero. Además, su valor medio es diferente de cero. Con los esquemas más complejos, se intenta que esta onda de salida se parezca lo más posible a una línea horizontal, pero siempre tendremos una desviación de la ideal, que se cuantifica por el **rizado** de la onda de salida:

$$V_R(\%) = \left[\frac{V_{Omax} - V_{Omin}}{V_{Omax}} \right] \cdot 100$$

En este caso, el rizado es del 100%. El problema con el que nos encontramos es que cuando el diodo está en corte no se alimenta a la carga. Para disminuir el rizado, es preciso suministrar energía a la carga durante los semiciclos en los que la fuente no actúa.

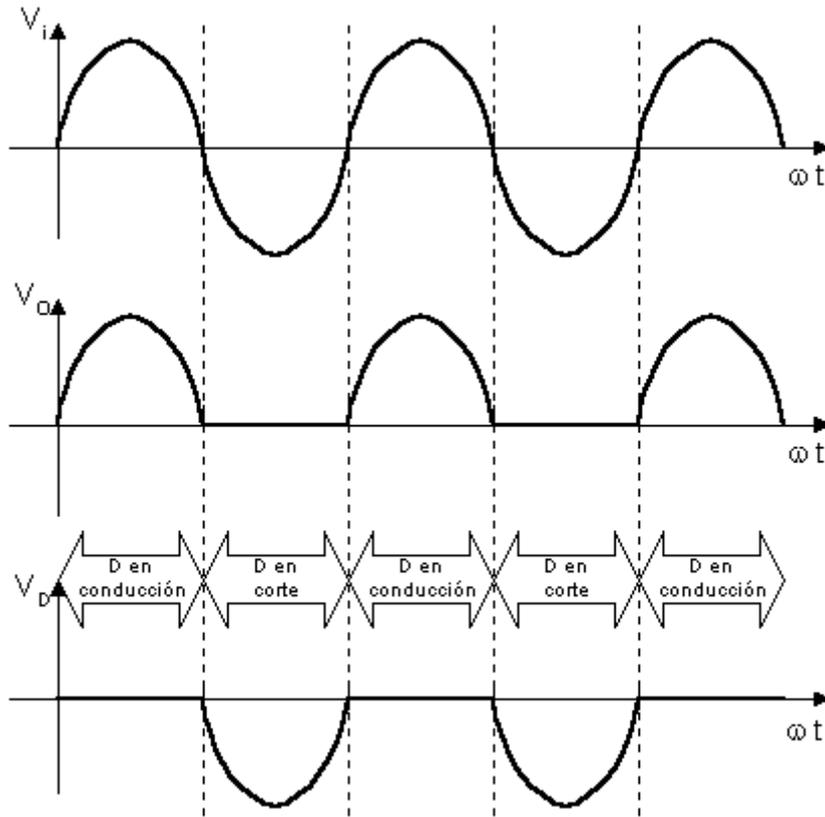


Figura 21: Tensiones en el circuito de la Figura 20.

6.3 El condensador en los rectificadores

Como se recordará, el condensador es un componente que almacena energía. Cuando se somete a una diferencia de potencial, esta obliga a las cargas a situarse entre sus placas. En el momento en el que cesa el potencial, las cargas pueden retornar a un circuito y comportarse como un generador de tensión.

En la Figura 22 se presenta el esquema eléctrico que aplica este principio a la rectificación. Lo que se pretende es que sea el condensador el que alimente a la carga cuando no pueda hacerlo la fuente de alimentación.

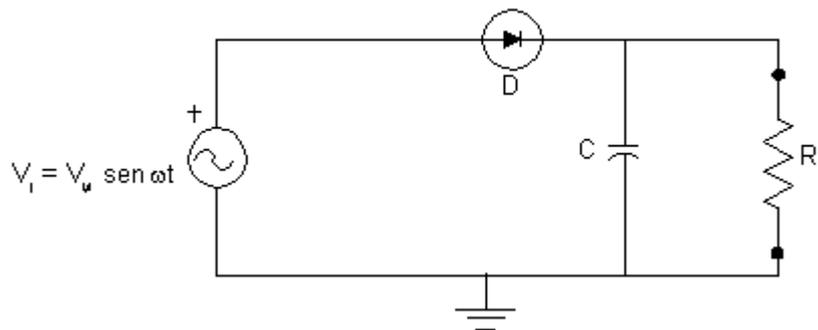


Figura 22: Esquema de rectificador con condensador.

6.3.1 Funcionamiento en vacío:

Se estudiará en primer lugar el esquema en vacío, es decir, sin carga aplicada.

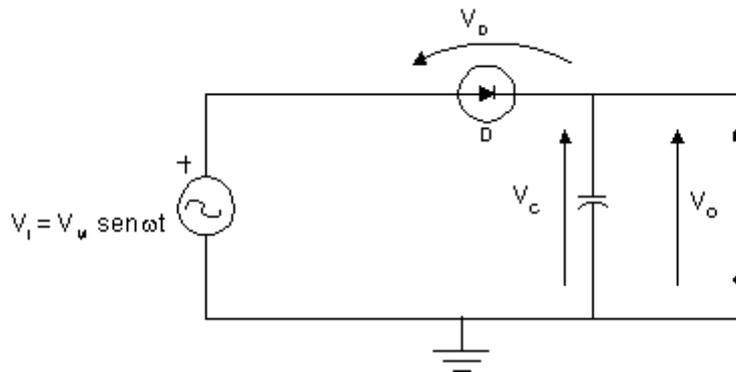


Figura 23: Funcionamiento en vacío.

