

## FUNDAMENTOS DE DIODOS

### El diodo ideal

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 ánodo (*a*) a cátodo (*k*).

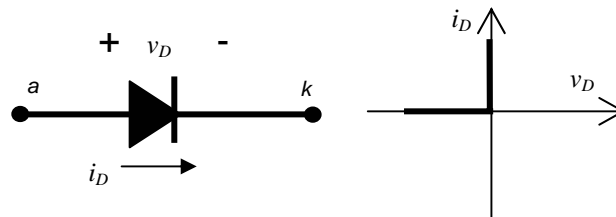


FIGURA 1: SÍMBOLO Y CURVA CARACTERÍSTICA TENSIÓN-CORRIENTE DEL DIODO IDEAL.

El diodo ideal es 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 de la figura 1 indica el sentido permitido de la corriente. En los circuitos de la figura 2 se ejemplifica el funcionamiento de un diodo ideal.

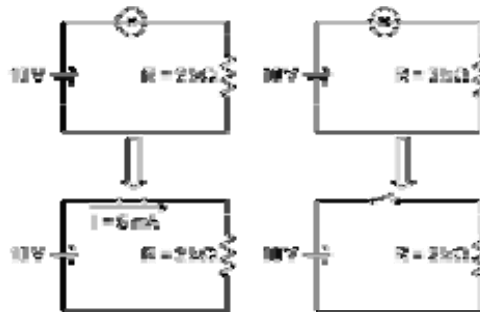


FIGURA 2: EJEMPLO DE FUNCIONAMIENTO DEL DIODO IDEAL.

En el circuito de la izquierda, el diodo permite la circulación de corriente, la corriente circula de ánodo a cátodo y el diodo se comporta como un interruptor cerrado, la corriente que circula por la resistencia es de 5 mA. 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 determinan la tensión inversa que soporta el diodo.

### La Juntura PN

Si se divide un monocristal de silicio puro en dos zonas cuya frontera queda definida por un plano, una zona se dopa con impurezas de tipo P y la otra de tipo N (figura 3). 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 (portadores minoritarios), aunque en una concentración varios órdenes de magnitud inferior que la de los portadores mayoritarios.

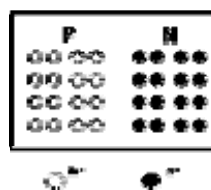


FIGURA 3: IMPURIFICACIÓN DEL SILICIO PARA LA OBTENCIÓN DE DIODOS PN

Dado que en cada zona la carga total es neutra, por cada electrón hay un ion positivo, y por cada hueco un ion negativo, no existen distribuciones de carga neta ni campos eléctricos internos. Al crear dos zonas de diferente concentración de portadores, entra en juego el mecanismo de la difusión que 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 que electrones de la zona N pasan a la zona P y huecos de la zona P pasan a la zona N. Este movimiento de portadores de carga tiene un doble efecto. En la zona P cercana a la unión, 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, el pasaje de un 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 tal como se muestra en la figura 4. La distribución de cargas formada en la región de la unión provoca un campo eléctrico desde la zona N a la zona P.

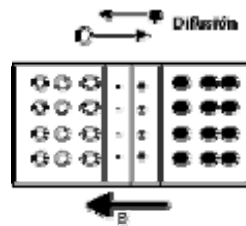


FIGURA 4: FORMACIÓN DE LA UNIÓN PN

El 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 una zona semiconductor tipo P con una resistencia  $R_P$ , una zona semiconductor tipo N con una resistencia  $R_N$ , y una zona de agotamiento (depleción) que no es conductora, puesto que no posee portadores de carga libres. En ella actúa un campo eléctrico, o sea que existe una barrera de potencial. Este proceso sucede instantáneamente en el momento en el que se generan las zonas N y P, y no necesita de ningún aporte de energía, excepto el de la agitación térmica.

### Polarización directa

El bloque PN descrito en el apartado anterior en principio no permite el establecimiento de una corriente eléctrica entre sus terminales puesto que la zona de agotamiento no es conductora. 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 agotamiento (Figura 5a). Sin embargo, mientras ésta exista la conducción es casi nula. Si la tensión aplicada supera a la de barrera, desaparece la zona de agotamiento, electrones y huecos se dirigen a la unión y se recombinan, la corriente es determinada por el circuito externo ya que la tensión en bornes de la juntura permanece prácticamente constante. (Figura 5b):

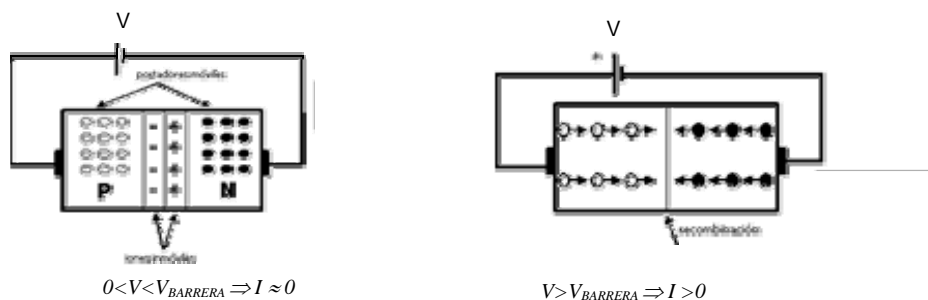


FIGURA 5: (a) DIODO PN DURANTE LA APLICACIÓN DE UNA TENSIÓN INFERIOR A LA DE BARRERA  
(b) DIODO PN BAJO LA ACCIÓN DE UNA TENSIÓN MAYOR QUE LA DE BARRERA

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. Cuando la tensión aplicada vence la barrera de potencial los portadores de carga comienzan a moverse y la zona de agotamiento se inunda de cargas móviles.

