

ANÁLISIS Y DISEÑO DE CIRCUITOS CON DIODOS

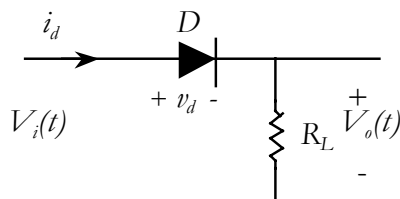
RESUMEN

Se plantean las bases lógicas para analizar circuitos con diodos. Para simplificar el trabajo, el diodo semiconductor (SC) es reemplazado por modelos adecuados, cada uno claramente definido. Dominada la base conceptual, se analizará lo que respecta al diseño de circuitos simples, tales como: Filtros para rectificadores, reguladores de tensión y limitadores de señal entre otros.

CARACTERÍSTICAS Y MODELOS

DIODO REAL

El siguiente circuito, utiliza un diodo SC. La problemática consiste en determinar la tensión y corriente sobre el dispositivo.



CAPITULO I: Análisis y Diseño de Circuitos con Diodos

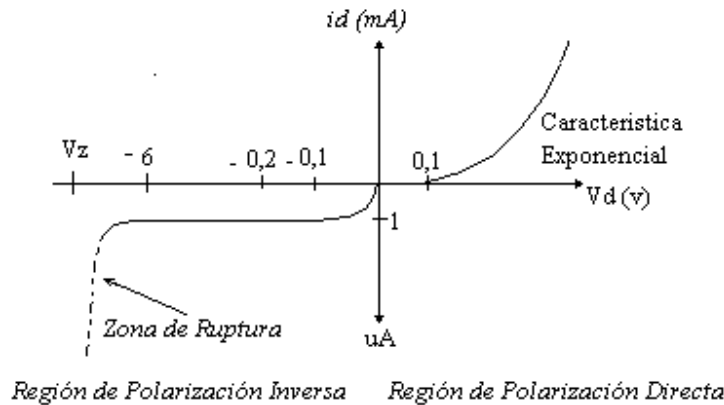
Los fundamentos teóricos nos indican que la corriente por el dispositivo, es:

$$i_d = I_o \left(e^{\frac{V_d}{\eta V_T}} - 1 \right) \quad (1)$$

Donde:

η Constante de fabricación
 Si=1, Ge=2
 V_T Tensión por efecto térmico
 I_o Corriente de saturación inversa

La representación gráfica de la ecuación, resulta ser¹:



Analizando el circuito:

$$V_i(t) = V_d + V_o(t)$$

como

$$V_o(t) = R_L I_d$$

Entonces

$$V_i(t) = V_d + R_L I_d$$

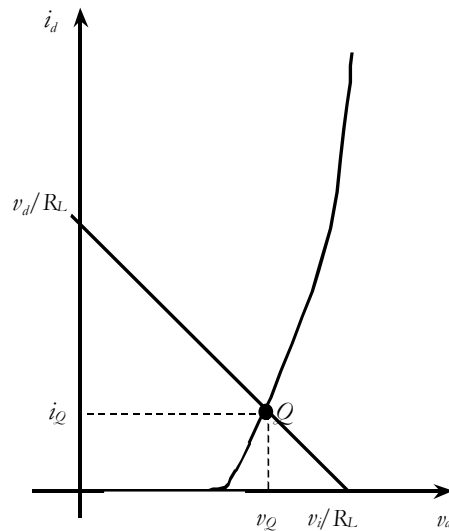
$$I_d = -\frac{I}{R_L} V_d + \frac{V_i}{R_L} \quad (2)$$

La ecuación (2), representa la *recta de carga* del circuito. La cual podemos facilmente graficar.

La intercepción entre la curva característica del diodo semiconductor y la recta de carga, determinan las coordenadas del *punto de trabajo*, conocido simplemente como *punto de reposo* o bien, *punto Q*.

¹ Notar que en la región de polarización inversa, ha sido magnificada en la representación de la corriente por el diodo. Se realizo así, debido a que las corrientes durante la polarización inversa son muy pequeñas respecto de las corrientes durante la polarización directa.

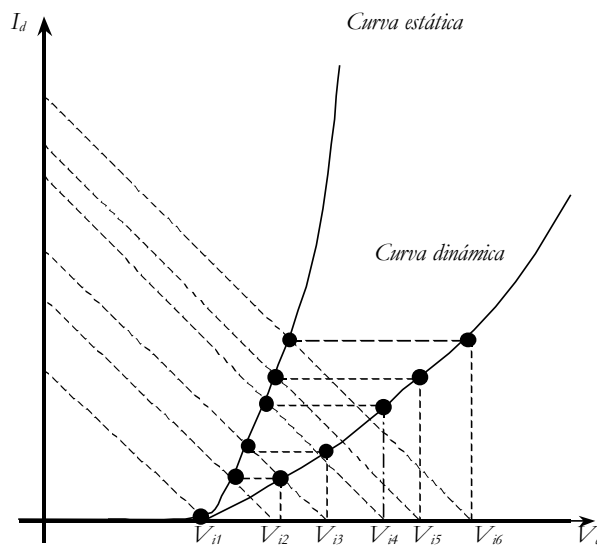
CAPITULO I: Análisis y Diseño de Circuitos con Diodos



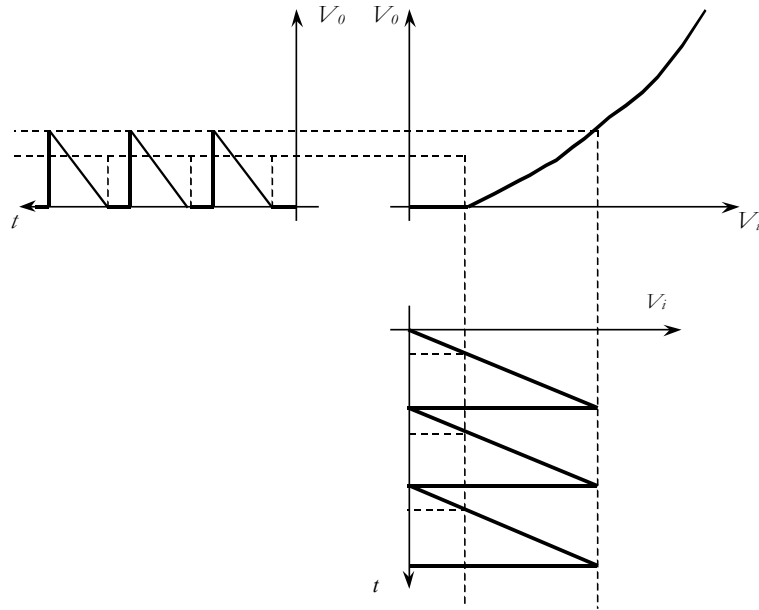
Para evaluar el par (i_Q, v_Q) , lógicamente debemos trabajar con la curva exponencial, y realizar la igualdad con la recta de carga. Este aspecto, que en prácticamente todos los casos, resulta ser difícil y engorroso (por no contar con toda la información de la característica analítica de la curva exponencial), nos conduce directamente a realizar aproximaciones. La idea es aproximar la característica exponencial, a una característica gráfica del tipo lineal. Dicha metodología representa una modelación del sistema, en nuestro caso, la del diodo.

Curva de transferencia

Toda característica gráfica de tipo salida/entrada, se denomina *Característica de Transferencia*. Para nuestra gráfica anterior bastará multiplicar por la carga (escalamiento en el eje de ordenadas), obteniendo la tensión de salida, es decir: una gráfica V_o/V_i con la misma forma que la curva dinámica del diodo. Lo interesante de la curva de transferencia es que podemos analizar gráficamente distintas formas de onda para la excitación de entrada, y visualizar el resultado particular en la onda de salida.



