

INVERSOR MULTINIVEL DE CINCO NIVELES MONOFÁSICO PARA APLICACIONES SOLARES FOTOVOLTAICAS EN UN ENTORNO SIMULADO

*SINGLE PHASE FIVE-LEVEL MULTILEVEL
INVERTER FOR SOLAR PV APPLICATIONS
IN A SIMULATED ENVIRONMENT*

Rodrigo Alexis Velázquez Pérez

Tecnológico Nacional de México / CENIDET, México
M22ce027@cenidet.tecnm.mx

Susana Estefany de León Aldaco

Tecnológico Nacional de México / CENIDET, México
susana.da@cenidet.tecnm.mx

Jesús Aguayo Alquicira

Tecnológico Nacional de México / CENIDET, México
jesus.aa@cenidet.tecnm.mx

Daniel Alejandro Pérez Uc

Tecnológico Nacional de México / ITS de Centla, México
daniel_perezuc@cenidet.tecnm.mx

Recepción: 25/septiembre/2023

Aceptación: 13/junio/2024

Resumen

Este trabajo presenta un inversor multinivel de cinco niveles monofásico de topología de puente H en cascada para aplicaciones solares usando el tipo de modulación PWM multi portadora. Esta topología presenta mejoras en la calidad de la forma de onda de salida en comparación con los inversores convencionales ya que, al manejar más niveles, la distorsión armónica disminuye. Asimismo, frente a las otras topologías multinivel se tienen ventajas de modularidad y menor estrés térmico-eléctrico en los dispositivos de potencia. Para la modulación se utiliza la técnica APOD-PWM y se valida el funcionamiento mediante simulación en Matlab/Simulink para una potencia de 1 kW y se obtiene el valor de la THD.

Palabras clave: Energía solar, Inversor, Multinivel, PWM, THD.

Abstract

This paper presents a single-phase five-level multilevel inverter of cascaded H-bridge topology for solar applications using multi-carrier PWM modulation type. This topology presents improvements in the output waveform quality compared to conventional inverters since, by handling more levels, the harmonic distortion decreases. Also, compared to other multilevel topologies, there are advantages of modularity and lower thermal-electrical stress in the power devices. The APOD-PWM technique is used for modulation and the operation is validated by simulation in Matlab/Simulink for a power of 1 kW and the THD value is obtained.

Keywords: *Inverter, Multilevel, PWM, Solar Energy, THD.*

1. Introducción

En años recientes, numerosas aplicaciones han comenzado a requerir equipos de más potencia y para aplicaciones de energías renovables donde se encuentra la solar fotovoltaica [Mittal, 2012]. Por lo que se han introducido los inversores multinivel para satisfacer la demanda de las nuevas aplicaciones de alta potencia y de media tensión. Las aplicaciones de los inversores multinivel están en las fuentes de energías renovables, fuentes de poder no interrumpibles y vehículos eléctricos [Zhang, 2018], [Poorfakhraei, 2021], [Bucella, 2019]. Esta topología de inversor multinivel se divide en tres tipos [Mittal, 2012], [Malinowski, 2010], [Franquelo, 2008].

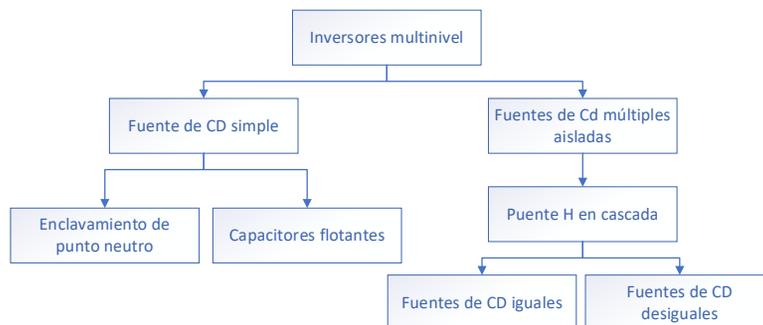
- Inversor multinivel de diodos de enclavamiento.
- Inversor multinivel de capacitores flotantes.
- Inversor multinivel en cascada.

