

COMPRENDIENDO LOS ARMÓNICOS EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

UNDERSTANDING HARMONICS IN POWER ELECTRICAL SYSTEMS

OBED RAMÍREZ GÓMEZ

FELIPE ALBERTO MACHORRO
FERNÁNDEZ

ARTURO GERARDO GUERRERO
MARTÍNEZ

JESÚS GUERRERO CONTRERAS

RESUMEN

La mayoría de los sistemas electrónicos (como computadoras, televisores, teléfonos celulares, entre otros) dependen de uno de los sistemas eléctricos más simples y subestimados: el rectificador. Este componente, que ha permanecido casi sin cambios ni actualizaciones durante mucho tiempo, sigue enseñándose de manera tradicional en muchas facultades de ingeniería. Sin embargo, es posible ahondar en su comprensión usando nuevas herramientas pedagógicas. Este artículo explora el comportamiento de los circuitos rectificadores mediante herramientas matemáticas y MATLAB®. A través de este enfoque se calculan las series de Fourier para cada tipo de circuito, lo que permite obtener una visión clara de cómo se distorsionan las señales. Además, se calcula teóricamente el índice de distorsión armónica (THD), para luego comparar los resultados con los obtenidos en experimentos realizados con el analizador de energías FLUKE 1773, revelando las diferencias y confirmando las predicciones.

Palabras clave: distorsión armónica; componente fundamental; series de Fourier rectificadores.

Instituto Tecnológico de Saltillo.

ABSTRACT

Most electronic systems (such as computers, televisions, and cell phones, among others) rely on one of the simplest and most underestimated electrical systems: the rectifier. This component, which has remained nearly unchanged for a long time, is still traditionally taught in many engineering schools. However, it is possible to deepen understanding using novel pedagogical tools. This article explores the behavior of rectifier circuits using mathematical tools

Correspondencia
jesus.gc@saltillo.tecnm.mx
<https://orcid.org/0000-0003-4632-7677>
Fecha de recepción
21 de mayo de 2025.
Fecha de aceptación
22 de octubre de 2025.

and MATLAB. Using this approach, Fourier series are computed for each circuit type, providing a clear view of how signals are distorted. In addition, the Total Harmonic Distortion (THD) index is theoretically calculated and then compared with the results obtained from experiments conducted with the FLUKE 1773 energy analyzer, revealing differences and confirming predictions.

Keywords: harmonic distortion; fundamental component; Fourier series rectifiers.

I. INTRODUCCIÓN

Para comprender el funcionamiento de un sistema eléctrico de potencia (EPS) real, es importante tener en cuenta que la forma de onda del voltaje nunca será exactamente una onda sinusoidal con una frecuencia constante. Cuando una forma de onda es periódica (o se trata como tal), puede describirse matemáticamente como una suma de ondas sinusoidales, cuyas frecuencias son múltiplos de la frecuencia fundamental (60 Hz, en el caso de México). Las componentes de frecuencia no fundamental son conocidas como distorsiones armónicas (Cecchi y col., 2009).

En la Figura 1, se observa el comportamiento de la señal fundamental (línea azul continua) y la señal real (línea negra punteada). Por otro lado, se aprecian las componentes armónicas (líneas rojas y verdes continuas). La señal real o "distorsionada" resulta de la suma de la componente fundamental y sus armónicas, que contribuyen a la distorsión de la señal. Las armónicas son voltajes o corrientes sinusoidales con frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia a la que está diseñado el sistema eléctrico de potencia para su operación (llamada frecuencia fundamental). La frecuencia de un voltaje armónico es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental. Por ejemplo, en un sistema de 60 Hz, la segunda armónica será de 120 Hz, la tercera de 180 Hz, y así sucesivamente (Luszcz, 2013).

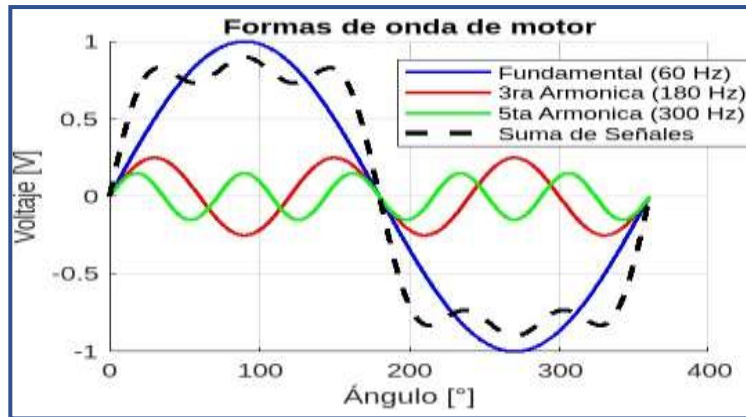


Figura 1. Señal sinusoidal pura (60 Hz, en azul), componentes armónicas (180 Hz y 300 Hz, en rojo y verde) y señal real distorsionada con tercera y quinta armónica.

