

Armónicas

3.1 Introducción a las armónicas

En la actualidad, el problema de las armónicas en los sistemas eléctricos se ha visto incrementado debido a las cargas no lineales conectadas a ellos. ¹ Algunas de las fuentes más comunes de armónicas son dispositivos de estado sólido usados en el control, hornos de arco eléctrico, controladores de velocidad en motores eléctricos y transformadores de potencia sobreexcitados. ²

Estas distorsiones de la forma de onda crean problemas en la red eléctrica tales como, el aumento de pérdidas de potencia activa, sobretensiones en los condensadores, mal funcionamiento de protecciones o daño en los aislamientos, que trae como consecuencia la disminución de la vida útil de los equipos.

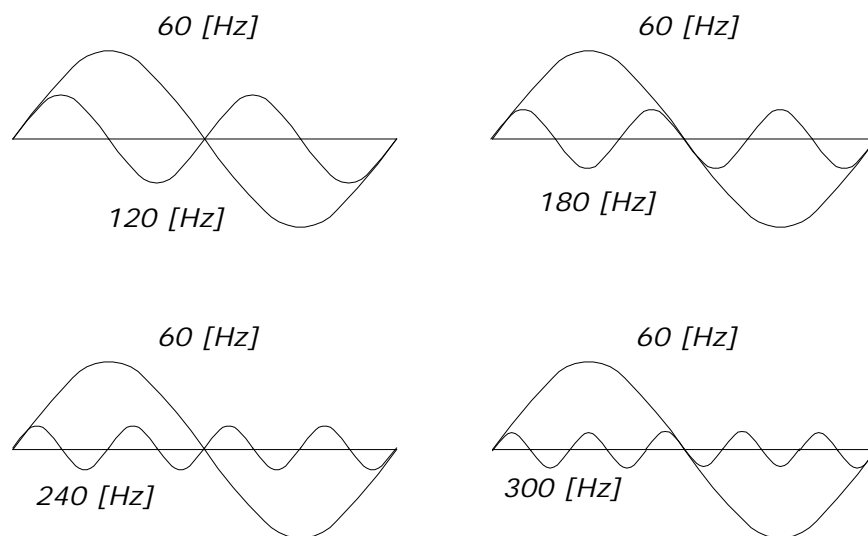
La mayoría de las veces se presentan los problemas en el lado de las cargas (usuarios) y si no se controlan aquí, se transmiten a la red y de aquí a otros usuarios o cargas conectadas a la misma.

Debido a ello, el estudio de los problemas de armónicas no debe ser exclusivo de empresas suministradoras, también debe incluir al sector industrial y desarrollar métodos efectivos para su mitigación. ³

3.2 Definición de armónica

Las armónicas son señales cuya frecuencia es un entero, múltiplo de la frecuencia principal o fundamental. ⁴

Las armónicas se expresan en términos de su orden, es decir, las armónicas de orden segunda, tercera y cuarta, tienen frecuencias de 120, 180 y 240 [Hz] respectivamente. ⁵



Onda senoidal de frecuencia fundamental y sus armónicas

En sistemas de potencia de 60 [Hz], una onda armónica es una senoide que tiene una frecuencia expresada por:⁶

$$F_h = h \times 60 [\text{Hz}]$$

donde h es un entero y representa el orden de la armónica.

La magnitud de la armónica, en por unidad, es igual a:

$$I_h = \frac{I_1}{h}$$

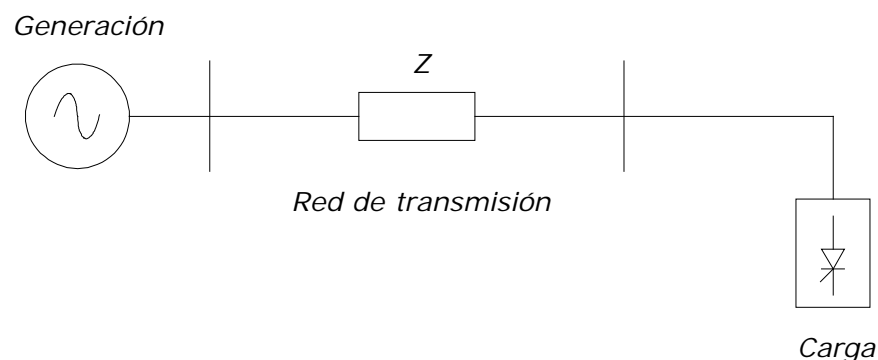
Donde:

- I_h – Magnitud de la corriente armónica (en pu)
- I_1 – Magnitud de la corriente fundamental (en pu)
- h – Orden de la armónica

En la medida en que se incrementa el orden de la armónica, su magnitud y frecuencia disminuyen; por ello, las armónicas de orden inferior tienen mayor repercusión en el sistema de potencia.⁷

Generalmente, la medición de armónicas se realiza en las ondas de corriente en el lado de la carga o usuario y en la onda de tensión en el lado de la red.

La onda distorsionada de corriente en el lado de la carga produce una caída de tensión con la impedancia de la red de transmisión, de manera que se distorsiona la onda de tensión. Por lo tanto, el problema de las armónicas debe controlarse en el punto en donde se genera, de lo contrario se puede transmitir a otros usuarios conectados a la misma red.⁸

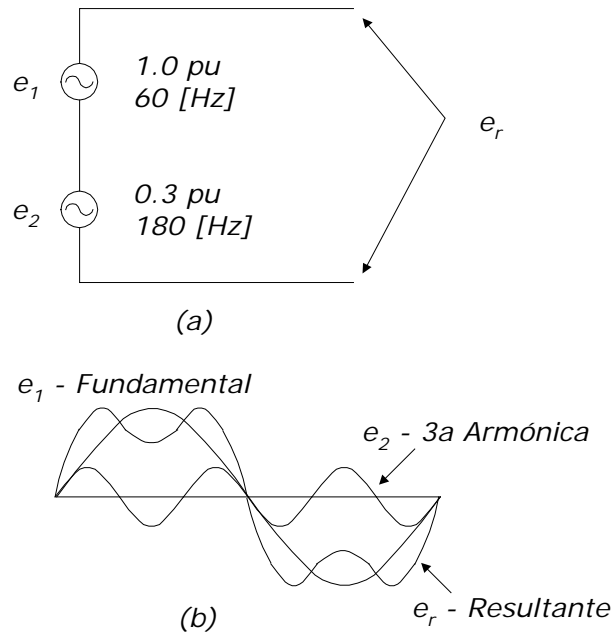


La presencia de armónicas en el sistema eléctrico se puede detectar a través de los efectos que producen⁹, por ejemplo:

- Fusibles fundidos en los bancos de capacitores
- Transformadores y motores eléctricos que se sobrecalientan sin razón aparente
- Operación incorrecta de protecciones

3.3 Distorsión armónica

Cuando las armónicas se combinan con la frecuencia fundamental, ocurre la distorsión de la onda. La distorsión armónica es causada por dispositivos no lineales conectados al sistema de potencia, en los cuales la corriente no es proporcional a la tensión aplicada.¹⁰

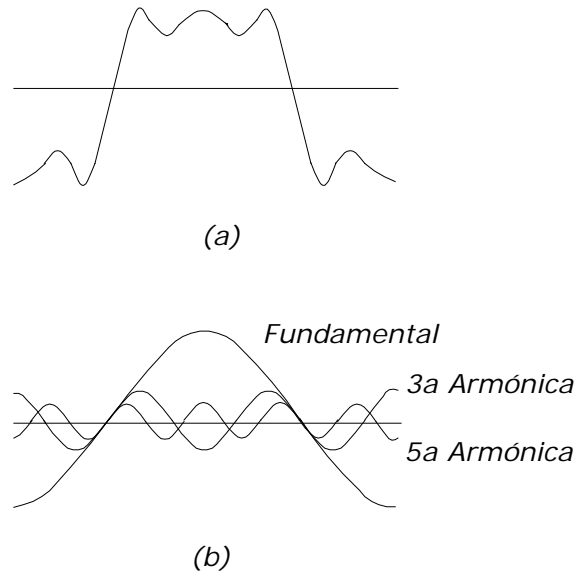


(a) Circuito. (b) Onda distorsionada

3.3.1 Descomposición de una onda distorsionada en sus armónicas

Cuando la forma de onda es idéntica de un ciclo a otro (onda periódica), ésta puede ser representada como una suma de ondas senoidales puras en la cual la frecuencia de cada senoide es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental de la onda distorsionada. La descomposición una onda periódica en su fundamental y componentes armónicas se fundamenta en el análisis de Fourier.¹¹

Ésta propiedad es de gran utilidad en el análisis de sistemas eléctricos; cada componente senoidal de la onda distorsionada puede analizarse por separado usando métodos de solución de circuitos y después aplicar superposición.



