

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA
Carrera: Ingeniería Electromecánica, **Curso:** Electrónica Analógica, **Unidad 1:** El diodo semiconductor.

Autor: Dr. David Lara Alabazares

1.3. El diodo y sus aplicaciones

Competencias a desarrollar	
Analizar e identificar las principales aplicaciones del Diodo.	Diseñar y construir circuitos convertidores de AC-CD.
Actividades de aprendizaje	
- Identificar las características técnicas de los diodos. - Distinguir los circuitos con diodos rectificadores. - Aplicar las conexiones en serie y paralelo e los diodos rectificadores.	- Elaborar circuitos rectificadores con diodos. - Medir los principales voltajes de los circuitos rectificadores. - Ilustrar las formas de onda de cada uno de los circuitos rectificadores.

1.3.1. Introducción

En este capítulo se presenta el dispositivo de potencia que permite la conversión de corriente alterna (CA) a corriente continua (CC) o directa (CD). Este dispositivo es el diodo semiconductor y se usa en un circuito rectificador. Entonces, se dará una descripción del diodo rectificador o simplemente el diodo. El diodo conduce en modo unidireccional y se comporta como un interruptor que se cierra automáticamente cuando en su terminal llamada ánodo se aplica una tensión positiva con respecto a la otra terminal llamada cátodo; en este caso se dice que el diodo está en polarización directa. Por otro lado, el diodo se comporta como un interruptor que se abre automáticamente cuando la tensión aplicada al ánodo es más negativa que la tensión aplicada al cátodo; en este caso el diodo esta en polarización inversa. En la figura 3.1 se muestra el símbolo esquemático del diodo y sus circuitos equivalentes para cada caso de polarización. Los diodos que se utilizan para la fabricación de convertidores de C.A. a C.C. son de silicio, aunque también existen diodos fabricados de germanio. Al estudiar los rectificadores de potencia, debido a las grandes magnitudes de corriente y voltaje que manejan se hacen las siguientes consideraciones:

- Existe una corriente nula en la fase de polarización inversa
- Hay una resistencia interna del diodo (R_d) constante durante la conducción directa

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA

Carrera: Ingeniería Electromecánica, **Curso:** Electrónica Analógica, **Unidad 1:** El diodo semiconductor.

Autor: Dr. David Lara Alabazares

Por lo cual las características voltamperométricas más aproximadas son las que se indican en la figura 3.1.
Nota: Estas no son las características reales de un diodo, solo son las consideraciones para simplificar el estudio de rectificadores de potencia.

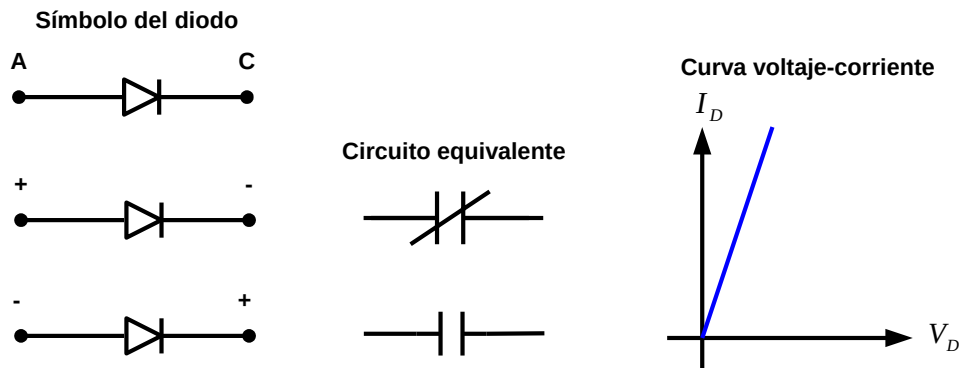


Figura 3.1. Esquemático del diodo semiconductor y curva de voltaje-corriente del diodo ideal.

1.3.2 Características técnicas de los diodos

Las características técnicas de los diodos pueden ser clasificadas como sigue:

1. Características eléctricas estáticas y dinámicas
2. Características térmicas estáticas y dinámicas
3. Características geométricas y mecánicas

Los fabricantes generalmente dan cada una de estas características para una serie de diodos así como sus valores límites de operación, a continuación se mencionan las características más comunes.

Tabla 3.1 Características de los diodos

Símbolo	Description	Descripción	Unidades
I_F	Average Rectified Forward Current	Corriente en directa rectificada	A
I_{FM}	Max Peak Forward Current	Máximo pico de corriente directa	A
$I_{F(AV)}$	Forward Average Max current	Máxima corriente media	A
I_{FRM}	Peak Repetitive Forward Current	Máxima corriente de pico en el transitorio repetitiva	A
I_{FSM}	Non Repetitive Peak Forward Surge Current	Máxima corriente de pico transitoria no deseable	A
I_R	Reverse current	Corriente inversa	μA

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA
Carrera: Ingeniería Electromecánica, **Curso:** Electrónica Analógica, **Unidad 1:** El diodo semiconductor.

Autor: Dr. David Lara Alabazares

I_{RM}	Max Peak reverse current	Máxima corriente inversa	μA
V_F	Forward voltage	Voltaje en directa	V
V_{FM}	Forward max voltage	Máximo voltaje en directa (máxima tensión en las cabezas de la unión en estado de conducción)	V
V_{RRM}	Peak repetitive reverse voltage	Máxima tensión inversa repetitiva	V
t_{rr}	Reverse Recovery Time	Tiempo de recuperación inversa	μS
I^2t	Max I^2t for fusing	Integral del cuadrado de I_{FSM} en un intervalo de 10ms	A^2s
T_J	Operation Junction Temperature	Máxima temperatura de la unión	$^{\circ}C$
R_{j-c}	Thermal resistance union to case	Res. térmica unión-encapsulado	$^{\circ}C/W$
Z_{j-c}	Thermal impedance union to case	Impedancia térmica	$^{\circ}C/W$

1.3.3 Circuitos con el diodo rectificador

A continuación se presentan los circuitos rectificadores más comunes y el procedimiento de cálculo de las principales variables eléctricas. Pero antes de presentar dichos circuitos se darán algunas definiciones

Corriente media: Prácticamente, se define como el valor medio de la suma de los valores instantáneos de corriente, en un periodo de tiempo T . Por lo tanto, una corriente alterna que tenga la mitad de sus valores instantáneos positivos y la otra mitad negativos, tendrá un valor medio igual a cero. Sin embargo, algunas veces interesa el valor medio de la mitad de una señal senoidal o sea medio periodo ($T/2$), el cual se puede obtener a través de la formula siguiente:

$$I_{med} = 0.637I_{max} \quad (3.1)$$

Corriente eficaz: Teniendo en cuenta el efecto térmico de una corriente alterna se puede definir la corriente eficaz como una corriente alterna de intensidad de un ampere que al circular por una determinada resistencia óhmica produce la misma cantidad de calor que si pasara una corriente continua de un ampere.

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA

Carrera: Ingeniería Electromecánica, **Curso:** Electrónica Analógica, **Unidad 1:** El diodo semiconductor.

Autor: Dr. David Lara Alabazares

Rectificador de Media Onda

El circuito más simple que puede examinarse con una señal variable en el tiempo se muestra en la figura 3.2, y se utilizará el modelo del diodo ideal.

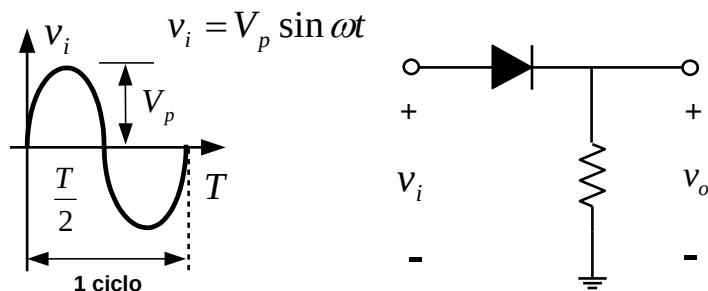


Figura 3.2 Rectificador de media onda

Al circuito se le aplica una señal senoidal cuyo ciclo completo está definido por el periodo T , tal como se muestra en la figura 3.2. El valor promedio (la suma algebraica de las áreas sobre y debajo del eje del tiempo) es cero. Sin embargo, el circuito rectificador de media onda, generará una forma de onda v_o que tendrá un valor promedio cuyo valor no es cero. Durante el semiciclo positivo definido por $0 \leq t \leq T/2$, el potencial en el ánodo es mayor que en el cátodo, es decir el voltaje de entrada v_i ocasiona que diodo se polarice directamente. Por lo tanto, el diodo se comporta como un corto circuito, conectando la salida directamente con la entrada, tal como se muestra en la siguiente figura.