CAPITULO I: Análisis y Diseño de Circuitos con Diodos



Cálculos y parámetros de interés en un Diodo Real

Para las definiciones y análisis, utilizaremos el circuito del punto anterior. En él, la señal de salida, será:

$$v_o(t) = v_i(t) - V_\gamma$$

Además:

$$i_d(t) = (v_i(t) - V_\gamma) / R_L$$

Suponiendo una excitación senoidal, tal que V_m es muy superior al umbral de conducción, entonces:

1. Valor Medio de la Señal de Salida:

Por definición:

$$\begin{aligned} v_{dc} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v_o(\alpha) d\alpha \\ &= \frac{V_m}{\pi} \end{aligned} \quad (3)$$

2. Angulo de Conducción

Cuando mediante un crecimiento desde cero, la señal de entrada alcanza el valor de tensión umbral, en la carga se inicia la conducción, esto ocurre para un tiempo finito, bien determinado, y que se le conoce como *ángulo de retardo*. Definido como:

$$\theta_D = \omega_0 t_1 \quad (4)$$

CAPITULO I: Análisis y Diseño de Circuitos con Diodos

En tal caso, la solución finita para ese instante de tiempo y considerando un diodo de Si, es:

$$t = \frac{1}{\omega_0} \sin^{-1} \left(\frac{0.7}{V_m} \right) \quad (5)$$

Cuando la excitación decrece desde su peak, entonces nuevamente la señal alcanza el umbral de conducción. Ese instante, llamémoslo t_2 , también satisface la ecuación anterior. El lapso de tiempo, mientras el diodo conduce, se denomina: *ángulo de conducción*, y corresponde a la cantidad:

$$\theta_c = \omega_0 (t_2 - t_1) \quad (6)$$

3. Tensión Inversa del Peak

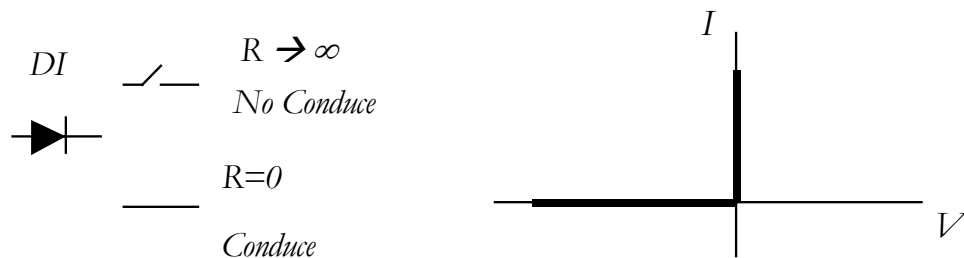
Cuando se experimenta con diodos comerciales, es importante conocer la máxima tensión inversa capaz de soportar antes de entrar en ruptura. A tal parámetro, se le conoce como *TIP* (Tensión Inversa del Peak). Su determinación es elemental para seleccionar el diodo más adecuado a nuestra aplicación.

Cuando la tensión es inversa, la señal de salida alcanzará el valor $-V_m$, por lo tanto, para evitar la destrucción del dispositivo tendremos que elegir diodos que cumplan la siguiente condición:

$$TIP > V_m$$

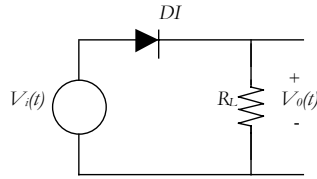
DIODO IDEAL (DI)

Si analizamos la información gráfica que nos ofrecen los fabricantes de los dispositivos, observaremos que no se incurrirá en errores significativos el sustituir (de manera conveniente) la curva exponencial por tramos lineales. Bajo esta condición, se ha definido, el diodo ideal (DI), el cual, constituye un ente, y como ya explicamos, es definido sólo para simplificar el análisis de circuitos con diodos. Como característica inicial, diremos que es un dispositivo que trabaja sólo en dos estados. Conducción: que abreviaremos por *estado On* o simplemente *On*; y No conducción: que abreviaremos por *estado Off*, o simplemente *Off*. Su comportamiento puede resumirse, en la siguiente figura:



Veamos una aplicación muy simple: En el circuito que sigue, se aprecia un diodo real, que sustituiremos por un DI. La tensión de salida, la proporciona la carga resistiva R_L .

CAPITULO I: Análisis y Diseño de Circuitos con Diodos

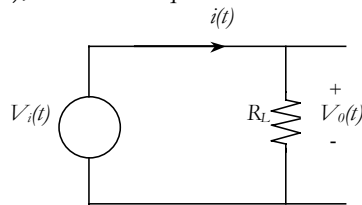


Supongamos que la excitación es del tipo senoidal, definida según:

$$V_i(t) = V_m \sin \omega_0 t$$

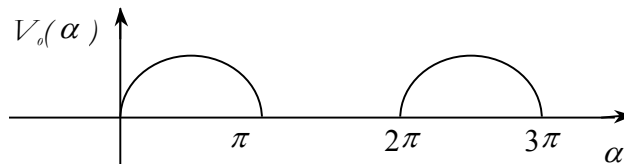
con $\omega_0 = 2\pi f_0$

Durante el estado de conducción(On), el circuito equivalente será el siguiente:

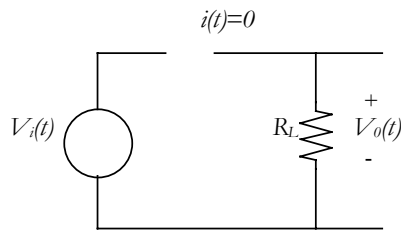


Notar que el DI se ha transformado en un corto circuito. Luego, la tensión de salida, es justamente igual a la excitación² (paralelismo directo).

En tal caso: $V_o(t) = V_i(t)$



En estado de no conducción, el DI se transforma en un circuito abierto. El circuito equivalente, será:

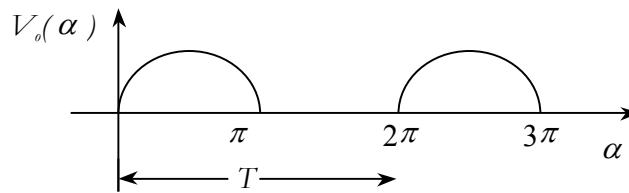


Luego $V_o(t) = 0$

La respuesta completa para la señal de salida, se obtiene aplicando superposición, es decir:

² Cuando la señal de salida, resulta ser igual a la entrada, se dice que el circuito realiza una operación de seguimiento. Razón por la cual, dichos circuitos se denominan *seguidores*.

CAPITULO I: Análisis y Diseño de Circuitos con Diodos



Este tipo de respuesta, se denomina: *rectificación de media onda*. Notar que los ciclos positivos de señal se respetan, y los ciclos negativos se eliminan.

Modelación del Diodo

El DI, puede ser dotado de las propiedades más características de todo diodo SC. En tal caso, hablamos de realizar una *modelación*³ al diodo real.

Existen varios modelos, ellos dependen, exclusivamente del grado de exactitud que se desee aplicar al posterior análisis. Para nuestro caso, los parámetros de la modelación serán sencillamente: La tensión umbral de conducción, y las resistencias características de las zonas de conducción directa e inversa. Se podrían incluir más parámetros, por ejemplo: la temperatura en el dispositivo. Pero bastará con los parámetros indicados inicialmente. Con ellos, se pueden resolver casi todo los problemas de análisis y diseño con diodos.