(a) Onda distorsionada. (b) Fundamental y sus componentes armónicas

3.4 Componentes simétricas y secuencia armónica

Los sistemas trifásicos regularmente son analizados utilizando el método de componentes simétricas para simplificar su análisis.¹² El sistema trifásico, representado por tres fasores, se sustituye por la suma de tres sistemas de fasores simétricos: un sistema de secuencia positiva, un sistema de secuencia negativa y un sistema de secuencia cero.¹³

El sistema de secuencia positiva es un sistema trifásico equilibrado representado por tres fasores de igual módulo, con un ángulo de defasamiento de 120° entre ellos y con una secuencia de fase a-b-c (0° , -120° , 120°). El sistema de secuencia negativa tiene las mismas características que el anterior pero con una fase de rotación inversa a-c-b (0° , 120° , -120°). El sistema de secuencia cero se representa por tres fasores de igual módulo y en fase (0° , 0° , 0°).¹⁴

En un sistema trifásico balanceado, la componente de secuencia armónica puede determinarse multiplicando el orden de la armónica por la secuencia de fase positiva. Por ejemplo, para la tercera armónica, $h=3$, se tiene $3 \times (0^\circ, -120^\circ, 120^\circ)$, resultando una armónica de secuencia cero ($0^\circ, 0^\circ, 0^\circ$), conocida también como armónica triple.¹⁵

Existe un patrón que relaciona las armónicas con su respectiva secuencia, donde únicamente se presentan armónicas impares, ya que en un sistema eléctrico no se generan armónicas de números pares. La siguiente tabla muestra la secuencia dominante correspondiente a cada armónica.¹⁶

SECUENCIA DE FASE	POSITIVA	NEGATIVA	CERO
Orden de la armónica	1	5	3
	7	11	9
	13	17	15

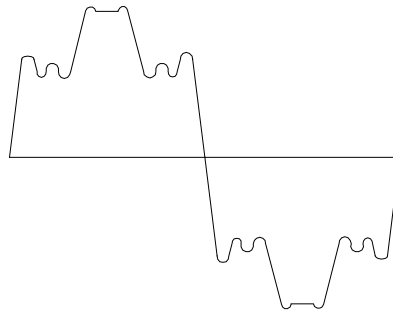
3.5 Distorsión Armónica Total

Este factor expresa la cantidad de distorsión armónica contenida en la onda distorsionada¹⁷ y es determinado por la siguiente ecuación:

$$THD = \frac{\sqrt{\text{Suma de los cuadrados de todas las amplitudes armónicas}}}{\text{Amplitud de la fundamental}} \times 100$$

El THD puede calcularse para tensión o corriente y es utilizado para muchas aplicaciones.

Por ejemplo, considerando la forma de onda de corriente distorsionada de la siguiente figura.



Orden de Armónicas	Frecuencia [Hz]	Amplitud de la Onda Fundamental en PU
Fundamental	60	1 = 1.000
5a	300	1/5 = 0.200
7a	420	1/7 = 0.143
11a	660	1/11 = 0.091
13a	780	1/13 = 0.077

Contenido armónico de una onda distorsionada

Se tiene una distorsión armónica total igual a:

$$THD = \frac{\sqrt{(0.2)^2 + (0.143)^2 + (0.091)^2 + (0.077)^2}}{1.0} \times 100 = 27\%$$

3.6 Fuentes de armónicas

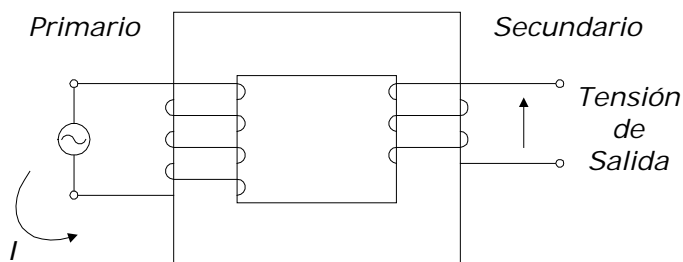
3.6.1 Fuentes tradicionales de armónicas

Antes del incremento de los convertidores estáticos de potencia, el problema de las armónicas en los sistemas eléctricos de potencia se relacionaba con la operación de transformadores y máquinas rotatorias; incluso, la corriente de excitación requerida por los transformadores de potencia, era la principal fuente generadora de armónicas.¹⁸

En operación estable, estas máquinas no provocan una distorsión considerable en el sistema, sin embargo, cuando operan fuera del rango de especificaciones o hay fluctuaciones de tensión, los niveles de distorsión son significativos. Otras fuentes de armónicas son la iluminación fluorescente y dispositivos de arco.

Transformadores

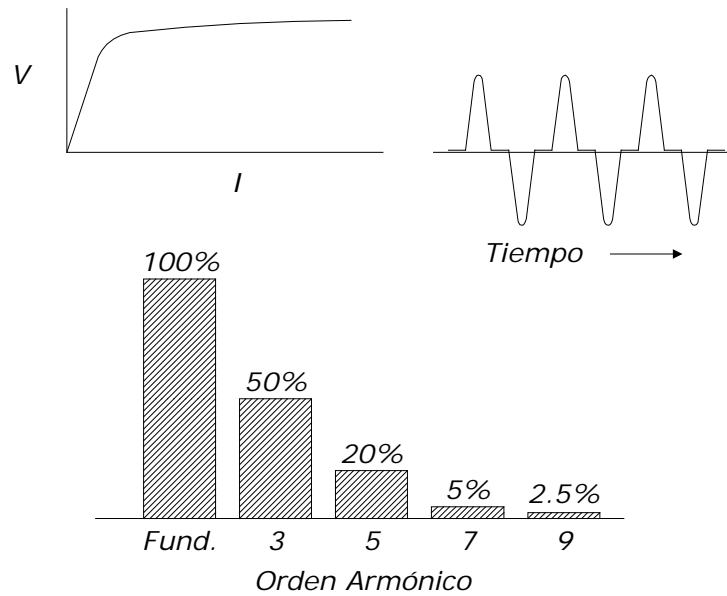
Cuando una tensión senoidal es aplicada al devanado primario del transformador, una pequeña corriente fluirá si el transformador está en vacío. Ésta corriente, conocida como corriente de excitación, es necesaria para establecer el campo magnético en el núcleo del transformador y así, inducir una tensión en el lado secundario.¹⁹



Corriente de excitación en el devanado primario de un transformador

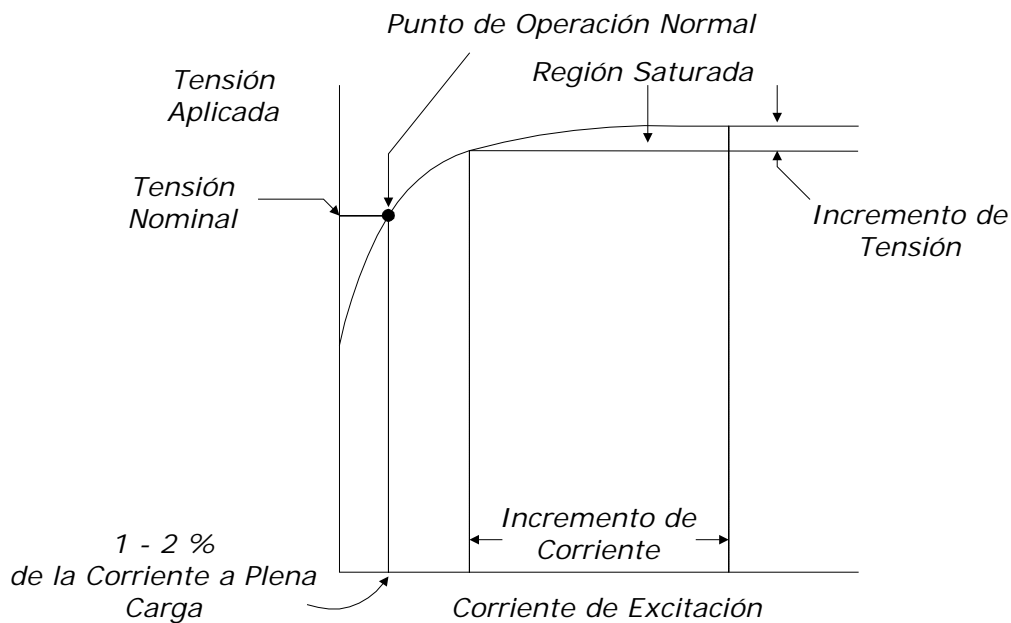
Las pérdidas por histéresis, provocan que la forma de onda de la corriente de excitación demandada por el transformador no sea senoidal. La distorsión de la onda se debe principalmente a la armónica de tercer orden, la cual alcanza el 50% de la corriente a la frecuencia fundamental; el resto de las armónicas (5^a, 7^a y 9^a), repercuten en un grado menor.²⁰

Los transformadores son diseñados para operar con una corriente de excitación del 1 o 2% la corriente nominal a plena carga. Así, aunque los transformadores son numerosos en el sistema de potencia, su corriente de excitación generalmente no causa problemas armónicos.²¹



Distorsión armónica en la corriente de excitación

Cuando la tensión aplicada al transformador es mayor a la nominal, el campo magnético se incrementa al punto donde el núcleo puede alcanzar la saturación. A un ligero incremento de tensión, el núcleo saturado produce un gran incremento en la corriente de excitación incrementándose abruptamente el contenido armónico de la misma.²²



Curva de saturación de un transformador

En una línea que termina en un transformador, energizada con el interruptor de carga abierto, se presenta una sobretensión causada por un transitorio que dura algunos ciclos y una sobretensión de tiempo largo a través de la inductancia de la línea, conocida como efecto Ferranti. Ésta alta tensión provoca la saturación del transformador generando altas corrientes armónicas hasta que la sobretensión sostenida se reduce por el cierre del interruptor de carga.

- **Conexión de transformadores**

En sistemas de distribución se usan transformadores con conexión estrella-estrella para minimizar las fallas monofásicas, no obstante, la corriente de excitación de ésta conexión fluye al sistema de potencia y puede causar distorsión de tensión significativa en el devanado secundario.