Sea $v_i = V_M \cdot \text{sen}(\omega t)$, y la caída de tensión en el diodo en conducción despreciable. En el instante inicial el condensador se encuentra descargado. En un punto entre $0 < \omega t < \pi/2$, v_i es mayor que cero, por lo tanto, el diodo D está polarizado en directa. Por él circula una corriente que carga al condensador.

Se considera que el condensador se carga instantáneamente ($V_C = v_i$). La carga del condensador es posible porque hay un camino en el circuito que se lo permite.

En el instante $\omega t = \pi/2$, la tensión de entrada es máxima, $v_i = V_M$, así como la tensión del condensador. Cuando la tensión de entrada empieza a decrecer el condensador, cargado con una diferencia de potencial $V_C = V_M$, intenta seguir el ritmo que le marque la fuente de tensión, disminuyendo V_C . Evidentemente, para que el valor de V_C disminuya, es necesario

que el condensador pierda parte de su carga ($V_C = Q/C$). Para ello, la corriente de descarga ha de seguir un camino contrario al de la corriente que lo cargó, ya que el circuito se encuentra funcionando en vacío, sin ninguna carga R_L conectada. La corriente no puede circular dado que el diodo está en inversa para ese sentido de circulación, con lo que C no puede descargarse y mantiene fija la tensión V_M . La siguiente figura refleja la carga y descarga del condensador:

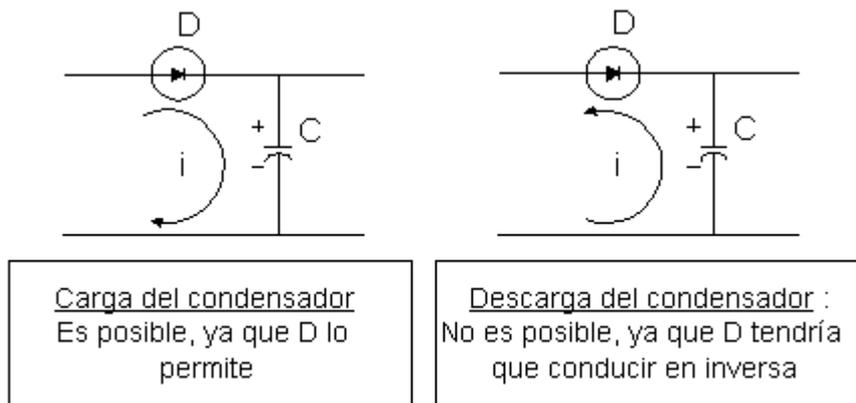


Figura 24: Funcionamiento del condensador.

Se puede deducir fácilmente, aplicando la ley de las mallas que cuando el diodo está en corte $V_D = V_M \cdot \text{sen}(\omega t) - V_C \leq 0$, o sea, V_D siempre es menor o igual que cero, el diodo nunca conducirá y el condensador nunca se descargará.

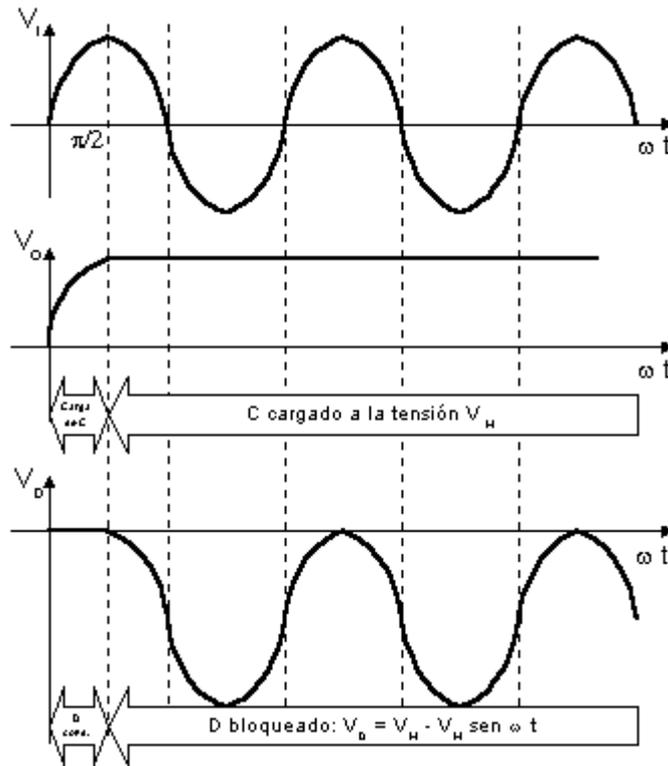


Figura 25: Tensiones en el circuito de la Figura 22.

Por lo tanto el condensador mantiene la diferencia de potencial entre sus terminales. La Figura 25 resume todo lo visto en este subapartado.

La onda de salida es perfecta para nuestros propósitos, ya que salvo entre 0 y $\pi/2$ es totalmente horizontal; pero vamos a ver qué pasa cuando el dispositivo funciona en carga.

6.3.2 Funcionamiento en carga:

Según se ha definido previamente, el funcionamiento en carga es el que se obtiene al conectar una carga R_L al dispositivo objeto de estudio.