Modelación con Tensión Umbral

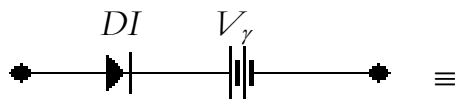
La tensión umbral, quizás la característica más llamativa de todo diodo SC, nos permite conocer el umbral de la conducción en el dispositivo, y según sea de Si o Ge. Como su valor es constante, puede ser modelada por una simple fuente de alimentación continua. En tal caso, corresponderá al siguiente modelo, como se indica en la siguiente figura:

Notar que para tal caso:

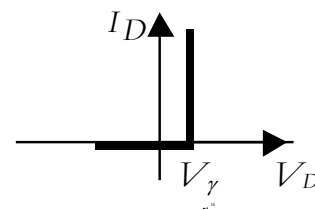
$$V_D \geq V_\gamma \Rightarrow on$$

$$V_D < V_\gamma \Rightarrow Off$$

Modelo de circuito propuesto



Característica del modelo



Modelación con Resistencia Directa (RD):

Cuando la aplicación requiera un cierto grado de exactitud o de aproximación por estar el punto de trabajo ubicado en zona de polarización directa, entonces, el modelo propuesto debe incluir lógicamente, a una resistencia que caracterice dicha región.

El modelo de diodo propuesto, resulta ser:

³ La modelación es una poderosa herramienta matemática, creada para resolver los complicados problemas que se presentan en las ciencias de la Ingeniería. En general, se aplica en prácticamente todas las disciplinas del conocimiento, incluida las ciencias económicas, las del área social, demografía, etc.

CAPITULO I: Análisis y Diseño de Circuitos con Diodos

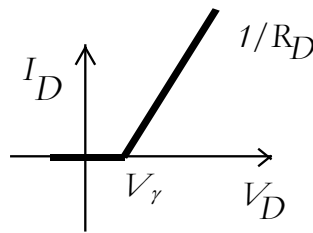


Notar que en este caso, debe ocurrir:

$$V_D = V_\gamma + R_D I_D$$

$$I_D = \frac{V_D}{R_D} - \frac{V_\gamma}{R_D} \quad (7)$$

La característica gráfica del modelo será:

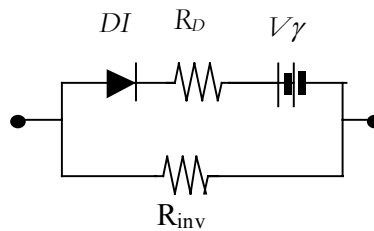


Notar que esta característica resulta bastante razonable, debido a la semejanza con la curva exponencial. Lo más importante para mejorar su exactitud, es la elección de la pendiente de la recta involucrada. Justamente, esa pendiente es la que caracteriza al parámetro R_D propuesto.

Modelación en Zona de Polarización Inversa

Cuando nuestra aplicación, requiera trabajar en ambas zonas de polarización entonces, debemos además caracterizar la pendiente que para la región de polarización inversa. Por consiguiente, la interacción de una señal operando en ambas regiones quedará influenciada por la pendiente de ambas regiones.

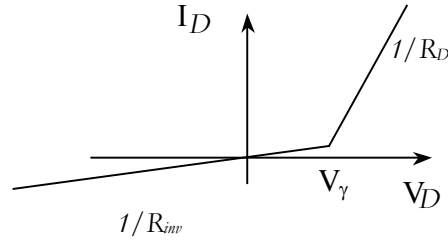
El modelo de diodo propuesto, presenta el siguiente circuito:



Se debe considerar que la magnitud de la resistecia que define la región de polarización inversa, es extremadamente alta, esto se deduce, por el hecho de que la pendiente de esa región es muy próxima al valor nulo⁴.

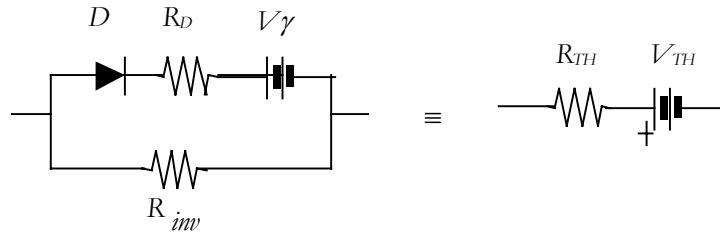
⁴ Recuerde que las graficas de esta región, han sido exageradas con la finalidad de poder interpretar de que allí siempre existirá una pendiente (aunque esta sea muy pequeña en magnitud).

CAPITULO I: Análisis y Diseño de Circuitos con Diodos



Analizando este último modelo, se puede deducir:

Cuando existe conducción, nuestro DI \rightarrow On, luego el circuito queda:



Por Thevenin y porque $R_{inv} \rightarrow \infty$ obtenemos:

$$R_{TH} = \frac{R_D R_{inv}}{R_D + R_{inv}} \approx R_D \quad (8)$$

$$V_{TH} = V_\gamma \left(\frac{R_{inv}}{R_{inv} + R_D} \right) \approx V_\gamma \quad (9)$$

RECTIFICADORES

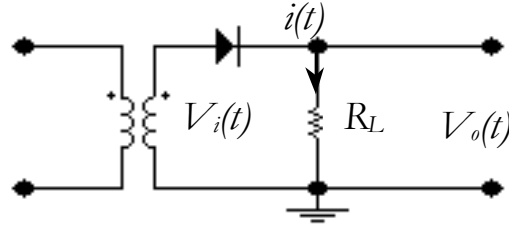
Lo más frecuente en la práctica consiste en polarizar el circuito electrónico mediante una fuente de alimentación, y cuya función es convertir ondas alternas de la red domiciliaria a tensión continua.

La etapa inicial de toda fuente de alimentación resulta ser un circuito rectificador. Existen varias versiones, siendo el más simple el rectificador de media onda, y el más usado es el rectificador tipo puente. Sin importar el tipo de rectificador a usar, su función siempre será la de convertir una onda de señal alterna en una onda continua pulsátil. Será de gran interés en esta última medir su valor medio, que corresponderá justamente a la componente continua de la señal de salida. El resto de la señal, corresponde a una sumatoria de armónicos.

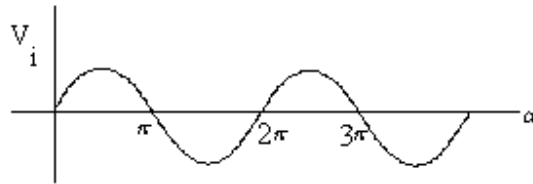
RECTIFICADOR DE MEDIA ONDA

La operación elemental de este circuito ya la vimos hace un momento. Nos dedicaremos mejor en analizar las componentes de señal que actúan.

CAPITULO I: Análisis y Diseño de Circuitos con Diodos



Sea la excitación de entrada, la tensión proporcionada por la red domiciliaria (220V/50 Hz), tal que:



Sea $i(t) = I_m \text{Sen } \omega t$, la corriente que circula por el circuito.

Determinaremos I_{dc} , componente continua de la señal de corriente rectificada. Por ecuación (3), tenemos:

$$I_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi I_m \text{Sen } \alpha \, d\alpha + 0$$

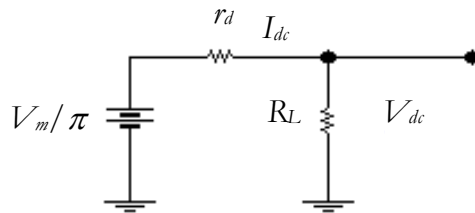
$$= \frac{I_m}{\pi}$$

Observando el circuito, el valor máximo de la corriente, será:

$$I_m = \frac{V_m}{R_L + r_d} \quad (10)$$

$$V_{dc} = R_L I_{dc} \quad (11)$$

Observar que la ecuación (10), hace referencia a la resistencia dinámica⁵.

