

## Análisis de la relación de niveles entre un inversor multinivel monofásico y uno trifásico

Ing. Kenia Gómez Díaz., Dr. Jesús Aguayo Alquicira., Dra. Susana De León Aldaco., Ing. Rafael González Chávez

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, m21ce033@cenidet.tecnm.mx, Cuernavaca, Morelos, México.  
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, jesus.aa@cenidet.tecnm.mx, Cuernavaca, Morelos, México.  
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, susana.da@cenidet.tecnm.mx, Cuernavaca, Morelos, México.  
Sector Privado, rafa.9ken@gmail.com, Cuernavaca, Morelos, México.

### Resumen

En este artículo se analiza y comprueba la relación entre los niveles de un inversor multinivel (MLI, MultiLevel Inverter) monofásico y un inversor multinivel (MLI) trifásico. Existen diversas topologías y técnicas de modulación, para este trabajo se seleccionó el inversor multinivel puente H en cascada, gracias a las ventajas que presenta con respecto a las otras topologías. Se observó una deficiencia en diversos artículos que hablan de los inversores multinivel, ya que omiten información acerca de con qué tipo de sistema se está trabajando, es decir, trifásicos o monofásicos. Los autores dan por hecho que todos los lectores tienen amplio conocimiento al respecto, sin embargo, las personas que no están tan involucradas con los MLI no pueden deducir con qué sistema llevo a cabo la investigación el autor, esto genera la necesidad de conocer de forma rápida si se está analizando un MLI monofásico o trifásico. Se utilizó el software PSPICE OrCAD<sup>®</sup> 17.4-2019 para la simulación de los inversores multinivel, de tal forma se obtuvieron los niveles que se deben de presentar de acuerdo al número de puentes completos que se tiene en el inversor y si es monofásico o trifásico. La relación es definida por una ecuación matemática deducida a partir de los resultados de simulación, las cuales fueron a partir de dos niveles hasta nueve niveles en monofásico.

**Palabras clave**— Inversor Monofásico, Inversor Multinivel (MLI), Inversor Trifásico, Puente Completo, Puente H,

### Abstract

*This paper analyzes and tests the relationship between the levels of a single-phase multilevel inverter (MLI) and a three-phase multilevel inverter (MLI). There are several topologies and modulation techniques, for this work the cascaded H-bridge multilevel inverter was selected, thanks to the advantages it presents with respect to the other topologies. A deficiency was observed in several articles that talk about multilevel inverters, since they omit information about what type of system is being used, i.e., three-phase or single-phase. The authors assume that all readers have ample knowledge of the subject, however, people who are not so involved with MLI cannot deduce which system the author conducted the research with. This creates the need to*

*know quickly whether a single-phase or three-phase MLI is being analyzed. PSPICE OrCAD<sup>®</sup> 17.4-2019 software was used for the simulation of the multilevel inverters, in such a way that the levels that should be presented were obtained according to the number of full bridges in the inverter and whether it is single-phase or three-phase. The relationship is defined by a mathematical equation deduced from the simulation results, which were from two levels up to nine levels in single-phase.*

**Keywords**— Full bridge, H-bridge, Multilevel Inverter (MLI), Single-phase Inverter, Three-phase Inverter.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la energía eléctrica es una de las formas de energía más utilizadas, tanto en la industria como en hogares, comercios o incluso en los medios de transporte. Una de sus características más relevantes son su contabilidad, versatilidad, y por su limpieza sobre todo en el lugar de consumo de la energía. Existen varias formas de generar la energía eléctrica a nivel mundial, a continuación se enlistan en orden descendente las mayores fuentes de energía eléctrica a nivel mundial, es decir, datos estadísticos del consumo total de la energía final consumidos a nivel mundial [1, 2]:

1. Crudo, con un 32% de consumo.
2. Carbón y sus derivados, con un 27% de consumo.
3. Gas natural, con un 22% de consumo.
4. Renovables, con un 14% de consumo.
5. Nucleoenergía, con un 5% de consumo.