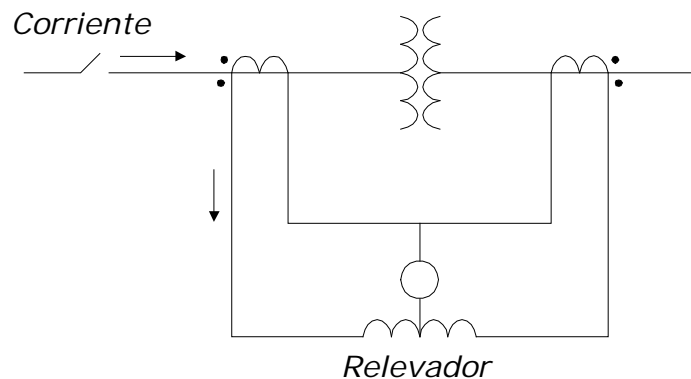
La conexión delta-estrella presenta una trayectoria de baja impedancia para la 3^a armónica de la corriente de excitación en el devanado delta, induciendo una tensión secundaria no distorsionada.²³ Por ésta razón, en plantas industriales es común usar transformadores con conexión delta-estrella.

- **Corrientes de inrush**

La corriente de inrush es una corriente de energización del transformador, que puede ser de 8 o hasta 12 veces la corriente a plena carga hasta por un segundo.²⁴ Después de ese corto tiempo, la corriente de excitación decae a su valor normal de 1 o 2% de la corriente a plena carga.

La corriente de inrush contiene armónicas pares e impares con la 2^a armónica dominante, pero como no es una corriente de excitación continua, no representa un problema severo de armónicas.

En transformadores de potencia con esquema de protección diferencial, el relevador tiende a operar innecesariamente cuando el transformador es energizado, debido a la corriente de inrush. En este caso, es necesario suministrar un filtro para restringir la 2^a armónica.



Esquema de protección diferencial para transformadores

La electrónica de potencia (EP)

Es una rama de la electrónica que más se ha desarrollado los últimos años, debido al creciente número y variedades de circuitos utilizados en sistemas industriales.

Estos circuitos están fundamentalmente diseñados de la siguiente manera:

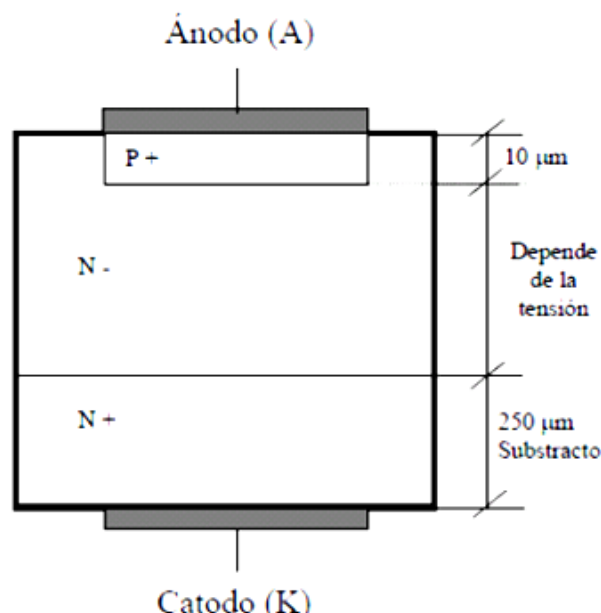
- 1.- Un circuito de Potencia, el cual está compuesto por semiconductores de potencia y elementos pasivos que conecta la fuente de alimentación con la carga.
- 2.-Un circuito de control, este es el encargado de procesar la información proporcionada por la carga o la fuente de alimentación, recibiendo las señales necesarias para conocer las condiciones con la que deben operar los elementos semiconductores y poder administrar la potencia entregada a una carga.

Para poder administrar la potencia a una carga de forma eficiente, los elementos semiconductores deben de permitir el paso de grandes corrientes siendo controlados en momentos precisos, consumiendo una potencia muy reducida y soportando altas tensiones cuando estos elementos se encuentran en su periodo de bloqueo.

Estos se pueden clasificar en 3 grupos de acuerdo a su control:

Dispositivos no controlados:

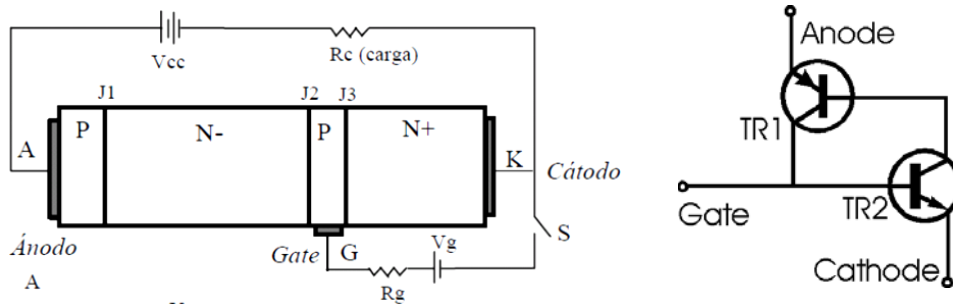
Los diodos los cuales se encuentran formados por la unión de 2 semiconductores del grupo 3 (tipo p) y 5 (tipo n) ,formando un ánodo y cátodo, debido a la presencia de impurezas en estos semiconductores, estos crean una barrera de potencial en su unión ,por lo que solo permite el paso de la corriente, cuando existe un potencial positivo mayor en el ánodo que en el cátodo, provocando una reducción en dicha barrera permitiendo el libre paso de electrones, por lo que se encuentra polarizado en directa , mientras que cuando el potencial del cátodo es mayor que en el ánodo la barrera de potencial aumenta impidiendo el flujo de corriente por lo que se encuentra en polarizado en inversa.



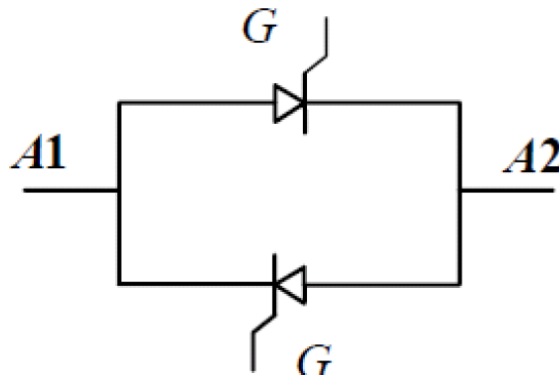
Dispositivos semicontrolados:

En este grupo se encuentran, dentro de la familia de los tiristores, los SCR y los TRIAC. Los SCR están formados por un ánodo, cátodo y la puerta esto es posible mediante la unión de 2 transistores los cuales se retroalimentan por medio de un pulso en la puerta lo cual inicia dicha realimentación, provocando la saturación de los 2 transistores, por lo que idealmente se comportan como un cortocircuito, a diferencia de los diodos estos son capaces de polarizarse en cualquier momento del periodo.

El flujo de corriente entre el ánodo y el cátodo estará determinado por el circuito de potencia, ya que puede ser un circuito de conmutación natural o forzada dependiendo de las necesidades de la carga.



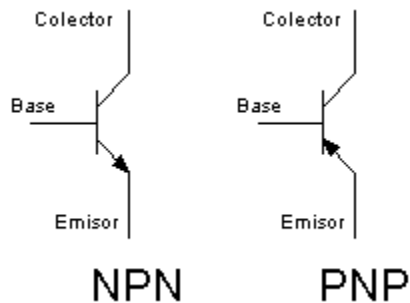
Mientras que el TRIAC esencialmente está formado por 2 tiristores conectados en paralelo y en sentido contrario, estos se encuentran limitados en el uso de grandes potencias ya que manejan voltajes de aproximadamente 1000 V y corrientes de 15 amperes por lo que manejan potencias reducidas.



Dispositivos totalmente controlados:

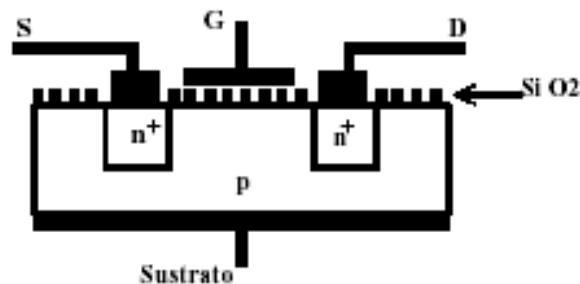
En este se encuentran los transistores bipolares (TBJ), los cuales están formados por semiconductores dopados constituidos por una base, colector y emisor. El emisor está fuertemente dopado y es capaz de inyectar sus electrones libres a la base, mientras que la base pasa los electrones inyectados del emisor al colector, dado que el emisor es la fuente de los electrones, es donde se origina la corriente más grande mientras que la mayor parte del flujo de electrones llega al colector es prácticamente igual a la corriente del emisor.

Para poder polarizar este dispositivo se debe de inyectar una corriente en la base, obteniendo corrientes mayores en el emisor debido a su gran nivel de dopaje.



Transistor Efecto Campo (MOSFET)

Los transistores de efecto campo MOSFET están formados por el drenador, fuente, puerta aislada por una capa de dióxido de Silicio (aislante) y sustrato p. En el modo de vaciamiento positivo, este elemento es capaz de permitir la conducción del drenador hacia la fuente por medio de una fuente de alimentación, atravesando el estrecho canal formado por formado por el estrato p, mientras que la puerta controla la anchura de ese canal, mientras más positiva sea la tensión de la puerta este permitirá un mayor flujo de corriente, mientras que existe una tensión positiva mínima, en la cual la corriente del drenador será interrumpida.



Este elemento tiene una alta impedancia de entrada y es capaz de conmutar aproximadamente a 100 ns. siendo controlado por medio de la puerta.

Las pérdidas de conducción en este dispositivo son mayores cuando las corrientes que fluyen sean mayores, ya que se comporta como un elemento resistivo cuando conduce.

Al operar sobre rangos muy específicos de tiempo, las probabilidades de falla son mínimas, mientras que son muy sensibles a transitorios ya que pueden alcanzar valores máximos de operación por lo que las probabilidades de falla aumentan.