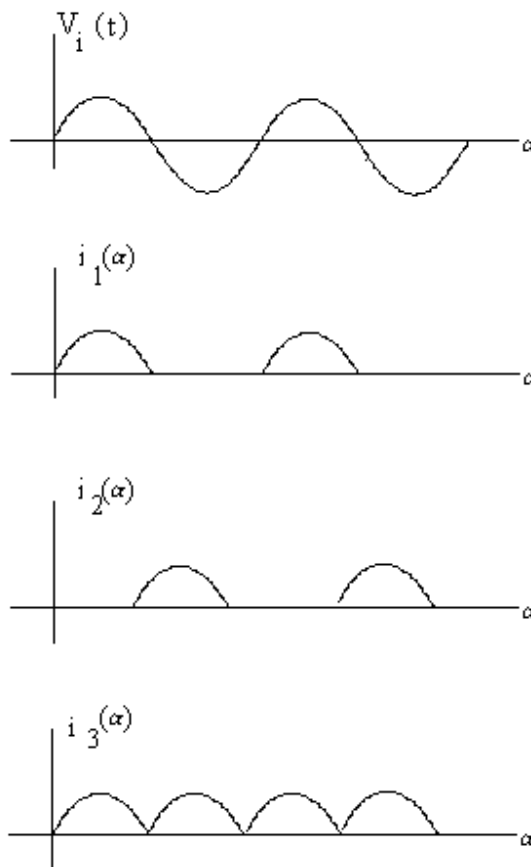
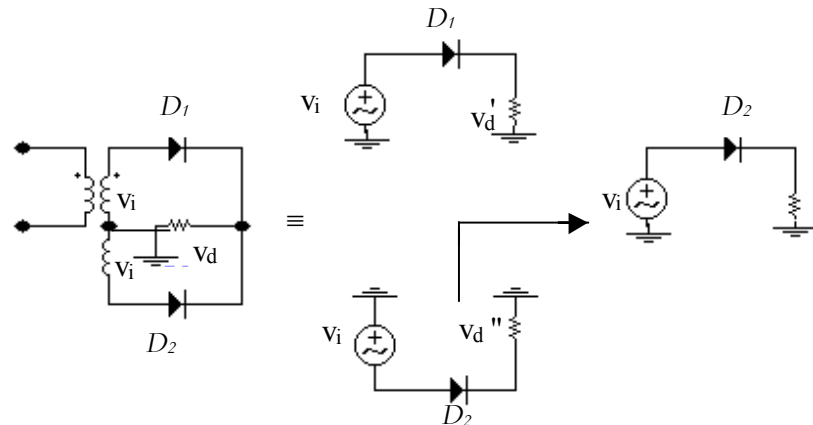


El circuito resultante, constituye la red equivalente del rectificador de media onda en continua.

⁵ r_d representa la resistencia dinámica del diodo real. Es por lo tanto, una característica dinámica y no una entidad de valor fijo o continuo. Pero la utilización aquí, se justifica suponiendo que seleccionamos un tramo lo bastante lineal para el dominio de la operación del diodo. Menos aún, debemos confundir este valor con el parámetro de modelación lineal R_D (resistencia directa del DI), R_D no existe, es sólo un instrumento para modelar y así, obtener una simplificación efectiva en el análisis.

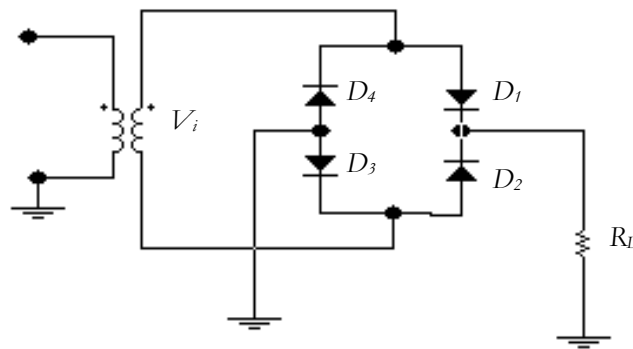
RECTIFICADOR DE ONDA COMPLETA

La función del rectificador de media onda, puede ser ampliada si utilizamos dos diodos rectificadores. Cada uno encargado de un ciclo respectivo de señal. En tal caso, el circuito se denomina *rectificador de onda completa*. Es importante observar que el resultado de este tipo de rectificación produce una señal con el doble de la frecuencia original, lo cual en sí, resulta muy conveniente cuando se deseen producir grandes peak de corriente en la carga.



RECTIFICADOR TIPO PUENTE

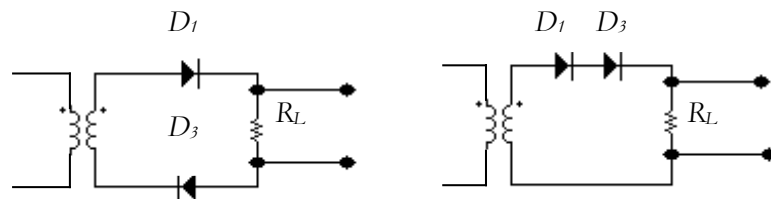
El circuito reúne todas las características que debe presentar un buen rectificador de señal. Su nombre se debe a que su esquema circuital, es muy parecido al popular *circuito puente*, utilizado en mediciones eléctricas. Ha modo básico, su funcionamiento es tal que cuando la salida del transformamador esta en región de polarización directa, sólo dos de los cuatro diodos conduciran. La doble resistencia, es una característica elemental de estos circuitos. Los dos restantes diodos, permanecerán bloqueados y no circulará corriente por ellos. Resultando para este dominio de señal un circuito rectificador de media onda. De manera análoga es el funcionamiento cuando la señal de salida del transformador, esta en región de polarización inversa. Los dos diodos que permanecieron bloqueados durante conducción directa, ahora conducen. Y los dos diodos restantes, dejan de conducir. Es decir, se originará un rectificador de media onda, operando en región de polarización inversa. Finalmente, la carga recibe la superposición de la corriente, originando una tensión pulsátil de onda completa.



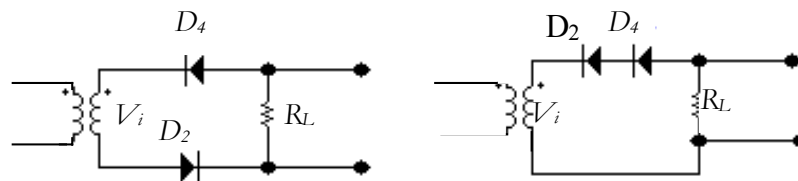
La siguiente tabla, muestra el resumen para la correcta operación de este circuito.

Ciclo Positivo	Ciclo Negativo
$D_1=ON$	$D_1=OFF$
$D_2=OFF$	$D_2=ON$
$D_3=ON$	$D_3=OFF$
$D_4=OFF$	$D_4=ON$

Ciclo Positivo



Ciclo Negativo

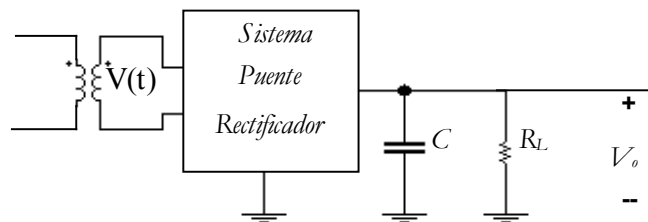


FILTROS PARA RECTIFICADORES

El concepto de filtro es muy importante en electrónica. Basicamente es un circuito electrónico que procesa un determinado conjunto de frecuencias. El procesamiento podría consistir en la aceptación o rechazo de un conjunto de frecuencias ubicadas en una determinada región del espectro⁶. Las frecuencias que no pertenecen al conjunto o región espectral, son considerablemente atenuadas respecto de su nivel de señal. Del grado de atenuación aplicado, se deduce el orden o grado que ofrece el circuito filtro.