### Polarización inversa

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 agotamiento o depleción, y la corriente debido a los portadores mayoritarios es nula (Figura 6). 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.

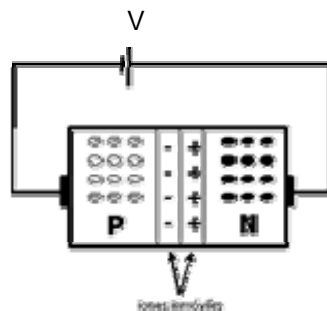


FIGURA 6: DIODO PN POLARIZADO EN INVERSA

Al aumentar la tensión inversa, llega un momento en que se produce la ruptura de la zona de depleción, 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. Esta ruptura, no necesariamente conlleva la destrucción de la juntura, mientras la potencia disipada se mantenga en niveles admisibles.

### DIODO DE UNIÓN PN

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 7 se presenta el esquema de los dos tipos de diodos que se fabrican comúnmente, el diodo vertical y el plano.

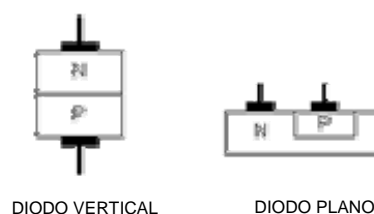


FIGURA 7: ESQUEMAS DE DIODOS DE UNIÓN PN

El comportamiento de un diodo real presenta algunas desviaciones con respecto al del diodo ideal.

### Característica tensión-corriente

La Figura 8 muestra la característica V-I (tensión-corriente) típica de un diodo real.

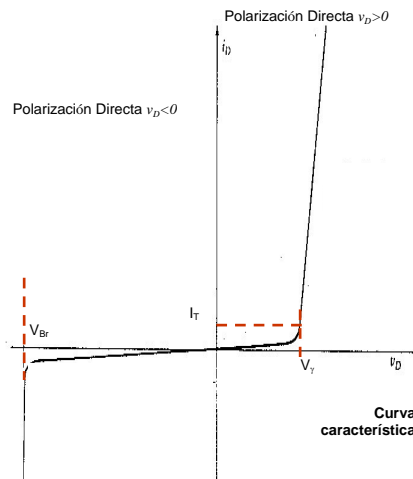


FIGURA 8: CARACTERÍSTICA V-I DE UN DIODO DE UNIÓN PN.

En la gráfica se aprecian claramente diferenciadas las diversas regiones de funcionamiento. En polarización directa (PD,  $v_D > 0$ ), se diferencian dos zonas de funcionamiento, si la tensión aplicada no supera la barrera de potencial ( $V_\gamma$ ), la corriente que circula es muy pequeña y podría considerarse nula, si bien va creciendo gradualmente. Cuando se va alcanzando la tensión de la barrera de potencial, la resistencia que ofrece el componente al paso de la corriente disminuye progresivamente, hasta que al alcanzar esa tensión queda limitada sólo por las resistencias intrínsecas de las zonas P y N y la intensidad de corriente que circula por la unión aumenta rápidamente. En el caso de los diodos de silicio,  $V_\gamma$  se sitúa entre los 0,6V y 0,7V, en los de germanio en el orden de los 0,2V y en los de arseniuro de galio alrededor del V. En la gráfica se identifica el punto de trabajo de plena conducción para el cual el fabricante realiza el ensayo y brinda los datos de la corriente de test ( $I_T$ ) para la cual mide la tensión que definimos como umbral ( $V_\gamma$ ). Normalmente esta corriente está en el orden del 10% de la corriente que circularía cuando el diodo disipase la máxima potencia permitida.

$$I_{MAX} \approx \frac{P_{MAX}}{V_\gamma} \quad I_T \approx 0,1 I_{MAX}$$

En polarización inversa, tensiones menores de 0 Voltios, la corriente es prácticamente nula (mucho menor que la que se obtiene para los mismos niveles de tensión que en directa, ya que los responsables de esta conducción son los portadores minoritarios) hasta llegar a la ruptura en la avalancha, en la que la corriente aumenta en forma abrupta.

En la Figura 9 se representan esquemáticamente las diferencias entre los comportamientos del diodo de unión PN y el diodo ideal.

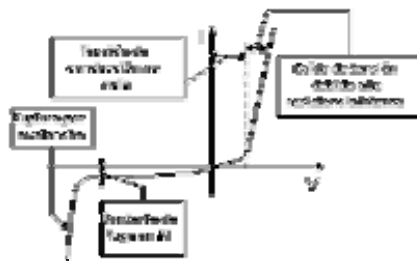


FIGURA 9: DIFERENCIAS ENTRE EL COMPORTAMIENTO DEL DIODO DE UNIÓN PN Y DEL DIODO IDEAL

### 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. Potencia máxima que puede disipar.
2. 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 ( $I_{FP}$ , Peak forward surge current), en la que se especifica también el tiempo que dura el pico, Corriente de pico repetitivo ( $I_{RFP}$ , Recurrent peak forward current), en la que se especifica la frecuencia máxima del pico.
3. Tensión de ruptura en polarización inversa (VIP, Breakdown Voltage, BV; Peak Inverse Voltage, PIV). Es la tensión a la que se produce el fenómeno de ruptura por avalancha.
4. Tensión máxima de trabajo en inversa (Maximum Working Inverse Voltage): Es la tensión que el fabricante recomienda no sobrepasar para una operación en inversa segura. (figura 5).
5. Corriente en inversa ( $I_R$ , reverse current): Es habitual que se exprese para diferentes valores de la tensión inversa.
6. Caída de tensión en PD, ( $V_\gamma$ , o VF, Forward Voltage): Pese a que se ha señalado anteriormente los 0.7V como valor típico, en ocasiones los fabricantes aportan datos detallados de esta caída de tensión, mediante la gráfica I-V del dispositivo.