Existen varias contribuciones a la distorsión armónica del voltaje. Las principales son:

a) Desviaciones en la forma real del generador de energía, como variaciones en la construcción física, los bobinados y las ranuras en el estator, que causan que la forma de onda del voltaje generado no sea exactamente sinusoidal (Shibuya y col., 2015).

b) El sistema de potencia no es completamente lineal, aunque la desviación pueda ser pequeña. Algunos componentes del sistema extraen una corriente no sinusoidal, incluso cuando el voltaje es sinusoidal. Un ejemplo de esto es el transformador, cuya no linealidad se debe a la saturación del flujo magnético en el núcleo de hierro (ciclo de histéresis) (Greene & Gross, 1988).

c) El uso creciente de la electrónica de potencia, con cargas alimentadas a través de convertidores de energía, que demandan una corriente no sinusoidal (Mohammed & Jung, 2021).

La presencia de corrientes armónicas constituye uno de los problemas más frecuentes en la calidad de la energía eléctrica. También existen los interarmónicos, que por definición son múltiplos no enteros de la frecuencia fundamental, y los subarmónicos, que son frecuencias mayores que cero, pero menores que la fundamental. Varios estudios demuestran que estos últimos se generan por tormentas solares que, al llegar a la Tierra, inducen electromagnéticamente corrientes en transformadores, las cuales luego se transmiten a las líneas de transmisión de energía eléctrica (Rastogi, 2004).

1.1 SERIE DE FOURIER Y COEFICIENTES

Para comenzar el análisis de señales, es necesario tener en cuenta el concepto de las series de Fourier. Las series de Fourier establecen que cualquier señal periódica puede representarse como la suma de una componente continua y funciones seno y coseno, como se expresa en la siguiente ecuación (Jenkins, 2017):

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)]$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$$

Los coeficientes de la serie de Fourier se determinan a partir de:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega_0 t) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega_0 t) dt$$

La componente sinusoidal de frecuencia $\omega_n = n\omega_0$ se denomina la n -ésima armónica de la función periódica. La primera armónica comúnmente se conoce como componente fundamental, porque tiene el mismo período que la función:

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f_0$$

El espectro de frecuencia-amplitud de una señal consiste en las gráficas de las amplitudes y de las fases de sus armónicas, en comparación con la frecuencia.

Con el marco teórico anterior, en este trabajo se desarrolló una rutina en la plataforma de programación MATLAB® (Moler, 2024), con la finalidad de obtener las series de Fourier para cada de estudio.



II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 DEFINICIÓN DE CASOS DE ESTUDIO

La metodología que se llevó a cabo fue la implementación real de los circuitos rectificadores de la marca DE LORENZO ®. Después, con el software MATLAB ®, se obtuvieron las series de Fourier correspondientes a cada caso, para proceder con la comparación teórica y práctica.

El equipo de medición utilizado es un analizador de energías trifásico, marca FLUKE. Este instrumento cuenta con una función para la medición de: fasorímetro, osciloscopio, transitorios y armónicos.

Este artículo se centra en el estudio de armónicos provocados por la electrónica de potencia en el uso de circuitos rectificadores, así como en el caso de un inversor de energía eléctrica, siendo utilizados para la alimentación de motores de inducción trifásicos. En un estudio posterior se analizará el caso de los subarmónicos e interarmónicos.

Los casos de estudio se enlistan a continuación:

1. Forma de onda sinusoidal.
2. Circuito rectificador de media onda no controlado.
3. Circuito rectificador de onda completa no controlado.
4. Circuito rectificador de media onda controlado.
5. Circuito inversor conectado a un motor de inducción.

Al estudiar armónicos, indiscutiblemente se debe hablar de su afectación al sistema eléctrico de potencia, por lo cual, para cada caso de estudio, se obtiene la serie de Fourier con 30 componentes y también se determina el valor del índice de la THD. El cual se puede calcular a partir de la siguiente ecuación:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{k_{max}} V_k^2}}{V_1} \cdot 100\%$$

Donde:

THD es el valor del índice de la distorsión armónica total.

Subíndice k , corresponde a cada armónico de la fundamental.

V_k^2 es la componente del armónico de la señal bajo estudio.