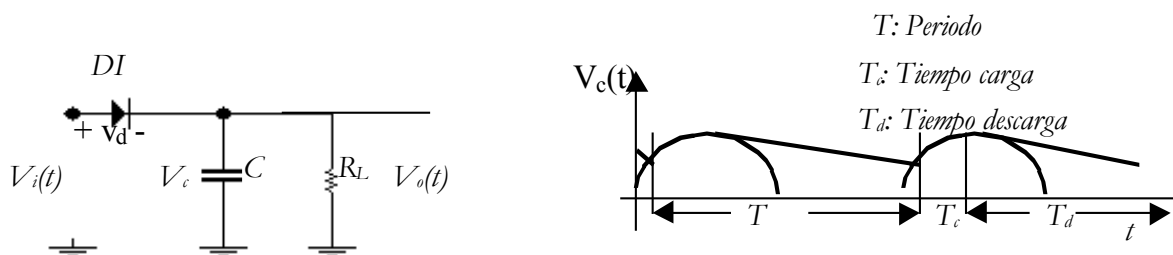
Con respecto a este curso, diremos que es un circuito cuya entrada es una señal rectificada y que la función del circuito mismo, consiste en atenuar las componentes alternas que presente dicha señal o equivalentemente, decir que su función corresponde a la de eliminar los armónicos producidos en el proceso de rectificación. La señal de salida, quedará mayoritariamente constituida de componentes continuas. Esto es así, debido a que es imposible reducir la totalidad de los armónicos.

El filtro más básico para eliminar señales ondulantes, es el filtro de primer orden, denominado *pasa bajos*. Consiste, en poner a la salida del circuito rectificador un condensador en paralelo a la carga, es decir:



Su comportamiento se basa en el hecho de que el condensador almacena energía (en forma de campo eléctrico) durante el periodo de conducción, liberando dicha energía sobre la carga, justamente en el periodo de no conducción. Analicemos dicha situación:

Sea el siguiente filtro:



Consideraciones:

- i.- Que la carga R_L sea extremadamente grande.

Bajo esta condición y suponiendo que la carga resistiva tiende a circuito abierto, entonces: una vez cargado el condensador, nunca más se podrá descargar, originando con ello una especie de almacenador permanente de energía. Su salida sería siempre constante, es decir, una señal continua pura. Desde el punto de vista práctico, lo anterior es imposible, debido a que no existe el condensador ideal. Por lo tanto, siempre presentará una resistencia (serie) propia al elemento capacitivo. Entonces, siempre existirá un

⁶ La representación de señales en el dominio de la frecuencia, se conoce como representación espectral. Toda señal en el dominio de la frecuencia posee espectro. La señal continua en el tiempo, posee un espectro de una sola frecuencia, ubicada en 0 Hz.

CAPITULO I: Análisis y Diseño de Circuitos con Diodos

camino para que circule la corriente eléctrica, lo que permitirá en definitiva descargar en un tiempo finito al condensador.

ii.- Que la carga sea finita.

Es el caso general. El condensador se descargará mayoritariamente por la carga⁷, originando una constante de tiempo de naturaleza exponencial.

Analicemos la situación:

Si especificamos por:

- T Periodo de la señal.
- T_c Tiempo que toma el condensador en cargarse.
- T_d Tiempo que dura la descarga en el condensador(τ)

Entonces:

$$T = T_c + T_d$$

El rizado que exhibe la respuesta del filtro puede manipularse, en tal caso es conveniente observar que:

1. Si T aumenta, entonces la constante de tiempo τ también crecerá.
2. Si τ crece, significa que el producto $R_L C$ también crece.
3. Si el tiempo de la descarga aumenta, entonces el tiempo de carga disminuye y viceversa.

Para fines del diseño, interesa que el tiempo de carga sea pequeño (grandes peak de corriente), tal de poder despreciarlo respecto del tiempo de descarga. Con esto nos aseguramos que el periodo de la señal resulta ser muy próximo al tiempo de descarga, lo cual facilita significativamente el análisis y diseño del circuito. Pues, el rizado dependerá mayoritariamente de T_d .

Podemos escribir por lo tanto:

$$\Delta v = V_m - V_m e^{-t/R_L C}$$

como nos interesa $T = T_d$

$$\Delta v = V_m \left(1 - e^{-T/R_L C} \right)$$

reemplazando adecuadamente⁸, se obtiene:

⁷ Debe considerarse que el modelo circuital equivalente (modelo) de todo condensador, incluye una componente resistiva en serie a los terminales del elemento. Además (dependiendo de la exactitud del modelamiento de la capacidad), se debe incluir un resistor en paralelo a los terminales del mismo. La resistencia serie, es siempre de una magnitud de algunos Ohms. la resistencia paralelo es muy elevada (varios megaohms). Para fines de aproximación se considera al resistor serie corto circuito, y al resistor paralelo circuito abierto.

⁸ Para aproximar el exponencial, se usó el desarrollo de Maclaurin: $e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots +$

CAPITULO I: Análisis y Diseño de Circuitos con Diodos

$$\Delta v = V_m \left(1 - \left(1 - \left(\frac{T}{R_L C} \right) \right) \right)$$

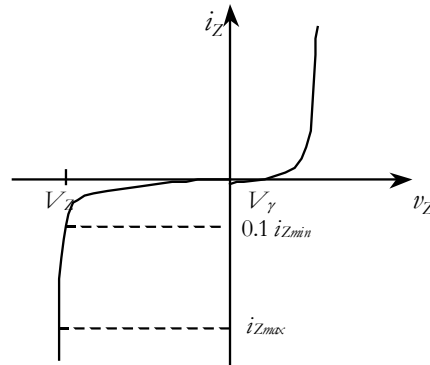
finalmente:

$$\Delta v \approx V_m \left(\frac{T}{R_L C} \right) \quad (12)$$

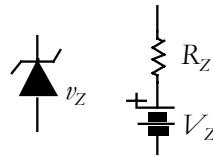
Observación: Para que Δv sea pequeño (menos componentes alternas), se necesitaran grandes valores de capacitancia.

REGULADORES DE TENSION

Toda fuente de alimentación continua, debe proveer de un grado razonable de regulación, tal que permita proporcionar una tensión constante a la carga. Sin embargo, es frecuente la existencia de tensiones no reguladas y ademas, son muy comunes las variaciones en la carga. Para mejorar la regulación es practicamente universal el uso del diodo zener. El dispositivo debe estar inversamente polarizado. Justamente en esa región el diodo presenta un alto grado de linealidad, lo cual facilita el análisis.



el modelo lineal equivalente del zener, en la zona de polarización inversa es:



Para determinar el *porcentaje de regulación*⁹, el procedimiento es el siguiente:

1. Se evalúa la mínima tensión por el zener. Es decir:

$$V_{Omin} = V_Z + R_Z I_{Zmin} \quad (13)$$

⁹ Mientras menor resulte el porcentaje de regulación, tanto mejor será la estabilización. Bajo 5%, se considera muy bueno.

CAPITULO I: Análisis y Diseño de Circuitos con Diodos

2. Se evalúa la máxima tensión por el zener. En tal caso:

$$V_{Omax} = V_z + R_z I_{zmax} \quad (14)$$

Entonces, el factor de regulación será:

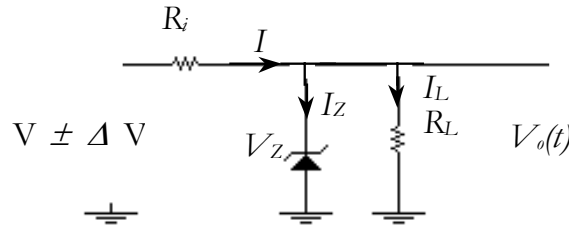
$$reg = \frac{V_{Omax} - V_{Omin}}{V_z} \quad (15)$$

Notar que sólo depende de R_z y del dominio existente para las variaciones de la corriente el diodo.

