

CAPÍTULO 2

INTRODUCCIÓN A LOS DIODOS

2.1 EL DIODO

El diodo es un dispositivo básico –pero muy importante– de dos terminales, el ANODO y el CATODO. El símbolo circuital para el diodo aparece en la figura 2.1a, y una característica volt-ampere típica se muestra en la figura 2.1b.

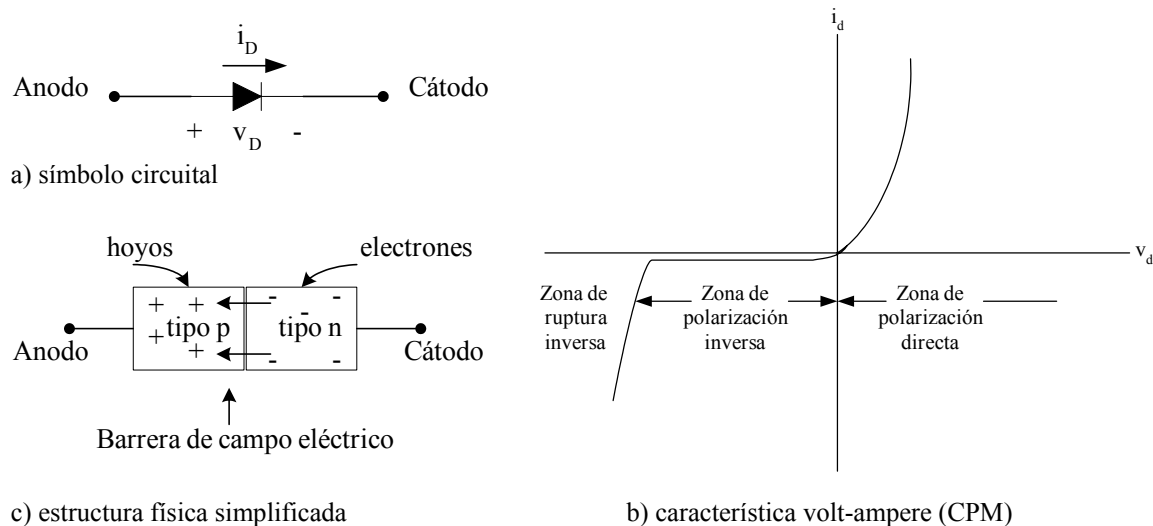


Figura 2.1: Diodo semiconductor

Como se muestra en la figura 2.1a, el voltaje v_D aplicado a un diodo tiene referencia positiva en el ánodo y negativa en el cátodo; similarmente, la corriente i_D en el diodo tiene referencia positiva de ánodo a cátodo.

Nótese en la característica de la figura 2.1b que si el voltaje v_D aplicado es positivo, se establece una corriente relativamente grande para voltajes pequeños. Esta condición se denomina de **POLARIZACIÓN DIRECTA**. Así, la corriente fluye con facilidad por el diodo en la dirección indicada por la “punta de la flecha” del símbolo.

A la inversa, para valores negativos (moderados) de v_D , la corriente i_D es pequeña. Corresponde esta situación a la región de **POLARIZACIÓN INVERSA**. Para voltajes negativos suficientemente grandes se alcanza la zona inversa de ruptura (breakdown), donde la corriente alcanza rápidamente magnitud despreciable.

La operación en zona inversa de ruptura, caracterizada por voltaje y corriente suficientemente grandes, involucra una fuerte potencia a disipar, normalmente una elevación de temperatura que puede conducir al daño irreversible del dispositivo (por sobredisipación, calentamiento excesivo).

En las aplicaciones en las que deliberadamente se trabaja el dispositivo en la zona inversa de ruptura, deben tomarse las precauciones para evitar sobrecalentamiento. Un ejemplo de estas aplicaciones corresponde a los diodos Zener (a revisar más adelante).

BREVE DESCRIPCIÓN DE LA FÍSICA DEL DIODO.

(Una descripción muy utilitaria)

Los diodos semiconductores consisten en la unión (juntura) de dos tipos de material semiconductor (usualmente Silicio dopado con impurezas cuidadosamente seleccionadas). En un lado de la juntura, las impurezas crean un material tipo-n, caracterizado por un gran número de electrones libres. En el otro lado de la juntura se emplea un tipo distinto de impurezas para crear (en su efecto) partículas de carga positiva denominadas huecos (u hoyos), material tipo-p.

Como se muestra en 2.1c, un diodo se forma con la unión de un material tipo-p (ánodo) con un material tipo-n (cátodo). Aún sin voltaje aplicado se establece una barrera de campo eléctrico en la juntura, la que previene la recombinación de electrones y hoyos, manteniéndolos confinados en sus lados.

Si se aplica externamente un voltaje con polaridad positiva en el lado-n (cátodo), la barrera es reforzada y los portadores de carga no pueden atravesar la juntura. El campo eléctrico positivo atrae a los electrones, así como el terminal negativo atrae a los hoyos (positivos). Se produce un desplazamiento transitorio de los portadores hasta que las atracciones descritas se equilibran con aquellas debidas al diferente signo de los portadores. Virtualmente no hay flujo de portadores, es decir, no se establece corriente.

En sentido opuesto, esto es aplicando un voltaje positivo al lado-p (ánodo), la barrera se debilita y los portadores la cruzan, estableciendo una corriente. El campo positivo repele a los hoyos, así como el campo negativo repele a los electrones; la fuerza de atracción entre cargas opuestas contribuye en igual sentido.

Así, en definitiva, la juntura no conduce a una polaridad del voltaje aplicado (positivo en el cátodo, tipo-n), y conduce fuertemente para la otra polaridad (positivo en el ánodo, tipo-p).

DIODOS PARA PEQUEÑA SEÑAL

Diversos materiales (en términos de cantidad o densidad de impurezas agregadas) y estructuras (dimensiones de la juntura) permiten lograr dispositivos adecuados a aplicaciones de muy diferentes rangos de trabajo.

La denominación de “pequeña señal” corresponde a aplicaciones en circuitería electrónica de baja y media potencia, típicamente hasta centenas de [Watt] en la carga y para ella es útil la descripción que sigue.

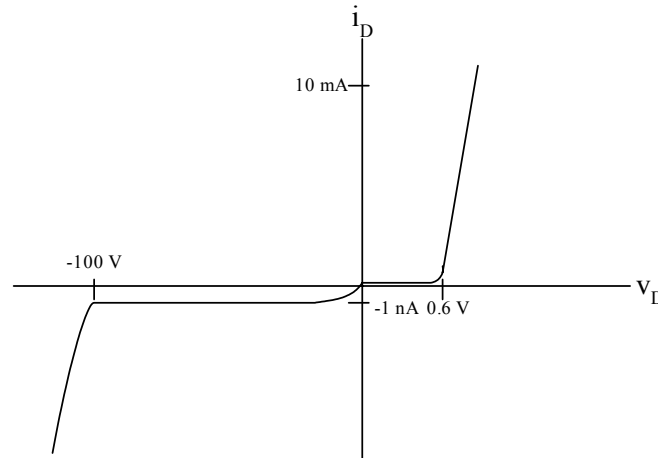


Figura 2.2: Característica Volt-ampere típica
@300K (nótese las escalas diferentes)

La figura 2.2 muestra la característica típica de un diodo de Silicio de “pequeña señal” a 300K. Las escalas diferentes permiten un mejor detalle en la representación.