De la clasificación anterior, se presenta una desventaja en los inversores de diodos de enclavamiento y de capacitores flotantes al usar un gran número de componentes y el tiempo de vida de los capacitores es reducido. Por lo anterior, se tiene un mayor interés en el estudio del inversor multinivel en cascada al presentar mejores características. De las cuales, se tienen:

- Son modulares y se puede incrementar el número de niveles aumentando el número de celdas conectadas en cascada.

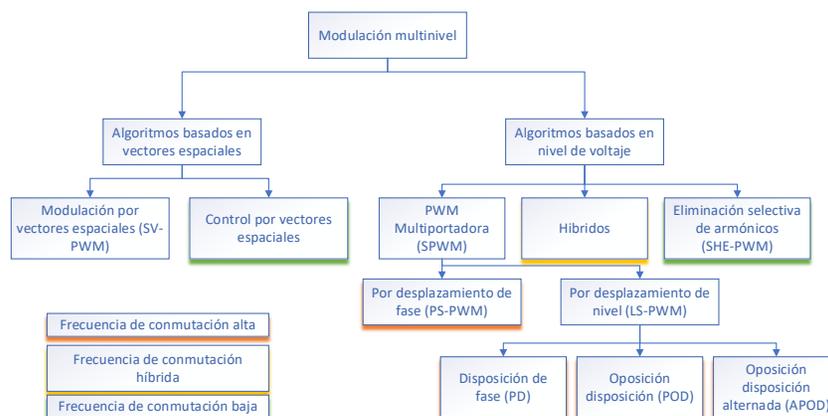
- Presentan un menor estrés térmico y eléctrico a medida que se aumenta el número de niveles.
- La suma de las tensiones de salida de cada celda genera el nivel de tensión de salida por cada fase. Por ende, se reduce el voltaje de alimentación de los interruptores de potencia.

Según el tipo de alimentación, los inversores multinivel se clasifican como se ve en la figura 1, [Manivelan, 2020]. En donde los inversores de puente H en cascada poseen fuentes de CD iguales(simétricos) o desiguales(asimétricos). En la figura 2, se presenta un esquema con la organización de las diferentes técnicas de modulación empleadas en los inversores multinivel [Franquelo, 2010]. En donde las técnicas de modulación multi portadora se dividen en dos tipos, por desplazamiento de nivel y por desplazamiento de fase.



Fuente: elaboración propia

Figura 1 Clasificación de los inversores multinivel.

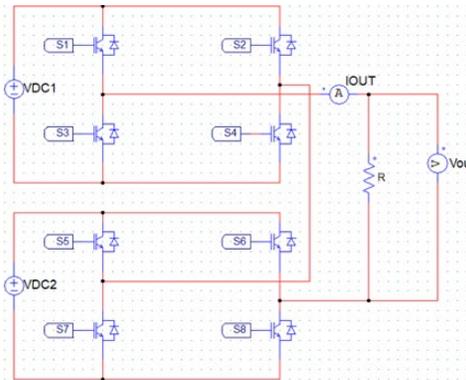


Fuente: elaboración propia

Figura 2 Modulación multinivel.

Topología de Inversor Multinivel de puente H en cascada

El inversor de topología de puente H en cascada es el que se muestra en la figura 3. El cual consta de ocho interruptores de potencia de tipo IGBT principalmente y de sus fuentes de alimentación simétrica, es decir, fuentes con el mismo valor de voltaje CD. Cada fuente de CD representa una fuente de energía fotovoltaica [Boontua, 2021], como un panel solar, que es conectado en la entrada de cada celda del inversor. La carga que se emplea en este caso de estudio es de tipo resistiva.