En corriente alterna (CA), los cambios de los niveles de tensión se realizan mediante el uso de equipo como transformadores, máquinas eléctricas estáticas de funcionamiento muy simple y de elevado rendimiento. Dentro de estas corrientes y tensiones alternas, puede haber dos modalidades de utilización de energía, las cuales son corrientes alternas monofásicas y corrientes alternas trifásicas.

Una fuente de alimentación trifásica consta de tres voltajes y/o corrientes sinusoidales, cada uno con exactamente la misma magnitud y las tres fases difieren solo en el ángulo de fase de las ondas sinusoidales. Los ángulos de fase de las tres ondas sinusoidales son 0°, 120° y 240° respectivamente (cuando el sistema es balanceado). A continuación, se describe dos ventajas de una fuente de alimentación trifásica:

1. Los voltajes y corrientes sinusoidales producidos pueden incrementarse usando un transformador, mientras que los voltajes y corrientes directas (CD) no pueden incrementarse.
2. La potencia entregada a una carga trifásica es constante.

Generalmente los receptores de pequeña potencia suelen ser monofásicos por simplicidad, sin embargo, en el transporte

de la energía eléctrica a grandes distancias suele realizarse de forma trifásica, porque ello permite un ahorro de conductores eléctricos. De igual manera los receptores de mediana y gran potencia suelen ser trifásicos porque existe un ahorro en los materiales y otro factor relevante es el funcionamiento más óptimo que tienen las máquinas trifásicas en comparación con las máquinas monofásicas [3].

La energía renovable actualmente es de suma importancia ya que cada vez es más notorio el agotamiento de las reservas de combustibles fósiles. Asimismo, estos combustibles y la energía nuclear no son amigables con el medio ambiente, esto genera una urgencia para ir reemplazando las fuentes de energía tradicional por fuentes de energía renovables. Las energías limpias brindan una tensión de CD, de ahí la importancia de implementar los inversores para la conversión a tensión de CA, para poder transportarla y usar en hogares.

Realizando una búsqueda bibliográfica no se encontró un trabajo que explique a detalle este tipo de relación que existe entre los niveles de tensión de salida en un inversor multinivel monofásico y el número de niveles de tensión de salida en un inversor trifásico. Algunos autores dan por hecho que todas las personas que están relacionadas a los inversores multinivel tienen este conocimiento y evitan dar detalles de cuantos niveles de tensión de salida en un inversor debe tener.

En este trabajo se busca obtener una ecuación matemática que represente el número de niveles de tensión de salida en los inversores multinivel simétricos monofásicos con la salida de los inversores multinivel simétricos trifásicos. Mediante el uso de resultados de simulaciones.

## 2. CONTENIDO

### 2.1 Inversores.

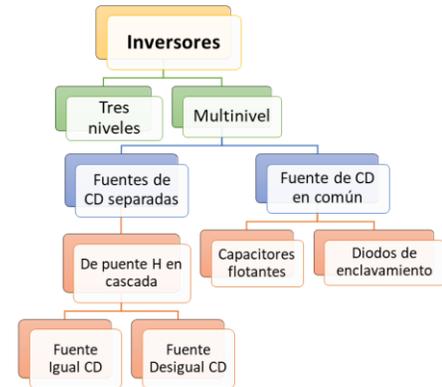
Un inversor, es un dispositivo capaz de convertir un voltaje de corriente directa en corriente alterna. Por tanto, este tipo de convertidor ha tomado relevancia en la actualidad, debido al interés por obtener energías limpias, también denominadas renovables, con el fin de reducir el impacto ecológico. También la necesidad de mayor potencia en la industria, se puede satisfacer mediante el uso de inversores [4]. Existen dos tipos de inversores, los tradicionales y los multiniveles. El primero se ha establecido como la solución industrial estándar

para aplicaciones de baja tensión. Es sencillo y económico, aunque la eficiencia se resiente si la frecuencia de conmutación incrementa debido a las elevadas pérdidas de conmutación, en el multinivel se puede incrementar la frecuencia de conmutación si es necesario sin perder mucha eficiencia [5].