En la zona de polarización directa la corriente es muy pequeña (mucho menor que 1 [mA]) mientras el voltaje directo aplicado sea menor que 0.6 [V]. Al alcanzar los 0.6[V] la corriente crece rápidamente a medida que supera dicho umbral. Se dice que la característica presenta una “rodilla” en aproximadamente 0.6[V]. A medida que la temperatura crece, el voltaje de rodilla (knee) decrece a razón de 2 [mV/K].

En la zona de polarización inversa las corrientes están típicamente en el orden de 1[nA], a temperatura ambiente. Dicha corriente crece junto con la temperatura; una buena estimación se logra suponiendo que la corriente se duplica cada vez que la temperatura sube 10K.

Al alcanzar el voltaje inverso de ruptura, la corriente crece rápidamente, como se muestra en la figura para $v_D = -100[V]$. Este valor de voltaje de ruptura varía, para diferentes tipos de diodos, entre unidades y varias centenas de [Volt].

Las especificaciones que permiten determinar la utilidad de un dispositivo para una aplicación dada son, entre otras:

- Corriente máxima que soporta en conducción (polarización directa).
- Tensión inversa máxima (antes de ruptura).

Para la corriente los límites se informan en términos de su valor continuo (o valor medio), de su valor máximo (de cresta o “peak”, en forma repetitiva y no-repetitiva) y de su valor efectivo (valor r.m.s.) La relevancia de cada uno depende de la aplicación.

Las aplicaciones más relevantes (y comunes) para este tipo de diodos se refieren a:

- Rectificación y detección,
- Recorte (clipping) de señales alternas,
- Enclavamiento (caming) de señales alternas,

las que serán revisadas más adelante.

DIODOS ZENER

La denominación Zener se aplica a diodos fabricados explícitamente para trabajar en la zona inversa de ruptura. Aún cuando la ruptura puede deberse a dos mecanismos diferentes, estos son funcionalmente indistinguibles, siendo válida entonces una descripción genérica.

Las aplicaciones de los diodos Zener se pueden definir como de referencia o comparación, requiriéndose un voltaje de ruptura constante; consecuentemente se busca la mayor verticalidad de la característica V-A en la zona de ruptura.

Se utiliza, para distinguirlos en los diagramas, una simbología modificada, la que se indica en la figura 2.3.

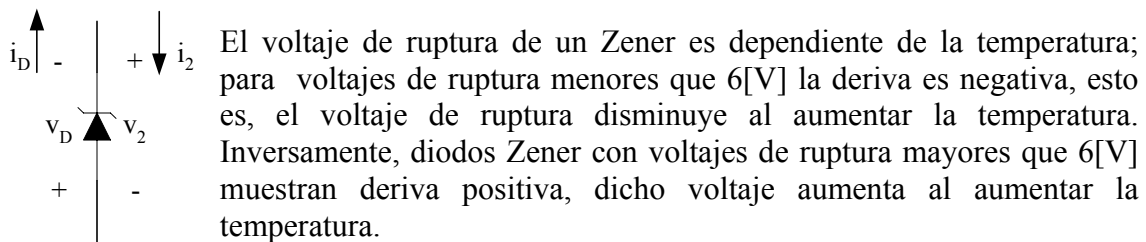


Fig.3: Símbolo de un diodo Zener

Diodos Zener con voltajes de ruptura de aproximadamente 6[V] tienden a ser independientes de la temperatura en dicha característica; además, para dichos valores se observa la mayor verticalidad. Así los Zener de 6[V] (más exactamente 6.3[V]) proporcionan el mejor comportamiento como referencias estables de voltaje.

OTROS TIPOS DE DIODOS

Existe una gran variedad de otros tipos de diodos con aplicaciones menos comunes; en pro de la generalidad sólo se mencionan:

- Diodos de capacidad variable (Varactor, Varicap)
- Diodos emisores de luz (LED)
- Diodos detectores de luz (PIN, APD)
- Diodos láser (emisores)

2.2 ANÁLISIS DE CIRCUITOS CON DIODOS MEDIANTE RECTA DE CARGA.

Dado el carácter eminentemente no-lineal de la característica V-A de un diodo, no es posible utilizar las técnicas de circuitos lineales; lo mismo es válido para la mayoría de los dispositivos electrónicos.

Un método útil para el análisis de circuitos que incluyen elementos no-lineales es de tipo gráfico, pudiendo aplicarse también en circuitos lineales.

En un elemento lineal las relaciones entre las variables de interés pueden ser descritas mediante expresiones simples, como también explicadas gráficamente. La figura 2.4 presenta un resistor (lineal).

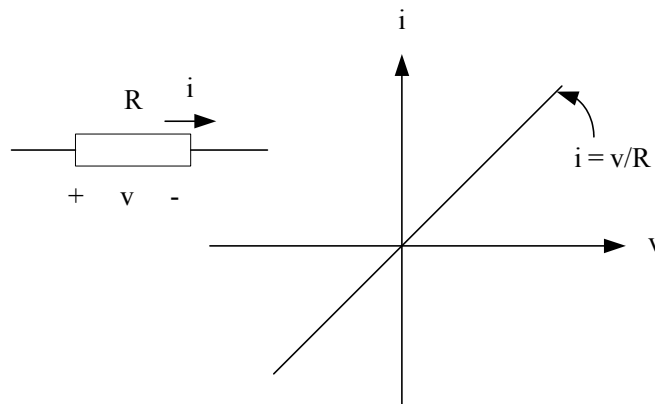


Fig. 2.4: Resistor

Considérese un circuito muy simple que incluye un diodo, como el de la figura 2.5:

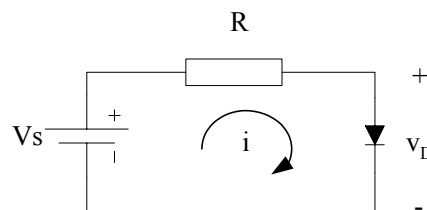


Fig. 2.5: Circuito sencillo con un diodo.

Aplicando la ley de voltaje de Kirchhoff, se puede escribir:

$$V_S = i \cdot R + v_D \quad (2.2.1)$$

Suponiendo que V_S y R son conocidos, se desea conocer la corriente i y la tensión en el diodo v_D .

La ecuación (2.2.1) muestra dos incógnitas de interés; para encontrar las soluciones se requiere una segunda ecuación, ésta corresponde o está presente en la característica V-A (gráfica) del diodo.

Se obtiene la solución graficando la ecuación (2.2.1) sobre el mismo sistema de coordenadas (eje) de la curva V-A del diodo. Dado que la ecuación (2.2.1) es lineal, su gráfico corresponde a una recta trazable identificando dos puntos de ella. Dos puntos (pares) simples de graficar (evaluar) se encuentran anulando, una a la vez, una y otra variable. Así, si $i_D = 0$ se tendrá $v_D = V_S$ y, si $v_D = 0$, se tendrá $i = V_S/R$.