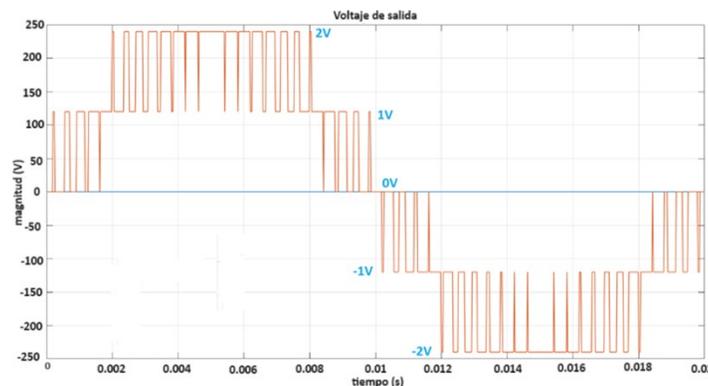


Fuente: elaboración propia

Figura 3 Inversor multinivel de cinco niveles.

Obtención de los niveles de voltaje a la salida del inversor

En la figura 4 se muestra la señal de salida del inversor y sus cinco niveles.



Fuente: elaboración propia

Figura 4 Señal de voltaje de salida del inversor.

En la tabla 1 se muestran los estados de conmutación de los interruptores para obtener los niveles de voltaje a la salida del inversor multinivel.

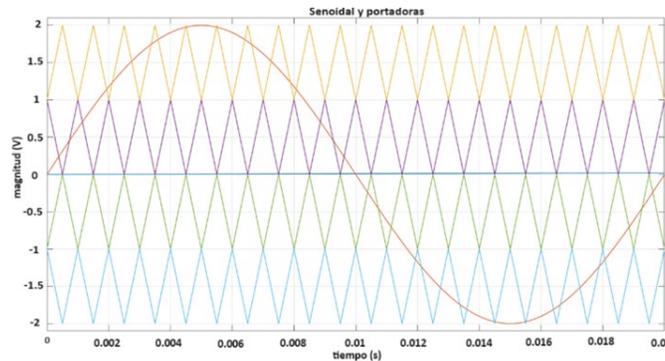
Tabla 1 Estados de conmutación para obtener los niveles de tensión.

	0V	V	2V	V	0V	-V	-2V	-V
S1	1	1	1	1	1	0	0	0
S2	1	0	0	0	1	1	1	1
S3	0	0	0	0	0	1	1	1
S4	0	1	1	1	0	0	0	0
S5	1	1	1	1	1	1	0	1
S6	1	1	0	1	1	1	1	1
S7	0	0	0	0	0	0	1	0
S8	0	0	1	0	0	0	0	0

Fuente: elaboración propia

Técnica de modulación APOD-PWM

La técnica de modulación empleada para controlar el inversor multinivel se denomina de disposición opuesta de fase alternada, APOD-PWM, por sus siglas en inglés “*Alternate Phase Opposition Disposition*”, y se verifica gráficamente en la figura 5 como ejemplo, la forma en qué están ordenadas las señales triangulares portadoras con respecto a la señal senoidal moduladora. La frecuencia de las portadoras es de 1 kHz.



Fuente: elaboración propia

Figura 5 Ejemplo ilustrativo para visualizar las señales.

Para obtener el número de señales portadoras en el inversor multinivel se tiene la ecuación 1. Donde, N_p es el número de portadoras, y N_n el número de niveles.

$$N_p = N_n - 1 \quad (1)$$

La relación en amplitud entre la señal moduladora y las señales portadoras se le denomina índice de modulación en amplitud y está dada por la ecuación 2.

$$m_a = \frac{A_m}{A_p * N_p} \quad (2)$$

Donde m_a es el índice de modulación en amplitud, A_m es la amplitud de la moduladora, A_p es la amplitud de la portadora y N_p es el número de portadoras. La relación en frecuencias se le llama índice de modulación en frecuencia y se denota en la ecuación 3, m_f es el índice de modulación en frecuencia, f_p y f_m las frecuencias de modulación de las portadoras y de la moduladora, respectivamente.

$$m_f = \frac{f_p}{f_m} \quad (3)$$

Revisión del estado del arte

Para ver el panorama de los trabajos más recientes, dentro de los últimos cinco años, con inversores multinivel en cascada monofásicos, se hizo la búsqueda de esta topología y sus aplicaciones como se ve en la tabla 2.