V_1 es la componente fundamental de la señal bajo estudio.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CASO 1 FORMA DE ONDA SINUSOIDAL

Este caso representa la forma de onda del suministro de energía eléctrica, con su componente fundamental a 60 Hz. Al no existir componentes adicionales que alteren la señal, únicamente debe aparecer en la serie de Fourier la forma de onda sinusoidal y su respectiva amplitud. El resultado de la simulación en MATLAB® se muestra en la Figura 2a-b.

En la Figura 2a, se aprecia la señal fundamental recibida del suministro de corriente alterna proveniente de la CFE. Dado que esta señal es idealizada como "pura", no se observan interferencias ni la presencia de armónicos. Esto indica que la señal mantiene una forma de onda sinusoidal perfecta, sin distorsiones adicionales ni contribuciones de frecuencias no deseadas. Sin embargo, en la práctica, el suministro real puede presentar pequeñas fluctuaciones o distorsiones no captadas en esta representación idealizada.

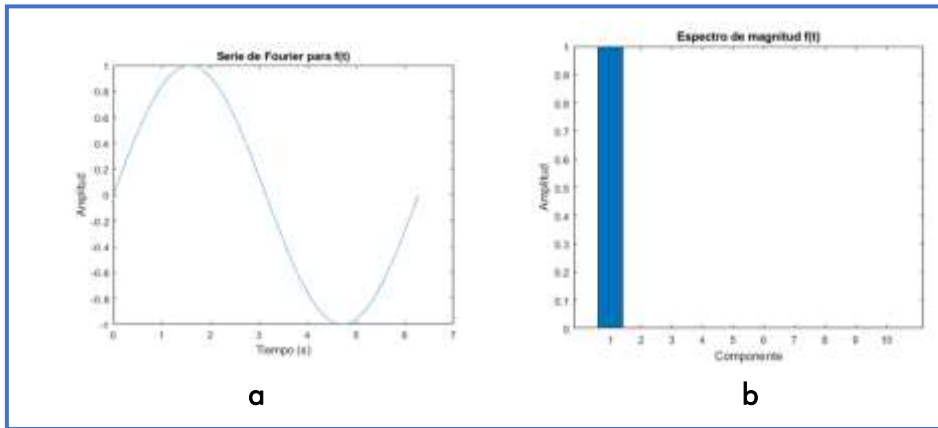


Figura 2. (a) Forma de onda sinusoidal sin armónicos y (b) espectro de frecuencia-amplitud.

En la Figura 2b, se observa claramente que la serie de Fourier aparece en forma sinusoidal y el espectro de frecuencias-amplitud solo muestra la componente fundamental y no existen armónicos de ningún tipo. Para este caso, la componente de corriente directa (el valor promedio de la señal a lo largo de un ciclo completo) no existe y el THD calculado es cero.

Por comparación, la Figura 3 muestra la pantalla del instrumento cuando está conectado directamente al suministro de energía eléctrica. En esta configuración, se puede observar que la señal generada presenta una leve distorsión en su forma de onda. Esta distorsión es un indicio de que la señal no es completamente pura, lo que se refleja en el espectro de frecuencias-amplitud del instrumento. En dicho espectro, se destacan armónicos impares, siendo el tercero el más prominente. Esta anomalía en la señal está relacionada con la naturaleza no lineal de los elementos semiconductores que componen el sistema, ya que estos dispositivos tienden a generar armónicos debido a su comportamiento en condiciones de funcionamiento fuera del rango lineal. Los semiconductores, como los transistores y diodos, son conocidos por introducir distorsiones armónicas, especialmente cuando operan a altas frecuencias o cuando se encuentran en un régimen no lineal de amplificación. La presencia de estos armónicos impares, particularmente el tercero, es un fenómeno común que puede ser asociado con la saturación o la no linealidad de la señal dentro de los componentes electrónicos involucrados.



Figura 3. Resultados del analizador de energías, para onda sinusoidal (a) modo osciloscopio y (b) analizador de armónicos.

CASO 2: CIRCUITO RECTIFICADOR DE MEDIA ONDA NO CONTROLADO

El circuito rectificador de media onda no controlado y su voltaje de salida se muestran en las Figuras 4 y 5, respectivamente. Este circuito ha sido diseñado en el software de simulación Multisim, y consta de los siguientes elementos: una fuente de alimentación de corriente alterna (CA), un diodo semiconductor y una carga resistiva. La fuente de alimentación proporciona la señal de entrada, que es una onda sinusoidal alternante. El diodo se encarga de permitir que la corriente fluya únicamente durante el ciclo positivo de la señal, bloqueando la corriente durante el ciclo negativo. Como resultado, la señal de salida muestra solo las mitades positivas de la onda, generando una forma de onda pulsante. La carga resistiva simula la parte final del circuito, donde se consume la energía rectificada. Este tipo de rectificador es conocido por ser simple y de bajo costo, aunque su eficiencia es limitada, ya que solo se aprovecha la mitad de la señal de entrada.