Además, los fabricantes pueden suministrar datos adicionales acerca del comportamiento del dispositivo para otras temperaturas diferentes a la nominal.

### 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.

#### Modelos para señales continuas

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

#### Modelo del diodo real

La expresión  $I = I_o (e^{v_D/\eta V_T} - 1)$  aproxima satisfactoriamente el comportamiento del diodo real.

En esta expresión,  $I_o$ , es la corriente inversa de saturación del diodo que depende de la estructura, del material, del dopado y fuertemente de la temperatura.  $\eta$ , es el factor de idealidad cuyo valor, que depende de las dimensiones del diodo, del material semiconductor, de la magnitud de la corriente  $I_o$  y de la potencia que disipa, está entre 1 y 2.  $V_T$ , es el potencial térmico del diodo que a temperatura ambiente ( $T=25^\circ\text{C}$ ) tiene un valor de 25.71mV. Es función de la constante de Boltzmann ( $K=1,38 \cdot 10^{-23} \text{J/}^\circ\text{K}$ ), la carga del electrón ( $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$ ) y la temperatura absoluta del diodo  $T[^\circ\text{K}]$ , según la siguiente expresión:

$$V_T = \frac{K}{q} T$$

La representación gráfica de este modelo se muestra en la Figura 10. 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. 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 utilizar un modelo complejo, por lo cual se utiliza el modelo básico para obtener soluciones de modo más simple.

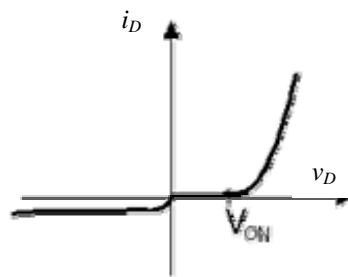


FIGURA 11: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL MODELO DEL DIODO REAL.

### Modelo ideal del diodo de unión PN

El modelo ideal del diodo de unión PN se obtiene asumiendo que el factor de idealidad es unitario,  $\eta=1$ , suponiendo 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.

$$I = I_o \left( e^{v_D/V_T} - 1 \right)$$

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

### 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 la corriente a través de la unión es nula cuando la tensión en el diodo no alcanza el potencial de la barrera ( $v_D \leq V_\gamma$ ), mientras que, para tensiones mayores en directa, la caída de tensión en la unión PN ( $v_D = V_\gamma$ ) es constante e independiente de la intensidad que circule por el diodo.

Si se considera un diodo de unión PN de silicio con una  $I_o=85\text{fA}$  a una temperatura ambiente de  $T=25^\circ\text{C}$ , y en consecuencia, el potencial térmico  $V_T=25.7\text{mV}$ , es posible calcular el valor de  $V_\gamma$  o  $V_{ON}$  tomando como variable independiente la intensidad  $i$  en la ecuación ideal del diodo:

$$v_d = V_T \ln \left( \frac{i}{I_o} + 1 \right)$$

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  $1 \text{ mA} \leq i \leq 1 \text{ A}$  se tienen tensiones en el diodo entre  $0,6\text{V}$  y  $0,77\text{V}$ . Como se puede apreciar, mientras que la corriente ha variado 1000 veces, la tensión apenas ha experimentado un cambio de  $200 \text{ mV}$ , por lo que es posible aproximar la caída de tensión en la unión PN a un valor constante de  $0,6\text{V}$  o  $0,7 \text{ V}$ .

Con estas simplificaciones se divide el modelo en dos tramos lineales denominados corte y conducción, cada uno de los cuales responde a diferentes condiciones: el diodo queda convertido en un componente biestado.

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

Corte:  $v_D < V_\gamma \Rightarrow i_D = 0$

Conducción:  $v_D \equiv V_\gamma \Rightarrow i_D > 0$

La figura 11 muestra la curva característica  $V$ - $I$  del modelo lineal y quedan reflejados los dos posibles estados del diodo: "On" o *Conducción*, donde la tensión es  $V_\gamma$  para cualquier valor de la corriente, "Off" o *Corte*, donde la corriente es nula para cualquier valor de tensión menor que  $V_\gamma$ .