Tabla 2 Inversores multinivel en cascada y sus aplicaciones.

Referencia	Año	Niv	Fuente	Aplicación	Modulación
[Boontua, 2021]	2022	5	Sym	Sistemas FV-Interconexión a red eléctrica	PS-PWM
[Kumar, 2022]	2022	5	Sym	Sistemas FV	PS-PWM y LS-PWM
[Pawar, 2021]	2021	3, 5, 7	Sym	Simulación con carga resistiva	SPWM
[Acharya, 2021]	2021	5, 7, 9	Sym/Asym	Sistemas FV	PD LS-PWM
[Swathy, 2020]	2020	5	Sym	Simulación con carga resistiva	PD PWM
[Kishore, 2020]	2020	7	Asym	Simulación con carga resistiva	PS-PWM, LS-PWM, PD-PWM
[Miss Shilpa, 2018]	2018	3, 5, 7	Sym	Simulación con carga resistiva	SPWM
[Buccella, 2019]	2019	7	Asym	UPS-Implementación con carga resistiva	SHE
[Katir, 2019]	2019	7	Sym	UPS-Implementación con carga resistiva	SPWM
[Punithavathani, 2016]	2016	9	Sym	UPS - Simulación en Matlab/Simulink	SHE-PWM

Fuente: elaboración propia

2. Métodos

Parámetros de simulación

Para llevar a cabo la simulación y generación de pulsos de comando se empleó el entorno de Matlab/Simulink® con los siguientes datos mostrados en la tabla 3.

Tabla 3 Parámetros de simulación.

Parámetro	Valor
Índice de modulación en amplitud	1
Índice de modulación en frecuencia	50
Frecuencia de conmutación f_p	2.5 kHz
Frecuencia de moduladora f_m	50 Hz
Voltaje de fuentes de CD	120 V
Carga resistiva	27 Ω

Fuente: elaboración propia

Cálculo de la potencia del inversor

Para calcular la potencia de salida del inversor, partiendo de la ecuación de potencia activa (Ecuación 4), se tiene el voltaje a la salida del inversor que se denota con ecuación 5. Por tanto, el voltaje pico de salida del inversor es de 240 V.

Tabla 3 Parámetros de simulación.

Parámetro	Valor
Índice de modulación en amplitud	1
Índice de modulación en frecuencia	50
Frecuencia de conmutación f_p	2.5 kHz
Frecuencia de moduladora f_m	50 Hz
Voltaje de fuentes de CD	120 V
Carga resistiva	27 Ω

Fuente: elaboración propia

$$P = \left(\frac{|v|}{\sqrt{2}}\right) * \left(\frac{|i|}{\sqrt{2}}\right) \quad (4)$$

$$V_o = 2 * V_{cd} \quad (5)$$

Donde P es la potencia de salida, v el voltaje pico, i la corriente pico, V_o el voltaje de salida y V_{cd} el voltaje de las fuentes simétricas.

Si se define, por diseño, la carga resistiva a 27 Ω , se obtiene la corriente mediante la ecuación 6, donde I_o es la corriente de salida y R la carga resistiva. Por tanto, la corriente pico de salida del inversor es de 8.88 A.

$$I_o = V_o/R \quad (6)$$

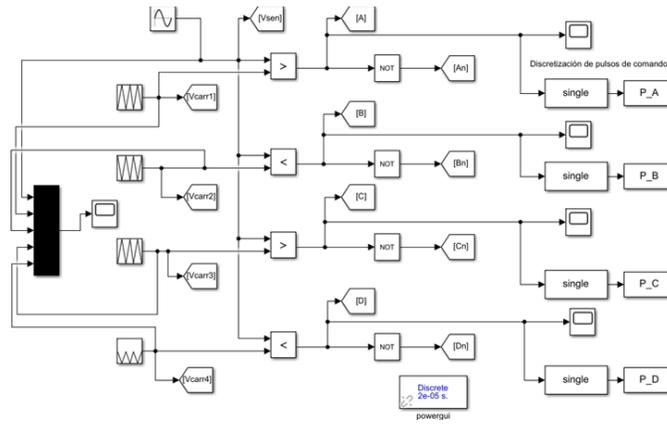
Calculando la potencia activa mediante ecuación 7 con los valores de voltaje y corriente del inversor, se tienen la potencia del inversor $P = 1,070 W$.