La figura 2.6 resume lo anterior:

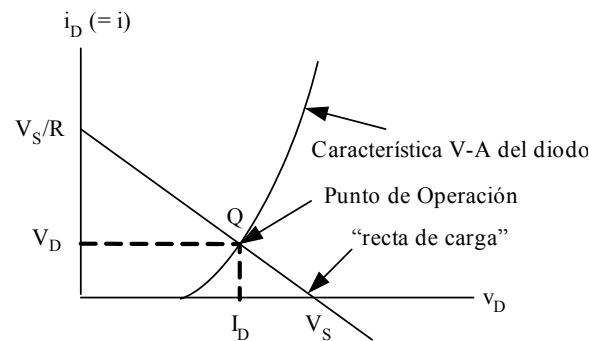


Fig. 2.6: Solución gráfica del circuito de la figura 2.5

La solución obtenida, punto Q (quiescent), satisface tanto la característica V-A del diodo, como la ec. (2.2.1), representada por la recta. Desde el punto Q se obtienen los valores de i (I_D) y v_D (V_D).

El método provee además fácil visualización del efecto de variaciones, tanto de V_S (desplazamientos paralelos de la recta), como de R (pivoteo de la recta manteniendo fijo el punto de intersección con el eje de abscisas, v).

2.3 REGULADOR DE VOLTAJE CON DIODO ZENER.

En la figura 2.7 se presenta un circuito de aplicación de diodo Zener como regulador de voltaje (de tipo “paralelo”).

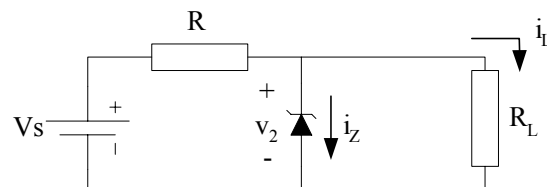


Fig. 2.7: Regulador con diodo Zener ($v_Z = -v_D$; $i_Z = -i_D$)

La situación a resolver corresponde a necesidades de proporcionar una tensión estable (constante) a una carga, representada por R_L . La estabilidad de dicha tensión debe

mantenerse ante variaciones de la propia carga R_L , o de la fuente V_S , o de su resistencia interna R (pudiendo estas variaciones coexistir).

La figura 2.8 muestra la característica V-A en operación Zener, así como la hipérbola de máxima disipación (o límite de potencia).

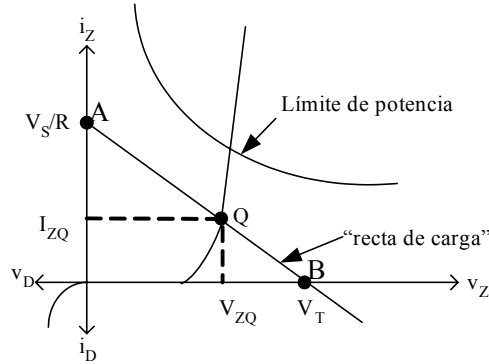


Fig. 2.8: Solución gráfica

Para trazar la “recta de carga” es necesario o conveniente reducir la circuitería externa al diodo, esto es, obtener el equivalente Thèvenin visto por los terminales del zener; tal equivalente se indica en la figura 2.9.

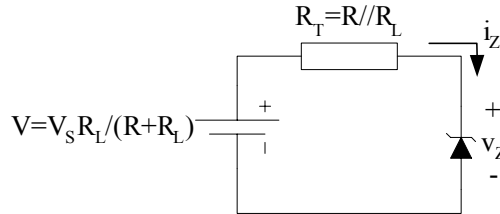


Fig. 2.9: Circuito simplificado

Para trazar la recta de carga se procede:

a) haciendo $v_Z = 0$, se obtiene

$$i_Z = \frac{V_T}{R_T}$$

donde $V_T = \frac{V_S R_L}{R + R_L}$, y $R_T = \frac{R \cdot R_L}{R + R_L} = R // R_L$

$$\text{Así, } i_Z|_{v_Z=0} = \frac{V_T}{R_T} = \frac{V_S R_L}{R + R_L} \cdot \frac{R + R_L}{R \cdot R_L} = \frac{V_S}{R}$$

b) haciendo $i_Z = 0$, se obtiene:

$$v_Z \Big|_{i_Z=0} = V_T = \frac{V_S R_L}{R + R_L}$$

la recta aparece trazada en la misma figura 2.8 anterior.

ANÁLISIS DE VARIACIONES

a) Variaciones de V_S (puede ejemplificar caso como el de un generador-rotatorio- de C.C. que varía su velocidad).

Si V_S crece, el punto A se desplazará hacia la derecha, esto es, la recta se alejará del origen del sistema y el punto Q subirá por la característica V-A; dada la verticalidad de la característica, la variación experimentada por V_{ZQ} será pequeña. Para disminución de V_S los desplazamientos serán –todos- en sentido opuesto.

El gráfico permite también estimar (y calcular) límites máximos para variaciones de V_S , manteniendo estable la tensión en la carga y no excediendo la disipación o corriente máxima en el zener.

b) Variaciones de R (puede ejemplificar casos como el de una pila que se agota o batería que se descarga).

Si R crece el punto A se desplazará hacia abajo y el punto B hacia la izquierda (V_T disminuye), la recta se acerca al origen y Q baja por la característica del zener. Nuevamente, dada la verticalidad de la curva V-A, la variación de V_{ZQ} será pequeña.

c) Variaciones de R_L (una gran variedad de cargas presenta este tipo de comportamiento).

Si R_L disminuye el punto A se mantiene estático, pero el punto B se desplaza hacia la izquierda (V_T disminuye). Como antes, la verticalidad de la curva V-A del zener resulta en que la variación de V_{ZQ} sea pequeña.

2.4 EXPRESIONES ANALÍTICAS SIMPLIFICADAS.

LA ECUACIÓN DE SHOCKLEY

Asumiendo algunas simplificaciones, la relación entre voltaje y corriente en un diodo de silicio de pequeña señal se expresa por:

$$i_D = I_S \left[e^{\frac{v_D}{nV_T}} - 1 \right] \quad (2.4.1)$$

conocida por como la ec. de Shockley.

I_s se llama “corriente de saturación” y su valor es del orden de 1×10^{-14} [A] a 300K (se duplica por cada aumento de 5K en el silicio).

n es el “coeficiente de emisión”, con valores entre 1 y 2; asumir la unidad produce buenas aproximaciones a los valores reales.

V_T es el “voltaje térmico“, determinado por:

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (2.4.2)$$

con

T : temperatura [K]

k : constante de Boltzmann = 1.38×10^{-23} [J/K]

q : carga del electrón = 1.6×10^{-19} [C]

Así, a 300K, $V_T = 0.026$ [V]

Debido a las aproximaciones simplificadoras implícitas, la expresión de (2.4.1) produce resultados aceptables para corrientes i_D entre 0.01[μA] y 10[nA].

Para valores de v_D de algunas décimas de Volt, la exponencial de la ecuación (2.4.1) es mucho mayor que 1, y se puede entonces aproximar:

$$i_D = I_s \cdot e^{\frac{v_D}{0.026}} \quad (2.4.3)$$

Para corrientes grandes debe incluirse el efecto resistivo (óhmico) del material semiconductor en cada lado de la juntura, aumentando la complejidad de las expresiones (y su resolución).

Si bien el tratamiento analítico puede lograr –en algunas ocasiones- resultados útiles, la gran mayoría de las aplicaciones puede ser tratada con métodos más simples, basados en modelos simplificados.

2.5 EL MODELO IDEAL DEL DIODO.

Un modelo útil para una gran variedad de instancias de análisis es el “ideal”, que describe al diodo como una válvula unidireccional, esto es, como un conductor perfecto cuando es polarizado directamente (positivo en el ánodo, negativo en el cátodo), y como un aislador perfecto cuando es polarizado negativamente.