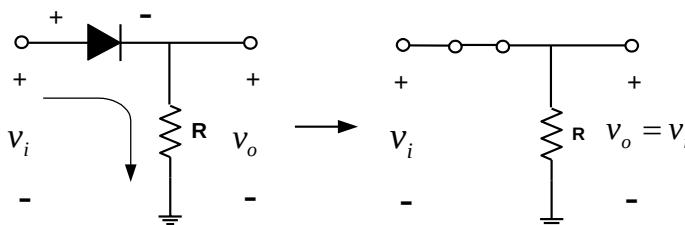


Figura 3.3. Polarización directa durante el primer semiciclo

Durante el semiciclo negativo definido por $T/2 \leq t \leq T$, el potencial en el ánodo es menor que en el cátodo, es decir, esta vez el voltaje de entrada v_i ocasiona que diodo se polarice inversamente. Por lo tanto, el diodo pasa a un estado de “corte”, con un equivalente en circuito abierto. Por lo tanto el voltaje en la salida será 0V, ya que no hay trayectoria para el flujo de corriente, tal como se muestra en la figura 3.4.

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA

Carrera: Ingeniería Electromecánica, Curso: Electrónica Analógica, Unidad 1: El diodo semiconductor.

Autor: Dr. David Lara Alabazares

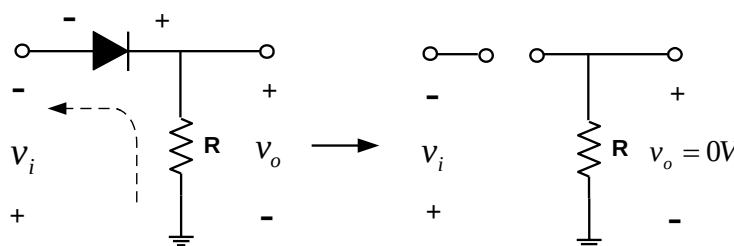


Figura 3.4. Región de no conducción durante el segundo semiciclo.

La forma de onda de la salida completa se muestra en la figura 3.5, donde el valor promedio de la salida es

$$v_{av} = 0.318v_{max} \quad (3.2)$$

El proceso de separación de una mitad de la señal para establecer un nivel de CD recibe por lo tanto el nombre de rectificación de media onda. El término rectificación proviene del uso del término rectificador para diodos que se emplean en fuentes de poder para el proceso de conversión CA-CD.

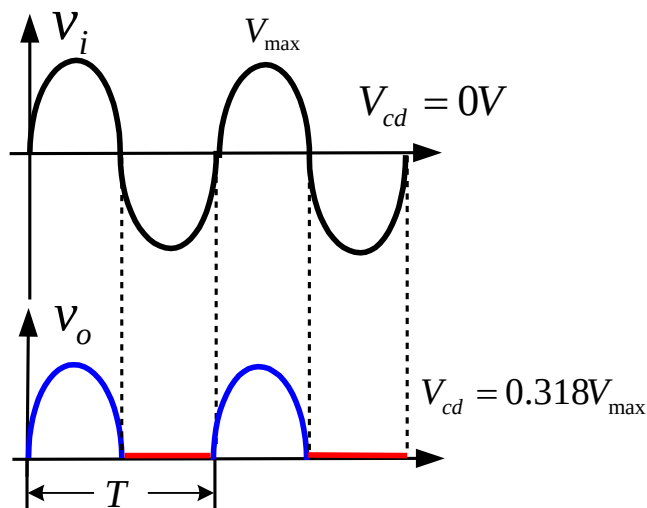
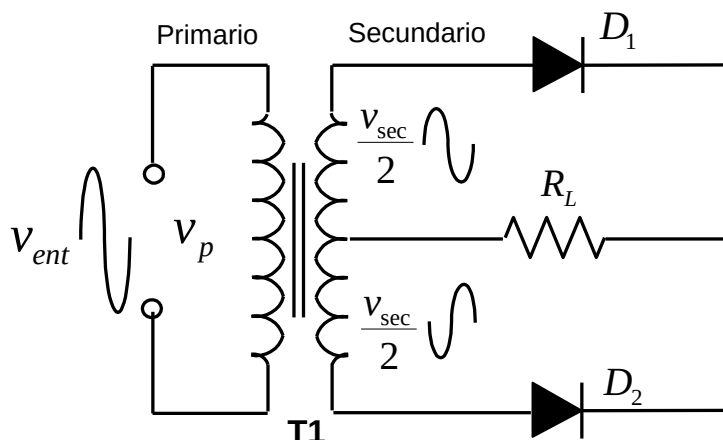


Figura 3.5. Señal rectificada de media onda

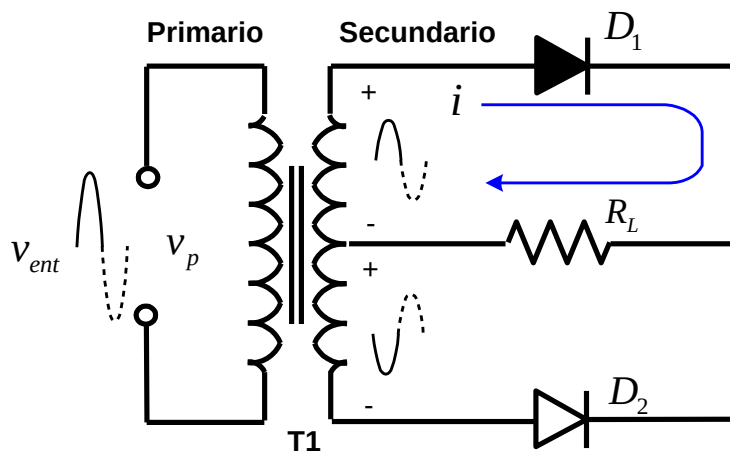
Rectificador de onda completa con derivación central

Este tipo de rectificador de onda completa utiliza dos diodos conectados al secundario de un transformador con derivación central, tal como se muestra en la figura 3.6. El voltaje de entrada se aplica al primario y se acopla magnéticamente al secundario. Debido a que existe una derivación central simétrica, el voltaje del secundario se divide en dos. La mitad del voltaje secundario aparece entre la derivación central y cada extremo del devanado secundario.

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA
Carrera: Ingeniería Electromecánica, **Curso:** Electrónica Analógica, **Unidad 1:** El diodo semiconductor.

Autor: Dr. David Lara Alabazares

Figura 3.6. Circuito rectificador de onda completa con derivación central

Durante el semiciclo positivo del voltaje de entrada el extremo del secundario conectado a D_1 tiene un mayor potencial con respecto a la derivación central, mientras que el otro extremo tiene un menor potencial; en consecuencia las polaridades de los diodos del secundario son diferentes, tal como se muestra en la figura 3.7. En esta condición el diodo D_1 está polarizado directamente, mientras que el diodo D_2 , está polarizado inversamente. Por lo tanto, la única trayectoria de corriente será a través del diodo D_1 y el resistor de carga R_L , tal como se indica en la figura 3.7.


Figura 3.7. Operación del circuito rectificador durante el semiciclo positivo.

En el semiciclo negativo del voltaje de entrada el extremo del secundario conectado a D_2 tiene un mayor potencial con respecto a la derivación central, mientras que el extremo conectado a D_1 tiene un menor potencial. Esta condición polariza inversamente al diodo D_1 y directamente al diodo D_2 y la trayectoria de la corriente es a través del diodo D_2 y la resistencia de carga R_L , tal como se muestra en la figura 3.8.

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA

Carrera: Ingeniería Electromecánica, Curso: Electrónica Analógica, Unidad 1: El diodo semiconductor.