Existen 3 topologías que son más comunes en los inversores multinivel, los cuales son capacitores flotantes, diodos de enclavamiento y el inversor multinivel puente H en cascada. En la Fig. 2 se muestra una clasificación de los inversores en

base a si es multinivel o no y también si son fuentes de CD en común o separadas.

Fig. 1: Clasificación inversores.



Fuente: elaboración propia a partir de [6].

### 2.2 Inversor multinivel puente H en cascada.

El puente H en cascada se ha comercializado con éxito para aplicaciones exigentes de muy alta potencia y calidad de la misma hasta un rango de 30 MVA, debido a su capacidad de expansión en serie. También esta topología se ha utilizado para aplicaciones, un ejemplo de estas aplicaciones serían las siguientes: filtro activo y compensación de potencia reactiva, vehículos eléctricos e híbridos, sistemas de alimentación ininterrumpida para la conversión de energía fotovoltaica y para la obtención de imágenes por resonancia magnética [7].

Este tipo de inversor tiene diferentes ventajas en comparación con las otras dos topologías. A continuación, se describen dichas ventajas [8]:

1. Menor volumen, esto gracias a que consta de menor cantidad de componentes.
2. Produce tensión en modo común, se reduce el estrés.
3. Bajas distorsiones en la corriente de entrada.
4. Funciona a las dos frecuencias fundamentales de conmutación.
5. La distorsión armónica total es muy baja en la forma de onda de salida sin ningún circuito de filtrado.

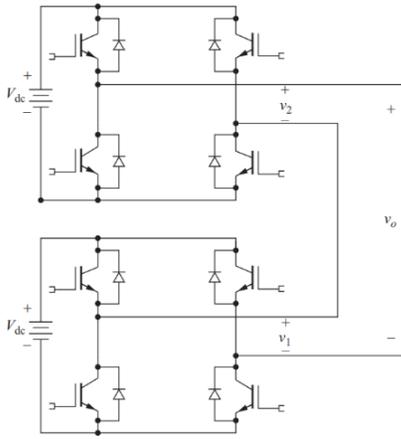
Sin embargo, así como cuenta con ventajas tiene algunas desventajas [6]:

1. Se requieren fuentes de corriente continua o capacitores independientes para cada módulo.
2. Se requiere un controlador más complejo debido a la cantidad de capacitores.

A partir de dos puentes H completos se debe realizar la conexión en cascada que es la que se muestra en la Fig. 7, la cual consiste en sacar del primer puente H el positivo que ira a la carga y el negativo del mismo conectarlo al positivo

del segundo puente H y de este último se obtiene el negativo que va a la carga [9].

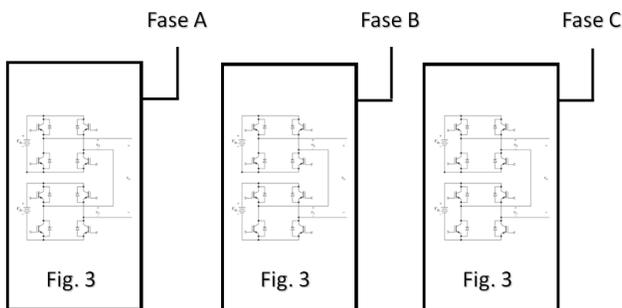
Fig. 2: Ejemplo de conexión en cascada monofásico.



Fuente: *Power electronics* [10].

Gracias al ejemplo de inversor multinivel presentado en la figura anterior, se puede presentar la representación a bloques de un inversor multinivel trifásico, que consta únicamente de la adaptación de tres veces la Fig. 3, desfasados 120 grados uno del otro, es decir, la fase A estará a 0°, la fase B estará 120° con respecto de la fase A y la fase C se coloca a 240°, 120° más con respecto a la fase B. En la Fig. 4 se proporciona una representación a bloques de un inversor multinivel trifásico con las consideraciones antes detalladas.

Fig. 3: Representación a bloques de un inversor multinivel trifásico.



Fuente: elaboración propia a partir de *Power electronics* [10].

