

ENTORNO GUI PARA EL ANÁLISIS DE TÉCNICAS SPWM CON PORTADORAS CONVENCIONALES Y BASADAS EN CAOS

Ochoa-Sáenz H.^{a*}, Lozoya-Ponce R.E.^a, Jiménez-López E.^b, Martínez-Montejano R.C.^c,
Ontañón-García L.J.^d

^a Tecnológico Nacional de México–Instituto Tecnológico de Chihuahua, Chihuahua, México,

^b Centro de Investigación y Estudios Avanzados de la Población, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México,

^c Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Estudios Profesionales Zona Media, Rioverde, S.L.P., México.

^d Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Coordinación Académica, Salinas de Hidalgo, S.L.P., México.
*L19060760@chihuahua.tecnm.mx

RESUMEN

Este trabajo presenta el desarrollo de un entorno gráfico interactivo (por sus siglas en inglés, *GUI*) en MATLAB para el análisis comparativo de técnicas *SPWM*, implementando cinco tipos de señales portadoras: triangular, sinusoidal, diente de sierra, aleatoria y caótica (generada mediante mapas logísticos). La plataforma realiza un análisis de distorsión armónica total (por sus siglas en inglés, *THD*), conforme al estándar IEEE 519, proporcionando una evaluación unificada para inversores multinivel de 5, 7 y 9 niveles, permitiendo visualizar en tiempo real espectros de frecuencia, formas de onda y métricas automatizadas. Se comparan las características determinísticas de las portadoras convencionales con la dispersión espectral de las portadoras caóticas, demostrando que estas últimas logran una distribución más uniforme del contenido armónico, mejorando significativamente la calidad energética, estableciendo bases teóricas y experimentales para la selección de técnicas de modulación que mejoren la calidad de la energía en sistemas de conversión de potencia.

PALABRAS CLAVE: *SPWM*, mapa logístico, caos, convertidores multinivel, MATLAB.

INTRODUCCIÓN

Los inversores multinivel son tecnología clave en conversión de energía por su capacidad de generar formas de onda de alta calidad y mejorar la eficiencia en media y alta tensión [8]. La modulación *SPWM* es ampliamente utilizada por su simplicidad, pero concentra armónicos en torno a la frecuencia de conmutación, incrementando el *THD*, ruido acústico e interferencia electromagnética (por sus siglas en inglés, *EMI*) [2, 4, 12].

Como alternativa, se han propuesto técnicas de modulación determinísticas basadas en señales caóticas para dispersar el espectro armónico [1, 2]. Estudios pioneros demostraron que secuencias caóticas en la modulación por ancho de pulso (por sus siglas en inglés, *PWM*) reducen picos espectrales sin afectar la eficiencia [1], mientras que trabajos recientes confirman su utilidad para suprimir *EMI*, aunque sin garantizar reducción del *THD* global [2, 5, 6, 13]. La literatura reporta métodos híbridos como inyección de armónicos [13, 14], implementaciones en una matriz de puertas programables en campo (por sus siglas en inglés, *FPGA*) [10], y el uso de diferentes mapas caóticos (logístico, carpa, doble carpa) con resultados variables [6, 9].

Este trabajo presenta una propuesta exploratoria unificando cinco tipos de portadoras en una GUI para SPWM aplicada a inversores de 5, 7 y 9 niveles. El objetivo es evaluar señales caóticas y aleatorias como portadoras, proporcionando análisis de THD hasta el armónico 52 según IEEE 519.

MARCO TEÓRICO

Modulación *SPWM*.

Representa una de las estrategias más empleadas en inversores debido a su simplicidad y facilidad de implementación. El principio de operación consiste en comparar una señal de referencia senoidal con una o varias señales portadoras de mayor frecuencia, usualmente triangulares, determinando así los instantes de conmutación de los dispositivos semiconductores. Como resultado, se obtienen pulsos modulados que permiten aproximar una onda senoidal en la salida del inversor. La Figura 1 ilustra este proceso, mostrando tanto la etapa de comparación como la forma de onda generada en la salida.