Los IGBT procede esencialmente de la tecnología de los MOSFET, estos están formados por una colector, emisor y puerta el cual se polariza aplicando un voltaje positivo entre la puerta y el emisor, mientras que la salida es una corriente entre los terminales de colector y emisor.

Este dispositivo cuenta con una alta impedancia de entrada y alta velocidad en su conmutación.

El IGBT tiene una caída de voltaje mucho menor mientras su tensión de disrupción mayor que los MOSFET.

Estas son las diferentes características que presenta cada uno de los dispositivos utilizados en la electrónica de Potencia:

DISPOSITIVO	POTENCIA	FRECUENCIA
TIRISTORES	Alta	Baja
GTOs	Alta	Baja
TRIACs	Baja	Baja
MOSFETs	Baja	Alta
BJTs	Media	Media
IGBTs	Media	Alta

Este conjunto de dispositivos se usan de manera variada en los sistemas electrónicos de potencia como por ejemplo:

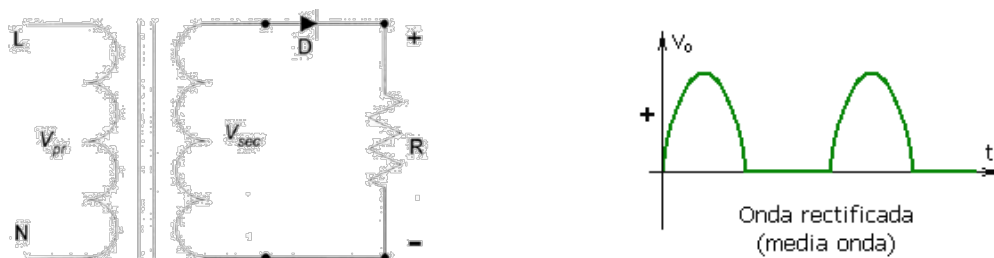
Rectificadores.

Son circuitos encargados de convertir el voltaje bidireccional en un voltaje de corriente directa, estos rectificadores en general son usadas en computadoras, dispositivos electrónicos de consumo.

Rectificadores No Controlados.

Estos hacen el uso de diodos en el caso de un rectificador de media onda lo comprende un transformador el cual está conectado al sistema en el lado de alta, mientras que en el lado de baja el flujo de corriente es controlado por un diodo.

Este se basa en el hecho de que el diodo solo permite el flujo de corriente en una dirección por lo que al ser una carga puramente resistiva habrá conducción solo en el semiciclo positivo de la carga.



Bajo estas condiciones la potencia entregada a la carga será la mitad que en la ausencia del diodo.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^T (V_{max} \text{sen}(\omega t))^2 d\omega t} = \frac{V_{max}}{2}$$

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{R} = \frac{V_{max}}{2R}$$

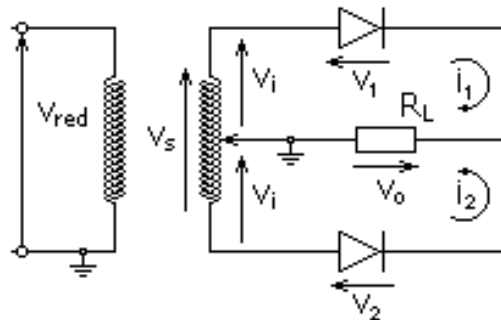
$$P = V_{rms} I_{rms} = \frac{V_{max}^2}{4R}$$

Para evitar una caída abrupta en la carga se conecta un capacitor en paralelo, ya que este es capaz de proporcionar la energía almacenada en el mismo para evitar una caída tan repentina.

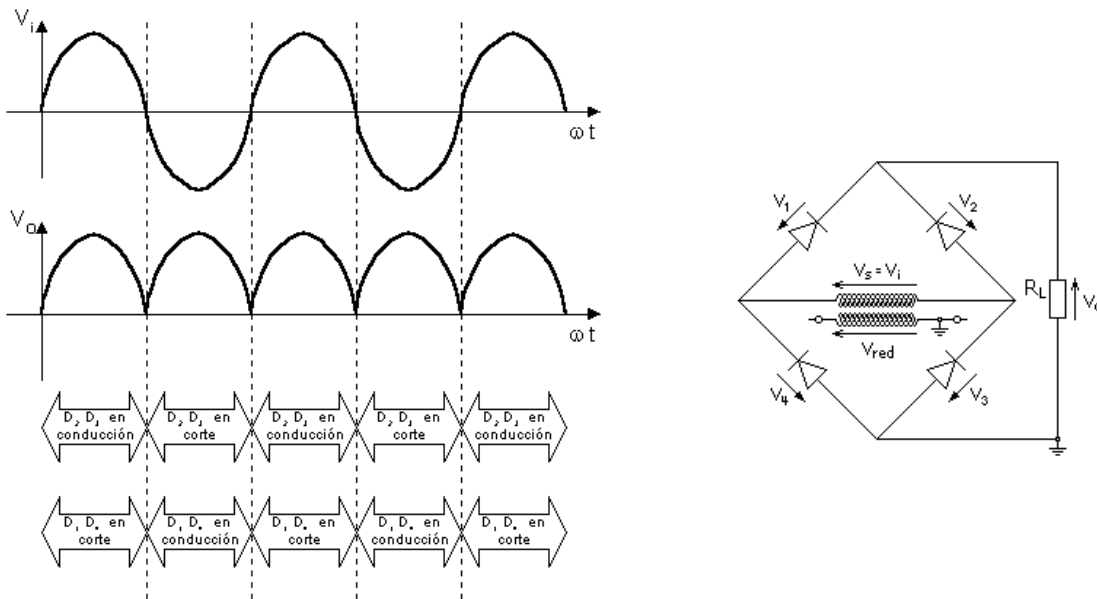
Rectificador monofásico de Onda Completa.

Este circuito utiliza un transformador de devanado secundario con derivación central, por lo que es posible aprovechar los 2 semiciclos provenientes de la fuente por lo que tendrá la una caída de tensión más sutil, mientras se puede reducir el tamaño del rizo aumentando la frecuencia de la fuente.

En este rectificador solo uno de los diodos esta polarizado en el caso del D1 conduce en el semiciclo positivo mientras que el D2 está polarizado en inversa impendo el paso de la corriente y viceversa en el semiciclo negativo.



Otra configuración de Rectificación de onda completa es conocida como el puente H el cual está formado por cuatro diodos en circuitos monofásicos y seis en circuitos trifásicos, sin embargo no es necesario un transformador con tap central para su implementación.



En este caso solo habrá conducción de 2 diodos dependiendo el semiciclo en el que se encuentre la fuente de alimentación, en el semiciclo positivo solo conducirán los diodos D1 y D3 ,mientras que en el semiciclo negativo solo conducirán los diodos D2 y D4 mientras la carga sea puramente resistiva.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} (V_{max} \text{sen}(\omega t))^2 d\omega t} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}}$$

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{R} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}R}$$

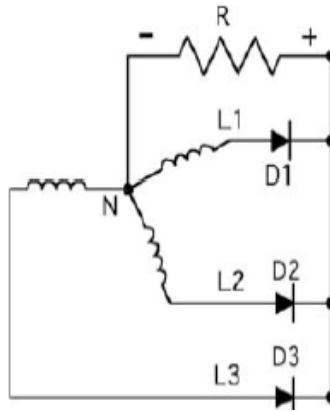
$$P_{rms} = \frac{V_{rms}^2}{R} = \frac{V_{max}^2}{2R}$$

Rectificadores Trifásicos (Media Onda y Onda Completa)

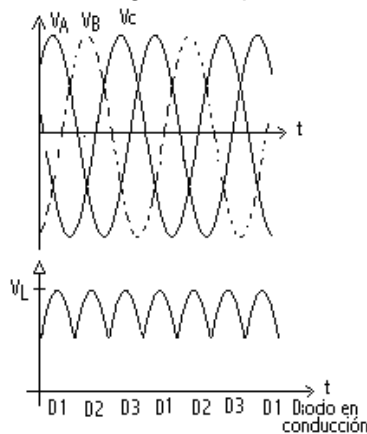
Rectificador Trifásico no controlado de Media Onda.

Las fuentes de voltaje se encuentran conectadas a una misma carga mientras que su conducción se limita por 120 grados con respecto a su periodo y así consecutivamente permitiendo el flujo de corriente por un tercio del periodo, que corresponde a 5.5 ms para sistemas de 60 Hz.

De forma que cada fase aporta corriente mientras su voltaje instantáneo sea mayor que las otras fases de forma alternada, por lo que el flujo de corriente hacia la carga tendrá una sola dirección mientras que los diodos de las fases que no conducen permanecerán polarizados en inversa, por lo que no permiten su conducción.



La rectificación de media onda produce componentes de CD en la fuente de corriente, esto no es recomendable para el uso de grandes potencias.

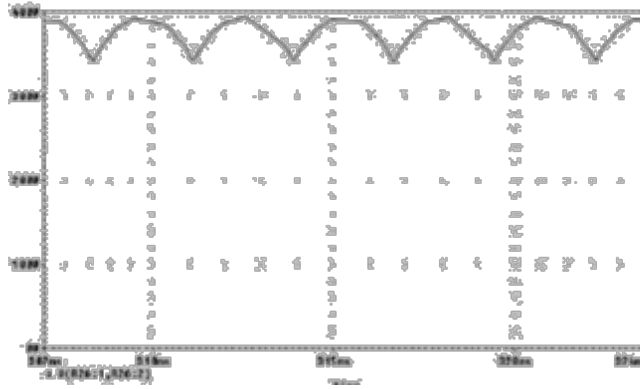
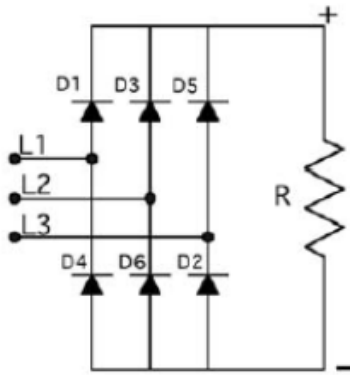


Por lo que habrá 3 pulsos en un ciclo cada uno conformado por cada una de las fases.

