



Generador de señales senoidales multinivel basado en amplificadores operacionales: una herramienta didáctica para electrónica de potencia

Ricardo Eliu Lozoya Ponce *

Tecnológico Nacional de México / IT de
Chihuahua,
Chihuahua, Chihuahua, México

Roberto Carlos Martínez Montejano

Universidad Autónoma de San Luis Potosí,
Rioverde, San Luis Potosí, México

Luis Javier Ontañón García

Universidad Autónoma de San Luis Potosí,
Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí, México

Rogelio Enrique Baray Arana

Tecnológico Nacional de México / IT de
Chihuahua,
Chihuahua, Chihuahua, México

* Autor de correspondencia: ricardo.lp@chihuahua.tecnm.mx

Resumen: Este artículo presenta un generador de señales senoidales multinivel económico, construido con componentes analógicos accesibles, como amplificadores operacionales. Su diseño modular y didáctico permite a estudiantes y docentes explorar conceptos clave de electrónica de potencia mediante la generación práctica de señales tipo PWM con varios niveles de voltaje. A través de pruebas experimentales, se evalúa la calidad de las señales generadas, midiendo la distorsión armónica total (THD), lo que ayuda a comprender cómo influye el diseño en la eficiencia y pureza de las señales eléctricas. El generador propuesto constituye una alternativa atractiva para la enseñanza y aprendizaje práctico de electrónica, permitiendo experimentar de manera sencilla con diferentes escenarios de modulación.

Palabras clave: Amplificadores operacionales, distorsión total armónica, generador de señal senoidal.

1. Introducción: lo que debemos saber de inicio

En los últimos años, los convertidores multinivel se han consolidado como una tecnología clave dentro de la electrónica de potencia, especialmente en aplicaciones industriales de media y alta tensión. Estos dispositivos permiten generar señales de salida más suaves y con menor distorsión armónica, lo que resulta ideal para alimentar motores eléctricos, mejorar la calidad de la energía en redes, y aprovechar fuentes renovables como paneles solares o bancos de baterías (Malinowski, Gopakumar, Rodriguez, & Pérez, 2010; Rodríguez, Lai, & Peng, 2002; Beser, Arifoglu, Camur, & Beser, 2009; Gupta & Jain, 2012).

A pesar de sus ventajas, implementar estos convertidores puede ser complejo y costoso, especialmente cuando se utilizan plataformas como DSPs o FPGAs para su control (Rodríguez, Lai, & Peng, 2002; Kouro et al., 2010). Esta barrera tecnológica puede dificultar su enseñanza en entornos educativos, donde se busca un equilibrio entre funcionalidad, accesibilidad y comprensión del fenómeno físico.

Este trabajo propone una alternativa didáctica para explorar el funcionamiento de un convertidor multinivel de cinco niveles, utilizando exclusivamente componentes analógicos como amplificadores operacionales. A través de este enfoque, es posible comprender los principios de la modulación por ancho de pulso (PWM) y evaluar la calidad de las señales generadas mediante el análisis de la calidad de la señal, Distorsión armónica total (THD), es una medida que indica cuánto se desvía una señal eléctrica de la forma ideal, típicamente una onda senoidal pura como la que se encuentra en la red eléctrica. Cuanto menor es el valor del THD, más limpia y eficiente es la señal generada, lo cual mejora el rendimiento y protección de equipos eléctricos sensibles. Este parámetro cuantifica qué tanto difiere una señal respecto a una onda senoidal ideal —como la de la red eléctrica de 60 Hz—, y es un indicador ampliamente utilizado para medir la eficiencia y la pureza espectral en sistemas de conversión de energía.

Además de su utilidad académica, esta implementación abre la puerta a explorar distintas configuraciones de señales portadoras (triangulares, cuadradas o sinusoidales), permitiendo al estudiante experimentar con diversos escenarios y observar cómo estas decisiones afectan la forma de onda resultante y su contenido armónico (Gupta & Jain, 2012; Kouro et al., 2010; Lozoya-Ponce, Campos-Cantón, & Lozoya-Ponce, 2013).