$$P = \left(\frac{|V_o|}{\sqrt{2}}\right) \left(\frac{|I_o|}{\sqrt{2}}\right) \quad (7)$$

Simulación en Matlab/Simulink®

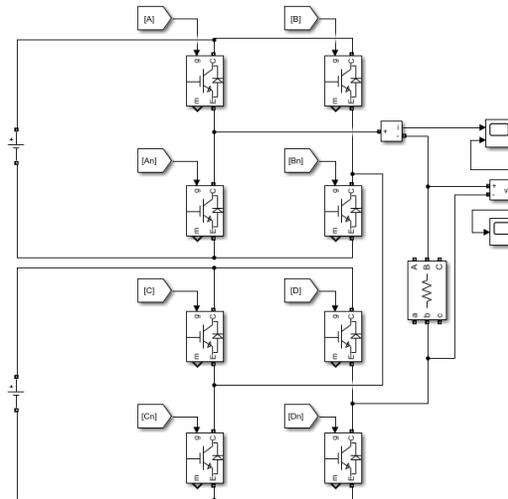
El diagrama a bloques para generar las señales portadoras y la señal moduladora se presenta en la figura 6. En donde se obtienen los pulsos de comando positivos y complementarios para los interruptores del inversor. El diagrama del inversor multinivel se muestra en la figura 7. Donde se tienen las dos fuentes de CD

simétricas y la carga resistiva en la salida, así como los medidores de voltaje, corriente y potencia. Las señales de las portadoras con la moduladora que se obtienen se muestran en la figura 8.



Fuente: elaboración propia

Figura 6 Diagrama a bloques en Simulink.

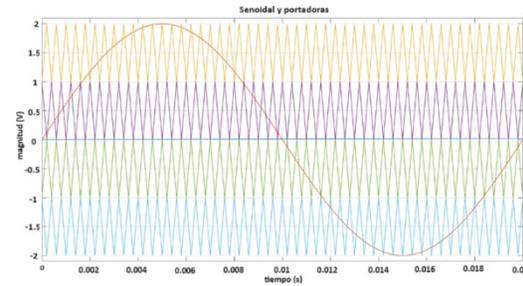


Fuente: elaboración propia

Figura 7 Inversor multinevel con carga resistiva.

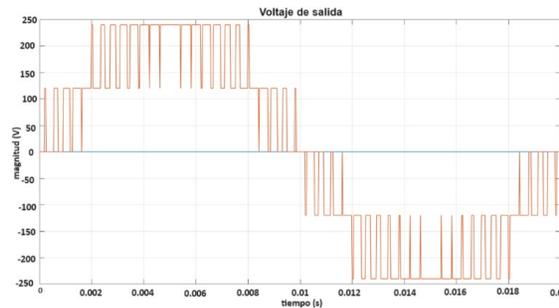
3. Resultados

La forma de onda de salida del inversor multinevel se muestra en la figura 9. La magnitud de voltaje pico es de 240 V. El análisis de THD se realiza tomando en cuenta hasta el armónico de orden 50, según [IEEE, 2022], esto con ayuda de la herramienta FFT Analysis de Simulink integrado en el entorno de simulación, para obtener el valor de distorsión armónica de la señal como se muestra en la figura 10.