### 2.3 Tensión de salida del inversor multinivel en cascada monofásico y trifásico

En los inversores multinivel monofásico el número de niveles en el voltaje de salida está relacionado con el número de puentes completos con los que está compuesto el inversor, es decir, un inversor multinivel de un puente H completo

proporciona 3 niveles, dos puentes H conectados en cascada permiten obtener a la salida 5 niveles, tres brinda 7 niveles y así sucesivamente. Es decir, que cada puente completo te proporciona dos niveles más, su 0+ y 0-, también existe una ecuación que se ha visto en algunos otros artículos [9, 11, 12] para la obtención de niveles de voltaje de salida, en relación con el número de fuentes de CD ya que cada fuente es para un puente H completo. La ecuación es la siguiente [13]:

$$n = 2s + 1 \quad [1]$$

Dónde:

- $n$  = número de niveles de salida
- $s$  = número de fuentes de CD

Sin embargo, es importante obtener una relación entre los niveles que se tienen en un inversor multinivel monofásico y los que se obtienen en un inversor trifásico. En este trabajo se realizó la investigación y simulaciones necesarias para encontrar esta relación.

### 2.4 Parámetros de simulación

En la Fig. 5 se presentan los parámetros para la adecuación de los ángulos de grados a milisegundos, para implementarlos en el tiempo de retraso (*delay*) y así obtener los niveles deseados.

En la Fig. 6 se muestra uno de los esquemáticos implementados para la obtención de resultados, es un inversor monofásico de dos puentes H en cascada con interruptores ideales, el cual proporciona 5 niveles a su salida, también se utilizó ese esquemático únicamente desconectando el segundo puente H en cascada para obtener el de 2 y 3 niveles. En la Tabla 1, se exponen todas las fuentes que se utilizaron en el esquemático del inversor.

Tabla 1: Parámetros de las fuentes de alimentación y conmutación.

Nombre	V1 (V)	V2 (V)	TD (ms)	TR (ns)	TF (ns)	PW (ms)	PER (ms)
V1 (Pulso)	0	15	18m-Ang2	10	10	10	1/fs =20
V2 (CD)	100	-	-	-	-	-	-
V3 (Pulso)	0	15	8m-Ang2	10	10	10	20
V4 (Pulso)	0	15	10m +Ang2	10	10	10	20
V5 (Pulso)	0	15	Ang2	10	10	10	20
V6 (Pulso)	0	15	18m-Ang1	10	10	10	20
V7 (Pulso)	0	15	10m +Ang1	10	10	10	20
V8 (CD)	100	-	-	-	-	-	-
V9 (Pulso)	0	15	8m-Ang1	10	10	10	20
V10 (Pulso)	0	15	Ang1	10	10	10	20

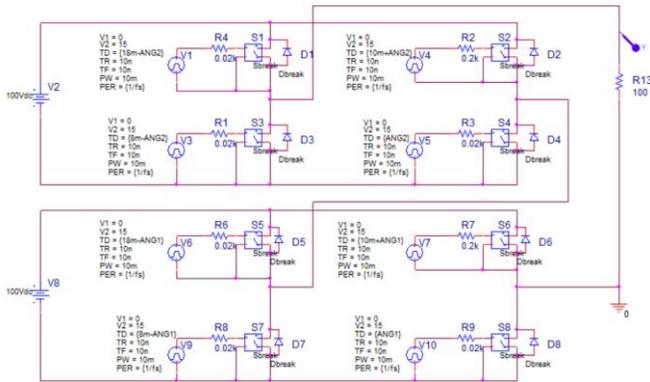
Fig. 4: Ajuste de los ángulos de conmutación.

**PARAMETERS:**  
 ANG1G = 10  
 ANG2G = 25

**PARAMETERS:**  
 ANG1 = {ANG1G\*(10m/180)}  
 ANG2 = {ANG2G\*(10m/180)}  
 fs = 50

Fuente: elaboración propia.

Fig. 5: Diagrama esquemático del inversor multinivel monofásico en cascada empleado



Fuente: elaboración propia.

Es importante añadir que los parámetros y el esquema aplica únicamente para el inversor multinivel monofásico de 5 niveles de tensión, para el trifásico se repite el esquema otras dos veces, ajustando  $120^\circ$  cada una de las fases (desfasando cada una).