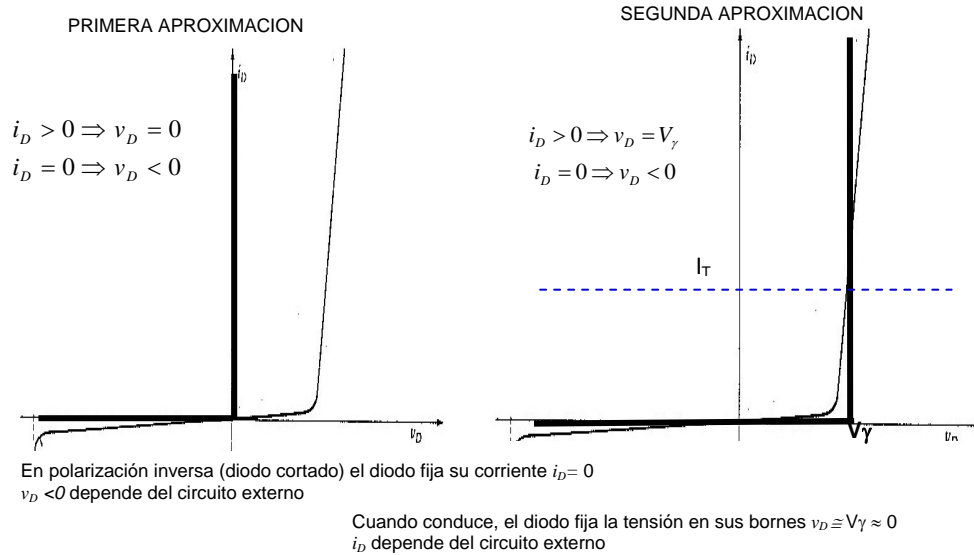


FIGURA 11: MODELO LINEAL POR TRAMOS DEL DIODO.

### Modelo para pequeñas señales de alterna

Hay aplicaciones en las que el diodo se polariza con una tensión continua en un punto de trabajo en la zona de conducción, y sobre ese punto se superpone una señal alterna de amplitud tal que no provoca un cambio en la zona de funcionamiento del diodo (figura 12), o sea el diodo permanece en la zona de conducción.

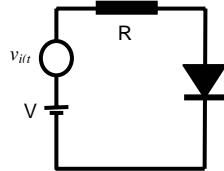


FIGURA 12: DIODO POLARIZADO CON UNA SEÑAL ALTERNA SUPERPUESTA

En la figura 13 se representa gráficamente el funcionamiento del diodo.

La tensión en el diodo está dada por:  $v_D = V_{DQ} + v_{d(t)}$ , la corriente que lo atraviesa puede calcularse aplicando cualquiera de los modelos anteriores.

Si se utiliza el modelo exponencial ideal:  $i_D = I_o e^{(V_{DQ} + v_{d(t)})/V_T}$ . Suponiendo conocida la amplitud de las oscilaciones de la tensión sobre el diodo ( $v_i$ ) la amplitud de las oscilaciones de la corriente ( $i_d$ ) queda dada por:

$$\Delta i_D = I_o \left( e^{\left( V_{DQ} + \frac{\Delta v_D}{2} \right) / V_T} - e^{\left( V_{DQ} - \frac{\Delta v_D}{2} \right) / V_T} \right)$$

El cálculo resulta complicado, e incluso es posible que no se pueda obtener una solución analítica.

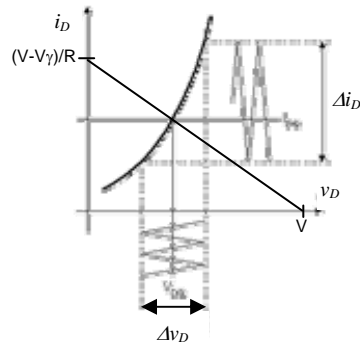


FIGURA 13: TENSIÓN Y CORRIENTE EN UN DIODO POLARIZADO CON UNA SEÑAL ALTERNA SUPERPUESTA

Para obtener una solución 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 una recta cuya pendiente es la de la tangente en el punto de operación, según se muestra en la Figura 14.

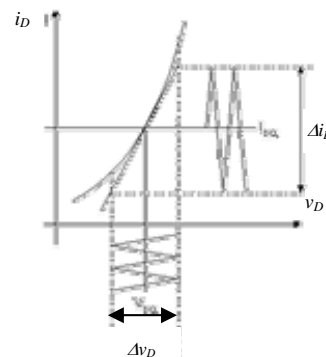


FIGURA 14: APROXIMACIÓN DE LA CARACTERÍSTICA DEL DIODO POR LA TANGENTE EN EL PUNTO DE OPERACIÓN

Teniendo en cuenta esta aproximación, la relación entre los incrementos de tensión y de

corriente pueden relacionarse por:  $\Delta v_D = \left[ \frac{dv_D}{di_D} \right]_Q \Delta i_D$

Esta aproximación será tanto más cierta cuanto menores sean las variaciones. La derivada de la tensión con respecto a la corriente en el punto de operación se la identifica como la resistencia dinámica del diodo  $r_D$ , y su expresión puede determinarse a partir del modelo exponencial del diodo, teniendo en cuenta que si el diodo está en la zona de conducción,  $V_{DQ}$  es lo suficientemente mayor que  $V_T$  y puede despreciarse la unidad frente al término exponencial:

$$i_D = I_o \left( e^{v_D/V_T} - 1 \right) \approx I_o e^{v_D/V_T} \quad \Rightarrow \quad r_d = \left[ \frac{\partial v_D}{\partial i_D} \right]_Q \approx \frac{V_T}{I_{DQ}}$$

Como  $V_T$  es aproximadamente 25 mV, la expresión válida para el cálculo de la resistencia dinámica de un diodo en función de la corriente de polarización continua puede calcularse mediante la aproximación de Shockley:

$$r_d \approx \frac{25mV}{I_{DQ}}$$

Recordar que este cálculo aproximado sólo es válido en la región de conducción en polarización directa.



## APLICACIÓN DE LOS MODELOS AL ANÁLISIS DE CIRCUITOS

A continuación se detallan algunos métodos válidos para el análisis de circuitos con diodos, basándose en los modelos expuestos en el apartado anterior, suponiendo que se dispone de un circuito como el de la figura 15.