El objetivo de este artículo es presentar una solución accesible y replicable, que sirva como puente entre los conceptos teóricos de la electrónica de potencia y su aplicación práctica en el aula o laboratorio.

2. Fundamentos Teóricos: reglas y principios científicos importantes

¿Qué es un convertidor multinivel?

En la electrónica de potencia, un convertidor multinivel es un dispositivo que transforma una señal de corriente directa (DC) en una señal de corriente alterna (AC) con múltiples niveles de voltaje escalonados. A diferencia de los inversores tradicionales que solo generan dos niveles (positivo y negativo), los convertidores multinivel pueden generar tres, cinco o incluso más niveles, lo que permite crear formas de onda más suaves y cercanas a una señal sinusoidal pura.

Esta característica tiene un beneficio directo: reduce la distorsión armónica, es decir, el “ruido” eléctrico que puede afectar el rendimiento de motores, equipos sensibles o redes eléctricas. Además, al distribuir el voltaje entre varios niveles, estos convertidores permiten manejar mayores tensiones sin forzar los componentes individuales (Malinowski, Gopakumar, Rodriguez, & Pérez, 2010; Rodríguez, Lai, & Peng, 2002).

Existen varias topologías de convertidores multinivel, pero una de las más populares y didácticas es la estructura en cascada con puentes H (conocida como Cascaded H-Bridge, o CHB). En esta configuración, cada celda o “puente” aporta una parte del voltaje total. Cuando se suman correctamente, producen una señal escalonada que se puede usar directamente o filtrar para obtener una forma de onda suave (Beser, Arifoglu, Camur, & Beser, 2009; Govindaraju & Baskaran, 2009).

Estos convertidores son ampliamente utilizados en:

- Energía renovable, como en sistemas fotovoltaicos o híbridos con baterías (Nema, Nema, & Agnihotri, 2011; Rahim & Mekhilef, 2002).
- Accionamientos industriales, para controlar motores de alta potencia.
- Mejoras en calidad de energía, actuando como filtros activos o compensadores de potencia reactiva.

Sin embargo, una de sus principales dificultades es el control de los niveles de salida. Normalmente, se requiere un sistema de modulación preciso, como la Modulación por Ancho de Pulso (PWM), para decidir cuándo y cuánto tiempo cada celda debe activarse. Esto lleva a muchos diseños a depender de procesadores digitales o microcontroladores avanzados, lo cual incrementa el costo y la complejidad (Gupta & Jain, 2012; Rodríguez, Lai, & Peng, 2002).

En este trabajo, se presenta una alternativa basada en componentes analógicos —principalmente amplificadores operacionales— para generar señales PWM útiles para un convertidor multinivel de cinco niveles. Este enfoque permite que estudiantes y docentes experimenten de forma directa con los principios de modulación y análisis de señales, sin requerir sistemas digitales complejos.

¿Qué es un PWM y cómo se genera con amplificadores?

La Modulación por Ancho de Pulso (o PWM, por sus siglas en inglés) es una técnica utilizada para controlar la cantidad de energía que se entrega a una carga eléctrica. En lugar de variar el voltaje de forma continua, como ocurre en una señal analógica, el PWM trabaja a través de pulsos digitales que se encienden y apagan rápidamente. Lo que varía es el “ancho” de estos pulsos, es decir, el tiempo que duran encendidos frente al tiempo total del ciclo.

En términos simples: cuanto más tiempo esté “encendido” un pulso dentro de un ciclo, mayor será la energía entregada. Esta relación se conoce como ciclo de trabajo (*duty cycle*), es decir el porcentaje de tiempo que permanece activo, y puede ir del 0% (siempre apagado) al 100% (siempre encendido).