La condición de conmutación se establece mediante comparación directa entre la señal de referencia senoidal y las portadoras.

$$V_m(t) = M_a \sin(2\pi f_m t) \quad (1)$$

$$M_a = \frac{V_m}{V_c}, \quad M_f = \frac{f_c}{f_r} \quad (2)$$

Los índices de modulación en amplitud (M_a) y frecuencia (M_f) determinan las características espectrales de la señal de salida, donde V_m y V_c son las amplitudes de la moduladora y portadora respectivamente. Estos índices determinan la amplitud del componente fundamental de la salida, así como la localización de los armónicos en el espectro [8].

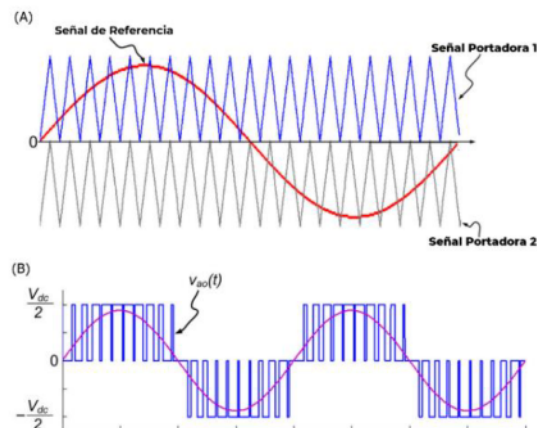


Figura 1. Principio de la modulación *SPWM*. (A) Comparación entre señal de referencia senoidal (rojo) y señales portadoras triangulares (azul y gris). (B) Forma de onda de salida modulada $v_{ao}(t)$, mostrando la envolvente senoidal tras el filtrado.

Si llamamos:

$$v_r(t) = V_m \sin(\omega t) \quad (\text{señal de referencia senoidal}) \quad (3)$$

$$v_c(t) \quad (\text{señal portadora triangular de frecuencia } f_c) \quad (4)$$

entonces la condición de conmutación se puede expresar como:

$$\begin{cases} S = 1, & \text{Si } v_r(t) \geq v_c(t) \\ S = 0, & \text{Si } v_r(t) < v_c(t) \end{cases} \quad (5)$$

Portadoras caóticas.

Si bien la *SPWM* presenta ventajas como un control lineal de la onda fundamental y una implementación sencilla en hardware digital, una limitación inherente que se tiene al emplear portadoras de diente de sierra o triangulares las cuales cuentan con comportamiento periódico resultando en que sus armónicos se concentran alrededor de la frecuencia de conmutación y sus múltiplos, en cambio las portadoras caóticas cuentan con alta sensibilidad a las condiciones iniciales y son aperiódicas, resultando así en un espectro de frecuencias continuo y de banda ancha, mitigando problemas de *EMI*.

Dentro de los sistemas caóticos más estudiados se tiene al mapa logístico el cual es un referente dada su simplicidad de implementación y su capacidad de generar comportamientos no lineales a partir de una ecuación en diferencias de un sistema dinámico discreto:

$$x_{n+1} = \alpha x_n(1 - x_n), \quad 0 < x_n < 1 \quad (6)$$

Donde $\alpha \in R$ es el parámetro de control (tasa de crecimiento) y x_n la condición inicial normalizada en el intervalo (0,1). La variación de r permite transitar desde dinámicas estables hasta regímenes caóticos, plenamente desarrollado, lo que resulta atractivo para generar secuencias pseudoaleatorias en modulación [3, 10]. Implementaciones en hardware digital mediante procesadores de señales digitales (por sus siglas en inglés, *DSPs*) y *FPGAs* han demostrado la viabilidad práctica de estas estrategias en electrónica de potencia [7, 10] posibilitando el uso del caos como mecanismo de modulación para mejorar *THD*, *EMI* y voltaje de modo común en inversores.

El *THD* se define como la relación entre la raíz cuadrática media (RMS) de los armónicos y la componente fundamental:

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \times 100\% \quad (7)$$

donde V_1 es la amplitud RMS del componente fundamental y V_n corresponde a la amplitud RMS del n -ésimo armónico.