Autor: Dr. David Lara Alabazares

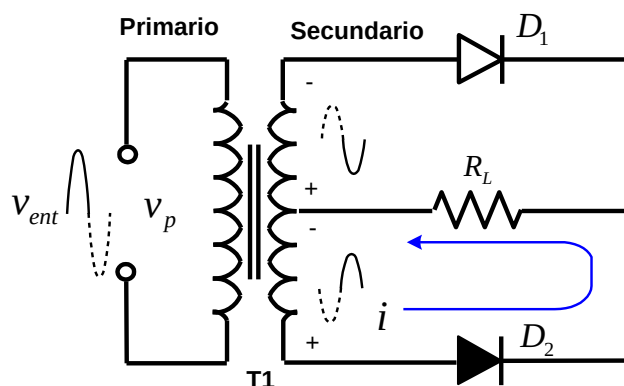


Figura 3.8. Operación del circuito rectificador durante el semiciclo negativo.

Como la corriente de salida circula en la misma dirección a través de la carga para ambos semiciclos de la entrada, el voltaje de salida desarrollado a través del resistor de carga es un voltaje de CD de onda completa rectificado mostrado en la figura 3.9.

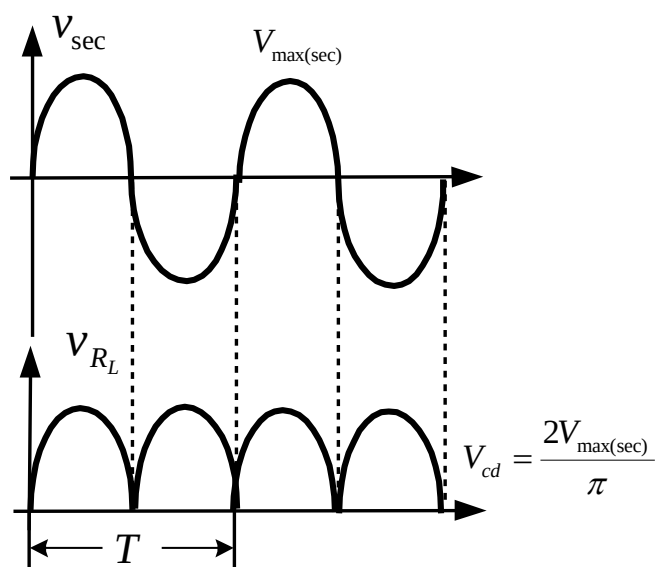


Figura 3.9. Operación de un rectificador con derivación central

Nota: Se debe considerar la caída de potencial en los diodos, la cual es de 0.7V para los diodos de silicio y 0.3V para los diodos de germanio; en el primer caso el voltaje de salida está dado como:

$$v_{sal} = \frac{v_{sec}}{2} - 0.7$$

(3.3)

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA

Carrera: Ingeniería Electromecánica, **Curso:** Electrónica Analógica, **Unidad 1:** El diodo semiconductor.

Autor: Dr. David Lara Alabazares

Rectificador de onda completa tipo puente

El rectificador tipo puente es un arreglo de cuatro diodos conectados al secundario sin derivación central de un transformador, tal como se ilustra en la figura 3.10. Considerando que las polaridades del primario y del secundario son las mismas, entonces durante el semiciclo positivo de entrada los diodos D_1 y D_2 están polarizados directamente y conducen corriente en la dirección mostrada y el voltaje a través de R_L es idéntico al semiciclo positivo de entrada. Durante ese semiciclo, los diodos D_3 y D_4 están polarizados inversamente y su estado es en corte o abiertos. Cuando el semiciclo de entrada es negativo, como se muestra en la figura 3.11, los diodos D_3 y D_4 están polarizados directamente y conducen corriente en la misma dirección a través de R_L que durante el semiciclo positivo. Durante el semiciclo negativo, D_1 y D_2 están polarizados inversamente. El voltaje de salida resultante durante todo el ciclo será por lo tanto una onda rectificada completa.

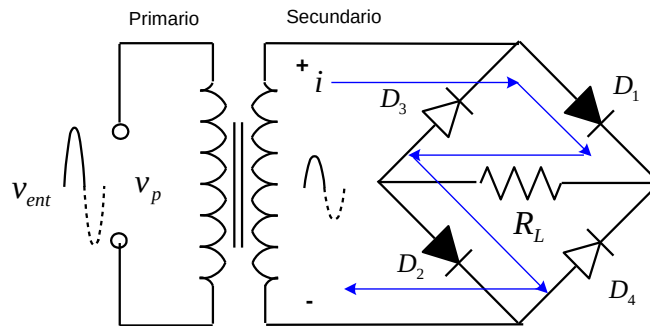


Figura 3.10. Operación del circuito rectificador tipo puente durante el semiciclo positivo.

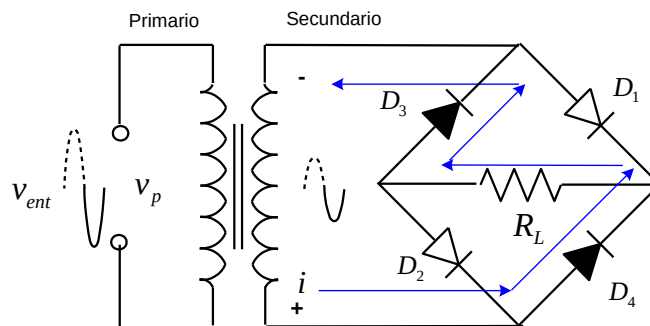


Figura 3.11. Operación del circuito rectificador tipo puente durante el semiciclo negativo.

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA**Carrera:** Ingeniería Electromecánica, **Curso:** Electrónica Analógica, **Unidad 1:** El diodo semiconductor.**Autor:** Dr. David Lara Alabazares

Nota: Se debe considerar la caída de potencial en los diodos, la cual es de 0.7V para los diodos de silicio y 0.3V para los diodos de germanio; en el primer caso el voltaje de salida está dado como:

$$v_{sal} = v_{sec} - 1.4 \quad (3.4)$$

Por otro lado en ambos caso la corriente en la resistencia fluye en el mismo sentido, por lo tanto el extremo de la resistencia que está conectada a la unión de cátodos es el positivo y el extremo que está conectado a la unión de ánodos es el negativo.

1.3.4 Conexión en serie y en paralelo de diodos rectificadores

Ocurre con frecuencia que la potencia suministrada por un elemento rectificador no es suficiente, dadas las necesidades del equipo o sistema. En este caso se recurre a conectar dos o más elementos rectificadores en serie o en paralelo, según se desee una mayor tensión o intensidad de corriente respectivamente.

Anteriormente se utilizaban elementos rectificadores de elevada potencia, como el rectificador de vapor de mercurio, los cuales han sido sustituidos por elementos de materiales semiconductores que tienen un menor costo y necesitan menor mantenimiento. Sin embargo, en la actualidad las tensiones y corrientes que pueden suministrar estos dispositivos semiconductores son relativamente pequeñas; si los comparamos con sus antecesores, veremos que estos elementos individualmente no pueden ser empleados para sustituir a los tubos de vacío. Por lo tanto, se recurre a conectar varios de ellos en serie o en paralelo, según las necesidades.

Como principio básico podemos decir que si las necesidades del consumidor vienen expresadas por una tensión muy elevada, la conexión de los diodos rectificadores se realizará en serie. Si por el contrario, las necesidades de la instalación consumidora exigen una intensidad de corriente elevada, la conexión que se efectuará entre los diodos rectificadores será en paralelo. Ocurre sin embargo, tanto en la conexión en serie como en la conexión en paralelo, que aunque los diodos rectificadores conectados sean todos originalmente idénticos, sus características presentan ciertas variaciones de unos con respecto a otros, debido a las tolerancias constructivas. Ello provoca que en uno de los elementos conectados aparezcan tensiones o corrientes superiores a los límites admitidos por el elemento, con lo que este va rápidamente a la destrucción.

Si para obtener una tensión elevada se conecta un grupo de diodos en serie ocurre que al pasar los diodos del estado de conducción al de bloqueo, no todos ellos dejan de conducir corriente al mismo tiempo, sino que lo hacen con pequeñas diferencias de tiempo; por causa de éste fenómeno, el elemento que primero impide el paso de la corriente se encuentra con que por unos instantes se aplica en él toda la tensión inversa a rectificar, tensión para la cual el no está dimensionado. Esto puede observarse la figura 3.12, en ella se han representado las características $I_R = f(V_R)$ de los cuatro diodos; como se ve debido a las

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA

Carrera: Ingeniería Electromecánica, **Curso:** Electrónica Analógica, **Unidad 1:** El diodo semiconductor.