En convertidores multinivel, esta técnica permite decidir en qué momento cada nivel de voltaje se activa, generando una forma de onda escalonada que se acerca a una señal sinusoidal. Entre las variantes de PWM, una de las más conocidas es la modulación sinusoidal por ancho de pulso (SPWM), donde una señal senoidal de referencia se compara con una señal portadora (típicamente triangular) para generar los pulsos de conmutación.

Una de las ventajas de este proyecto es que no se necesita un microcontrolador (μC) o una FPGA para generar la modulación. Todo se puede realizar usando componentes analógicos, especialmente amplificadores operacionales, simplificando el concepto y la teoría fundamental de operación de los convertidores y de la SPWM al no requerir tiempo para

aprender a usar el hardware (ADC, DAC, interrupciones, etc.), escribir, depurar y optimizar código en el μ C o FPGA.

La implementación del sistema SPWM se puede dividir en tres bloques principales:

1. Generación de señales portadoras: Se crean varias versiones de una señal triangular (o cuadrada o sinusoidal), cada una desplazada verticalmente respecto a la otra. Este desplazamiento se logra con sumadores de voltaje (offset adders) construidos con amplificadores operacionales en configuración no inversora. Estas señales actúan como los “niveles” de comparación para la modulación.
2. Comparación con la señal moduladora: Una señal senoidal (60 Hz) sirve como referencia. Se compara con cada una de las señales portadoras usando comparadores —circuitos también hechos con amplificadores operacionales o con el LM311 configurado como comparador—. El resultado son señales digitales que indican en qué momentos la señal senoidal supera a cada portadora.
3. Suma de señales de conmutación: Las salidas de los comparadores se combinan en un circuito sumador, generando la clásica forma de onda escalonada que caracteriza a un convertidor multinivel. Esta señal se puede observar en un osciloscopio, o incluso analizar su calidad con herramientas como un analizador de espectro.

Esta implementación no solo es económica, sino también altamente didáctica. Los estudiantes pueden ver físicamente cómo se generan los pulsos, modificar valores en tiempo real (como frecuencia de la portadora o amplitud de la señal), y observar cómo estos cambios afectan la señal de salida y su contenido armónico.

3. Desarrollo del Trabajo: *aplicando las reglas y principios científicos*

Prototipo experimental

El sistema desarrollado tiene como objetivo demostrar, de forma práctica y accesible, cómo funciona la modulación por ancho de pulso (PWM) para controlar un convertidor multinivel. Para lograrlo, se diseñó un circuito que utiliza componentes comunes y de bajo costo, como amplificadores operacionales TL081 y comparadores LM311.

Este prototipo está basado en una topología de convertidor en cascada de cinco niveles, una configuración ampliamente usada por su sencillez y su capacidad de generar formas de

onda escalonadas con bajo contenido armónico (Malinowski, Gopakumar, Rodriguez, & Pérez, 2010; Rodríguez, Lai, & Peng, 2002). Cabe destacar que todo el sistema puede construirse sin necesidad de microcontroladores, FPGAs ni programación, lo que lo hace ideal para estudiantes o laboratorios con recursos limitados.

El diseño se organiza en tres bloques funcionales:

1. Generación de señales portadoras desplazadas: Se utilizan sumadores con amplificadores operacionales para crear varias versiones de una señal portadora (por ejemplo, triangular), cada una desplazada verticalmente respecto a la otra. Esto permite simular los diferentes niveles de voltaje requeridos en el convertidor. El sistema consta de tres bloques principales: generación de portadoras, comparación con la señal de referencia y suma de señales de salida. En la sección de generación de portadoras, cada portadora se obtiene al sumar un voltaje fijo a una señal base, generando múltiples niveles de comparación. En la sección de comparación de portadoras, cada comparador evalúa si la señal senoidal (moduladora) supera a una de las portadoras. Cuando eso ocurre, se genera un pulso de conmutación.