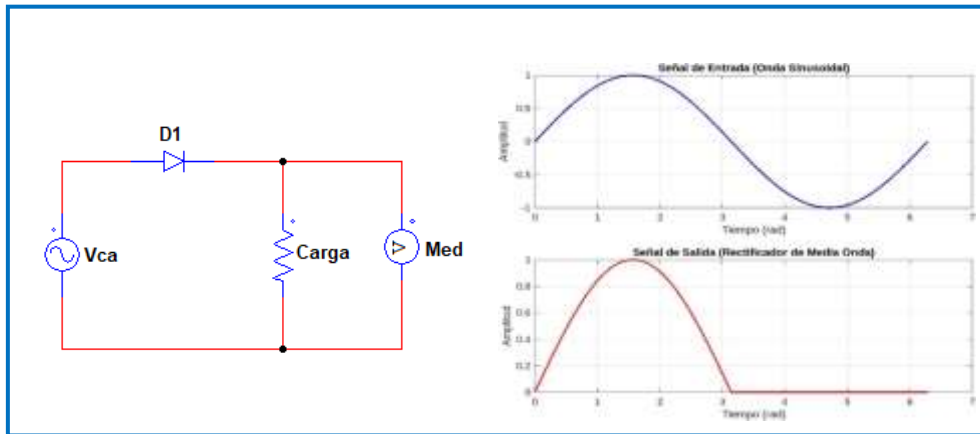


Figura 4. Circuito rectificador de media onda y voltaje de salida del mismo.

Se observa que en la salida del rectificador solo aparece voltaje para el semiciclo positivo de la forma de onda sinusoidal de entrada, debido a que el diodo solo es activado por este voltaje. Al realizar la simulación en MATLAB® para la obtención de la serie de Fourier, considerando como límite de integración inferior 0 y superior π , con un periodo de la señal igual a 2π y como entrada una función sinusoidal, se obtienen los resultados de la Figura 5a.

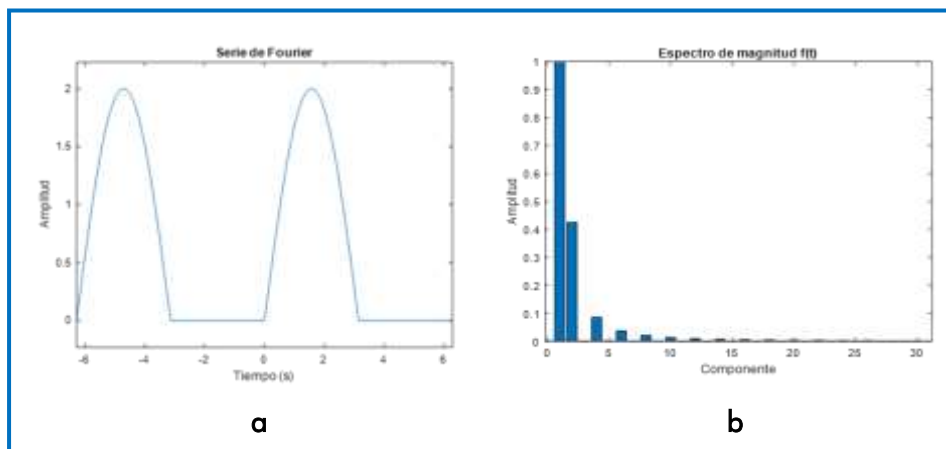


Figura 5. Serie de Fourier y espectro de frecuencias-amplitud para rectificador media onda.

En la Figura 5b, se puede observar que, para este caso, la componente de corriente continua obtenida mediante el cálculo de la serie es $0.3183 V_{max}$, y el THD (Total Harmonic Distortion) es del 43.520%. Además, se puede observar que la simulación muestra la presencia de la componente fundamental, así

como contribuciones de armónicos pares. A medida que aumenta el número de términos en la serie, la amplitud de cada armónico disminuye.

En la Figura 6a, se muestran los resultados obtenidos al conectar el instrumento de medición para verificar los cálculos realizados en MATLAB®. En la Figura 6b, se observa que el $THD = 43.6\%$ (calculado por el instrumento de medición) es muy similar al valor obtenido en la simulación de MATLAB®. Además, se destacan los armónicos pares, mientras que los armónicos impares tienen valores bajos. Esto se debe a la condición inicial de la forma de onda del suministro de energía eléctrica.