Rectificador de Onda Completa.

Se basa en el mismo principio que el rectificador de media onda sin embargo cada fase conduce en los semiciclos positivo y negativo, por lo que habrá 6 pulsos en cada ciclo por lo que el tiempo de conducción de cada fase será de 60 grados eléctricos, por lo que se le conoce como rectificador de 6 pulsos.

La corriente de carga se hace discontinua en una menor cantidad de tiempo por acción de las 3 fases, por lo que a comparación de las rectificaciones anteriores el rizo en el voltaje de salida es mucho menor, mientras que son utilizados para grandes volúmenes de potencia sin embargo esto implica el uso de diodos de mayor tamaño y esta significa una gran fuente de armónicas.

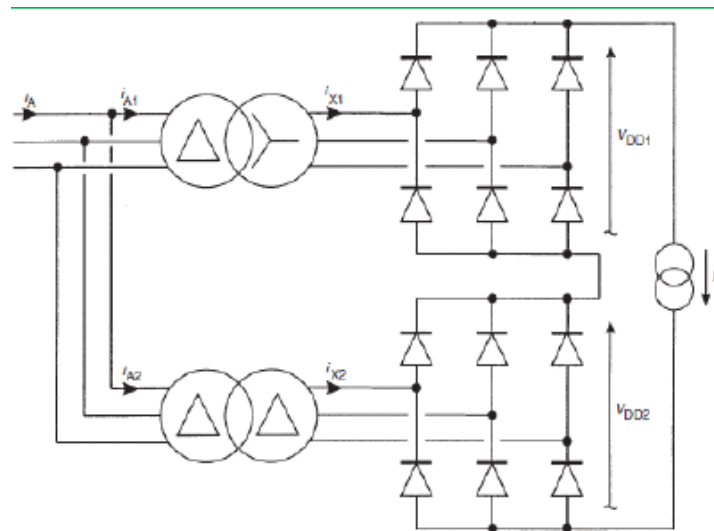


$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi/6} \int_0^{\pi/6} (\sqrt{3}(V_{max} \cos(\omega t)))^2 d\omega t} = \left(\frac{3}{2} + \frac{9\sqrt{3}}{4\pi}\right) V_{max} = 1.6554V_{max}$$

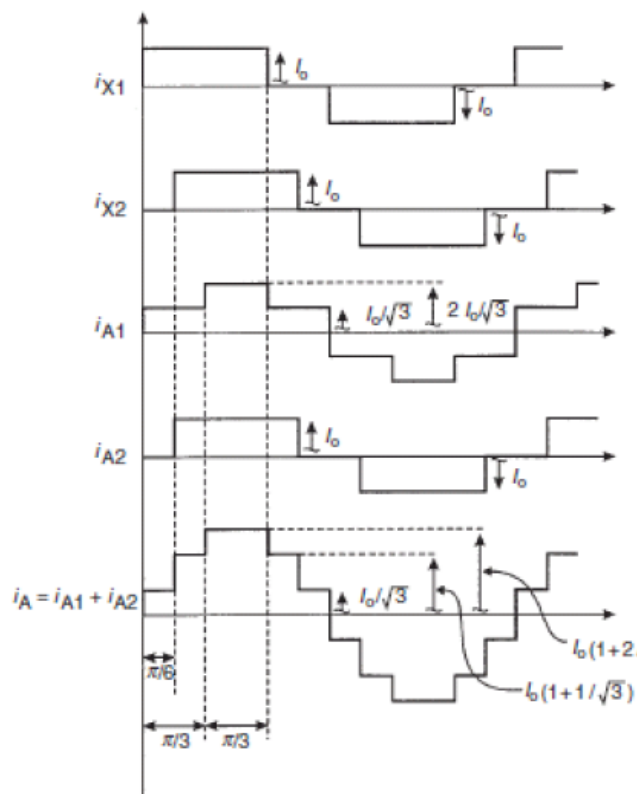
Rectificador trifásico de 12 pulsos.

Esta configuración reduce la ondulación en la tensión de salida, utilizando comúnmente un transformador delta-estrella junto con un transformador delta-delta, sin embargo la relación de vueltas del transformador delta-estrella es $1: \frac{1}{\sqrt{3}}$ por lo que los voltajes secundarios de línea a línea tienen la misma amplitud, sin embargo estos se encuentran adelantados 30 grados con respecto a los voltajes primarios.

El transformador delta-delta tiene una relación de vueltas 1:1 los voltajes y corrientes se encuentran en fase.



Estos 2 transformadores se encuentran en paralelo por lo que en la primera entrada de la línea de cada rectificador, existe un desfase de 20 grados entre las 2 corrientes que fluyen a través de los 2 transformadores donde i_{x1} está adelantada a i_{x2} , en la primera corriente de entrada i_{A1} , está formada por la combinación de 2 corrientes secundarias reflejadas casi cuadradas, $(i_{x1}-i_{x2})/\sqrt{3}$.



Mientras que la corriente i_{A2} es la misma corriente que en el secundario i_{x2} , ya que el transformador tiene una configuración delta-delta.

Por lo que la corriente resultante es $I_A = I_{A1} + I_{A2}$, tiene una forma escalonada multinivel, tiene forma parecida a una senoidal ideal.

Motores y generadores

Como en el transformador, un motor requiere de corriente de excitación del sistema para establecer un campo magnético en su núcleo. No obstante, en el caso de un motor, la curva de saturación es más lineal que la de un transformador.

El tipo de devanado de un motor también influye en la generación de armónicas. Los devanados típicos del motor tienen 5 o 7 ranuras por polo, produciendo corrientes armónicas de orden 5ª y 7ª. Estas armónicas son minimizadas por ajuste de las ranuras.²⁵

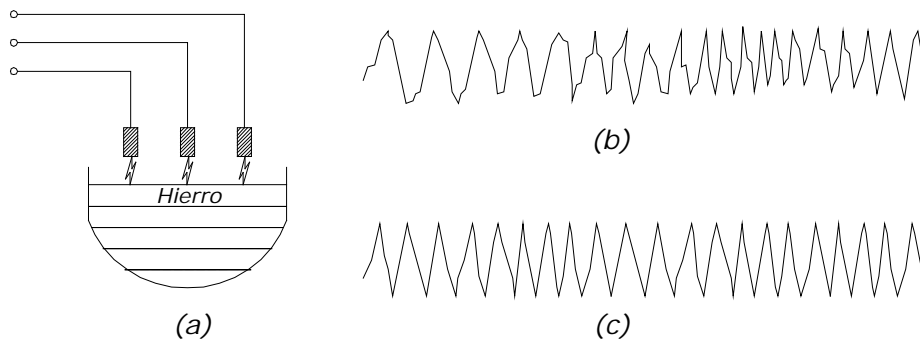
En un generador de corriente alterna, la tensión inducida en el estator es ligeramente distorsionada y contiene una componente dominante de 3ª armónica. Esto causa que fluya corriente de 3ª armónica cuando el generador opera bajo carga.

Las armónicas causadas por motores y generadores no son significativas en comparación con la producción armónica total en el sistema de potencia.

Dispositivos de arco

Esta categoría incluye hornos de arco eléctrico, soldadoras de arco y lámparas de descarga (fluorescentes, vapor de sodio, vapor de mercurio) con balastro electrónico.²⁶ Todos estos equipos tienen un comportamiento no lineal.

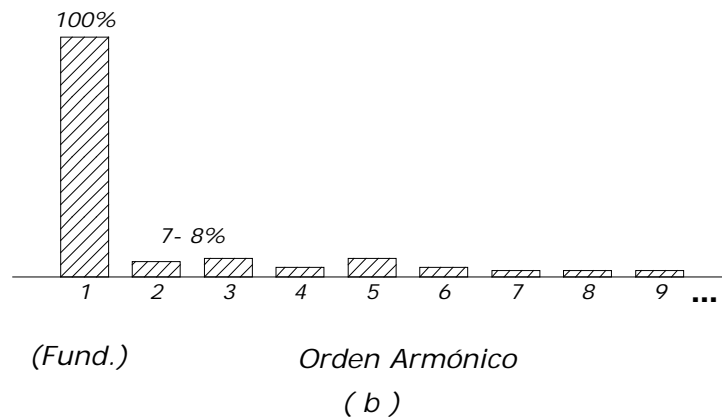
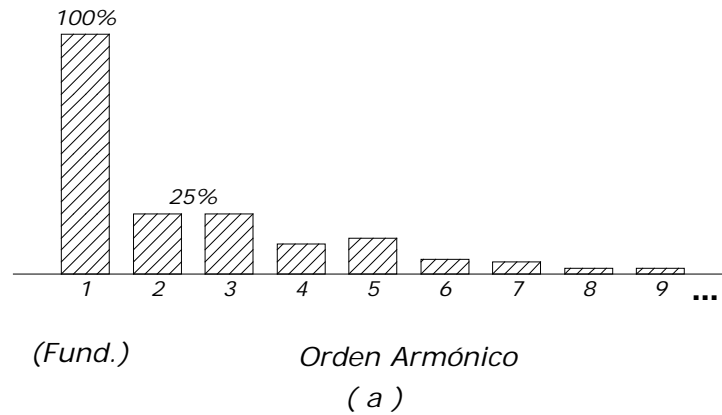
En un horno de arco eléctrico de AC, el acero y otros materiales metálicos son fundidos y refinados por medio de un arco de alta energía. El proceso inicia cuando tres electrodos de grafito, cada uno controlado individualmente, son acercados al horno, haciendo contacto con el acero. Los electrodos son levantados y bajados para regular la corriente de arco; la trayectoria de la corriente es de un electrodo a través del acero a otro electrodo. La corriente que pasa a través del carbón del electrodo al acero tiene una impedancia diferente en la dirección positiva que en la dirección negativa.