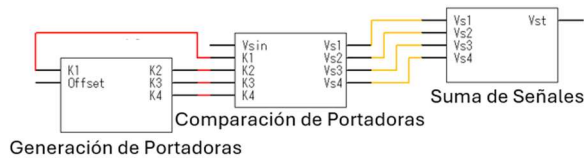


Figura 7 Estructura general de un generador SPWM con amplificadores operacionales.

Obtenida de: elaboración propia.

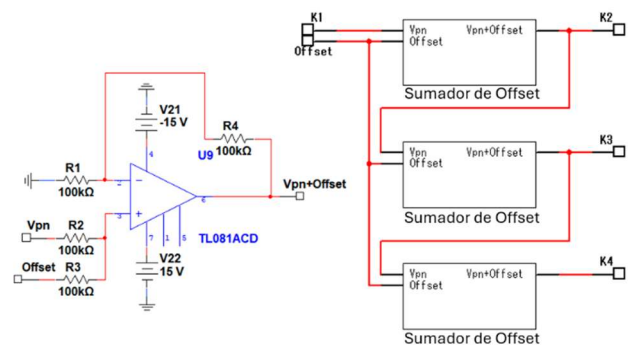


Figura 2 Generación de señales portadoras mediante sumadores con desplazamiento (offset).

Obtenida de: elaboración propia.

2. Comparadores: Se implementaron circuitos de comparación analógicos que comparan la señal senoidal de referencia (60 Hz) con cada portadora. Cuando la señal de referencia supera a la portadora, se activa una señal de conmutación que representa uno de los niveles del convertidor.

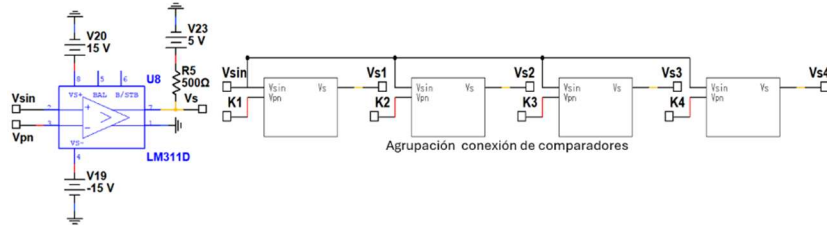


Figura 3 Diagrama del bloque de comparadores.

Obtenida de: elaboración propia.

3. Suma de señales de conmutación: Las salidas de los comparadores se combinan mediante un circuito sumador con resistencias, también basado en amplificadores operacionales. El resultado es una señal escalonada compuesta por los diferentes niveles de salida, lista para ser analizada o aplicada a una carga.

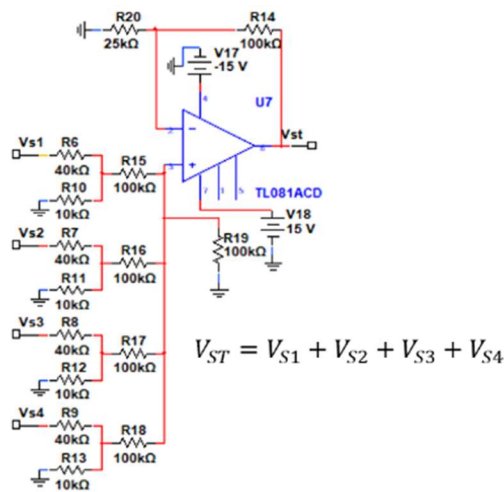


Figura 4 Implementación analógica de un sumador de voltaje usando amplificador operacional. El bloque suma las señales de conmutación para producir una forma de onda escalonada.

Obtenida de: elaboración propia.

Este tipo de prototipo no solo permite observar físicamente cómo se genera una forma de onda PWM, sino también modificar los parámetros en tiempo real (frecuencia, amplitud, forma de portadora), promoviendo una comprensión profunda de los principios que rigen la electrónica de potencia.