De acuerdo con la norma IEEE 519-2014, en sistemas de potencia se recomienda que el valor de *THD* en tensión no exceda típicamente el 5 % en el punto de conexión común, y valores aún más estrictos pueden aplicarse dependiendo de la categoría de la red y el nivel de tensión. Esto enfatiza la necesidad de explorar nuevas técnicas de modulación capaces de redistribuir o reducir los armónicos [15].

METODOLOGÍA

Con el propósito del estudio del mapa logístico se creó esta herramienta la cual permite modificar parámetros clave como la condición inicial (x_0), el número de iteraciones y el valor del parámetro de control (r).

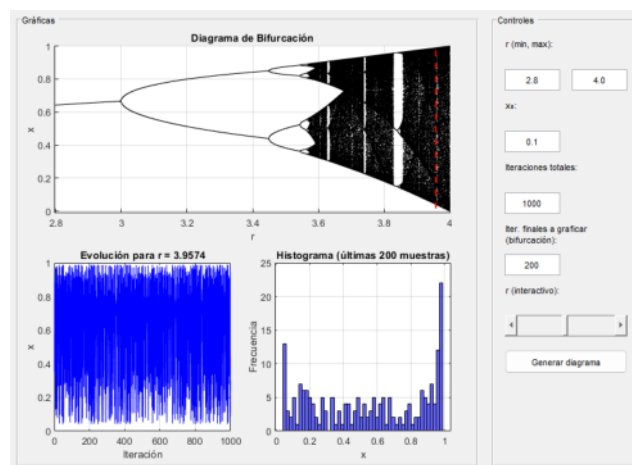


Figura 2. Interfaz gráfica para el análisis del mapa logístico: (a) Diagrama de bifurcación; (b) Evolución temporal de la serie; (c) Histograma de distribución.

En una segunda etapa de simulación, se desarrolló la implementación de la técnica *SPWM* con portadoras convencionales y caóticas; la cual consta de cinco tipos de portadoras mediante algoritmos específicos. Las portadoras convencionales (triangular, sinusoidal y cuadrada) se generan mediante funciones analíticas estándar [17, 19]. La portadora aleatoria implementa un generador pseudoaleatorio con distribución uniforme. El mapa logístico se implementa con normalización al rango $[-1, 1]$ mediante la transformación:

$$c_{\log}[n] = 2x_n - 1 \quad (8)$$

| Portadora | Ecuación Principal | Tipo | Periódica | Determinista | Rango |
|------------|--|----------|-----------|--------------|------------|
| Triangular | $c_{tri}(t) = 2 \text{mod}(f_c t, 1) - 0.5 - 1$ | Continua | Sí | Sí | $[-1, 1]$ |
| Senoidal | $c_{sen}(t) = \sin(2\pi f_c t)$ | Continua | Sí | Sí | $[-1, 1]$ |
| Cuadrada | $c_{cuad}(t) = \text{sgn}(\sin(2\pi f_c t))$ | Discreta | Sí | Sí | $[-1, +1]$ |
| Aleatoria | $c_{rand}[n] = 2\mathcal{U}(0, 1) - 1$ | Discreta | No | No | $[-1, 1]$ |
| Logística | $c_{log}[n] = 2x_n - 1$ donde $x_{n+1} = \alpha x_n(1 - x_n)$ | Discreta | No | Sí | $[-1, 1]$ |

Tabla 1. Características matemáticas de las portadoras implementadas.

RESULTADOS:

Los experimentos se realizaron con parámetros estandarizados: frecuencia de muestreo de 100 KHz, frecuencia fundamental de 60 Hz, tiempo de análisis de 200 ms e índice de modulación de 1.0 para inversores de 5, 7 y 9 niveles. Las portadoras se distribuyeron con umbrales adaptativos ajustables mediante la *GUI* desarrollada.