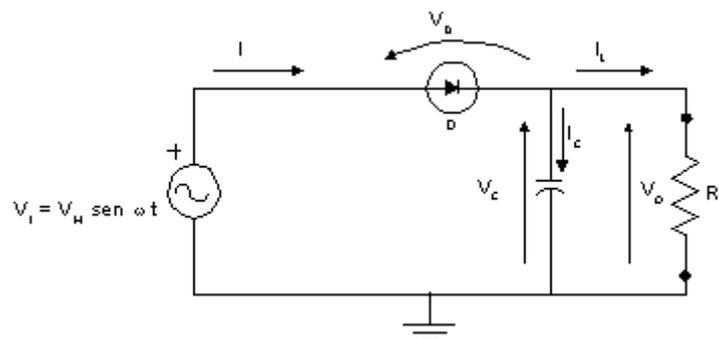


Figura 26: Dispositivo en carga.

Dado un valor de v_i entre $0 < \omega t < \pi/2$. Al ser un valor positivo, el diodo está en conducción. Hay dos caminos posibles para la intensidad que salga del generador. Por un lado, hay una corriente que carga el condensador, y por otro, una corriente que circule por R_L . Si suponemos que estamos en bajas frecuencias, el valor de la intensidad que absorbe el condensador es despreciable frente a la que circula por R_L , y se puede determinar el valor de la corriente que atraviesa la carga como:

$$I = \frac{V_i}{R_L}$$

Cuando $\omega t > \pi/2$ como en el caso anterior el diodo entra en corte al intentar descargarse el condensador por él. Sin embargo, ahora el condensador tiene un camino para descargarse a través de R_L . Mientras el diodo esté en corte, la parte derecha del circuito se comporta independientemente con respecto al generador.

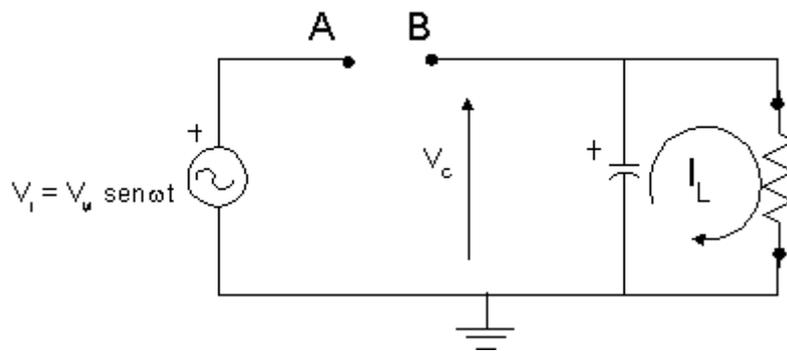


Figura 27: Descarga de C a través de R_L .

El condensador va perdiendo su carga al poder cerrarse una corriente a través de R_L . De este modo, se cumple el objetivo de este diseño: C alimenta a la carga.

Volviendo al circuito original. D estará en corte mientras V_B sea menor que V_A . Por lo tanto hay un punto en el que D vuelve a conducir ($V_B = V_A$), repitiéndose a partir de aquí toda la secuencia. Dicho funcionamiento se muestra en la Figura 28.

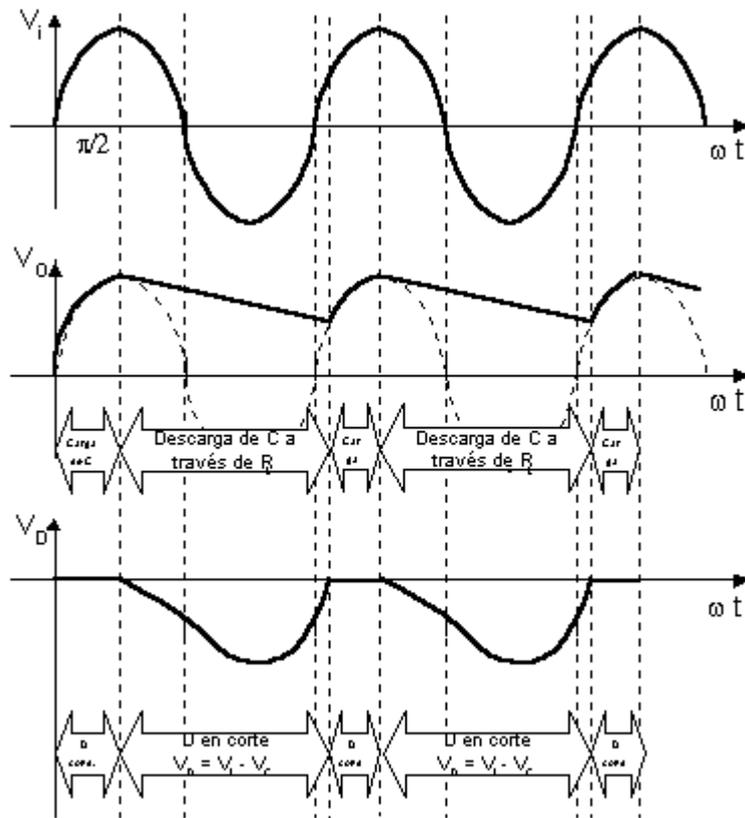


Figura 28: Tensiones en el circuito de la Figura 26.

Tal como se aprecia en la figura Figura 28, el rizado obtenido es menor que el del esquema anterior. Su valor depende de la rapidez con que se descargue C a través de la resistencia. Como se recordará, cuanto mayor sea el valor de C, mayor será el tiempo que necesita para descargarse, y menor el rizado. Como contrapartida, si C es muy grande es posible que no tenga tiempo suficiente para cargarse durante el tiempo de conducción de D.

6.3.3 Selección de los componentes

Una vez finalizado el análisis del esquema eléctrico de la Figura 22, se aborda seguidamente la tarea de la selección de los componentes adecuados para una aplicación concreta.