Figura 6. Resultados del analizador de energías, para rectificador de media onda (a) forma de onda de la señal y (b) contenido de armónicos.

CASO 3: RECTIFICADOR DE ONDA COMPLETA NO CONTROLADO

El circuito rectificador de media onda no controlado y su voltaje de salida se muestran en la Figura 7a-b. El rectificador en puente, que es el rectificador tradicional utilizado en aplicaciones de dispositivos electrónicos, se muestra en la Figura 7a. En la Figura 7b, se observan las formas de onda características de entrada y salida.

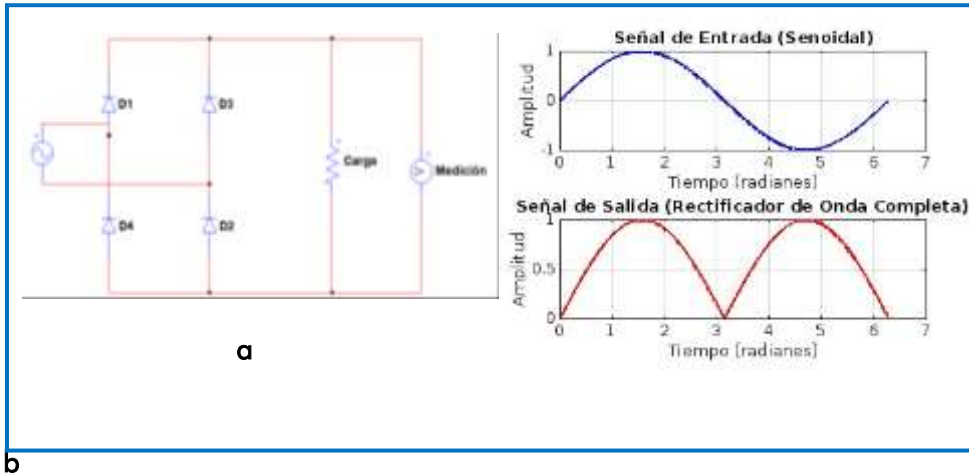


Figura 7. (a) Circuito rectificador de onda completa y (b) formas de onda de entrada (azul) y de salida (rojo) del rectificador.

En la Figura 8a, se observa que en la salida del rectificador solo aparece voltaje para ambos semiciclos, solo que el negativo es rectificado a valor positivo. Al realizar la simulación en MATLAB®, para la obtención de la serie de Fourier, considerando como límite de integración inferior 0 y superior π , con un periodo de la señal igual a π y como entrada una función sinusoidal.

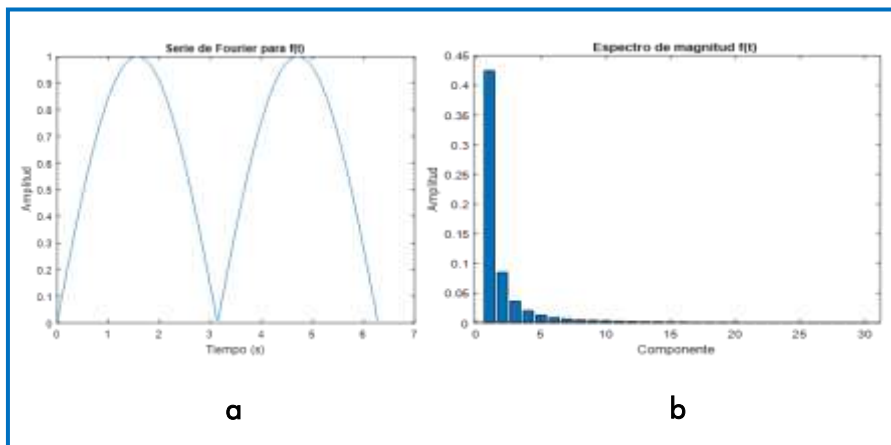


Figura 8. (a) Serie de Fourier y (b) espectro de frecuencias-amplitud para rectificador de onda completa.

En la Figura 8b, se observa que, para este caso, la componente de corriente continua obtenida mediante el cálculo de la serie es $0.6366 \cdot V_{max}$, y el THD es 22.520%. También se puede observar que la simulación muestra la presencia de la componente fundamental, así como armónicos pares e

impares. A medida que aumenta el número de iteraciones en la serie, la amplitud de cada armónico disminuye, tal como se mencionó anteriormente.