Autor: Dr. David Lara Alabazares

tolerancias constructivas, las tensiones inversas no coinciden plenamente, para una misma intensidad inversa; en efecto el elemento D4 soporta una tensión inversa $-V_{D4}$ mucho mayor que los restantes.

El fenómeno se representa tan solo por unos instantes brevísimos, al cabo de los cuales la corriente inversa se hace tan pequeña que prácticamente la tensión se reparte por igual en todos los diodos. Sin embargo estos instantes pueden ser suficientes para destruir el diodo. Para solucionar este problema se recurre a conectar en paralelo con cada diodo una red de equilibrio cuya misión es la de distribuir equitativamente la tensión entre ellos; esta red se forma, generalmente, por una resistencia y un condensador en derivación, tal como se muestra en la figura 3.13.

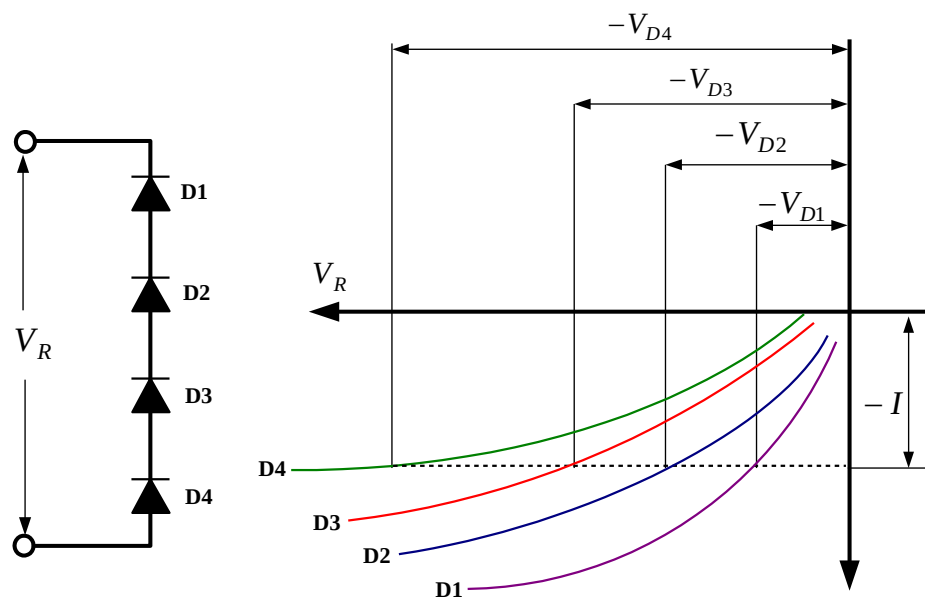
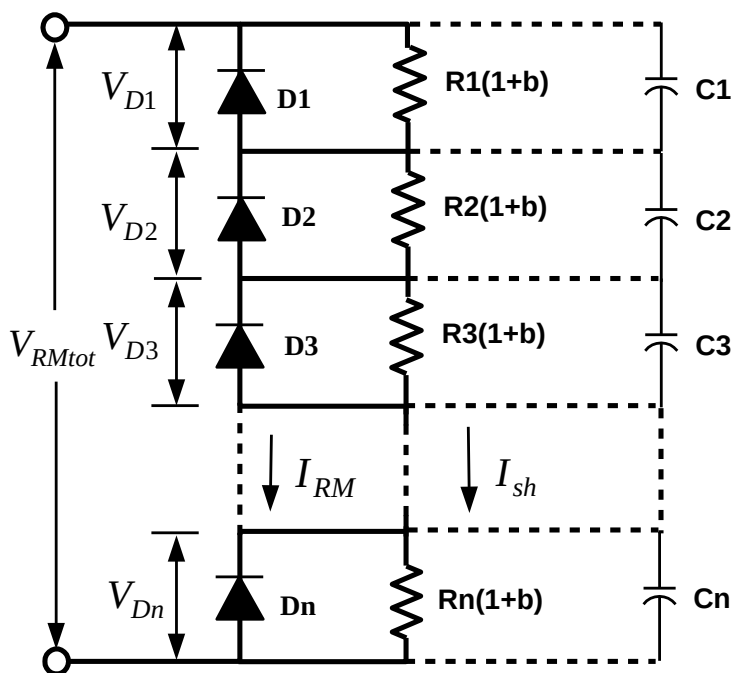


Figura 3.12 Curvas características del voltaje inverso vs corriente de cuatro diodos en serie.

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA
Carrera: Ingeniería Electromecánica, **Curso:** Electrónica Analógica, **Unidad 1:** El diodo semiconductor.

Autor: Dr. David Lara Alabazares

Figura 3.13 Diodos conectados en serie con resistencias de equilibrio.

Las resistencias de equilibrio, en paralelo con los diodos conectados en serie, contribuyen a distribuir la tensión a lo largo de toda la cadena de “n” diodos en condiciones estáticas de polarización inversa. El valor de dichas resistencias se determina de la siguiente manera:

Supóngase en primer lugar que todos los diodos presentan su máxima corriente de fuga excepto la del diodo D1, el cual posee una resistencia de fuga infinita. Esta condición puede llevarse a un mayor grado suponiendo que en paralelo con D1 se ha conectado una resistencia cuyo valor corresponde al límite superior de la tolerancia, es decir una resistencia de valor $R(1 + b)$, en donde b es la tolerancia propia de la resistencia, y en paralelo con los demás diodos unas resistencias $R(1 - b)$.

Por razones de conveniencia representaremos por “ a ” la relación entre la mínima resistencia de fuga del diodo y el valor nominal de la resistencia en paralelo con éste, es decir:

$$a = \frac{R_{Dmin}}{R} \quad (3.5)$$

Por lo tanto la resistencia en paralelo R_p entre la mínima resistencia de fuga de cualquier diodo y una resistencia en paralelo de valor $R(1 - b)$, está dada por:

$$\frac{(R_{Dmin})(R(1-b))}{R_{Dmin}+R(1-b)} = R_p \quad (3.6)$$

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA

Carrera: Ingeniería Electromecánica, **Curso:** Electrónica Analógica, **Unidad 1:** El diodo semiconductor.

Autor: Dr. David Lara Alabazares

Pero como $R_{Dmin} = Ra$, tenemos:

$$\frac{Ra(R(1-b))}{Ra+R(1-b)} = Rp \quad (3.7)$$

Entonces a partir de la corriente de fuga total y el voltaje inverso que debe soportar cada diodo, se puede determinar la resistencia Rp y a partir de esta se calcula el valor nominal de la resistencia R que deberá conectarse en paralelo con cada diodo.

La conexión en paralelo de diodos se utiliza para aumentar la capacidad de conducción de corriente, y la corriente de cada diodo está en función del voltaje en directa aplicado. Sin embargo para una mejor repartición de corriente en estado permanente se conecta una resistencia en serie con cada diodo, tal como se muestra en la figura 3.14.

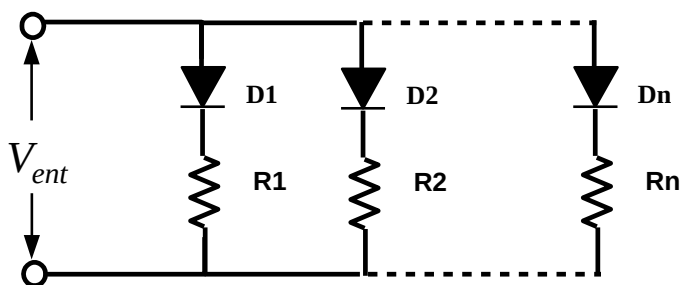


Figura 3.14 Diodos conectados en paralelo con resistencias para una mejor distribución de corriente.

1.3.5 Rectificadores Trifásicos

En un sistema estático para la regulación de motores de corriente continua, el elemento principal lo constituye el rectificador, formado por un conjunto de diodos y de tiristores que suministran al inducido y al inductor del motor una corriente continua a partir de una red de corriente alterna. La tensión suministrada que se regula con los tiristores regula a su vez la velocidad o par del motor.