REGULADOR DE TENSION CON DIODO ZENER

El circuito más elemental y popular para lograr fines de regulación, es el denominado circuito de regulación paralelo¹⁰.

Sea el siguiente circuito¹¹:



Las condiciones para el diseño son las siguientes:

Notar que en todo momento: $I = I_z + I_L$

Mínima condición de regulación:

Se define según las siguientes relaciones y ecuaciones:

$$V_{in} \leftarrow V - \Delta v$$

$$I_z \leftarrow I_{zmin}$$

$$I_L \leftarrow I_{Lmax}$$

$$R_i = \frac{(V - \Delta v) - V_z}{I_{zmin} + I_{Lmax}} \quad (16)$$

Máxima condición de regulación:

Se define según:

¹⁰ Se le denomina regulador paralelo, debido a que el diodo zener, interactúa en paralelo a la carga.

¹¹ Notar que la excitación no representa exactamente la cantidad de rizado existente.

CAPITULO I: Análisis y Diseño de Circuitos con Diodos

$$V_{in} \leftarrow V + \Delta v$$

$$I_{\tilde{z}} \leftarrow I_{\tilde{z}max}$$

$$I_L \leftarrow I_{Lmin}$$

$$R_i = \frac{(V + \Delta v) - V_{\tilde{z}}}{I_{\tilde{z}max} + I_{Lmin}} \quad (17)$$

Además, el fabricante garantiza que:

$$0,1 I_{\tilde{z}max} = I_{Lmin} \quad (18)$$

Posteriormente, si igualamos ambas condiciones llegaremos a una formula para evaluar $I_{\tilde{z}max}$

Es decir:

$$\begin{aligned} (V - \Delta v - V_{\tilde{z}})(I_{\tilde{z}max} + I_{Lmin}) &= V + \Delta v - V_{\tilde{z}}(0,1 I_{\tilde{z}max} I_{Lmax}) \\ I_{\tilde{z}max}(V - \Delta v - V_{\tilde{z}} - 0,1(V + \Delta v - V_{\tilde{z}})) &= (V + \Delta v - V_{\tilde{z}})I_{Lmax} - (V - \Delta v - V_{\tilde{z}})I_{Lmin} \\ I_{\tilde{z}max} &= \frac{[(V + \Delta v - V_{\tilde{z}})I_{Lmax} - (V - \Delta v - V_{\tilde{z}})I_{Lmin}]}{(0,9V - 1,1\Delta v - 0,9V_{\tilde{z}})} \end{aligned} \quad (19)$$

Ahora sí, podremos evaluar la magnitud de R_i y con ello calcular la potencia que deberá soportar dicho resistor.

Sea $P_{R,max}$ la máxima potencia sobre el resistor, entonces se debe cumplir:

$$\begin{aligned} P_{R,max} &= V_{max} I_{max} \\ &= (V + \Delta v - V_{\tilde{z}})(I_{\tilde{z}max} + I_{Lmin}) \end{aligned} \quad (20)$$

Análogamente, debemos conocer la potencia que debe soportar el diodo zener, en tal caso:

$$P_{Z,max} = V_Z I_{Zmax} \quad (21)$$

OTRAS APLICACIONES DE CIRCUITOS CON DIODOS

Aparate de los circuitos rectificadores y reguladores, existe una variada gama de otros circuitos con diodos que gozan de gran popularidad. Entre ellos destacaremos los circuitos limitadores y desplazadores.

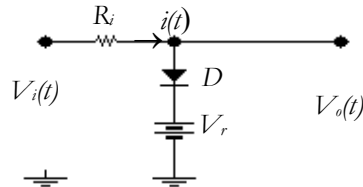
LIMITADORES

CAPITULO I: Análisis y Diseño de Circuitos con Diodos

Reciben este nombre debido a que limitan el nivel de los ciclos a un valor predeterminado. El limitador más elemental, es el denominado *limitador de un nivel*.

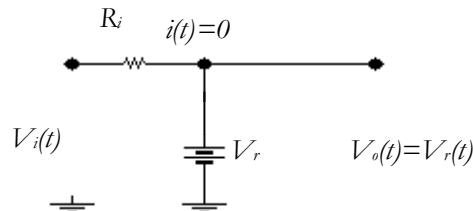
Limitador de Un Nivel

Sea el siguiente circuito:

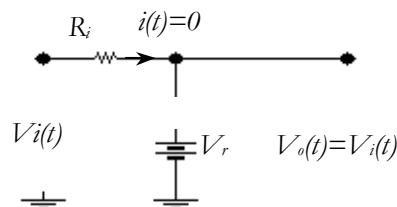


Para que el circuito cumpla su función, la señal de entrada debe tener un valor máximo de amplitud, superior a V_r , es decir: $V_i(t) = V_m f(t)$, donde $V_m > V_r$. Siendo $f(t)$ una señal normalizada (senoidal, triangular, tren de pulsos o de cualquier otro tipo).

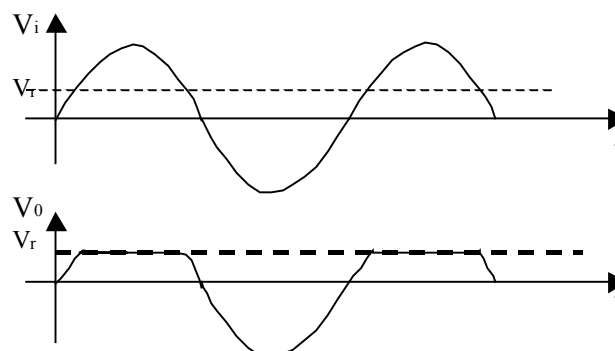
1. Supongamos que $V_i(t) > V_r$, entonces el diodo conduce, ($D=On$) es decir, el circuito equivalente para esta condición será:



2. Si $V_\gamma = 0,7 \text{ (Si)} \vee 0,2 \text{ (Ge)}$, entonces el diodo no conduce ($D=Off$), el circuito equivalente será:



Por lo tanto, la respuesta gráfica de la función de este circuito se puede observar en la siguiente gráfica:

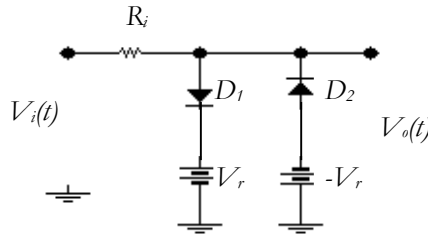


Limitador de Dos Niveles

CAPITULO I: Análisis y Diseño de Circuitos con Diodos

Cada nivel trabaja para un tipo de ciclo de señal. Para el ciclo positivo, la situación es idéntica al limitador de un nivel (positivo). Para el ciclo negativo, es análogo, salvo las disposiciones de los elementos de circuito. Ambas ramas actuando simultáneamente originan el limitador de dos niveles.