En la Figura 9, se muestran los resultados obtenidos al conectar el instrumento de medición al circuito correspondiente para verificar los cálculos realizados en MATLAB®. Esta conexión permite comparar directamente las mediciones experimentales con los valores teóricos obtenidos mediante simulación, asegurando la precisión y validez de los resultados. El uso del instrumento de medición también permite observar el comportamiento real del circuito, tomando en cuenta factores como las imperfecciones del sistema, posibles interferencias y características no idealizadas, que podrían no reflejarse completamente en la simulación computacional. Esto ofrece una visión más completa de la respuesta del circuito en condiciones prácticas.



Figura 9. Resultados del analizador de energías, para rectificador de onda completa.

Se observa claramente que el $THD=22.4\%$ (calculado por el instrumento de medición) es muy cercano al cálculo realizado por la simulación de MATLAB®.

- Armónico: número armónico (1°, 2°, 3°, etc.).
- Frecuencia experimental (Hz): frecuencia observada experimentalmente para ese armónico.
- Frecuencia simulada (Hz): frecuencia calculada en la simulación de MATLAB®.
- Amplitud experimental (V): amplitud de la señal medida con el analizador de energías FLUKE 1773.

- Amplitud simulada (V): amplitud de la señal obtenida en la simulación de MATLAB®.
- Diferencia (%): diferencia porcentual entre los valores experimentales y simulados en términos de amplitud.

CASO 4: RECTIFICADOR DE MEDIA ONDA CONTROLADO

El circuito rectificador de media onda controlado se muestra en la Figura 10. Se observa que el circuito requiere un disparo o pulso para que el SCR entre en conducción.

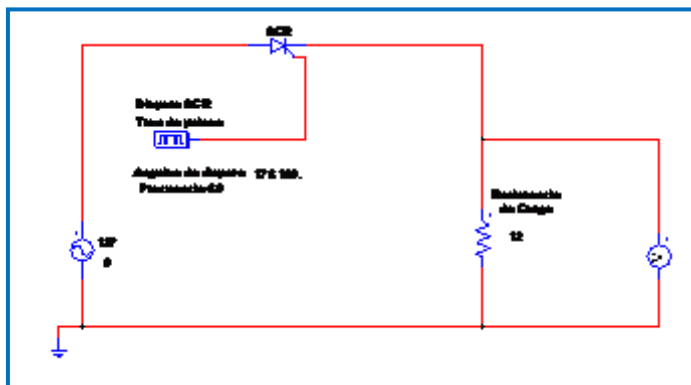


Figura 10. Circuito rectificador de media onda controlado.

En este circuito, el principio de operación sigue siendo el mismo, permitir solo el paso del semiciclo positivo y el negativo no es provechado. A diferencia del no controlado, se sustituye el diodo por un rectificador controlado de Silicio (SCR), el cual requiere de un circuito de control que envíe el pulso (disparo) a la compuerta para comenzar la conducción, y así tener un voltaje de salida. La Figura 10, muestra el voltaje de salida del rectificador.

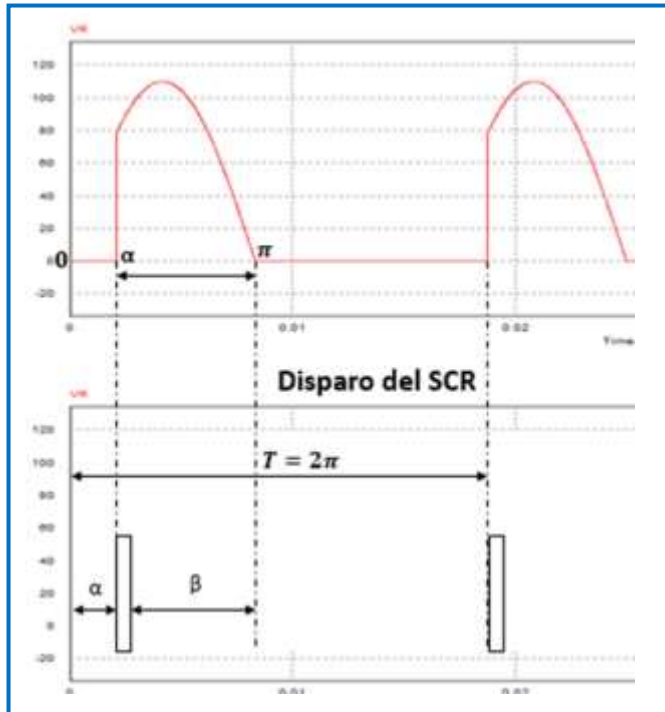


Figura 11. Voltaje de salida del rectificador de media onda controlado.

En la Figura 11, se observa que α es el ángulo o tiempo de disparo del SCR, y β representa el ángulo o tiempo de conducción del SCR. Como puede observarse, el ángulo de disparo que puede enviarse en cualquier instante al SCR es antes de los 180° , ya que después de este ángulo el SCR no conduce.