6.3.3.1 Diodo

A la vista de las gráficas de la Figura 28, se pueden calcular las características comerciales exigibles al diodo del esquema.

- **Corriente máxima en polarización directa, I_{Fmax} :** Mientras esté en conducción y, despreciando su caída de tensión ($V_{(ON)}$):

$$I = \frac{V_i}{R_L} \Rightarrow I_{MAX} = \frac{(V_i)_{MAX}}{R_L} = \frac{V_M}{R_L}$$

También se desprecia la corriente que absorbe C para cargarse.

- **Tensión máxima en inversa, PIV:** Cuando esté en corte, $V_D = v_i - V_C$. V_C es siempre mayor que cero, tal y como se aprecia en la figura, y su valor máximo es V_M . En este aspecto es más exigente el funcionamiento en vacío que en carga, ya que cuando v_i llega a ser $-V_M$, V_C sigue siendo V_M , y se tiene $V_D = v_i - V_C = -V_M - V_M = -2V_M$.

Los parámetros comerciales del diodo serán, por lo tanto:

$$I_{Fmax} = \frac{V_M}{R_L} \quad PIV = 2V_M$$

6.3.3.2 Condensador

El valor de la capacidad del condensador se ha de calcular teniendo en cuenta el rizado máximo exigido al aparato. Para la frecuencia de la red eléctrica doméstica, es posible emplear la siguiente expresión:

$$C = \frac{I_o \cdot t_c}{V_{RIZADO}}$$

en la que:

- I_o : cociente entre la tensión máxima, V_M , y la resistencia de carga, R_L .
- t_c : tiempo de descarga del condensador.
- V_{RIZADO} : Diferencia entre la tensión máxima y mínima admisible.

La deducción de esta fórmula ha sido discutida ya en el capítulo segundo de estos apuntes.

6.4 Rectificador de onda completa

el esquema anterior produce una onda de salida bastante aceptable, cuando el condensador es lo suficientemente grande como para alimentar la carga durante un semiciclo aproximadamente. Sin embargo, se desaprovecha medio ciclo de la red, con lo que la potencia transmitida a la carga se limita. En el siguiente circuito, el puente de diodos consigue que durante el semiciclo negativo también alimente la red a la carga.

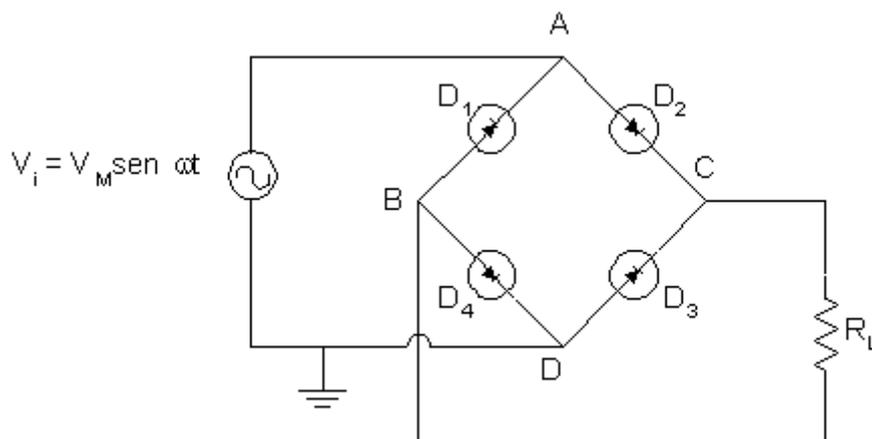


Figura 29: Rectificador de onda completa.

Dado un valor positivo de la tensión de entrada, $v_i = V > 0$. El punto A está sometido al mayor potencial del circuito, V , mientras que D se encuentra a potencial nulo, el menor en ese instante. Por lo tanto, los puntos B y C se encontrarán a un potencial intermedio entre 0 y V voltios. Un circuito que está alimentado entre 0 y 10V, por ejemplo, no tiene sentido que haya un punto del mismo que tenga un potencial mayor que 10V con respecto a la referencia, ya que la tensión sólo puede disminuir entre los nodos de los componentes del circuito (esto es válido sólo para el régimen permanente).

Suponiendo que hay una corriente intentando circular. Como V_A es mayor que V_C el diodo D_2 está en condiciones de conducir, mientras que D_1 está en corte. La corriente circular de A a C. D_4 está en corte, puesto que $V_{DC} = V_D - V_C < 0$, por lo tanto la intensidad atraviesa R_L de arriba a abajo. El retorno de corriente será por D_3 , puesto que $V_B < V_A$ y $V_B > V_D$.

Así pues, D_1 y D_4 no conducen en el semiciclo positivo de v_i . El esquema equivalente sería:

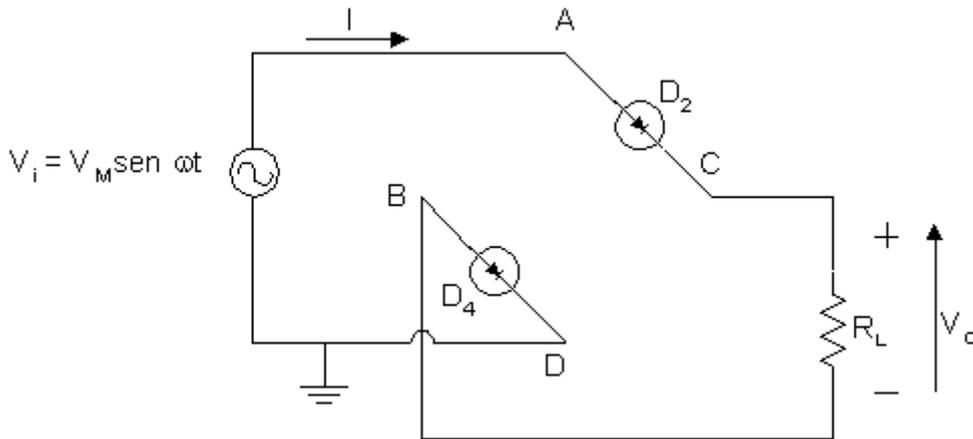


Figura 30: Rectificador de onda completa durante los semiciclos positivos.