La figura 2.10 grafica el modelo ideal

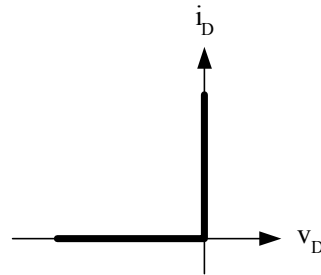


Fig. 2.10: Curva V-A del modelo ideal.

Si i_D es positiva, v_D es cero, y se dice que el diodo está en estado On (encendido).

Si v_D es negativo, i_D es cero, y se dice que el diodo está en estado Off (apagado).

El modelo ideal se puede utilizar si el contexto del circuito se puede presumir que los voltajes serán de magnitud suficiente para asegurar uno u otro estado de operación de los diodos, y si, frente a esos niveles de voltaje y corriente, los voltajes de conducción (rodilla) y las corrientes inversas resultan despreciables. También resulta muy útil el modelo ideal si lo que se requiere es la comprensión del funcionamiento de un circuito (cualitativo) más que un análisis exacto (cuantitativo).

Cuando se analiza un circuito con diodos modelados como ideales, no se puede conocer anticipadamente en qué estado se encontrará cada uno. La experiencia ayuda a acertar en las obligadas suposiciones. El método consiste en suponer una cierta combinación de estados de los diferentes diodos involucrados; con dichos estados supuestos se reemplazan los diodos por cortocircuitos (los supuestos en estado On) y por circuitos abiertos (los supuestos en estado Off). El circuito se ve así significativamente simplificado permitiendo una fácil evaluación de tensiones y corrientes.

Obteniendo corrientes y tensiones en los puntos (nodos) donde estaban los diodos, éstas se comparan con las condiciones necesarias para los estados supuestos; si hay concordancia significa que la combinación de estados supuesta es correcta; obviamente, si no hay concordancia debe intentarse otra combinación de estados.

Mayor claridad puede lograrse aplicando el procedimiento descrito en un ejercicio simple, como sigue.

Ejemplo: Analizar el circuito de la figura 2.11 usando modelo ideal para los diodos D_1 y D_2

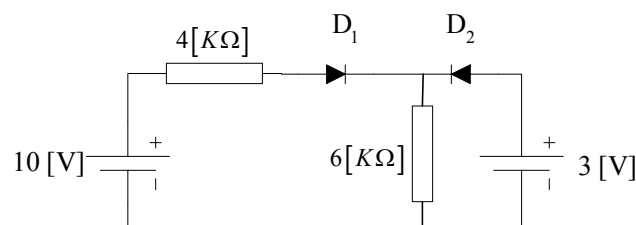
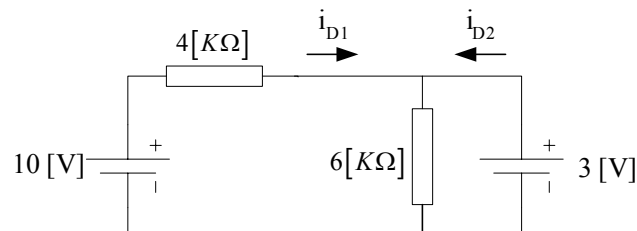


Figura 2.11: Circuito con dos diodos.

Dado que hay dos diodos, existen 4 alternativas:

		D ₂	
		ON	OFF
D ₁	ON	a	b
	OFF	c	d

Suponiendo la alternativa a (ambos diodos en estado ON), el circuito se simplifica hasta:



Evaluable las corrientes, se obtiene:

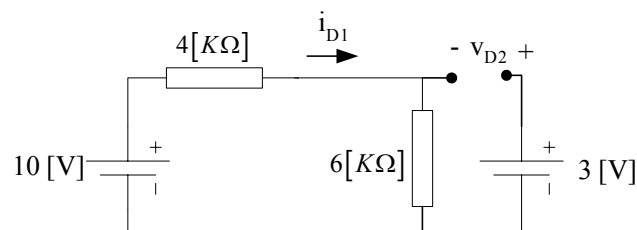
$$i_{D1} = (10 - 3) / 4 = 1.75 [mA]$$

$$i_{D2} = i_{R6K} - i_{D1}$$

$$i_{D2} = \frac{3}{6} - 1.75 = -1.25 [mA]$$

El valor negativo obtenido para i_{D2} implica que D₂ no está en estado ON y, por lo tanto, la alternativa no es la correcta.

Si se analiza la alternativa b (D₁ en ON y D₂ en OFF), el circuito queda como:



Evaluable,

$$i_{D1} = 10 / (4 + 6) = 1 [mA]$$

$$v_{D2} = 3 - 10 \cdot \frac{6}{4 + 6} = -3 [V]$$

Efectivamente, entonces, i_{D1} positiva confirma el estado ON de D_1 , y v_{D2} negativo confirma el estado OFF de D_2 .

Para circuitos con N diodos las alternativas a analizar serían 2^N , lo que puede resultar muy extenso; un buen número de estas 2^N alternativas son fácilmente descartables, particularmente teniendo algo de práctica; sólo unas pocas alternativas merecerán atención.

2.6 MODELO CON LINEALIDAD A TRAZOS.

Algunas aplicaciones cuya solución requiere de mayor precisión obligan a mejorar (complicando) el modelo anterior, haciendo consideración tanto del voltaje de rodilla (diferente de 0[V]) como del carácter finito de la pendiente de la curva V-A.

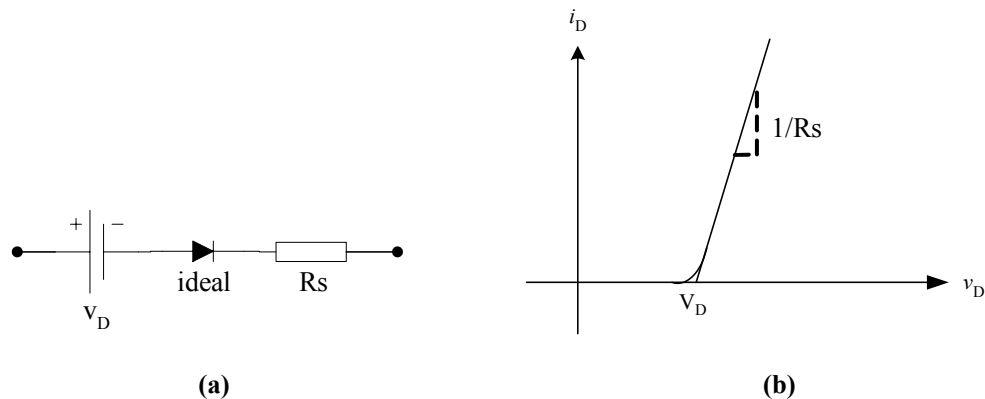


Figura 2.12: Modelo con linealidad por trazos

(a) Representación del modelo.

(b) Curva V-A aproximada mediante trozos de rectas.

APLICACIONES CORRIENTES.

2.7 CIRCUITOS DE RECTIFICACIÓN.

La función básica de un circuito de rectificador es convertir potencia disponible desde una fuente de corriente alterna en potencia de tensión continua.

Las aplicaciones más comunes en que es requerida esta conversión son en fuentes de poder (para alimentación de circuitería, o polarización) y en cargadores de baterías.