(a) Horno de arco. (b) Corriente demandada
(c) Distorsión de tensión en el bus

Durante el proceso de fundición, la tensión decae tanto como la corriente de arco incrementa, limitada únicamente por la impedancia del sistema de potencia, que se ve afectada por la reactancia de los cables del horno y algunas contribuciones del transformador que lo alimenta.²⁷ El resultado de las variaciones de la tensión de arco produce todas las armónicas.

Cuando la chatarra está siendo fundida, la 2ª y 3ª armónicas son dominantes. En el proceso de refinación, la superficie del metal es relativamente uniforme y el arco es más estable, predominando todavía la 2ª y 3ª armónicas pero con magnitudes reducidas al 7 u 8% de la magnitud de corriente fundamental.²⁸



*Armónicas producidas durante la operación de un horno de arco
(a) Período inicial de fundición. (b) Período de refinación*

Los dispositivos de arco con mayor producción de armónicas son, probablemente, cargas de alumbrado, las cuales tienen mayor presencia en el sistema de potencia. Sin embargo, los hornos de arco causan los problemas más severos porque representan una fuente armónica de gran capacidad, concentradas en un solo lugar.

Alumbrado fluorescente

Son lámparas de descarga que requieren un balastro para suministrar una alta tensión e iniciar la descarga de la corriente entre los dos electrodos del tubo a través de vapor o gas. Una vez que la descarga es establecida, la tensión disminuye y la corriente de arco se incrementa. El balastro reduce rápidamente la corriente hasta obtener la iluminación especificada. De esta forma, el balastro es también un limitador de corriente.²⁹

Las armónicas generadas incluyen una fuerte componente de 3ª armónica, porque el balastro es un dispositivo ferromagnético que requiere corriente de excitación la cual contiene armónicas de tercer orden.



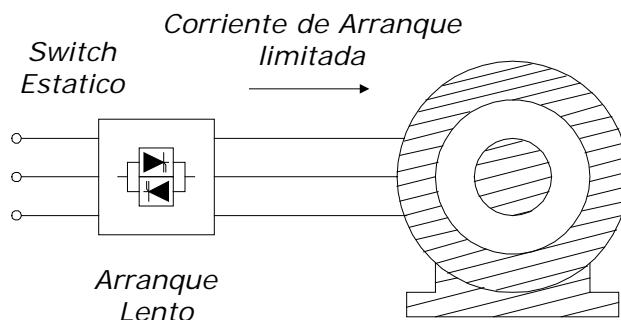
Corriente demandada por una lámpara fluorescente

La creciente demanda de sistemas eficientes de iluminación, debido a programas de ahorro de energía, ha incrementado el uso de éstas lámparas, provocando una fuerte inyección de armónicas a la red de distribución.

3.6.2 Nuevas fuentes de armónicas

Controladores de tensión

Estos dispositivos generan armónicas por su mecanismo de control. Por ejemplo, los arrancadores a tensión reducida tienen un switch de tiristores que limita la corriente de arranque demandada por el motor, disminuyendo la tensión durante el arranque. La tensión aplicada al motor es controlada por la variación en el ángulo de encendido de los tiristores del switch.



Arrancador a tensión reducida

Sólo operan por un corto tiempo (durante el arranque del motor), de tal manera que no causan grandes problemas de armónicas.

Compensadores estáticos de vars

El compensador estático de vars (SVC) controla la tensión por el ajuste de la cantidad de potencia reactiva suministrada o absorbida del sistema. Utiliza reactores y capacitores controlados por tiristores. El SVC puede cambiar la magnitud y dirección del flujo de vars muy rápidamente en respuesta a las necesidades de carga.

Un SVC es usado en cargas industriales que varían rápida y significativamente, tales como hornos de arco eléctrico, para suministrar potencia reactiva local a la carga. Esto reduce el flicker e incrementa la eficiencia del horno.

En los sistemas de potencia, el SVC opera continuamente para regular la tensión y mejorar la capacidad de transferencia de potencia a través del sistema de transmisión. El SVC podría también ser switchheado inmediatamente después de una falla en el sistema para ayudar a mantener la estabilidad suministrando potencia reactiva y tener un mejor soporte de tensión.

3.7 Características de la respuesta del sistema

3.7.1 Impedancia del sistema

Cuando un circuito es excitado por una fuente de tensión que es una función senoidal del tiempo a una determinada frecuencia, circula una corriente cuya amplitud y ángulo de fase dependen de la tensión aplicada, de los elementos que lo constituyen y de la frecuencia.³⁰

La representación compleja de las funciones senoidales de corriente y tensión permite relacionarlas mediante la impedancia del circuito. Ésta relación constituye la ley de Ohm en forma generalizada.

Para el caso de un circuito formado por una resistencia, inductancia y capacitancia, la impedancia se expresa como:³¹

$$Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$$

Los sistemas eléctricos de potencia, a la frecuencia fundamental, son considerados primeramente inductivos y la impedancia equivalente en algunas ocasiones es llamada reactancia de corto circuito; debido a que los efectos capacitivos son despreciados frecuentemente en los sistemas de distribución y en los sistemas eléctricos industriales.³²

Una de las cantidades más utilizadas en el análisis de armónicas en los sistemas eléctricos es la impedancia de corto circuito en el punto de la red donde un capacitor es localizado. Cuando no se tiene disponible en forma directa, se puede calcular a partir de los estudios de corto circuito, expresados en MVA o por medio de la corriente de corto circuito.³³

$$Z_{CC} = R_{CC} + jX_{CC} = \frac{kV^2}{MVA_{CC}} = \frac{kV \times 1000}{\sqrt{3}I_{CC}}$$

Donde:

- Z_{CC} – Impedancia de corto circuito
- R_{CC} – Resistencia de corto circuito
- X_{CC} – Reactancia de corto circuito
- kV – Tensión entre fases en [kV]
- MVA_{CC} – Potencia de corto circuito trifásico en [MVA]
- I_{CC} – Corriente de corto circuito en [A]

La impedancia de corto circuito es una cantidad fasorial que consiste tanto de resistencia como de reactancia. Si el valor de corto circuito no contiene información de fase, puede asumirse que la impedancia es puramente reactiva.

Como la porción de reactancia inductiva de la impedancia cambia linealmente con la frecuencia, es necesario ajustar la reactancia al valor de la frecuencia; la reactancia de la h armónica es determinada a partir de la reactancia a la frecuencia fundamental X_1 ,³⁴ esto es:

$$X_h = hX_1$$

En la mayoría de los sistemas eléctricos puede asumirse que la resistencia no cambia significativamente cuando se estudian los efectos de las armónicas menores a las de noveno orden.

En los sistemas eléctricos de potencia industriales, la reactancia equivalente del sistema está regularmente dominada por la impedancia del transformador; lo cual permite aproximar la reactancia de corto circuito a la impedancia del transformador.³⁵

3.7.2 Impedancia capacitiva

Los capacitores por sí solos no generan armónicas, sin embargo, algunas distorsiones armónicas pueden atribuirse a su presencia.³⁶

Los capacitores en derivación, conectados en el lado del usuario para corregir el factor de potencia, o bien, en la red de distribución para control de tensión, alteran la impedancia del sistema con la variación de la frecuencia. Mientras la reactancia inductiva incrementa proporcionalmente con la frecuencia, la reactancia capacitiva decrece debido a que:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

Donde la capacitancia C está dada en farads;³⁷ no obstante, los capacitores son especificados en términos de su potencia, por lo cual éste parámetro es calculado en base a ella y a la tensión aplicada. La reactancia capacitiva de línea a neutro para un banco de capacitores puede determinarse de la siguiente manera:

$$X_C = \frac{kV^2}{MVAR}$$

3.7.3 Resonancia paralelo

La resonancia paralelo ocurre cuando la reactancia inductiva X_L es igual a la reactancia capacitiva X_C ;³⁸ la frecuencia a la cual ocurre éste fenómeno es llamada frecuencia de resonancia.

Cuando la reactancia inductiva y capacitiva del sistema entran en resonancia con alguna armónica generada por una carga no lineal, esa corriente armónica excitará al circuito generando una corriente amplificada que oscila entre la energía almacenada en la inductancia y el capacitor.