Mediante un razonamiento análogo se consigue determinar el esquema equivalente mostrado en la Figura 31.

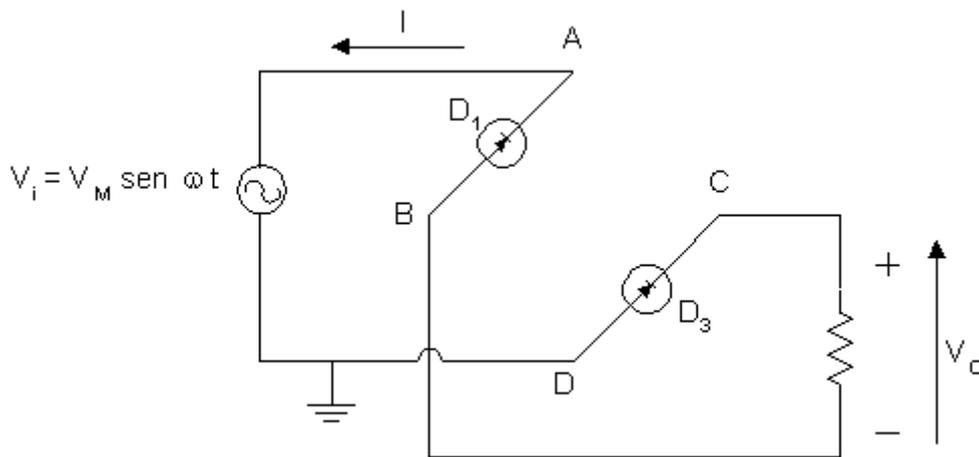


Figura 31: Rectificador de onda completa durante los semiciclos negativos.

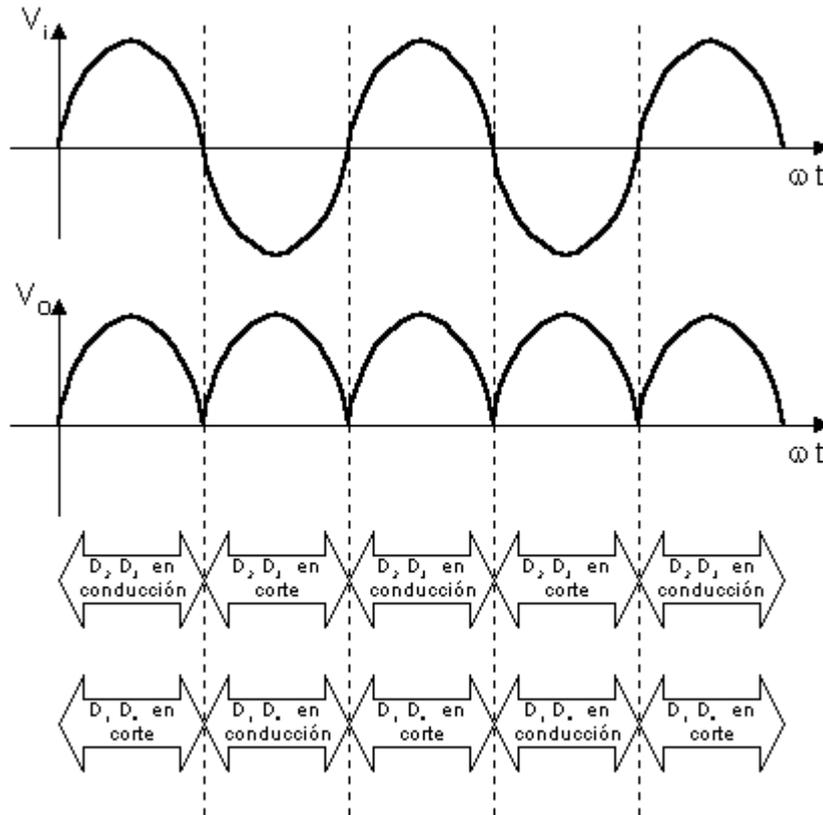


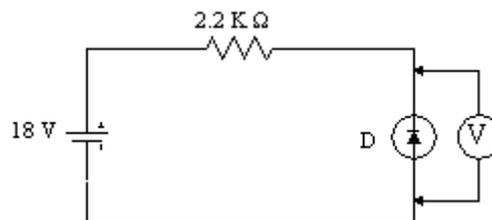
Figura 32: Tensiones en el rectificador de onda completa.

En ambos casos, la corriente que circula por R_L circula en el mismo sentido, luego la caída de tensión en R_L siempre es del mismo signo:

Si ahora se filtra esta señal mediante un condensador, mejoraría su rizado. El condensador necesario es de menor capacidad que en el esquema anterior, puesto que debe alimentar durante menos tiempo a la carga.