Otras aplicaciones son la demodulación (“detección”) de señales de radio AM y la conversión en voltímetros basados en galvanómetros (C.C) para medir tensiones de C.A.

RECTIFICADOR DE “MEDIA ONDA”.

El circuito de la figura 2.13 constituye un rectificador básico de media onda, con fuente de alimentación alterna sinusoidal y carga resistiva.

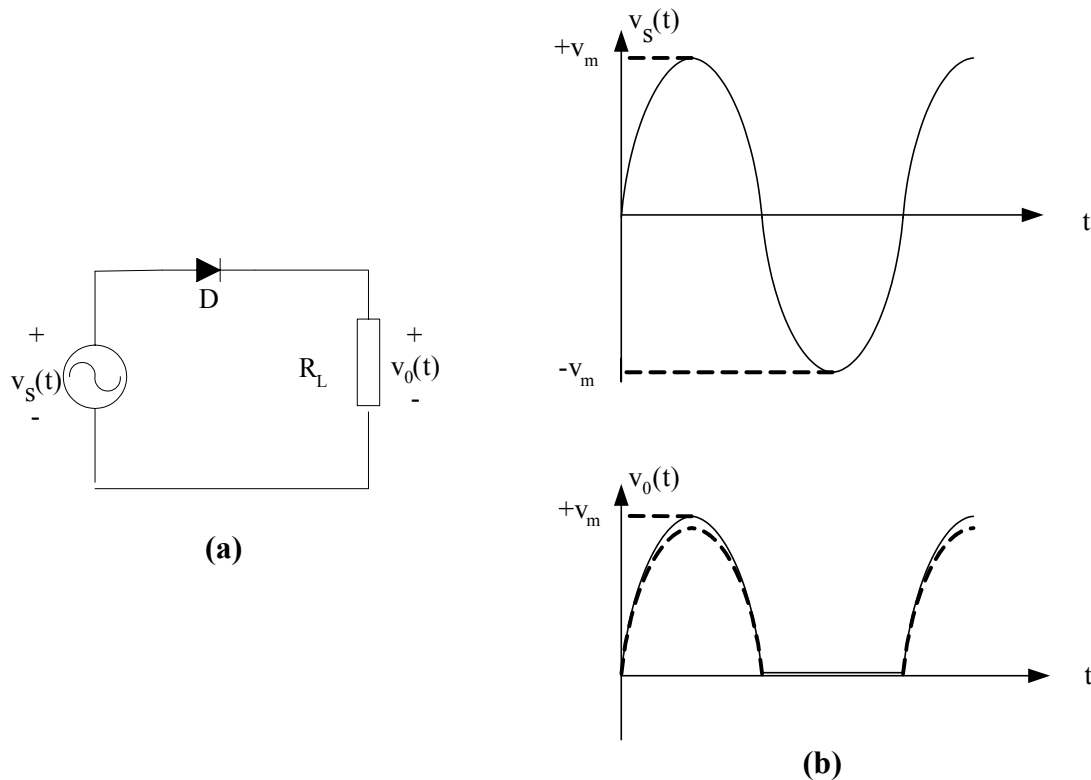


Figura 2.13: Rectificador básico de media onda.

(a) Esquemático del rectificador.

(b) Señales de entrada y salida del rectificador.

Utilizando el modelo ideal para el diodo, es fácil describir el funcionamiento:

- Cuando la señal de entrada $v_s(t)$ tiene valores positivos, esto es durante todo un semiciclo o media onda, el diodo se polariza directo, asume estado ON y se comporta como cortocircuito; así la tensión $v_s(t)$ es aplicada directamente a R_L , como aparece en $v_o(t)$.
- Cuando $v_s(t)$ tiene valores negativos –esto es, durante el otro semiciclo- el diodo queda con polarización inversa (estado OFF) y se comporta como circuito abierto; no hay circulación de corriente y la tensión $v_o(t)$ es nula.

En resumen, la carga recibe tensión sólo durante los semiciclos positivos de $v_s(t)$, tal como lo indica la gráfica de $v_0(t)$. La curva sólida corresponde a la utilización del modelo ideal del diodo; la curva segmentada considera la (pequeña) reducción debida al voltaje de rodilla finito del diodo.

La señal $v_0(t)$ tiene valor medio finito, lo que corresponde al voltaje continuo; superpuesto a dicho valor existe además un voltaje alterno (constituido por una sumatoria de sinusoidales de frecuencias armónicas de la frecuencia original de $v_s(t)$).

RECTIFICADOR DE MEDIA ONDA CON FILTRO CAPACITIVO (Figura 2.14)

Cuando se requiere aumentar el valor medio o continuo, y reducir las componentes alternas, en la tensión proporcionada por un circuito rectificador, el método más popular consiste en la utilización de un condensador (de gran valor) en paralelo con los terminales de salida, esto es, con carga.

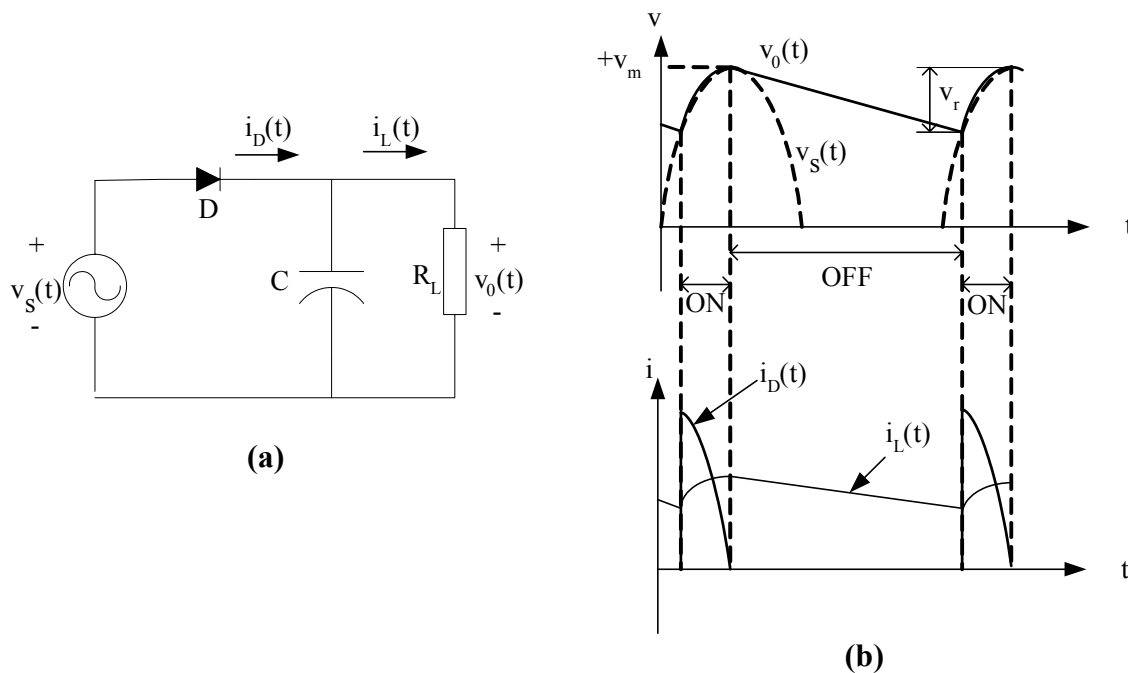


Figura 2.14: Rectificador de media onda con filtro capacitivo.