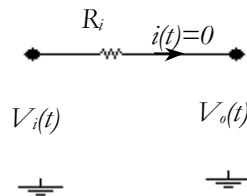
Sea el siguiente circuito, un limitador de dos niveles:



1.- Ciclo Positivo

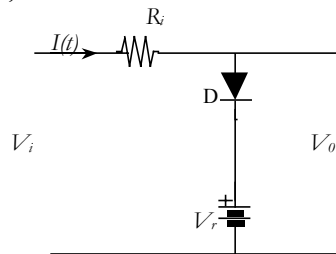
i.- ¿Donde habrá tensión para la operación del diodo ?

a.- Supongamos que D_1 no conduce, entonces:



$$V_o(t) = V_i(t)$$

b.- Supongamos ahora que D_1 conduce, entonces:



$$V_o(t) = V_r$$

Igualando este resultado con el obtenido en a, veremos que existirá un punto de quiebre en $V_i(t) = V_r$. Existirá una transición en la operación del diodo, es decir, habrá un cambio de pendiente por lo tanto, la gráfica tendrá el punto de quiebre en:

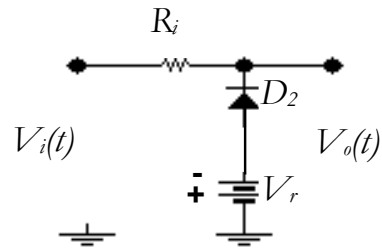
$$\text{Si } 0 \leq V_i(t) < V_r \Rightarrow D_1 : \text{Off} \therefore V_o(t) = V_i(t)$$

$$\text{Si } V_r \leq V_i(t) \leq V_m \Rightarrow D_1 : \text{On} \therefore V_o(t) = V_r$$

2.- Ciclo Negativo

La segunda rama paralela, es lógicamente la responsable del comportamiento del circuito en esta región.

CAPITULO I: Análisis y Diseño de Circuitos con Diodos

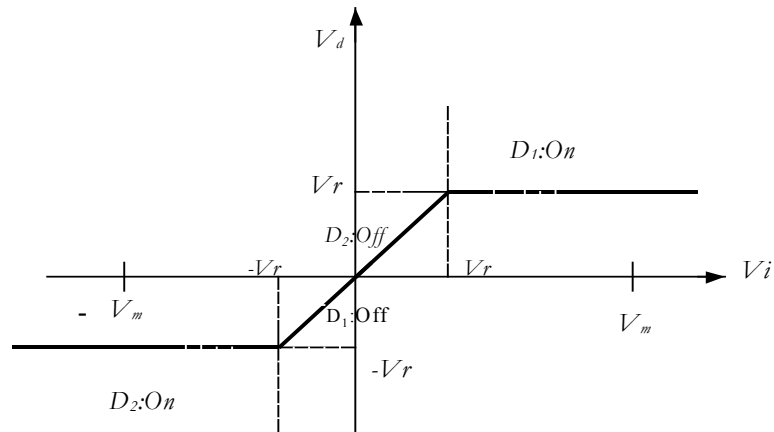


Sí D_2 esta en estado Off, entonces:

$$V_o(t) = V_i(t)$$

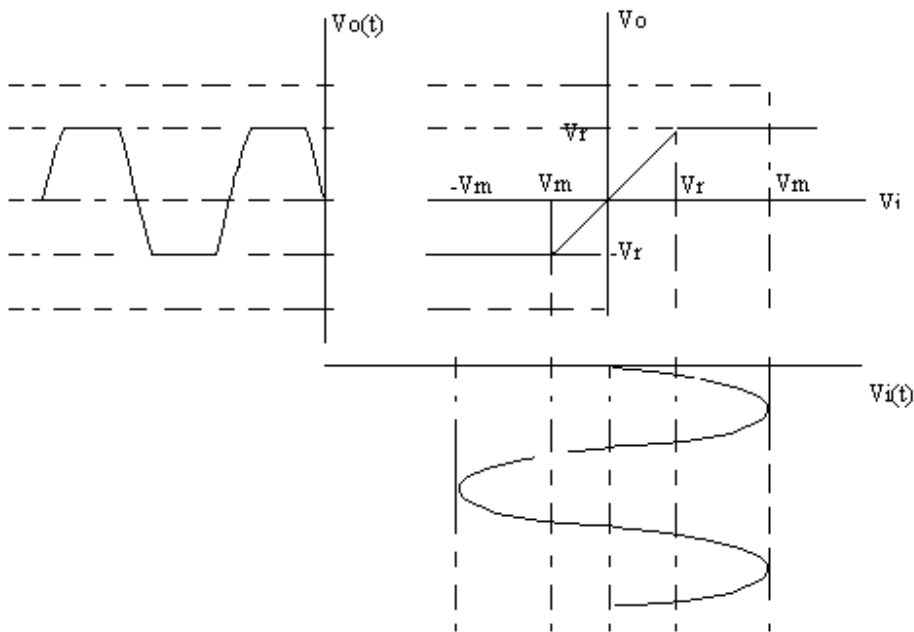
Cuando D_2 conduce, la salida será:

$$V_o(t) = -V_r$$



Como ya sabemos, por medio de la curva de transferencia, podremos analizar las diferentes respuestas que ofrece el circuito, en este caso, para excitación senoidal, la respuesta es la siguiente:

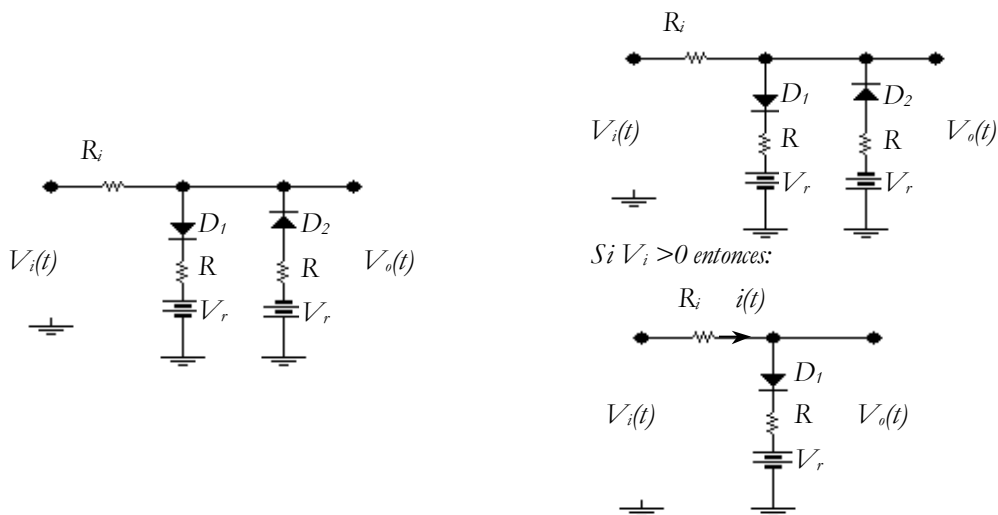
CAPITULO I: Análisis y Diseño de Circuitos con Diodos



Limitador con Función de Atenuación

Es una generalización del limitador de dos niveles. Utiliza un resistor en serie a cada diodo. Notar que si las resistencias R no existieran, entonces el circuito sería un limitador de dos niveles.

Usando Diodo ideal, tendremos:

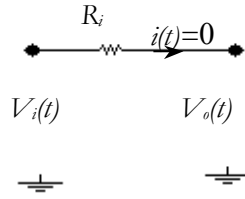


1.- Ciclo Positivo

i.- ¿ Donde habrá tensión para la operación del diodo ?