Además, su diseño modular permite experimentar con diferentes formas de portadora (triangular o senoidal) y evaluar su efecto en la calidad de la señal, lo cual veremos en la siguiente sección.

Simulaciones y resultados experimentales

Para validar el funcionamiento del sistema propuesto, se realizaron simulaciones en dos plataformas complementarias: Multisim, para verificar el diseño del circuito analógico, y MATLAB, para visualizar el comportamiento del sistema y analizar la calidad de la señal generada.

El objetivo principal fue observar cómo varía la forma de onda escalonada de salida al modificar tres elementos clave:

- La forma de la señal portadora (triangular o senoidal).
- La frecuencia de la portadora (1.1 kHz y 5.5 kHz).
- La separación entre niveles de comparación (usando offset de 1V entre portadoras).

En la simulación, se empleó una señal senoidal de referencia de 60 Hz y señales portadoras con diferentes formas. Para un convertidor de cinco niveles, se generaron cuatro portadoras desplazadas.

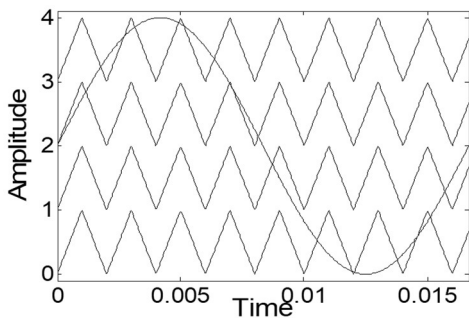


Figura 5 Señales portadoras triangulares (VP1 a VP4) junto a la señal senoidal de referencia (VSin).

Obtenida de: elaboración propia.

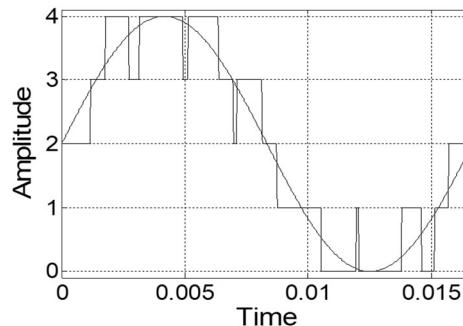


Figura 6 Resultados de las comparaciones: señales de conmutación VS1 a VS4 y Señal escalonada obtenida (VST) superpuesta a la señal de referencia.

Obtenida de: elaboración propia.

Estas simulaciones muestran claramente cómo se forma la señal escalonada a partir de las comparaciones individuales. Al cambiar la forma o frecuencia de la portadora, el

comportamiento de la señal de salida también se modifica. El circuito fue construido físicamente utilizando amplificadores LM311 y TL084, alimentados con una fuente de $\pm 15V$. Las señales fueron generadas con un generador de funciones, y la salida fue capturada con un osciloscopio y un analizador de espectro para medir la distorsión armónica total (THD). Se compararon dos tipos de portadora (triangular y senoidal) a dos frecuencias (1.1 kHz y 5.5 kHz), obteniendo seis casos en total.

Los resultados experimentales confirman que, al aumentar la frecuencia de la portadora, el valor del THD disminuye, lo cual concuerda con la teoría: a mayor frecuencia de conmutación, mayor resolución en la reconstrucción de la señal. Entre todas las configuraciones, el mejor resultado de THD se obtuvo con la portadora senoidal a 5.5 kHz. Sin embargo, como se discutirá en la sección de conclusiones, la generación de una portadora perfectamente senoidal puede ser más complicada en la práctica que una triangular, por lo que debe evaluarse en función de los recursos disponibles.