(a) Esquemático del rectificador

(b) Señales de interés.

Cuando $v_s(t)$ alcanza su peak positivo carga al condensador C hasta dicho peak $+v_m$. Al comenzar a disminuir v_s , la tensión en el capacitor, aplicado al cátodo, lleva al diodo a estado OFF.

El capacitor se descarga a través de R_L disminuyendo su tensión; al semiciclo siguiente, el diodo conducirá nuevamente cuando $v_s(t)$ alcance y supere la tensión en el condensador.

Para un análisis cualitativo del comportamiento de este tipo rectificador (con filtro) pueden utilizarse métodos computacionales –mejorando previamente el modelo (incluyendo p.ej. resistencia interna de la fuente $v_s(t)$)– o bien, utilizar algunos nomogramas disponibles (Ref: DAYAL, “Power rectification using silicon diodes”. Curvas de Schade).

Comparando $v_0(t)$ de la figura 2.13 con la de la figura 2.14 se aprecia que esta última ha aumentado el nivel medio, disminuyendo la magnitud de las componentes alternas, esto es, ha mejorado el proceso de rectificación.

RECTIFICADOR DE ONDA COMPLETA

En referencia al circuito anterior (figura 2.14) es claro que la magnitud total de las componentes alternas (V_R) podría ser reducida, con el consecuente aumento del valor medio por medio de aumentar el tamaño del condensador; tal procedimiento puede resultar poco práctico por diversas razones. Otra opción para el propósito anterior puede encontrarse reduciendo el tiempo durante el cual el condensador se descarga a través de R_L ; tal solución es la que se logra con un rectificador de onda completa, ya sea en versión “puente de diodos” o “de punto medio”.

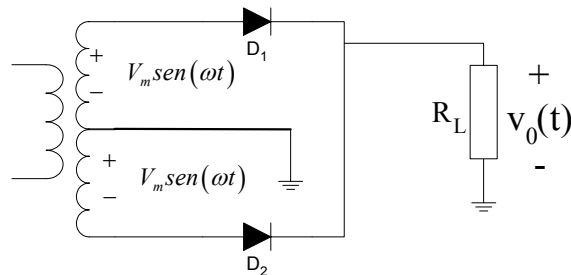


Figura 2.15: Rectificador de onda completa de “punto medio”

Cuando $V_m \text{sen}(\omega_m t)$ está en semiciclo positivo la conducción es a través de D_1 . D_2 se mantiene en estado OFF. Para el sentido negativo de $V_m \text{sen}(\omega_m t)$, la conducción es por D_2 . R_L recibe ambos semiciclos con igual polaridad.

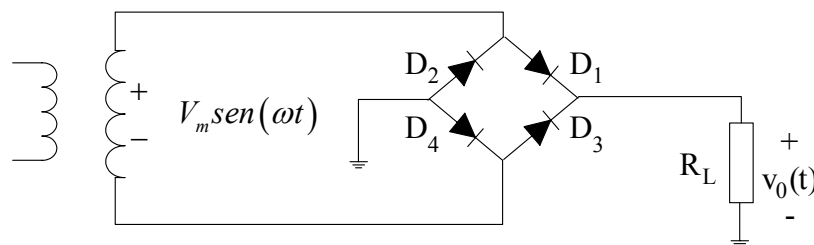


Figura 2.16: Rectificador de onda completa de “puente de diodos”.

Cuando $V_m \sin(\omega_m t)$ está en sus semiciclos positivos, se establece la conducción por D_1 , R_L y D_4 ; D_2 y D_3 permanecen OFF. Para los semiciclos negativos de $V_m \sin(\omega_m t)$ la conducción es a través de D_3 , R_L y D_2 ; D_1 y D_4 permanecen OFF.

Tanto en los semiciclos positivos como en los negativos, la corriente circula por R_L entrando por el terminal positivo ($v_0(t)$ positivo).

2.8 CIRCUITOS MODIFICADORES DE FORMA DE ONDA

Tal como existe una amplia variedad de circuitos cuyo propósito es modificar una forma de onda aplicada en su entrada, para proporcionar otra diferente –pero relacionada- en su salida, también son variadas las técnicas más adecuadas para su tratamiento. Algunos de estos circuitos son realizados en base a diodos, destacándose los *recortadores* y los *enclavadores*.

CIRCUITOS RECORTADORES (CLIPPER CIRCUITS)

Son empleados principalmente como etapas de protección, esto es, para impedir que la tensión en la entrada de una etapa exceda cierto nivel (recortando cualquier exceso eventual). Una configuración simple se muestra en la figura 2.17.

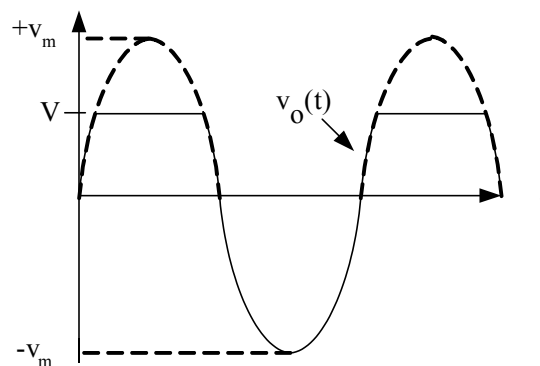


Figura 2.17: Recortador de un nivel (positivo).

Mientras la señal de entrada se mantiene en valores inferiores a V , el diodo D permanece en estado OFF (equivalente a circuito abierto), no hay circulación de corriente y la tensión se replica en la salida.

Cuando $V_m \sin(\omega_m t)$ supera la tensión de la batería V , el diodo adopta estado ON, se comporta como cortocircuito y la tensión observable en la salida no supera el valor V .

La diferencia entre la curva sólida y la curva segmentada corresponde a la caída de tensión en R .

Es posible construir recortadores para 2 niveles (positivos, negativos o en combinación), en los que la salida es réplica de la entrada mientras ésta se mantenga entre los 2 niveles.

CIRCUITOS DE ENCLAVAMIENTO (CLAMP CIRCUITS)

En ciertas aplicaciones se requiere que la señal, sin perder su forma de onda original, se mantenga confinada sobre o bajo un voltaje especificado de umbral; para el propósito se agrega a la señal un nivel continuo tal que impida que sus “peaks” excedan el umbral especificado. La función es normalmente realizada en base a diodos.

El circuito de la figura 2.18 enclava los peaks positivos de la señal de entrada en -5V (tensión de batería).