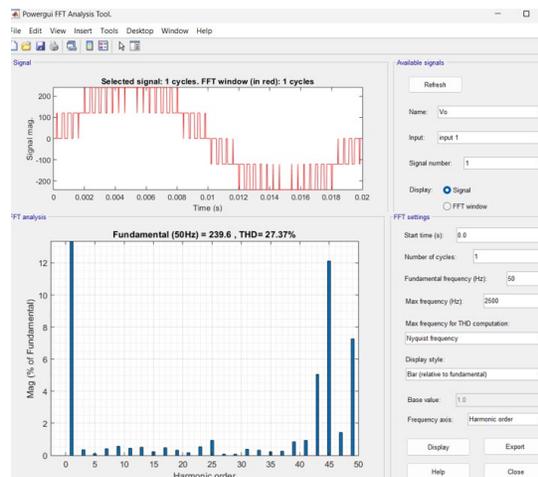
Fuente: elaboración propia

Figura 8 Señales portadoras a 2.5 kHz y moduladora a 50 Hz.



Fuente: elaboración propia

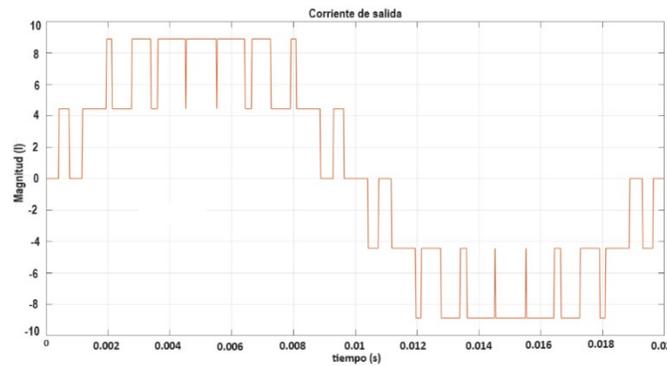
Figura 9 Voltaje de salida de técnica APOD-PWM con f_p a 2.5 kHz.



Fuente: elaboración propia

Figura 10 Medición de armónicos con f_p a 2.5 kHz.

La señal de corriente en la salida del inversor se muestra en la figura 11. La magnitud de corriente pico es de 8.88 A. Se hizo una comparación a dos frecuencias de conmutación del inversor para ver el efecto de la THD a medida que se aumenta considerablemente la frecuencia. Se obtuvo la tabla 4 de la misma forma a lo descrito en esta sección.



Fuente: elaboración propia

Figura 11 Señal de corriente de salida con f_p a 2.5 kHz.

Tabla 4 THD y Frecuencia de conmutación del inversor multinivel.

Frecuencia de conmutación f_p	Magnitud de la fundamental	THD (%)
2.5 kHz	239.6 V	27.37
4.0 kHz	240.4 V	26.83

Fuente: elaboración propia

4. Discusión

El inversor multinivel de puente H en cascada tiene la particularidad de ser modular y por cada celda, le corresponde un arreglo fotovoltaico, siendo éste una fuente de voltaje de CD. Con esto, cada celda recibe una cantidad de voltaje en proporción al voltaje de salida del inversor. Es decir, en este caso de estudio se tienen dos celdas de puente H para alcanzar los cinco niveles de salida, por lo que cada celda procesa la mitad de potencia del total entregado, reduciéndose así el estrés eléctrico que reciben los dispositivos de potencia y, por ende, el estrés térmico. En esta topología, la forma de onda generada a la salida del inversor se va pareciendo más a la senoidal a medida que se va aumentando el número de niveles. Asimismo, conforme se aumenta la frecuencia de conmutación, la THD se reduce como se comprobó en la sección 3.