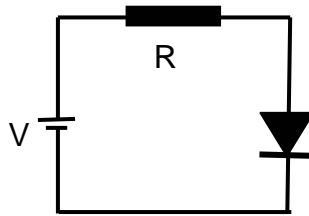


FIGURA 15: DIODO POLARIZADO

### Modelo exponencial

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 para:
  1. Obtener la expresión que relaciona  $v_D$  con  $i_D$
  2. La ecuación del modelo exponencial del diodo proporciona otra relación entre  $v_D$  e  $i_D$
  3. Se resuelve el sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas.

### Modelo lineal por tramos

Se parte de que el diodo está en conducción, se sustituye el diodo por el modelo (una fuente de tensión de valor  $V_\gamma$  que se opone a la circulación de corriente) y se calculan las tensiones y corrientes del circuito. 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 (la corriente debe circular en el sentido que corresponde a la fuente  $V$ ). 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.

### Método gráfico

El procedimiento para el cálculo sería:

1. Determinar la expresión de la recta de carga calculando el circuito equivalente de Thevenin que ve el diodo.
2. Dibujar la recta de carga correspondiente al circuito Thevenin calculado superpuesta al gráfico de la curva característica del diodo.
3. Hallar el punto de intersección de ambas curvas

### 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), partiendo de la hipótesis de que el diodo estará en una de la zonas de funcionamiento y no sale de la misma por efecto de la señal de alterna.

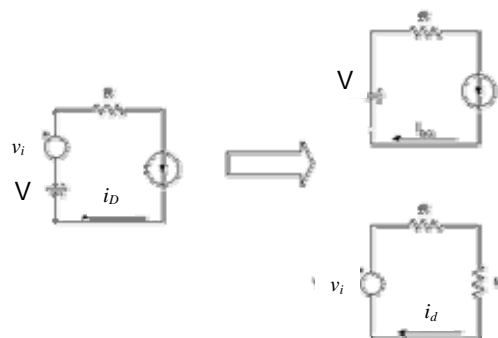


FIGURA 16: ANÁLISIS DEL CIRCUITO POR SUPERPOSICION

1. Análisis DC del circuito: Se cortocircuitan las fuentes de alterna y se determina el punto de operación del diodo.
2. Si el diodo está en conducción, se determina la resistencia dinámica del diodo utilizando los datos del punto de trabajo.
3. Se cortocircuitan las fuentes de continua y se realiza el análisis del circuito de alterna sustituyendo el diodo por su resistencia dinámica. De ese modo se obtiene el modelo equivalente en pequeña señal que permite determinar las variaciones que se producen en el diodo.

## DIODOS ZENER

El diodo zener es básicamente un diodo común que se diseña para aprovechar la tensión inversa de ruptura, con una curva característica brusca o afilada. Esto se consigue fundamentalmente 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 curva característica de un diodo zener no se diferencia mucho de la del diodo ideal, como puede verse en la figura 17. 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 en el valor de su tensión zener,  $V_Z$ . Sus aplicaciones básicas son como regulador de tensión o bien como recortador.

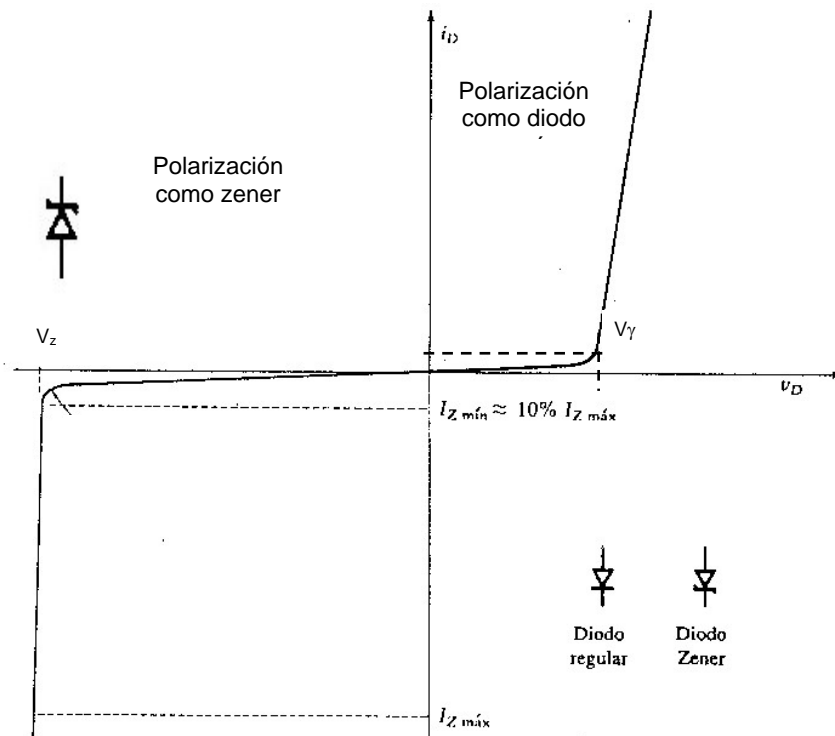


FIGURA 17: CARACTERÍSTICA V-I DE UN DIODO ZENER.

Los parámetros comerciales del diodo zener son los mismos que los de un diodo normal, salvo que se identifica la tensión de zener,  $V_Z$ , y no una tensión de pico inverso.

El diodo 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), y conducción en polarización inversa donde mantiene constante la tensión en su valor de tensión de zener ( $V_Z$ ) con una corriente entre 0 y la corriente máxima que corresponde a la máxima potencia que puede disipar.

## EJEMPLO DE APLICACIÓN DEL DIODO: RECTIFICACIÓN

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.