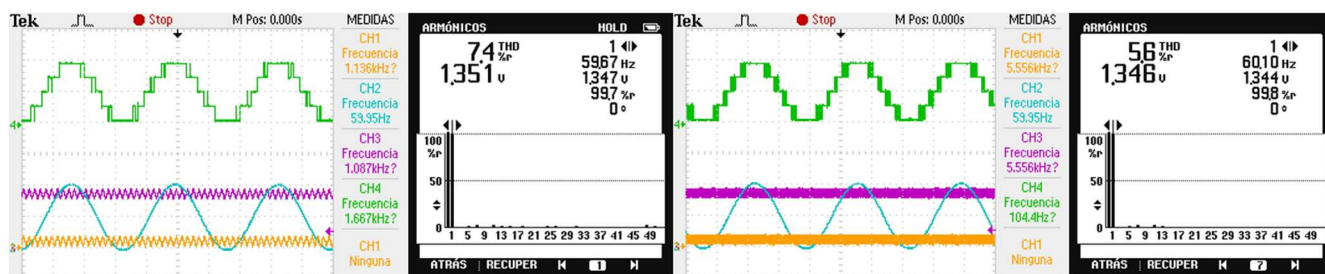


Figura 7 Resultados experimentales con portadora triangular. Para una frecuencia de 1.1 kHz se observa un THD de 7.4, mientras que para una frecuencia de 5.5 kHz se tiene un valor THD de 5.6.

Obtenida de: elaboración propia.

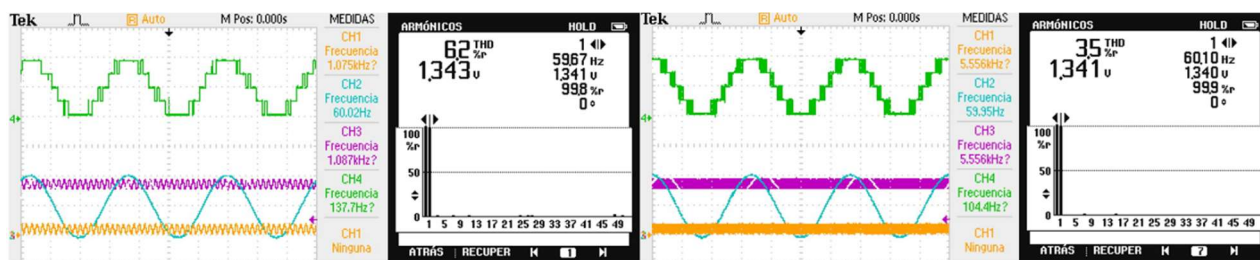


Figura 8 Resultados experimentales con portadora senoidal. Para una frecuencia de 1.1 kHz se observa un THD de 6.2, mientras que para una frecuencia de 5.5 kHz se tiene un valor THD de 3.5.

Obtenida de: elaboración propia.

4. Conclusiones: lo que podemos aprender de este artículo

Más allá de los resultados técnicos, este proyecto constituye una valiosa herramienta educativa. Su diseño permite que los estudiantes comprendan conceptos complejos de forma tangible, manipulando señales reales, observando sus efectos en tiempo real y relacionando teoría con práctica. A continuación, se destacan algunas de las principales enseñanzas que este prototipo ofrece:

- a) Comprensión de la modulación por ancho de pulso (PWM).
- b) Desarrollo de habilidades prácticas en electrónica analógica.
- c) Evaluación de la calidad de energía.
- d) Flexibilidad para adaptarse a múltiples escenarios.
- e) Aplicaciones en energías renovables y sistemas reales.

Este tipo de actividades permiten que la enseñanza de la electrónica de potencia no se limite a simulaciones o esquemas en papel, sino que involucre el razonamiento crítico, la experimentación y la validación de hipótesis. En resumen, este proyecto es una puerta de entrada accesible y poderosa al mundo de los convertidores avanzados y la modulación.

Este trabajo presentó una propuesta experimental y accesible para implementar un convertidor multinivel de cinco niveles, utilizando exclusivamente componentes analógicos como amplificadores operacionales y comparadores. A través de esta solución, fue posible demostrar que técnicas avanzadas de modulación, como la modulación por ancho de pulso (PWM), pueden comprenderse y replicarse sin necesidad de plataformas digitales complejas como FPGAs o DSPs.