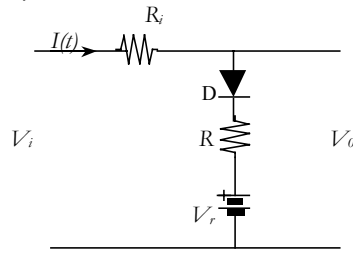
a.- Supongamos que D_1 no conduce, entonces:

CAPITULO I: Análisis y Diseño de Circuitos con Diodos



$$V_o(t) = V_i(t)$$

b.- Supongamos ahora que D_1 conduce, entonces:



$$i(t) = \frac{V_i(t) - V_o(t)}{R_i}$$

$$V_o(t) = V_r + \frac{R}{R_i} (V_i(t) - V_o(t))$$

$$V_o(t) \left[1 + \frac{R}{R_i} \right] = V_r + \frac{R}{R_i} (V_i(t))$$

obteniendo:

$$V_o(t) = \frac{V_r + \frac{R}{R_i} V_i(t)}{1 + \frac{R}{R_i}}$$

Igualando el resultado de ambas partes, llegaremos a las coordenadas de la transición para este dominio o rango de señal. En tal caso:

$$V_r + \frac{R}{R_i} V_i(t) = V_i(t) + V_i(t) \frac{R}{R_i}$$

$$V_i(t) = V_r$$

Es decir:

CAPITULO I: Análisis y Diseño de Circuitos con Diodos

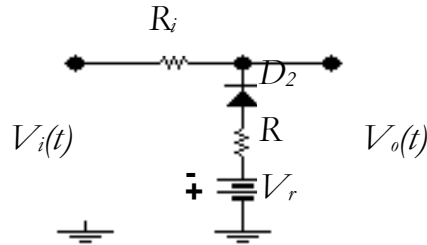
Si $0 \leq V_i(t) < V_r \Rightarrow D_1 : Off \therefore V_o(t) = V_i(t)$

Si $V_r \leq V_i(t) \leq V_m \Rightarrow D_1 : On \therefore V_o(t) = \frac{V_r + \frac{R}{R_i} V_i(t)}{1 + \frac{R}{R_i}}$

$$V_o(t) = \left(\frac{R}{R + R_i} \right) V_i(t) + \left(\frac{R_i}{R + R_i} \right) V_r$$

2.- Ciclo Negativo

Análogo, a lo anterior y por nuestra experiencia en el limitador de dos niveles, tendremos:

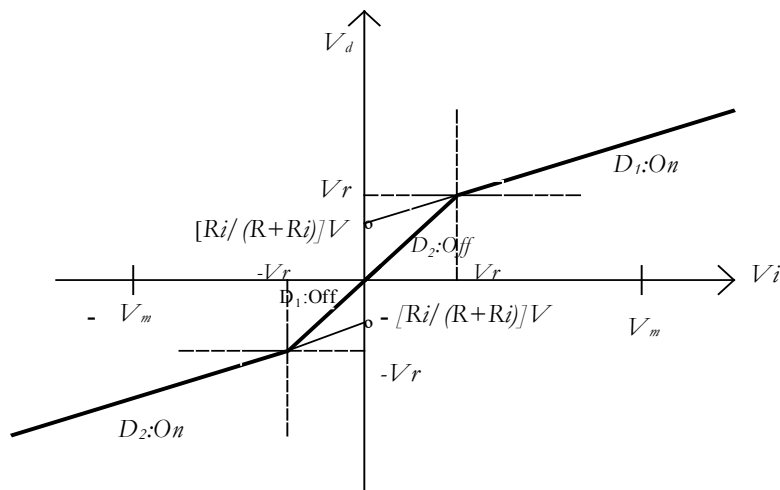


Sí D_2 esta en Off, entonces:

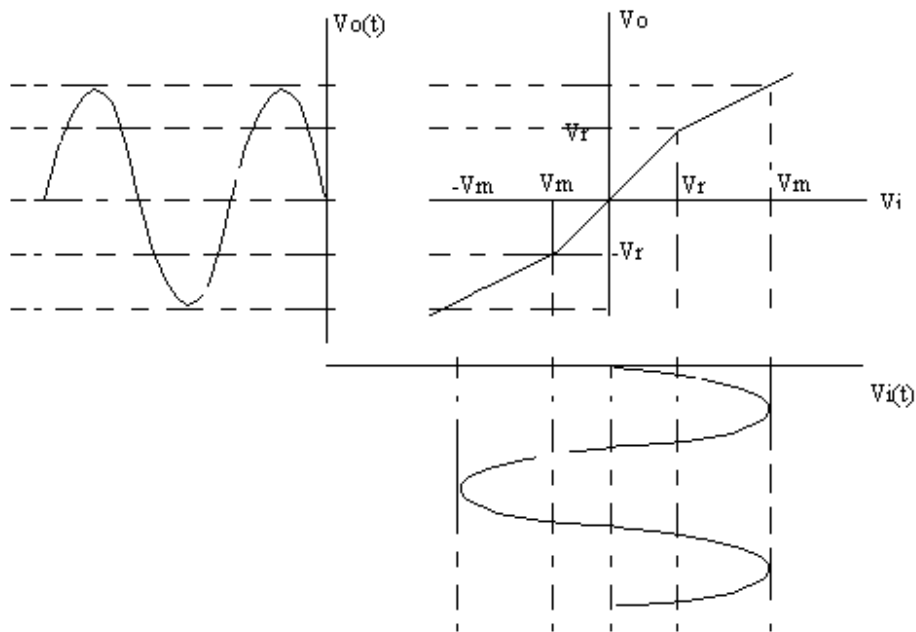
$$V_o(t) = V_i(t)$$

Cuando D_2 conduce, la salida será:

$$V_o(t) = \left(\frac{R}{R + R_i} \right) V_i(t) - \left(\frac{R_i}{R + R_i} \right) V_r$$



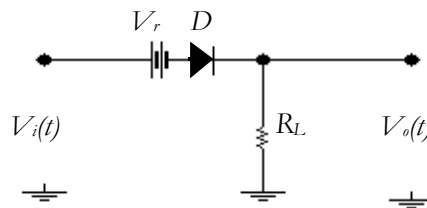
CAPITULO I: Análisis y Diseño de Circuitos con Diodos



Notar que la señal de salida no es una señal senoidal.

Desplazador de Nivel

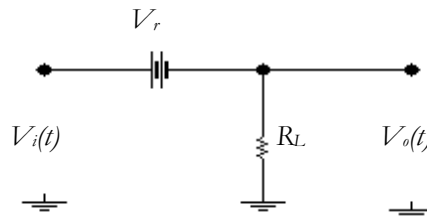
La función de todo circuito desplazador de nivel, es la de adicionar nivel continuo a la señal a procesar. Lo más básico para tal función consiste en:



$$D : \text{On} \quad V_i(t) \geq V_r$$

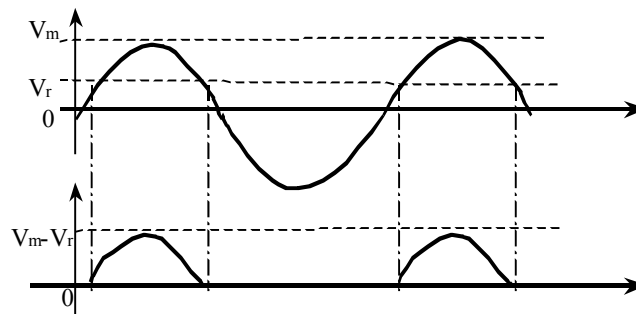
$$D : \text{Off} \quad V_i(t) < V_r, \quad i = 0 \quad \therefore V_o(t) = 0$$

Si D es On, entonces:



$$V_o(t) = V_i(t) - V_r \quad (22)$$

CAPITULO I: Análisis y Diseño de Circuitos con Diodos



Observe que la función es tal como lo describe su nombre "desplazar" o llevar el nivel continuo V_r a nivel "cero".

CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

El diodo real no es un dispositivo lineal. Para facilitar el análisis circuital, se reemplaza por un diodo ideal. El equivalente lineal resultante, es mucho más sencillo de analizar. El error involucrado en aproximar el diodo real, es mínimo. Sólo corresponderá decidir el grado de modelación que se desee utilizar y eso depende sólo del tipo de aplicación que el circuito debe satisfacer.

En lo que respecta al diseño de circuitos con diodos, es importante tener claro la función y operación que desempeñan los diferentes circuitos elementales (rectificadores, filtros, estabilizadores de tensión, limitadores de señal, etc.), y los diferentes parámetros involucrados en cada uno de ellos (el dominio o rango de la señal, las potencias que deberán soportar los distintos elementos de circuito, la TIP, etc).