El sistema más sencillo para accionar un motor de corriente continua a partir de una red de corriente alterna consiste en un diodo que alimenta al inducido, el devanado de excitación se alimenta independientemente o bien se usan imanes permanentes. Este sistema no regula la tensión aplicada al inducido, la relación par-velocidad esta fija a las características del motor y la potencia que puede suministrar es baja. Para alimentar motores de corriente continua de mayor potencia, es preferible usar sistemas trifásicos. Por lo tanto los circuitos rectificadores trifásicos dan un mayor número de pulsaciones

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA

Carrera: Ingeniería Electromecánica, **Curso:** Electrónica Analógica, **Unidad 1:** El diodo semiconductor.

Autor: Dr. David Lara Alabazares

por ciclo de la frecuencia de línea, aumentando el tiempo en que la corriente circula por el motor, la relación entre los valores medio y eficaz, y evitando el sobrecalentamiento del inducido.

Los diodos y los tiristores empleados en los circuitos de rectificación son de funcionamiento francamente no lineal. Para analizar circuitos en los que intervengan estos elementos se precisa de circuitos modelos y de técnicas para su manejo en las operaciones repetitivas que tienen lugar.

Rectificador trifásico de media onda (semionda)

El circuito rectificador trifásico más sencillo es el de media onda, representado en la figura 3.25. Este rectificador consiste de tres diodos conectados a una carga resistiva común R . El circuito está conectado a la red mediante un sistema de transformación Delta-Estrella. La corriente que fluye a través del embobinado del secundario es unidireccional y contiene una componente de CD. Sólo el embobinado del secundario lleva corriente en un instante determinado, por lo tanto la corriente de carga retorna por el neutro N de la red trifásica de suministro. El primario se conecta en delta ya que la primera armónica que se presentara será la tercera, es decir se reduce la componente armónica.

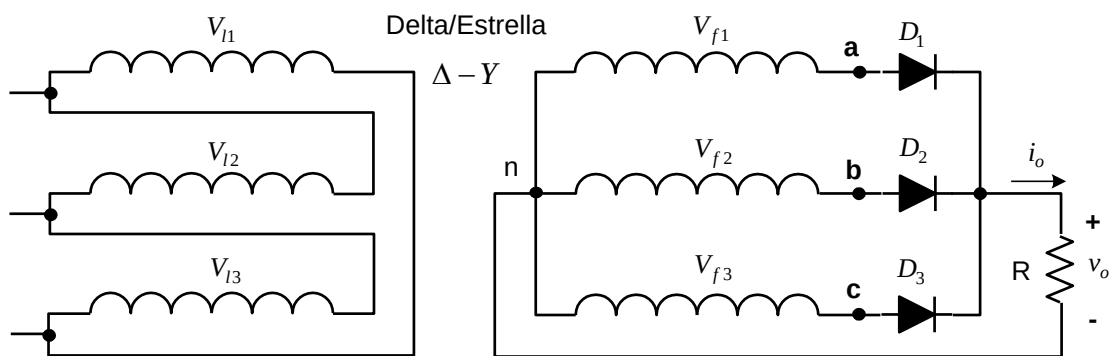


Figura 3.25-1. Circuito rectificador trifásico de media onda

En la figura 3.26, pueden apreciarse las tres tensiones trifásicas $v_{f1} = v_{an}$, $v_{f2} = v_{bn}$ y $v_{f3} = v_{cn}$, así como la tensión resultante en la resistencia.

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA

Carrera: Ingeniería Electromecánica, Curso: Electrónica Analógica, Unidad 1: El diodo semiconductor.

Autor: Dr. David Lara Alabazares

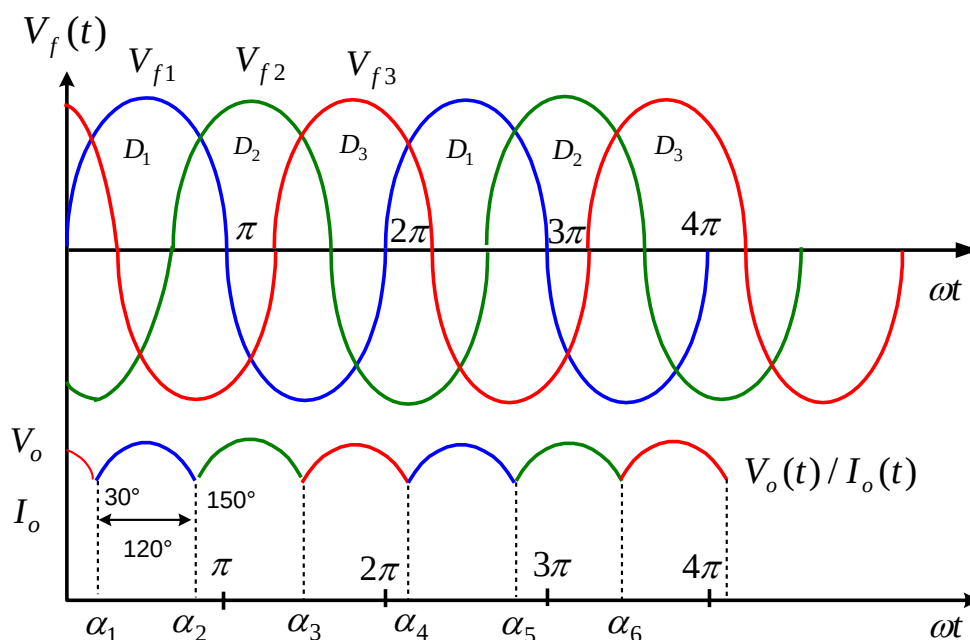


Figura 3.26. Formas de onda del circuito rectificador trifásico de media onda

Cada uno de los tres diodos conduce la corriente durante 120° eléctricos, y sus tres cátodos están conectados a un punto común de la carga, mientras que los ánodos se conectan cada uno a cada una de las fases. Cada diodo conduce únicamente cuando esta polarizado directamente y no conduce cuando esta polarizado en inverso, de tal forma que en cualquier instante, el diodo que está conectado a la fase de mayor tensión instantánea es el que conduce, mientras que los otros dos diodos quedan polarizados inversamente, ya que las tensiones están referenciadas al común de los cátodos. Como puede verse en la figura la tensión de salida toma la forma de los valores máximos instantáneos de las tres tensiones. Lo anterior se resume como sigue:

Cuando D_1 conduce v_{f1} es más positivo que v_{f2} y v_{f3}

Cuando D_2 conduce v_{f2} es más positivo que v_{f1} y v_{f3}

Cuando D_3 conduce v_{f3} es más positivo que v_{f1} y v_{f2}

La tensión a la salida v_o en la carga es una tensión continua de valor medio dado por

$$V_o = \frac{3}{2\pi} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} V_{fmax} \sin(\omega t) d(\omega t) \quad (6.1)$$

donde $\alpha_1 = \frac{\pi}{6} = 30^\circ$, $\alpha_2 = \frac{5\pi}{6} = 150^\circ$ y $120^\circ = 2\pi/3$

Entonces, resolviendo la integral definida y evaluando los límites de integración se tiene:

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA

Carrera: Ingeniería Electromecánica, **Curso:** Electrónica Analógica, **Unidad 1:** El diodo semiconductor.

Autor: Dr. David Lara Alabazares

$$V_o = \frac{3}{2\pi} V_{fmax} [-\cos(\omega t)]_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} \Rightarrow V_o = \frac{3}{2\pi} V_{fmax} \left[\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} \right]$$

Lo cual resulta

$$V_o = V_{cd} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_{fmax} \quad (6.2)$$

El resultado anterior se puede extender para sistemas polifásicos de N fases, entonces el voltaje de salida se resuelve como:

$$V_{cd} = \frac{2}{2\pi N} \int_0^{\pi/N} V_{fmax} \cos(\omega t) d(\omega t) = V_{fmax} \frac{N}{\pi} \text{sen}(\pi/N) \quad (6.3)$$

Por otro lado el voltaje de fase máximo en función del voltaje eficaz está dado por $V_{fmax} = \sqrt{2}V_{fef}$, entonces, el valor medio de la carga está dado por:

$$V_o = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} V_{fef} = 1.17V_{fef} \quad (6.4)$$

La corriente está dada en función de la resistencia de carga y circula en un solo diodo a la vez tal como se muestra en la siguiente figura

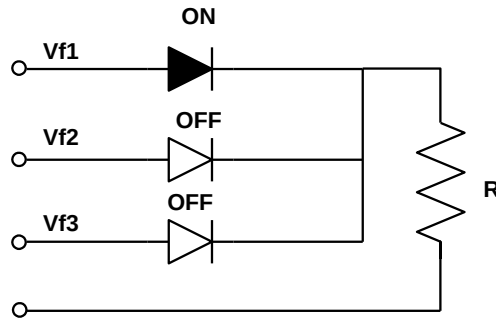


Figura 3.27. Solo un diodo permanece activado

Por lo tanto, la corriente se obtiene aplicando la ley de Ohm

$$I_o = V_o/R \quad (6.5)$$

Como la I_{fAV} ocurre en todo el periodo 2π tenemos que:

$$I_{fAV} = I_o/3 \quad (6.6)$$

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA

Carrera: Ingeniería Electromecánica, **Curso:** Electrónica Analógica, **Unidad 1:** El diodo semiconductor.