Al realizar la simulación en MATLAB®, para la obtención de la serie de Fourier, considerando dos funciones de entrada; la primera es cero, cuyos límites de integración son: inferior 0 y superior α , y la segunda es sinusoidal cuyos límites de integración son: inferior α y superior π , con un periodo de la señal a 2π , los resultados se muestran en la Figura 12a-b.

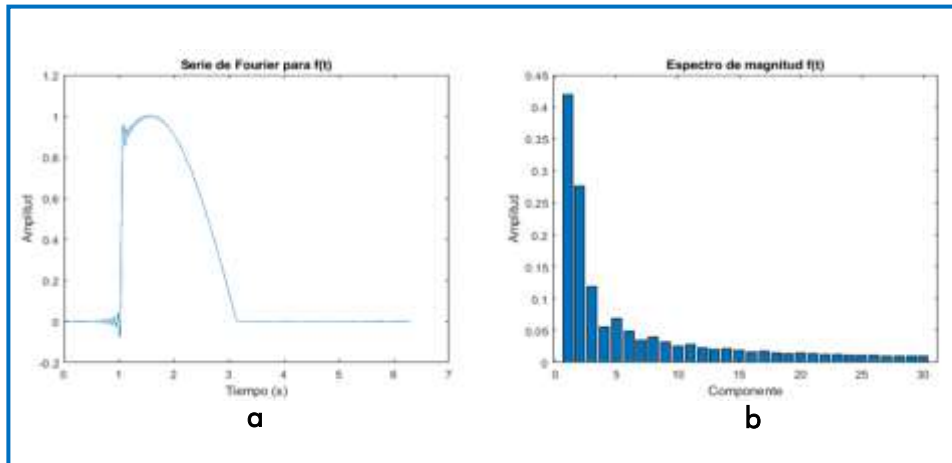


Figura 12. Serie de Fourier y espectro de frecuencias-amplitud para rectificador de media onda controlado.

Para este caso, la componente de corriente directa obtenida por cálculo de la serie es $0.2390 \cdot V_{max}$, el $THD=78.940\%$. El valor del THD es muy alto en comparación con los circuitos de media onda y onda completa no controlados. Esto tiene sentido, ya que hay discontinuidades de la señal al enviar el disparo al SCR. Estos cambios abruptos provocan una mayor cantidad de armónicos de la señal.

En la Figura 12b, se observa que, a medida que aumentan las componentes de la serie, el armónico en cuestión no necesariamente tiene que ser menor que el anterior, especialmente en el caso del rectificador controlado.

CASO 5: INVERSOR CONECTADO A UN MOTOR DE INDUCCIÓN

Para la implementación de este caso, se utiliza una parte del tablero que contiene dispositivos electrónicos de Transistor Bipolar de Puerta Aislada (IGBT), los cuales proporcionan la señal del inversor trifásico.

En la Figura 13a-b se muestran (a) el osciloscopio y (b) el fasorímetro del analizador de energía. Se puede observar la distorsión en la forma de onda de los voltajes trifásicos, lo cual se debe a la naturaleza del funcionamiento del inversor, que entrega pulsos de voltaje. La magnitud de los voltajes y el

desfase de 120° se observan en el fasorímetro, donde se aprecia que cumplen con las características de un sistema trifásico.

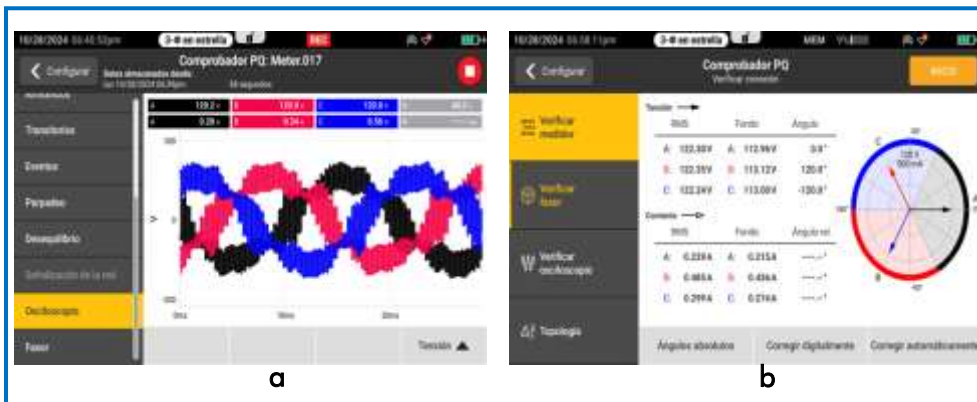


Figura 13. (a) forma de onda en el osciloscopio y (b) fasorímetro para el caso del inversor.