La característica de un circuito resonante paralelo es una alta impedancia al flujo de la corriente armónica a la frecuencia de resonancia.³⁹

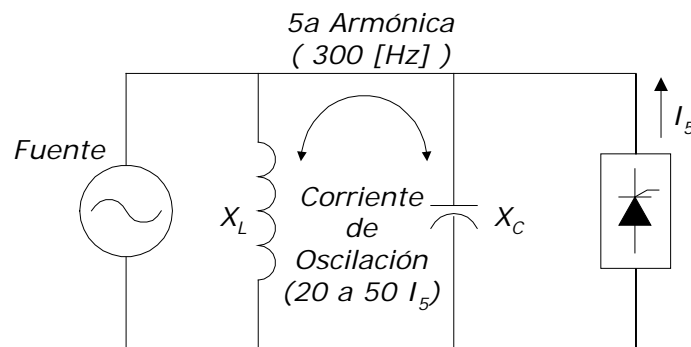
En el análisis de los sistemas eléctricos, la frecuencia a la cual ocurre la resonancia paralelo puede ser calculada con la siguiente ecuación:⁴⁰

$$f_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} = \sqrt{\frac{MVA_{CC}}{MVAR_{cap}}}$$

Donde:

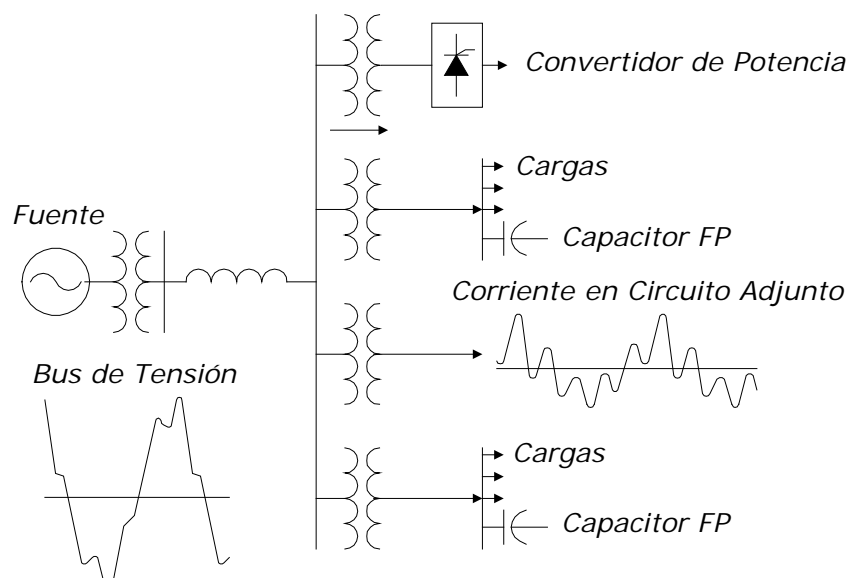
- f_r – Frecuencia de resonancia
- X_C – Reactancia capacitiva a la frecuencia fundamental
- X_L – Reactancia inductiva a la frecuencia fundamental
- MVA_{CC} – MVA de corto circuito del sistema
- $MVAR_{cap}$ – MVAR de los capacitores

Por ejemplo, en el circuito mostrado, la frecuencia de resonancia es cercana a 300 [Hz] (5ª armónica) y se generan armónicas de quinto orden en el convertidor estático de seis pulsos; la corriente armónica excita al circuito resonante presentándose una impedancia muy grande al flujo de la misma.



Circuito típico de resonancia paralelo

La resonancia paralelo y la corriente de 5ª armónica producen una tensión armónica grande en el bus y una corriente de oscilación que puede ser de 20 a 50 veces la magnitud de la corriente armónica que originalmente excita al circuito.



Propagación de corriente armónica a través del sistema

La corriente amplificada podría fundir fusibles del banco de capacitores. La tensión distorsionada del bus podría causar el flujo de corrientes distorsionadas en los circuitos adyacentes y afectar a cargas remotas de la fuente armónica y del circuito.

3.7.4 Resonancia serie

La resonancia serie ocurre cuando una reactancia inductiva y una reactancia capacitiva que están en serie son iguales a alguna frecuencia.⁴¹ Si la frecuencia de resonancia corresponde a la frecuencia de una armónica característica, el circuito LC atraerá una gran cantidad de la corriente armónica generada en el sistema de distribución.⁴²

Por lo tanto, el sistema ofrece una impedancia muy baja al flujo de corrientes armónicas de frecuencia igual a la de resonancia.⁴³

Bajo estas condiciones, la impedancia del circuito resonante serie puede ser utilizada para absorber corrientes armónicas deseadas.⁴⁴

3.8 Normatividad sobre el problema de armónicas

3.8.1 Norma IEEE Std. 519-1992

La norma es aplicable para límites de distorsión de corriente y tensión. La filosofía de la norma implica dos puntos importantes:⁴⁵

- Los usuarios deben responsabilizarse para limitar la cantidad de corrientes armónicas inyectadas al sistema de potencia.
- Las compañías suministradoras deben limitar la distorsión de tensión y suministrar una tensión de calidad al usuario.

Los límites dados en las tablas son usados como valores de diseño del sistema en condiciones de operación normal, las cuales no son mayores de una hora. Para períodos cortos, por ejemplo, en condiciones de arranque de motores, los límites pueden ser excedidos en un 50%. (Ver anexo A)

Los límites de tensión y corriente armónica son aplicados en el punto de acoplamiento común. Éste es el punto donde otros usuarios comparten el mismo bus o donde nuevos usuarios pueden ser conectados en el futuro. El estándar asigna los límites de inyección de corriente armónica basado en el tamaño de la carga con respecto al tamaño del sistema de potencia, el cual es definido por su capacidad de corto circuito.⁴⁶

3.8.2 Especificación CFE L0000-45-2005

Esta especificación se refiere a las desviaciones permisibles en las formas de onda de tensión y corriente en el suministro y consumo de energía eléctrica.

Las tablas indican las desviaciones máximas permisibles indicadas en la especificación, aplicables tanto al suministrador como al consumidor que se encuentren conectados a la red eléctrica de CFE. (Ver anexo A)

3.9 Efectos de las armónicas

Las corrientes armónicas producidas por las cargas no lineales e inyectadas a los sistemas de potencia pueden interactuar adversamente con gran parte del equipo, provocando pérdidas adicionales, sobrecalentamiento y sobrecarga.⁴⁷

La distorsión armónica en la red de corriente alterna puede ocasionar inconvenientes tales como:

- Exceso de corriente en capacitores y bancos de capacitores, con el consiguiente acortamiento de su vida útil. Actuación indebida de fusibles.
- Disparo intempestivo de interruptores y otros equipos de protección.
- Actuación indebida de fusibles.
- Aumento de las pérdidas y mal aprovechamiento de la instalación.
- Sobrecalentamiento de motores, transformadores y componentes del circuito en general.
- Mal funcionamiento de computadoras y otros equipos electrónicos de control y/o cargas sensibles.
- Interferencia con circuitos de iluminación y telefónicos.
- Resonancia con otros componentes del sistema.
- Oscilación mecánica en máquinas.
- Errores en equipos de medición, especialmente los de estado sólido.
- Operación inestable en el disparo de circuitos que trabajan por cruce por cero de tensión.
- Disminución del factor de potencia.
- Fallas en el aislamiento.

Los efectos de las armónicas pueden dividirse en tres categorías generales: efectos en el sistema de potencia, efectos en las cargas y efectos en los circuitos de comunicación.⁴⁸

3.9.1 Efectos en el sistema de potencia

En el sistema de potencia, las corrientes armónicas son las culpables del sobrecalentamiento, disminución de la vida útil del equipo y registro inadecuado de los equipos de monitoreo. Además, también pueden causar distorsiones de tensión.⁴⁹

El impacto es mayor cuando por resonancias en la red se amplifican dichas corrientes armónicas.

3.9.2 Efectos en las cargas

Motores y generadores

La disminución de la eficiencia, junto con el calentamiento, vibración y ruido audible son indicadores de distorsión armónica de tensión.⁵⁰

La aplicación de tensión distorsionada al motor resulta en pérdidas adicionales en su núcleo. Las pérdidas por histéresis se incrementan con la frecuencia y las pérdidas debidas a corrientes parásitas aumentan como el cuadrado de la frecuencia; además las corrientes armónicas producen pérdidas adicionales I^2R en los devanados del motor.⁵¹

Otro efecto debido a las armónicas, es la oscilación en el torque. Las armónicas que más predominan en los sistemas de potencia son la 5ª y la 7ª. La 5ª armónica es una armónica de secuencia negativa, cuyo campo magnético gira en dirección opuesta a la de la frecuencia fundamental y cinco veces más rápido. La 7ª armónica es de secuencia positiva, su campo magnético gira siete veces más rápido que el de la fundamental y en la misma dirección. El efecto neto es un campo magnético que gira a una velocidad relativa de seis veces la velocidad del rotor, induciendo corrientes en el rotor cuyo valor de frecuencia es seis veces la frecuencia fundamental. La interacción de los campos magnéticos y las corrientes inducidas en el rotor producen oscilaciones en el motor.⁵²

Transformadores

Los transformadores son diseñados para entregar la potencia requerida a las cargas conectadas con el mínimo de pérdidas, a la frecuencia fundamental. La distorsión armónica de corriente, particularmente, provoca un calentamiento adicional en el transformador.⁵³

Los efectos que resultan del calentamiento del transformador cuando la corriente de carga incluye componentes armónicas son:

- Incremento en la corriente RMS. Si el transformador es dimensionado solo para la potencia en kVA requerida, las corrientes armónicas pueden hacer que la corriente RMS sea mayor que su capacidad, provocando pérdidas en los conductores.
- Pérdidas por corrientes parásitas. Las corrientes parásitas son corrientes inducidas que fluyen en los devanados, en el núcleo y en otras partes conductoras del transformador sujetas a su campo magnético y causan un calentamiento adicional.
- Pérdidas en el núcleo. La distorsión armónica puede incrementar las corrientes parásitas en las laminaciones del núcleo. El incremento de las pérdidas debido a la

presencia de armónicas dependerá del efecto de las armónicas en la tensión aplicada y del diseño del transformador.⁵⁴

Otros problemas incluyen posibles resonancias entre la inductancia del transformador y la capacitancia del sistema, estrés en los aislamientos y pequeñas vibraciones en el núcleo.