5. Conclusiones

Con este trabajo de investigación se encontró en la revisión del estado del arte, que este tipo de inversores multinivel están siendo cada vez más usados en el sector de energías renovables debido a sus ventajas. Uno de los factores importantes a considerarse en el diseño de inversores es la calidad de forma de onda de salida

que se genera, y esta topología trae ventajas en reducir la THD en comparación con los inversores convencionales y el manejo de alta potencia con mediana tensión. Con la implementación en el ambiente de Simulink se corroboró que este tipo de inversores multinivel en cascada de puente H completo tienen la ventaja de ser modulares y de procesar la potencia total distribuyéndola en cada celda, así como la capacidad de reducir la THD conforme se aumenta considerablemente la frecuencia de conmutación.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Acharya, A. K, Chowdary, K. V. V. S. R, Sahu, P. K, and Kumar, K. Simulation and Analysis of Single-Phase Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter for Solar PV Application en *Advances in Smart Grid Automation and Industry 4.0*, (Lecture Notes in Electrical Engineering, ch. Chapter 54, pp. 543-554, 2021.
- [2] Buccella, M. G. C. C, Tinari, M, Cecati, C. Seven-level cascaded inverters for Uninterruptible Power Supply (UPS) applications, *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Lisbon, Portugal, 2019.
- [3] Boontua, S. P., Kongsuk, and Kinnares, V. Five-level Cascaded Multilevel H-Bridge Inverter for Single-Phase PV Grid-Connected System, presentado en The 2021 18th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2021.
- [4] Franquelo, L. G., Rodríguez, J., Leon, J. I., Kouro, S., Portillo, R. C., and Prats M. Á. M. J. I. I. E. M. The age of multilevel converters arrives, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 2, 2008.
- [5] Hanane, A. A., Noussi, K., Ibtissam, L. Adaptive Backstepping Control Of Cascaded H-Bridge Multilevel DC/AC Converters, *IEEE*, 2019.
- [6] IEEE. Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems in IEEE std 519-2022. Agosto 2022.
- [7] Kishore, D. N. K. a. P. V. Performance Analysis of Asymmetrical Cascaded H Bridge Multilevel Inverter Using Multicarrier Pulse-Width Modulation Techniques, Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2020, pp. 81-90, 2020.

- [8] Malinowski, M., Gopakumar, K., Rodríguez, J. R., and Pérez, M. A. J. I. T. o. I. E. A Survey on Cascaded Multilevel Inverters, vol. 57, pp. 2197-2206, 2010.
- [9] Manivelan, C. A Survey on Multilevel Inverter Topologies and Control Schemes with Harmonic Elimination, IEEE, pp. 1-7, 2020.
- [10] Mittal, N., Singh, B., Singh, S. P., Dixit, R., Kumar, D. Multilevel inverters: A literature survey on topologies and control strategies, 2nd International Conference on Power, Control Embedded Systems, pp. 1-11, 2012.
- [11] Nitin, P. V. K. T., and Pallavi, C. Design of Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter, Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2021, pp. 645-655, 2021.
- [12] Poorfakhraei, A., Narimani, M., and Emadi, A. A Review of Multilevel Inverter Topologies in Electric Vehicles: Current Status and Future Trends, IEEE Open Journal of Power Electronics, vol. 2, pp. 155-170, 2021.
- [13] Punithavathani, E. A. B. a. D. S. Real Time GA and ANN Based Selective Harmonic Elimination In 9 Level Ups Inverter, ICTACT Journal on Soft Computing, vol. 06, 2016.
- [14] Ranjith, K. G. R. Z. G., Jianghua, L., Wei, C., and Bo, L. Thermal Analysis and Reliability Evaluation of Cascaded H-Bridge Multilevel Pv Inverter for Grid Connected Applications, IET, The Journal of Engineering, 2022.
- [15] Shilpa, D. A. G. T. N. Dehedkar, Simulation of Single Phase Cascaded H Bridge Multilevel Inverters & THD analysis, Proceedings of 2018 Conference on Emerging Trends and Innovations in Engineering and Technological Research (ICETIETR), 2018.
- [16] Swathy, N. N. a. K. S. C. M. S. Design of Five-Level Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter, Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2020, pp. 65-80, 2020.
- [17] Zhang, X., Zhao, T., Mao, W., Tan, D., and Chang, L. Multilevel Inverters for Grid-Connected Photovoltaic Applications: Examining Emerging Trends, IEEE Power Electronics Magazine, vol. 5, no. 4, pp. 32-41, 2018.