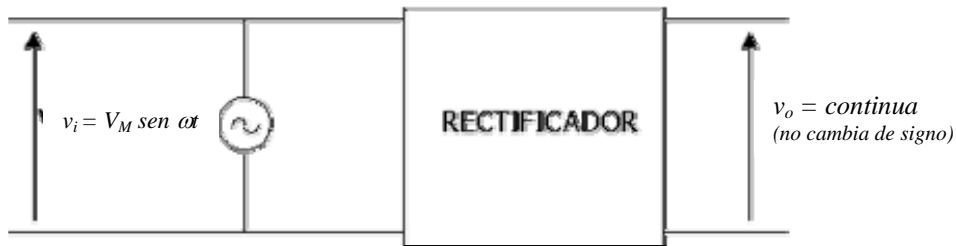


FIGURA 18: ESQUEMA GENERAL DEL PROCESO DE RECTIFICACIÓN.

El rectificador es un aparato muy utilizado. En general, llevan incorporado en primer lugar un transformador de tensión. El transformador permite obtener a partir de tensión de la red (220V eficaces) una tensión del valor deseado. Una vez reducida la tensión, el rectificador convierte la tensión alterna en continua. Para los análisis, en la salida del circuito rectificador se coloca una resistencia de carga ( $R_L$ ), ya que todo aquello que vaya a ser alimentado por este circuito puede reducirse a una simple resistencia de carga mediante su circuito equivalente de Thevenin. Un rectificador funciona en vacío cuando no se le conecta ninguna carga, es decir, cuando la  $R_L$  no está unida al circuito. En caso contrario funciona en carga.

El esquema de la Figura 19 es el más sencillo de los rectificadores: el rectificador de media onda.

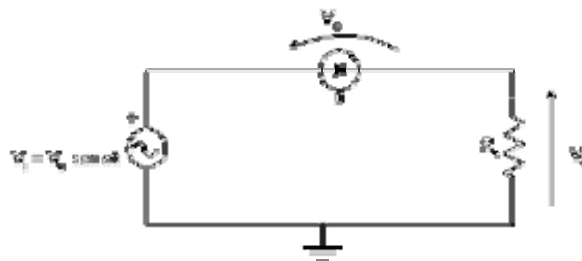


FIGURA 19: ESQUEMA DE UN RECTIFICADOR DE MEDIA ONDA.

Cuando el valor de la tensión de entrada es superior a la de conducción del diodo se crea una corriente, y se cumple que la tensión sobre la carga esta dada por:  $v_L = v_i - V_\gamma$ .

Si se desprecia  $V_\gamma$ , cuando la tensión de entrada sea mayor que cero,  $v_L = v_i$ . Si la tensión de entrada es negativa,  $v_i < 0$ , el diodo esta en cortado y no circulara corriente por lo cual la caída de potencial en  $R_L$  será nula ( $v_L = 0$ ). (figura 20).

Como se puede apreciar, la tensión de salida  $v_L$  no tiene un valor constante en el tiempo (no responde a lo que en electrónica interpretamos como continua, pero lo es en el sentido matemático pues no cambia su signo (polaridad). Aunque no es constante, siempre es mayor que cero, y su valor medio es diferente de cero. Con circuitos 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 o ripple de la onda de salida que se define como el valor eficaz de las componentes de alterna de la salida sobre el valor medio de la misma, y en este caso queda determinado por:

$$F_r = \frac{V_{efca}}{V_{med}}$$

En este caso, el rizado es casi del 100%. Para disminuir el rizado, se recurre a agregar un filtro a capacitor.

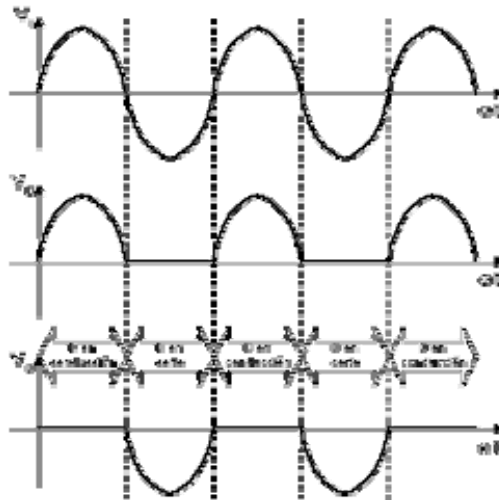


FIGURA 20: TENSIONES EN EL CIRCUITO DE LA FIGURA 19.

### Rectificador de media onda con filtro capacitivo

El condensador o capacitor 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 21 se presenta el esquema eléctrico que aplica este principio a la rectificación. Lo que se pretende es que sea el capacitor el que alimente a la carga cuando no pueda hacerlo la fuente de alimentación.

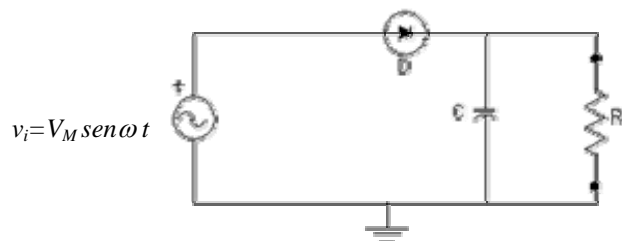


FIGURA 21: ESQUEMA DE RECTIFICADOR CON CAPACITOR.

Primero se analizará el **funcionamiento en vacío**, es decir, sin carga (figura 22).