La Figura 14 muestra el espectro de frecuencias-amplitud del analizador de energía. Los índices de THD obtenidos (2.6%, 2.9% y 3.0% para cada fase, según el analizador de energía) son bajos, lo que indica que se cumple con la normatividad vigente, la cual establece un límite máximo de THD no superior al 5%. Sin embargo, se observa la presencia de una amplia variedad de armónicos en este tipo de circuitos. Esta variedad de armónicos es coherente con la señal de pulsos que el inversor entrega como salida.

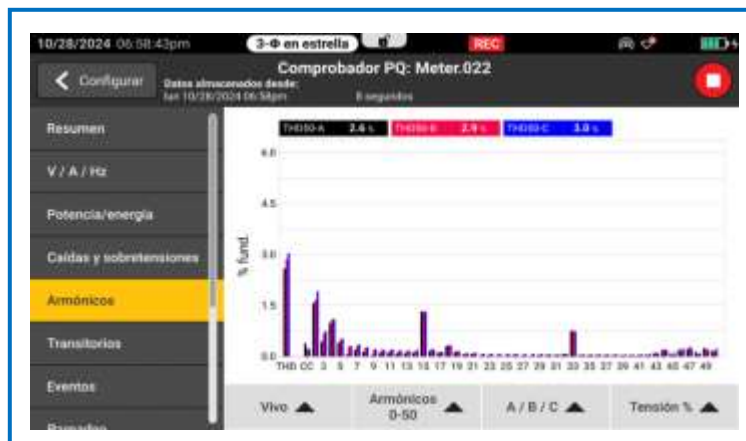


Figura 14. Espectro de frecuencias-amplitud para el caso del inversor de energía eléctrica.

CONCLUSIONES

1. Se observa que la forma de onda del suministro de energía eléctrica ya está contaminada por armónicos provenientes del sistema eléctrico de potencia. En este caso, se destaca la presencia de un tercer armónico.
2. En la mayoría de los casos, la teoría y la práctica coinciden, con una ligera variación debido al contenido armónico presente en la señal de entrada.
3. En el caso del rectificador de media onda, se observa que las simulaciones y las mediciones obtenidas son muy cercanas. La única diferencia notable es la aparición del tercer armónico presente en la señal sinusoidal de entrada.
4. En el caso del inversor conectado al motor de inducción trifásico, a medida que se lleva al motor a sus valores nominales, el THD disminuye progresivamente, incluso cumpliendo con las normativas respectivas. Sin embargo, la forma de onda mostrada en el instrumento de medición no es una sinusoidal como se espera, lo cual podría provocar un calentamiento excesivo en el motor.
5. Las señales con cambios repentinos (como cuadradas, triangulares y los disparos de SCR) presentan una mayor componente de armónicos. Esto no necesariamente implica un alto valor de THD, ya que depende de la amplitud de cada armónico.

REFERENCIAS

- Cecchi, V., Leger, A. S., Miu, K., & Nwankpa, C. O. (2009). Modeling approach for transmission lines in the presence of non-fundamental frequencies. *IEEE transactions on power delivery*, 24(4): 2328-2335.
- Greene, J. D., & Gross, C. A. (1988). Nonlinear modeling of transformers. *IEEE transactions on Industry Applications*, 24(3): 434-438.
- Jenkins, W. K. (2017). Fourier methods for signal analysis and processing. In *Digital Signal Processing Fundamentals* (pp. 3-32). CRC Press.

- Luszcz, J. (2013). High frequency harmonics emission of modern power electronic AC-DC converters. 2013 International Conference-Workshop Compatibility and Power Electronics,
- Mohammed, S. A. Q., & Jung, J.-W. (2021). A state-of-the-art review on soft-switching techniques for DC-DC, DC-AC, AC-DC, and AC-AC power converters. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(10): 6569-6582.
- Moler, C. (2024). MatLab (software). *Syntax*, 2024(24.2). 24.21-24.21.
- Rastogi, R. (2004). Electromagnetic induction by the equatorial electrojet. *Geophysical Journal International*, 158(1): 16-31.
- Shibuya, S., Kobayashi, Y., & Kobayashi, H. (2015). High-frequency low-distortion signal generation algorithm with arbitrary waveform generator. 2015 IEEE 11th International Conference on ASIC (ASICON). DOI: [10.1109/ASICON.2015.7517007](https://doi.org/10.1109/ASICON.2015.7517007)