Bancos de capacitores

El principal problema en los capacitores debido a las armónicas, es el daño que sufren en condiciones de resonancia.⁵⁵

Debido a que la reactancia de un banco de capacitores es inversamente proporcional a la frecuencia, éste actúa como un sumidero para corrientes armónicas de mayor frecuencia. Dicho efecto incrementa el estrés en el dieléctrico y calentamiento. El problema no es el calentamiento, sino el estrés en el dieléctrico, ya que las tensiones armónicas se agregan a la tensión de pico fundamental. Entonces, el dieléctrico es expuesto a tensiones mayores que las de diseño, resultando en la disminución de su vida útil.⁵⁶

Cables de potencia

El flujo de una corriente no senoidal en un conductor causa pérdidas adicionales a las esperadas por el valor RMS de la forma de onda. Esto se debe al fenómeno conocido como efecto piel, el cual provoca que la resistencia del conductor sea mayor para corrientes de AC que para corrientes de DC, especialmente en conductores largos. Tanto el efecto piel como el tamaño del conductor dependen de la frecuencia. Cuando una corriente rica en armónicas fluye en el cable, la resistencia equivalente se incrementa aún más, incrementándose las pérdidas I^2R .⁵⁷

Sistemas de control

Aunque la distorsión de tensión es tomada en cuenta en el diseño de sistemas de control, la distorsión armónica puede alterar los parámetros de encendido, afectando considerablemente su operación.

Equipos de medición

Un wattorímetro es esencialmente un pequeño motor acoplado a un disco metálico.

La corriente en fase con la tensión, demandados por la carga, fluyen a través de bobinas del medidor, produciendo un par en el disco que tiende a hacerlo girar. El consumo de energía es medido por la acumulación del número de vueltas del disco sobre un período de tiempo.⁵⁸

El par desarrollado en el disco es sensible a la frecuencia; a frecuencias más altas que la fundamental, el par disminuye, causando una lenta rotación del disco y en consecuencia una lectura errónea de la energía consumida.

Las componentes armónicas regularmente son bastante pequeñas comparadas con la componente de frecuencia fundamental, así éste error de medición es generalmente despreciable. Estudios recientes sobre el efecto de las corrientes armónicas en medidores

y otros instrumentos muestran que un factor de distorsión de cuando menos el 20% es requerido para tener un error significativo.⁵⁹

Dispositivos de protección

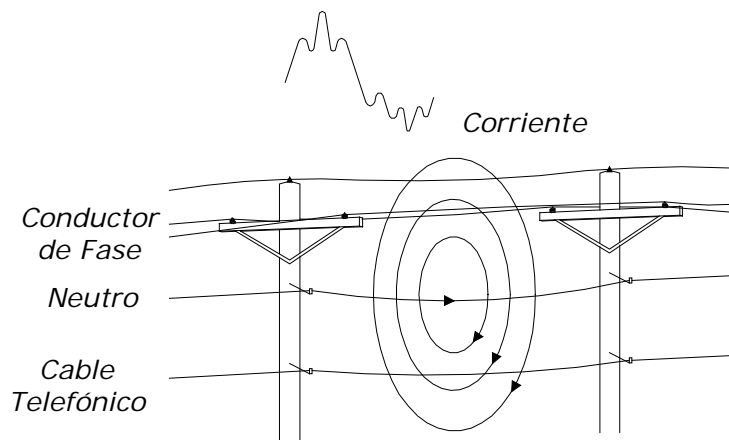
La presencia de armónicas en los sistemas eléctricos puede influir en la operación de los relevadores de protección provocando disparos indeseables. Los relevadores que dependen de la tensión de cresta o del cruce por cero de la tensión o corriente son afectados por la distorsión armónica en la forma de onda.⁶⁰ Un estudio canadiense documenta los siguientes efectos:

- Un relevador electromecánico puede operar más rápido o más lento que el tiempo de operación esperado para la frecuencia fundamental.
- Los relevadores estáticos de baja frecuencia y relevadores de sobretensión y sobrecorriente son susceptibles a cambios en las características de operación.
- Dependiendo del contenido armónico, el para de los relevadores puede ser revertida.

Se requieren niveles de distorsión armónica entre el 10 y 20% para que se presenten problemas con la operación de los relevadores. Estos niveles son mucho mayores que los tolerados en el sistema de potencia.⁶¹

3.9.3 Efectos en los circuitos de comunicaciones

El flujo de corrientes armónicas en los conductores de los sistemas de distribución induce tensiones que caen dentro del ancho de banda de los sistemas de telefonía. Las armónicas triples son particularmente problemáticas en sistemas de cuatro hilos; ya que tienen una secuencia cero, lo cual implica que están en fase con los conductores de las tres fases y que se agreguen directamente al neutro del circuito, el cual está más cercano al circuito de comunicación.⁶²



Tensiones inducidas en los circuitos de telefonía

Las corrientes armónicas del sistema eléctrico se acoplan a los circuitos de comunicación ya sea por inducción o por conducción directa. Éste fue un grave problema en tiempos pasados; hoy en día, predominan los cables de comunicaciones de par trenzado con apantallamiento que disminuyen significativamente dicho efecto.

3.10 Referencias

- ¹ ENRÍQUEZ, Gilberto H. *“El ABC de la Calidad de la Energía Eléctrica”*. México, Limusa, 1999, p. 78
- ² DUGAN, Roger C. (et al). *“Electrical Power Systems Quality”*. 2da. Ed., USA, Mc Graw Hill, 1996, p. 168
- ³ Enríquez, op. cit., p. 20
- ⁴ Dugan, op. cit., pp. 25-27
- ⁵ Enríquez, op. cit., p. 75
- ⁶ IEEE Std 141-1993, *“Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants”*, pp. 445-446
- ⁷ Enríquez, op. cit., p. 75-76
- ⁸ Dugan, op. cit., pp. 171-172
- ⁹ BURKE, James J. *“Power Distribution Engineering: Fundamentals and applications”*. USA, Marcel Dekker Inc, 1994, p. 288
- ¹⁰ Ibidem, p. 168
- ¹¹ Ibidem, p. 169 e IEEE Std 141-1993, op. cit., p. 447
- ¹² Ibidem, p. 178
- ¹³ VIQUEIRA, Jacinto, L. *“Redes Eléctricas”* Tomo II. México, UNAM, Facultad de Ingeniería, 2004, p. 19
- ¹⁴ Ibidem, pp. 19-21
- ¹⁵ Dugan, op. cit., pp. 178-179
- ¹⁶ IEEE Std 141-1993, op. cit., p. 448
- ¹⁷ Dugan, op. cit., pp. 181-182
- ¹⁸ Enríquez, op. cit., pp. 78-79
- ¹⁹ Ibidem, p. 79
- ²⁰ DAS, J. C. *“Power System Analysis: Short circuit load flow and harmonics”*. USA, Marcel Dekker Inc, 2002, pp. 560-564 y Enríquez, op. cit., p. 79
- ²¹ ARRILLAGA, J. y Watson, Neville R. *“Power System Harmonics”*. 2da. Ed., Gran Bretaña, John Wiley & Sons Ltd, 2003, p. 62
- ²² Burke, op. cit., pp. 285-286
- ²³ Das, op. cit., p. 562; Arrillaga, op. cit., pp. 62-63 y Dugan, op. cit., p. 196
- ²⁴ Das, op. cit., p. 562
- ²⁵ Arrillaga, op. cit., pp. 69-70
- ²⁶ Dugan, op. cit., pp. 194-195
- ²⁷ Ibidem, p. 195 y Arrillaga, op. cit., p. 74
- ²⁸ Idem y Das, op. cit., pp. 582-583
- ²⁹ Dugan, op. cit., p. 186
- ³⁰ VIQUEIRA, Jacinto, L. *“Redes Eléctricas”* Tomo I. México, UNAM, Facultad de Ingeniería, 2004, p. 34
- ³¹ Ibidem, p. 35
- ³² Dugan, op. cit., p. 199
- ³³ Ibidem, pp. 199-200
- ³⁴ Ibidem, p. 200
- ³⁵ Ibidem, p. 201
- ³⁶ Idem
- ³⁷ Ibidem, pp. 201-202
- ³⁸ IEEE Std 141-1993, op. cit., pp. 456-457
- ³⁹ Dugan, op. cit., p. 203
- ⁴⁰ IEEE Std 141-1993, op. cit., p. 457
- ⁴¹ Idem
- ⁴² Dugan, op. cit., p. 206
- ⁴³ IEEE Std 141-1993, op. cit., p. 457
- ⁴⁴ Dugan, op. cit., p. 207
- ⁴⁵ Ibidem, p. 282
- ⁴⁶ Ibidem, p. 283
- ⁴⁷ Ibidem, p. 210
- ⁴⁸ IEEE Std 141-1993, op. cit., p. 458

⁴⁹ Ibidem, pp. 458-459

⁵⁰ Dugan, op. cit., pp. 215-216

⁵¹ SANKARAN, C. *"Power Quality"*. USA, CRC Press, 2002, p. 94

⁵² Idem

⁵³ Dugan, op. cit., pp. 211-213

⁵⁴ Ibidem, pp. 212-213 y Arrillaga, op. cit., p. 153

⁵⁵ Das, op. cit., p. 608

⁵⁶ Sankaran, op. cit., p. 95 e IEEE Std 141-1993, op. cit., p. 462

⁵⁷ Das, op. cit., p. 607; Sankaran, op. cit., p. 99 e IEEE Std 141-1993, op. cit., p. 461

⁵⁸ Dugan, op. cit., p. 218

⁵⁹ IEEE Std 141-1993, op. cit., p. 462 y Das, op. cit., p. 615

⁶⁰ Das, op. cit., p. 615

⁶¹ Idem e IEEE Std 141-1993, op. cit., p. 463

⁶² Dugan, op. cit., pp. 216-217