Autor: Dr. David Lara Alabazares

Por otro lado la máxima tensión inversa está dada como $V_{RRM} = \sqrt{3}V_{fmax}$ y la corriente de diodo está dada por $I_{Def} = I_{fef}$, entonces:

$$I_{Def} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{a_1}^{\alpha_2} (I_{fmax} \sin(\omega t))^2 d(\omega t)} \quad (6.7)$$

Aplicando la identidad trigonométrica

$$I_{Def} = I_{fmax} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{a_1}^{\alpha_2} \frac{(1 - \cos^2(\omega t))}{2} d(\omega t)}$$

Evaluando los límites

$$I_{Def} = I_{fmax} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[\frac{\omega t}{2} - \frac{1}{4} \sin(2\omega t) \right]_{\pi/6}^{5\pi/6}} = \frac{I_{fmax}}{2} \sqrt{\frac{4\pi + 3\sqrt{3}}{6\pi}} = 0.485 I_{fmax} \quad (6.8)$$

Si la corriente está dada por $I_o = \frac{V_o}{R}$ y el voltaje como $V_o = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_{fmax}$, entonces

$$I_o = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi R_o} V_{fmax} = 0.83 \frac{V_{fm}}{R} = 0.83 I_{fmax}$$

Entonces:

$$I_{Def} = \frac{0.49}{0.83} I_o = 0.58 I_o \quad (6.9)$$

La potencia de salida está dada por $P_o = V_o I_o$ y la potencia de entrada está por $P = 3 V_f I_f$, entonces:

$$P = 3 \frac{v_o}{1.17} \times 0.58 I_o = 1.5 V_o I_o$$

La eficiencia del circuito es la relación de la potencia de salida entre la potencia de entrada:

$$\eta = \frac{P_o}{P} \Rightarrow \eta = \frac{V_o I_o}{1.5 V_o I_o} \Rightarrow \eta\% = 66.7\%$$

Existen numerosos circuitos rectificadores trifásicos que utilizan diodos y tiristores. En los que utilizan diodos, la tensión en la carga es directamente proporcional a la tensión de la red de corriente alterna, mientras que si se utilizan tiristores puede regularse la tensión de salida independientemente de la red. El circuito rectificador más conveniente se selecciona de acuerdo a las necesidades propias de la aplicación y

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA

Carrera: Ingeniería Electromecánica, **Curso:** Electrónica Analógica, **Unidad 1:** El diodo semiconductor.

Autor: Dr. David Lara Alabazares

del precio. Se debe considerar que el precio de los diodos y tiristores aumente proporcionalmente a sus corrientes y voltajes nominales.

Rectificador trifásico de onda completa

Este rectificador, también conocido como rectificador tipo puente, consiste de seis diodos conectados en pares de puentes, conectados al secundario del transformador trifásico que tiene una configuración delta-estrella, tal como se ilustra en la figura 2.28.

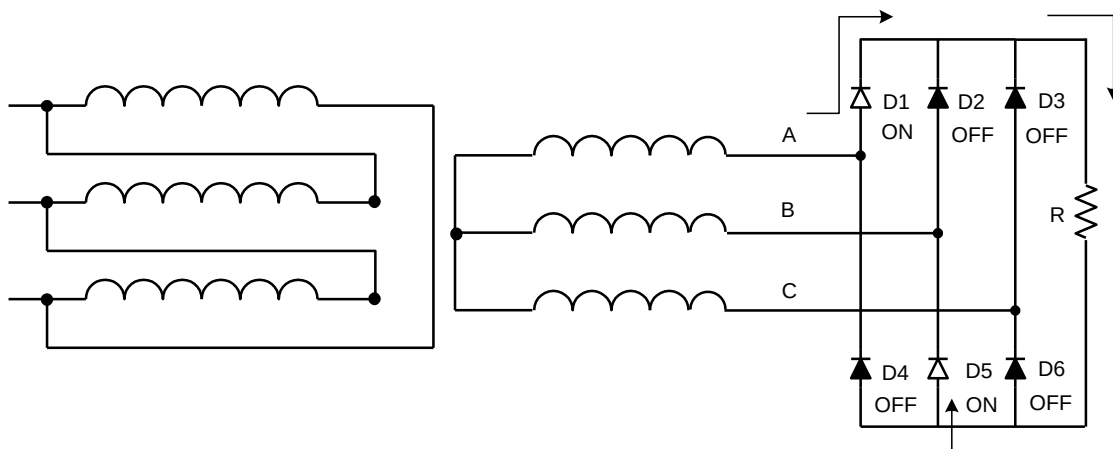


Figura 3.28. Rectificador de onda completa

Estos rectificadores trabajan a 6 tensiones que son, las tres cíclicas directas V_{AB} , $-V_{BC}$, $-V_{CA}$ y las tres cíclicas indirectas V_{BA} , $-V_{CB}$, $-V_{AC}$. En la figura siguiente se muestran las cíclicas para las fases A y B.

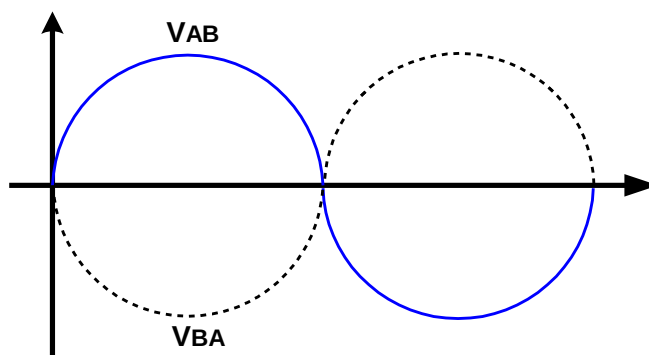


Figura 3.29. Tensiones en las fases A y B

Para que exista una circulación de corriente por la carga R se deben de encontrar dos diodos en estado de encendido, y existen seis posibles maneras de que se efectué la circulación de corriente:

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA
Carrera: Ingeniería Electromecánica, **Curso:** Electrónica Analógica, **Unidad 1:** El diodo semiconductor.

Autor: Dr. David Lara Alabazares

D1 Y D5 EN ON “I” SALE POR “A” Y ENTRA POR “B” V_{AB} MÁS POSITIVO QUE: $V_{BC} - V_{CA} - V_{BA} - V_{CB} - V_{AC}$

D1 Y D6 EN ON “I” SALE POR “A” Y ENTRA POR “C” V_{AC} MÁS POSITIVO QUE LOS OTROS VOLTAJES

D2 Y D6 EN ON “I” SALE POR “B” Y ENTRA POR “C” V_{BC} EL MÁS POSITIVO

D2 Y D4 EN ON “I” SALE POR “B” Y ENTRA POR “A” V_{BA} EL MÁS POSITIVO

D3 Y D4 EN ON “I” SALE POR “C” Y ENTRA POR “A” V_{CA} EL MÁS POSITIVO

D3 Y D5 EN ON “I” SALE POR “C” Y ENTRA POR “B” V_{CB} EL MÁS POSITIVO

Lo anterior se representa en la siguiente tabla:

VOLTAJE MAS +	V_{AB}	V_{AC}	V_{BC}	V_{BA}	V_{CA}	V_{CB}	
DIODO + EN ON	D1	D1	D2	D2	D3	D3	D1
DIODO – EN ON	D5	D6	D6	D4	D4	D5	D5

Como se podrá ver en la figura siguiente cada voltaje es más positivo 60° y cada diodo conduce para dos fases sucesivas por lo cual conduce 120° .