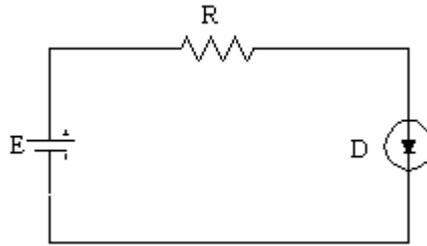
EJEMPLOS

1 Si se aplican 18 V al siguiente circuito, ¿qué tensión medirá el voltímetro si D_1 es de silicio?



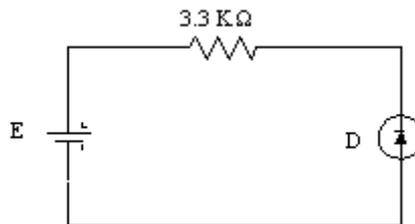
2 Si el diodo D del circuito del problema 3 puede soportar una corriente máxima de 500 mA, ¿cuál es el mínimo valor de la resistencia R con el que se puede utilizar el circuito si se aplican 20 V?

3 Si la resistencia R de la figura es de 100 y se aplican 10 V al circuito, ¿cuánto valdrá la potencia disipada en el diodo D?

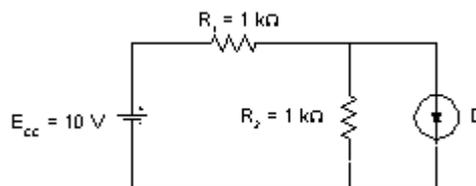


4 Si el diodo D de la figura del problema 5 tiene un pico inverso de voltaje (PIV) de 100 V, ¿cuánto es la tensión máxima que se puede aplicar al circuito?, ¿y si se conecta una resistencia en paralelo con el diodo $R_2=2.7 \text{ kW}$?

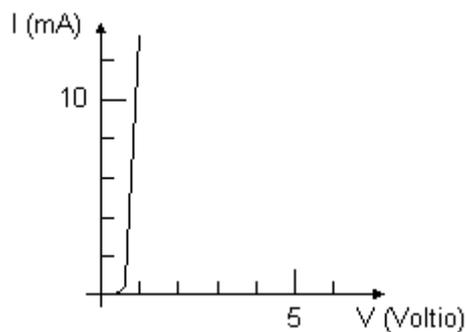
5 ¿Cuál será la potencia disipada en el diodo D de la figura si se aplican 60 V al circuito?, ¿y si se conecta una resistencia de 2.7 kW en paralelo con el diodo?



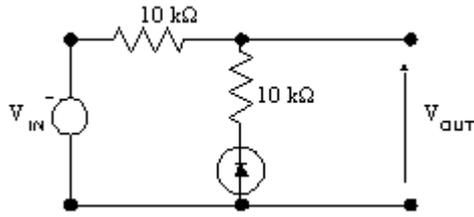
6 Calcular la corriente que atraviesa el diodo en el circuito de la figura, empleando el modelo lineal por tramos.



7 En el problema de la figura anterior, calcular la corriente que circula por el diodo mediante el método gráfico, tomando como característica V-I del diodo la curva que se presenta a continuación.

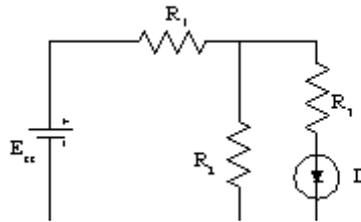


8 El generador del el circuito de la figura puede aportar una tensión comprendida entre -20 y +20 V. Se pide determinar las expresiones que permitan calcular V_{OUT} en función de V_{IN} dentro del rango indicado.



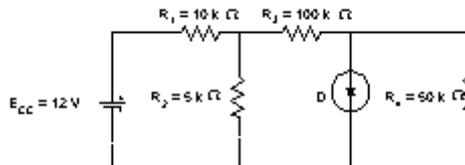
9 Calcular el punto de operación del diodo (corriente y tensión en el mismo) para $E_{CC}=10V$, $R_1= R_2= R_3=1k$.

- Aplicando el modelo lineal por tramos del diodo.
- Mediante un método gráfico.

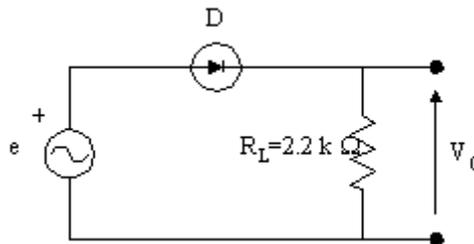


10 En el circuito de la figura adjunta se pide:

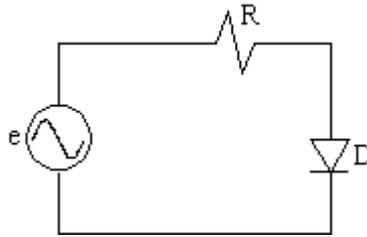
- Potencia suministrada por la fuente.
- Potencia disipada por cada una de las resistencias.
- Potencia disipada por el diodo.



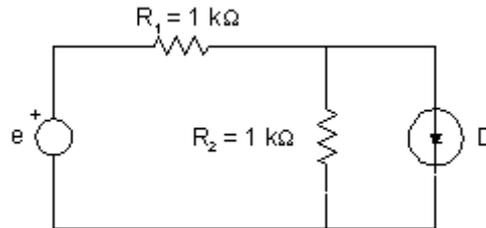
11 En el circuito de la figura representar las ondas de tensión y corriente de salida ($v_o(t)$, $i_o(t)$) del circuito de la figura, siendo $e(t)$ la tensión de red doméstica europea.