Considerando el diodo como ideal y el condensador muy grande, las excursiones positivas de $v_s(t)$ cargan el condensador al valor peak

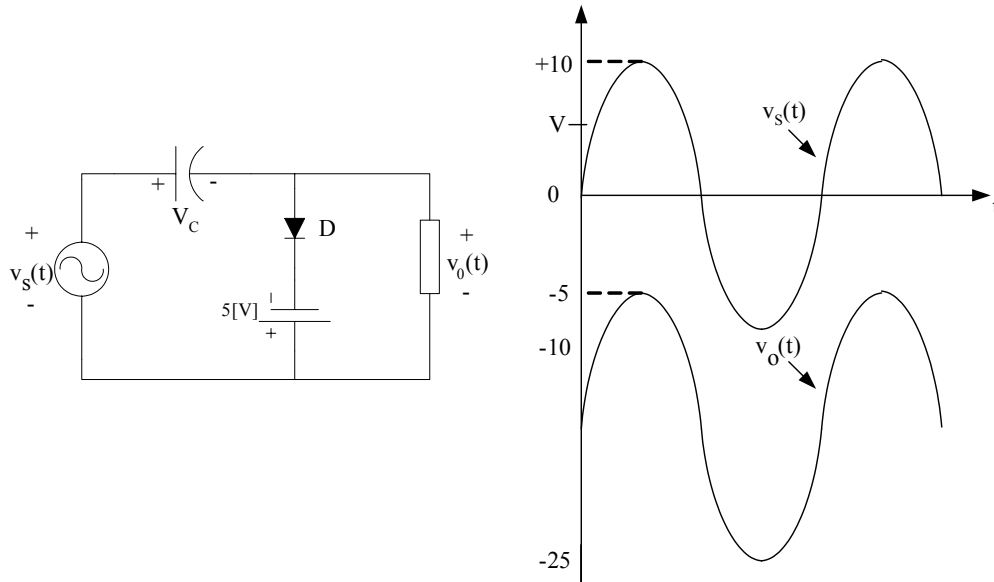


Figura 2.18: Enclavador

Considerando el diodo como ideal y el condensador muy grande, las excursiones positivas de $v_s(t)$ cargan el condensador al valor peak, a través de la conducción del diodo. Al disminuir la tensión de entrada el diodo asume estado OFF (circuito abierto) y la salida estará dada por:

$$v_o(t) = v_s(t) - V_c \quad (2.8.1)$$

Las curvas de la figura 2.18 suponen $v_s(t) = 10\sin(\omega t)$.

Es posible naturalmente producir el enclavamiento en diferentes combinaciones de peak enclavado (positivo o negativo) y el voltaje al cual se enclava (positivo o negativo), por medio de diferentes polaridad de la batería y orientación (sentido) del diodo.

Como criterio de diseño inicial se elige el producto RC (constante de tiempo) un orden de magnitud mayor que el período de la señal de entrada ($T = 2\pi/\omega$).

2.9 CIRCUITOS LÓGICOS ELEMENTALES

Algunas funciones básicas de decisión pueden ser efectuadas mediante circuitos simples basados en diodos, suponiendo que las variables (señales) de entrada son de tipo discreto binario, esto es, que pueden asumir sólo uno de dos posibles niveles.

Típicamente se utiliza +5V como nivel alto (“1 lógico”) y 0V como nivel bajo (“0 lógico”).

La figura 2.19 muestra la realización de la función lógica OR de tres señales binarias:

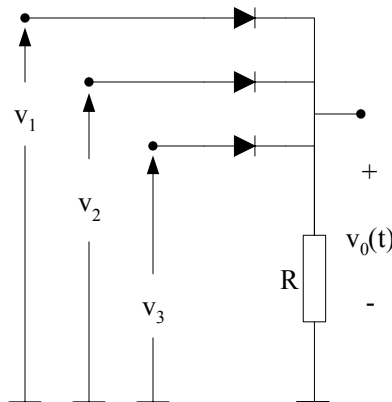


Figura 2.19: Función OR

Considerando los diodos como ideales, es claro que v_0 será igual a +5[V] si cualquiera de las entradas v_1 a v_3 es igual a dicho valor. Si las tres entradas son –simultáneamente– iguales a 0[V], la salida v_0 también será 0[V].

Así,

$$\begin{aligned} v_0 &= v_1 \text{ OR } v_2 \text{ OR } v_3 \\ v_0 &= v_1 + v_2 + v_3 \Big|_{\text{binario}} \end{aligned} \quad (2.8.2)$$

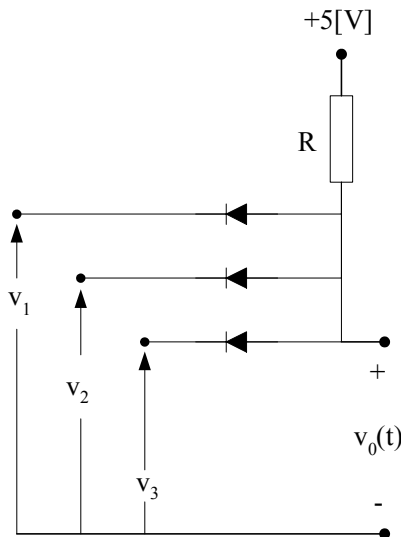


Figura 2.20: Función AND

Las figura 2.20 muestra la función AND. Si cualquiera de las señales v_1 a v_3 asume el estado 0[V], forzará la conducción del diodo correspondiente, llevando v_0 a 0[V]. Sólo si las tres entradas son –simultáneamente- iguales a +5[V], ningún diodo conducirá, no habrá circulación de corriente y la salida v_0 será igual al valor de la fuente, esto es, +5[V].

Así,

$$\begin{aligned} v_0 &= v_1 \text{ and } v_2 \text{ and } v_3 \\ v_0 &= v_1 \cdot v_2 \cdot v_3 \Big|_{\text{binario}} \end{aligned} \quad (2.8.3)$$

Si se considera el carácter no-ideal de los diodos, esto es, el voltaje de rodilla finito, se puede deducir que no es posible conectar varias de estas configuraciones en cascada (serie), pues la acumulación de caídas de tensión provocará un significativo alejamiento de los dos valores predefinidos. Esta limitación restringe el campo de aplicación de la lógica basada en diodos a sólo funciones elementales simples, sin embargo, capaces de satisfacer en forma sencilla algunos requerimientos.

2.10 CONMUTADOR (SWITCH) ANALÓGICO

Una función requerida con relativa frecuencia es la de controlar (conmutar) una señal analógica mediante señales de control discretas, en reemplazo de un interruptor de tipo mecánico. Un esquema simple de realización se indica en la figura 2.21:

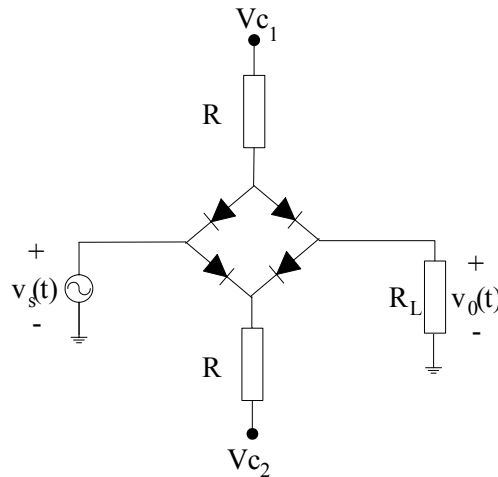


Figura 2.21: Switch análogo

Las señales de control V_{c1} y V_{c2} deben asumir sólo uno de dos valores posibles ($+V$ y $-V$) y, además, hacerlo en forma complementaria.

Si $V_{c1} = +V$ (y $V_{c2} = -V$), todos los diodos asumen estado ON; suponiendo el modelo ideal, la salida v_o queda conectada a la entrada v_s .

Si $V_{c1} = -V$ (y $V_{c2} = +V$), los diodos asumen estado OFF (circuito abierto) y la salida queda flotante.

La magnitud de V debe ser significativamente mayor que el valor peak de la señal de entrada.

2.11 APLICACIONES LINEALES

La utilización de dispositivos no-lineales en aplicaciones lineales se basa en conceptos y técnicas de POLARIZACIÓN y PEQUEÑA SEÑAL.