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA

Carrera: Ingeniería Electromecánica, Curso: Electrónica Analógica, Unidad 1: El diodo semiconductor.

Autor: Dr. David Lara Alabazares

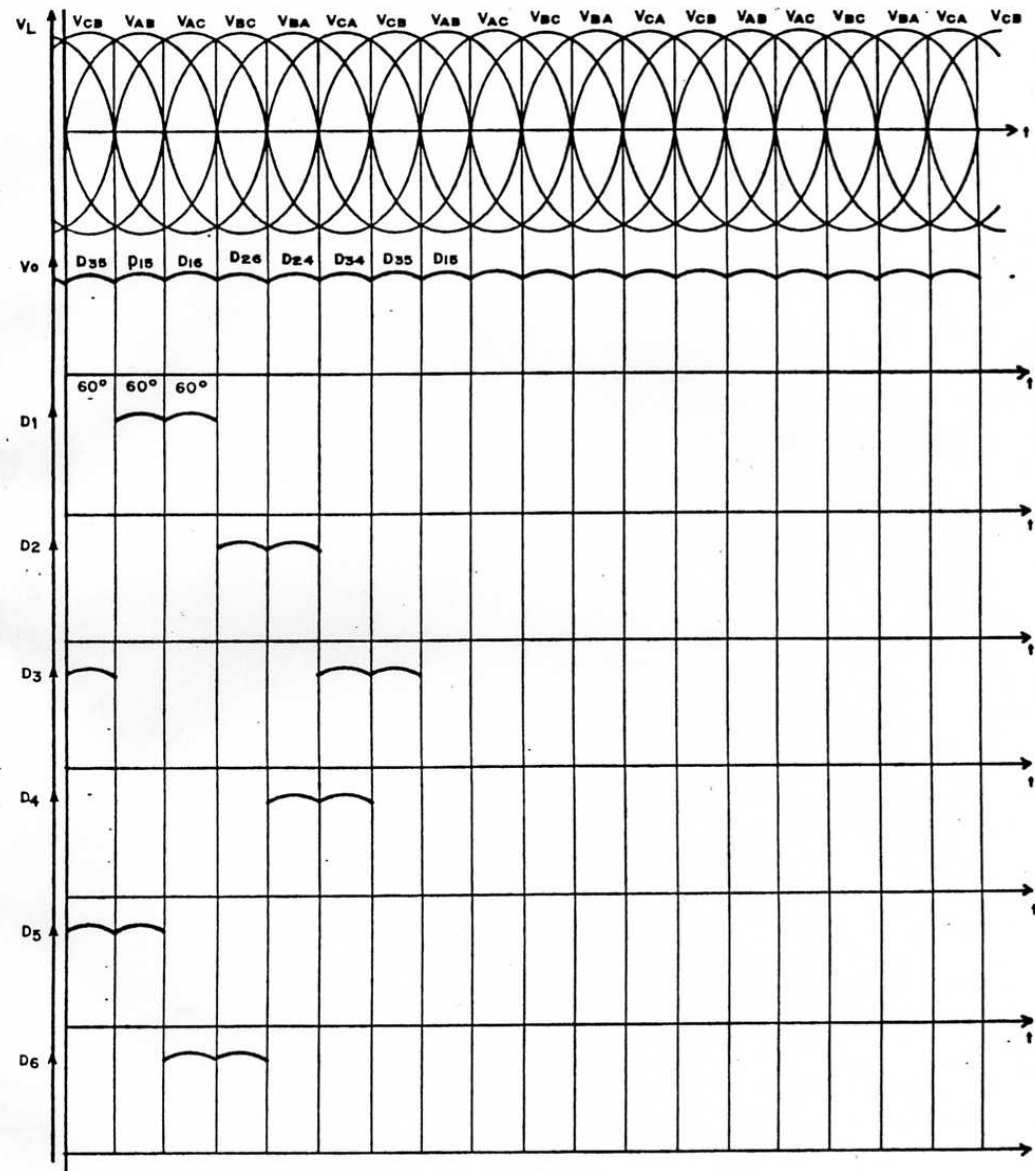


Figura 3.30. Voltaje rectificado por cada diodo.

La corriente en cada fase del secundario del transformador sigue la secuencia que se muestra en la figura siguiente:

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA

Carrera: Ingeniería Electromecánica, Curso: Electrónica Analógica, Unidad 1: El diodo semiconductor.

Autor: Dr. David Lara Alabazares

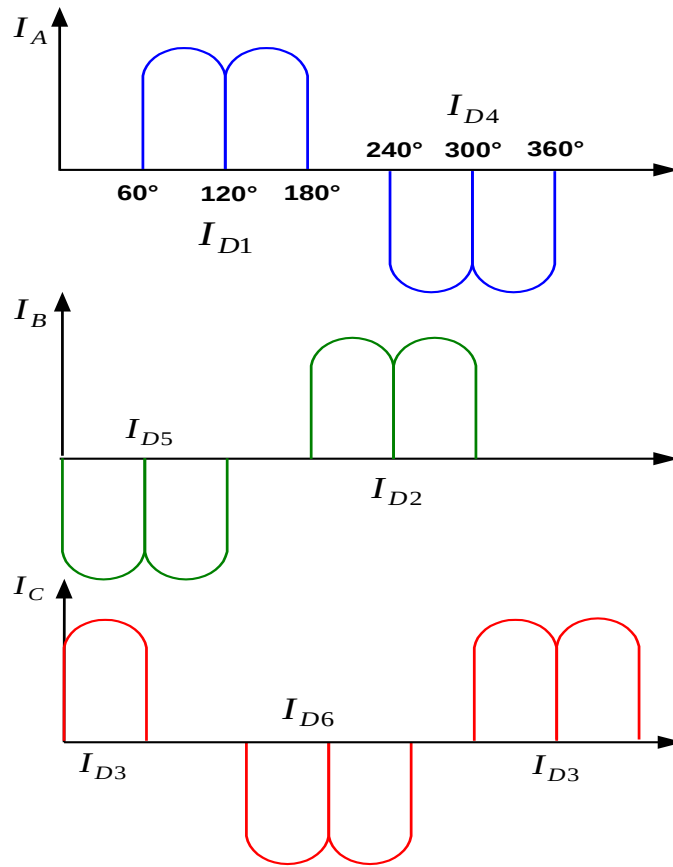


Figura 3.31. Corriente a la salida del transformador.

Por lo tanto cada diodo conduce para una fase tal como se aprecia en la siguiente figura:

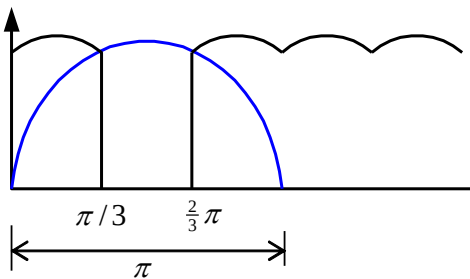


Figura 3.32. Conducción de cada diodo por fase.

El voltaje de línea máximo se define en función del voltaje de fase como $\sqrt{3}V_{fmax} = V_{Lmax}$, entonces el voltaje de cd se calcula tomando en cuenta los límites de integración definidos en la figura 3.32.

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA

Carrera: Ingeniería Electromecánica, **Curso:** Electrónica Analógica, **Unidad 1:** El diodo semiconductor.

Autor: Dr. David Lara Alabazares

$$V_{cd} = \frac{1}{\pi/3} \int_{\frac{1}{3}\pi}^{\frac{2}{3}\pi} V_{Lmax} \sin(\omega t) d(\omega t) \quad (6.10)$$

Resolviendo y evaluando la integral se tiene

$$V_{cd} = \frac{V_{Lmax}}{\pi/3} [-\cos(\omega t)]_{\frac{1}{3}\pi}^{\frac{2}{3}\pi} = \frac{3}{\pi} \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \right] V_{Lmax}$$

Por lo tanto,

$$V_{cd} = V_o = \frac{3}{\pi} V_{Lmax} = 0.95 V_{Lmax} \quad (6.11)$$

o bien

$$V_o = 0.95 \sqrt{3} V_{fmax} = 1.654 V_{fmax} \quad (6.12)$$

Por otro lado $V_{cd} = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} V_{ef} = 1.35 V_{ef}$ y la corriente de línea depende directamente del voltaje de línea y del valor de la resistencia de carga, entonces

$$I_{Lmax} = \frac{V_{Lmax}}{R}$$

La corriente de c.d. en función de la corriente de línea se define como $I_{cd} = \frac{3}{\pi} I_{Lmax}$ y la corriente de fase en promedio es $I_{fav} = \frac{I_{cd}}{3}$, ya que el diodo permanece encendido 120°.