Los resultados obtenidos, tanto en simulación como en laboratorio, confirmaron que el sistema es funcional y que la forma y frecuencia de la señal portadora influyen directamente en la calidad de la señal de salida. En particular, el uso de una portadora senoidal a 5.5 kHz arrojó los mejores resultados en términos de distorsión armónica total (THD), validando la teoría de que una mayor frecuencia de conmutación mejora la reconstrucción de la señal modulada. Sin embargo, también se observó que generar una portadora senoidal con alta fidelidad puede representar un desafío práctico, lo que posiciona a la portadora triangular como una opción más simple y efectiva en contextos educativos.

Más allá de los resultados técnicos, este proyecto destaca por su valor pedagógico. Permite que estudiantes y docentes exploren conceptos clave de electrónica de potencia, análisis de

señales y modulación, mediante un enfoque práctico y tangible. Además, su diseño modular abre la posibilidad de extender su funcionalidad, incluyendo otras formas de portadora, más niveles de conversión o nuevas técnicas de modulación.

En síntesis, se trata de una herramienta formativa de bajo costo, alto impacto educativo y amplio potencial para ser integrada en cursos de electrónica analógica, electrónica de potencia y energías renovables. Su implementación no solo facilita el aprendizaje activo, sino que también inspira la curiosidad y la experimentación, pilares fundamentales en la formación de ingenieros.

5. Referencias: *por si quieres seguir conociendo más*

- Belkheiri, A., Aoughellanet, S., Belkheiri, M., & Rabhi, A. (2015). FPGA based control of a PWM inverter by the third harmonic injection technique for maximizing DC bus utilization. *International Conference on Control, Engineering & Information Technology (CEIT)*.
- Beser, E., Arifoglu, B., Camur, S., & Beser, E. K. (2009). Multilevel inverter with reduced number of switches. *International Review of Electrical Engineering*, 4(4), 532–538.
- Deshmukh, V. M., & Patil, A. J. (2015). Development of Matlab/Simulink model for three-phase PWM inverter and hardware implementation using DSP with nonlinear load. *International Journal of Control Science and Engineering*, 5(1), 1–9.
- Govindaraju, C., & Baskaran, K. (2009). Optimized hybrid phase disposition PWM control method for multilevel inverter. *International Journal of Recent Trends in Engineering*, 1(3), 129–134.
- Cupta, K. K., & Jain, S. (2012). Theoretical analysis and experimental validation of a novel multilevel inverter topology for renewable energy interfacing applications. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 4(1).
- Kouro, S., Malinowski, M., Gopakumar, K., Pou, J., Franquelo, L. G., Wu, B., et al. (2010). Recent advances and industrial applications of multilevel converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(8), 2553–2580.
- Lozoya-Ponce, R. E., Campos-Cantón, I., & Lozoya-Ponce, R. O. (2013). Estructura reconfigurable: comparador/multiplexor/demultiplexor. *Revista Mexicana de Física*, 59, 107–116.
- Malinowski, M., Gopakumar, K., Rodriguez, J., & Pérez, M. A. (2010). A survey on cascaded multilevel inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(7), 2197–2206.
- Nema, S., Nema, R. K., & Agnihotri, G. (2011). Inverter topologies and control structure in photovoltaic applications: A review. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 3(1).

- Rahim, N. A., & Mekhilef, S. (2002). Implementation of three-phase grid connected inverter for photovoltaic solar power generation system. *Proceedings of the International Conference on Power System Technology*.
- Rodríguez, J., Lai, J.-S., & Peng, F. Z. (2002). Multilevel inverters: A survey of topologies, controls, and applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 49(4), 724–738.
- Selvaraj, J., & Rahim, N. A. (2009). A novel pulse width modulation for grid-connected multilevel inverter. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 1(5).