## 2.5 Resultados de simulación

Para las siguientes gráficas se utilizó el software PSPICE OrCAD® 17.4-2019, fueron fuentes de voltaje iguales y con una amplitud de 100V cada una. La frecuencia de conmutación (fs) de los interruptores fue de 50Hz.

En la Fig. 7 se muestra un inversor de medio puente monofásico, el cual consta de dos niveles y en la Fig. 8 un inversor de medio puente trifásico, el cual consta de 3 niveles.

Fig. 6: Tensión de salida en un inversor medio puente monofásico.

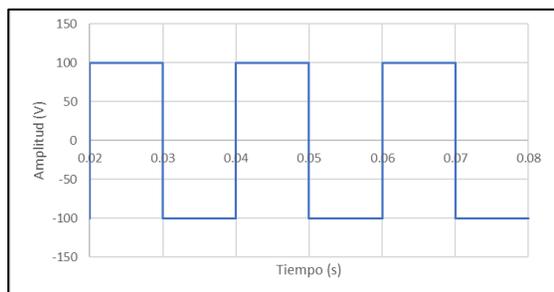
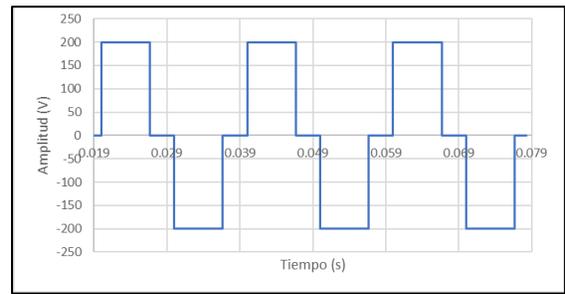


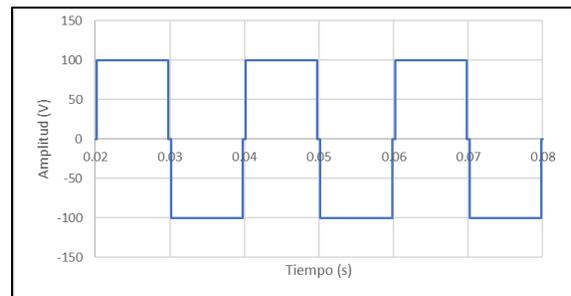
Fig. 7: Tensión de salida en un inversor de medio puente trifásico.



Fuente: elaboración propia

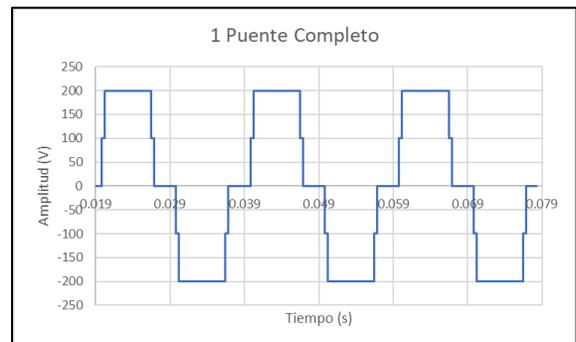
En la Fig. 9 se muestra la señal de la tensión de salida de un inversor monofásico puente H, la cual presenta 3 niveles de tensión (+100, 0, -100). En la Fig. 10 se muestra la señal de la tensión de salida de la misma forma que en la Fig. 3 pero en este caso es un sistema trifásico, el cual brinda 5 niveles de tensión (+200, +100, 0, -100, -200).

Fig. 8: Tensión de salida en un inversor de un puente H monofásico.



Fuente: elaboración propia.

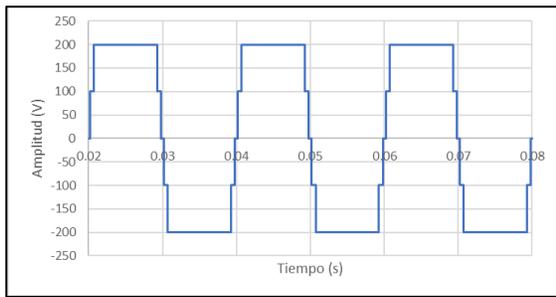
Fig. 9: Tensión de salida en un inversor de un puente H trifásico.