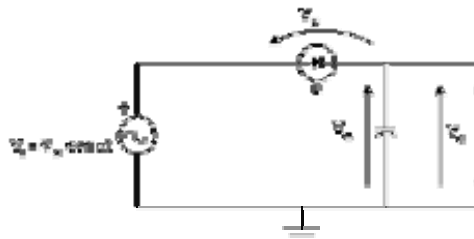


FIGURA 22: FUNCIONAMIENTO EN VACÍO.

Sea  $v_i = V_M \sin \omega t$ , y considerando la caída de tensión en el diodo en conducción despreciable, en el instante inicial el condensador se encuentra descargado. Cuando  $\omega t$  está entre  $0$  y  $\pi/2$ , el diodo está polarizado en directa y por él circula una corriente que carga al capacitor. El capacitor sigue a la tensión de entrada.

Cuando la tensión de entrada empieza a decrecer el condensador, cargado con una diferencia de potencial  $V_C = V_M$  no puede entregar la energía que almaceno pues el circuito está en vacío y la corriente no puede circular dado que el diodo está en inversa para ese sentido de

circulación, C no puede descargarse y mantiene fija la tensión en  $V_M$ , y el diodo permanece cortado, y la tensión en la salida es constante. La figura 23 muestra las formas de onda.

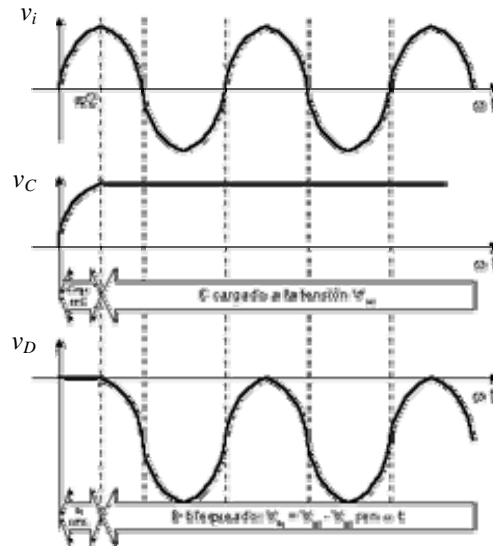


FIGURA 23: TENSIONES EN EL CIRCUITO DE LA FIGURA 22.

Para el análisis del **funcionamiento en carga** se recurre al circuito de la figura 24, en el cual se ha agregado una carga ( $R_L$ ) al rectificador con filtro capacitivo.

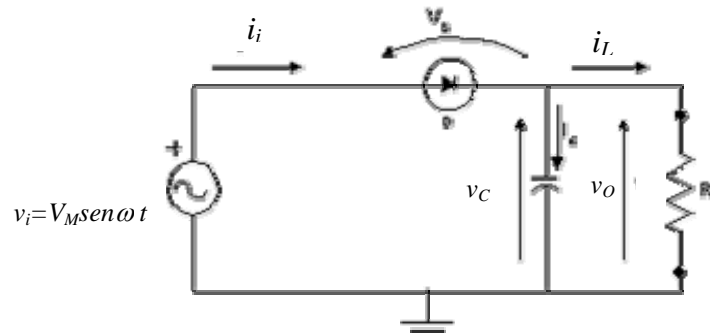


FIGURA 24: DISPOSITIVO EN CARGA.

Cuando el diodo conduce, una parte de la corriente que lo circula carga al capacitor y otra circula por la resistencia de carga. La corriente que circula por  $R_L$ , y si se considera el diodo

ideal resulta:  $i_L = \frac{v_i}{R_L} = \frac{V_M \sin \omega t}{R_L}$ , y la corriente que circula por el condensador tendrá forma

senoidal con un desfase de noventa grados respecto a la entrada  $\Rightarrow i_C = \frac{v_i}{X_C} = \omega C V_M \cos \omega t$

Cuando  $\omega t > \pi/2$ , la tensión de entrada comienza a disminuir y el capacitor comienza a entregar la energía almacenada a la carga intentando seguir el decrecimiento de la alimentación, la corriente por el diodo comienza a disminuir, y en el instante en que esa corriente se hace cero el diodo se corta y el capacitor se sigue descargando sobre la carga con una ley exponencial determinada por la constante  $R_L C$ . Si su descarga sobre ella es lo suficientemente lenta (decrece a un ritmo menor que la senoide de entrada, el diodo queda contratensionado y permanece cortado y la carga recibe potencia durante todo el período de la senoide).

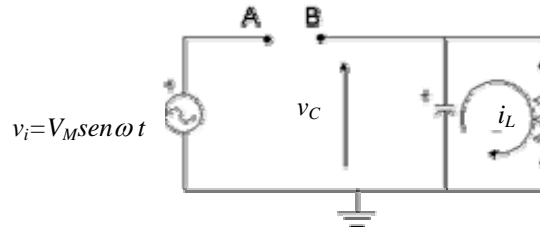


FIGURA 25: DESCARGA DE C A TRAVÉS DE RL.

El condensador va perdiendo su carga y el diodo permanece cortado. Cuando la tensión de entrada comienza a crecer nuevamente, llega un momento en que alcanza el valor de la tensión decreciente del capacitor y el diodo entra en conducción nuevamente volviéndose a repetir la secuencia. En la figura 26 se muestran las formas de onda para el caso en que la constante de tiempo de descarga del capacitor es mucho mayor que el semiperiodo de la senoidal ( $\tau = R_L C \gg T/2 = \pi/\omega$ ).