Ahora calcularemos la corriente eficaz en el diodo, en la figura 6.9 se muestra la secuencia de encendido en un ciclo para el diodo D1, de 0° a 60°, el diodo permanece apagado ($I_{D1} = 0$), así como de 180° a 360° por lo cual se hace el cálculo entre 60° y 120° lo que corresponde al cálculo del área 1, pero como son dos áreas debemos multiplicar la integral por dos.

$$I_{Def} = \sqrt{\frac{2}{2\pi} \int_{\frac{1}{3}\pi}^{\frac{2}{3}\pi} (I_{Dmax} \sin(\omega t))^2 d(\omega t)}$$

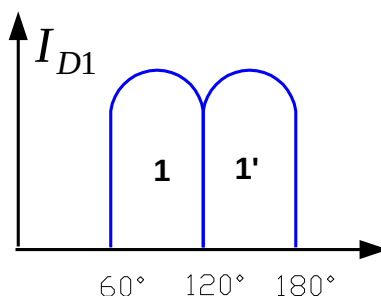
Resolviendo y evaluando se tiene:

$$I_{Def} = I_{Dmax} \sqrt{\frac{1}{6} + \frac{\sqrt{3}}{4\pi}}$$

Por lo tanto

$$I_{Def} = 0.552 I_{Dmax}$$

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA
Carrera: Ingeniería Electromecánica, **Curso:** Electrónica Analógica, **Unidad 1:** El diodo semiconductor.

Autor: Dr. David Lara Alabazares

Figura 3.33. Corriente eficaz del diodo

En función de la corriente de c.d se tiene:

$$I_{Def} = 0.552 \frac{\pi}{3} I_{cd} = 0.578 I_{cd}$$

Para calcular la I_{ef} en la fase del transformador se hace la consideración de 4 áreas, tal como se muestra para la fase A en la figura 6.8, entonces

$$I_{fef} = \sqrt{\frac{4}{2\pi} \int_{\frac{1}{3}\pi}^{\frac{3}{2}\pi} (I_{Fmax} \sin(\omega t))^2 d(\omega t)}$$

Resolviendo y evaluando se tiene:

$$I_{fef} = I_{Fmax} \sqrt{\frac{1}{3} + \frac{\sqrt{3}}{2\pi}}$$

Por lo tanto

$$I_{fef} = 0.78 I_{Fmax}$$

En términos de la corriente de c.d.

$$I_{fef} = \frac{\pi}{3} 0.78 I_{cd} = 0.817 I_{cd}$$

Para el cálculo de eficiencia se tiene:

$$\eta = \frac{P_{cd}}{P} = \frac{V_{cd} I_{cd}}{\sqrt{3} V_L I_L} = \frac{V_{cd} I_{cd}}{\sqrt{3} \frac{V_{cd}}{1.35} 0.817 I_{cd}} = \frac{1}{1.04}$$

En valor porcentual se tiene que

$$\% \eta = 95.4\%$$

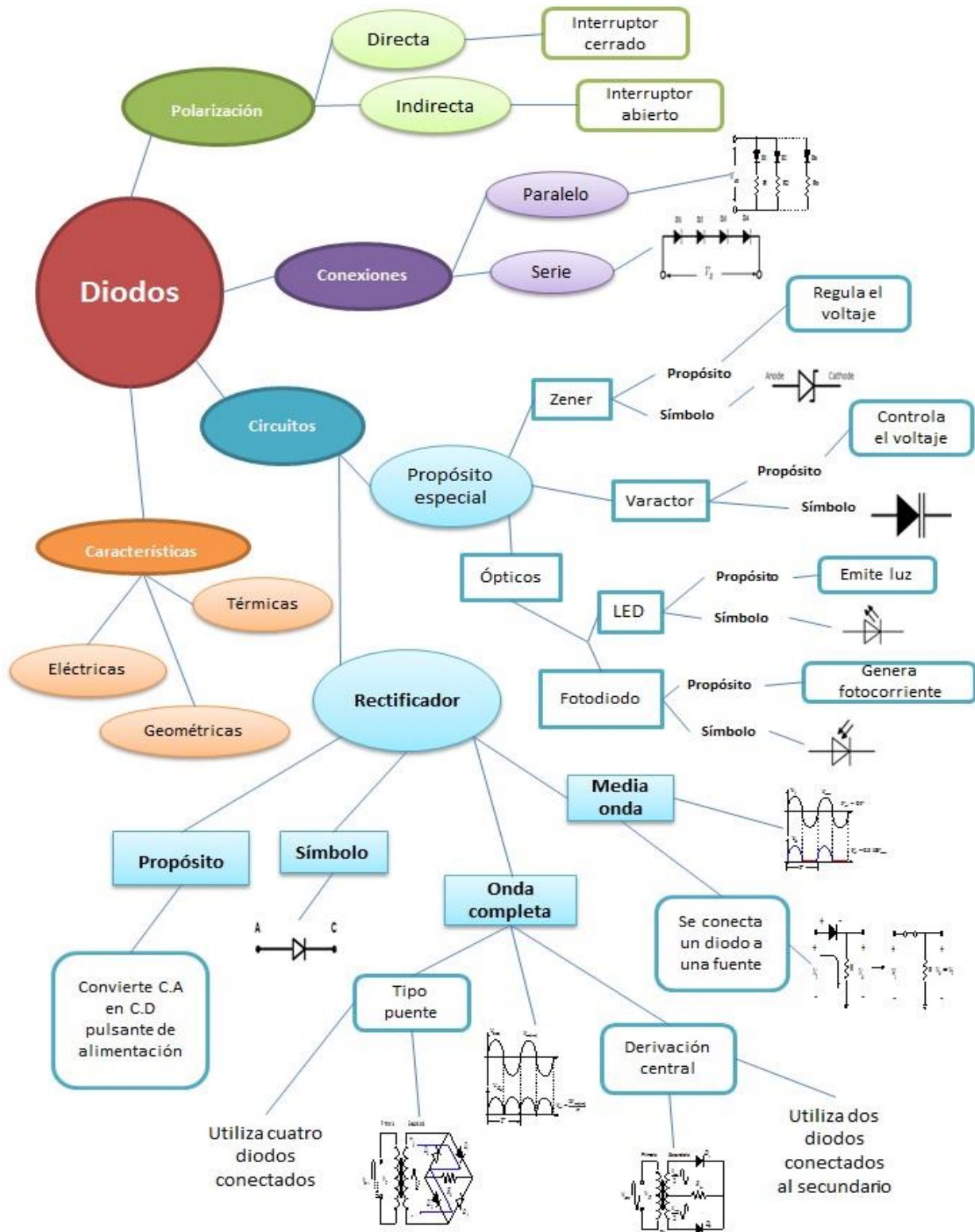
La cual es mayor que para el caso del rectificador trifásico de media onda.

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA

Carrera: Ingeniería Electromecánica, Curso: Electrónica Analógica, Unidad 1: El diodo semiconductor.

Autor: Dr. David Lara Alabazares

1.3.8 Mapa de aprendizaje de la unidad



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA

Carrera: Ingeniería Electromecánica, **Curso:** Electrónica Analógica, **Unidad 1:** El diodo semiconductor.

Autor: Dr. David Lara Alabazares

1.3.9 Autoevaluación

Completa correctamente lo que se te pide.

1. Como se clasifican las características técnicas de los diodos

2. ¿Cuáles son los rectificadores más comunes que se presenta en los circuitos?

3. Cuando se enlazan dos o más elementos rectificadores ¿Cómo se conectan? Representalos

4. ¿Por qué se emplean rectificadores trifásicos en un motor de C.A?

5. ¿En qué consiste un rectificador trifásico sencillo de media onda?