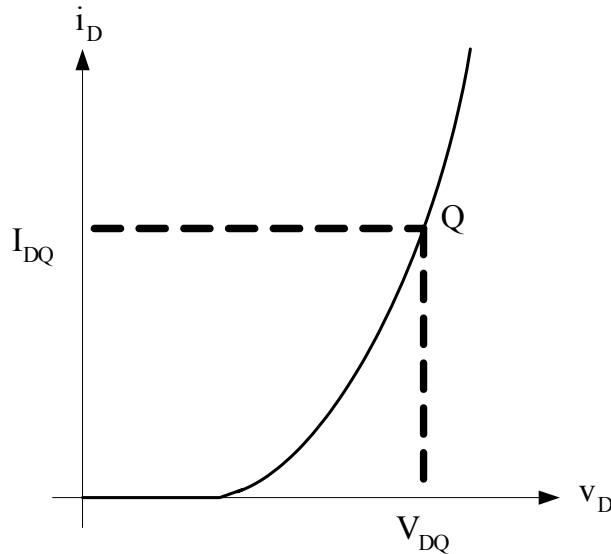


Figura 2.22: Característica V-A de un diodo de silicio.

Revisando nuevamente la característica V-A de un diodo de silicio en la zona de conducción, lo que se repite en la figura 2.22, el punto identificado Q (quiescent, estacionario) es alcanzado “polarizando” el diodo mediante fuente de tensión C.C y resistencia.

Considérese ahora que, debido a algún tipo de excitación, el punto Q es forzado a desplazarse pequeñas variaciones respecto de su posición original. Mientras esas variaciones (tanto de la corriente como de la tensión) sean pequeñas respecto de los valores de polarización (I_{DQ} ; V_{DQ}), el comportamiento del diodo podrá ser modelado como una resistencia, cuyo valor corresponde al recíproco de la pendiente alrededor del punto Q.

El concepto de “pequeña señal” es válido mientras las excursiones del punto Q no lo lleven a zonas de valor de pendiente significativamente diferente.

Controlando la posición del punto Q se tendrá control sobre el valor resistivo que modela el comportamiento del diodo, esto es, se dispondrá de un resistor controlado por voltaje (voltaje que polariza al diodo).

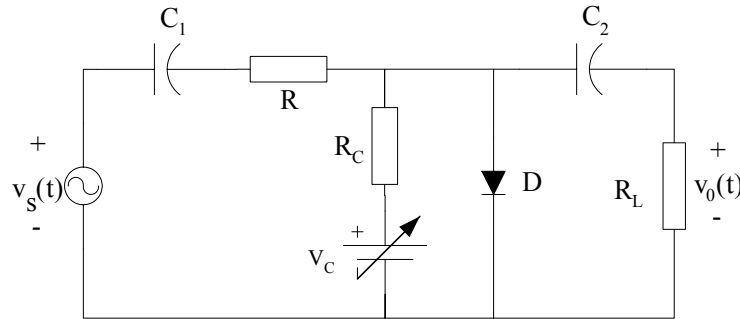


Figura 2.23: Atenuador controlado

El circuito de la figura 2.23 presenta un ejemplo de utilización que aplica los conceptos anteriores.

El circuito es un reemplazo electrónico de un potenciómetro de acción (mecánica) rotatoria o deslizante.

Los condensadores C_1 y C_2 son de valor suficientemente grande como para ser considerados “cortocircuito” a la frecuencia de la señal; para C.C. se comportan como circuito abierto.

La fuente de tensión continua V_C y la resistencia R_C determinan la polarización del diodo, p.ej. el punto Q de la figura 2.22.

Para “pequeña señal”, esto es, magnitudes de v_s que provoquen sólo pequeños desplazamientos del punto Q, el circuito se modela como se indica en la figura 2.24.

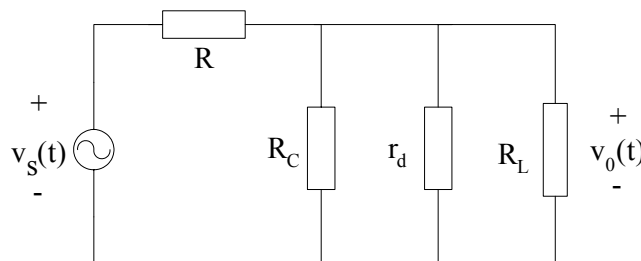


Figura 2.24: Modelo de pequeña señal

Los condensadores han sido reemplazados por cortocircuitos, al igual que la fuente V_C . El diodo es reemplazado por su RESISTENCIA DINÁMICA r_d , esto es, el recíproco de la pendiente de su característica en el entorno (inmediato) del punto Q.

La salida $v_0(t)$ es producto de una división de la tensión de entrada $v_s(t)$. El divisor de tensión consta de una fracción formada por R y otra fracción constituida por las resistencias R_C , r_d y R_L en paralelo.

En resumen,

$$v_0(t) = v_s(t) \left[\frac{R_C // r_d // R_L}{R + R_C // r_d // R_L} \right] = v_s(t) \cdot K \quad (2.11.1)$$

de donde se aprecia la razón de atenuación (entre []), la cual se puede variar por medio de r_d .

Si V_C se aumenta, el punto Q se desplazará alejándose del origen hacia una zona de mayor pendiente de curva, esto es, de menor resistencia dinámica, y K disminuye. Si, a la inversa, V_C disminuye, el punto Q se acerca al origen, hacia una zona de menor pendiente o mayor resistencia dinámica y K aumenta.

Si $v_s(t)$ es de amplitud constante, $v_0(t)$ variará su amplitud proporcionalmente a K.

Un ejemplo de aplicación práctica se encuentra en grabadoras con control automático del nivel de grabación, aplicándose un esquema de realimentación como el del diagrama de bloques de la figura 2.25:

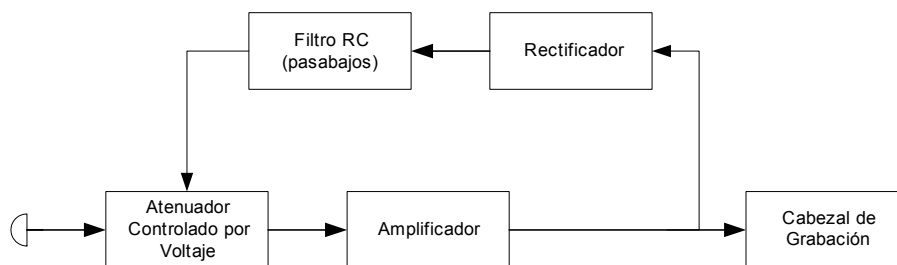


Figura 2.25: Control automático de nivel de señal

El filtro (RC) pasabajos extrae el valor medio o continuo de la señal rectificada. Si la señal de entrada aumenta su valor, el nivel continuo crece, disminuyendo la razón en el atenuador controlado.

El propósito de un sistema de este tipo es poder proporcionar un alto grado de amplificación a las señales débiles, pero previniendo que cuando éstas señales de entrada sean fuertes, puedan provocar saturaciones (con la siguiente distorsión).

De los conceptos y técnicas revisadas hasta ahora es posible extraer los elementos de análisis –e incluso algunos de diseño– para dos de los bloques del esquema. Capítulos siguientes abordarán temas relativos a otros bloques funcionales.