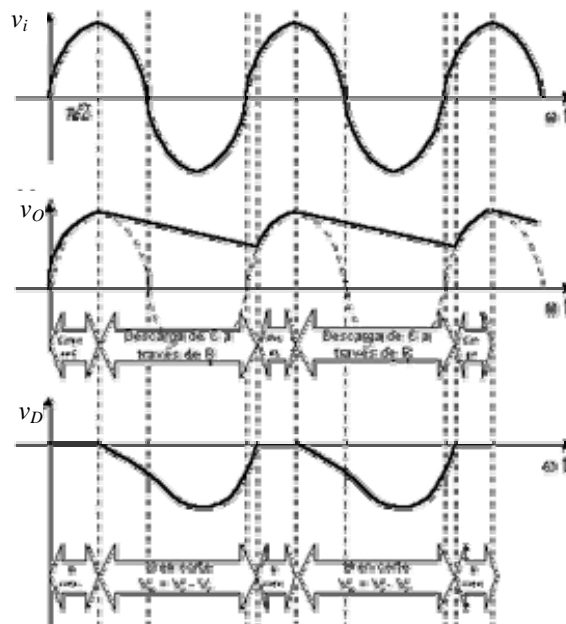


FIGURA 26: TENSIONES EN EL RECTIFICADOR CON FILTRO CAPACITIVO Y CARGA.

Tal como se aprecia en la figura 26, 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, el tiempo de conducción del diodo disminuye y las condiciones de funcionamiento del circuito son más exigidas ya que aumenta el pico de corriente repetitivo por el diodo, y en consecuencia la potencia instantánea que disipa.

### Selección de los componentes

#### Diodo.

- Corriente de pico no repetitivo,  $I_{FMAX}$ .
- Corriente de pico repetitivo,  $I_{FPR}$
- Corriente media,  $I_O$
- Tensión máxima en inversa, VIP. En el caso del rectificador con filtro  $VIP=2VM$

### 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:

$$C \approx \frac{I_o t_c}{V_{\text{rizado}}}$$

donde  $t_c$ : tiempo de descarga del condensador,  $V_{\text{rizado}}$ : diferencia entre la tensión máxima y mínima admisible.

### Rectificador de onda completa

Si bien el esquema anterior produce una onda de salida bastante aceptable, se desaprovecha medio ciclo de la red, con lo que la potencia transmitida a la carga se limita. En el circuito de la figura 27, puente de diodos, se consigue que la carga reciba potencia de la entrada en el semiciclo negativo y permite obtener un menor rizado sobre la carga.

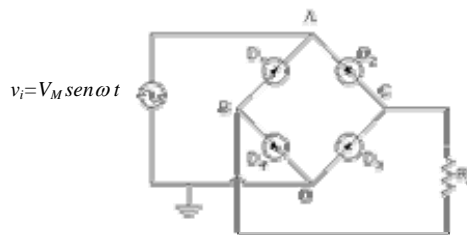


FIGURA 27: RECTIFICADOR DE ONDA COMPLETA.

Dado un valor positivo de la tensión de entrada,  $v_i = V > 0$ . El punto A está sometido al mayor potencial del circuito 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. Los diodos  $D_2$  y  $D_4$  conducen, mientras que  $D_1$  y  $D_3$  están inversamente polarizados. La corriente circula por  $R_L$  de C a D. En la figura 28 se muestra el circuito equivalente en este semiciclo.

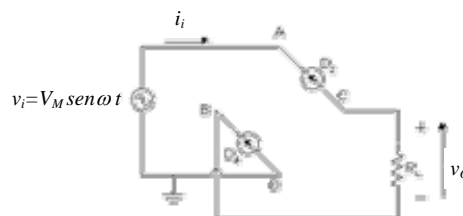


FIGURA 28: RECTIFICADOR DE ONDA COMPLETA DURANTE LOS SEMICICLOS POSITIVOS.

Mediante un razonamiento análogo se determina el esquema equivalente mostrado en la Figura 29 para el semiciclo negativo de la entrada. Conducen  $D_1$  y  $D_3$  mientras que  $D_2$  y  $D_4$  están cortados. La corriente circula por la carga en el mismo sentido que antes (de C a D).

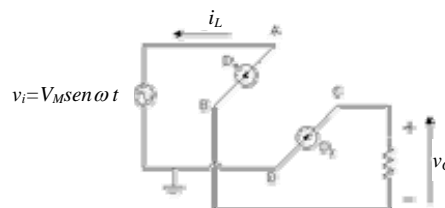


FIGURA 29: RECTIFICADOR DE ONDA COMPLETA DURANTE LOS SEMICICLOS NEGATIVOS.

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

El rizado resulta la mitad del obtenido en el rectificador de media onda (figura 30). Si ahora se filtrase esta señal mediante un condensador, mejoraría el rizado y el condensador necesario es de menor capacidad que en el circuito de media onda, puesto que debe alimentar durante menos tiempo a la carga.

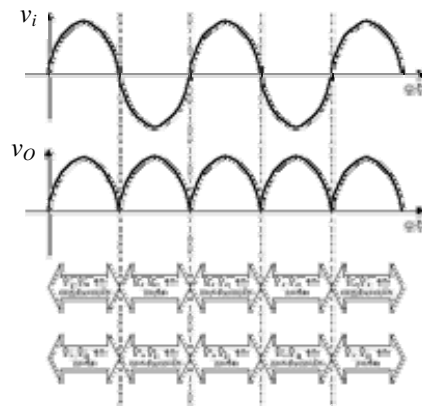


FIGURA 30: TENSIONES EN EL RECTIFICADOR DE ONDA COMPLETA.