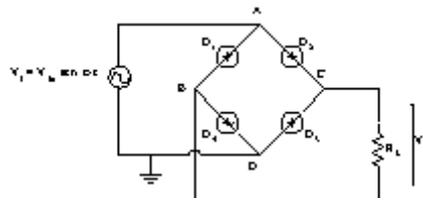
12 Si el generador de señal "e" de la figura produce una onda senoidal de 10 V entre pico y pico, y la resistencia R tiene un valor de 500 ohmios, ¿qué características debemos exigir a un diodo de silicio para utilizarlo como se indica en la figura?



13 Se quiere fabricar un circuito como el de la figura adjunta. ¿Qué características deberíamos exigir al diodo? ($e = 10 \sin t$)

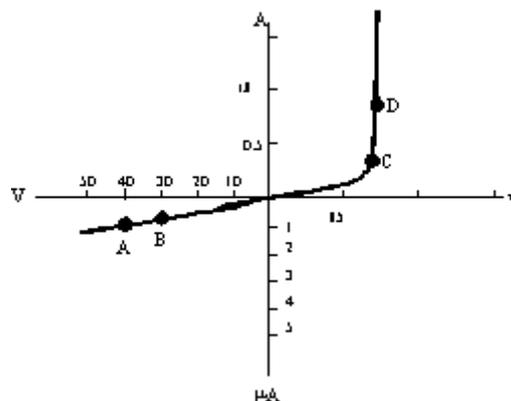


14 Calcular la tensión y la corriente en la resistencia R_L ($V_M = 10 \text{ V}$; $R_L = 2,2 \text{ k}$).



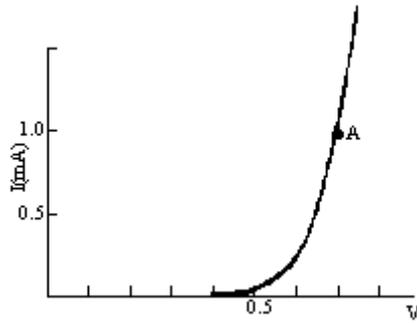
15 Deducir la expresión de la resistencia dinámica de un diodo partiendo del modelo exponencial del mismo. Si $V_T = 25 \text{ mV}$ para $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, comparar el resultado obtenido con la aproximación de Shockley.

16 Calcular la resistencia estática del diodo, cuya curva característica se incluye a continuación, en los puntos A, B, C y D de la curva. (Nota: Las escalas de los ejes x positivo y negativo son diferentes)

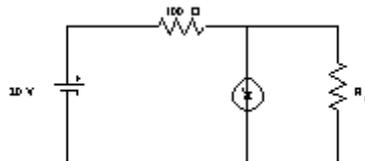


17 Calcular la resistencia dinámica del diodo del problema anterior en los cuatro puntos indicados. Comparar el método gráfico de cálculo con la aproximación de Shockley.

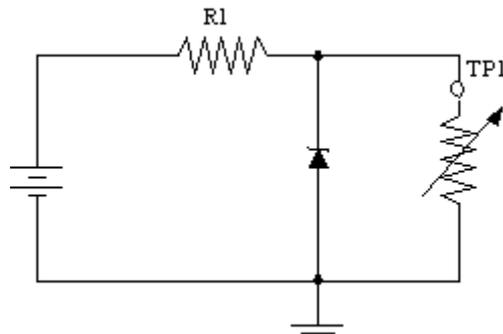
18 Hallar la resistencia estática y dinámica en el punto A de la figura.



19 Sea el circuito de la figura con $V_{ZC}=10\text{ V}$ e $I_{ZM}=0,05\text{ A}$. ¿Entre qué valores puede variar R_L manteniéndose alimentada a 10 V ?



20 Para una tensión de entrada de 28 V (DC), calcular la corriente en TP1 para el circuito de la figura. $R_1=1\text{ K}$, $R_L=1\text{ K}$, $V_z=9.6\text{ V}$.

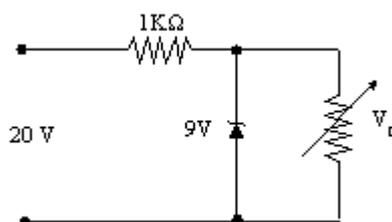


21 ¿Cuánta potencia será disipada por un diodo Zener de 9 V cuando le atraviesa una corriente de 100 mA en polarización directa?

¿Y si a ese mismo diodo le atraviesa la misma corriente en inversa?

22 En el siguiente circuito:

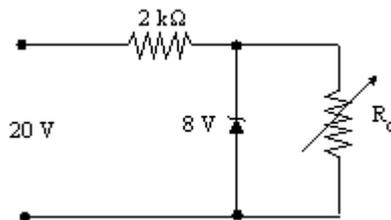
- Determinar la máxima corriente que se puede aplicar a la carga antes de que el Zener deje de regular la tensión.
- Si R_L es 1 k , hallar la corriente y la potencia disipada en el Zener, la corriente en la carga y V_o .
- Idem si R_L toma el valor 10 k .



23 Mediante la recta de carga hallar el punto de operación del zener del problema 20 para $R_z=400$, si se cambia el zener por otro que tenga $I_{zM}=0.1A$.

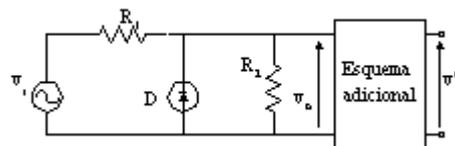
24 En el circuito de la figura,

- Determinar la máxima corriente que se puede aplicar a la carga R_c antes de que el Zener falle.
- Si R_c fuera 2 k, hallar la corriente del Zener y la corriente en la carga.
- Hallar la potencia que disipa el Zener en los casos en que R_c tome como valor 2 k.