Fuente: elaboración propia.

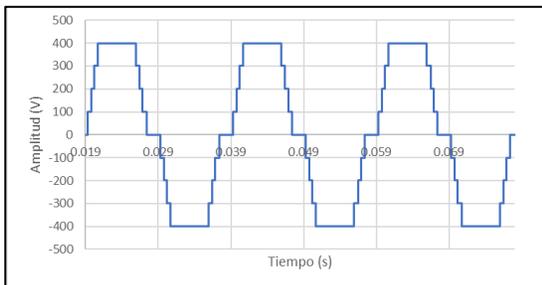
En el caso del inversor monofásico de 5 niveles, el cual se indica la señal de la tensión de salida en la Fig. 11 y permite comparar con la Fig. 12 la diferencia de niveles, la cual es de 4 niveles más en el caso del inversor trifásico de dos puentes H completos.

Fig. 10: Tensión de salida en un inversor de dos puentes H monofásico.



Fuente: elaboración propia

Fig. 11: Tensión de salida en un inversor de dos puentes H trifásico.



Fuente: elaboración propia

## 2.6 Discusión de resultados

Con base a las señales de salida obtenidas se genera la Tabla 2, donde se proporciona los niveles cuando es monofásico y trifásico, de tal manera se puede deducir una ecuación para conocer el número de niveles que debe de haber en un inversor trifásico, en base a los niveles que existen en monofásico.

Tabla 2: Relación del número de niveles.

Número de Puentes H	Número de niveles en monofásico	Número de niveles en trifásico
1/2	2	3
1	3	5
2	5	9
3	7	13
4	9	17

Fuente: elaboración propia

Ecuación para la relación de niveles de monofásico a trifásico es:

$$n_{3\phi} = 2n - 1 \quad [2]$$

Dónde:

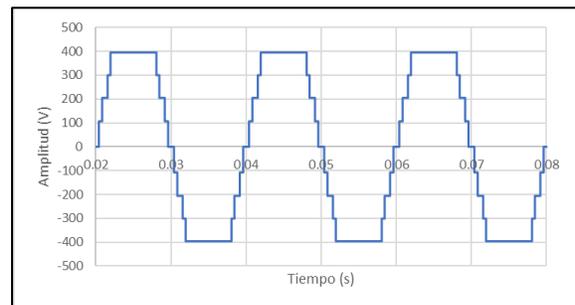
- $n$  = número de niveles en modo monofásico
- $n_{3\phi}$  = número de niveles en modo trifásico

Por ejemplo, un inversor monofásico de 9 niveles:

$$n_{3\phi} = 2(9) - 1 = 18 - 1 = 17 \text{ niveles}$$

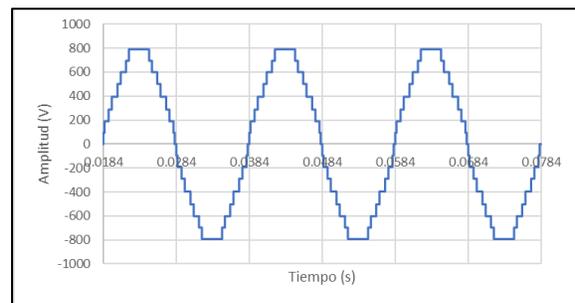
Para comprobar este ejemplo se realizó la simulación de un inversor monofásico de 4 puentes completos en cascada y se obtuvo la Fig. 13 tiene nueve niveles (+400, +300, +200, +100, 0, -100, -200, -300, -400) y la Fig. 14 que se muestran a continuación se tienen 17 niveles (+800, +700, +600, +500, +400, +300, +200, +100, 0, -100, -200, -300, -400, -500, -600, -700, -800).

Fig. 12: Tensión de salida en un inversor de cuatro puentes H monofásico.



Fuente: elaboración propia

Fig. 13: Tensión de salida en un inversor de cuatro puentes H trifásico.



Fuente: elaboración propia

Después de observar este ejemplo y las gráficas obtenidas, se puede comprobar que al aplicar la ecuación se obtiene el número de niveles a la salida de un inversor trifásico.