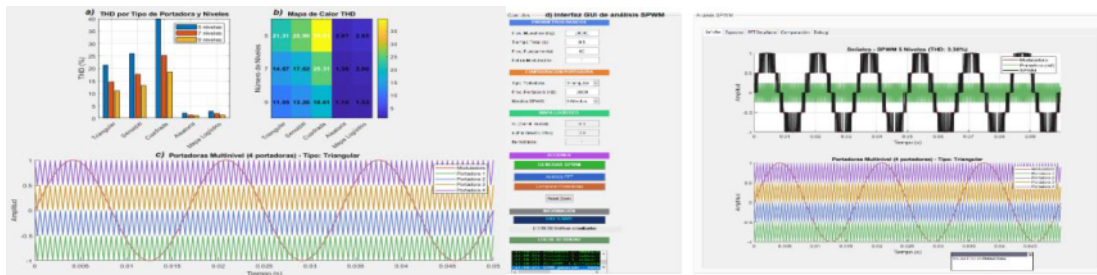


Figura 3. Análisis experimental de *THD*: (a) Comparación por tipo de portadora y niveles; (b) Mapa de calor *THD*; (c) Ejemplo de modulación *SPWM* multinivel con portadoras triangulares; (d) Interfaz *GUI* de análisis *SPWM*.

La tabla 2 presenta los resultados experimentales de *THD* para diferentes portadoras y configuraciones multinivel. Las técnicas determinísticas presentan *THD* sustancialmente inferior, destacando el mapa logístico alcanza una reducción del 86.86% respecto a la triangular y una distribución espectral más uniforme hasta el armónico 52.

| Portadora | 5 Niveles | 7 Niveles | 9 Niveles | Promedio |
|-----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Triangular | 21.31 % | 14.67 % | 11.05 % | 15.68 % |
| Senoidal | 25.96 % | 17.62 % | 13.20 % | 18.92 % |
| Cuadrada | 39.81 % | 25.31 % | 18.61 % | 27.91 % |
| Aleatoria | 2.07 % | 1.36 % | 1.10 % | 1.51 % |
| Mapa Logístico | 2.85 % | 2.00 % | 1.33 % | 2.06 % |

Tabla 2. Comparación del *THD* por tipo de portadora y número de niveles. Resultados experimentales obtenidos desde la simulación de la *GUI*.

El *THD* disminuye consistentemente al incrementar niveles: para 9 niveles, la aleatoria logra 1.10% y el mapa logístico 1.33%. Aunque la portadora aleatoria presenta menor *THD*, el mapa

logístico ofrece ventajas prácticas decisivas: implementación simple mediante ecuación recursiva, menor carga computacional para síntesis en *DSPs* y/o *FPGAs* [7, 10], y reproducibilidad determinística —crítica para sincronización— sin sacrificar dispersión espectral.

Trabajo Futuro:

Los resultados establecen bases para implementación en *FPGA* de punto fijo en tiempo real, exploración de otros atractores caóticos (Chua, Lorenz), y validación experimental en prototipos de potencia.

Financiamiento:

Los autores agradecen al COPOCYT por el apoyo brindado a la realización de este proyecto de investigación.

REFERENCIAS:

- [1] A. Bellini, G. Franceschini, R. Rovatti, G. Setti, and C. Tassoni, "Generation of low-EMI PWM patterns for induction motor drives with chaotic maps," in *Proc. 27th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc. (IECON)*, 2001, pp. 1527–1532.
- [2] H. Li, Y. Liu, J. Lü, T. Q. Zheng, and X. Yu, "Suppressing EMI in power converters via chaotic SPWM control based on spectrum analysis approach," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 11, pp. 6128–6137, Nov. 2014, doi: 10.1109/TIE.2014.2308131.
- [3] D. Lina, D. Luo, G. Huang, Y. Chen, and T. Li, "Research on control method of multilevel inverter based on chaotic modulation," in *Proc. SPIE 13291, ISAECE 2024*, pp. 1–7, 2024, doi: 10.1117/12.3034432.
- [4] P. Arul Kumar and N. P. Subramaniam, "Chaotic triangular carrier based non-deterministic SPWM strategy for voltage source inverter drives," *Indian J. Sci. Technol.*, vol. 8, no. 9, pp. 842–848, May 2015, doi: 10.17485/ijst/2015/v8i9/60075.
- [5] M. Asefi and J. Nazarzadeh, "Integral-series Fourier analysis of chaotic PWM patterns for common mode voltage stresses," *IET Power Electron.*, vol. 11, no. 8, pp. 1329–1340, 2018, doi: x
- [6] G. Han, J. Kim, and Y. Jung, "A study on the spread-spectrum of chaos PWM techniques applied to power electronics converters," *J. Korean Inst. Illum. Electr. Install. Eng.*, vol. 36, no. 5, pp. 27–37, May 2022, doi: 10.5207/JIEIE.2022.36.5.027
- [7] S. Natarajan, P. Padmavathi, J. R. Kalvakurthi, T. S. Babu, V. K. Ramchandaramurthy, and S. Padmanaban, "Conducted electromagnetic interference spectral peak mitigation in Luo-converter using FPGA-based chaotic PWM technique," *Electr. Power Compon. Syst.*, vol. 47, no. 19–20, pp. 1761–1774, Jul. 2019, doi: 10.1080/15325008.2019.1629510.
- [8] K. K. Gupta, *Multilevel Inverters: Conventional and Emerging Topologies and Their Control*. Academic Press, 2020, ch. 4.
- [9] D. Rath, S. Kar, and A. K. Patra, "Harmonic distortion assessment in the single-phase photovoltaic (PV) system based on SPWM technique," *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 46, pp. 4765–4779, May 2021, doi: 10.1007/s13369-021-05437-6.
- [10] R. Sarker, A. Datta, and S. Debnath, "FPGA-based high-definition SPWM generation with harmonic mitigation property for voltage source inverter applications," *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 17, no. 2, pp. 1352–1363, Feb. 2021, doi: 10.1109/TII.2020.2983844.
- [11] B. H. Yuditya, R. N. Hasanah, L. Ardhenta, and T. Taufik, "Performance Comparison of Single-Phase Multilevel Inverter with SPWM Unipolar and Bipolar Switching Techniques," in *Proc. FORTEI-Int. Conf. Electr. Eng. (FORTEI-ICEE)*, Malang, Indonesia, 2020, pp. 102–107, doi: 10.1109/FORTEI-ICEE50915.2020.9249911.
- [12] R. M. Tallam, R. J. Kerkman, D. Leggate, and R. A. Lukaszewski, "Common-mode voltage reduction PWM algorithm for AC drives," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 46, no. 5, pp. 1959–1969, Sep./Oct. 2010, doi: 10.1109/TIA.2010.2057396.



UASLP
Universidad Autónoma
de San Luis Potosí



FACULTAD DE
ESTUDIOS
PROFESIONALES
ZONA MEDIA
UASLP



COLEGIO
UNIVERSITARIO DE
CIENCIAS Y ARTES

- [13] B. Tan, Z. Gu, K. Shen, and X. Ding, "Third harmonic injection SPWM method based on alternating carrier polarity to suppress the common mode voltage," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 9805–9815, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2890014.
- [14] I. M. K. Al-Jafeary and N. M. L. Tan, "Design of a novel SPWM based on bat-like reference signal technique for EV applications," in *Proc. 2020 IEEE Int. Conf. Power and Energy (PECon)*, Penang, Malaysia, 2020, pp. 439–444, doi: 10.1109/PECon48942.2020.9314525.
- [15] IEEE Standard 519-2014, "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems," IEEE, 2014.
- [16] IEC 61000-2-2, "Electromagnetic compatibility (EMC)- Part 2-2: Environment- Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems," IEC, 2002.
- [17] J. Rodriguez, J.-S. Lai, and F. Z. Peng, "Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, no. 4, pp. 724-738, Aug. 2002.
- [18] S. Kouro, M. Malinowski, K. Gopakumar, J. Pou, L. G. Franquelo, B. Wu, J. Rodriguez, M. A. Pérez, and J. I. Leon, "Recent advances and industrial applications of multilevel converters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 8, pp. 2553-2580, Aug. 2010.
- [19] F. Z. Peng, "A generalized multilevel inverter topology with self voltage balancing," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 37, no. 2, pp. 611-618, Mar./Apr. 2001.