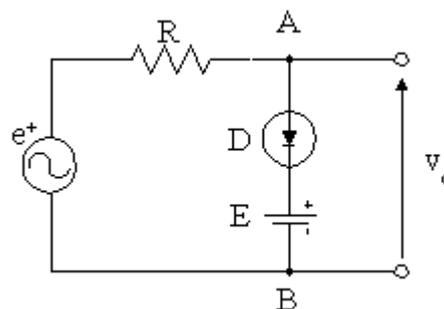


25 Para el circuito de la figura:

- Representar gráficamente la tensión de salida v_o si en la entrada se aplica una señal alterna $v_i = V \sin t$. (Para el diodo despreciar la caída de tensión en directa).
- Si $V = 200$ voltios, $R_1 = R_2 = 1 k$, determinar las características comerciales del diodo apropiado para esta aplicación.
- Si nos interesara disminuir el rizado de la onda v_o : ¿Qué esquema adicional podría añadirse a este?.



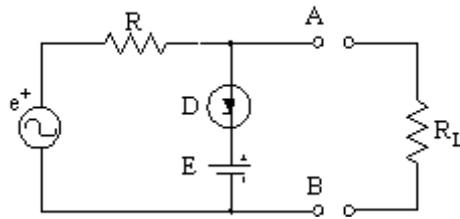
26 Dado el circuito siguiente:



- Hallar la tensión de salida del dispositivo, funcionando en vacío (sin carga en la salida). Despreciar la caída de tensión en el diodo.
- ¿Qué misión tiene la resistencia R?. ¿Se podría quitar?.
- Calcular las características comerciales del diodo D.
- Discutir la posibilidad de sustituir la rama AB por un diodo Zener. ¿Qué comportamiento tendrá entonces el dispositivo?. ¿Qué características debería tener este diodo para que no se deteriore?.

DATOS: $e = 500 \sin t$; $E = 100 V$; $R = 1 K$

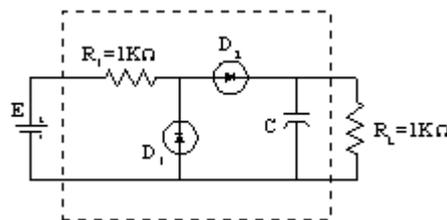
27 En el dispositivo de la figura:



¿Cuál es la situación más desfavorable para el diodo, el funcionamiento en vacío o con una carga resistiva colocada entre A y B?. (El valor de E es menor que e_{MAX}).

28 El circuito de la figura adjunta está preparado para rectificar ondas sinusoidales de 220 V de valor eficaz ($\sqrt{2} \cdot 220$ V de valor de pico). Debido a un error de manipulación, se conecta el dispositivo en carga a una tensión continua de 500 V. A los pocos segundos de dicha conexión se impregna el ambiente de un olor a plástico quemado, y el dispositivo deja de funcionar (no se reciben señales en la carga). ¿Sabrías decir qué componente/s se ha/n quemado y por qué?.

Datos adicionales: Potencia disipable máxima en las resistencias = 100 W.



29 Dado el circuito de la figura:

- Dibujar aproximadamente las formas de onda de las tensiones V_0 y V_0' para dos ciclos completos de la onda de entrada V_i .
- Características comerciales del diodo D_2 .
- ¿Podría ser C un condensador electrolítico?. Justificar la respuesta.

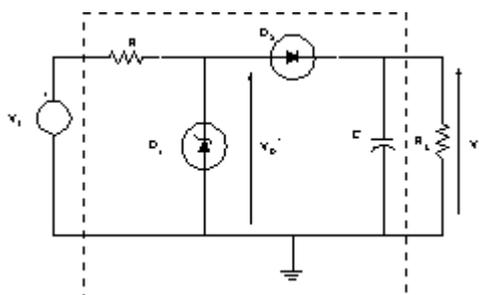
DATOS: $e = 200 \text{ sen}(100t)$ V. $R = 1 \text{ k}$

$V_Z = 50$ V.

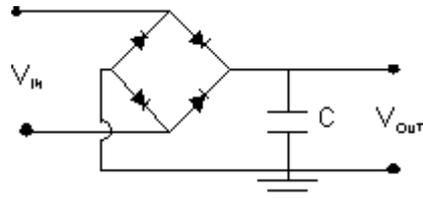
$R_L = 1 \text{ k}$

Despreciar las caídas de tensión en los diodos en conducción.

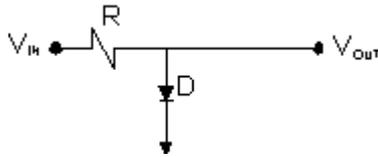
Considerar que la velocidad de descarga de C sobre R_L es pequeña comparada con la frecuencia de la red.



30 Diseñar un puente rectificador de onda completa que entregue 10V en tensión continua con un rizado menor de 0.1 V de pico a pico a una carga que requiere 10 mA. Elegir una adecuada tensión de entrada al circuito.



31 Se quiere proteger un circuito conectado a la salida V_{out} del circuito de la figura frente a posibles sobretensiones producidas por una señal de entrada V_{in} excesivamente fuerte.



Si se desea que V_{out} sea menor que 5V, cual debe ser la tensión a la que se conecta el diodo.

32 Diseñar con un diodo Zener una fuente de tensión regulada de 12V para corrientes entre 0 y 100mA. La tensión de entrada puede variar entre +20V y +25V. La corriente mínima que debe atravesar el Zener debe de ser de 10mA en las condiciones más desfavorables de trabajo.

¿Cual es la potencia disipada por el zener?