## 3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La ecuación matemática Ec. [2] fue obtenida y comprobada mediante el análisis de diversas simulaciones realizadas, con la finalidad de obtener esa relación que se requería entre cada uno de los sistemas, es decir, de monofásico a trifásico, fue necesaria la simulación de varios inversores multinivel,

ya que dependiendo del número de puentes H completos, es el número de niveles obtenidos a la salida. Estas simulaciones permitieron sintetizar la información en una tabla que relacionara cada tipo de inversor para lograr identificarlo como monofásico o trifásico, y así formular una ecuación matemática que represente esta relación.

Con la finalidad de reproducir los resultados y gráficos mostrados en este artículo, se recomienda al lector realizar la simulación y colocar los datos señalados para que logre generar un análisis propio, y que aprenda a identificar en otros artículos los datos y gráficos para deducir de qué tipo de inversor multinivel se trata.

### 3.1 Observaciones generales

Este trabajo surge debido a la necesidad detectada en los artículos de inversores multinivel, en la mayoría de los artículos publicados los autores asumen que el lector promedio tiene los conocimientos sobre la relación de niveles en los inversores multinivel, o bien no especifican si son sistemas trifásicos o monofásicos, a partir de este análisis y la ecuación obtenida se puede deducir con que tipo de sistema se está trabajando en los artículos o incluso a partir de los gráficos de simulación se puede identificar el tipo de sistema.

## 4. REFERENCIAS

- [1] B. G. FERMIN, *Sistemas de energía eléctrica*. Editorial Paraninfo, 2004.
- [2] (2019). *Balance Nacional de Energía*.
- [3] J. R. R. Polo, *Circuitos eléctricos monofásicos y trifásicos. Fundamentos teóricos y ejercicios resueltos*. Universitat de Lleida, 2000.
- [4] E. Barcenas, "Análisis y desarrollo de un inversor multinivel," Tesis de maestría, CENIDET, 2002.
- [5] M. Schweizer, T. Friedli, and J. W. Kolar, "Comparative evaluation of advanced three-phase three-level inverter/converter topologies against two-level systems," *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 60, no. 12, pp. 5515-5527, 2012.
- [6] M. A. Memon, S. Mekhilef, M. Mubin, and M. J. R. Aamir, "Selective harmonic elimination in inverters using bio-inspired intelligent algorithms for renewable energy conversion applications: A review," *Renewable Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 2235-2253, 2018.
- [7] L. G. Franquelo, J. Rodriguez, J. I. Leon, S. Kouro, R. Portillo, and M. A. Prats, "The age of multilevel converters arrives," *IEEE industrial electronics magazine*, vol. 2, no. 2, pp. 28-39, 2008.
- [8] R. A. Krishna and L. P. Suresh, "A brief review on multi level inverter topologies," in *2016 international conference on circuit, power and computing technologies (ICCPCT)*, 2016, pp. 1-6: IEEE.
- [9] V. J. Manohar and P. Jyothi, "TLBO based Selection of Optimal Switching angles in SHE Control of CMLI with Unequal DC sources," in *2018 2nd International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud)(I-SMAC) I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud)(I-SMAC), 2018 2nd International Conference on*, 2018, pp. 393-398: IEEE.
- [10] D. W. Hart, *Power electronics*. Tata McGraw-Hill Education, 2011.
- [11] K. Haghdar, "Optimal DC source influence on selective harmonic elimination in multilevel inverters using teaching-learning-based optimization," vol. 67, no. 2, pp. 942-949, 2019.
- [12] J. Olamaei and M. Karimi, "Total harmonic distortion minimisation in multilevel inverters using the teaching-learning-based optimisation algorithm," *International Journal of Ambient Energy*, vol. 39, no. 3, pp. 264-269, 2018.
- [13] R. Vargas, A. Figueroa, S. DeLeon, J. Aguayo, L. Hernandez, and M. Rodriguez, "Analysis of minimum modulation for the 9-level multilevel inverter in asymmetric structure," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no. 9, pp. 2851-2858, 2015.